

المرجع في

# محولات القوى الكهربائية

2019

أ.د. محمود جيلاني

كلية الهندسة - جامعة القاهرة

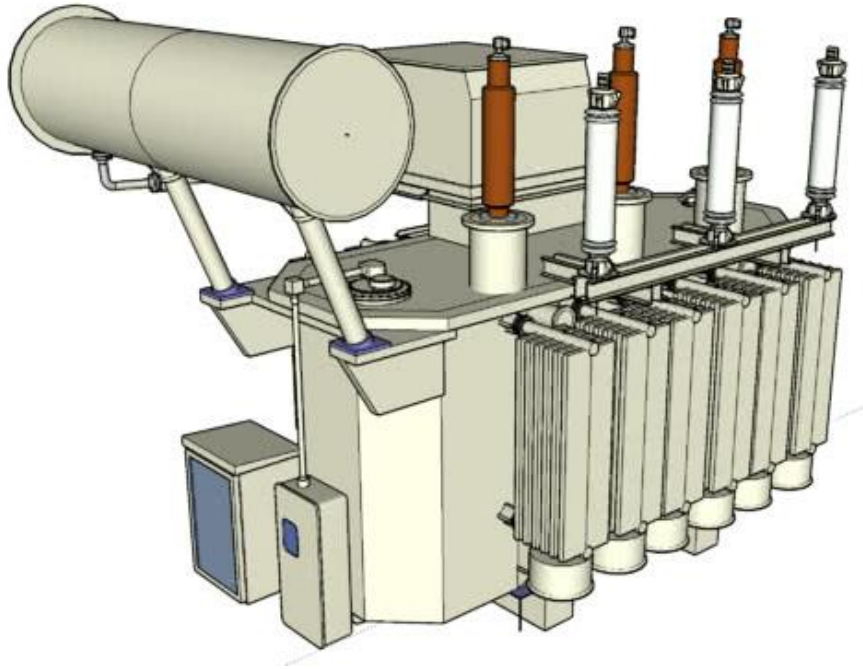


**لمتابعة التحديثات و الإستفسارات الخاصة بهذا الكتاب  
يرجى متابعة الموقع الخاص بي**

**[www.drgilany.com](http://www.drgilany.com)**

# المرجع في محولات القوى الكهربائية

## 2019



أ.د. محمود جيلانى

الأستاذ بكلية الهندسة – جامعة القاهرة

[drgilany@gmail.com](mailto:drgilany@gmail.com)

حقوق الطبع محفوظة للمؤلف

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



اللهم لك الحمد كله ، ولك الملك كله ، وبيدك الخير كله ، وإليك يرجع الأمر كله ، اللهم صل على محمد خاتم أنبيائك ورسلك. اللهم إني أبرأ من الثقة إلا بك. ومن الأمل إلا فيك ، ومن التسليم إلا لك ، ومن التفويض إلا إليك ، ومن التوكل إلا عليك ، ومن الرضا إلا عنك ، ومن الطلب إلا منك ، ومن الرجاء إلا فيك ، اللهم تتابع على برك ، واتصل خيرك ، وكمل عطائك ، وعمت فواضلك ، وتمت نوافلك ، فاللهم أحسن ختامنا يا أرحم الراحمين.





هذا الكتاب

# وقفٌ بـِدي تعالى

﴿ رَبَّنَا تَقَبَّلْ مِنَّا إِنَّكَ أَنْتَ السَّمِيعُ الْعَلِيمُ  
رَبَّنَا وَاجْعَلْنَا مُسْلِمِينَ لَكَ وَمِنْ ذُرِّيَّتِنَا أُمَّةً مُسْلِمَةً لَكَ وَأَرِنَا مَنَاسِكَنَا وَتُبْ  
عَلَيْنَا إِنَّكَ أَنْتَ التَّوَّابُ الرَّحِيمُ ﴾

قَالَ رَسُولُ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ  
إِذَا مَاتَ الْإِنْسَانُ انْقَطَعَ عَنْهُ عَمَلُهُ إِلَّا مِنْ ثَلَاثَةٍ: إِلَّا مِنْ صَدَقَةٍ جَارِيَةٍ، أَوْ عِلْمٍ يُنْتَفَعُ  
بِهِ، أَوْ وَلَدٍ صَالِحٍ يَدْعُو لَهُ.

أ. د. محمود جيلاني

زهراء المعادي - 2019 .

للتواصل مع المؤلف:

[drgilany@gmail.com](mailto:drgilany@gmail.com)

## مقدمة

2019

صدر هذا الكتاب في نسخته الأولى سنة 2013، ولم يكن الهدف منه في البداية أن يكون كتاباً عن المحولات ، بل كنت قد بدأت في كتابة كتاب عن محطات التحويل الرئيسية Substations ، وبدأت بالفعل في تجميع المادة العلمية المطلوبة ، وأثناء الكتابة عن المحول كأحد العناصر الأساسية - بل هو العنصر الأساسي في المحطة - وجدت أن المادة العلمية الخاصة بالمحول تكبر حتى لم تعد تصلح أن تكون فصلاً ولا باباً في كتاب ، بل تحولت إلى كتاب مفصل عن محولات القوى في الـ Substations. واليوم أقدم للقارئ المهتم نسخة 2019. وبالطبع سيكون السؤال الأول هو:

## ما الجديد في نسخة 2019؟

تعتبر الإضافات والتعديلات في هذه النسخة هي الأقل بين الإضافات في بقية الكتب الأربعة ، وذلك بسبب أهمية المحول!!.

نعم ، فبسبب أهمية المحول فقد تعاملنا معه بتفاصيل مختلفة في كافة الكتب الثلاث (نظم الحماية ، هندسة القوى ، المرجع في التركيبات) وكانت هناك إضافات وتحسينات عديدة في المواضع التي تعاملنا فيها مع المحول ، وقد وجدت أن نقلها إلى هنا سيكون تكراراً لما سبق ، ومن هنا لم تظهر غضافات كثيرة في هذه النسخة اللهم سوى الأمثلة المحلولة.

فأبرز الإضافات في هذه النسخة هي إضافة العديد من الأمثلة المحلولة في معظم الفصول ومعظمها منقولة من كتاب Theraja وهو الكتاب الأشهر لطلبة السنوات الأولى في قسم القوى الكهربائية ، كما أضيفت بعض التوضيحات على اختبارات المحول في الفصل الرابع عشر ، بالإضافة بالطبع إلى تغيير شكل العرض في الكتاب ليتشابه مع بقية الكتب الأخرى.

وأضيف كذلك ملحق أسئلة وأجوبة باللغة الإنجليزية FAQ أرسله لي أحد المتابعين وقد اخترت منه الأسئلة التي تعرض الكتاب لها ووضعتها في الملحق الخامس.



نقلا من مقدمة الطبعة الأولى لهذا الكتاب:

## أهمية هذا الكتاب

هذا الكتاب أحسبه يسد ثغرة في المكتبة العربية الخاصة بكتب الهندسة الكهربائية ، فهناك العديد من الكتب التي تشرح عمل المحول كواحد من الآلات الكهربائية ، أى من وجهة نظر الـ Machine Design ، لكن المكتبة العربية - فيما أعلم - فيها القليل جدا من الكتب التي تتعامل مع المحولات الكهربائية كعنصر من عناصر منظومة القوى Power System ، وكعنصر رئيسي في محطات التحويل Substations ، و هذا هو الجديد الذي يقدمه هذا الكتاب ، فهو يعرض موضوعات محولات القوى من وجهة نظر مهندس يعمل في محطة محولات Substation ، بالإضافة إلى شرح وتلخيص (وليس تفصيل) وجهة نظر أستاذ الآلات الكهربائية.

## لغة الكتاب

كمثل سابقه (كتاب نظم الحماية الكهربائية ، وكتاب المرجع في التركيبات الكهربائية) فإن لغة الكتاب هي العربية ، مع المحافظة على المصطلحات الإنجليزية. ويزداد يقينى مع الوقت أننا بحاجة إلى موجة من التأليف والترجمة باللغة العربية ، لأننا في الواقع نفهم بها أسرع وأدق ، وتعطى مجالا للمهندس أن يفكر بثقة فيما يقرأ ، وأن يطور فهمه بعد ذلك إلى إبداعات وتحسينات.

## لن هذا الكتاب

سيستفيد من هذا الكتاب إن شاء الله مهندسو الكهرباء حديثو التخرج في الدرجة الأولى ، وسيستفيد منه أيضا الطلاب في سنوات البكالوريوس وذلك في فهم العديد من مشاكل المحولات العملية بصورة ميسرة ، لكن أنبه الطلاب الذين يدرسون مقررا عن المحولات الكهربائية أنهم لن يجدوا في الكتاب مسائل محلولة كثيرة مثل الكتب العادية (زادت كمية الأمثلة المحولة بصورة ملحوظة في نسخة 2019) ، فأنصحهم أن يستكملوا هذا النقص في الكتاب بأن يستعينوا - بالإضافة لهذا الكتاب - بكتاب آخر من الكتب التي تهتم بحل المسائل ، وذلك كما قلت إذا كان الطالب يدرس مقررا عن المحولات.

## وأخيرا

فهذا الكتاب هو الثالث في سلسلة الكتب التي أردت أن تكون وقفا علميا لله تعالى ، تطبيقا لحديث رسول الله صلى الله عليه وسلم: " إذا مات ابن آدم انقطع عمله إلا من ثلاث : صدقة جارية ، أو علم ينتفع به ، أو ولد صالح يدعو له".

زهراء المعادى

2019

# شكرو تقدير

لله الحمد أولا وآخرا ، ثم أجدنى مدفوعا لأن أتوجه بالشكر لأول أستاذ درس لى المحولات الكهربائية ، وللأسف توفى منذ أكثر من عشر سنوات ، فرحمة الله على الأستاذ الدكتور سراج أبو شادى أستاذ الآلات الكهربائية بكلية الهندسة جامعة القاهرة.

وخالص شكرى لزملائى الذين ساهموا فى مراجعة هذا الكتاب وأعطوه من وقتهم رغم مشاغلهم الكثيرة ، وأخص بالذكر المهندس الكبير رباح فارس من دولة العراق الشقيق ، وزملائى المصريين المميزين م. سيد سعد ، و م. محمود بدر . كما أخص بالذكر أيضا أ.د. دعاء خليل التى راجعت جميع فصول الكتاب. وأخيرا ، فهذا الكتاب يحسب لعائلتى الصغيرة : أولادى نائلة ، ويحىى ، ويوسف ، وزوجتى د. أسماء زيادة.

# المقدمة

يعتبر المحول أكثر عناصر الشبكة الكهربائية إنتشاراً وتنوعاً في أشكاله وأحجامه ووظائفه . فالشبكة الكهربائية بها العشرات من المولدات ، لكنها تحتوي على عشرات الآلاف من المحولات ، وبالطبع لا ينافس في هذا الانتشار الواسع داخل منظومة القوى الكهربائية سوى الكابلات والخطوط الهوائية ، إلا أن التنوع في حجم وشكل ووظيفة المحولات يجعل دراسة المحولات الكهربائية الأكثر أهمية بين عناصر منظومة القوى الكهربائية.

والطريف أن كثيراً من الدارسين ربما يختلط عليه وظيفة المحول ووظيفة المولد ، لكثرة ما يسمع من أن تغذية المبنى الفلاني تأتي من المحول هذا أو ذاك ، حتى يظن البعض أن المحول هو مصدر الطاقة الكهربائية ، وبالطبع هذا خطأ فالمحولات ليست إلا عنصر ناقل للطاقة الكهربائية فقط وليس منتجا لها ، فالمولد هو المنتج الوحيد للطاقة.

## نبذة تاريخية عن المحولات

كان فارداي أول من اكتشف في عام 1831 ظاهرة الحث المتبادل Mutual Induction بين ملفين منفصلين ومتواجدين على قلب مصنوع من مادة مغناطيسية ، وقام بقياس القوة الدافعة الكهربائية ( Electric Motive Force ) عملياً في أحد الملفين نتيجة تغير التيار في الملف الآخر . ثم ظهرت لأول مرة في عام 1882 محولات مصنعة من ملف ابتدائي واحد وعدة ملفات ثانوية بغرض الحصول على قيم مختلفة للجهود الثانوية .

وقد كان ظهور المحولات ذات القلب المغناطيسي magnetic core عام 1884 هو بداية لاستخدام المحولات في تحويل الطاقة الكهربائية إلى جهود عالية ، ونقلها لمسافات بعيدة . وكان أول من قام بهذه الخطوة الأخوان جون وإدوارد هوبكنسون ، حيث قاما بصنع محول بسيط قلبه مصنوع من صفائح فولاذية معزولة ، ومن ملفين أحدهما للجهود المنخفض والآخر للجهود العالي.

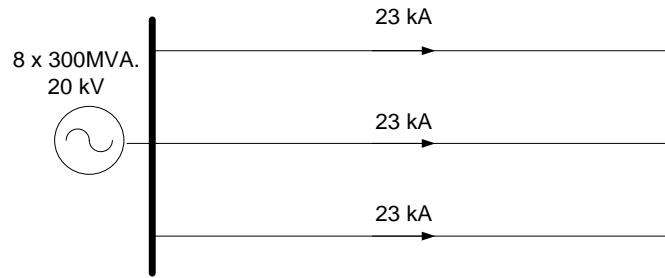
وبعدها جاء العالم المجرى "ويري" الذي كان أول من أطلق اسم المحول (Transformer) على هذه الأجهزة ، وابتكر فيما بعد فكرة توصيل المحولات على التوازي . أما بالنسبة للمحولات الثلاثية فقد كان العالم الروسي (دوليف دوبروفولسكي) أول من اخترع المحول الثلاثي في عام 1889.

## لماذا هذا الانتشار الواسع للمحولات في الشبكات الكهربائية؟

للإجابة عن هذا السؤال علينا أولاً تذكر الدور الأساسي للمحولات الكهربائية ، وهو خفض قيمة التيار المنقول عبر الخطوط و الكابلات ومن ثم تقليل المفقود من الطاقة ، وتيسير نقل القدرة الكهربائية بصورة عملية من مناطق التوليد إلى مناطق الاستهلاك.

ولتوضيح ذلك ، نفرض أن محطة لإنتاج الطاقة الكهربائية بها 8 مولدات قدرة كل مولد 300 MVA ، وأن جهد التوليد هو 20 kV ، ونريد نقل هذه الطاقة من محطة التوليد عبر ثلاثة خطوط إلى مناطق الاستهلاك ، ففي هذه الحالة ستصبح الشبكة كما في الشكل-1 . وسيكون قيمة التيار عبر كل خط من الخطوط الثلاثة - بفرض أنهم متماثلين- يساوى 23kA طبقاً للمعادلة :

$$I_{PER LINE} = \frac{8 \times 300 \times 10^6}{3(\sqrt{3} \times 20 \times 10^3)} = 23kA$$

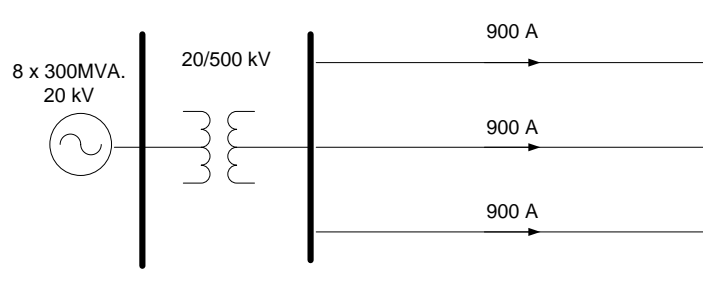


شكل -1 : شبكة نقل بدون محولات

فإذا علمت أن الموصل النحاسي الذي مقطعه 300 mm<sup>2</sup> يستطيع تحمل تيار قدرة 400 أمبير تقريباً ، فهذا يعني أننا نحتاج إلى ما يقرب من 60 كابل من هذا المقطع موصلين على التوازي لنقل هذه الكمية من التيار الكهربائي عبر كل خط من الخطوط الثلاثة (180 كابل لنقل كل الطاقة) ، وهذا بالطبع رقم غير عملي ، ويجب إيجاد حل لهذه المشكلة.

والحل في استخدام المحول ، فإذا فرضنا أننا أضفنا للشبكة - بعد المولد مباشرة - محول Step up جهده 20/500 kV لرفع الجهد على شبكة النقل لتصبح الشبكة كما في الشكل-2





شكل -2 : شبكة النقل بعد إضافة المحولات

الآن ، بعد أن أصبح جهد النقل يساوى 500 kV بدلا من 20 kV فإن التيار المطلوب نقله من المحطة عبر كل خط من الخطوط الثلاثة سيساوى 900 أمبير فقط بدلا من 23 kA كما فى المعادلة

$$I_{PER LINE} = \frac{8 \times 300 \times 10^6}{3(\sqrt{3} \times 500 \times 10^3)} = 900 A$$

وهذا يعنى أننا نحتاج إلى 3 كابلات فقط فى كل خط بدلا من 60 كابل فى كل خط.

## مزايا أخرى للمحولات

يمكن أن نقول أن الميزة الأهم والأساس للمحولات فى منظومة القوى الكهربائية هى خفض قيمة التيار المنقول عبر الخطوط و الكابلات ، ولكن هذه الميزة يترتب عليها مزايا أخرى منها:

**1- تقليل القدرة المفقودة أثناء نقل الطاقة الكهربائية :** وهذه هى الميزة الأولى المترتبة على خفض قيمة التيار، ففي المثال السابق لو فرضنا جدلاً أنه يمكن نقل الطاقة المولدة بدون استخدام محولات الـ Step-up الذى ذكرناها ، وذلك عبر الخطوط الثلاثة التى مقاومة كل خط منها 0.001 Ω/km فى كل phase ، وفرضا أن مسافة النقل تصل إلى 100 km ، فهذا يعنى أنه فى حال عدم وجود المحول فإن القدرة المفقودة فى الخطوط الثلاثة تساوى 476 MW طبقاً للمعادلة :

$$P_{Loss} = 3 \times (3 \times I^2 \times R) = 3 \times (3 \times 23000^2) \times (0.001 \times 100) = 476 MW$$

أى أننا فقدنا فى خطوط النقل ما يقرب من 20% من الطاقة المولدة ، بينما إذا تم استخدام المحول فتصبح القدرة المفقودة عبر النقل فى الخطوط الثلاثة تساوى أقل من 1 MW . وهذا يعطى مؤشر آخر على أهمية استخدام المحولات فى الشبكة الكهربائية.

**2- خفض قيمة الهبوط فى الجهد :** الميزة الثانية المترتبة على خفض قيمة التيار عبر خطوط النقل هى خفض قيمة الهبوط فى الجهد ، فمعلوم أن الجهد عند نقطة الوصول Receiving point يساوى جهد الـ Sending Voltage مطروحا منه الـ Voltage drop وقيمته تساوى رياضياً ( I . X ) -

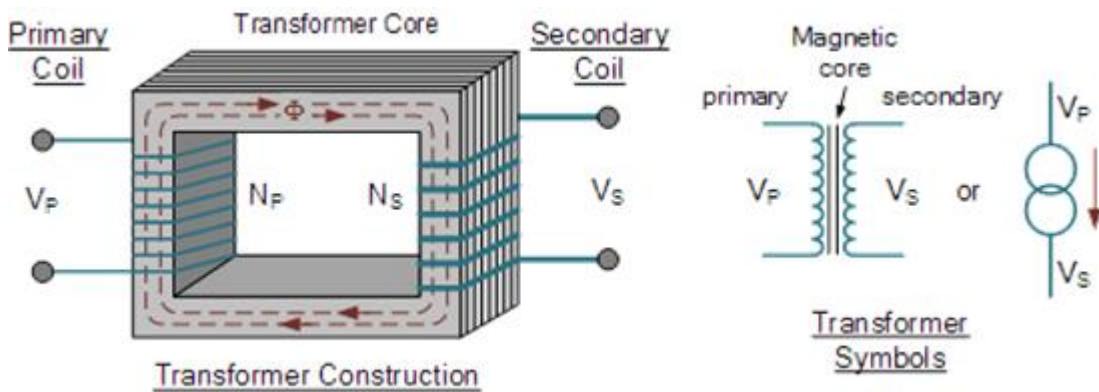
وذلك بإهمال قيمة المقاومة  $R$  - ومن ثم فكلما زاد التيار المار في الخط كلما زادت نسبة الهبوط في الجهد .

3- تقليل تكلفة خطوط النقل وأبراج القوى الكهربائية : الميزة الثالثة المترتبة على خفض قيمة التيار المنقول هي استخدام موصلات عددها أقل ، وهذا يعني تكلفة أقل في سعر الموصلات ، وفي أحجام الأبراج التي تحمل هذه الموصلات.

## نبذة عن التركيب

المحول الكهربائي في أبسط صورته كما في الشكل 3- هو عبارة عن قلب حديدي (Iron Core) ملفوف على جانبيه ملفين ، الأول يسمى بالـ

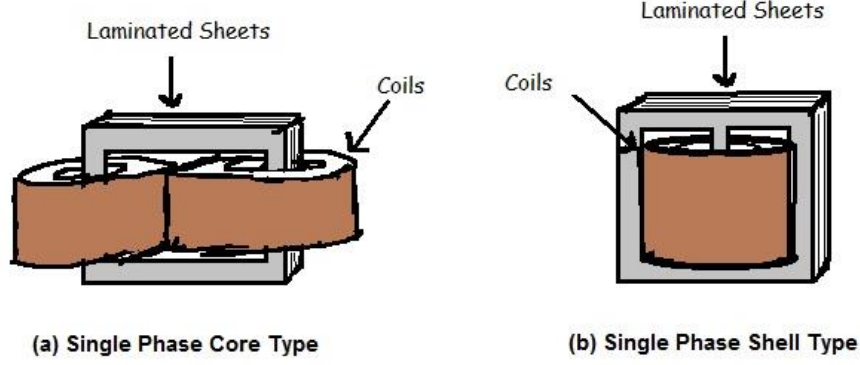
(Primary winding) ، وهو الملف المتصل بمصدر الطاقة ، ويتكون من عدد من اللفات  $N_P$  Turns ، بينما يتصل الثاني بالحمل المراد نقل الطاقة إليه ويسمى الـ Secondary Winding ، ويتكون من عدد آخر من اللفات  $N_S$  Turns ، والاتصال بالحمل يمكن أن يكون مباشرة على أطراف الثانوي ، أو من خلال خطوط نقل.



شكل 3- : المحول في أبسط صورة

ومن ثم يمكن أن نقول أن العنصرين الأساسيين في تركيب المحول هما القلب الحديدي Core ، والملفات windings.

أما العنصر الأول (Core) فيصنع من مواد حديدية لها خواص مغناطيسية جيدة . ويوجد أسلوبان في الصناعة لتصنيع القلب ، هما الـ Core type ، والإسلوب الآخر هو الـ Shell type ، كما في الشكل-4 . علماً بأن كل نوع منهما يمكن أن يستخدم مع محولات الـ Single phase (1-Φ) ، أو محولات الـ Three phase (3-Φ) ، كما سيتم شرحه تفصيلاً في الباب الثاني.



شكل-4 : نوعى القلب فى المحولات الأحادية

أما العنصر الثاني في المحولات الكهربائية وهو الـ windings فهي تصنع من موصلات كهربية جيدة التوصيل (غالباً النحاس) ذات مقاطع تتناسب وشدة التيار الذى ستحملة ، وتلف حول القلب الحديدي بأشكال متنوعة ، وتكون هذه windings معزولة عن بعضها البعض ، ومعزولة أيضاً عن القلب الحديدي core ، بل أن الطبقات المختلفة في الـ winding الواحد تكون أيضاً معزولة عن بعضها ، كما سيتم دراسته تفصيلاً لاحقاً في الباب الثانى.

## تصنيفات المحولات

للمحولات أنواع متعددة من حيث الحجم و الوظيفة و الشكل و غيره . و يمكن تقسيم المحولات الكهربائية إلى تصنيفات متعددة ، منها على سبيل المثال التصنيف حسب مجال الاستخدام . وهذه قائمة ببعض الاستخدامات الأكثر شيوعاً:

### التصنيف حسب مجال الاستخدام :

- Power Tr. for Transmission networks,
- Distribution Tr. For distribution networks,
- Power supply,
- Impedance matching,
- Circuit isolation;
- Rectifier,
- Arc furnace.

وتتفاوت أحجام وأوزان المحولات أيضاً بشدة ، فالنوع الأول في المجموعة السابقة يمكن أن تصل أبعاده إلى 10 أمتار سواء في الطول أو العرض أو الارتفاع ، أما وزنه فيقاس بعشرات الأطنان ، بينما يصل الحجم في النوع الثالث من نفس المجموعة إلى عدة سنتيمترات ، والوزن لا يتجاوز عشرات الجرامات ،

فشاحن التلفون المحمول مثلا ليس إلا محول صغير من النوع الثالث والذي يتميز باستخدامه في تطبيقات الجهد المنخفض.

و في هذا الكتاب سيكون التركيز على النوعين الأول والثاني فقط والتي تسمى بمحولات القوى والتوزيع (وهما في الواقع يمكن أن يعتبرا نوعا واحدا كما سنرى) . وهذان النوعان لهما تصنيفاتهما المتعددة أيضا والتي منها:

#### التصنيف حسب عدد الـ Phases .

- a. Single-phase •
- b. 3-phase Transformers •

#### التصنيف حسب طريقة التبريد

- a. Self-air-cooled (dry type) •
- b. Air-blast-cooled (dry type) •
- c. Liquid-immersed, self-cooled •
- d. Oil-immersed, combination self-cooled and air-blast •
- e. Oil-immersed, water-cooled •
- f. Oil-immersed, forced-oil-cooled •
- g. Oil-immersed, combination self-cooled and water-cooled •

مع ملاحظة أن التبريد بالماء يقصد به تبريد الأجزاء الخارجية فقط وذلك عقب حدوث قصر شديد في الملفات أو في القلب .

#### التصنيف حسب نسبة التحويل

- Step-up, المحول الرافع للجهد الخافض للتيار •
- Step-down, المحول الخافض للجهد الرافع للتيار •

#### التصنيف حسب تردد التشغيل:

1. Very low frequency Transformer “Power and Distribution Tr.”
2. High frequency Transformer
3. Intermited frequency Transformer
4. Very High frequency Transformer,

الأنواع الثلاثة الأخيرة تستخدم في أجهزة الاتصالات و أجهزة التحكم و مصادر التغذية الإلكترونية ، و هي تمتاز بصغر حجمها نظرا لأن قلوبها تصنع من مواد أخف كثافة من الحديد و ذات نفاذية مغناطيسية عالية. Permeability

وحتى داخل النوع الواحد في التصنيفات السابقة يمكن أن تجد هناك تصنيفات إضافية ، فعلى سبيل المثال المحولات الثلاثية الأوجه 3-phase Transformers يمكن تصنيفها حسب طريقة توصيل الملفات الثلاثية في كل جانب من جانبي المحول ، فيمكن أن تكون على شكل Delta, Star, Zigzag, إلخ كما سيتم دراسته تفصيلا.

كما أن القلب الحديدي Core يمكن أن يصنف إما Core Type أو Shell Type . وكذلك فإن ملفات الـ Secondary يمكن أن تكون ملف ذو مأخذ واحد Single Output Voltage أو يكون ملف واحد متعدد المآخذ Multi output ، وربما يكون هناك أيضا أكثر من ملف في الثانوى Tertiary Winding . والخلاصة أن هناك تصنيفات تفصيلية عديدة للمحولات.

## مجالات استخدام محولات القوى داخل محطات التوليد

مجال استخدام محولات القوى التي هي محل الدراسة في هذا الكتاب متنوعة حتى داخل محطة القوى الكهربائية الواحدة ، فداخل محطة التوليد غرب القاهرة مثلا سنجد هناك المحولات المتصلة مباشرة بالمولدات لرفع الجهد قبل الدخول على شبكة النقل والمعروفة بـ Generator Step up TR ، وهي محولات زيتية تقدر قدرة المحول الواحد بـ 400 MVA ، وترفع الجهد من 20 kV إلى 220 kV ، وهذا المحول مزود بثلاث مضخات لتحريك الزيت - ورابعة احتياطية - تعمل إذا وصلت درجة الحرارة لأول Set point ، فإذا تجاوزت الحرارة الـ Set point الثانية فستقوم 37 مروحة مركبة على الريدياتر بالعمل أتوماتيكيا.

ثم هناك الـ Unit Auxiliary Tr وهو محول بقدرة 32 MVA يخفض جهد التوليد من 20 kV في ملفه الابتدائي إلى حوالي 6.3 kV في ملفين للثانوى مركبين فيه قدرة كل واحد منهما 16 MVA ، بغرض تشغيل المعدات الخاصة بوحدة التوليد والتي تعمل على هذا الجهد. وهو مزود بأربعة مراوح.

وهناك نوع ثالث وهو الـ Start Up TR ، وهو محول بقدرة 50 MVA وجهد 220 kV في الابتدائي ، وله ملفين في الثانوى قدرة كل واحد منهما 25 MVA وبجهد 6.3 kV ، وهو مزود بثمانية مراوح. وهذا المحول متصل مباشرة بالشبكة الموحدة ، و يمكن من خلاله الحصول على تغذية الأحمال الكهربائية للمحطة في حالة حدوث فصل للمولد أو في حالة الـ Start Up .

وهناك محول الطوارئ Emergency Tr الذى يستخدم في حالات الـ Black-out ، حيث تحتاج جميع محطات التوليد لمصدر أولي لتشغيل التربينات تمهيدا لإعادة التشغيل ، و هذا المصدر غالبا يكون مولد

ديزل ضخ موجود في واحدة من المحطات الرئيسية التي تنقل طاقتها إلى الشبكة العامة ، مع ضرورة فصل كافة الأحمال الأخرى باستثناء الأجزاء الميكانيكية في المحطات الأخرى التي ستحصل على الطاقة اللازمة لها لإعادة التشغيل من خلال محول الـ Start Up Tr. وفي محطة غرب يوجد محول طوارئ بقدرة 40 MVA وجهد ابتدائي KV 11.5 وهو جهد المولد الديزل الموجود ، ويخفضه إلى KV 6.3 في ملفين بالثانوى قدرة كل واحد منهما 20 MVA . وهو مزود بستة مراوح.

أما خارج محطات التوليد فالاستخدام الأساسي هو في محطات التحويل Substations ومحطات التوزيع Distributors أو الموزعات . و هذه الأنواع جميعا لا تختلف عن بعضها سوى في الحجم و الوظيفة ، أما التركيب الداخلي لها فمتشابه تماما تقريبا.

### هل يصلح نفس المحول لرفع أو خفض أى جهد؟

المحول كما ذكرنا هو جهاز مهمته الأساسية رفع أو خفض قيمة الجهد الداخل عليه ، ومن ثم سينخفض أو يرتفع التيار الخارج منه ، وإذا فرضنا أن الـ Losses في المحول مهملة (كفاءة المحول عادة تدور حول 99%) و بفرض أن معامل القدرة (  $\cos \phi = 1$  ) فهذا يعنى تقريبا أن :

$$\text{Power} = V_{in} \times I_{in} = V_{out} \times I_{out}$$

فهل يعنى ذلك أنه إذا كان لدينا مثلا محول 100 kVA فإنه من الممكن أن توصل عليه أى جهد فيعطيك أى تيار طالما أن حاصل ضربها معا سيساوي 100 kVA؟

بالطبع هذا الكلام صحيح نظريا فقط. أما عمليا فعليك أن تلتزم بقيمتي  $V_{RATED}$  ، و قيمة الـ  $I_{rated}$  لأنك لو وضعت جهد فى الـ Primary قدره 100 V فإنك نظريا ستحصل على تيار قدرة 1 kA وهذا يستلزم أن يكون مقطع الموصلات المستخدمة فى صناعة ملف الابتدائى قادرة على تحمل هذا التيار وهذا مستحيل ، ولذا فالمفاهيم النظرية لا تطبق هنا عمليا بشكل مثالي أو نموذجي.

### هل هناك فرق بين POWER TR وبين الـ DISTRIBUTION TR ؟

محول التوزيع يعمل على أحمال مختلفة ، ومن الممكن أن يعمل لمدة كبيرة عند اللاحمل ، أما محول القدرة فهو يعمل عند الحمل الكامل بصفة مستمرة ، و نادرا ما يعمل عند أحمال نسبتها أقل من 60 % من الحمل الكامل ، لذا يراعى عند التصميم أن تكون مفايد اللاحمل فى محول التوزيع أقل ما يمكن.

ويمكن أن نقول أن الفرق الأبرز بينهما هو في الحجم والقدرة المنقولة عبر أي منهما ، لكن فيما سوى ذلك فالتركيب الداخلي واحد . ومواصفات الـ IEC مثلا لا تفرق بينهما و تعتبر أن الإسمين مترادفين ومن ثم فعند الحديث عن التركيب والتبريد والاختبارات والصيانة فالكلام ينطبق على النوعين دون تفرقة.

إلا أن بعض المراجع تعتبر أن المحولات ذات قدرة أقل من 500 kVA هي محولات توزيع ، والمحولات ذات القدرة الأعلى من ذلك هي محولات قوى. وفي التصنيف الأمريكي يسمى الجميع power transformers ، ثم يتم تصنيف محولات القوى إلى ثلاث مجموعات حسب القدرة المقننة :

1. Small power transformers: 500 kVA to 7500 kVA

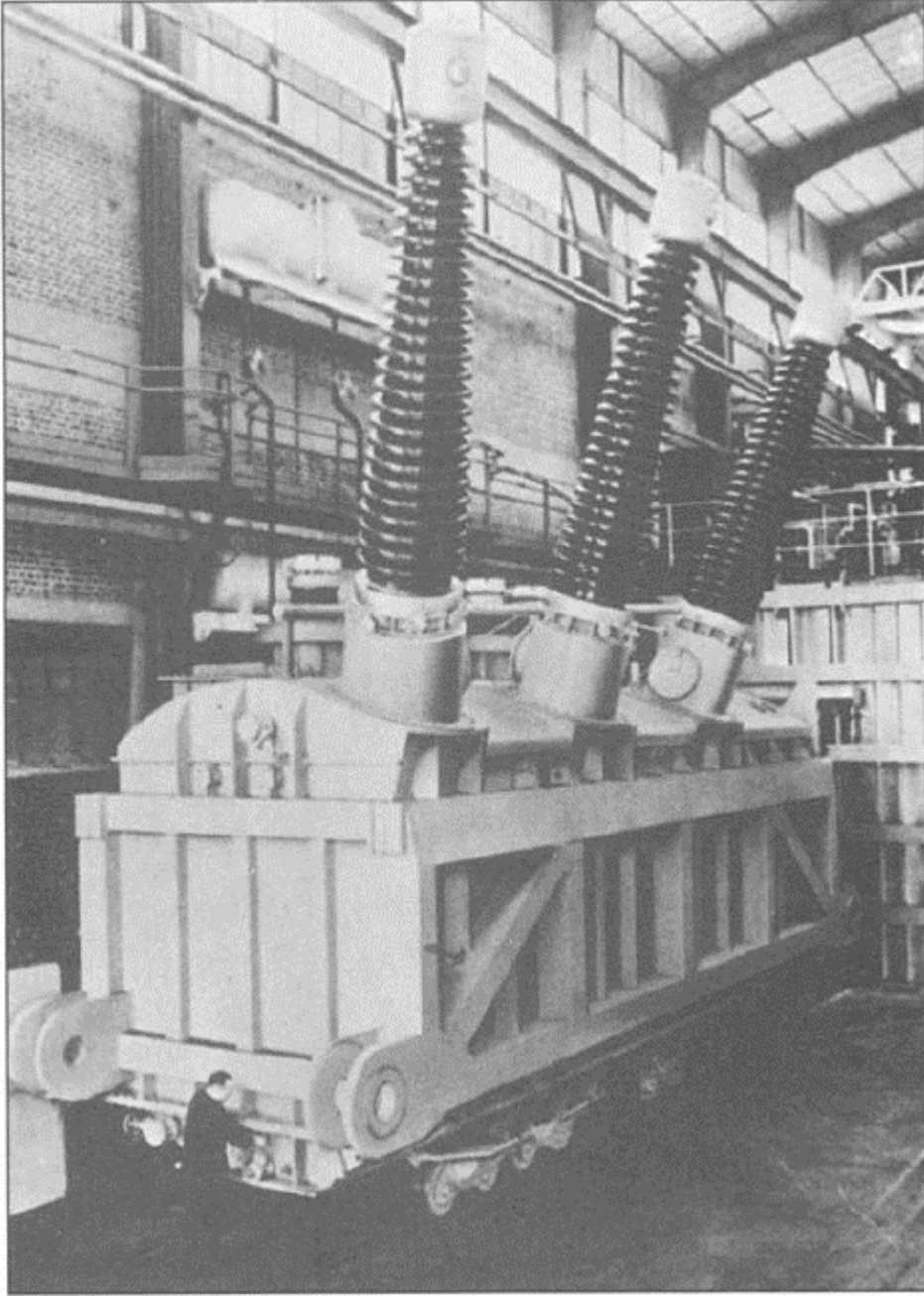


2. Medium power transformers: 7500 kVA to 100 MVA



3. Large power transformers: 100 MVA and above.





(الصورة لمحول ABB 20/400kV وقدرة 600 MVA)

وفي هذا الكتاب لن نفرق بين النوعين ، وسنعمد أن كلمة "محول" نقصد بها محول قوى أو محول توزيع دون تفرقة.

## لماذا تدرس المحولات غالبا ضمن كتب الآلات الكهربائية ؟

أحد تعريفات المحول تقول أن : "المحول الكهربائي عبارة عن آلة كهربية إستاتيكية ( غير متحركة ) وظيفته تحويل تيار متردد ذو فولتية معينة إلى تيار متردد آخر بفولتية أخرى (أعلى أو أقل ) مع ثبات القدرة والتردد والقيام بنقل الطاقة الكهربائية من أماكن توليدها الى أماكن استهلاكه".

ويمكن أيضا تعريفه بأنه " آلة كهربية Electric Machine قادر على تحويل القدرة الكهربائية الداخلة إليه بجهد ما إلى قدرة كهربية تخرج منه بجهد مختلف سواء بالزيادة أو النقصان".

ورغم أن مصطلح Electric Machine دائما ينصرف إلى المولدات والمحركات بأنواعها ، إلا أن المحول يعتبر نوع من أنواع الآلات الكهربائية لأن القوانين التي تحكم عمل المحركات والمولدات والمحولات واحدة ، وهى قوانين الكهرومغناطيسية .

والفرق الوحيد بين المحركات والمولدات من جانب وبين المحولات من جانب آخر هو أن المحركات والمولدات تدور بينما المحولات آلة كهربية ساكنة لا تدور ، وفيما سوى ذلك فكلهم يخضعون لقوانين الكهرومغناطيسية كما سنرى ، وهذا يفسر لك لماذا دائما تجد المراجع الكبرى للآلات الكهربائية تحتوى على فصول خاصة بالمحولات الكهربائية ، فالجميع ينتمون إلى عائلة واحدة .

## الباب الأول

# الأساسيات العامة للمحولات

الفصل الأول : مبادئ المغناطيسية

الفصل الثاني : التمثيل الحقيقي للمحولات

الفصل الثالث : المحولات الثلاثية الأوجه

# الفصل الأول

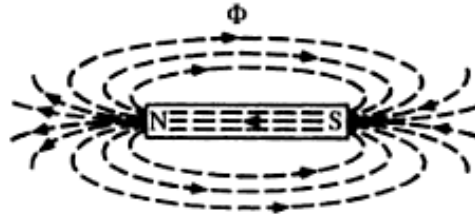
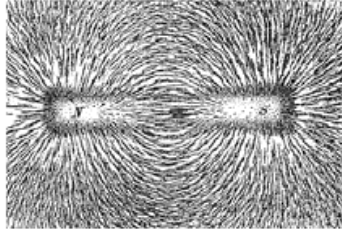
## مبادئ المغناطيسية

### 1-1 القواعد الأساسية للمغناطيسية

يحسن قبل الدخول في تفاصيل دراسة المحولات أن نراجع بعض قواعد وقوانين المغناطيسية .

#### 1-1-1 تأثير المغناطيس

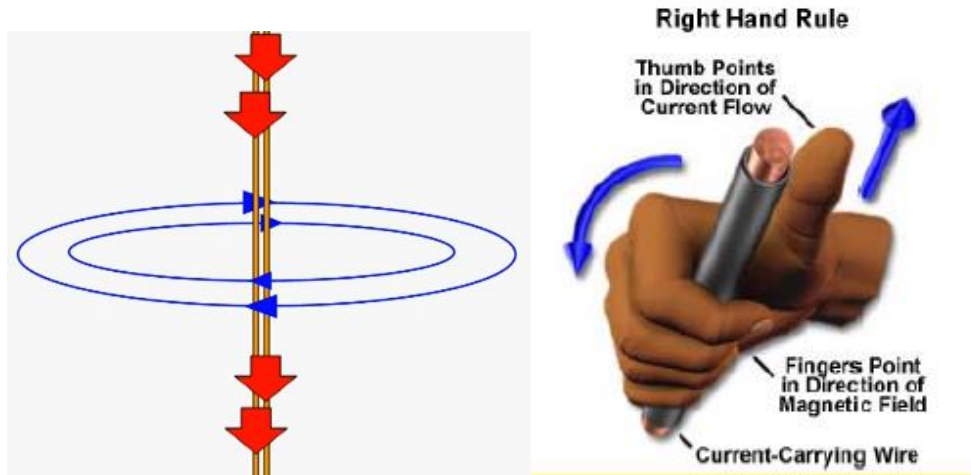
ينتج عن وجود مغناطيس عادي (Magnet) في مكان ما وجود ما يعرف بمنطقة المجال المغناطيسي ، وهي المنطقة التي يظهر فيها ما يعرف بخطوط الفيض (Flux lines) ، وهي الخطوط التي تمر من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي للمغناطيس ، ويمكن أن نشعر بها ونرى اتجاهها إذا وضعنا برادة حديد بالقرب من مغناطيس كما في الشكل 1-1.



شكل 1-1 : المجال المغناطيسي

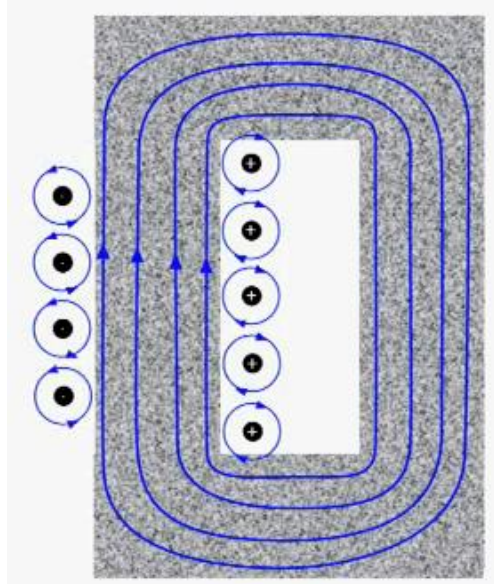
#### 2-1-1 المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربى

أثبت فارادى أن أي تيار متردد يمر في سلك كهربى فإنه ينشأ حوله مجال مغناطيسي يشبه تماما المجال المغناطيسي الذى ينشأ حول مغناطيس عادي ، ويكون اتجاه هذا المجال المغناطيسي محددًا حسب قاعدة فليمنج لليد اليمنى ، كما في الشكل 2-1 . ومن هنا ظهر مصطلح الكهرومغناطيسية ، ويعنى أن الكهرباء و المغناطيس لهما علاقات وتأثيرات متبادلة ومتشابهة.



شكل 1-2 : المجال المغناطيسي المصاحب للتيار الكهربائي

وللحصول على مجال مغناطيسي قوى فإنه من المستحيل الحصول عليه من قطع المغناطيس الحديدية ، ولذا فقد استفدنا من الحقيقة السابقة - وهي أن التيار المار في سلك يصاحبه مجال مغناطيسي - وطبقنا نفس المبدأ في الملفات ، حيث يكون اتجاه التيار موحداً في كل اللفات turns ، ومن ثم ينشأ عنه مجال مغناطيسي قوى ، وهو بالطبع أقوى من المجال الناشئ من سلك أو سلكين. وهذا ما يحدث في المحول حيث يلف الـ Coil حول ذراع القلب الحديدي فينشأ مجال مغناطيسي قوى (باللون الأزرق) في القلب الحديدي كما في الشكل 1-3 الذي يمثل مقطع طولى في القلب الحديدي في المحول.



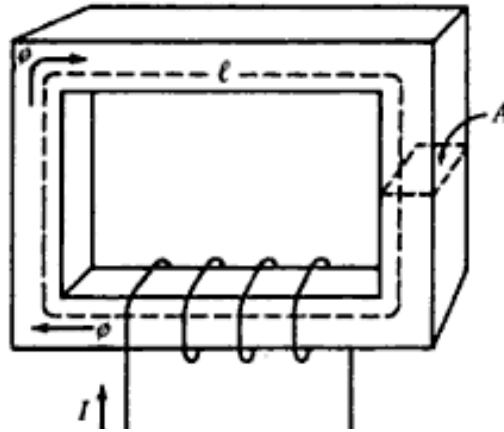
شكل 1-3 : المجال المغناطيسي داخل القلب

## 3-1-1 القوة الدافعة المغناطيسية MMF

وضع العلماء بعد ذلك عدة قوانين وعلاقات تحكم عمل هذا المجال المغناطيسي الناشئ بسبب مرور تيار كهربى ، منها أنه إذا مر تيار كهربى  $I$  فى ملف عدد لفاته  $N$  فستنشأ قوة دافعة مغناطيسية  $\text{Magnetomotive Force, mmf}$  قيمتها تقدر بالـ  $\text{Ampere-Turn}$  ،

$$\text{MMF} = N.I$$

وهذه القوة الدافعة هى التى تدفع خطوط الفيض فى القلب الحديدي كما فى الشكل 4-1 .



شكل 4-1 : القوة الدافعة للفيض

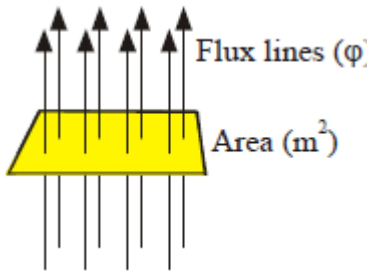
وكما كانت المسافة  $L$  التى تدفع بها الـ  $\text{MMF}$  خطوط الفيض قصيرة كلما كانت شدة المجال  $\text{Field Intensity, H}$  أكبر ، ويعبر عن ذلك بالمعادلة

$$H = \frac{\text{MMF}}{l} = \frac{NI}{l}$$

والقانون السابق يوضح العلاقة بين قيمة شدة هذا المجال المغناطيسي  $\text{Field Strength, H}$  ، وشدة التيار  $I$  ، المار فى عدد من اللفات  $N$  خلال مسار طوله  $L$  ، ويمكن وضعه على الصورة:

$$N.I = H.L$$

## 1-1-4 العلاقة بين الفيض والمجال المغناطيسي



الفيض المغناطيسي ( $\phi$ ) يقاس بوحدة تسمى الـ (Webber) ، وإذا  
عبر الفيض خلال مساحة مقطع  $A$  (مقاسة بالمتر) فإن كثافة الفيض  
 $B$  ( تقاس بوحدة تسمى Tesla ) و تحسب من المعادلة

$$B = \frac{\phi}{A}$$

وترتبط قيمة كثافة الفيض  $B$  بقيمة شدة المجال  $H$  حسب العلاقة:

$$B = \mu H$$

حيث  $\mu$  هو معامل النفاذية المغناطيسية Permeability للمادة التي يمر بها الفيض ، وارتفاع قيمتها  
يعتبر مؤشرا على انخفاض ممانعة المادة لمرور المجال المغناطيسي خلالها ، فنفاذية الهواء مثلا  $\mu_0$   
قيمتها تساوي  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/AT.m}$  ، بينما نفاذية بعض أنواع الحديد تصل إلى سبعة أمثال هذه  
القيمة.

## 1-1-5 الممانعة لمرور المغناطيسية

ممانعة المادة لمرور الفيض تسمى بالـ Reluctance ، وتتوقف ليس فقط على نوع المادة ولكن على  
مساحة مقطعها  $A$  ، وطولها  $l$  ، طبقا للعلاقة

$$\zeta = \frac{l}{\mu A}$$

حيث  $\mu$  هو معامل النفاذية المغناطيسية Permeability ، وهى بذلك تتشابه مع مفهوم المقاومة فى  
الدوائر الكهربائية.

## 1-1-6 التشابه مع القوانين الكهربائية

ويمكن تعميم مبدأ التشابه بين الدوائر الكهربائية والمغناطيسية إذا اعتبرنا أن القوة الدافعة المغناطيسية الـ  
 $MMF$  تشبه القوة الدافعة الكهربائية  $EMF$  ، والفيض يشبه التيار ، والممانعة تشبه المقاومة. وستجد أن  
هناك فعلا تشابه بين العلاقات فى كل مجال

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{mmf}{\zeta} = \frac{N.I}{\zeta} & \text{Magnetic} \\ I &= \frac{emf}{R} = \frac{V}{R} & \text{Electric} \end{aligned}$$



**7-1-1 الجهد الناشئ بالحث المغناطيسي Induced Voltage**

تحسب قيمة الجهد الناشئ بالحث المغناطيسي Induced Voltage (لكل لفة من عدد اللفات  $N$  في أى ملف) من العلاقة:

$$\frac{E}{N} = k\phi_m f$$

where

$k$  is a constant,

$\phi_m$  is the maximum value of total flux in webers linking that turn and

$f$  is the supply frequency in hertz.

وهذا يعني أن الجهد الناشئ يتناسب طردياً مع التردد والفيض.

وفي حالة الـ sinusoidal induced Voltage تكون قيمة الجهد الناشئ

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi f N a B_{\text{peak}}}{\sqrt{2}} \approx 4.44 f N a B$$

حيث

$a$	مساحة مقطع الـ Core
$N$	عدد اللفات
$f$	التردد
$B$	قيمة كثافة الفيض العظمي

ومنها نحسب

$$E/N = 4.44 B_m A f \times 10^{-6}$$

where

$E/N$  = volts per turn, which is the same in both windings

$B_m$  = maximum value of flux density in the Core, tesla

$A$  = net cross-sectional area of the Core,  $\text{mm}^2$

$f$  = frequency of supply, Hz

**Example 32.1.** The maximum flux density in the core of a 250/3000-volts, 50-Hz single-phase transformer is  $1.2 \text{ Wb/m}^2$ . If the e.m.f. per turn is 8 volt, determine

- (i) primary and secondary turns (ii) area of the core.

(Electrical Engg.-I, Nagpur Univ. 1991)

**Solution.** (i)

$$E_1 = N_1 \times \text{e.m.f. induced/turn}$$

$$N_1 = 250/8 = 32; N_2 = 3000/8 = 375$$

(ii) We may use

$$E_2 = -4.44 f N_2 B_m A$$

$$\therefore 3000 = 4.44 \times 50 \times 375 \times 1.2 \times A; A = 0.03 \text{ m}^2.$$

### مثال شامل على قواعد المغناطيسية السابقة

- Example-1** In the magnetic circuit detailed in Figure 21.14 with all dimensions in mm, calculate the required current to be passed in the coil having 200 turns in order to establish a flux of  $1.28 \text{ mWb}$  in the *air gap*. Neglect fringing effect and leakage flux. The B-H curve of the material is given in Figure 21.15. Permeability of air may be taken as,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

**Solution:**

Step 1 First draw the simplified diagram of the given magnetic circuit along with the equivalent circuit as shown in figure 21.16.

Step 2 To calculate *mean lengths* of various parts, mark the center points of various limbs and yokes with small bullets.

Step 3 Name the different portions which will carry same flux as 1, 2 and 3. For example, path CFED is in fact path 1 where flux  $\phi_1$  will remain same. Similarly the path DC (path 2) will carry same flux  $\phi_2$  and path CBAD (path 3) will carry same flux  $\phi_3$ .

Step 4 Calculation of mmf required for the path 2:

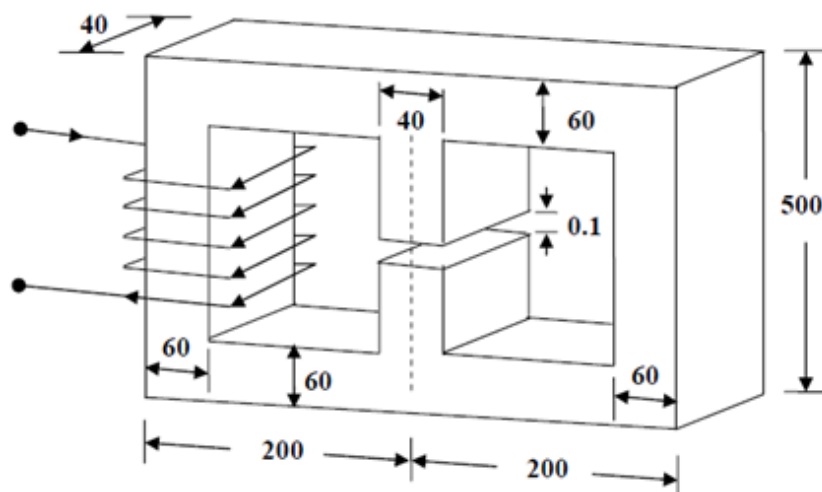


Figure 21.14: For Q B1.

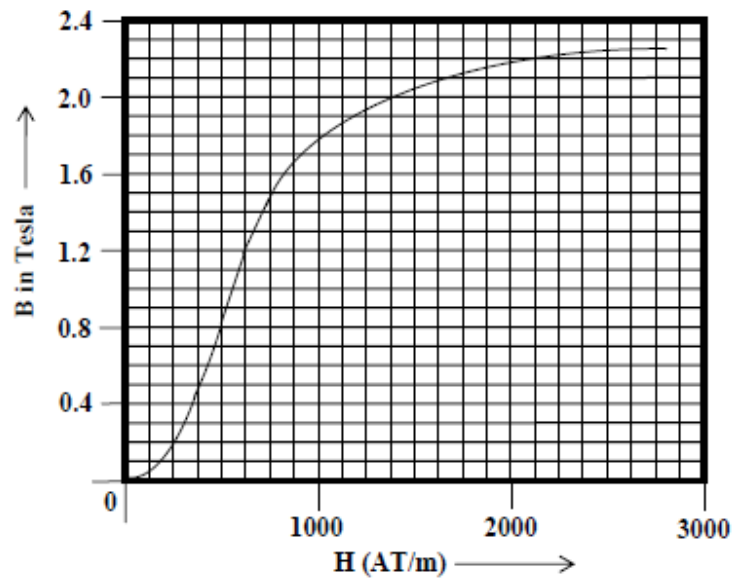


Figure 21.15: For Q B1.

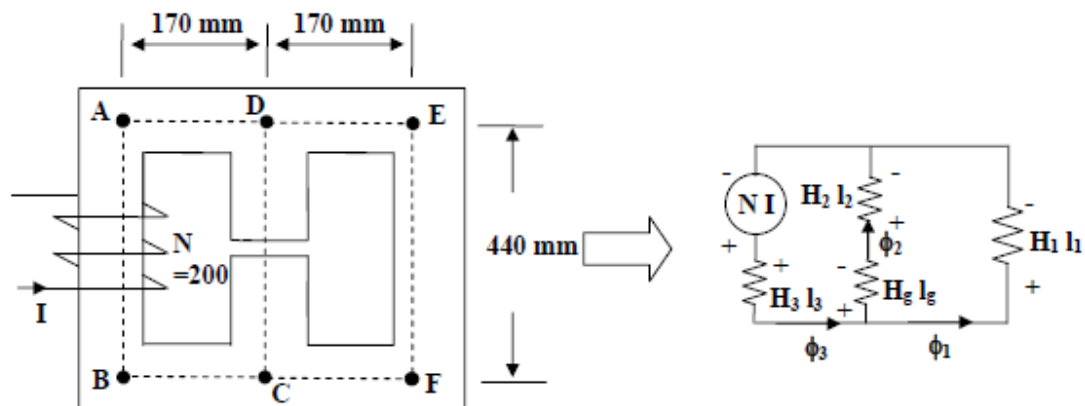


Figure 21.16: Circuit showing mean lengths.

$$\phi_g = \phi_2 = 1.28 \times 10^{-3}$$

$$\text{Cross sectional area of central limb } A_2 = 16 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Flux density } B_g = B_2 &= \frac{1.28 \times 10^{-3}}{16 \times 10^{-4}} \text{ T} \\ &= 0.8 \text{ T} \end{aligned}$$

$$\therefore H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{0.8}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ AT/m}$$

$$\begin{aligned}
 &= 63.66 \times 10^4 \text{ AT/m} \\
 \text{mmf required for gap } H_g l_g &= 63.66 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-4} \text{ AT} \\
 &= 63.66 \text{ AT}
 \end{aligned}$$

Now we must calculate the mmf required in the iron portion of the central limb as follows:

$$\begin{aligned}
 \text{flux density, } B_2 &= 0.8 \text{ T } \because \text{fringing \& leakage neglected} \\
 \text{corresponding H from graph, } H_2 &\approx 500 \text{ AT /m} \\
 \text{Mean iron length, } l_2 &= (440 - 0.1) \text{ mm} \\
 &\approx 0.44 \text{ m} \\
 \text{mmf required for iron portion, } H_2 l_2 &= 220 \text{ AT} \\
 \text{Total mmf required for iron \& air gap,} &= (220 + 63.66) \text{ AT} \\
 \text{mmf}_{CD} &= 283.66 \text{ AT.}
 \end{aligned}$$

Step 5 Due to parallel connection, mmf acting across path 1 is same as mmf acting across path 2. Our intention here, will be to calculate  $\phi_1$  in path 1.

$$\begin{aligned}
 \text{mean length of the path, } l_1 &= l_{DE} + l_{EF} + l_{FC} \\
 &= 2 \times 170 + 440 \text{ mm} \\
 &= 0.78 \text{ m} \\
 \therefore H_1 &= \frac{283.66}{0.78} \\
 &= 363.67 \text{ AT /m} \\
 \text{corresponding flux density from graph, } B_1 &\approx 0.39 \text{ T} \\
 \therefore \text{flux, } \phi_1 &= B_1 A_1 \\
 &= 0.39 \times 24 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\
 \therefore \phi_1 &= 0.94 \times 10^{-3} \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

Step 6 In this step we calculate the mmf necessary to drive  $\phi_3$  in path 3 as follows.

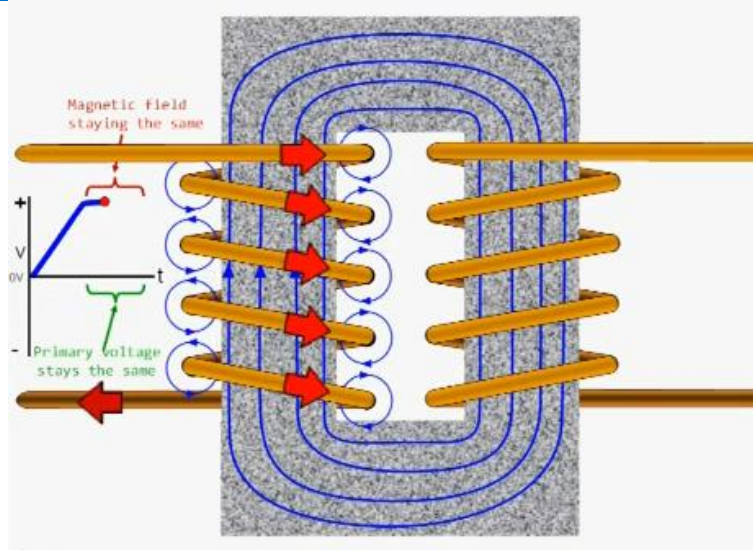
$$\begin{aligned}
 \text{flux in path 3, } \phi_3 &= \phi_1 + \phi_2 \\
 &= 2.22 \times 10^{-3} \text{ Wb} \\
 \text{flux density, } B_3 &= \frac{\phi_3}{A_3} \\
 &= \frac{2.22 \times 10^{-3}}{24 \times 10^{-4}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore B_3 &= 0.925 \text{ T} \\
 \text{corresponding } H \text{ from graph, } H_3 &\approx 562.5 \text{ AT /m} \\
 \text{mean length of path 3, } l_3 &= 2 \times 170 + 440 \text{ mm} \\
 &= 0.78 \text{ m} \\
 \text{total mmf required for path 3} &= H_3 l_3 \\
 &= 562.5 \times 0.78 \text{ AT} \\
 &= 438.7 \text{ AT} \\
 \therefore \text{ mmf to be supplied by the coil, } NI &= 283.66 + 438.7 \text{ AT} \\
 \text{or } 200I &= 722.36 \text{ AT} \\
 \therefore \text{ exciting current needed, } I &= \frac{722.36}{200} \text{ A} \\
 &= 3.61 \text{ A}
 \end{aligned}$$

## 2-1 المبادئ الحاكمة لعمل المحولات

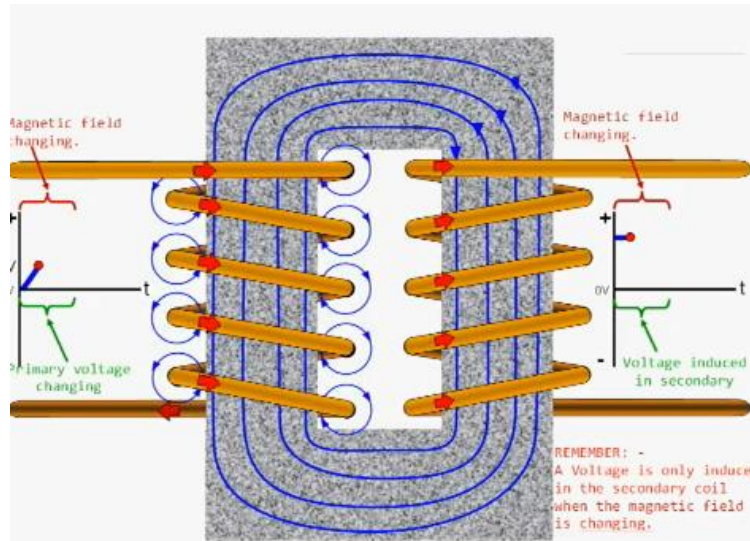
فكرة عمل المحولات مبنية على قوانين فارادى للكهرومغناطيسية ، فعند مرور تيار متردد AC في الملفات الابتدائية Primary winding فإن مجالا مغناطيسيا (magnetic field) مترددا ينشأ بالتبعية (قانون فارادى الأول).

والسبب في نشوء هذا المجال هو حركة الشحنات الكهربائية سواء كانت هذه الشحنات نتيجة حركة الإلكترونات حول الذرات كما في المغناطيس الدائم ، أو كانت نتيجة حركة الشحنات في التيار الكهربى كما في المغناطيس الكهربى فى الشكل 1-5 ، وفي كل الأحوال يمكن أن نقول أن المجال المغناطيسى فى مكان ما ناشئ عن حركة شحنات كهربية مجاورة.



شكل 1-5 : نشأة المجال المغناطيسي بسبب التيار الكهربائي

والمجال المغناطيسي المتردد ينشأ عنه مرور خطوط الفيض ذات قوة متغيرة بالقلب الحديدي للمحول ، فتقطع هذه الخطوط ملفات الـ (secondary winding) ، ومن ثم ينشأ في ملفات الثانوي جهداً كهربياً وذلك حسب قانون فاردي الثاني (قانون الحث Induction) . أي أن المجال المغناطيسي الناشئ من الملف الابتدائي يتسبب في توليد جهد في الملف الثانوي عن طريق ما يسمى بالحث الكهرومغناطيسي (electro-magnetic induction) ، حيث يتسبب المجال المغناطيسي المتغير في تحريك الشحنات في ملف الثانوي كما في الشكل 1-6 . تذكر أن التيار الكهربائي ليس إلا شحنات كهربية متحركة.

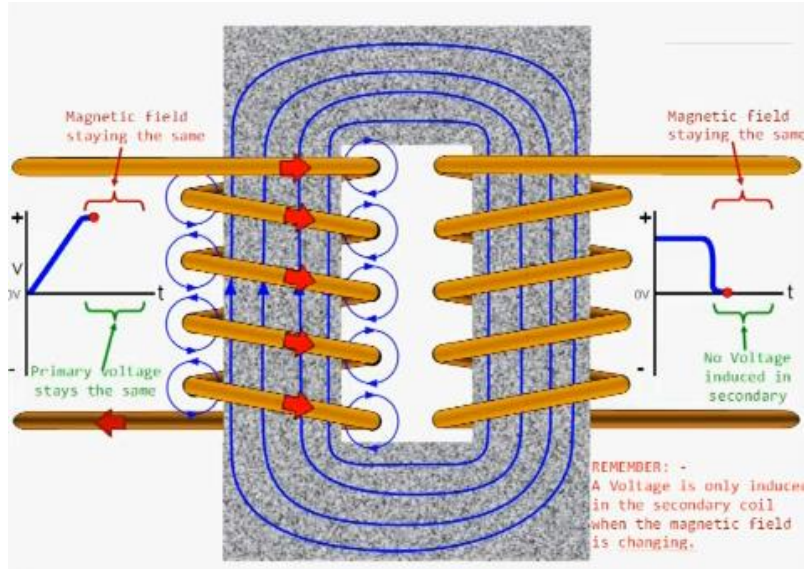


شكل 1-6 : المجال المتغير ينشأ جهداً في الثانوي



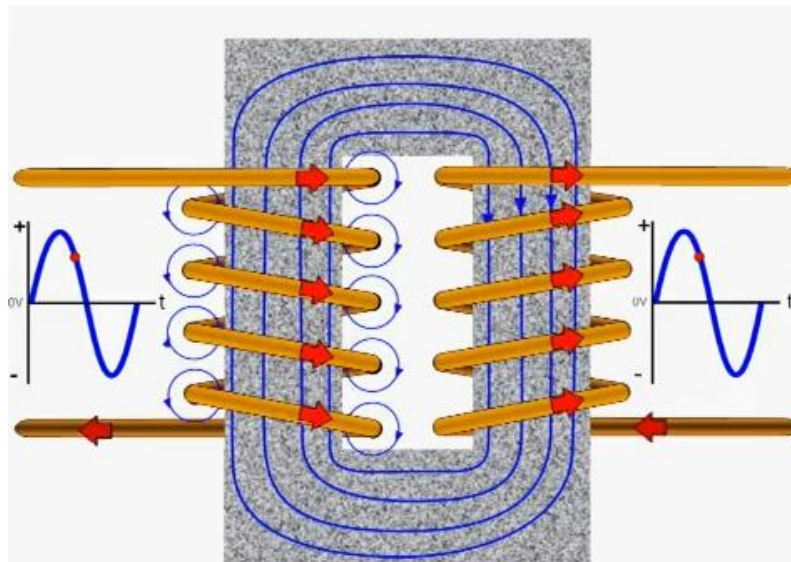
## 1-2-1 هل يمكن رفع أو خفض جهد DC بواسطة المحول ؟

لاحظ في الشكل 7-1 أن هناك جهد يظهر في الملف الثانوي فقط إذا كان لدينا مجال متغير (متزايد أو متناقص) ، أما إذا ثبتت قيمة الفيض فسيكون الجهد في الملف الثانوي يساوي صفر .



شكل 7-1 : المجال المتغير ثم الثابت وتأثيرهما

ومن أجل هذا فإننا نحتاج إلى جهد متردد في الملف الابتدائي (وهذا هو السبب في أننا نستخدم دائماً الـ Sinusoidal wave) لنحصل على مثيله في الملف الثانوي كما في الشكل 8-1 . وهذا أيضاً هو السبب في أن المحول لا يصلح للتعامل مع الـ DC Voltage .



شكل 8-1 : المجال الجيبي

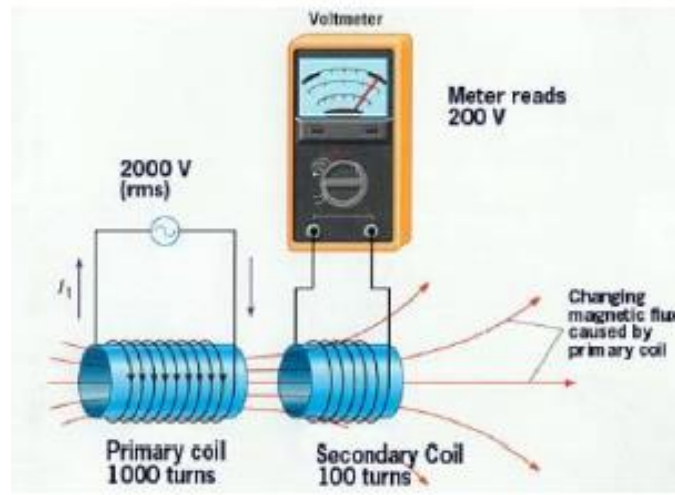


## 2-2-1 مفهوم الـ Transformer Action

عند تمرير تيار كهربى متردد فى ملف فسوف ينشأ عنه فيض ، هذا الفيض إذا قطع ملفا آخر مجاور له فسيولد فيه جهدا كهربيا يتناسب حسب عدد اللفات فى كلا الملفين.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

وهو ما يعرف بالـ Transformer action . ويظهر مثال له في الشكل التالى:



ويمكن تلخيص ما سبق حتى الآن فى النقاط التالية:

- 1- الجهد الكهربى يتسبب فى تحريك الإلكترونات.
- 2- تحرك الإلكترونات يعنى مرور تيار.
- 3- التيار الكهربى فى سلك يولد مجال مغناطيسي حول السلك electro-magnetism.
- 4- لف السلك على شكل ملف يزيد من قوة المجال.
- 5- الفيض المغناطيسي يمر بسهولة فى المواد الحديدية أكثر من الهواء.
- 6- المجال المغناطيسي المتردد يولد جهدا فى الملفات المجاورة وذلك بالحث magnetic Induction.
- 7- المحول يعتمد فى وجود مجال مغناطيسي متردد.

## 3-1 أسئلة هامة لفهم المحول

فى هذا الجزء وحتى نهاية هذا الفصل سندرس المحول كما لو أنه معدوم الـ Loss أى أنه نموذجى فى كل شئ ، وهذا بالطبع شئ غير عملى ، لكنه تقريب مقبول ، ومفيد لفهم عمل المحولات بطريقة سهلة

لاسيما أن كفاءة المحولات عمليا تتراوح حول 98-99% ، وهذا يعنى أن ما نقوله هنا قريب بدرجة كبيرة من الواقع . وسنطرح هنا بعض التساؤلات الهامة لفهم المحول:

### 1-3-1 لماذا تلف الملفات حول قلب حديدي؟

إن عدد اللفات ليست العنصر الوحيد المتحكم في قيمة الجهد المتولد بالحث في الجانب الثانوى ، فهناك أيضا درجة الارتباط المغناطيسى بين الملفين Magnetic coupling ، حيث ترتفع قيمة الجهد المتولد في الثانوى بالحث كلما كان الـ Coupling بين الملفين أكبر ، وهذا يتم بطريقتين :

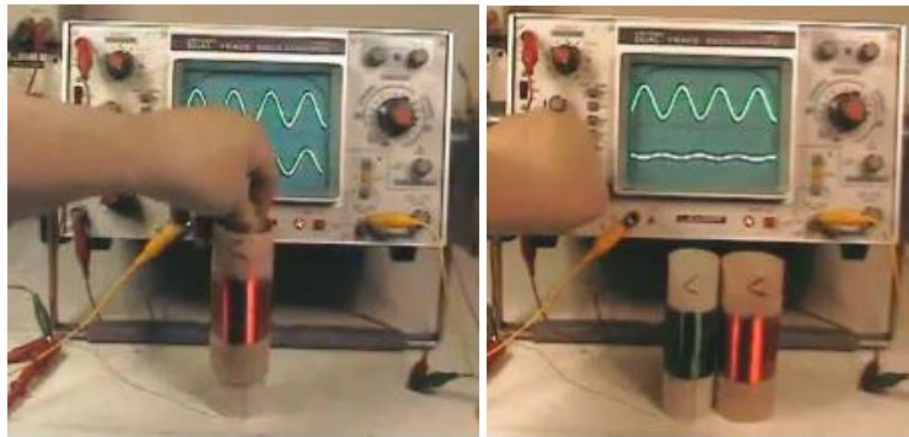
1- بزيادة تقارب الملفين بدرجة أكبر من بعضهما

2- أو بوضع قلب حديدي بينهما بدلا من الهواء .

ويمكن عمليا إثبات الحقيقتين السابقتين ، ففي المعمل يمكن أن نصنع Air-core Transformer مكون من:

- ملف ابتدائي (باللون الأخضر في الشكل 1-9) ويمثله الـ Signal العلوية في جهاز راسم الموجات Oscilloscope في نفس الشكل.
- ملف ثانوى (الأحمر) ويمثله الـ Signal السفلية في جهاز راسم الموجات Oscilloscope .

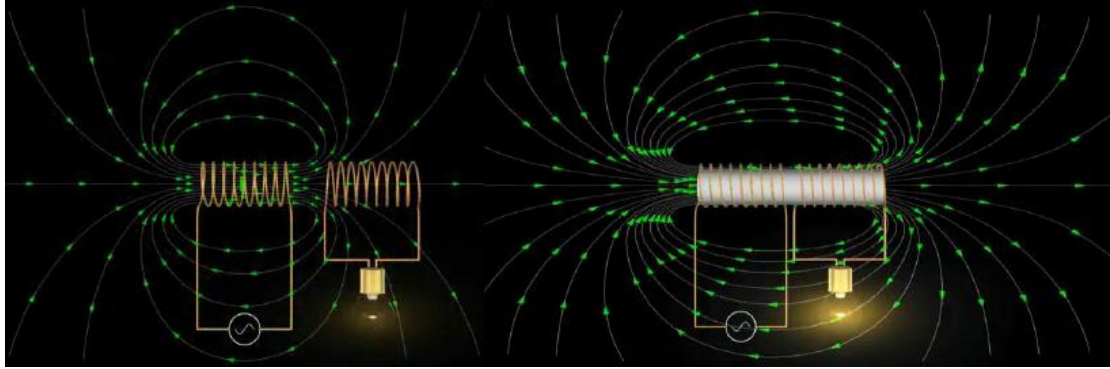
لاحظ في الصورة اليمنى أن قيمة الجهد المتولد في الثانوى صغير جدا كما هو واضح في راسم الموجات لأن الملفين متباعدين وبينهما هواء ، لكن إذا كان الملفين متداخلين كما في الصورة اليسرى فإن الجهد المتولد في الثانوى يزيد.



شكل 1-9 : تأثير تتداخل الملفين وتجاورهما على قيمة الجهد الناشئ

ويمكن إثبات الحقيقة الثانية ( تأثير القلب المغناطيسي ) بتجربة بسيطة كما في الشكل 1-10 ، حيث نوصل مصباح صغير على أطراف ملف الثانوى ونلاحظ مدى شدة إضاءته إذا كان الملفين على مسافة

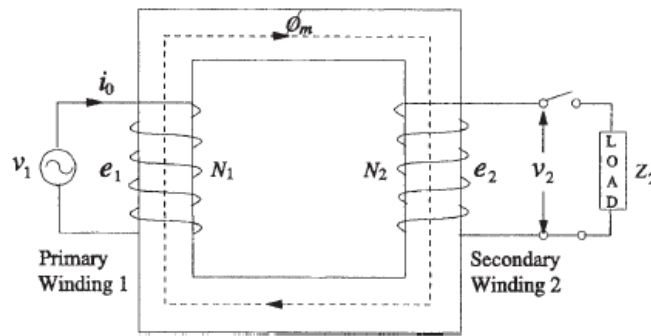
واحدة وبينهما هواء كما في الصورة اليسرى ، أو إذا وجد قلب حديدي بينهما كما في الصورة اليمنى ، فسيزداد سطوع المصباح ، مما يدل على زيادة الجهد المتولد بالحث في الجانب الثانوي رغم ثبات عدد اللفات والمسافة في الحالتين.



شكل 10-1 : تأثير تقارب الملفين على درجة انارة المصباح

### 1-3-2 ماذا يحدث في حالة الـ No-load condition ؟

في الشكل 11-1 نموذج لمحول بسيط من النوع  $(1-\Phi)$  يحتوي على عدد من اللفات  $N_1$  في الملف الابتدائي وعدد  $N_2$  في الملف الثانوي. ويطلق أيضا على هذا الوضع بحالة الـ No-load لأنه الحمل مفصول وغير متصل بالمحول.



شكل 11-1 : الدائرة المكافئة البسيطة لمحول نموذجي

عند توصيل جهد المصدر الابتدائي  $(V_1)$  بالملف الأول (الابتدائي) ، فإن تيارا صغير  $i_0$  يسحب من المصدر ( تذكر أن الحمل في الجانب الثانوي مفتوح وغير متصل ) ، وهذا التيار الصغير يسمى (excitation current) ، وقد جاءت هذه التسمية لأن التيار يقوم باستثارة الملف الابتدائي لينشأ الفيض المغناطيسي  $\Phi_1$  ( هذا الفيض سينشأ فيض آخر في الثانوي ثم يمر في القلب محصلة الفيضين والتي يرمز لها بـ  $\Phi_m$  في الشكل 11-1 ) .

وفي المحولات النموذجية ideal transformer (التي لا نفترض بها وجود أي loss) فإن الفيض بالكامل سيمر في القلب الحديدي دون أن يتشتت هنا أو هناك ، حتى يقطع الملف الموجود في الجانب الثانوي ، فينشأ فيه قوة دافعة كهربية ثانية  $e_2$  قيمتها تساوي

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt}$$

### 1-3-3 ماهي القوة الدافعة العكسية Back emf ؟

لكن لماذا يسحب الملف الابتدائي تياراً صغيراً بالرغم أن جهد المصدر موضوع كله على الملف ، وهذا الملف ليس إلا سلك نحاس أي أن مقاومته صغيرة جداً ؟ فالمفروض أن يمر تيار كبير وليس تيار صغير؟؟

والجواب أن الفيض المغناطيسي  $\Phi_m$  الذي ذكرنا أنه يمر بالقلب الحديدي ويقطع ملفات الثانوي ، هذا الفيض يقطع أيضاً كما ذكرنا ملفات الابتدائي وينشأ فيه جهداً  $e_1$  (هذا مختلف عن جهد المصدر  $V$ ) ، قيمته تتناسب مع عدد الملفات

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt}$$

وهي قيمة تكاد تساوي قيمة الجهد الأصلي ، أي أن :

$$V_p \approx E_p$$

or

$$v \approx e$$

وهذا الجهد  $e_1$  الناشئ بال induction يعاكس الجهد الأصلي للمصدر  $V_1$  ( حسب قاعدة لنز المعروفة ويتسبب في جعل Applied voltage الفعلي الموجود على الملف الابتدائي لا يساوي  $V_1$  بل يساوي  $(V_1 - e_1)$  ومن ثم تكون قيمة excitation current التي تمر في الملف الابتدائي صغيرة.

وبما أن الجهد الناشئ بالحث  $e_1$  يعاكس الجهد الأصلي للمصدر  $V_1$  كما ذكرنا فإنه يسمى back emf وأحياناً يسمى Counter e.m.f أي القوة الدافعة الكهربائية العكسية.

ملحوظة:

ومن المعادلتين السابقتين يمكن أن تصل إلى القاعدة المعروفة

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

لكن لاحظ أنه لكي تكون المعادلة السابقة صحيحة فإن الـ Voltages المستخدمة هي الـ induced voltages ، أى  $e_1$  و  $e_2$  ، وليس  $V_1$  و  $V_2$  .

### 1-3-4 كيف يشعر الملف الابتدائي بإضافة حمل جديد في الثانوي ؟

عند توصيل حمل كهربائي Adding a load (مقاومة مثلاً) في الجانب الثانوي للمحول ، فإن الجهد  $e_2$  الموجود في الجانب الثانوي يتسبب في مرور تيار  $I_2$  يمر في الحمل وفى ملف المحول الثانوي ( نظرياً يكون الجهد  $e_2 = V_2$  وذلك فى حالة المحولات الـ ideal Tr. فقط ) هذا التيار الجديد  $I_2$  ينشأ هو الآخر فيضا مغناطيسياً جديداً  $\Phi_2$  معاكساً للفيض الذي أنشأه تيار magnetization ،  $I_0$  ( طبقاً لقاعدة لنز فإن التيار الناشئ بالحث يحاول دائماً معاوقة المسبب الذي أنشأه ) ومن ثم يصبح الفيض المحصل Resultant flux هو

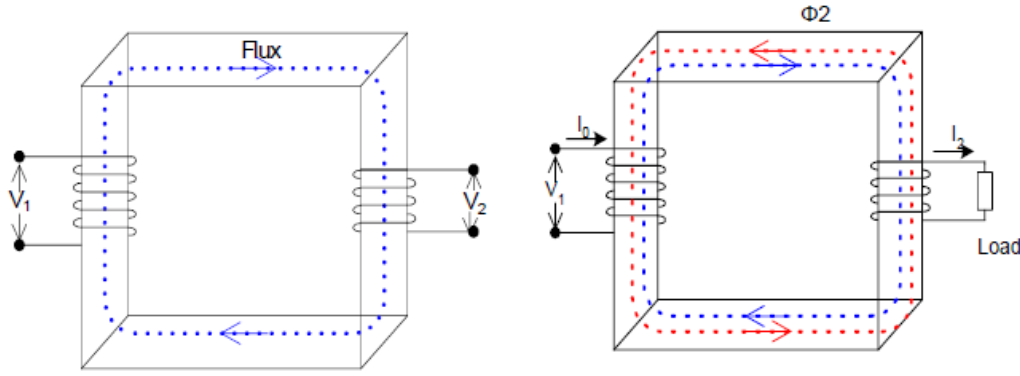
$$\phi_m = \phi_1 - \phi_2$$

وهو الفيض المحصل الذي يقطع الملفين بالفعل ، ولذا ظهر فى الشكل 1-11 ولم يظهر غيره .  
الآن أصبح الفيض الذي يقطع  $N_1$  هو  $\Phi_m$  وليس  $\Phi_1$  ، وهو كما ذكرنا أقل فى القيمة من  $\Phi_1$  ، ومن ثم فإن الجهد الناشئ بالحث فى  $N_1$  وهو  $e_1$  تصبح قيمته أقل من القيمة السابقة ، وهذا يعني أن  $(-V_1)$  سترتفع قيمتها ، ومن ثم ترتفع قيمة التيار  $I_1$  ، وهكذا كلما زاد التيار فى الثانوي زاد التيار فى الابتدائي . لاحظ أن قيمة تيار الـ magnetization ،  $I_0$  لن تتغير ، وإنما الذى سيتغير فقط هو التيار المسحوب من المصدر  $I_1$  .

### 1-3-5 هل تتغير قيمة الفيض داخل Core المحولات النموذجية ؟

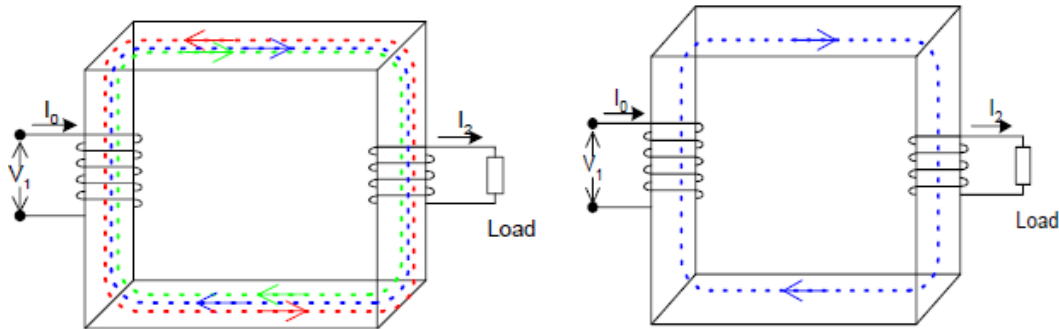
هذا السؤال يمكن أن نجاب عليه بالرسم التخطيطي فى الشكل 1-12 . ففى الحالة الأولى (الشكل الأيسر) فرضنا أن المحول غير متصل بأى حمل ، ومن ثم فإنه يسحب من المصدر فقط تيار الـ magnetization الكافى ليمرر الفيض المرسوم باللون الأزرق .

وعند وضع حمل فى الثانوي - كما فى الشكل الأيمن - فإن مرور تيار  $I_2$  ينشأ فيضا عكسياً حسب قاعدة لنز وهو الفيض المرسوم باللون الأحمر فى الشكل .



شكل 1-12 : الفيض الناشئ نتيجة التيارات في الابتدائي والثانوي

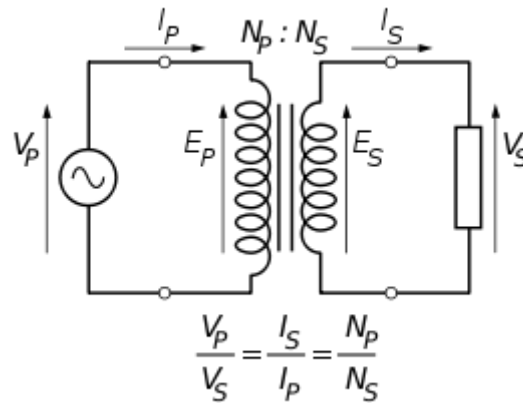
هذا الفيض الجديد يجعل الـ  $e_1$  كما ذكرنا تقل عن  $V_1$  فيزداد التيار المسحوب من المصدر بنفس قدر التيار الذي مر في الحمل ، وهذا التيار الجديد الإضافي ينشأ فيضاً باللون الأخضر كما في الشكل الأيمن في الشكل 1-13 . وحسب قاعدة لنز فإنه يعاكس منشؤه ولذا فهو عكس الفيض الأحمر ويساويه ، ومن ثم فقد وصلنا للنتيجة النهائية وهي أن زيادة الحمل (التيار) لا تؤدي لزيادة الفيض في القلب بل تظل قيمته ثابتة (هذا في المحولات الـ Ideal ) وسيختلف الوضع قليلاً في المحولات الحقيقية.



شكل 1-13 : الفيض المحصل

## 4-1 خلاصة سمات المحول النموذجي IDEAL TR.

الدائرة المكافئة لمحول نموذجي ideal مرسومة في الشكل 1-14 ، ومنه نشير إلى عدة سمات لهذا المحول:



شكل 1-14 : محول نموذجي

1- السمة الأولى أن القدرة الداخلة للمحول  $V_p \times I_p$  تساوي القدرة الخارجة من لمحول  $I_s \times V_s$

$$P_{\text{incoming}} = I_p V_p = P_{\text{outgoing}} = I_s V_s,$$

وهذا بالطبع غير حقيقي وغير عملي ، لأن ذلك معناه أنه لا توجد Losses مطلقاً .

2- والسمة الثانية في المحول الـ Ideal أن  $E_p = V_p$  ،  $E_s = V_s$  ، وهذا يعني أنه لا يوجد Voltage drop نهائياً ، وهذا أيضاً غير عملي وغير واقعي .

3- والسمة الثالثة في هذا المحول الـ Ideal أن الفيض الذي ينشأ من الـ Primary يقطع كله ملفات الثانوي دون أن يتشتت منه أي قدر من الـ Flux وهذا أيضاً غير عملي ، كما أن قيمته ثابتة لا تتوقف على قيمة الحمل كما رأينا في الجزء السابق.

4- وفي المحول الـ Ideal تصبح الـ Turns ratio تساوي النسبة بين جهد المصدر  $V_p$  ، وجهد الحمل  $V_s$  ، وهذا غير صحيح ، لأن النسبة الصحيحة تكون بين قيم الـ Induced voltages في الجانبين  $E_p$  and  $E_s$  .

كل هذه الأمور وغيرها ستأخذ في الاعتبار عند تمثيل المحول تمثيلاً حقيقياً في الفصل التالي .

**Example 32.4.** A 25-kVA transformer has 500 turns on the primary and 50 turns on the secondary winding. The primary is connected to 3000-V, 50-Hz supply. Find the full-load primary and secondary currents, the secondary e.m.f. and the maximum flux in the core. Neglect leakage drops and no-load primary current. (Elect. & Electronic Engg., Madras Univ. 1985)

**Solution.**

$$K = N_2/N_1 = 50/500 = 1/10$$

Now, full-load

$$I_1 = 25,000/3000 = 8.33 \text{ A. F.L. } I_2 = I_1/K = 10 \times 8.33 = 83.3 \text{ A}$$

$$\text{e.m.f. per turn on primary side} = 3000/500 = 6 \text{ V}$$

$$\therefore \text{secondary e.m.f.} = 6 \times 50 = 300 \text{ V (or } E_2 = K E_1 = 3000 \times 1/10 = 300 \text{ V)}$$

$$\text{Also, } E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m; 3000 = 4.44 \times 50 \times 500 \times \Phi_m \therefore \Phi_m = 27 \text{ mWb}$$

# الفصل الثاني

## التمثيل الحقيقي للمحولات

### Modeling Real Transformers

للبدا في دراسة وحسابات الأداء الفعلي للمحولات ( Real performance ) مثل حسابات كفاءة المحول Efficiency وحسابات انتظام الجهد Regulation وغير ذلك ، فإننا نحتاج إلى تمثيل حقيقي real model للمحول تراعي فيه الظروف الواقعية للتشغيل ، وليس تمثيلا تقريبا كما هو الحال في الـ Ideal Transformer الذي استخدمناه حتى الآن ، والذي ذكرنا عدة أشياء في الجزء السابق تبعده عن أن يمثل المحول تمثيلا صادقا ، وهي أمور يجب أن تؤخذ في الاعتبار عند عمل دائرة مكافئة للمحول Equivalent Circuit ، وهو موضوع هذا الفصل من الكتاب ، حيث نعالج بعض أهم أوجه الاختلاف التي جعلت التمثيل السابق للمحول Ideal Transformer غير واقعي .

## 1-2 الوجه الأول للاختلاف : مقاومة الملفات

لاشك أن ملفات الـ primary & secondary لهما بالتأكيد مقاومة كهربية  $R_1$  ،  $R_2$  ، تتوقف قيمتهما على نوع الموصل ومساحة مقطعه. وإضافة هاتين المقاومتين إلى دائرة المحول النموذجي تعني :

1- أن القدرة الداخلة تصبح بالضرورة أكبر من القدرة الخارجة لوجود Loss بداخل الملف خلال المقاومة وهذا هو الواقع الفعلي.

2- أن الجهد على الأطراف Terminal voltage لا يساوى بالضرورة الجهد الناشئ بالحث داخل الملفات Induced voltage بسبب الهبوط في الجهد والذي يساوى رياضيا ( I . X ) .

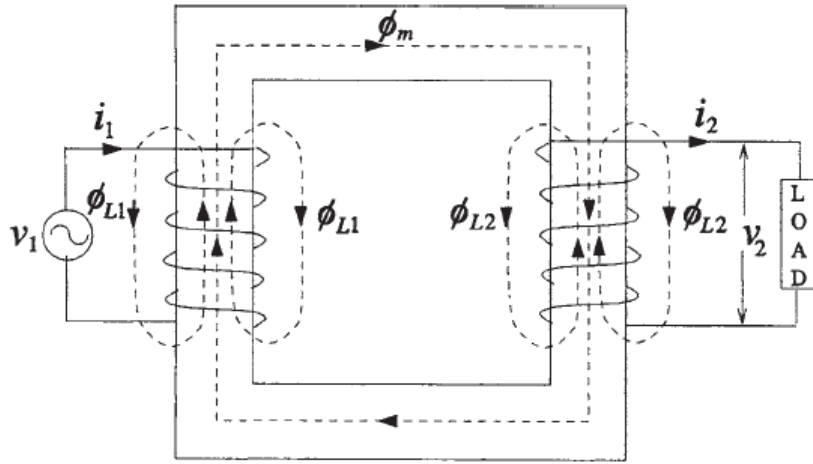
$$V_1 \neq E_1 , \quad V_2 \neq E_2$$

## 2-2 الوجه الثاني للاختلاف : الفيض المتسرب

في المحول النموذجي Ideal Transformer افترضنا أن الفيض الناشئ من الملفات الابتدائي يمر كله في القلب الحديدي دون تشتت حتى يقطع الملف الثانوي ، وكذلك الحال بالنسبة للفيض الناشئ عن مرور تيار في الملف الثانوي. وكل هذا غير واقعي ، والصحيح أن مرور التيار في الملفين ينشأ فيضا ولكن



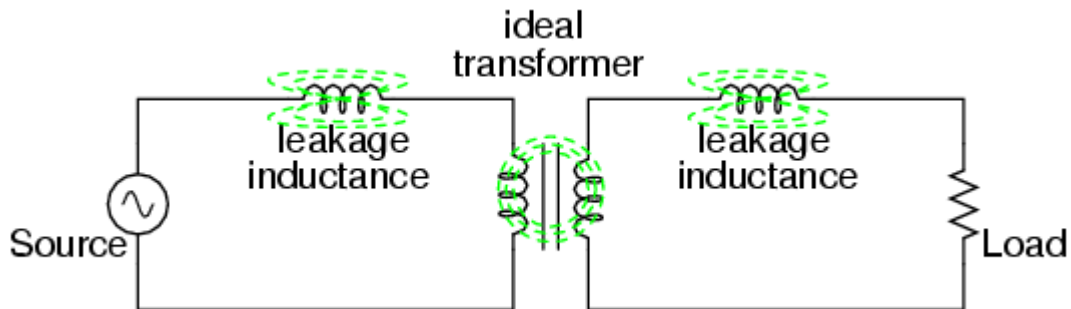
جزءاً من كل فيض منهما يتسرب خارج الـ Core ، و يسمى بالـ leakage flux ، وهذا الفيض المتسرب (  $\phi_{L1}$  ,  $\phi_{L2}$  ) في كل ملف يظل مرتبطاً بالملف الذي أنشأه كما في الشكل 1-2 .



شكل 1-2 : الفيض المتسرب من الملفات

وهذا الجزء المتسرب من كلا الملفين تتناسب قيمته طردياً مع طول المسافة بين الملفين ، فكلما تباعد الملفان عن بعضهما كلما زاد معدل التسريب ، ولذا ستجد عملياً في المحولات أن الملفات الابتدائية توضح مباشرة فوق ملفات الثانوي (أو العكس) لتقليل هذا الـ leakage في الفيض.

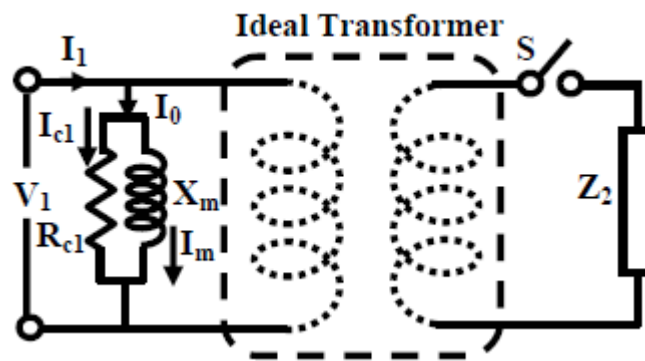
ونتيجة لهذا التسريب فإن الجهد المتولد بالحث داخل الملف الثانوي  $e_2$  سيكون أقل من المتوقع طبقاً لقانون فاردي ، كما أن الجهد الذي ينشأ على أطراف الحمل  $V_2$  سيكون بالضرورة أقل في القيمة من الجهد المتولد في Secondary winding ، والنقص الحاصل في الجهد بين  $e_2$  ,  $V_2$  نعتبره كما لو أنه ضاع خلال ملف له leakage inductance, L ، كما في الشكل 2-2 ، وهي التي ينتج عنها leakage reactance,  $X_2$ .



شكل 2-2 : تأثير الفيض المتسرب

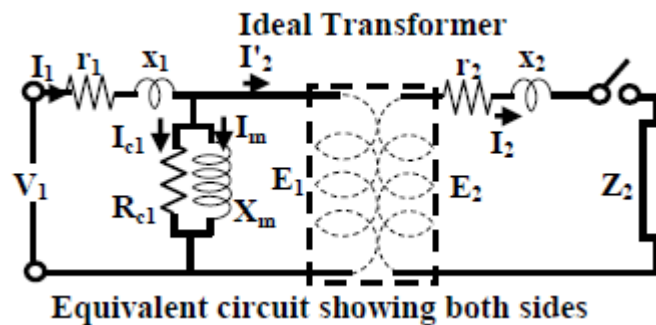
## 3-2 الوجه الثالث للاختلاف : مفاهيم الدائرة المغناطيسية

- في عند توصيل الملف الابتدائي بمصدر للجهد فإن التيار المنشئ للفيض magnetizing current  $I_0$  سوف يمر بالمحول منتجا الفيض  $\phi$  في القلب الحديدي ، ومرور هذا الفيض في القلب الحديدي يسبب نوعين من أنواع الـ losses هما : eddy loss and hysteresis loss . وفي الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي Real Transformer نأخذ هذين النوعين من الـ Loss في الاعتبار ، من خلال عنصرين هما على الترتيب  $R_c$  ،  $X_m$  كما في الشكل 3-2 .



شكل 3-2 : الدائرة المكافئة لمحول حقيقي

وتصبح الدائرة المكافئة عند أخذ الأوجه الثلاثة السابقة في الاعتبار كما في الشكل التالي:



### 1-3-2 أخذ تأثير الـ eddy loss في الاعتبار

طبقا لقوانين فارادي فإن الفيض المتردد حين يقطع موصل فإنه يولد فيه تيار كهربائي ، وهذا الكلام ينطبق على الأسلاك النحاسية الممثلة للملف الثانوي ، و ينطبق أيضا على القلب الحديدي. وهنا يعني أن القلب الحديدي سيمر به تيار Induced Current هو الآخر ، ويسمى هذا التيار بالـ eddy current .

وبالطبع فإن هذا التيار غير مرغوب فيه ، ويمثل فقد للقدرة على صورة حرارة تتولد في القلب ، ولذا فإننا نعمل بشتى الطرق على تقليل قيمة تيار eddy current.

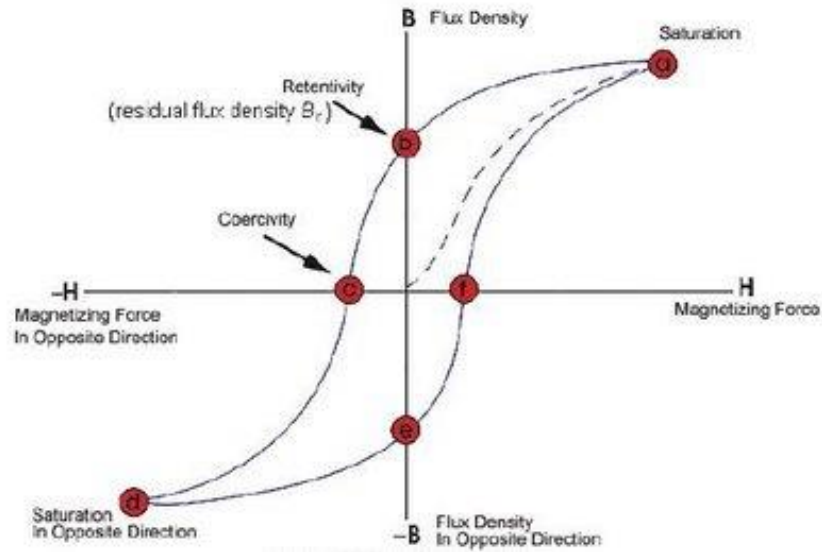
ومن هذه الطرق أن نجعل مقاومة القلب الحديدي عالية حتى نقلل من قيمة التيار ، ولجعل مقاومة القلب عالية فإننا نصنع القلب من شرائح معدنية رفيعة ومضغوطة معاً و معزولة أيضاً عن بعضها ، ومن ثم تصبح  $(R = \frac{\rho l}{A})$  كبيرة جداً لأن مساحة المقطع (A) صغيرة جداً.

مع ضرورة التأكيد على أن الشرائح رغم اتصالها ببعضها ظاهرياً إلا أنه فعلياً هناك مادة عازلة بين كل شريحة والمجاورة لها ، وذلك لضمان الحصول على المقطع الكلي المطلوب للفيض لكن من شرائح لها مقطع صغير. ولتمثيل هذه الـ Power المفقودة على شكل حرارة في القلب بأننا نضيف مقاومة  $R_c$  وهي تمثل الـ power loss في القلب الحديدي كما في الشكل 2-3 .

### 2-3-2 أخذ تأثير الـ Hysteresis loss

عند مرور الفيض في القلب الحديدي فإن جزيئات القلب الحديدي تستجيب له بدرجة ما ، وتترتب بانتظام في اتجاه المجال المغناطيسي الموضوع عليها. وعند فصل الدائرة الكهربائية فإنه من المفترض أن يختفي تأثير المجال على الجزيئات ، ولكن هذا صحيح فقط في الـ Ideal Transformer.

والواقع أنه يتبقى في المادة الحديدية جزء من المغناطيسية يسمى residual flux أي أننا فقدنا جزءاً من القدرة المغناطيسية داخل المادة الحديدية هذه القدرة تسمى Hysteresis Loss . ويعبر عن هذا المفهوم من خلال الشكل 2-4 (لاحظ أن منحنى الـ B-H هو نفسه منحنى  $\Phi-I_0$  لكن على مقياس مختلف). فالمنحنى بدأ في أول دورة فقط من الصفر ثم في باقى الـ Cycles يبدأ من نقطة رقم 1 ، ويزيد حتى يصل إلى أقصى قيمة وهي النقطة a التي يحدث بعدها تشبع saturation ، ثم يبدأ في التناقص ، لكنه لما تناقصت قيمة الـ H (تذكر أن قيمتها تتناسب طردياً مع قيمة التيار) إلى الصفر لم تصل قيمة الـ B (قيمتها تتناسب طردياً مع الفيض) إلى الصفر بل ظلت لها قيمة أكبر من الصفر عند نقطة b ، وهذه القيمة هي التي يعبر عنها بأنها الفيض المتبقى residual flux في القلب بعد وصول قيمة التيار المنشئ له إلى الصفر .



شكل 4-2 : منحنى الـ Hysteresis

ويتم تمثيل تأثير الـ Hysteresis Loss في الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي Real Transformer على شكل ملف له معاوقة قدرها  $X_m$  كما في الشكل 3-2 .

وهناك سبب ثاني لظهور ملف الـ  $X_m$  في الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي ، فكما نلاحظ فإن المحول حتى لو كان بدون تحميل no load فإنه يسحب تياراً صغيراً يمر في الملف الابتدائي فقط وهو الذي سميناه excitation current ، و هذا التيار الذي يسمى أيضاً بالـ magnetizing current هو المسئول عن نشوء الفيض flux ومن ثم يجب أن يكون هناك عنصر منشأ لهذا التيار في الدائرة المكافئة.

وهناك سبب ثالث لوجود الـ  $X_m$  في الدوائر المكافئة ، وهو أنه قد لوحظ أنه في حالة وجود sinusoidal Voltage  $V_1$  على أطراف الابتدائي فإن الفيض  $\phi$  يتأخر بـ  $90^\circ$  عن الجهد  $e_1$  ، ولتمثيل هذا التأخر الموجود عملياً في دائرة المحول فإننا نضيف ملف  $X_m$  على التوازي مع  $R_c$  كما في الشكل 3-2 .

$$\text{تذكر أن : } (e_1 = - \frac{Nd\phi}{dt})$$

بالطبع فإن تمثيل  $R_c$  ،  $X_m$  على التوازي جعل من السهولة تمثيل تيار  $I_0$  المار في الابتدائي في حالة .No load

ويمكن أن نرى الآن أن التيار  $I_0$  يتكون من جزئين: الأول هو  $I_c$  المار في Core resistance,  $R_c$  ، والثاني هو  $I_m$  المار في الـ Core reactance,  $X_m$  . يمكن أن نرى أيضاً أن هذا التمثيل جعل قيمة تيار الـ magnetizing current ثابتة ولا تتغير مع تغير الحمل وهو ما أكدناه سابقاً.

**Example 32.9. (a)** A 2,200/200-V transformer draws a no-load primary current of 0.6 A and absorbs 400 watts. Find the magnetising and iron loss currents.

**(b)** A 2,200/250-V transformer takes 0.5 A at a p.f. of 0.3 on open circuit. Find magnetising and working components of no-load primary current.

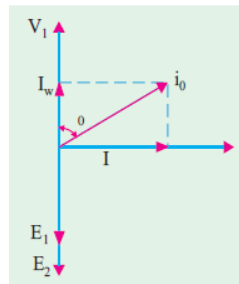
**Solution. (a)** Iron-loss current

$$= \frac{\text{no-load input in watts}}{\text{primary voltage}} = \frac{400}{2,200} = 0.182 \text{ A}$$

Now

$$I_0^2 = I_w^2 + I_\mu^2$$

$$\text{Magnetising component } I_\mu = \sqrt{(0.6^2 - 0.182^2)} = 0.572 \text{ A}$$



**(b)**  $I_0 = 0.5 \text{ A}, \cos \phi_0 = 0.3 \therefore I_w = I_0 \cos \phi_0 = 0.5 \times 0.3 = 0.15 \text{ A}$   
 $I_\mu = \sqrt{0.5^2 - 0.15^2} = 0.476 \text{ A}$

## 4-2 تبسيط الدائرة المكافئة

طالما بقي المحول بمفليه الابتدائي والثانوي موجودين في الدائرة المكافئة فإن هذه الدائرة لا تزال تعتبر معقدة ، لأنك يجب أن توجد قيمة التيار في دائرتين منفصلتين كما في الشكل التالي، وهذا يصعب حل أى مسألة.

إن يجب التخلص من الملفين حتى تصبح الدائرة المكافئة متصلة ومكونة من دائرة كهربية واحدة . هذه الدائرة الواحدة يتصل المصدر بطرفيها من جهة ، ويتصل الحمل بطرفيها من الجهة الأخرى ، وخط الرجوع مشترك ، ويجب أن تعطى الدائرة المكافئة الجديدة نفس النتائج الخاصة بخواص التشغيل الأساسية للمحول. ولكي نتخلص من الملفين بصورة علمية يجب أن يصبح الجهد على طرفيها من الجهتين متساويا ، بمعنى أن تصبح القوة الدافعة الكهربائية في الملف الثانوي مساوية للقوة الدافعة الكهربائية للملف الابتدائي ، فيمكن عندئذ إلغاء الملفين استنادا إلى كون الجهد متساوى عند نقطتي الاتصال ، ومن ثم لا يحدث تأثير على بقية الخواص الكهربائية.

ولكن كيف يمكن أن تتم هذه المساواة؟

هذا يحدث إذا أصبح عدد ملفات الثانوى مساويا  $T'_s$  بدلا من  $T_s$  و بشرط أن تكون  $T'_s = T_p$  ، وفى هذه الحالة ستصبح  $E'_2 = E_1$  ، ويقال فى هذه الحالة أننا "ننسب" Refer الملف الثانوى إلى الملف الابتدائى ، ويمكن أيضا - إذا شئنا - أن يحدث العكس أى ننسب الابتدائى إلى الثانوى.

وللتأكد من أن الدائرة الجديدة تكافئ فعلا الدائرة الأصلية يجب تحقق شرطان :

- الأول أن تكون الـ Losses فى كلاهما متساوية حتى لا تتغير حسابات الكفاءة .
- الثانى يجب يتساوى الـ Voltage drop خلال المقاومة والمعاوقة فى الدائرة الأصلية والدائرة الجديدة حتى لا تتغير قيمة الـ Regulation.

والشرط الأول معناه أن

$$(I'_s)^2 R'_s = I_s^2 R_s$$

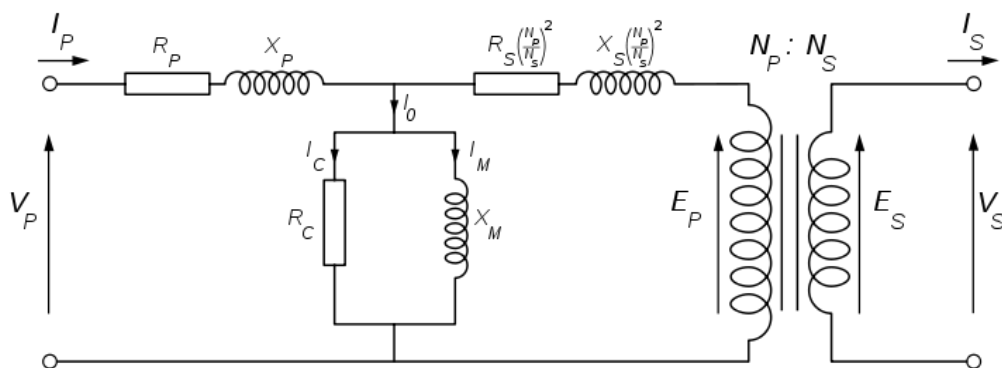
ومنها نحدد قيمة

$$R'_s = R_s \frac{N_p^2}{N_s^2}$$

وبالمثل يمكن أن نثبت أن

$$R'_p = R_p \frac{N_s^2}{N_p^2}$$

ومعنى هذا الكلام أننا لو نقلنا كلا من  $X_s$  &  $R_s$  إلى الجهة الأخرى وتغيرت قيمهما ليصبحا كما فى المعادلتين السابقتين فإن الدائرة الجديدة تكون فعلا مكافئة للدائرة الأصلية ، ومن ثم يمكن إعادة رسم الشكل 2-3 ليصبح كما فى الشكل 2-4 :



شكل 2-4 : أول درجات تبسيط الدائرة المكافئة

## مثال شامل على الدائرة المكافئة للمحولات

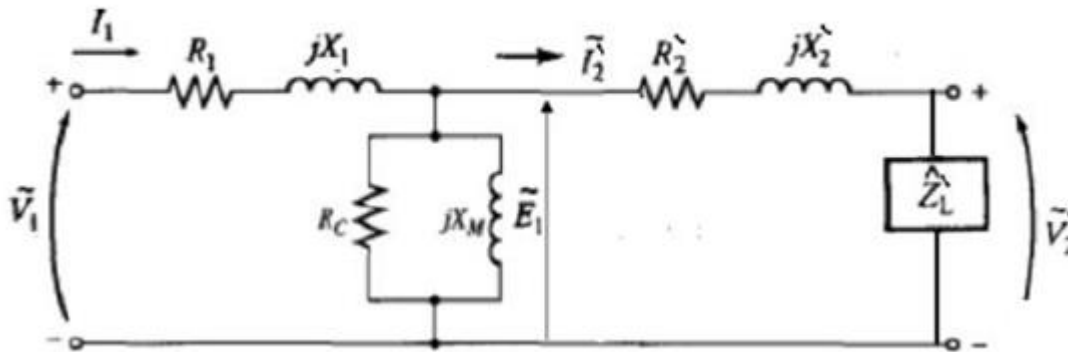
A 15-kVA, 2400:240-V, 60 Hz transformer has the following equivalent circuit parameters:

$$\begin{array}{lll} R_1 = 2.5\Omega & R_2 = 0.025\Omega & X_1 = 7\Omega \\ X_2 = 0.07\Omega & R_c = 32\text{ k}\Omega & X_m = 11.5\text{ k}\Omega \end{array}$$

If the transformer is supplying a 10-kW, 0.8 PF lagging load at rated voltage, assuming the output voltage is the reference, **draw** the transformer's **exact** equivalent circuit referred to the primary (H.V) side and use it to **calculate**:

1. The input current
2. The input voltage
3. The input power factor

## Solution



## 1. The input current

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_o + \bar{I}_2'$$

$$|\bar{I}_2'| = \frac{P_{load}}{|\bar{V}_2'| * pf} = \frac{10 * 10^3}{2400 * 0.8} = 5.2 \text{ Amp}$$

$$\bar{I}_2' = |\bar{I}_2'| \angle (-\cos^{-1}(p.f)) = 5.2 \angle -\cos^{-1}(0.8) = 5.2 \angle -36.87 \text{ Amp}$$

$$\bar{I}_o = \frac{\bar{E}_1}{R_c // X_m}$$

$$\bar{E}_1 = \bar{V}_2' + \bar{I}_2'(R_2' + jX_2')$$

$$= 2400\angle 0 + 5.2\angle -36.87(10^2 * 0.025 + j10^2 * 0.07)$$

$$= 2432.4\angle 0.5 \text{ volt}$$

$$R_c // X_m = \frac{R_c * X_m}{R_c + X_m} = \frac{32 * 10^3 * j11.5 * 10^3}{32 * 10^3 + j11.5 * 10^3} = 10.82\angle 70.23 \text{ k}\Omega$$

$$\bar{I}_o = \frac{2432.4\angle 0.5}{10822\angle 70.23} = 0.2247\angle -69.73 \text{ Amp}$$

$$\bar{I}_1 = 0.2247\angle -69.73 + 5.2\angle -36.87 = 5.4\angle -38.16 \text{ Amp}$$

## 2. The input voltage

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1(R_1' + jX_1')$$

$$= 2432.4\angle 0.5 + 5.4\angle -38.16 (2.5 + j7)$$

$$= 2466.6\angle 0.99 \text{ volt}$$

## 3. The input power factor

$$pf_{inp} = \cos(\angle \bar{V}_1 - \angle \bar{I}_1)$$

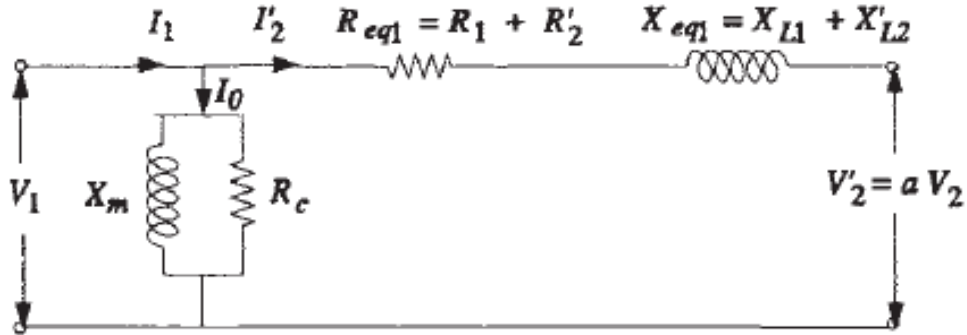
$$= \cos(0.99 + 38.16)$$

$$= 0.775$$

ويمكن لمزيد من التبسيط كخطوة ثانية نقل الدائرة الممثلة للفقد في الـ magnetic circuit إلى أقصى اليسار، حيث التغير الذي أهملناه في قيمة الجهد يعتبر بسيطاً ، كما أن هذا سيسهل جمع المقاومات معا

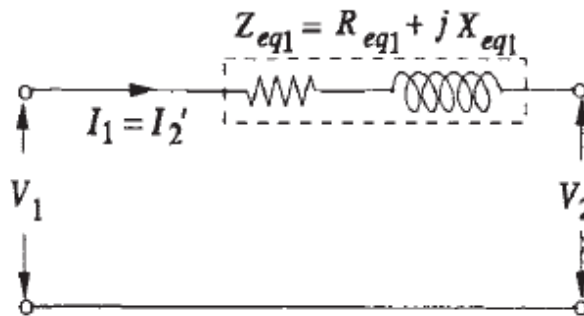


للحصول على  $R_{eq1}$  وكذلك جمع المعاوقات معا للحصول على  $X_{eq1}$  ، ويصبح بعد ذلك كما في الشكل 5-2 .



شكل 5-2 : درجة ثانية للتبسيط

ويمكن أيضا إهمال power loss في الـ Core ، ومن ثم إلغاء الدائرة المرسومة على التوازي في الشكل السابق ويصبح بعد ذلك كما في الشكل 6-2 .



شكل 6-2 : درجة ثالثة للتبسيط

وللحصول على أقصى درجات التبسيط ، فإننا يمكن أن نهمل قيمة الـ  $R_{eq}$  مقارنة بقيم الـ  $X_{eq}$  ومن ثم يصبح المحول كما لو كان ممثلاً فقط بـ  $X$  فقط. وهذا هو السبب في أهمية قيمة  $X\%$  للمحول .

## 5-2 أهمية حسابات الـ PER UNIT

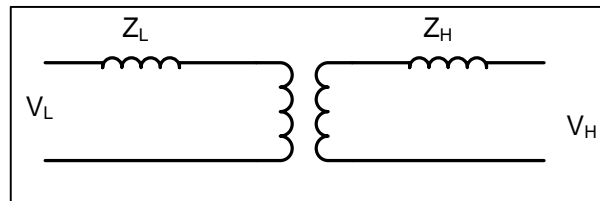
من المعروف أنه لولا وجود المحولات في الشبكات لما كان هناك أى مشكلة في حساب Short Circuits لكن المحولات هي مصدر الصعوبة في حسابات تيارات القصر بالشبكات ، وذلك لسبب واضح وهي أن لها جهدين مختلفين على جانبيها الابتدائي والثانوي ، ومن ثم تنقسم الشبكة في حالة وجود محول واحد فقط إلى شبكتين وتحتاج لحساب التيارات في شبكتين وليس شبكة واحدة ، ومن ثم فلك أن تتخيل لو وجد

خمس محولات بالشبكة كيف ستكون حجم العمليات الحسابية على جوانبها. بل إن كل محول يرى الشبكة من ناحية الملفات الابتدائية بقيمة مقاومات مختلفة عن قيمتها من جهة الملفات الثانوية.

أما لو خلت الشبكة من المحولات فستصبح مثل أى دائرة كبيرة عادية يمكن إيجاد المقاومة المكافئة لها بمجموعات حسابات بسيطة للمقاومات على التوالي والمقاومات على التوازي أو باستخدام طرق الحل المشهورة مثل Supper position أو Thevenen. وأحد الطرق المشهورة للتخلص من مشكلة المحولات هي طريقة Per Unit .

والأسس المرجعية لهذه الطريقة بسيطة جداً فإنك لو قلت أن زيدا (165 سم) طويل فربما كنت تقارنه بعمرى الذى لا يزيد طوله عن (150سم) لكن سيجئ آخر ويقول إن زيدا قصير جداً لأنه قارنه بأحمد الذى يبلغ 180 سم ، وهكذا سيختلف الناس فى الحكم على شخص واحد لأن المرجعية عندهم مختلفة. أما لو تم تحديد المرجعية وقلنا مثلاً : أن الطول القياسى هو 160سم فعندها لن يختلف أحد أن أحمد طويل فعلاً وأن عمرو قصير .

وعلى نفس هذا المنوال تم حل مشكلة المحولات فى طريقة الـ Perunit . فلو نظرنا للمحول فى الشكل 7-2 سنجد أن له معاوقة  $Z_H$  وهى معاوقة المحول منسوبة لـ High V. Side وهى تختلف عن المعاوقة  $Z_L$  المنسوبة لـ Low Side . فأيهما سنأخذها فى الاعتبار عند حل الشبكة؟ .



شكل 7-2 : محول أولى

الجواب: لا هذه ، ولا تلك ، بل سنأخذ فى الاعتبار قيمة جديدة اسمها  $Z_{p.u}$  وسنثبت هنا أن هذه القيمة لو نظرت إليها من الجانب الثانوى للمحول ستعطيك نفس القيمة التى يراها المحول من الجانب الابتدائى. وتعرف  $Z_{p.u}$  بأنها:

$$Z_{p.u} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{Base}}$$

وتعرف  $Z_{Base}$  بأنها

$$Z_{Base} = \frac{V_{Base}}{I_{Base}}$$

و  $V_{Base}$  للجانب الابتدائي هي  $V_H$  أما للجانب الثانوي هي  $V_L$  . والكلام ينطبق تماماً على  $I_{Base}$  . ولعمل مرجعية واحدة لكل عناصر الشبكة فإن كل قيم المقاومات في الشبكة ستحسب بالنسبة لقدرة رمزية تسمى  $MVA_{Base}$  ، وبما أنها رمزية فإننا يمكننا أن نفرض لها أى قيمة. ويمكن بسهولة أن نثبت أنه لو فرض أكثر من شخص قيمة مختلفة لها فينتج الجميع فى النهاية حلاً واحداً كما سنرى ، لأنها مجرد رقم مرجعى .Refernce Value

وتحسب  $Z_{p.u}$  بمعلومية  $MVA_{Base}$  كما فى المعادلة التالية:

$$Z_{p.u} = Z_{\Omega} \frac{MVA_{Base}}{kV_B^2}$$

وهذه هي المعادلة الرئيسية لهذه الطريقة.

ولنبداً بتطبيق هذه الطريقة على أصعب عناصر الشبكة وهي المحولات فنحسب  $Z_{p.u}$  للمحول.

$$Z_{p.u} = Z_{\Omega} \frac{MVA_B}{kV_B^2}$$

والسؤال الآن هو: ما هي  $Z_{\Omega}$  ؟ هل هي  $Z_L$  أم  $Z_H$  ؟. و الإجابة: لا فرق. فإذا استخدمت أياً منهما ستعطيك نفس الإجابة. ولنفرض أن  $Z_{\Omega}$  هي  $Z_L$  مرة و  $Z_H$  مرة أخرى ثم نقارن الحالتين معا لنكتشف المفاجأة السارة وهي أنهما متساويتان .

$$\therefore Z_{p.u_1} = Z_L \times \frac{MVA_B}{kV_L^2}$$

$$Z_{p.u_2} = Z_H \times \frac{MVA_B}{kV_H^2}$$

$$\frac{Z_{p.u_1}}{Z_{p.u_2}} = \frac{Z_L}{Z_H} \times \frac{kV_H^2}{kV_L^2} = \left( \frac{Z_L}{Z_H} \right) \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 1$$

بمعنى آخر أنك لو استخدمت  $Z_{p.u}$  في الحسابات فسيصبح المحول مثل أى عنصر فى المنظومة بمعنى أن له مقاومة واحدة فقط هي  $Z_{p.u}$  ، وليس قيمتين كما فى الحسابات التقليدية .

إذن فالميزة الأساسية لهذه الطريقة أن صار لنا مرجعية واحدة نرجع إليها قيم كل المقاومات سواء كانت فى الجانب الأول أم الثانى للمحول . وعلى هذا فإذا قيل أن  $Z_{p.u}$  للمحول تساوى مثلاً 5% ، فليس هناك معنى أن نسأل أن كانت هذه القيمة هي  $Z_{p.u}$  بالنسبة للابتدائي أم الثانوي ، فليس هناك فرق . لكن كل ما هناك أن هذه القيمة محسوبة لقدرة مرجعية معينة وبالتالي فيجب وأنت تقول أن  $Z_{p.u}$  للمحول تساوى 5% أن تذكر كذلك قيمة Prated التى حسبت طبقاً لها هذه القيمة.

ملحوظة:

إذا ضربنا قيمة  $(X_{p.u})$  السابقة في 100 تصبح تسمى  $X\%$ .

النتيجة التي وصلنا إليها سواء في المرحلة الأخيرة من تبسيط الدائرة المكافئة ، أو في الجزء الخاص بتوضيح معنى الـ Per unit تفسر لماذا عمليا تجد الـ name plate لأي محول لا يعطيك قيم  $R$  ،  $X$  ، التي سبق الحديث عنها في الجزء السابق ، وإنما يعطيك فقط قيمة  $X\%$  أو  $X_{p.u}$  وهما صورة أخرى من التعبير عن قيمة الـ  $X$  المكافئة بالأوم التي وصلنا إليها.

أما إذا أردت الحصول على قيم  $R_1$  ،  $X_1$  ،  $R_C$  ،  $X_2$  إلخ ، فإنك تحتاج إلى إجراء بعض الاختبارات العملية المعروفة بـ No load test و short circuit test كما سندرس ذلك بالتفاصيل في فصل الاختبارات في الباب الرابع.

## 6-2 ما أهمية معرفة قيمة $X\%$ ؟

قيمة  $X\%$  لأي محول لها عدة استخدامات ، فهي مثلا تمثل قيمة voltage drop كنسبة مئوية. على سبيل المثال إذا كان المحول 2400 / 240 وكانت  $X\%$  له تساوي 3% ، إذن عند الـ Full load ستكون نسبة الهبوط في الجهد خلال الـ impedance الداخلية للمحول تساوي أيضا 3% ، وهذا يعني أن الجهد على أطراف الجانب الثانوي سينخفض بنسبة 3% عن القيمة الاسمية (عند التحميل الكامل Full load ) بسبب وجود الـ  $X$  .

أي أن الهبوط خلال  $X\% =$

$$72 \text{ V} = \frac{3}{100} \times 2400$$

وهذا يعني أنك يمكنك حساب قيمة الجهد عند أطراف الثانوي أثناء التحميل الكامل مباشرة دون قياس وذلك كما في المعادلة التالية:

$$2400 - 72 = V_2$$

وهذا يعني مرة أخرى أن هذه الـ  $X$  تسبب في هبوط قدرة 72V عند مرور تيار الـ F.L ، مع ملاحظة أن كل ما سبق يفترض أننا نهمل قيمة المقاومة  $R$  للملفات وهذا عمليا مقبول لأن قيمة  $R \ll X$  .

أما إذا كانت  $R$  غير مهملة فإننا نستخدم  $Z\%$  بدلا من  $X\%$  ، والعلاقة بينهما معروفة من المعادلة التالية

$$Z_{pu} = \frac{Z_{eq}(\Omega)}{Z_{base}} = \frac{I_{rated} Z_{eq}}{V_{rated}} = R_{pu} + jX_{pu}$$

وهناك استخدام آخر مهم جداً لقيمة  $X\%$  وذلك في حساب الـ S.C ، فالمعلوم أنه كلما زادت قيمة  $X\%$  للمحول كلما قلت قيمة Short Circuit Capacity الناشئة في الجانب الآخر من المحول ، لكن بالطبع هذه الميزة سيعني بالضرورة ارتفاع قيمة الهبوط في الجهد كما ذكرنا .

ولها استخدام ثالث وذلك عند عمل الـ Short circuit test ، حيث إن  $X\%$  تعني جهد معاوقة المحول – percentage impedance voltage ، وهو الجهد المطلوب تسليطه على أحد ملفي المحول لإمرار التيار المقنن Rated في كلا الملفين عندما يتم وضع دائرة قصر short على الملف الآخر ، وهذا الجهد يعبر عنه بالنسبة المئوية من الجهد المقنن ، وهذه النسبة هي نفسها الـ percentage impedance voltage ، فلو كلنت قيمتها تساوى مثلاً  $3\%$  فهذا يعني أنك تحتاج إلى  $3\%$  من قيمة الجهد المقنن فقط في الـ Short circuit test لتمثيل قيمة التيار المقنن Rated current .

**Example:** Determine the interrupting capacity, in amperes, of a circuit breaker or fuse required for a 75 KVA, three phase transformer, with a primary of 480 volts delta and secondary of 208Y/120 volts. The transformer impedance ( $Z$ ) = 5%. If the secondary is short circuited (faulted), the following capacities are required:

Normal Full Load Current =

$$\frac{\text{Volt Amps}}{\sqrt{3} \times \text{Line Volts}} = \frac{75,000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \times 480 \text{ V}}$$

90 Amps

Maximum Short Circuit Line Current =

$$\frac{\text{Full Load Amps}}{5\%} = \frac{90 \text{ Amps}}{5\%}$$

1,800 Amps

The breaker or fuse would have a minimum interrupting rating of 1,800 amps at 480 volts.

**NOTE:** The secondary voltage is not used in the calculation. The reason is the primary circuit of the transformer is the only winding being interrupted.

ويمكن معرفة قيمة الدنيا للـ  $Z\%$  للمحول من الجدول التالي المأخوذ من مواصفات الـ IEC (القيمة الأدق تؤخذ مباشرة من لوحة معلومات المحول):

Table 1 – Recognized minimum values of short-circuit impedance for transformers with two separate windings

Short-circuit impedance at rated current	
Rated power kVA	Minimum short-circuit impedance %
Up to 630	4,0
631 to 1 250	5,0
1 251 to 2 500	6,0
2 501 to 6 300	7,0
6 301 to 25 000	8,0
25 001 to 40 000	10,0
40 001 to 63 000	11,0
63 001 to 100 000	12,5
Above 100 000	>12,5

## 7-2 حساب القوى الداخلية بين الموصلات بالمحول

من الحسابات الهامة أيضا التي يجب دراستها بعمق عند دراسة المحولات حسابات القوى الميكانيكية (التجاذب / التنافر) بين الموصلات الكهربائية الحاملة للتيار. وتظهر أهمية هذا الموضوع عند دراسة الـ S.C في المحولات حيث يمر تيار كهربائي عالي جداً بالملفات وينشأ عن هذا التيار قوى ميكانيكية كبيرة قد تتسبب في تفكك المحول نفسه لاسيما في المحولات التي يكون الملفات الابتدائية والثانوية فيها متداخلة داخل بعضها .

### 2-7-1 القوة المؤثرة على موصل منفرد

من الأساسيات في الكهرومغناطيسية أن مرور التيار في موصل يكون دائما مصاحبا بفيض كما ذكرنا ، و قد أثبت فاراداي أيضا أن أى موصل يمر به تيار  $I$  ، و يقطع فيضا مغناطيسيا كثافته  $B$  ، فإنه يتعرض لقوة مغناطيسية قدرها  $F$  حيث

$$F \propto I \times B$$

لاحظ أنه في حالة المحول فإن الـ  $B$  في المعادلة هي كثافة الفيض المتسرب و ليس الفيض الأصلي الذي يمر بالـ Core في المحول ، لأن الفيض الأصلي ترك الموصل و مر في القلب ، وأصبح غير مرتبط به .

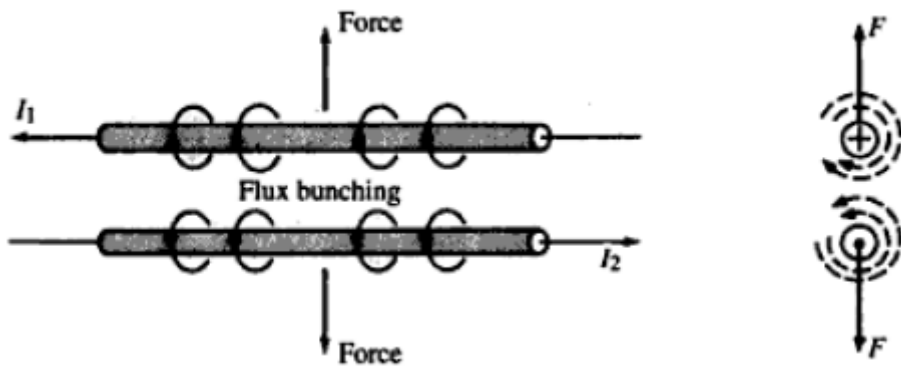
أما في حالة دراسة المحركات فإن القيمة الكبرى للـ  $B$  هي المرتبطة بالأسلاك المكونة للـ Motor windings ، ومن ثم تكون الـ Force الواقعة على ملفات الموتور كبيرة فتتحركه ، على عكس الحالة هنا في المحولات ، فالـ Force الناشئة عن الـ Leakage flux والمؤثرة على ملفات المحول لحسن الحظ غير كبيرة ومن ثم لا يتحرك الملف كما في الموتور (لكنها أيضا ليست مهملة كما سنرى) .

## 2-7-2 حسابات القوى المغناطيسية بين موصلين :-

الآن إذا كان لدينا موصلين متجاورين يحمل كل منهما تيار قدرة  $i_1$  ,  $i_2$  على الترتيب ، فإنه تنشأ بينهما قوة (تجاذب \ تنافر) تتوقف قيمتها على قيمة التيارين ، و المسافة بين السلكيين حسب القانون

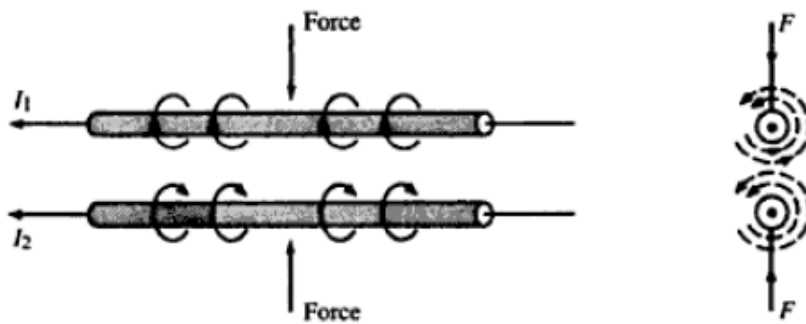
$$|F_x| = i_1 \times i_2 \times \frac{\mu_0}{2\pi r}$$

و يتحدد اتجاه القوة ( تجاذب \ تنافر ) حسب اتجاه التيارين ، فإذا كانا متعاكسين كانت القوة بينهما قوة تنافر كما في الشكل 8-2 .



شكل 8-2 : تأثير تجاور الموصلات الحاملة لتيارات متعاكسة الاتجاه

و إذا كانا في اتجاه واحد كانت القوة المغناطيسية بينهما هي قوة تجاذب كما في الشكل 9-2 .



شكل 9-2 : تأثير تجاور الموصلات الحاملة لتيارات متحدة الاتجاه

و تحدد قاعدة فلمنج لليد اليسرى اتجاه القوة المؤثرة على موصل يمر فيه تيار و موضوع في اتجاه مجال مغناطيسي.

هذه القوى الميكانيكية بين الموصلات تتوقف على عاملين أساسيين (بفرض ثبات المسافة بين الموصلات)

- الأول هو شدة تيار العطل

- والثاني هو مدة سريان تيار العطل

ومن ثم نذكر هنا بأهمية ودور أجهزة الوقاية فكلما كانت هذه الأجهزة دقيقة وسريعة كلما كان فصل العطل سريعا وهذا يقلل من القوى المؤثرة على الملفات

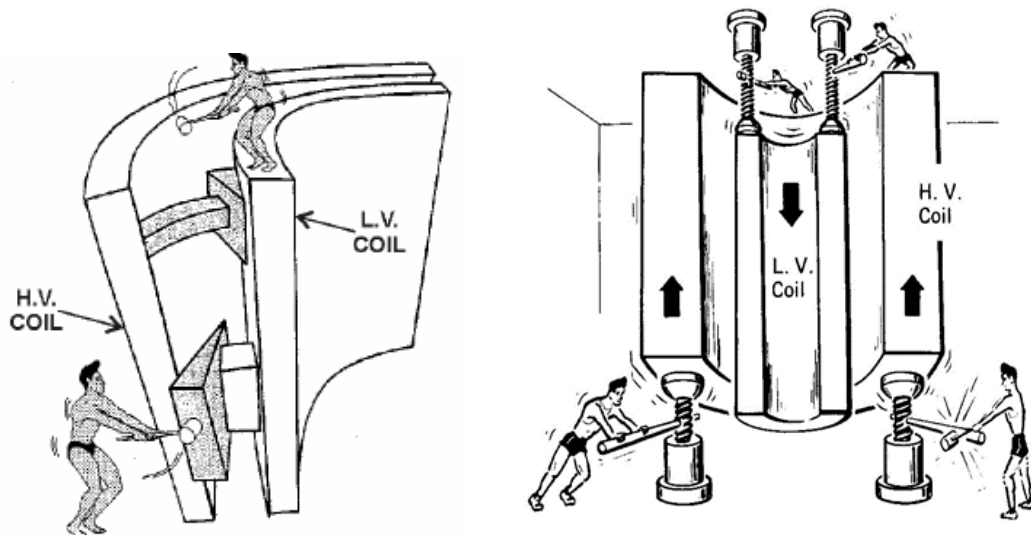
### 2-7-3 ما هي العناصر المسؤولة عن هذه القوى الميكانيكية؟

من المعروف أنه خلال المرور الطبيعي للتيار في محول له قطبية موجبة Additive Polarity يكون اتجاه مرور التيار في الملف الابتدائي عكس اتجاه مرور التيار في الملف الثانوي ، ومن ثم يزيد الجهدين معا وينقصا معا دون تغير في الـ Phase كما سنرى في فصل القطبية في الباب الثالث من هذا الكتاب ، ورغم اختلاف قيمة التيارين إلا أن الـ Ampere Turn A.T لكلا الملفين متساوية ومتعاكسة . وحيث أنه يوجد فيض متسرب Flux Leakage حول كل موصل في كلا الملفين فهناك قوة طرد بينهما للخارج تزيد بالطبع كلما زاد التيار .

لاحظ أننا نتحدث فقط عن تأثير  $\phi$  leakage Flux وليس عن الفيض الأصلي الذي يمر بالـ Core فهذا الذي يمر بالـ Core لا ينتج أي قوى مؤثرة على الـ conductors لأنه غير مرتبط به أصلا .

### 2-7-4 اتجاه القوى المغناطيسية الميكانيكية أثناء الأعطال

أثناء حدوث العطل يكون اتجاه القوى الميكانيكية مركبا ومعقدا ، فملفات الـ H.V تميل للصعود لأعلى عكس ملفات LV ، و في نفس الوقت يميل الملفان للتباعد أفقيا كما في الشكل 2-10 و كل هذا ينعكس بمعدل 50 مرة في الثانية الواحدة بفرض أن لدينا (50 Hz System) .



شكل 2-10 : القوى الميكانيكية الناشئة داخل محول



و هذا يعطي إشارة لأهمية أن يكون الترابط في المحولات محسوبا بدقة و إلا تفكك المحول مع أول عطل يحدث به.

ملحوظة: من المشاكل الأخرى التي تنتج عن تيار العطل - بالإضافة إلى القوى الميكانيكية - مشكلة الشرارة التي تنتج داخليا نتيجة انهيار العزل بين الملفات ، وهذه الشرارة تكون مصاحبة بحرارة عالية تتسبب في تسخين الزيت فيشتعل ، و يزداد الضغط داخل TANK حتى يصل إلى حد الانفجار.

## الفصل الثالث

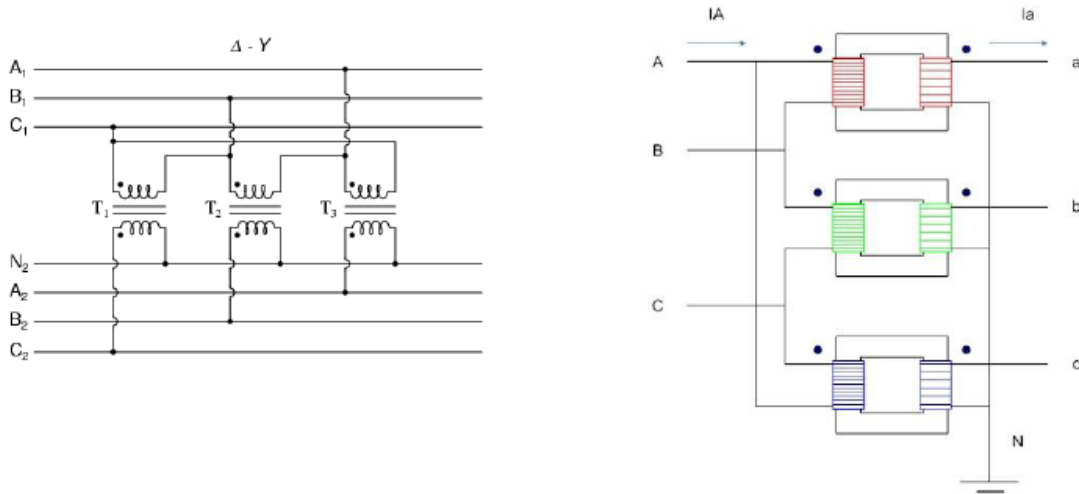
### المحولات الثلاثية الأوجه

#### 3-Ø Transformers

معظم محولات القوى في المحطات تكون من النوع ثلاثية الأوجه (3-Ø) ، أما المحولات أحادية الوجه (1-Ø) فتطبيقاتها محدودة بالأحمال الصغيرة فقط. و للحصول على محول 3-Ø فهناك طريقتين :

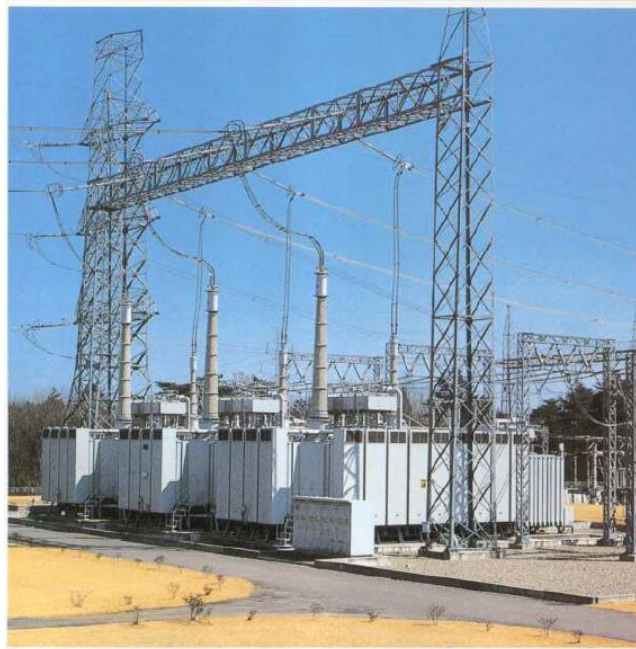
### 1-3 الطريقة الأولى للحصول على محولات الـ 3-Ø

وفيها نستخدم 3 محولات Three Banks من النوع الـ 1-Ø، و نوصلهم معا بحيث يتم توصيل الأطراف الستة للملفات الابتدائية معا على شكل ستار مثلا أو على شكل دلتا ، وبالمثل فإن الأطراف الستة للملفات الثانوية يمكن أن تكون Y أو دلتا كما في الشكل 1-3.



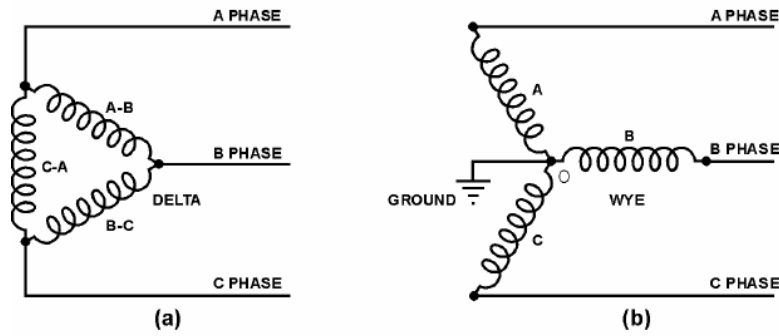
شكل 1-3 : محول ثلاثي مكون من ثلاثة محولات أحادية

والشكل 2-3 تظهر فيه مجموعة محولات أحادية متصلة معا لتكون محولات ثلاثية



شكل 3-2 : صورة حقيقية لمحولات ثلاثية مكون مصنعة من محولات أحادية

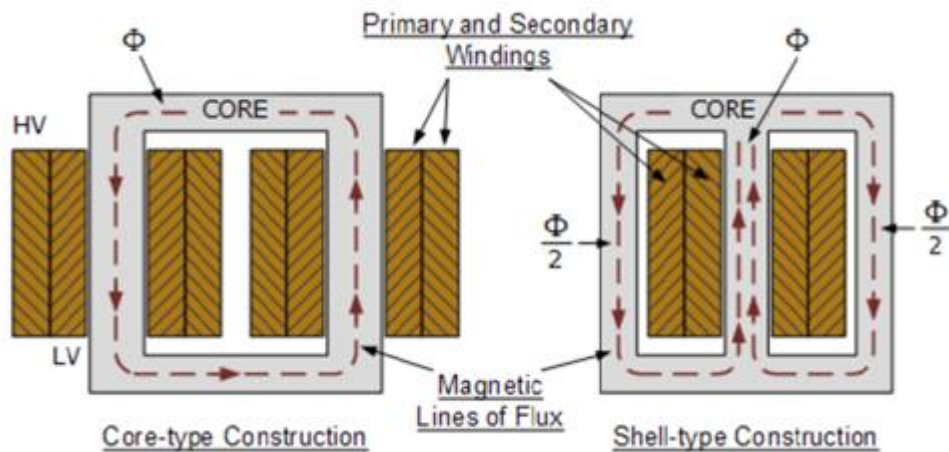
والشكل 3-3 يمثل الطريقة الـ Standard في التعبير عن توصيلة الدلتا (إلى اليسار) ، وتوصيلة الـ Y (إلى اليمين).



شكل 3-3 : توصيلة الدلتا (الأيمن) وتوصيلة الـ Star

## 2-3 الطريقة الثانية لتصنيع المحولات الـ 3-Ø :

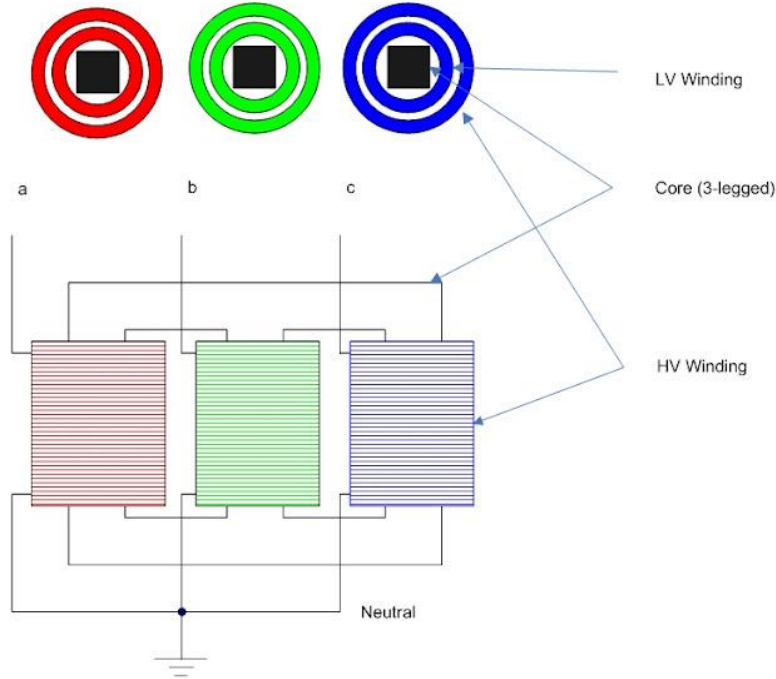
المحولات بصفة عامة سواء كانت أحادية أو ثلاثية يكون وضع الملفات بالنسبة للقلب على طريقة من طريقتين: core type and Shell type كما في الشكل التالي الذي يظهر الطريقتين في حالة المحولات الأحادية Single phase transformers .



وبنفس الطريقة تكون المحولات الـ 3-Ø مصنوعة من قلب حديدي ثلاثي كوحدة واحدة مباشرة (و ليس من ثلاث محولات أحادية كما في النوع السابق) . وقلب المحولات الـ 3-Ø يمكن أن يصنع بإحدى الطريقتين وهما الـ Core-type أو Shell-type ، وتسميها المراجع العربية بالمحولات القلبية والمحولات القشرية.

على سبيل المثال في حالة استخدام طريقة الـ Core-type ، يكون القلب الحديدي مكون من 3 أعمدة 3-limbs ، و يوضع ملف الـ LV الخاصة بالـ phase-A حول العمود الأول ، ثم توضع فوقها ملفات

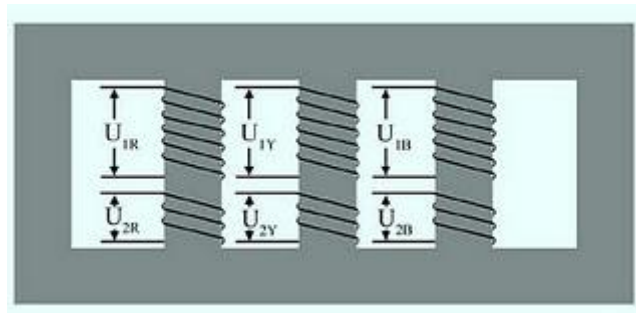
ال HV الخاصة بنفس ال phase ، و هكذا في ال 2-phases الأخرى كما في الشكل 3-4 . وبالطبع هناك عزل بين الملفين في كل Phase .

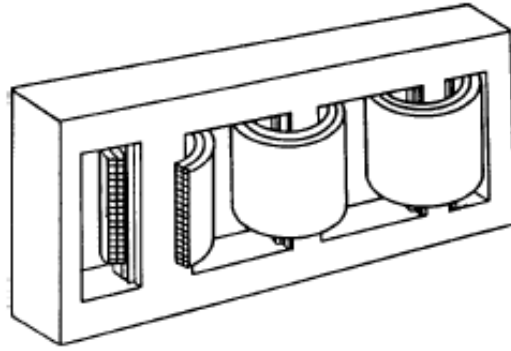


شكل 3-4 : محول ثلاثي Core Type

وعملياً يتم تجهيز ملفي كل Phase بصورة منفصلة ثم توضع الملفات في فرن التجفيف بدرجة حرارة 120 مئوية لمدة 24 ساعة ، وبعد إخراجها من الفرن توضع مباشرة تحت تأثير مكبس خاص لتحديد طول الملف ودرجة تماسك طبقات الملف الواحد ، وبعد ذلك يتم إنزال الفيزات الثلاثة ، حيث يتم إنزال ال Phase الأوسط على العمود الأوسط للقلب الحديدي ، ثم ال Phase الآخرين بعد ذلك.

ويمكن تصنيع القلب الحديدي أيضاً بطريقة ال Shell Form ، وتسمى أيضاً بالمحولات القشرية كما في الشكل 3-5 .





شكل 3-5 محول Shell Type له خمس أذرع

والهدف في كلا الطريقتين هو ضمان أن الفيض الناشئ من ملفات L.V سيرتبط بدرجة كبيرة بملفات الـ H.V دون تشتت للفيض ، و دون تسرب كبير . وهناك تفاصيل أكثر عن طريقة التصنيع تجدها في الباب الثاني من الكتاب.

### الفرق بين طريقتي تكوين المحولات الثلاثية

تتميز طريقة Banks-3 لتكوين محولات الـ  $3-\emptyset$  بالسهولة في كل شيء ، سواء في صيانتها ، أو تركيبها ، لكنه يشغل حيزا أكبر من النوع الثاني الذي تكون الـ  $3-\emptyset$  فيه وحدة واحدة ، كما أن تكلفة النوع الأول أكبر أيضا بنسبة حوالي 25% ، كما أن الوزن أيضا يكون أكبر .

غير أن استخدام ثلاثة محولات أحادية لتكوين محول واحد ثلاثي لها ميزة هامة رغم العيوب السابقة وهي أننا يمكن أن يكون لدينا محول رابع أحادي يمثل محول طوارئ في حالة خروج أي من المحولات الثلاثة من الخدمة ، بينما في حالة المحول الثلاثي المصنع كوحدة واحدة فإننا نحتاج إلى محول مثله ليكون محول طوارئ وهذا يمثل تكلفة أكبر .

## 3-3 توصيل الملفات وحسابات الجهد والقدرة في الـ $3-\emptyset$

هناك العديد من الطرق لتوصيل الملفات في المحولات الثلاثية ، لكن تظل الأربعة طرق المرسومة في الشكل 3-6 هي الأكثر انتشار ، وهي على الترتيب كما في الرسم :

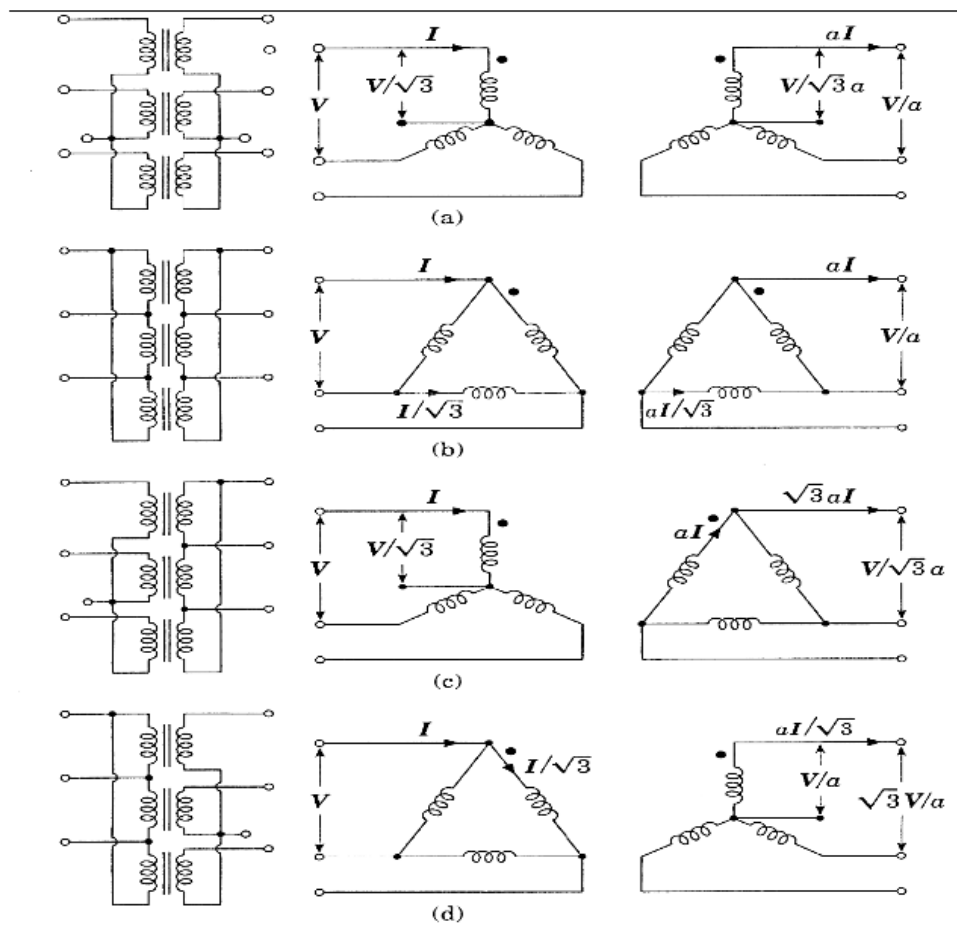
1- طريقة Wye – Wye ، وتعرف أيضا بطريقة Star – Star ، وهي طريقة قليلة الاستخدام لأنها تعاني من مشاكل عديدة في حالة عدم اتزان الأحمال Unbalanced Loads .

2- طريقة Delta – Delta ، وتتميز هذه الطريقة بأنه في حالة فصل واحد من الملفات الثلاثة (أو واحد من المحولات الثلاثة إذا كنا نستخدم طريقة الـ Banks-3 ) فإن المحولين الباقيين يمكنهما

الاستمرار في الخدمة ، وإنتاج ما يعادل 58% من القدرة الاسمية الأصلية. (أحيانا يستخدم البعض اللفظ (mesh) للتعبير عن الـ Delta وكلها مترادفات ).

3- طريقة الـ Wye – Delta، وتعرف أيضا بطريقة (Star-Delta) ، وتستخدم غالبا مع محولات الـ Step-down ، حيث يوصل جانب الـ Star إلى الجهد العالي لتخفيض تكلفة العوازل ، حيث يكون الجهد مساويا  $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ .

4- طريقة Delta – Wye ، وتعرف أيضا بطريقة Delta-Star ، وتستخدم في محولات الـ Step up على عكس طريقة (Star-Delta) السابقة ولنفس الأسباب التي ذكرناها. (بصفة عامة التوصيل جهة الجهد العالي يكون star حتى يكون الجهد على العوازل مقسوما على جذر 3)

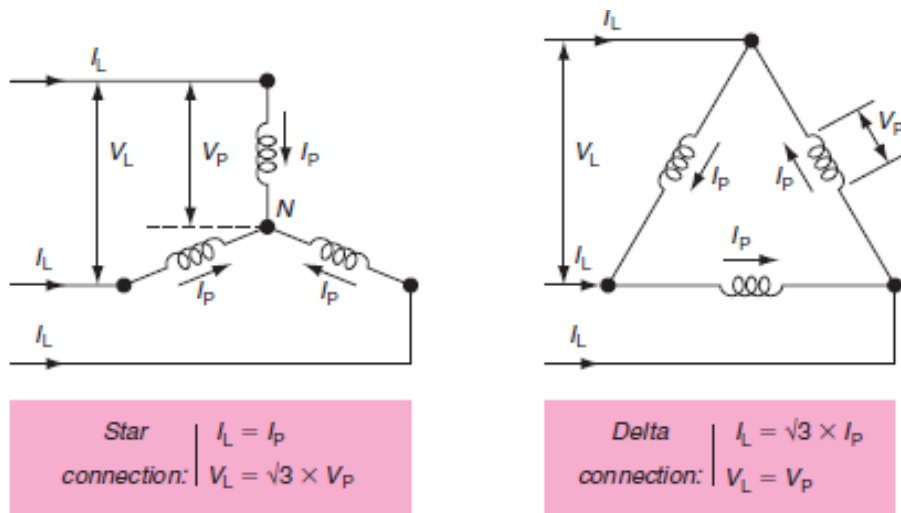


شكل 3-6 : التوصيلات الأشهر في المحولات الثلاثة

ولكل طريقة من الطرق الأربعة تفاصيل أخرى لميزاتها وعيوبها ، وسنتعرف على ذلك بالتفصيل في الباب الثالث.

### 3-3-1 العلاقات الحاكمة للجهد في محولات الـ 3-Ø

كما ذكرنا ، فإن الطريقتين الأكثر شيوعاً لتوصيل الملفات الثلاثة في كل جانب من جانبي المحول هما : إما على شكل دلتا ، أو على شكل ستار ، وفي كلا الحالتين لدينا نوعين من الجهد كما في الشكل : الأول هو الجهد بين أى Two lines ويسمى بالـ Line Voltage,  $V_L$  ، والثاني هو الجهد المباشر على الـ Winding ويسمى بالـ Phase Voltage,  $V_P$ . والعلاقة بينهما واضحة في الشكل 7-3.



شكل 7-3 العلاقة بين الجهود والتيارات المختلفة في الدلتا والـ Star

ففي حالة التوصيل على شكل Star ، تكون العلاقة بين  $V_L$  (line voltage) ، وبين phase voltage ( $V_P$ ) ، وكذلك علاقات التيار بين  $I_L$  ، وبين  $I_P$  كما يلي:

$$V_L = \sqrt{3} V_P$$

$$I_L = I_P$$

أما في حالة التوصيل على شكل Delta فستكون العلاقات كما يلي :

$$V_L = V_P$$

$$I_L = \sqrt{3} I_P$$



### 2-3-3 العلاقات الحاكمة للقدرة Power Relations في المحولات الثلاثية

تحتسب قيمة الـ  $S$  Apparent Power مقاسة بوحدات الـ kVA أو وحدات الـ MVA في المحولات الثلاثية ، سواء الموصلة على شكل دلتا ، أو الموصلة على شكل ستار بطريقة واحدة وهي :

$$S = 3 V_{LN} I_{LN}$$

حيث  $V_{LN}$  هي Phase Voltage

و  $I_{LN}$  هو الـ Phase Current

ويمكن التعبير عن المعادلة السابقة بصورة أخرى في حالة التوصيل على شكل ستار كما يلي:

$$S_Y = 3 V_{LN} I_L = 3 \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} I_L = \sqrt{3} V_{LL} I_L$$

وبالمثل في حالة التوصيل على شكل دلتا تكون العلاقة كما يلي

$$S_{\Delta} = 3 V_{LL} I_{\Delta} = 3 V_{LL} \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} V_{LL} I_L$$

لاحظ أن علاقات حساب القدرة في المحولات لا تتوقف على طريقة التوصيل ، ففي كلا الحالتين تكون قيمة القدرة الـ  $S$  , Apparent power محسوبة بطريقة واحدة وهي :

$$S = \sqrt{3} V_{LL} I_L$$

#### مثال 1-3 ( من كتاب Fitzgerald )

Three single-phase, 50-kVA 2400:240-V transformers, each identical with that of Example 2.6, are connected Y- $\Delta$  in a three-phase 150-kVA bank to step down the voltage at the load end of a feeder whose impedance is  $0.15 + j1.00 \Omega/\text{phase}$ . The voltage at the sending end of the feeder is 4160 V line-to-line. On their secondary sides, the transformers supply a balanced three-phase load through a feeder whose impedance is  $0.0005 + j0.0020 \Omega/\text{phase}$ . Find the line-to-line voltage at the load when the load draws rated current from the transformers at a power factor of 0.80 lagging.

الحل

### ■ Solution

The computations can be made on a single-phase basis by referring everything to the high-voltage, Y-connected side of the transformer bank. The voltage at the sending end of the feeder

is equivalent to a source voltage  $V_s$  of

$$V_s = \frac{4160}{\sqrt{3}} = 2400 \text{ V line-to-neutral}$$

From the transformer rating, the rated current on the high-voltage side is 20.8 A/phase Y. The low-voltage feeder impedance referred to the high voltage side by means of the square of the rated line-to-line voltage ratio of the transformer bank is

$$Z_{lv,H} = \left( \frac{4160}{240} \right)^2 (0.0005 + j0.0020) = 0.15 + j0.60 \Omega$$

and the combined series impedance of the high- and low-voltage feeders referred to the high-voltage side is thus

$$Z_{feeder,H} = 0.30 + j1.60 \Omega/\text{phase Y}$$

Because the transformer bank is Y-connected on its high-voltage side, its equivalent single-phase series impedance is equal to the single-phase series impedance of each single-phase transformer as referred to its high-voltage side. This impedance was originally calculated in Example 2.4 as

$$Z_{eq,H} = 1.42 + j1.82 \Omega/\text{phase Y}$$

Due to the choice of values selected for this example, the single-phase equivalent circuit for the complete system is identical to that of Example 2.5, as can be seen with specific reference to Fig. 2.14a. In fact, the solution on a per-phase basis is exactly the same as the solution to Example 2.5, whence the load voltage referred to the high-voltage side is 2329 V to neutral. The actual line-neutral load voltage can then be calculated by referring this value to the low-voltage side of the transformer bank as

$$V_{load} = 2329 \left( \frac{240}{4160} \right) = 134 \text{ V line-to-neutral}$$

which can be expressed as a line-to-line voltage by multiplying by  $\sqrt{3}$

$$V_{load} = 134\sqrt{3} = 233 \text{ V line-to-line}$$

Note that this line-line voltage is equal to the line-neutral load voltage calculated in Example 2.5 because in this case the transformers are delta connected on their low-voltage side and hence the line-line voltage on the low-voltage side is equal to the low-voltage terminal voltage of the transformers.

### 3-3-3 ما الفرق بين استخدام الـ Amp واستخدام الـ Volt-Amp في التعبير عن قدرة محول Three Phase ؟

عادة عند التعبير عن حمل المحول يمكن أن يكون ذلك بالأمبير أو بالـ kVA ، فنقول مثلا هذا محول 100A و نقول عن محول آخر أنه محول 1 MVA. وكلاهما مستخدم ، ولكن هناك مشكلة تظهر عن توصيل ثلاثة محولات أحادية الوجه 1-Ø لنحصل منهم على محول واحد ثلاثي الأوجه 3-Ø. فإذا كان كل محول من المحولات الثلاثة الـ 1-Ø قادر على تحمل 100A مثلا فإننا عند توصيل المحولات الثلاثة معا لنصنع منهم محول واحد من النوع الـ 3-Ø فإننا نقول أن قدرة المحول الجديد بالأمبير تساوي 100A أيضا و ليست 300A. أما إذا عبرنا عن قدرة المحول بالـ kVA ، وكانت قدرة كل واحد من المحولات الأحادية الثلاثة تساوي 20 kVA ، فإننا في هذه الحالة سنحصل على محول 3-Ø قدرته تساوي 60 kVA وليس 20 kVA .

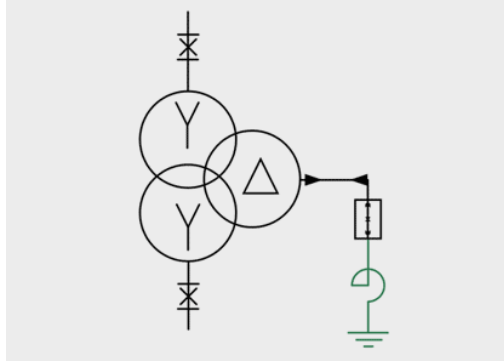
## 4-3 المحولات ثلاثية الملفات

في أغلب المحولات يكون لدينا مجموعتين من الملفات (Primary / Secondary) ولذا يعرف بـ Two windings transformer - ، و هذه المحولات هي التي تعرفنا عليها حتى الآن مثل محولات  $\Delta/Y$  أو  $Y/Y$  وهكذا.

لكننا هنا نتعرض لنوع آخر من المحولات يعرف 3-windings transformer حيث تكون لدينا ثلاثة مجموعات من الملفات على كل limb ويكون لدينا 9 أطراف خارجة من المحول وتسمى ملفات المجموعة الثالثة المضافة إلى المحول بـ windings tertiary و يعني الملف الثالث.

وهذا الملف الثالث له استخدامين أساسيين :

1. الاستخدام الأول يكون لإنتاج جهد مختلف عن جهدي الـ pri/sec ، على سبيل المثال 300/132/33 ومن ثم يكون المحول مستخدم لإنتاج جهدين مختلفين من الجهد الأصلي.
2. الاستخدام الثاني أن يتم توصيله لتسريب الـ Zero sequence currents لاسيما إذا كان المجموعتين الآخرين بالمحول موصلين على شكل YY أو  $\Delta\Delta$  كما في الشكل 3-8 .



شكل 3-8 : محول ثلاثي الأوجه و ثلاثي الملفات

### 3-4-1 هل تحدد قدرة المحول بالـ kVA أم بالـ kW؟

المحولات على عكس الموتور ليس لها mechanical output بل لها Electrical output فقط ، وهذا يعني أن التيار الخارج من المحول يمكن أن يكون له power factor تتراوح قيمته من 0 : 1 حسب طبيعة الحمل المتصل به ، ومن ثم يصبح غير مناسب أن تعرف المحول بالـ kW لأنها ستكون قيمة متغيرة حسب الحمل ، وإنما يعرف بالـ kVA ، ثم تحسب قيمة الحمل بالـ kW حسب الـ P.F الخاص بالحمل.

# البَابُ الثَّانِي

## تركيب وتصنيع المحولات

- الفصل الرابع : الأجزاء الفعالة : القلب والملفات Core and Windings
- الفصل الخامس : الأجزاء الغير فعالة والأجهزة المساعدة

## مقدمة الباب الثاني

ما تم دراسته حتى الآن لا يتعدى الأسس النظرية للمحولات الكهربائية ، لكن هذا الباب يخرج عن السياق السابق ليعرض تركيب محول القوى و عناصره الأساسية ، و أهم الملحقات التابعة له ، و ذلك قبل أن نبدأ في دراسة تشغيل و أداء المحولات و اختبارات الخ في الباب الثالث.

## الفصل الرابع

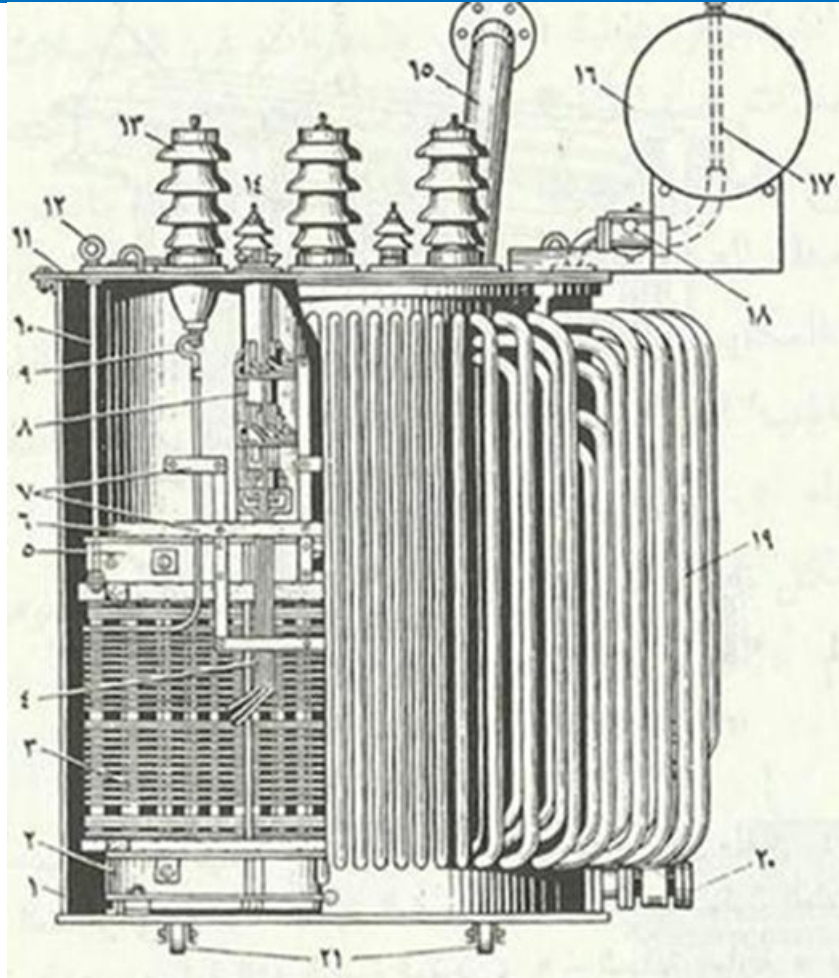
### قلب المحول وملفاته

يمكن أن نقسم تركيب المحول إلى مجموعتين أساسيتين تظهر عناصرهما التفصيلية في الشكل 4-1:

- المجموعة الأولى: تشمل القلب الحديدي Core (رقم 6) ملفوفا حوله الملفات Windings (رقم 4) ، وهذه المجموعة تعرف بالجزء الفعال Active Part .
- المجموعة الثانية : تضم بقية الأجزاء وتعرف بالأجزاء المساعدة Auxiliaries أو غير الفعالة .

وهذه المجموعة الثانية تضم مايلي :

- الخزان ( Tank ) ، رقم (1) وغطاؤه (رقم 11) وحنفية تفريغ الزيت (رقم 20)
- أنابيب التبريد رقم 19 ويلحق بها المضخات
- وعاء التمدد الزيتي ( Conservator tank ) (رقم 16 ) وملحقاته مثل مؤشر الزيت (رقم 17) وأنبوب الانفلات (رقم 15) ، وحدة التنفيس Breathing unit
- جهاز الحماية المعروف باسم بوخلز Buchholz Relay (رقم 18)
- حلقات الرفع (رقم 12) تستخدم في رفعه وتنزله بالأوناش .
- العجلات (رقم 21)
- وهناك عناصر المرتبطة بالخزان والملفات معا وتشمل Bushings (رقم 14 و 13) ومن ملحقاته Corona rings و Flange و Skirts و Tap changer (رقم 4 و 9) وعتبات الـ Yoke (رقم 5 و 2) وغيرها.



شكل 1-4 : المكونات التفصيلية للمحول

أما الشكل 2-4 فيبرز أهم العناصر في محولات القوى لكن من زاوية أخرى :

لوحة البيانات

H.V. bushings -1

L.V. bushings -2

H.V. tapping switch -3

H.V. double primary voltage switch -4

-5 نقطة ملاء الزيت

-6 مؤشر الزيت على التانك الاحتياطي

-7 مؤشر لقياس الحرارة

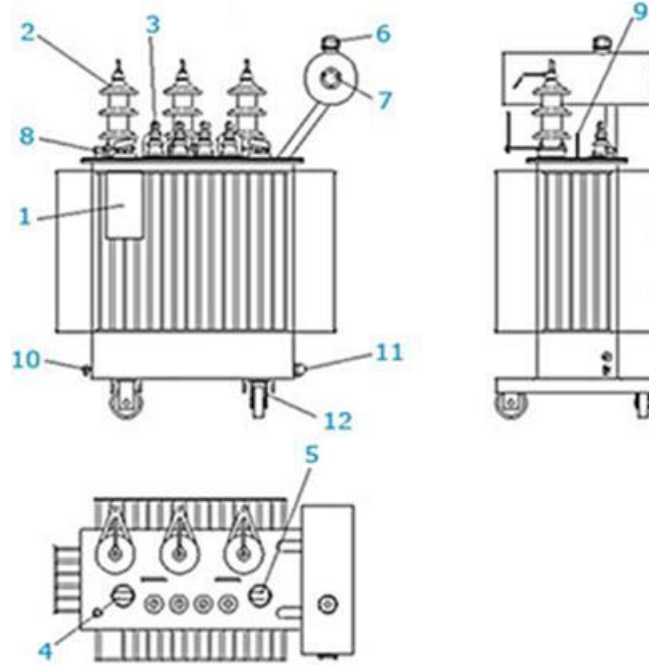
-8 لقمة رفع المحول ( نقطة اتصال الوش)

-9 نقطة تأريض



10- صمام سحب عينات الزيت

11- عجلات السير



شكل 4-2 : صورة أخرى لتفاصيل المحول

وهذا الفصل مكون من جزئين : الأول خاص بالقلب الحديدي وتصنيعه وتجميعه ، والثاني خاص بالملفات وطرق لفها.

## الجزء الأول : تصنيع وتجميع القلب الحديدي

## 1-4 القلب ( CORE )

ال Core في المحولات مصمم لتحمل الفيض المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في الملف الابتدائي ونقله ليقطع الملف الثانوي ليتولد الجهد بالحث induced voltage في الملف الثانوي. وهذا المسار الذي يسري فيه الفيض يجب أن يكون ذا معاوقة مغناطيسية ضعيفة ليسهل مرور الفيض .

وقلب المحول عملياً يصنع من رقائق ذات سمك 0.3 mm من مادة الصلب السيليكوني موجه الحبيبات و المدرفل على البارد ( Cold rolled grain oriented Silicon steel ) . وتعرف اختصاراً بـ ، CRGO ويتميز هذا النوع كما يبدو من مفردات اسمه بالآتي :

- الصلب: والصلب له كفاءة عالية لتمرير الطاقة المغناطيسية نظراً لارتفاع النفاذية النسبية ( Permeability ) ، كما أنه يعطي أقل قدر ممكن من مفقودات ال eddy current مما يساعد على رفع كفاءة المحول .
- السيليكوني : حيث يتم عزل الشرائح بعضها البعض بمادة السيليكون السائل لتقليل أثر ال eddy current.
- المدرفل على البارد : حيث يتم درفلة شرائح الصلب من السمك الذي تم تصنيعها عليه حوالي ( 5mm ) إلى السمك الذي سوف يستخدم في المحول ( 0.3mm ) على عدة مراحل في درجة حرارة منخفضة و ذلك حتى يسهل التعامل معها و تقطيعها بشكل منتظم لتكوين القلب الحديدي.
- موجه الحبيبات grain oriented : حيث يتم ترتيب بلورات الصلب في اتجاه الدرفلة على البارد حتى لا تسبب مقاومة لمرور الفيض المغناطيسي .

في هذا النوع تتراوح كثافة الفيض ( Flux density ) داخل الدائرة المغناطيسية بين 1.6 : 1.8 تسلا ( Webber/m<sup>2</sup> ) ، و يراعى عدم زيادة هذه القيمة إلى الحد الذي يسبب تشبع ( Saturation ) القلب الحديدي حيث يتسبب تشبع القلب الحديدي في خفض كفاءة التشغيل و ظهور توافقيات ( Harmonics ) غير مرغوب فيها .

## 2-4 سمات المواد المستخدمة في صناعة القلب الحديدي

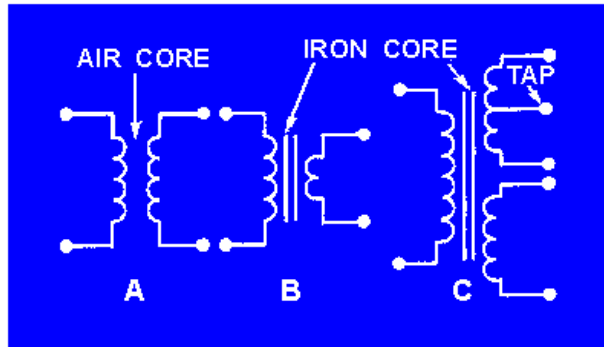
هناك عدة سمات يجب أن تتوفر في المادة التي تستخدم في صناعة القلب الحديدي ، منها :

## 1-2-4 السماحية Permeability

والسماحية أو الـ Permeability ويرمز لها بالرمز  $\mu$  ، تعنى القدرة على نقل الفيض ، ويحسن أن تكون عالية جدا حتى تسمح بمرور فيض عالى فى مساحة صغيرة وإلا سيصبح حجم المحول غير منطقى. وبالطبع فإن الهواء يمكن أيضا استخدامه فى نقل الفيض بين الملفات لكن كفاءته منخفضة جدا مقارنة بالمواد المغناطيسية الأخرى فبعض أنواع الـ Soft Iron لها Permeability نسبية  $\mu_r$  تصل قيمتها إلى 1500 مرة زيادة عن الهواء والتي يرمز لها بالرمز  $\mu_0$  .

ولا يستخدم الهواء كوسط لنقل الفيض إلا فى حالة المحولات عالية التردد ( أعلى من 20 kHz ) لأن هذه الترددات العالية تتسبب فى مفقودات عالية جدا فى حالة استخدام قلب حديدى داخل المحول. وبالطبع هذه محولات تستخدم عادة فى الدوائر الإلكترونية ، وليست من فئة محولات القوى.

ويتم التفريق بين الرمز المستخدم للقلب الحديدى والآخر المستخدم للقلب الهوائى كما فى الشكل 3-4.



شكل 3-4 : القلب الحديدى والهوائى

حيث يضاف خطين رأسيين بين الملفين فى حالة استخدام القلب الحديدى.

## 2-2-4 عدم التشبع

السمة الثانية الضرورية فى المادة المغناطيسية هى ألا تدخل بسرعة فى مرحلة الـ Saturation أو التشبع عند مرور الفيض بها. فالفيض المغناطيسي يتسبب فى حدوث Line-up لجزيئات المادة المغناطيسية ، وكلما زاد الفيض كلما تغير وضع عدد آخر من جزيئات القلب ، فإذا تغير وضع كافة الجزيئات فإننا نقول أن القلب قد تشبع ويصبح أى زيادة فى قيمة التيار المولد للفيض لا يقابلها زيادة فى الفيض .

## 3-2-4 سمات أخرى

هناك عدة سمات أخرى سبق الحديث عن تأثيرها فى فصول سابقة منها أن تكون المادة على شكل شرائح رفيعة لتقليل الفقد فى الطاقة ، ومنها أيضا قلة الفيض المتبقى فى القلب الـ Residual Flux بعد فصل

المصدر والتي يعبر عن ذلك بصغر مساحة الـ Hysteresis loop . وهناك المزيد من التفاصيل حول هذه النقطة في الباب الرابع (فصل المفقودات).

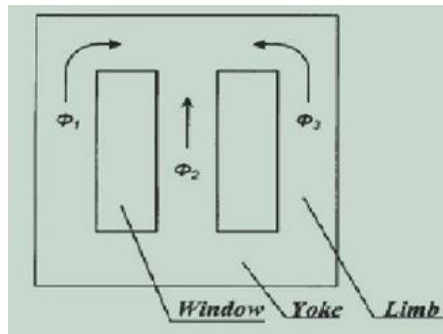
## 3-4 تجميع القلب الحديدي (الـ CORE)

هناك أسلوبان معروفان لتجميع الـ Core في المصانع :

1. Core type
2. Shell type

والإسلوبان يتشابهان في نقاط ويختلفان في أخرى ، ففي كلا الأسلوبين يتم تصنيع القلب من شرائح المادة المغناطيسية المستخدمة ( مع وضع العزل بين كل شريحتين ) حتى نصل للسلك المطلوب حسب التصميم المناسب لكلا الطريقتين ، ثم يتم تحزيم هذه الشرائح معاً بواسطة روابط مصنوعة من fiber glass غالباً ، وهي تتحمل حرارة عالية تصل إلى 130 درجة مئوية.

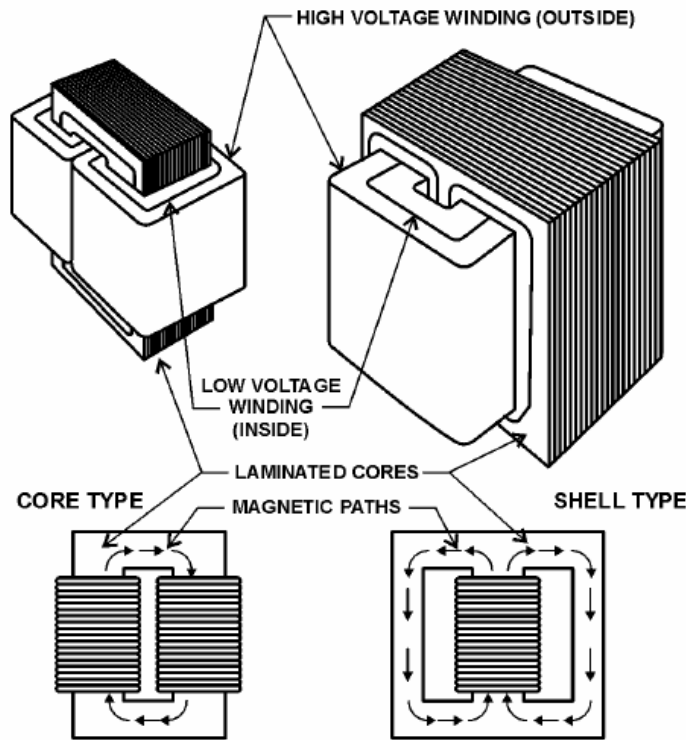
والقلب الحديدي بصفة عامة يتكون في كلا الطريقتين من أجزاء رأسية تسمى الساق أو Legs أو Limbs أو الأعمدة ، بالإضافة إلى جزء أفقي يربط هذه الأجزاء الرأسية معا ويسمى Yoke أو الفك ، وهو الجزء الذي لا يلتف حوله أى ملفات كما في الشكل 4-4 .



شكل 4-4 : أسماء أجزاء القلب الداخلي

والنوع الأول Core Type يكثر استخدامه في المحولات الأصغر في القدرة ، علماً بأن كل المحولات التي تفوق قدرتها 50 MVA فإنها تصنع بالطريقة الثانية ( Shell Form ) . لاحظ أن الفقد في الفيض يكون اقل نسبياً في حالي الشيل

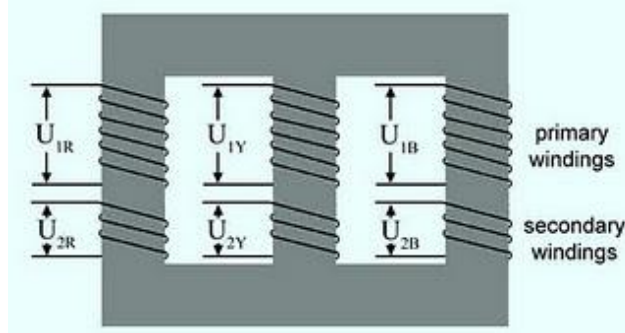
وكل نوع منهما يمكن أن يستخدم مع محولات الـ Single phase (1-Φ) ، كما في الشكل 4-5 .



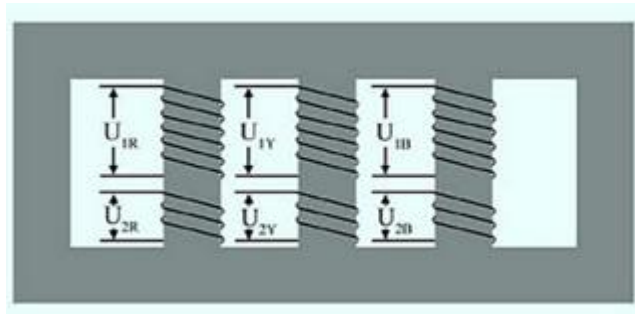
شكل 4-5 : محولات الـ Core Type ومحولات الـ Shell Type

ويختلف الأسلوبان في عملية وضع الملفات حول الـ Core ، ففي حالة الـ Core Type فإن مسار الفيض المغناطيسي يكون من Loop واحدة كما في الجزء الأيمن من الشكل 4-5 ، وهذه الـ Loop أو الحلقة تربط الملفين الابتدائي والثانوي معا ، بينما في حالة الـ Shell Type فإن الشرائح المعدنية المكونة للقلب تحيط بالجزء الأكبر من الملفات ، حيث يكون المسار المغناطيسي في هذه الحالة مكونا من دائرتين Two Loops كما في الجزء الأيسر من الشكل 4-5 الذي يوضح الفرق بين الأسلوبين في محولات الـ Single phase (1- $\Phi$ ).

ويمكن استخدام الإسلوبين في محولات الـ Three phase (3- $\Phi$ ) أيضا ، كما في الشكل 4-6 الذي يمثل محول من النوع 3-Phase Core-Type Transformer . و الشكل 4-7 الذي يمثل محول من النوع : 3-Phase Shell-Type Transformer



شكل 4-6 : محولات الـ Core Type الثلاثية

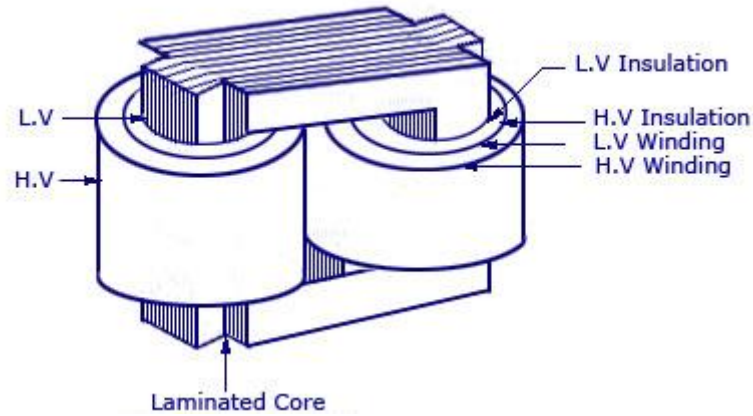


شكل 4-7 : ومحولات الـ Shell Type الثلاثية

وفى كلا الحالتين يكون القلب الحديدي مكونا من 3 أعمدة ، ويلف الملفين الابتدائي والثانوي لكل phase من الـ phases الثلاثة على عمود منفصل ، حيث يوضع ملف الجهد المنخفض ملاصقا للـ Core ، ثم يوضع فوقه ملف الجهد العالي.

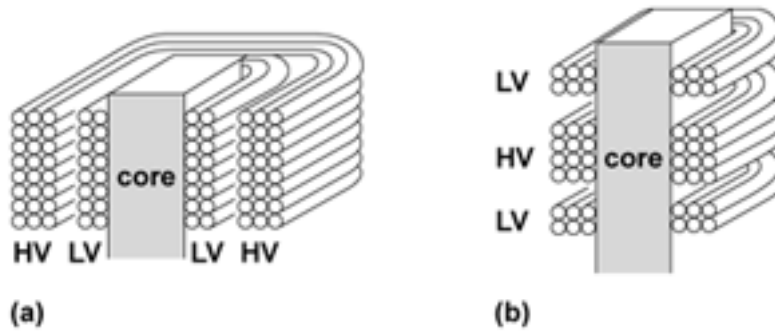
#### 1-3-4 طريقة الـ Core Type

إذا وضع كلا من الملف الابتدائي والملف الثانوي على Legs مختلفة فحتما سيكون هناك فقد كبير فى الفيض Flux Leakage ولذا فى الواقع العمل يندر أن تجد الصورة الموجودة فى الشكل 4-5 حيث الملفات متباعدة عن بعضها ، وإنما ستجد أن الملفين ملفوفين حول نفس الـ Leg بعد تقسيما إلى جزئين متساويين كما فى الشكل 4-8 .



شكل 4-8 : طريقة وضع الملفات في محولات الـ Core Type

وتوضع الملفات حول القلب بطريقتين كما في الشكل 4-9 .



(a) Concentric. (b) Interleaved.

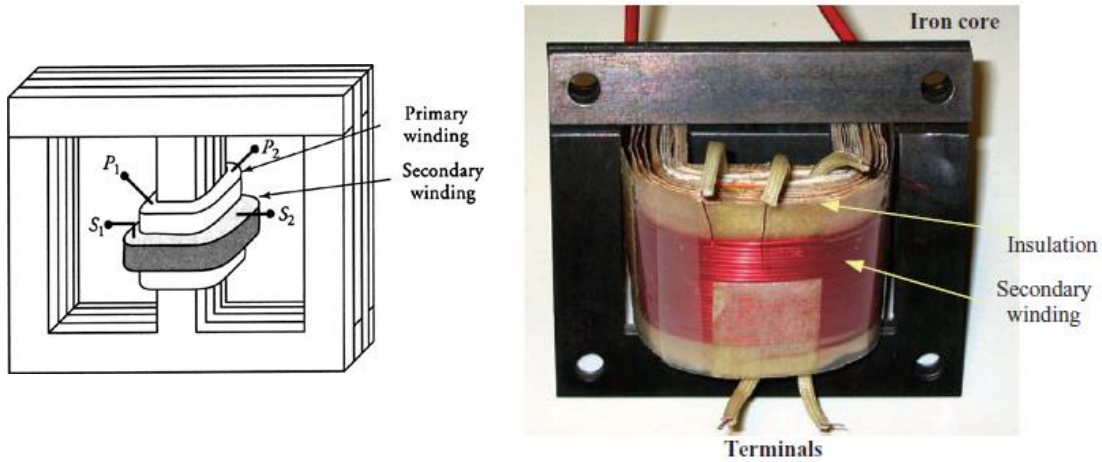
شكل 4-9 : وضع الملفات حول القلب

في الطريقة الأولى يوضع أولاً ملفات الجهد المنخفض على الـ Leg ثم توضع فوقها ملفات الجهد العالي وتسمى الترتيب المركزي Concentric ، أما في الطريقة الثانية فيكون هناك تناوب بين أجزاء ملفات الجهد المنخفض والجهد العالي وتسمى Interleaved ، وفي كلا الطريقتين فإن احتمال أن يقطع الفيض الناشئ في الملف الأول ملفات الملف الثاني احتمالاً عالياً ومن ثم تتحسن كفاءة الـ Coupling بين الملفات ويقل الـ Flux leakage .

وبالطبع هناك عزل يوضع بين كلا النصفين ، بالإضافة إلى العزل بين القلب وبين ملفات الجهد المنخفض الداخلية. وهذا يفسر السبب في جعل النصف الداخلي الملاصق للقلب هو من ملفات الجهد المنخفض وذلك حتى نسهل عملية عزله عن القلب الحديدي.

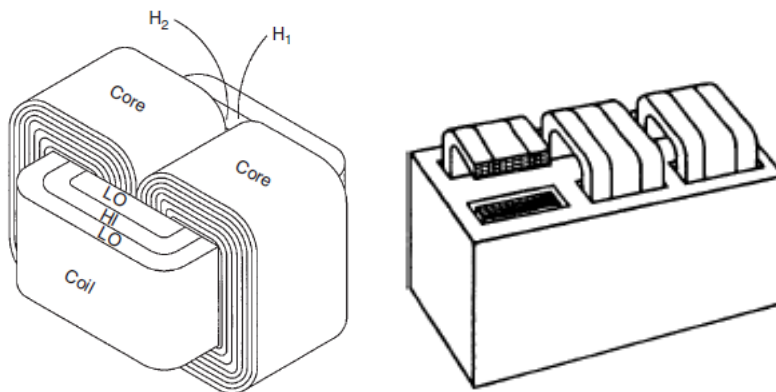
## 2-3-4 طريقة الـ Shell Type

الفيض المغناطيسي كما ذكرنا ينقسم في حالة الـ Shell Type إلى دائرتين مغناطيسيتين ، ومن ثم فإن الـ Leg الوسطى سيمر بها الفيض كاملاً بينما يمر نصف الفيض فقط في الـ Legs الموجودة على الأطراف ، وكذلك في الـ Yoke ، وهذا يفسر السبب في أن هذه الأجزاء يكون مساحة مقطعها نصف مساحة الـ Leg الوسطى . أما الملفات فيوضعان فوق بعضهما على الـ Leg الوسطى كما في الشكل 10-4 . ووجود الملفات في الـ Limb الداخلي هو السبب في تسمية هذا النوع بالمحولات القشرية لأن الشكل العام يشبه القشرة التي تحيط بالثمرة.



شكل 10-4 : طريقة وضع الملفات في محولات الـ shell type

وقد يتم تقسيم ملفات الجهد المنخفض إلى نصفين يضمن بينهما ملفات الجهد العالي (سندويتش) ، كما في الشكل 11-4 وهي الطريقة الأكثر انتشاراً.



شكل 12-4 : وضع ملفات الجهد العالي والمنخفض بطريقة السندويتش

والهدف واضح من كلا الطريقتين وهو تقليل الفقد في الفيض المتسرب.



### 3-3-4 الفروق بين طريقتي التصنيع

يمكن بعد هذه المقدمة أن نجل أهم الفروق بين طريقة الـ Core Type وطريقة الـ Shell Type المستخدمتان في تصنيع القلب الحديدي:

- 1- في حالة الـ Core type الأحادية يكون لدينا 2-Limbs بينما يكون لدينا ثلاثة في حالة الـ Shell type
- 2- في حالة الـ Core type يكون الطول المتوسط للقلب الحديدي أطول منه في حالة الـ Shell type بينما يكون الطول المتوسط لملف النحاس أقصر من حالة الـ Shell type.
- 3- يترتب على ما سبق أن الـ Shell type له مساحة أكبر للقلب الحديدي وعدد أقل للغات النحاس مقارنة بالـ Core type .
- 4- طريقة الـ Shell لها قدرة أكبر على تحمل الـ Short Circuit لكن صيانتها أصعب.

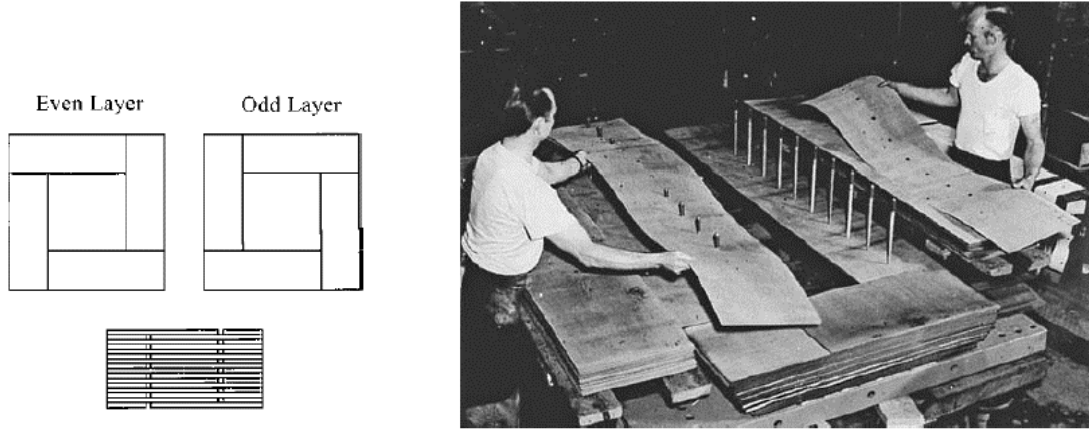
## 4-4 تجميع شرائح القلب الحديدي

القلب الحديدي عموماً يصنع من شرائح معدنية كما ذكرنا ، وهذه الشرائح لها أشكال متعددة كما في الصورة.



هناك عدة طرق لتجميع القلب الحديدي ، منها طريقة قديمة تسمى Butt Lap ويتم فيها تجميع الأجزاء المختلفة على قواعد مستطيلة باستخدام طبقات زوجية وفردية كما في الشكل 4-13 (تبادلية أو تناكبية).

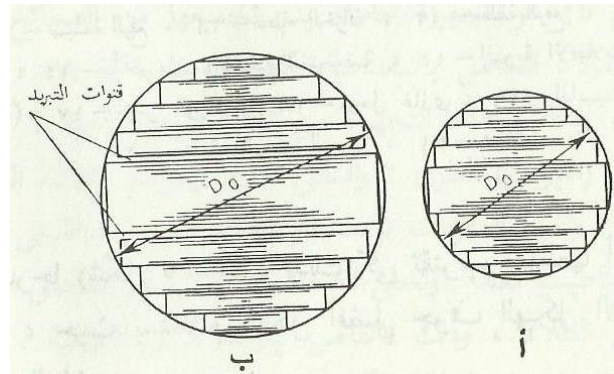
ويهدف هذا الترتيب في وضع الشرائح في الصورة السابقة إلى جعل المجال المغناطيسي متصلاً داخل القلب ولا تكون هناك Air Gap .



شكل 4-13 : رص الشرائح بطريقة تبادلية



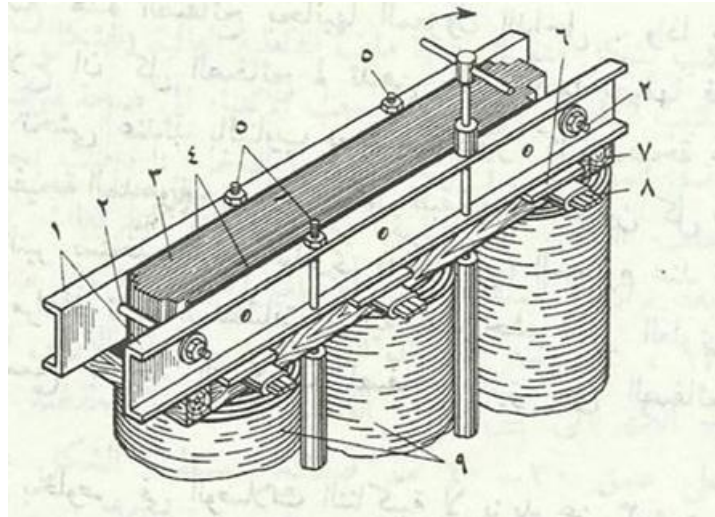
وتصنع أجزاء القلب سواء الرأسية أو الأفقية من شرائح متدرجة المقطع ليكون مقطعها أقرب إلى الدائرة ، وذلك لتسهيل عملية لف الملفات بعد ذلك كما في الشكل 4-14 (أ) للمحولات الصغيرة ، والشكل 4-14 (ب) للمحولات الكبيرة . ويلاحظ أن المحولات الكبيرة تزود أحياناً بقنوات داخلية ليتغلغل فيها الزيت ويزيد من كفاءة تسريب الحرارة.



شكل 4-14 : قنوات التبريد في القلب

وفي المحولات القديمة كان يتم كبس هذه الشرائح معا بواسطة مسامير فولاذية تمر عبر ثقوب ، أما المحولات الحديثة فأصبحت الشرائح تصنع من الفولاذ المدرفل على البارد والذي يتم رصه و كبسه بواسطة شريط مؤقت يمر عبر ثقب بالشرائح دون مسامير ربط .

وبعد انتهاء عملية الحشو ننتقل إلى عملية تكبيس الـ Yoke العلوى بالعتبات (رقم 1) كما فى الشكل 4-15 ، ويجب التأكد من وجود العزل رقم (4) بين العتبة والـ Yoke . لاحظ وجود مسامير شد رأسية (رقم 5) وأخرى أفقية (رقم 2) لضمان ثبات الشرائح وكلاهما يجب أن يكون معزولا تماما عن الشرائح المعدنية ولا يوجد قصر Short بينهما ، ويجب فى نهاية العملية التأكد بجهاز ميجر من هذه النقطة حيث يجب ألا تقل مقاومة العزل بينهما عن 100 ميجا اوم . وتظهر فى الشكل أيضا ثلاثة أطراف لأحد ملفات الجهد (رقم 8) أما الأطراف الأخرى فلم تظهر لأنها فى الجانب الآخر من الصورة.



شكل 4-15 : تفاصيل تركيب القلب



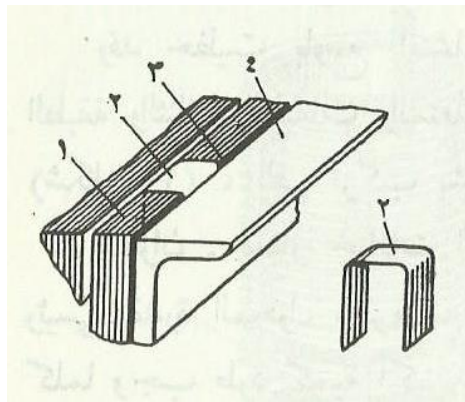


ومن الطرق الأحدث في صناعة القلب لاسيما في المحولات الصغيرة استخدام شريحة متصلة من الصلب ولفها حول قالب له أبعاد محددة للوصول إلى عدد الشرائح المطلوب (أى أن القلب كله عبارة عن شريحة واحدة لكنها ملفوفة عدة لفات حول نفسها). وهذه الطريقة لاشك أنها أسرع ويمكن تنفيذها بصورة آلية وهى أرخص كذلك ولا تحتاج لعمال مهرة إضافة إلى أن

الـ Power Loss فى القلب المصنوع بهذه الطريقة تكون أقل. وفى هذه الحالة نستخدم مادة cold-rolled grain-oriented sheet steel (C.R.G.O). وهى تتميز كما ذكرنا بانخفاض القدرة المفقودة فى القلب المصنوع منها إذا كانت المغنطة تتم فى نفس اتجاه الـ Rolling Direction.

#### 4-4-1 تأريض القلب الحديدى

جميع الأجزاء المعدنية فى المحول سواء الداخلية أو الخارجية يجب أن يتم تأريضها بشكل مضمون. وربما يغيب عن البعض أن القلب المغناطيسي للمحول Core يجب أيضا تأريضه ، فعند دخول المحول فى الخدمة يقع الـ Core وغيره من الأجزاء المعدنية فى مجال كهربى شديد ينشأ بين الملفات ، فتتكهرب هذه الأجزاء المعدنية الواقعة فى هذا المجال ، ولكى نتجنب هذه الظاهرة الغير مرغوب فيها يجب تأريض القلب والخزان وأدوات التثبيت وكل ما هو معدنى وإلا فيمكن أن تتولد قوة دافعة كهربية Emf كبيرة بين هذه العناصر الواقعة فى مجال الملفات وهذه القوة الدافعة يمكن أن تفوق قدرة العزل الموجود بين الصفائح المعدنية مثلا حيث أنه الأضعف فى درجات العزل لقلة سماكته ، مما قد يتسبب فى حدوث Discharge داخل الخزان وهذا التفريغ يمكنه أن يفكك الزيت. ولذا يتم تأريض هذه الأجزاء وخاصة العتبات المعدنية للـ Yokes ، ويبين الشكل 4-16 أحد طرق تأريض الـ Core بواسطة شريط تأريض (رقم 2) متصل بالعتبة (رقم 4) التى هى نفسها مؤرضة . ويمكن تأريض الـ Core من خلال ربط موصل إلى العازل خزفي - bushing - ثم يُربط الموصل إلى منظومة التأريض الخاصة بالمحول.



شكل 4-16 : تأريض القلب

## 5-4 موصلات ملفات المحولات

تصنع الملفات غالبا من أسلاك معزولة من النحاس الأحمر النقي ، وجميع لفاتها معزولة عن بعضها وعن القلب عزلا كهربائياً. ويحتل النحاس المرتبة الأولى في المواد المستخدمة في صناعة الملفات لأنه يمتاز بعدة مزايا منها : قابليته العالية للتوصيل الكهربى ، علما بأن هذه السمة تتوقف أساسا على نسبة الشوائب الموجودة به ، فالنحاس الذى يحتوى مثلاً على 2% من الفسفور أو 7% من الزرنيخ تنخفض قابليته للتوصيل بنسبة 30% . ومن مزايا النحاس أنه بطئ التأكسد ويتحمل الهواء الرطب ودرجة انصهاره عالية وسهل اللحام ، كما أنه سهل السحب والتشكيل.

وتختلف درجة العزل ومساحة المقطع باختلاف قيمة الجهد ، وقيمة التيار المار به . وقد يصنع الملف من الألومنيوم ، حيث أنه أخف وزناً وأقل سعراً ، لكننا سنحتاج معه لمقطع كبير نسبياً لجعله قادراً على تحمل التيارات العالية ، ولذا تجده لا يستخدم سوى في المحولات الصغيرة.

ويتم لف الاسلاك أولاً على ماكينات اللف ثم تجفيفها فى فرن لطرطد الرطوبة وأخيراً يتم تسقيطها فوق الـ Legs كما فى الصورة.



ويوضع فواصل معزولة Spacers بين القلب الحديدى وبين الملفات لضمان أعلى درجة من الـ Mechanical strength ولعزل الملفات عن القلب الحديدى ، وكذلك حتى نضمن أيضاً أن يظل الملف دائماً فى وضع رأسى تماماً ومنطبق محوره مع الـ Axial Center لا Leg.

وأشهر الشركات المنتجة لموصلات المحولات هى شركة ASTA ولذا يسمى الموصل أحياناً باسمها .

#### 4-5-1 عمل الـ Transposition في الموصلات

وتكون أسلاك الموصلات غالبا على شكل أسلاك مجدولة أو شرائح مستطيلة . وعند صناعة الموصلات للمحولات الكبيرة يتم عمل تباديل بين الطبقات المكونة لمقطع الموصل الذى يكون غالبا كبيرا ، وهو ما يعرف بعملية الـ Transposition وتسمى الموصلات المصنعة بهذه الطريقة بالـ Continuous Transposed Conductor, CTC كما فى الشكل 4-17.



شكل 4-17 : عمل الـ Transposition فى الموصلات

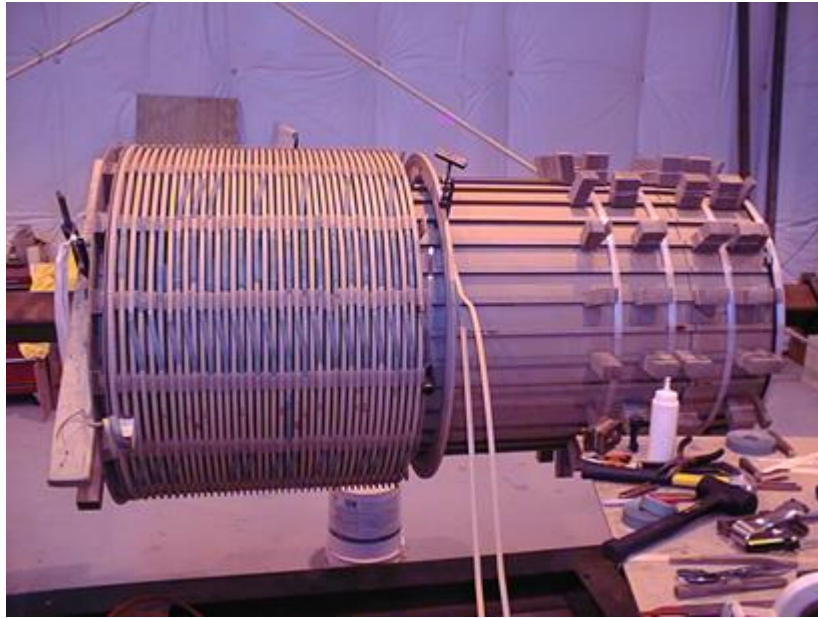
والهدف من هذه العملية هو منع التيارات الدوامية التى يمكن أن تنشأ داخل المقطع الكبير للموصل نفسه نتيجة تعرض أجزائه لمستويات مختلفة من الفيض بسبب وضعها النسبي فينشأ فرق فى الجهد بين بعض الطبقات يتولد نتيجتها تيارات دوامية داخلية فى الموصل ، وعمل الـ Transposition يضمن اختفاء هذه التيارات لأنها تلغى بعضها البعض.

## 4-6 أنواع الملفات

هناك أربعة أنواع مشهورة للف الملفات ، وغالبا يكون الاختيار بين هذه الأنواع الأربعة بناء على عدد الملفات المطلوبة وقيمة التيار الذى تحمله.

#### 4-6-1 النوع الأول : Helical Winding

ويسمى أيضا بالـ Screw أو بالـ Spiral أو الحلزونى أو الاسطوانية ، وكلها لنفس المسمى ، وهو عبارة عن طبقات متعددة بينها فواصل بين الملفات وبين الطبقات ، ويستخدم هذا النوع للملفات التى تحمل تيارات عالية ، ويعيبه أنه يشغل حيزا كبيرا لكنه الأكثر ثباتا ميكانيكيا وسهل التصنيع كما فى الصورة.

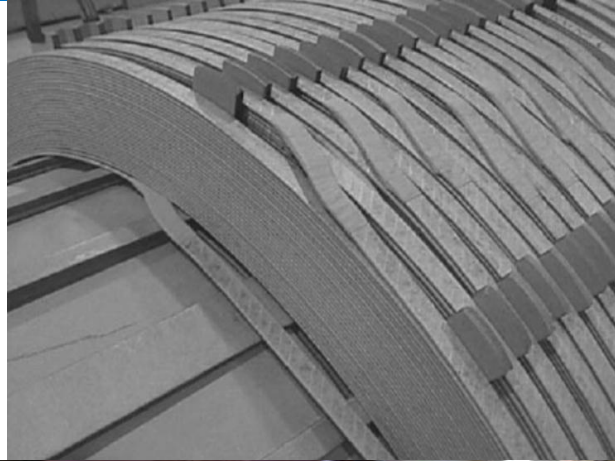


#### 4-6-2 النوع الثاني : Disc Winding

ويسمى أيضا باللف القرصى ، وهذا يستخدم مع المحولات التي تحتوى على عدد ضخم من اللفات وتحمل تيارا خفيفا أى يستعمل مع الجهد العالى والتيار المنخفض ، وغالبا فإن كل الـ Winding التي تعمل على جهد أكبر من 25 kV تلف بهذه الطريقة ، حيث تكون اللفات على شكل Discs بينها فواصل كما فى الصورة .

والعوازل هنا موجودة على الموصلات فقط وليس هناك عوازل بين الطبقات ولكن هناك عوازل بين الـ Discs فقط.

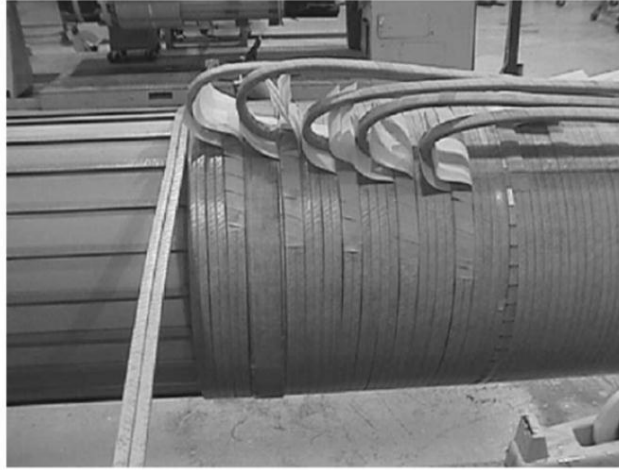




#### 4-6-3 النوع الثالث : Layer Winding

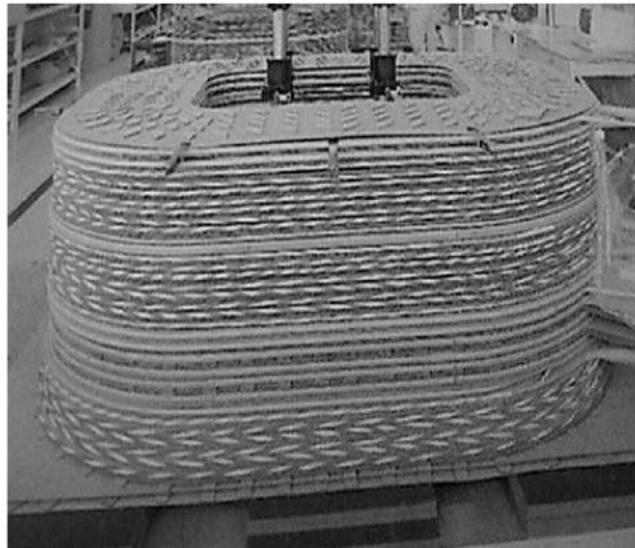
وتسمى أيضا Barrel Winding ، وهذه الطريقة تستخدم مع المحولات التي تزود بـ Load Tap Changer حيث يمكن فيها إخراج أطراف أجزاء الـ Winding كما في الصورة لتوصيلها بدائرة التحكم في الـ Tap Changer .



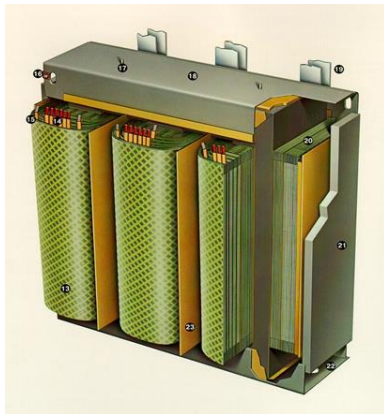


#### 4-6-4 النوع الرابع : Ban cake Winding

هذا النوع يستخدم حصريا في محولات الـ Shell Type وتلف أولا على قوالب خشبية ثم توضع على القلب الحديدي.



#### 4-6-5 مقطع الملف



يكون مقطع الملف كما سبق في الصور السابقة إما دائريا أو مستطيلا ، والمقطع الدائري يتميز بالمتانة الميكانيكية بينما المقطع المستطيل (كما في الصورة التالية) يتميز بقلّة المواد المستخدمة في تصنيعه لكنه محدود الاستخدام إلا في المحولات الصغيرة لضعف متانته الميكانيكية لاسيما أثناء حدوث Short Circuit. وعموما يتم ملاء أي فراغات بين الملفات وبين القلب بواسطة فواصل خشبية أو غيرها من المواد العازلة لتحسين المتانة الميكانيكية.

## 4-7 العوازل المستخدمة في المحولات

العوازل المستخدمة في المحولات لها عدة أنواع ، فمنها ما يستخدم مع الموصلات ومنها ما يستخدم لعزل طبقات الشرائح المعدنية عن بعضها ومنها أيضا ما يستخدم لعزل الملفات عن القلب الحديدي .

أما بالنسبة للموصلات فسواء استخدمنا أسلاك مجدولة أو شرائح فلابد من عزل هذه الموصلات باستخدام عوازل رفيعة وغير سميكة وذات كفاءة لضمان عدم شغل مساحة كبيرة. والعوازل المستخدمة مع الموصلات أشهرها طلاء الـ Enamel . أما العزل الورقي فقد قل استخدامه كثيرا لمصلحة البلميريات الصناعية Synthetic Polymer أو القماش الصناعي Synthetic Cloth. أما العزل بين الطبقات المختلفة فغالبا يستخدم له ورق الـ Kraft paper كما في الصور .



## 4-8 تجفيف المحول

بعد تجميع المحول يجب تجفيفه في أفران خاصة ، حيث إن الأجزاء العازلة في المحول تتألف غالبيتها من مواد ليفية (خشب ، كرتون عازل ، ورق عازل) وهذه النوعية من العوازل لها قابلية عالية لالتقاط الرطوبة مما يؤدي لانخفاض خواص العزل لديها. ولذا يتعرض المحول للتجفيف لطرد الرطوبة . وفي حالة إصلاح المحول بورش المصنع أو في حالة عدم وجود أفران خاصة يتم تجفيف القلب والملفات عليه بواسطة تمرير تيارات الحثية Induced Currents في فولاذ الخزان ، وذلك بتمرير AC current في ملف ملفوف حول الخزان ومعزول بعازل حراري قوي ، ويمكن وضع مادة عازلة للحرارة حول جسم المحول أولا ثم يلف حولها الملف المؤقت المستخدم لتوليد المجال المغناطيسي الذي سيمر خلال حديد الخزان

ويمرر فيه التيار الحثي ويسخنه ، وعندئذ تسخن بقية الأجزاء الداخلية فتتبخر الرطوبة ويفضل أن تتم هذه العملية قبل ملأ الخزان بالزيت.

## الفصل الخامس

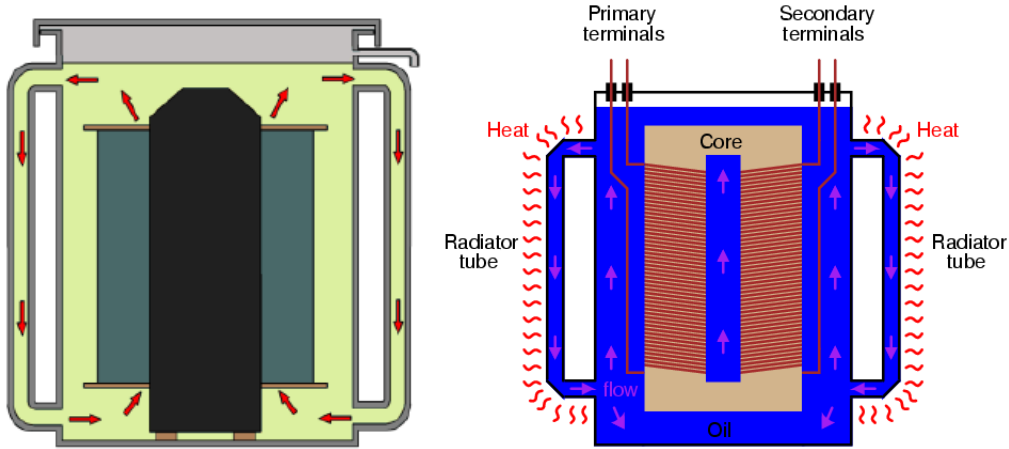
### الأجهزة المساعدة في المحولات

ما درس حتى الآن من مكونات المحول هما فقط عنصري الجزء الفعال Active Part وهما القلب ، والملفات ، وهما يمثلان المكونات الأساسية لأي محول ، وهناك بعد ذلك الجزء الغير فعال ويضم الخزان والأجهزة المساعدة وعناصر منظومة التبريد وغيرها . وبعض مكونات هذا الجزء قد تظهر في محول ولا تظهر في آخر حسب قدرة المحول ومجال استخدامه . وحيث أن معظم هذه الأجزاء ترتبط بشكل أو بآخر بزيت المحول فسنبدأ هذا الفصل بمقدمة عن زيت المحولات وأهميته.

#### 1-5 وظائف زيت المحول

من المعلوم أن تلامس الزيت مع الملفات والقلب سيجعل الحرارة تنتقل منهما إليه ، حيث تقوم بقية عناصر منظومة التبريد (المضخات - الراديتير - المواسير - المراوح) بطرد هذه الحرارة بعدة طرق (التوصيل - الحمل - الإشعاع) إلى الوسط الخارجي.

**الوظيفة الأولى** إذن للزيت هي التبريد ، وتعتبر من أهم الوظائف ، لأن الحرارة الداخلية في المحول إذا تركت يمكن أن تسبب خطورة شديدة ، وليس أفضل من الزيت في نقلها للخارج ، حيث يتغلغل الزيت بسهولة بين الملفات و تنتقل الحرارة إليه من هذه الملفات ، ثم نقوم بعملية طرد للحرارة الموجودة بالزيت ، إما من خلال Fans and Radiators ، أو من خلال حتى التلامس الطبيعي بين الزيت و جسم المحول المعدني كما في الشكل 1-5.



شكل 1-5 : تسرب الحرارة من المحولات

ولضمان قدرة الزيت المعدني على طرد هذه الحرارة تحت الظروف المختلفة وفي مدى واسع من درجات الحرارة وظروف التشغيل يجب أن تتوافر في الزيت عدة سمات تتعلق باللزوجة ونقطة الغليان Pour point ، ودرجة التبخر Flash Point.

**أما الوظيفة الثانية** لزيت المحولات فإنه يقوم بدور العازل بين الملفات وبعضها ، وبين الملفات والقلب Tank ، فالزيت يحيط بكل هؤلاء ويفصل بينهم ويزيد من قوة العازلية بينهم ، وحيث أن معامل العازلية للزيت Dielectric constant يصل إلى 2.2 ( معامل عازلية الهواء يساوي 1 ) ، لذا فهو يقترب بذلك من عازلية المواد العازلة عموماً ، وهو أفضل كثيراً من الهواء ( عازلية الهواء أو ما يعرف بجهد الانهيار للهواء تساوي 30kV/cm ) بينما عازلية بعض الزيوت المعدنية - جهد انهيارها - تصل إلى 80kV/cm ومن ثم يقل الإجهاد Stress على عزل الملفات إذا كانت الملفات مغمورة في الزيت مقارنة بكونها موضوعة في الهواء .

زيادة قوة العزل بين الملفات الابتدائية و الثانوية تساعد على تقليل المسافة بينهما وبالتالي يمكن الحصول على حجم معقول للمحمول. فمن المعلوم أن قوة عزل الهواء تساوي 30 kV/cm أي أن كل موصلين كهربيين بينهما مسافة واحد سم يمكن أن يرتفع فرق الجهد بينهما بما لا يزيد عن 30 kV ، وإلا ستحدث شرارة بين الملفين. فإذا أردت أن تضيق المسافة بينهما ، و في نفس الوقت تتجنب حدوث الشرارة فيجب عليك في هذه الحالة أن تغير مادة الفراغ العازل بينهما ليصبح زيتاً بدلاً من الهواء ( الزيت عزله يصل إلى 80 kV/cm ) ، وإذا أردت أن تحصل على حجم أصغر للمحول بعد ذلك ، فيمكن أن تستخدم غاز SF<sub>6</sub> المعروف بقوة عزله 100 kV/cm وهذا يفسر لك اختلاف حجم المحولات التي لها نفس القدرة من نوع لآخر ، فالأكبر حجماً هو المحولات المعزولة بالهواء ، ثم المعزولة بالزيت ، و الأصغر حجماً هي المعزولة بال SF<sub>6</sub>.

**الوظيفة الثالثة للزيت** أنه يغطي كل الأجزاء المعدنية فيمنع حدوث العديد من العمليات الكيميائية مثل oxidation التي يمكن أن تؤثر بشدة على توصيلة conductivity الموصلات كما يمنع أي تفاعلات أخرى كالتآكل يتكون من بعضها الصدأ ، ومن ثم يمنع حدوث شوائب.

**وللزيت وظيفة رابعة** حيث يستخدم في كشف العديد من الأعطال حيث أن حدوث عطل بالمحول fault يؤدي إلى تغيرات كيميائية في خواص الزيت داخل المحول نتيجة للطاقة الكبيرة الناتجة عن العطل ، وبأخذ عينة من الزيت وتحليلها فإننا نصل إلى نتائج تساعد في تحديد نوعية العطل الداخلي بالمحول كما سيتبين في الفصل الخاص بالاختبارات.

## 2-5 الخزانات TANK

يصنع الخزان من حديد غير مغناطيسي ، وتمتاز خزانات المحولات الرئيسية بتعدد أشكالها حسب قدرة المحول ، فقد يكون سطحه مسطح - مستوى عادي - ( plain tank ) ، و هذا النوع يستخدم للقدرات الصغيرة الأقل من 50 ك. ف . أ ، حيث يكون السطح المستوي كافياً للتخلص من الحرارة المتولدة بالملفات والتي تنقل إليه بواسطة زيت التبريد .

وقد يحتوى على مجارى ( أنابيب ) ( مواسير ) جانبية ( Tubed Tank ) ، ويستخدم هذا النوع في محولات التوزيع المتوسطة القدرة حيث يتم إضافة سطح تبريد على شكل أنابيب خارجية يتم لحامها على جسم الخزان و تكون مساراً متوازياً لدوران الزيت داخلياً .

وهناك نوع ثالث من الخزانات وفيه تتركب زعانف التبريد Radiators على الأجناب الأربعة للمحول و يتم لحامهم معاً لتكوين خزان المحولات ، وقد يسحب الزيت بمضخات لتبريده في الـ Radiators ثم يعاد للخزان مرة أخرى ، وذلك في المحولات ذات القدرات العالية .

ويركب الخزان على قاعدة تعمل على عجالات بحيث يسهل نقل المحول . وتلحم خطاطيف في الجزء العلوى من الخزان لرفعه من خلالها عند الحاجة.

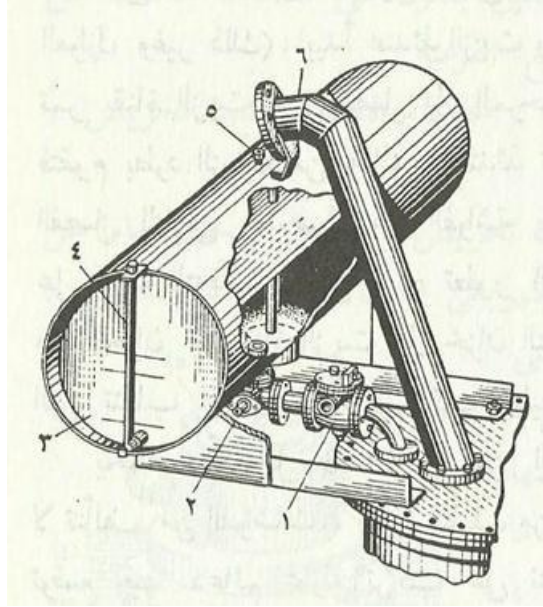
### 1-2-5 فائدة الخزان الرئيسي

- 1- حماية القلب والملفات باحتوائه لها .
  - 2- حمل أطراف ومخارج التوصيل .
  - 3- وضع وحفظ زيت المحولات المستخدم في تبريد وعزل المحول .
  - 4- حمل مواسير الإشعاع للمحول .
- وللخزان الرئيسي غطاء منفصل يستخدم لإحكام الغلق ، وتتركب عليه بقية ملحقات الـ Tank ، ومنها:

### 2-2-5 أنبوبة الطرد ( قذف الزيت ) :

في المحولات كبيرة القدرة يزود خزان الزيت الرئيسي بأنبوبة تغلق فتحتها بواسطة شريحة زجاجية ( غشاء ) . وعند حدوث خطأ تزيد كمية الغازات بالخزان ، فتضغط على الشريحة الزجاجية فتكسرها وتخرج الغازات إلى الجو الخارجي وكذلك الزيت الزائد . وهى تسمى أيضاً بأنبوب تصريف الزيت (رقم 6 فى الشكل 2-5).

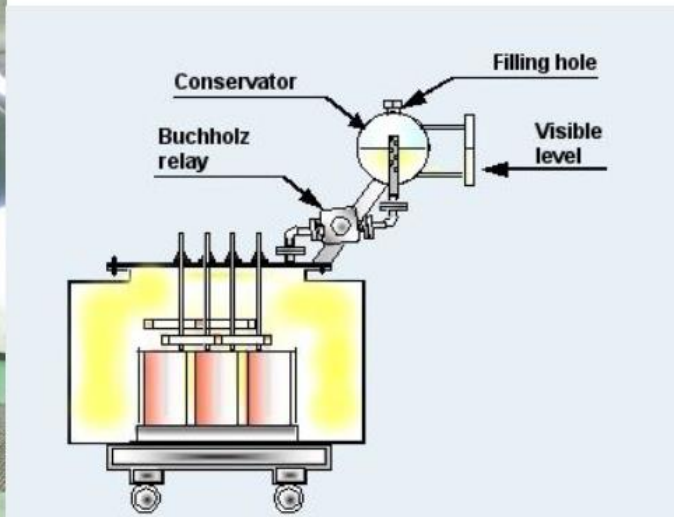




شكل 2-5 : تفاصيل الخزان المساعد

## 3-5 صندوق التمدد CONSERVATOR TANK

في المحولات الكبيرة يستخدم دائما صندوق احتياطي للزيت ، بحيث يصبح التانك الأصلي مغمورا كلياً في الزيت دون أي ستارة هوائية فوقه ، و تنتقل الستارة الهوائية إلى التانك الاحتياطي أو صندوق التمدد كما في الشكل 3-5.



شكل 3-5 : الخزان المساعد

والوظيفة الأساسية لهذا التانك الاحتياطي هو استيعاب أي تمدد أو انكماش في حجم الزيت بعيدا عن التانك الأصلي ، كما أنه يعوض مباشرة أي نقص يحدث في زيت التانك الأصلي ، و من ثم فهو مزود بمقياس oil level gauge لمعرفة مستوى الزيت به حتى لا ينخفض بشدة عن الحدود المثلى. و هو مزود أيضا بمؤشر يرى بالعين المجردة لمعرفة ارتفاع مستوى الزيت بداخله visible level . ويقدر حجم خزان التمدد بحوالي 1/10 حجم الخزان الرئيسي .

و عند تشغيل المحولات على الحمل الكامل فانه تبعاً لخصائص الزيت الطبيعية يتمدد و يزداد حجمه . و قد وجد عملياً أنه يمكن أن يزداد الحجم بنسبة 8% عند التحميل الكامل مع أقصى درجة حرارة محيطه ، و على ذلك لا يمكن ملئ الخزان بالكامل بالزيت ، و لكن يكون ارتفاع الزيت حوالي 30% من ارتفاع خزان التمدد للسماح بتمدد الزيت .

ويزود خزان التمدد بأنبوبة بيان مستوى الزيت (رقم 4 فى الشكل 5-2) وفائدتها بيان مستوى الزيت . وكذلك يمكن من خلالها ملاحظة لون بخار الزيت الناتج عن حدوث عطل بالمحول ، بعد اشتغال الـ Bochholz Relay ، حيث سيكون لون البخار المتجمع واحدا مما يلي :

- إما أبيض ، فيدل ذلك على حرق فى الورق العازل .
- أو أصفر ، فيدل ذلك على حرق الخشب والفبر العازل .
- أو أسود ، فيدل ذلك على تحلل الزيت وحرقه .

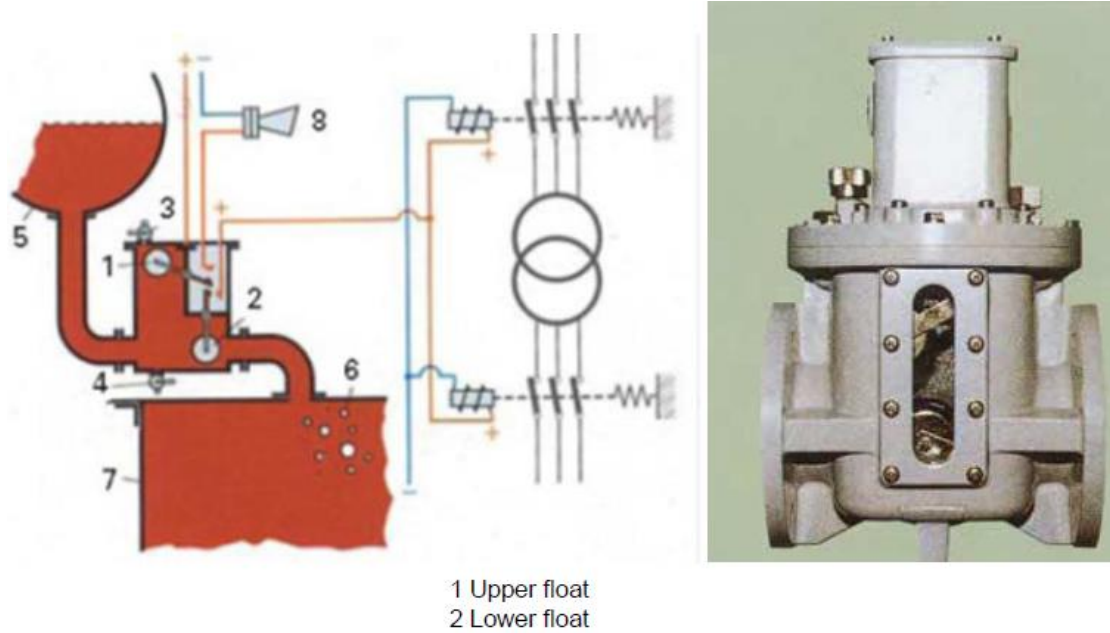
و بالطبع مع إضافة التانك الاحتياطي فإننا نحتاج لإضافة عناصر جديدة مساعدة إلى هذه المنظومة مثل Bochholz relay ومثل Breather unit.

### 5-3-1 جهاز الوقاية الغازية Bochholz relay

و يوجد ضمن ملحقات خزان التمدد ما يعرف بـ Bochholz relay ، وهو جهاز حماية Protective Relay يمكنه أن يصدر إنذار alarm عند انخفاض مستوى الزيت ، و يمكنه أيضا فصل المحول إذا حدث عطل خطير. و يركب الـ Bochholz Relay فى الأنبوبة الواصلة بين الخزائين . وهو يتكون من غرفة واحدة بها عوامتين : عليا وسفلى كما فى الشكل 5-4. ونتيجة عطل أو خلافه تتراكم بداخله الغازات مما يتسبب فى إزاحة للزيت .

ويزود الـ Bochholz Relay أيضا بصمام لخروج الزيت الزائد ، كما يوجد به صمام لخروج بخار الزيت الذى يخرج من فتحة زجاجية أعلي الإناء ومنها يمكن معرفة نوع العطل بمعرفة لون البخار الناتج.





شكل 4-5 : وضع الـ Bochholz relay

- وعند حدوث أحمال زائدة جدا ترتفع درجة حرارة الزيت حتى يغلى ويزيد معدل التبخر له فيتجمع البخار أعلى إناء الـ Bochholz Relay مما يسبب الضغط علي العوامة العلوية فتتحرك إلى أسفل مسببة توصيل دائرة الإنذار.
  - وعند حدوث قصر فان ضغط الزيت داخل الخزان الرئيسي يزداد ، ويندفع الزيت بسرعة الي خزان التمدد ، وعند مروره علي الـ Bochholz Relay يضغط علي العوامة السفلية مسببا قفل دائرة القاطع الرئيسي للمحول وفي نفس الوقت يكون زيادة البخار داخل الـ Bochholz Relay قد سبب حركة العوامة العلوية وبالتالي يحدث Trip.
- علما بأنه إذا حدث فقد في زيت المحول - و نتج عنه انخفاض مستوى زيت الوحدة - فإنه يحدث اضطراب في وضع العوامتين تماما كما لو كان نتيجة عطل.

### 5-3-2 وحدة التنفيس (Breather unit)

عند انخفاض مستوى الزيت في التانك الأصلي يتم تعويضه كما ذكرنا أوتوماتيكيا من التانك الاحتياطي ، و هذا يتسبب في انخفاض مستوى الزيت في التانك الاحتياطي ، و يزداد حجم فراغ الهواء الموجود به ، فيسحب هواء من الخارج من خلال ما يعرف بـ Dehydrated Breathing Unit ، و التي تحتوي على مادة Silicone gel ، و هذه المادة قادرة على امتصاص أي رطوبة تتسرب للزيت ، وهذه المادة يتغير لونها إذا فقدت قدرتها على عزل الرطوبة من اللون الأزرق إلى الوردي كما في الشكل 5-5 .

والسيليكاجيل Silica gel عبارة عن ملح بلوري يمتص كما ذكرنا الرطوبة الموجودة بالهواء أثناء دخوله للمحول و بالتالي يمنع الرطوبة من الوصول لزيت المحول .



شكل 5-5 : وحدة التنفيس

ألوان مادة السيليكاجيل :

- اللون الأزرق : هو لون المادة الفعالة .
- اللون الوردي هو لون مادة السيليكاجيل المشبعة بالرطوبة و يجب تغييرها أو التجفيف في فرن مفتوح درجة حرارته من  $150^{\circ}$  :  $200^{\circ}$  م حتى تستعيد اللون الأزرق مرة أخرى .
- اللون الأبيض : هو لون مادة السيليكاجيل المشبعة بالرطوبة و تم تجفيفها عدة مرات وبالتالي لم تعد صالحة لاعادة التجفيف و يتم تغييرها .
- اللون الأسود هو لون مادة السيليكاجيل المشبعة بالزيت حيث يقوم الزيت بسد مسام السيليكاجيل ، وإذا أصبحت سوداء فلا تصلح عندئذ لاعادة التجفيف و يجب تغييرها .

## 4-5 منظومة حماية الزيت

الزيت له أهمية كبيرة كما رأينا ، ولذا كان لابد من وجود منظومة تحميه من التسرب ، و من التلوث أيضا ، فأي تلوث يتسرب للزيت ( الرطوبة moisture مثلا والتي هي من أخطر أنواع التلوث ) يتسبب في تقليل قوة عزل الزيت ، و هذا يمكن أن يؤدي إلى حدوث شرارة بين الملفات و سخونة الزيت ثم اشتعاله . كما أنه إذا وجدت بالزيت أي مواد موصلة conducting material ( شوائب ) فإنها تتسبب في نفس المشكلة السابقة . وأخيرا ، فإن تسرب الهواء إلى الزيت يتسبب في نوع من الأكسدة للزيت oxidation

، وقد يفقد الزيت خواصه العزلية بذلك. من أجل كل ذلك كان لابد من عمل منظومة لحماية الزيت و مراقبته طوال مدة خدمة المحول .

#### 5-4-1 Sealing في المحولات الصغيرة

تختلف المحولات عن بعضها في تصميم منظومات حماية الزيت oil preservation حسب حجم و قدرة المحول ، فالمحولات الصغيرة يكتفي فيها بعمل لحامات جيدة للـ Tank الرئيسي و مراقبة أي شروخ في جسمه أو أي تسريب في الزيت ، و من ثم فهو نظام بسيط بدون مراوح ولا رادياتير كما في الشكل 5-6.



شكل 5-6 : الـ Sealing في المحولات الصغيرة

حيث يغمس الـ Core و الـ windings داخل هذا الصندوق الحديدي ، ولا يملأ الـ Tank ( المحكم الإغلاق ) بنسبة 100%، بل نترك ما يعرف بـ GAS Blanket أي منطقة فراغ هوائية لتسمح بتمدد الزيت داخل التانك عند الحرارة العالية دون حدوث ارتفاع في الضغط الداخلي . ويتراوح حجم هذه الـ Blanket من 10% إلى 15% عند 25 م° ، و أحيانا تكون هواء أو نيتروجين.

لاحظ أنه عند حدوث عطل فإن ضغط الزيت سيرتفع بشدة داخل التانك ، و لذلك لابد أن نزود هذه الأنواع بصمام pressure relief valve ليسمح بتسريب الهواء من الداخل للخارج لحظة العطل .

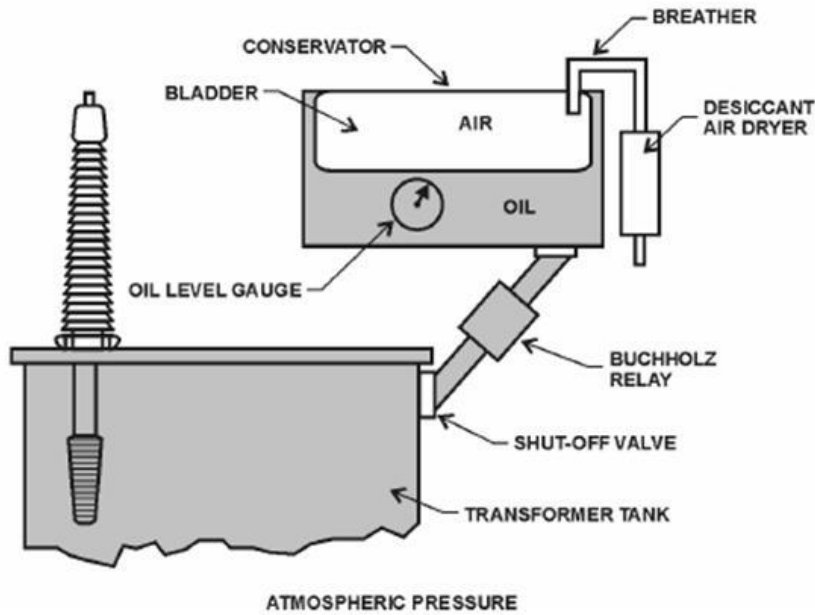
واضح بالطبع أن هذا النوع بسيط في تصميمه و سيكون بالتالي أرخص في سعره . ولكن يعيبه بالطبع أنه يمكن بسهولة أن يحدث اتصال بالهواء إذا حدث أي خلل في اللحام أو عيب في الـ Flange التي تفصل بين الـ Bushings و جسم المحول ، لذا سنستخدم نظاما أخرى في المحولات الكبيرة كما في الجزء التالي.

ملحوظة : قبل ملأ الزيت في الـ Tank لابد من تفريغ الهواء أولا ثم يوضع الزيت .

أما في المحولات الكبيرة فيتغير ضغط الزيت داخل الـ Tank حسب السخونة و البرودة ( التمدد و الانكماش) ، و لابد من عمل Sealing لهذه المحولات بطريقة آمنة . و هناك أنظمة مشهورة لتأمين مثل هذا الـ Sealing of Oil-Filled Tr. :

1. و جود الـ Conservator. كما سبق شرحه في الجزء السابق وكما هو واضح في الشكل 5-7.

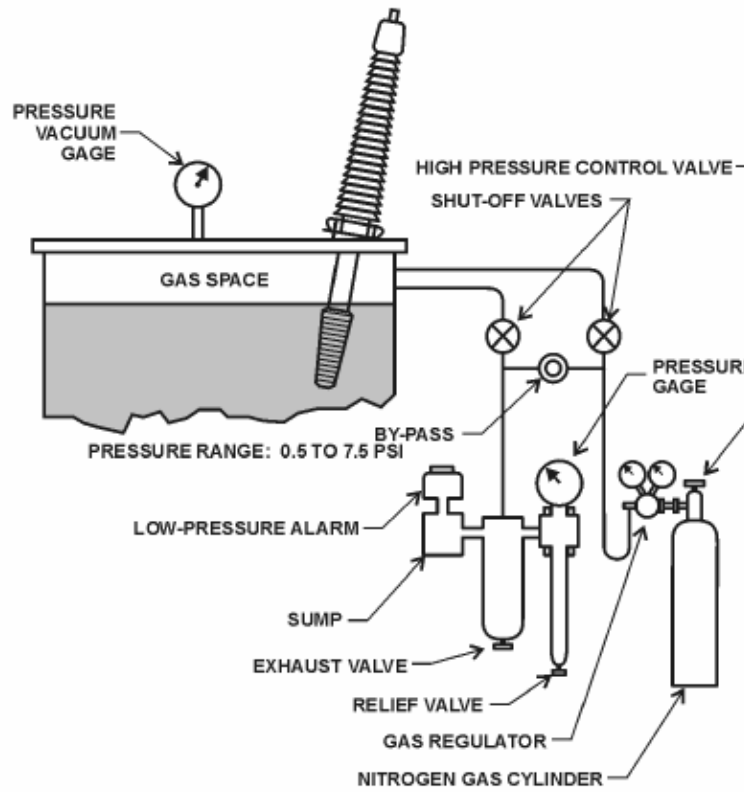
2. أو عمل Positive Pressure فوق الزيت بواسطة غاز النيتروجين



شكل 5-7 : تأمين الزيت في المحولات الكبيرة

#### 1-4-5 N – POSITIVE PRESSURE

ومن الأنظمة المشهورة لتأمين الـ Sealing of Oil-Filled Tr أن يتم استخدام النتروجين المضغوط ليشكل فراغاً بنسبة حوالي 10% فوق الزيت في التانك الأصلي ، وتزود المنظومة في هذه الحالة بأنابيب مملوءة بالنيتروجين توضع ملحقة بالمحول لتعويض أي انخفاض في ضغط الغاز فوق الزيت ، بالإضافة لمجموعة من الصمامات ومؤشرات القياس كما في الشكل 5-8 ، وهذا النتروجين المضغوط يضمن عدم تسرب أي هواء إلي الزيت.



شكل 5-8 : استخدام النتروجين

## 5-5 منظومة تبريد الزيت

ضمن منظومة حماية الزيت هناك منظومة للمحافظة على درجة حرارته من الارتفاع . ففي المحولات الصغيرة يتم تسريب حرارة الزيت من خلال تلامس الزيت مع جسم التانك ، أما في المحولات الكبيرة فيضاف عنصر جديد لزيادة كفاءة التبريد ، وذلك عن طريق إضافة Radiator ليقوم بزيادة مساحة السطح المعرض للهواء من الخارج والملامس للزيت من الداخل .

وفي بعض المحولات يكتفى بإضافة هذا Radiator لزيادة كفاءة التبريد ، وتعرف هذه الأنظمة بأنظمة التبريد الطبيعي للهواء والزيت ، ولكن في البعض الآخر تضاف مراوح Fans تركيب على ال Radiator كما في الشكل 5-9 .



شكل 5-9 : تبريد المحولات الكبيرة

وفي هذه الحالة يكون التبريد قسري Forced ، وهو أقوى من السابق ، ولذا تعرف بأنظمة Forced Air, FA ، وقد تضاف مضخة أيضاً لضمان تحريك الزيت بسرعة داخل الـ Radiator وداخل المحول ، وفي هذه الحالة تسمى بأنظمة FAFO Forced Air Forced Oil ، كما سندرس تفصيلاً في باب التبريد .

#### ملحوظة :

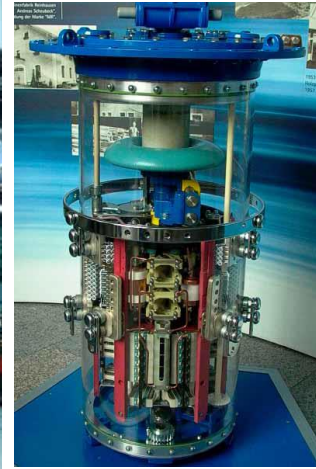
المحركات التي تحرك المراوح أو التي تحرك المضخات تكون غالباً مرتبطة بأنظمة تحكم أوتوماتيكية لتشغيل أو إيقاف هذه المحركات حسب درجة الحرارة ودرجة التحمل ، لأن هذه المحركات تستهلك جزءاً من قدرة المحول ، وبالتالي تقلل من كفاءة تشغيله ، ولذا يجب ألا تعمل إلا إذا كانت هناك حاجة ماسة لتشغيلها .

## 6-5 مغير الجهد (TAP CHANGER)

الـ Tap Changer هو أحد أهم العناصر الرئيسية في تركيب المحول والتي لها علاقة مباشرة مع الملفات ، وهو الجهاز المسئول عن تغيير النسبة بين عدد الملفات في ملف الابتدائي إلى عدد الملفات في الملف الثانوي وهي المعروفة بـ  $N1 / N2$  . وهذا الجهاز يكون موجوداً فقط مع المحولات الكبيرة أما المحولات الصغيرة فتكون النسبة بين  $N1 / N2$  ثابتة .

وتغيير نسبة التحويل قد يكون أثناء التشغيل on-load أو أثناء فصل المحول off-load ، والنوعان موجودان بالخدمة ، ولكل ميزاته وعيوبه ، فالنوع الأول (شكل 5-10) أفيد وأسرع ، لكنه أصعب في التصميم لأن التغيير يتم أثناء مرور التيار في الملفات ، وهذا قد يتسبب في شرارة .





شكل 5-10 : مغير الجهد

### 5-6-1 الحاجة للـ Tap Changer

معلوم أن ثبات نسبة التحويل في المحولات الكبيرة يتسبب أحيانا في مشاكل في أداء المحول ، لأنه إذا كانت نسبة التحويل مثلا في أحد المحولات هي  $132/11 \text{ kV}$  فمن المحتمل أن يتغير جهد الدخول الذي يفترض أن يكون مساويا لـ  $132 \text{ kV}$  بدرجة أصغر أو أكبر قليلاً من هذه القيمة نتيجة بعد المحول مثلاً عن مصدر التغذية ، وبالتالي ستتغير قيمة جهد الخروج . ولعلاج هذه المشكلة نستخدم الـ Tap Changer حيث يتم أثناء تصنيع ملفات المحول تقسيم ملفات الابتدائي (الجهد الأعلى غالبا) إلى أجزاء ، وإخراج أطراف هذه الأجزاء لتكون متاحة للتوصيل الخارجي . وهذا الجهاز قادر على تكبير النسبة بين  $N1/N2$  أو تصغيرها بقدر محدد سلفاً ، وتتراوح نسبة التغير بين  $\pm 5\%$  من الجهد الإسمى كما في الشكل 5-11.

+5.0% tap	13,860/480 V
+2.5% tap	13,530/480 V
Nominal rating	13,200/480 V
-2.5% tap	12,870/480 V
-5.0% tap	12,540/480 V

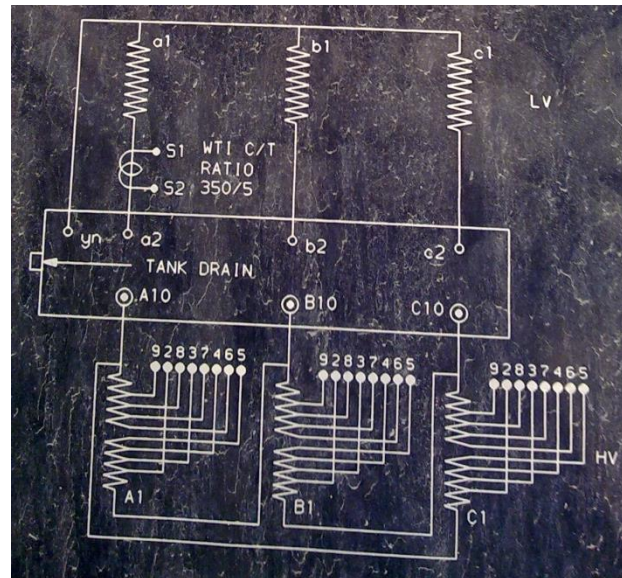
شكل 5-11 : قيم مغير الجهد

فلو انخفض جهد الدخول مثلاً في محول نسبة تحويله هي 132/11KV من 132KV إلى 130KV أى بمقدار 1% من القيمة الاسمية ، فهذا يعنى أن جهد الخروج سينخفض أيضاً ليصبح 10.8 kV بدلاً من 11 kV. ولكي نرفع هذه القيمة (10.8 kV) إلى القيمة الاسمية (11 kV) فإننا نحتاج لرفع نسبة التحويل لتصبح 101% بدلاً من 100% ، وهذا يعنى أن جهد الخروج سيرتفع بنفس النسبة ليصبح مساوياً 11KV كما في المعادلة :

$$V_o = 10.8 \times \frac{101}{100} = 11kV$$

### 5-6-2 فكرة عمل الـ Tap Changer

وفكرة عمل الـ Tap Changer يمكن فهمها بسهولة من خلال الشكل 5-12 المرسوم على أحد المحولات جهد 11/34 kV. واضح من الرسم أن ملف كل Phase مقسم إلى سبع أجزاء بحيث يمكن توصيل أى جزءين من هذه الأجزاء معاً للحصول على نسبة من العدد الكلى لللفات.



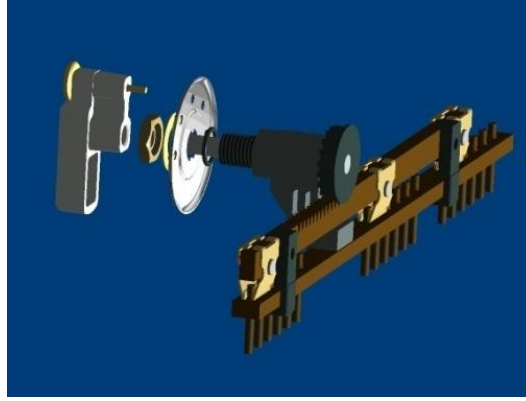
H.V. VOLTS	CONNECT PHASES A.B.C.	SWITCH POSITION
34650	5-8	1
33825	4-8	2
33000	4-7	3
32175	3-7	4
31350	3-8	5
30525	2-8	6
29700	2-9	7

شكل 5-12 : توصيلات مغير الجهد



عملياً ، في محولات التوزيع الأقل قدرة سيتحرك مشط معدني Diverter Switch (شكل 5-13) لعمل short بين أى طرفين من أطراف الملف الابتدائي السبع (الأعلى جهداً والأقل في التيار) حسب وضع الـ Switch Position ، ففي الوضع رقم 1 مثلاً سيتم عمل short بين الطرفين 5 و 6 في الـ 3-Phases (باقي الأرقام مفتوحة) ، وهذا يعني أن عدد اللفات في الملف الابتدائي في حدها الأقصى دون استبعاد أي لفات (لاحظ ذلك في الجزء الأيمن) ، ويكون جهد الابتدائي مساوياً 34650V ، ومن ثم تصبح  $N1/N2$  مساوية لـ 11/34.

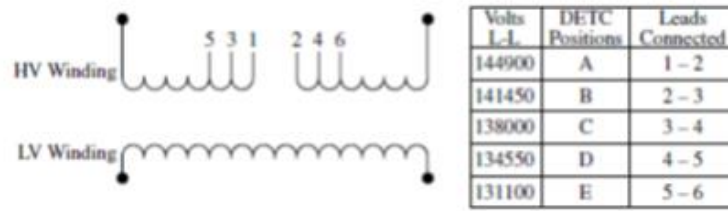
أما في الوضع رقم 2 فيتم عمل short بين الطرفين 4 و 6 ، وهذا يعني أنه إذا دخل التيار من النقطة A10 في الـ Phase الأول مثلاً فإنه سيمر أولاً بنقطة رقم 6 ثم النقطة رقم 4 وهذا يعني أن جزء من عدد اللفات (الواقع بين 4 ، 5) قد استبعد أي قلت عدد اللفات ، ومن ثم تنخفض نسبة التحويل ، ومن ثم سينخفض جهد الابتدائي ليصبح 33825 V حسب القيم الموضحة بالجدول يمين الشكل 5-12.



شكل 5-13 : أحد أشكال مغير الجهد في محولات التوزيع

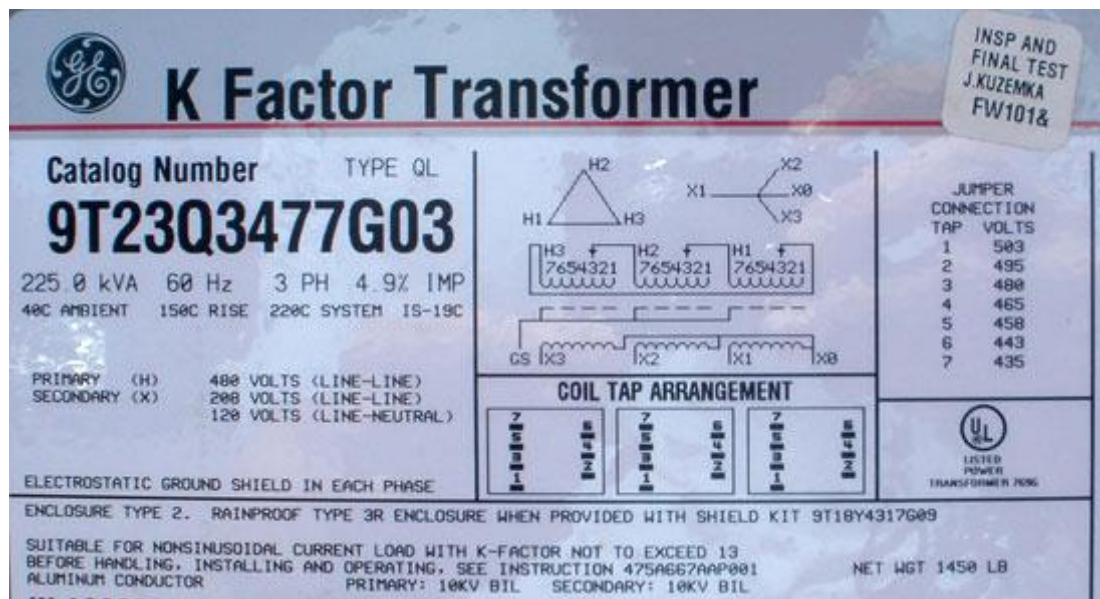
بالمثل في الوضع 6 مثلاً سيتم عمل short بين 8-2 وهذا يعني أن التيار يدخل من رقم 8 ثم الي رقم 2 ومن ثم تقل بشدة نسبة التحويل لاستبعاد جزء كبير من عدد اللفات وهكذا .

وهناك مثال آخر في الشكل 5-14 ، وفيه يمكنك أن تحصل على أقصى نسبة تحويل عندما يكون المشط في الوضع A الذي يكون فيه short بين النقطتين 1-2 ، ليصبح جهد الخروج 144900V ، أما أقل نسبة تحويل فتحصل عليها إذا وضعت الـ DIVERTER في الوضع E أي إذا عملت short بين النقطتين 5-6 ، ويكون عندها جهد الخروج 131100V لأن جزء كبير من اللفات قد تم عمل short فوقه كما في الشكل 5-14.



شكل 5-14 : مثال آخر لمغير الجهد

والشكل 5-15 يعطى مثالاً ثالثاً للـ Tap Changer .



شكل 5-15 : مثال ثالث لمغير الجهد

### 5-6-3 مقارنة بين نوعي Tap Changer

مغير الجهد على الحمل ( On load tap changer ) يستخدم فقط في محولات القدرة حيث يتعذر فصل المحول عن الشبكة ، ولذا تغمر نقط التلامس لمغير الجهد التي تستخدم في تغيير النسبة في اسطوانة بها زيت غير قابل للاشتعال .

لكن هناك نوع آخر وهو Off-Load Tap Changer أى مغير الجهد على الدائرة المفصولة ، و يستخدم هذا النوع في محولات التوزيع ، حيث يجب فصل مصدر الجهد المتوسط وكذلك مفاتيح الخروج لعزل المحول تماما عن الشبكة قبل عمل أى تغيير فيه نظراً لخطورة تغيير وضع مغير الجهد في وجود جهد على المحول حيث يؤدي ذلك إلى اشتعال زيت المحول .

والجدول 1-5 فيه مقارنة بين النوعين:

جدول 1-5 : مقارنة بين مغير الجهد الـ On-load و Off-load

وع المقارنة	مغير الجهد على الحمل	مغير الجهد على الدائرة المفصولة ( الالاجهد )
نوع المحول	محولات القدرة	محولات التوزيع
عدد نقاط التقسيم	17 نقطة أو أكثر	3 أو 5
الوسط المحيط	اسطوانة مغلقة بها زيت قاطع للشرارة	زيت المحول
طريقة التغيير	أتوماتيكياً بواسطة وحدة تحكم خاصة	يدوياً بعد فصل الجهود من على المحول
المكان	أسطوانة خاصة متوازية مع الملفات	أسفل السطح العلوي للمحول
وقاية المحول من الشرارة التي يمكن أن تحدث أثناء التغيير	زيت قاطع للشرارة	فصل الجهد عن المحول

## 5-7 أطراف التوصيل BUSHINGS

من العناصر الأساسية البارزة في أي محول وجود ما يعرف بـ Bushings والتي وظيفتها توصيل أطراف الملفات الابتدائية الثلاثة الداخلية بالشبكة الكهربائية الخارجية ، أي توصيل المحول بجهد الدخل Input Voltage ، وكذلك توصيل أطراف الملفات الثانوية الثلاثة الداخلية بأطراف الـ Load الخارجية .

وبالطبع حيث أننا نتعامل مع جهود عالية فلا بد من عزل هذه الأسلاك وهذا هو دور الـ Bushings ، الذي يمكن أن نلخص وظيفته بأنه يعزل أطراف الملفات الداخلية عن جسم المحول ، أي أنه يقوم بالربط بين الأطراف الداخلية للمحول والأطراف الخارجية للشبكة سواء مصدر الكهرباء ، أو الحمل .

ويتم توصيف Bushings حسب جهد المحول وحسب قيمة التيار المار به وليس حسب قدرة المحول ( رغم أن القدرة هي حاصل ضربها ) ، لأننا يمكن أن يكون لدينا جهد عالي جداً ، و تيار منخفض في جهة

، بينما لدينا جهد منخفض وتيار عالي في الجهة الثانية ، وفي هذه الحالة فالقدرة تقريباً متساوية في الناحيتين بفرض عدم وجود ( loss ) ، لكن مواصفات Bushings الخاصة بكل جانب تكون مختلفة تماماً ، ولذا لا تصلح القدرة لتوصيف الـ Bushings .

فالعزل مثلاً في الجانب الأعلى جهداً يكون أكبر بكثير من الجانب الأقل جهداً ، ومن ثم يمكنك أن تميز بمجرد النظر بين الجانب الأقل جهداً و الجانب الأعلى جهداً في المحول من ملاحظة حجم الـ Bushings الموجود في كل جانب .

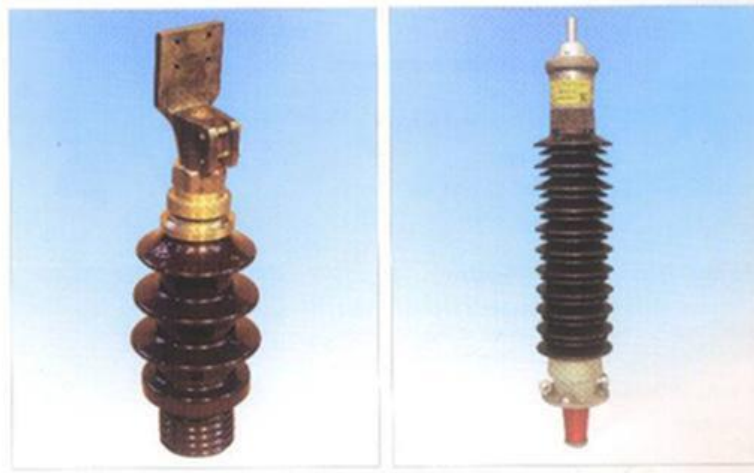
وتختلف مادة العوازل باختلاف الجهد المستخدم ففي الجهد المنخفض و المتوسط تكون من الصيني ، أما في الجهد العالي تكون من الصيني المملوء بالزيت ، وفي حالة الجهد الفائت تكون السيراميك . و الشكل 4-33 يبين بعض أشكال الـ Bushings .

مع ملاحظة أنه في حالة توصيل المحول بكابلات أرضية فإننا نستخدم صندوق نهاية مثبت في جانب المحول بحيث تدخل إليه الكابلات وتتغذ إلى داخل الوعاء . أما في حالة توصيل المحول مباشرة بالخطوط الهوائية أو قضبان التوزيع فتكون أطراف التوصيل فوق غطاء المحول .

#### 5-7-1 دور الـ Skirts

جسم الـ Bushing الخارجي مصنوع غالباً من السيراميك ، ويتميز بالتعاريح الموجودة عليه كما في شكل 5-16 ، وهذه التعاريح تعرف بالـ Skirts ، والهدف منها جعل المسافة التي يقطعها التيار المتسرب خلال سطح العازل ( السيراميك ) أطول ما يمكن ، ومن ثم تصبح المقاومة السطحية للتيار surface resistance أكبر ما يمكن لتقليل هذه التيارات المتسربة .

وتعرف مسارات التسرب بـ creeping paths ، وتمتد من الجزء المتصل بالكهرباء إلى جسم العازل إلى الأرض ( جسم المحول ) وبالطبع نحتاج لإطالة هذا المسار كما ذكرنا لزيادة المقاومة .



شكل 5-16 : أشكال البوشنج

### 2-7-5 استخدام الـ Corona Rings

في محولات الجهد العالي يكون هناك احتمال لحدوث تفريغ كهربى في الهواء Discharge بين الأطراف الداخلة ذات الجهد العالي وبين جسم المحول بسبب ارتفاع الجهد وقيمة المجال الكهربى ، ولتقليل قيمة المجال وتوزيعه بانتظام حول الـ Skirts نضيف حلقة معدنية كما في الشكل 5-17 بالقرب من نهاية أطراف الـ Bushing ، ومن ثم تسهم هذه الحلقة في ضمان ألا يرتفع قيمة المجال إلى القيمة التي يمكن أن تؤدي لحدوث ظاهره الكورونا ، والتي تنشأ عنها إما إنهيار جزئي partial breakdown أو يحدث نوع من التفريغ discharge خلال الهواء وهذا يعني فقد في الطاقة ، وقد ينتهي بحدوث complete breakdown وانهيار تام للعزل بين الأطراف الحاملة للتيار وجسم المحول .



شكل 5-17 : حلقات الكورونا

### 3-7-5 أهمية الـ Flange

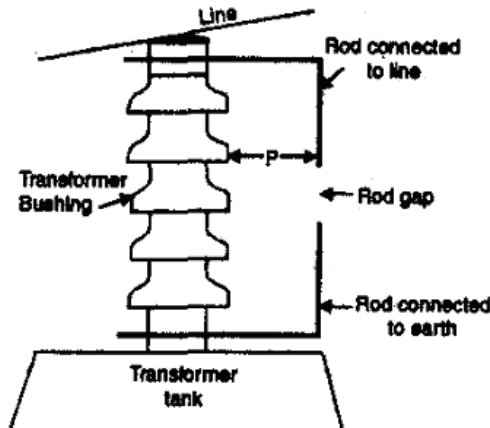
وظيفة الـ Flange هي تثبيت الـ bushing في جسم المحول بطريقة تمنع تسرب أي تلوث أو رطوبة أو أتربة من خلال نقاط الاتصال ، وغالباً تصنع من cast aluminum وهي مادة غير مغناطيسية كما في الشكل 5-18 لمنع حدوث أي نوع من الـ loss بسبب التيار الذي يمر خلال هذه الـ Flange.



شكل 5-18 : Flange

#### 4-7-5 استخدام فتحة التفريغ Rod Gap

تزود الـ Bushings بما يسمى بالفجوة الشرارية : Rod Gap كما في الشكل 5-19 وذلك لحمايتها من الجهود الزائدة حيث إنه عند زيادة الجهد ينهار عزل الهواء في هذه الفجوة .



شكل 5-19 : شكل فتحة التفريغ

## 8-5 معدات القياس والتحكم ACCESSORIES

في نهاية هذا الباب هذه صور لبعض الـ Accessory المستخدمة في محولات التوزيع من كتالوج شركة الماكو للمحولات المصرية. لاحظ أن شكل الـ Accessory يختلف حسب الـ rating الخاص بالمحول.



## 2 Pressure relief valve

The pressure relief valve is mounted on the cover of power transformers to relief any internal over pressure.

Pressure relief valve is flanged type with operating pressure from 0.2 atm to 0.7 atm (20 to 70 KPA). The valve operates, just the internal pressure reach 30 % higher than the setting value.



## 3 Dial thermometer with capillary tube

This instrument is used for indication of oil temperature in power transformer. It is of dial type fitted with maximum reading pointer and suitable for outdoor mounting.

The maximum reading pointer should be re-settable from outside by a Knob or by screwdriver.

All components are made from corrosion resistant material or surface treated.



## 4 Buchholz relay

This relay is provided to:

- Detect any generation of gas Bubbles and energize alarm Contact (first stage)
- Detect any sudden oil level drop and actuate
- Tripping contact (second stage)
- The relay is according to NFC 52-100, DIN42566.



## 5 Magnetic oil level indicator

The oil level indicator is of magnetic type provided with indicator to indicate the oil level of the expansion tank (conservator) for power transformer.

Operating temperature is:

Ranging from -20 °C to 100° C & Degree of protection IP 54





## 6 Electrical fan

In order to increase the transformer load capacity a special motor fan is used to increase the cooling of transformer.



## 7 Winding temperature indicator

The winding temperature indicator is used to control the cooling Fans for (ONAF) operation and gives alarm and trip signals to protect the power transformer.

The indicator is complete with a temperature sensing system with a capillary tube and suitable for a current transformer with secondary current 2A. It is fitted four sets of adjustable micro switches to close between temp. range 60° C to 120° C.



## 8 Oil temperature indicator

The oil temperature indicator is used for Indication of the oil temperature and gives alarm and trip signals to protect the power transformer.



## 9 Dehydrating breather

(SELICA-GEL TYPE)

It is used to trap out the moisture of the air entering the Expansion vessel during the transformer operation.

The saturation degree distinguished by changing color silicagel.



# الباب الثالث

## توصيل الملفات في المحولات الثلاثية

### Transformer Connections

- الفصل السادس : قطبية المحولات
- الفصل السابع : حساب الـ  $\text{Phase Displacement}$  وتحديد الـ  $\text{Vector Group}$
- الفصل الثامن: ميزات وعيوب التوصيلات المشهورة في المحولات

## مقدمة الباب الثالث

لدينا في محولات الـ  $3-\emptyset$  ثلاثة ملفات في الجانب الابتدائي موصلة على صورة دلتا أو star ، وثلاثة آخرين في الجانب الثانوي موصلة على صورة دلتا أو star أو زجراج ، وربما يكون لدينا ثلاثة ملفات أخرى Terratiary winding إذا كان الثانوي متعدد الجهد.

وحسب طريقة توصيل الملفات أو Transformer Connections في الابتدائي والثانوي سيكون لدينا قيم مختلفة للـ line voltage ، ولـ voltage phase ، وهذا معروف وسبق الحديث عنه ، لكننا سنتحدث تفصيلاً في هذا الفصل عن أمور أخرى إضافية لها علاقة بالـ Transformer Connections. فاختلاف الـ Connection سيؤثر على:

1- القطبية أو الـ Polarity ، فطريقة التوصيل واتجاه اللف في الملفات سيحدد الاتجاه اللحظي لجهد الثانوي بالنسبة لجهد الابتدائي سواء في المحولات الـ  $3-\emptyset$  أو في المحولات الـ  $1-\emptyset$  ، وهو ما يعرف بالقطبية.

2- كما سيؤثر اختلاف الـ Connection على قيمة الزاوية بين الجهد الناشئ في الثانوي والجهد الابتدائي ، أو ما يعرف بالـ phase displacement ، وبالطبع فإن قيمة هذه الزاوية ستتوقف ليس فقط على طريقة التوصيل في كلا الجانبين وهل هي دلتا/ستار ، أو ستار/دلتا ، أم دلتا/دلتا إلخ ، إنما ستتوقف كذلك على طريقة توصيل الملفات الثلاثة معاً لتشكيل توصيلة الـ Delta أو لتشكيل توصيلة الـ Star .

3- و سيؤثر كذلك اختلاف الـ Connection على ما يعرف بـ vector group ، وهو موضوع مترتب على قيمة الـ phase displacement السابقة كما سنرى.

4- ومن الموضوعات المرتبطة كذلك بالـ Connection موضوع الـ Phase Sequence أو اتجاه تتابع الـ Phases ، وهل هي A ثم B ثم C أم هي ترتيب آخر ، وهل الترتيب مع عقارب الساعة أم عكس عقارب الساعة إلخ.

### لماذا ندرس هذا الموضوع؟

فأهمية دراسة موضوع عمل الـ Connection ، وطريقة ترتيب وتوصيل الملفات الثلاثة معاً في كل جهة ، تكمن في أنه عند طريقها نستطيع أن نحقق أية زاوية اتجاهية مطلوبة بين الابتدائي والثانوي (أى Vector Group) ، ونحقق أيضاً أية Phase Sequence ، ونحقق أية قطبية Polarity ، وكل ذلك سيفيد عند توصيل المحولات على التوازي ، وهذا هو الغرض الأساسي من

دراسة هذا الموضوع ، فبدون هذه المعلومات لا يمكن توصيل محولين على التوازي ، أما إذا كان المحول منفردا فستكون معلومات هذا الفصل شكلية بالنسبة له وليست ذات أهمية.

ملاحظة:

موضوع ( القطبية ) هو الوحيد الذى يصلح تطبيقه بمحولات الـ 3-Ø ، و محولات الـ 1-Ø ، أما باقى الموضوعات فيتعلقوا بمحولات الـ 3-Ø فقط.

# الفصل السادس

## قطبية المحولات

### Transformer Polarity

مصطلح القطبية يقصد به تحديد العلاقة الاتجاهية بين جهد المصدر في ملفات الابتدائي ، والجهد الناشئ في ملفات الثانوي والتي بناء عليها سيتحدد الاتجاه اللحظي لجهد الثانوي بالنسبة لجهد المصدر وهل يتزايدون معا ويتناقصون معا أم هناك Phase Shift بينهما ، وذلك سواء في المحولات الـ 3-Ø ، أو في المحولات الـ 1-Ø . وهى قضية هامة جدا عند توصيل المحولات على التوازى وأيضا عند توصيل الـ Current Transformers مع أجهزة الوقاية وأجهزة القياس .

فالمعلوم أن جهد الثانوي يمكن أن يكون في نفس إتجاه جهد الابتدائي In-phase ، وقد يكون عكس الاتجاه 180 degree out of phase ، وذلك حسب طريقة لف الأسلاك وحسب اتجاه اللف تحديدا ، وهذا هو المقصود بالقطبية .

على سبيل المثال لو أن إتجاه لف الأسلاك كان من أعلى لأسفل في اتجاه عقارب الساعة في كلا الملفين ( الابتدائي والثانوي ) وذلك لمن ينظر للملف من أعلى ففي هذه الحالة فالطرف النهائي العلوي للملف الابتدائي ونظيره الثانوي سيكونان لهما نفس القطبية ، وهذا يعني أن أى ارتفاع أو انخفاض في الابتدائي و الثانوي سيكون في نفس اللحظة ، أي متزامنان معا في كلا الطرفين . أما لو عكست القطبية فهذا يعني العكس تماما ، أي أن أحدهما يرتفع و الآخر ينخفض .

## 1-6 تجربة عملية لتوضيح المفهوم

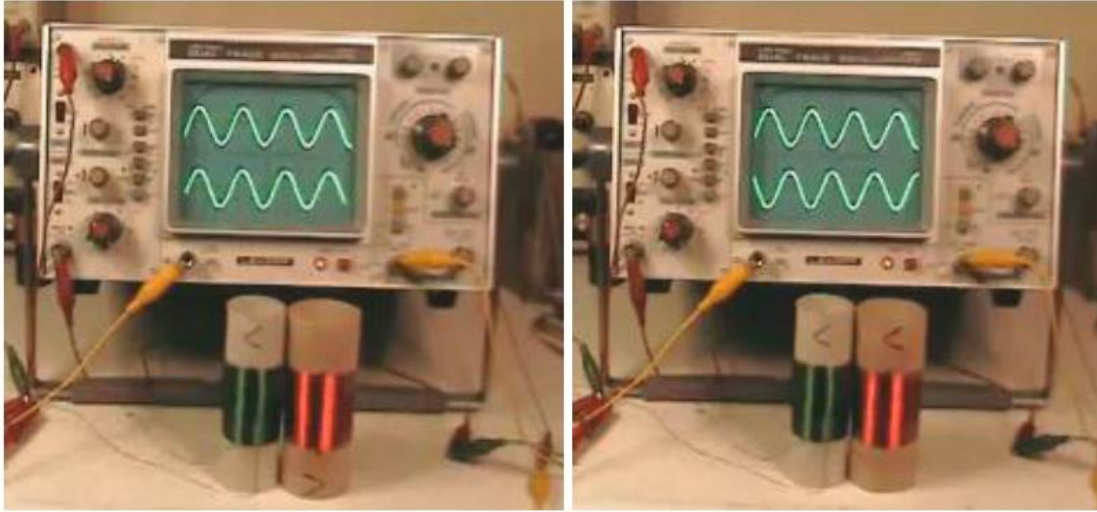
فى المعمل يمكن أن نصنع Air-core Transformer مكون كما فى الشكل 1-6 من:

3- ملف ابتدائي (الأخضر ) ويمثله الـ Signal العلوية فى جهاز راسم الموجات Oscilloscope .

4- ملف ثانوى (الأحمر) ويمثله الـ Signal السفلية فى جهاز راسم الموجات Oscilloscope .

فى الصورة اليمنى تشير الأسهم على الملفين إلى أنهما ملفوفين فى نفس الاتجاه . أما فى الصورة اليسرى فقد تم عكس اتجاه الثانوى بالنسبة للابتدائي (لاحظ أن السهمين عكس بعضهما) . الآن قارن بين الصورتين فى جهاز راسم الموجات ليظهر لك بوضوح مفهوم القطبية ، ففي الصورة اليسرى يرتفع الجهدان

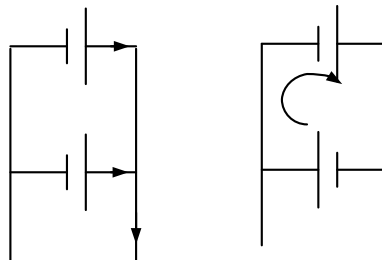
معاً وينخفضاً معاً وتسمى القطبية هنا بـ Additive Polarity أى قطبية جمع ، وبمجرد عكس اتجاه اللف تغيرت الزاوية بين جهد الابتدائي والثانوى بمقدار 180 درجة مع عدم تغير قيمة المقدار magnitude (أى فقط تغير الاتجاه) وأصبح الجهدان عكس بعضهما فى الاتجاه فإذا ارتفع الأول انخفض الثانى وهكذا ، وتسمى بالقطبية الطرحية Subtractive Polarity .



شكل 6-1 : اختلاف القطبية حسب اتجاه اللف

### الأهمية العملية لتحديد الـ Polarity

لتوضيح أهمية الـ polarity فى الواقع العملى ، فإننا نأخذ مثالا عند توصيل محولين على التوازي ، وتذكر أنه فى الدائرة الكهربائية البسيطة لتوصيل بطاريتين على التوازي يكون التوصيل صحيحا إذا كانت الأقطاب متشابهة موصلة معاً ، فيخرج مجموع التيارين إلى الحمل كما فى الجزء الأيسر من الشكل 6-2 ، أما إذا تم عكس اتجاه الأقطاب فإن ذلك يعني حدوث short وحدوث خطأ قاتل فى التوصيل لأنه سيمر تيار مرتفع جدا بين البطاريتين Circulating current خلال فقط مقاومة الأسلاك والمقاومة الداخلية للبطاريتين المنخفضة أصلا أى خلال مقاومة تقريبا تساوى صفر .



شكل 6-2 : تأثير عكس اتجاه الأقطاب (الأيسر هو الصحيح)

فإذا كانت الـ Polarity للمحولين الموصلين على التوازي مختلفة فستحدث نفس المشكلة السابقة ويمر تيار عالي جدا Short بين المحولين نفسيهما ، ومن هنا كان لابد من معرفة الـ Polarity أولا قبل توصيل المحولات على التوازي.

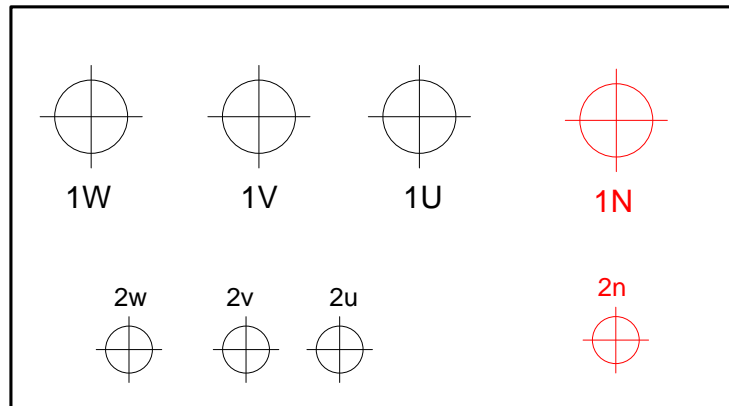
## 2-6 ترميز أطراف المحول طبقا للمواصفات المختلفة

من الطبيعي أن يكون هناك standard موحد لتمييز أطراف الملفات الابتدائي و الثانوي في حالة المحولات الأحادية والثلاثية ، ففي كلا النوعين فإن أطراف الملف تخرج لخارج المحول من خلال الـ Bushings. و يجب أن تكون مميزة بعلامات أو رموز واضحة لتمييز أطراف الجهد العالي عن أطراف الجهد المنخفض ، وتحديد أيضا أطراف الـ 3-Ø مرتبة في كلا الجانبين من المحول . (ملحوظة : لا يكفي الاعتماد على حجم الـ Bushing لتمييز الأطراف ، لأن الحجم يميز فقط بين الجهد العالي وهو الأكبر حجما وبين الجهد المنخفض ، لكنك لا تستطيع أن تحدد من من الثلاثة هو الـ Phase-A أو Phase-B ، ومن هنا كانت أهمية الترميز .

### 1-2-6 الترميز في مواصفات الـ IEC

تستخدم ثلاثة أحرف هي U & V & W ، وتكون هذه الحروف كبيرة Capital Letter ومسبوقة برقم 1 في حالة أطراف الجهد العالي ، هكذا : 1U ، 1V ، 1W ، أما أطراف الجهود الأخرى فتستخدم لها الأحرف الصغيرة Small Letter مسبوقة برقم 2 ، هكذا : 2u ، 2v ، 2w . ويمكن استخدام رقم 3 إذا كان المحول به ملف ثالث وهو ما يعرف بـ Windings Tertiary ، هكذا : 3u ، 3v ، 3w ، ويستخدم الحرف N لتمييز خط الـ Neutral ، ويوضع على اليمين.

والترميز طبقا للـ IEC في المحولات الثلاثة يظهر كما في الشكل 3-6.



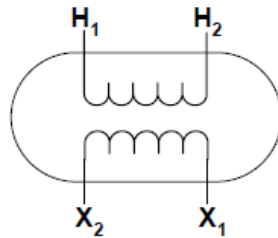
شكل 3-6 : ترميز المحولات الثلاثة في IEC



## 2-3-6 الترميز في مواصفات IEEE / ANSI

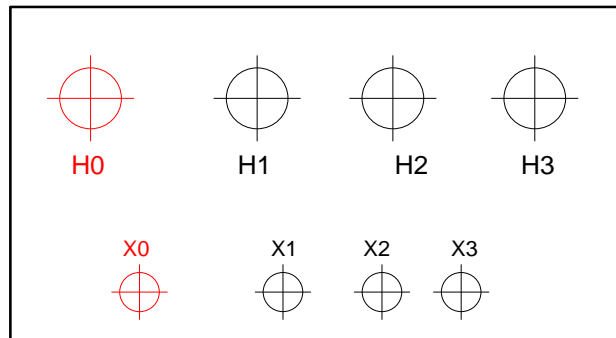
تستخدم حرف الـ H لتمييز الجهد العالي  $H_1, H_2, H_3$  ، أما الجهود الأخرى بالمحول فيستخدم معها الحرفين X,Y أي  $(X_1, X_2, X_3)$  أو  $(Y_1, Y_2, Y_3)$  وهكذا ، ويستخدم الرقم 0 لتمييز الـ Neutral في الناحيتين  $(X_0, H_0)$

أما محولات الـ 1-Ø ، وباستخدام مواصفات الـ ANSI فيكون الترقيم فيه كما في الشكل 4-6.



شكل 4-6 : ترميز محول 1-Ø في مواصفات IEEE / ANSI

أما المحول الـ 3-Ø في نفس المواصفات فيكون كما في الشكل 5-6 (هذه صورة اللوحة للنظر إليها من أعلى المحول)



شكل 5-6 : ترميز المحولات الثلاثية في الـ ANSI

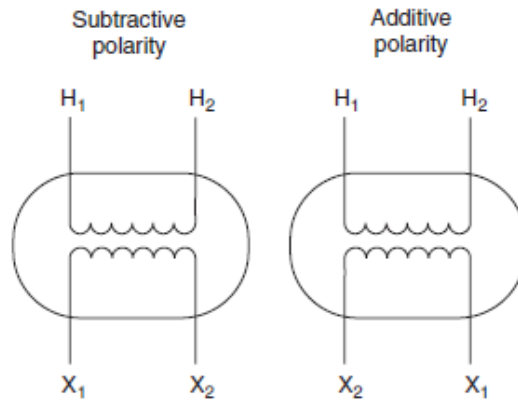
لاحظ أنه في حالة الـ IEC أن الـ Neutral يوضع على اليمين ، ويرمز له بالرمز 1n و 2N في جهتي الجهد العالي والمنخفض على التوالي ، عكس مواصفات الـ ANSI فتضعه على اليسار وترمز له بالرمز  $H_0$  و  $X_0$  في الجهتين على التوالي كما في الشكل 5-6 .

## 4-6 تحديد القطبية POLARITY من الرموز

والترميز السابق له أهمية في تحديد القطبية أي العلاقة الاتجاهية بين جهد الملف الابتدائي والملف الثانوي.

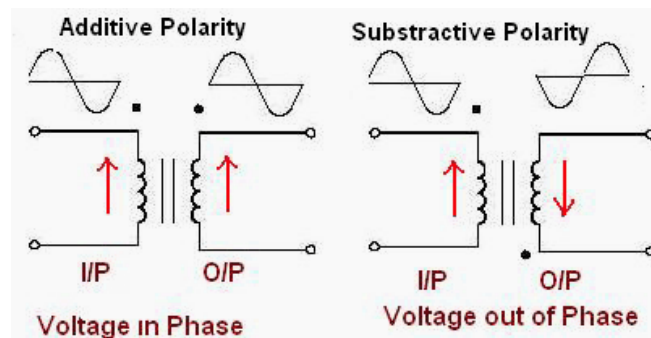
فإذا كان الترتيب هو  $H_1, H_2, X_1, X_2$  كما في الشكل 6-6 الأيمن (بمعنى أنهما يدورا وراء بعضهما في اتجاه عقارب الساعة) فإن هذا القطبية تسمى قطبية جمعية Additive Polarity (من الجمع) ، (بمعنى آخر أنه حين تكون  $H_1$  على اليسار ونكون  $X_1$  على اليمين) وهذا يعني أن  $H_1$  موجبة بالنسبة لـ  $H_2$  و في نفس اللحظة تكون  $X_1$  موجبة بالنسبة لـ  $X_2$ .

أما إذا كان الترتيب معكوسا (الترميز في اتجاه واحد في الجانبين) كما في الشكل 6-6 الأيسر فتسمى Subtractive Polarity وهي عكس الحالة السابقة .



شكل 6-6 : أنواع القطبية

وأحيانا في المحولات الأحادية يعبر عن Add/Sub باستخدام الـ Dot كما في الشكل 6-7 . فإذا كانت النقطتين في اتجاه واحد فهذا يعني Add Polarity ، وهنا يعني كما ذكرنا سابقا أن الجهد في هذين الطرفين يرتفعان معا وينخفضان معا في نفس التوقيت كما في الشكل 6-7 الأيسر ، أما إذا وضعت نقطة في الأعلى و أخرى في الأسفل فهذا يعني Sub Polarity.

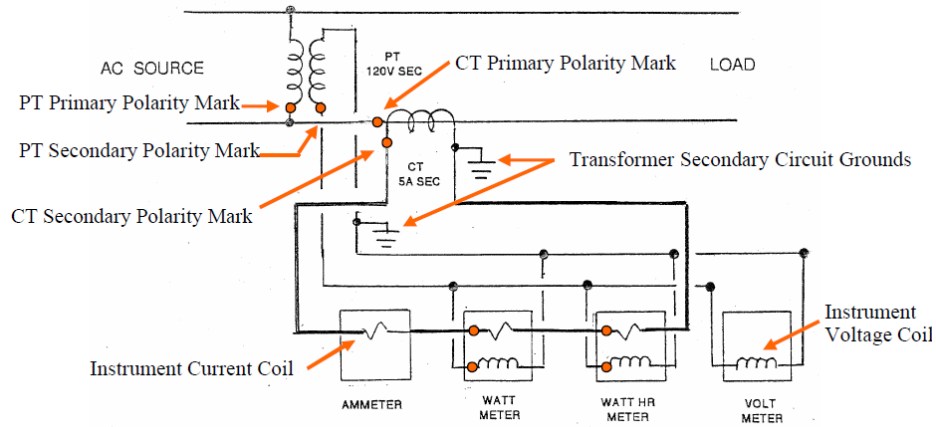


شكل 6-7 : توضيح أنواع القطبية

ملحوظات هامة جدا :

1- عند التوصيل على التوازي توصل الأطراف التي عليها Dot معا.

2- عند توصيل الـ CT ، إذا فرضنا أن التيار داخل على نقطة الـ Dot الموجودة على خط الابتدائي CT Primary Polairty mark سيكون التيار خارجا من الـ Dot الموجودة على الثانوي CT Secondary Polarity Mark ، كما في الشكل التالي.



# الفصل السابع

## حساب الـ Phase Displacement وتحديد الـ Vector Group

هذا الموضوع يخص فقط المحولات الثلاثية الـ 3-Ø و ليس له معنى ولا علاقة بالمحولات الـ 1-Ø، حيث أننا في المحولات الثلاثية نحتاج عند توصيلهم على التوازي ليس فقط لمعرفة ترتيب الـ phases الثلاثة في الجانب الابتدائي والثانوي ، وكتابة رموزها بالطرق القياسية (  $x_1 \ x_2 \ x_3 - H_1 \ H_2 \ H_3$  ) إلخ ) ، ومعرفة القطبية لها كما سبق في الفصل السابق ، ولكننا نحتاج أيضا لمعرفة الزاوية الاتجاهية Phase Displacement بين الملفات المتناظرة في الجانبين الابتدائي والثانوي .

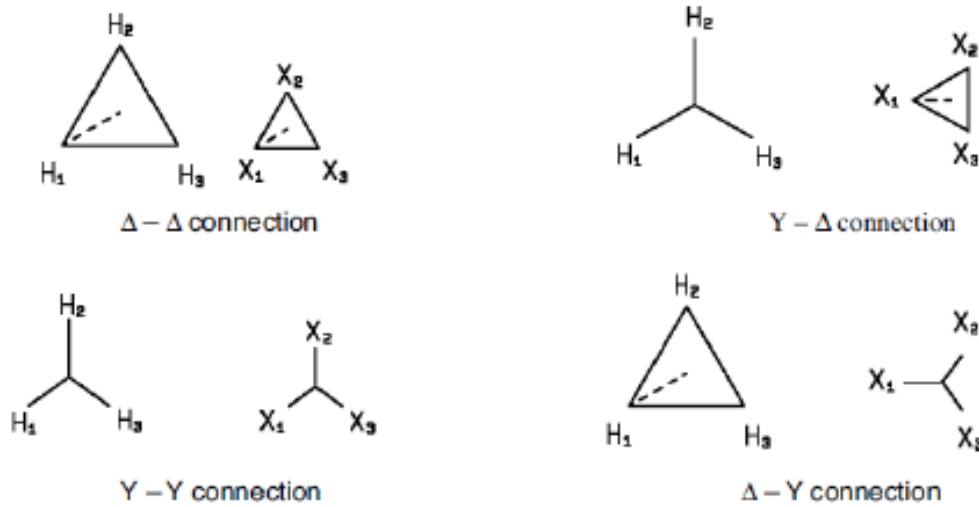
## 1-7 تعريف الـ PHASE DISPLACEMENT

تعرف الـ Phase Displacement ، وأحيانا يطلق عليه الـ Angular Displacement بأنها الزاوية بين جهدين هما : الـ line-to-N الموجود في الابتدائي ، ونظيره الموجود في الثانوي ، أو هي الزاوية بين جهدين : LN في جانب HV و الـ LN في جانب LV . وتعتبر هذه الزاوية موجبة إذا كان LN في جانب الـ LV متأخراً عن الـ LN الخاص بـ HV على اعتبار أن اتجاه الدوران الموجب هو عكس عقارب الساعة.

ولتوضيح ذلك فربما تكون ملفات المحول موصلة على شكل "Y" في الجانب HV ، وبالمثل موصلة على شكل "y" في الجانب الـ LV ، فإذا كان الملف الخاص بـ phase-A في الجانب الـ HV متطابق تماما مع الملف الخاص بالـ phase\_a في الجانب الـ LV فحينئذ نقول أن الزاوية الاتجاهية بين الملفين هي صفر ، ويعبر عن ذلك بكتابة العلاقة بين الأوجه الثلاثة كما يلي  $Yy0$

فلو كل المحولات كانت Y-Y أو D-D لما احتجنا لدراسة هذا الموضوع ، أما وأن المحولات فيها العديد من التوصيلات وطرق اللف من هنا ظهر هذا الموضوع.

وفي الشكل التالي لاحظ اتجاه الخط المنقط الممثل لزاوية X1 مقارنة بزاوية H1 في التوصيلات المختلفة ، ففي حالة D-d ، أو Y-y مثلا تجد الاثنين لا توجد زاوية بينهما Zero phase displacement ، أما في حالة Y-d ، أو D-y ستجد متجه H1 سابقا متجه X1 بـ 30 درجة في عكس اتجاه عقارب الساعة وهكذا يمكن تحديد الزاوية في أي توصيلة.



وعلى حسب قيمة هذه الزاوية فقد قسمت المحولات إلى مجموعات اتجاهية Vector Groups عديدة ، من أشهرها (هذه فقط بعض المجموعات وليست كلها):

Zero phase displacement (Yy0, Dd0, Dz0)	Group 1: -1
180° phase displacement (Yy6, Dd6, Dz6)	Group 2: -2
+30° phase displacement (Yd1, Dy1, Yz1)	Group 3: -3
-30° phase displacement (Yd11, Dy11, Yz11)	Group 4: -4

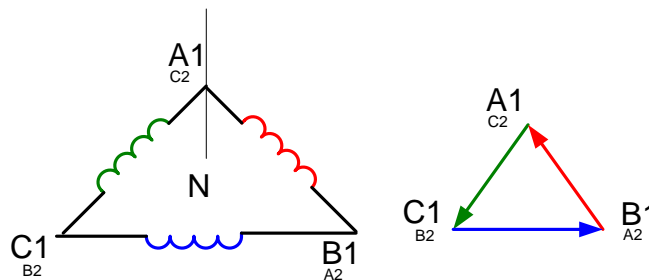
### 1-1-7 كتابة الـ Phase Displacement حسب الـ IEC

هناك قواعد متفق عليها للتعبير عن قيمة الزاوية الاتجاهية ، التي تتوزح بها الملفات المتناظرة في الجانبين HV و LV، وكذلك للتعبير عن الـ Vector Group، وسنطبق هنا في هذا الكتاب مصطلحات الـ IEC ، وهذه القواعد نوجزها فيما يلي:

1. اتفق على كتابة طريقة التوصيل في الملف الابتدائي بحروف كبيرة Capital فإذا كان التوصيل على شكل ستار نكتبها Y وإذا كان على شكل دلتا نكتبها D ، وإذا كانت Zigzag فإننا نكتبها Z ، وهكذا . أما طريقة توصيل الثانوي فتكتب بحروف small ( y , d , z, etc. ) . (لاحظ هنا أننا نتكلم عن نوع التوصيلة وليس عن الـ Phases داخل التوصيلة والتي تكلمنا عنها في الفصل السابق).

2. إذا كانت نقطة الـ Neutral يمكن الوصول إليها في توصيلة الستار فإن حرف الـ N يظهر أيضا في الاسم ، فنقول مثلا أن التوصيلة YNd هي توصيلة Star في الابتدائي ونقطة التعادل لها متاحة خارجيا (accessible) ، أو نقول أنها Yyn إذا كان الثانوي موصل Star ، و نقطة تعادل فيه متاحة خارجيا.

3. وحيث أن الـ Delta ليس لها نقطة N فقد اتفق على رسم نقطة N افتراضية داخل مثلث الاتجاهات لتحديد المكافئ لـ LN الخاص بكل Phase كما في الجزء الأيسر من الشكل 1-7 ، وبناء على هذا الاتجاه الافتراضى يتم تحديد اتجاه الجهد فى كل كما فى الجزء الأيمن من الشكل 1-7 .



شكل 1-7 : وضع الـ N الافتراضى فى حالة الدلتا

4. واتفق أيضا على أن تمثل الزوايا الاتجاهية بـ 12 رقم ، وبما أن مجموع الزوايا حول نقطة هو 360 درجة ، ومن ثم يكون الفرق بين كل رقمين متتاليين يساوي 360/12 أى 30 درجة . فالرقم 1 يمثل 30 درجة والرقم 2 يمثل 60 درجة وهكذا . ومن ثم فإذا كان المحول موصلا بطريقة Yd ، وكانت الزاوية الاتجاهية بين ملفات الابتدائى والثانوى تساوي + 30 درجة مثلا فإننا نكتبها Yd1 ، وهذا يعني أن متجه الجهد Line-to- Neutral في الـ Y يسبق متجه الجهد (LN) في الـ Delta بـ 30 درجة في عكس اتجاه عقارب الساعة . أما إذا كانت الـ Delta هي التي تسبق فإننا نكتبها Yd11 أن الزاوية بينهما هي 330 درجة أو - 30 درجة.

5. فى حالة محولات الـ Auto الثلاثية نستخدم حرف الـ a أو كلمة auto للتعبير عن الجانب الموصل بهذه الطريقة ، على سبيل المثال YNa ، أو يمكن كتابتها YNauto ، أو YNa11 ، أو YNa0 وهكذا.

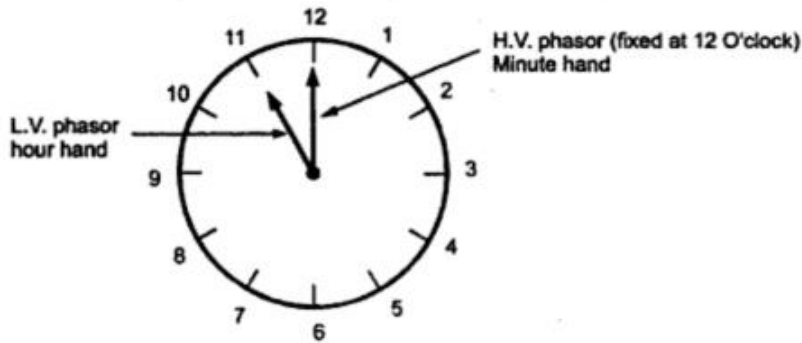
### 2-1-7 استنتاج الـ Phase Displacement بالرسم

يمكن تحديد الـ Phase Displacement بالرسم ، وذلك برسم ساعة حقيقية يكون فيها دائما المتجه الممثل لجهد الثانوي ( فى phase-a مثلا ) هو عقرب الساعات ، بينما يكون المتجه الممثل لجهد

الابتدائي في phase-A هو عقرب الدقائق ، وكلاهما يمثل الـ LN في كلا الجانبين . وفى هذه الطريقة يبدأ دائماً برسم عقرب الدقائق الممثل للابتدائي ، ونفترض هنا أنه يمثل الجهد الأعلى HV ، واجعله دائماً يقف عند الساعة 12 كما فى الشكل 2-7 ، سواء كانت التوصيلة فى الابتدائي دلتا أو ستار ، ثم يرسم عقرب الساعات الممثل للجهد المنخفض حسب زاويته فى الرسم ، وبالتالي يمكن مباشرة معرفة المجموعة الاتجاهية Vector Group ومنها نعرف قيمة الـ Phase Displacement. من قيمة الساعة.

فالمجموعة الاتجاهية فى الشكل 2-7 ، و بفرض أن الملفات كانت Dy تكتب هكذا : Dy11 ، لأن الساعة تشير إلى الحادية عشر ، ومنها تكون الـ Phase Displacement يساوى 330 درجة أو يساوى -30 درجة.

تذكر دائماً أن الزاوية الاتجاهية تعتبر موجبة اذا كان LN فى جانب الـ LV متأخراً عن الـ LN الخاص بـ HV على اعتبار أن اتجاه الدوران الموجب هو عكس عقارب الساعة.



شكل 2-7 تحديد المجموعة الاتجاهية من شكل ساعة اليد

### مثال 1-7

ما معنى Dy3؟

هذا يعني أن ملفات الابتدائي ( الجهد الأعلى ) موصلة على شكل  $\Delta$  وأن ملفات الثانوي ( الجهد الأقل ) موصلة على شكل Y وأن الزاوية الاتجاهية بينهما تساوي 90 درجة ، وهذا كما تشير العقارب إلى الساعة الثالثة فى ساعد اليد كما سنرى لاحقاً. (بمعنى آخر أن متجه الدلتا يسبق متجه النجمة فى عكس اتجاه عقارب الساعة).



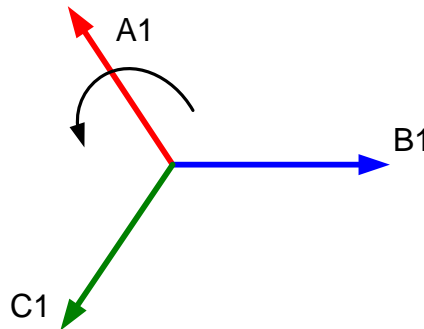
## مثال 2-7

ما معنى Dy1 ؟

هذا يعني أن ملفات الابتدائي ( الجهد الأعلى ) موصلة على شكل  $\Delta$  وأن ملفات الثانوي ( الجهد الأقل ) موصلة على شكل Y وأن الزاوية الاتجاهية بينهما تساوي 30 درجة ، بمعنى آخر فإن جهد الـ L N في الابتدائي يسبق جهد الـ L N في الثانوي ب 30 درجة ( كما تشير العقارب إلى الساعة الواحدة في ساعد اليد كما سنرى لاحقاً).

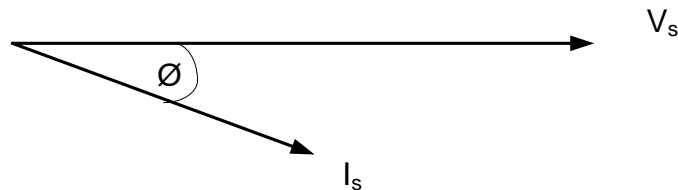
## 3-1-7 تحديد اتجاه الدوران Phase Rotation

اتفق عالمياً أيضاً على أن اتجاه "عكس عقارب الساعة" يعتبر هو المرجع في حساب الفروق بين الزوايا ، وهو أيضاً المرجع في تحديد الـ phase Sequence ، فنقول مثلاً عن الشكل 3-7 أن التتابع أو الـ Phase Sequence له هو A ثم B ثم C.



شكل 3-7 : اتجاه الدوران موجب

ونقول عن التيار في دائرة R-L مثلاً أنه متأخر عن الجهد بزاوية  $\phi = 30^\circ$  كما في الشكل 4-7 ، وغير صحيح أن نقول أن التيار يتقدم ب 30 درجة لأن الأصل أن الدوران يكون عكس عقارب الساعة ، ومن ثم فالجهد في هذا المثال هو الذي يسبق التيار في هذا الاتجاه .



شكل 4-7 : التيار المتأخر عن الجهد

ملحوظات هامة :

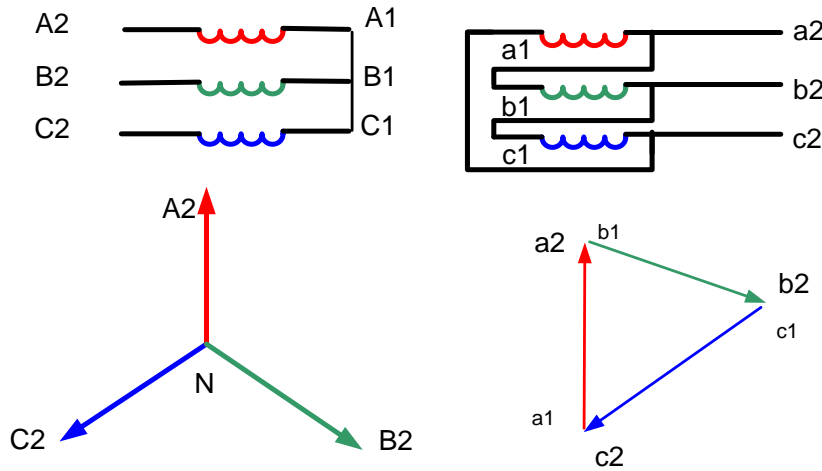
- 1- يجب عدم الخلط بين الـ phase angle displacement ، وزاوية الـ Power factor ، فالأولى هي زاوية بين جهدين : LN في جانب HV و LN في جانب LV ، وتتوقف قيمتها على طريقة توصيل الملفات معا وهو ما ندرسه في هذا الفصل ، أما الثانية (زاوية الـ Power factor) فهي زاوية بين الجهد والتيار في كل جانب على حدة من جانبي المحول ، وتتوقف قيمتها على طبيعة الحمل الموصّل على المحول)
- 2- يجب عدم الخلط أيضا بينهم ، و بين الـ Phase Rotation ، فاتجاه الدوران يعني الترتيب الذي تتابع به القيمة العظمى للجهد في phase الثلاثة ، وهل هي مثلا A ثم B ثم C أم هي A ثم C ثم B .
- 3- لاحظ أن عكس أي two phase يتسبب في تغير اتجاه الدوران مباشرة .

## 3-7 طريقة رسم الملفات والمتجهات

المطلوب في هذا الجزء رسم الملفات والمتجهات الخاصة بمحول موصل على شكل ستار في الابتدائي وموصل على شكل دلتا في الثانوي. ودائما تكتب أسماء أطراف الملفات في الابتدائي باستخدام الحروف الكبيرة Capital مثل A1A2, B1B2, C1C2 ، بينما تستخدم الحروف الصغيرة small لتسمية أطراف الملفات الثانوية a1 a2 – b1 b2 – c1 c2 ، كما في الجزء العلوي من الشكل 5-7.

ويجب التذكير أن الملف A1A2 ملفوف على نفس الـ Limb التي يلف عليها الملف a1 a2 ومن ثم سنستخدم لها نفس اللون في الرسومات سواء في رسم الملفات أو في رسم المتجهات الخاصة بكل Phase.

وكذلك سنستخدم لونين آخرين للـ phases الآخرين .



شكل 5-7

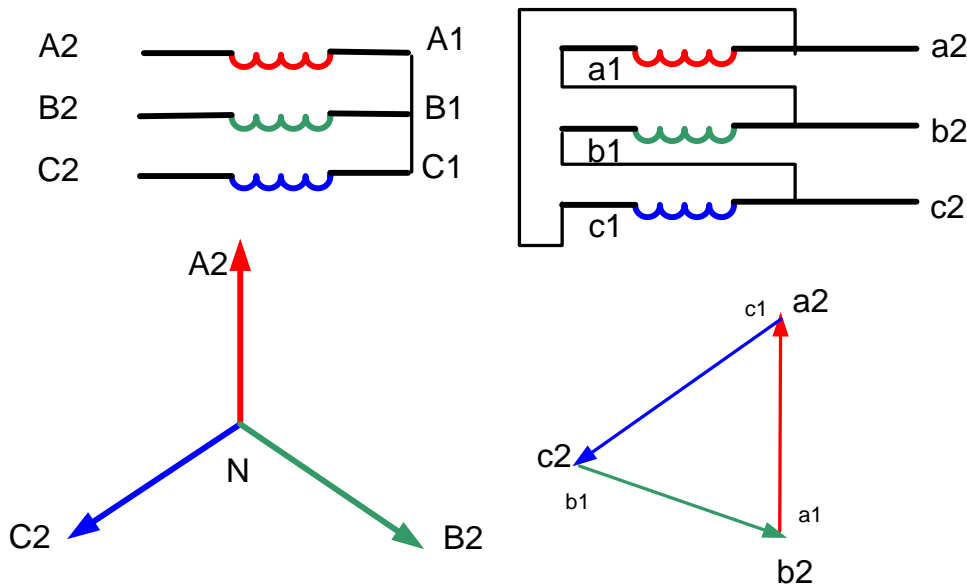
وللسهولة سنعتبر دائما أن القطبية متشابهة بمعنى أن A2 موجب بالنسبة لـ A1 ، ومن ثم فإن a2 موجب بالنسبة لـ a1 ، وبالمثل في الـ phases الأخرى ، وبناء عليه فالأطراف الخارجية في كلا الجانبين هي التي ستحمل رقم 2 ( a2, b2, c2 A2, B2, C2 ) . وفي هذه الحالة ترسم a1a2 توازي A1A2 وكلاهما يتجه من الداخل للخارج كما في الجزء العلوي من الشكل 5-7 ، وهكذا بالنسبة لـ B and C . وحيث أن الملف الابتدائي موصل على شكل star فإن A1B1C1 توصل معا لتكون النقطة (Neutral) N .

ملاحظة هامة:

- (متجه a2 الذى سنقارنه بمتجه A1 يكون اتجاه الخط من نقطة الـ N الافتراضية إلى نقطة a2 وليس اتجاه الخط الواصل بين a1-a2)
- عند رسم المتجهات (الجزء السفلى من الشكل 5-7) يبدأ برسم متجهات الـ Y أولا ، ثم يرسم المتجه الخاص بكل phase فى الدلتا موازيا لنظيره فى الـ Y .

### 1-3-7 طريقة رسم ملفات الـ Delta

ورغم أن توصيل الملفات على شكل ستار له طريقة واحدة ، إلا أن ملفات الثانوي الموصلة على شكل دلتا يمكن أن يتم بطريقتين ، حيث يمكن توصيل الطرف a1 بالطرف c2 كما في الشكل السابق 5-7 ، وبالمثل قمنا بتوصيل (b2c1, a1c2) . ويمكن أيضا توصيل الطرف a1 بالطرف b2 كما في الشكل 6-7 التالى ، وقد وصلنا فيه أيضا الأطراف المتقاربة (c2b1, c1a2) .



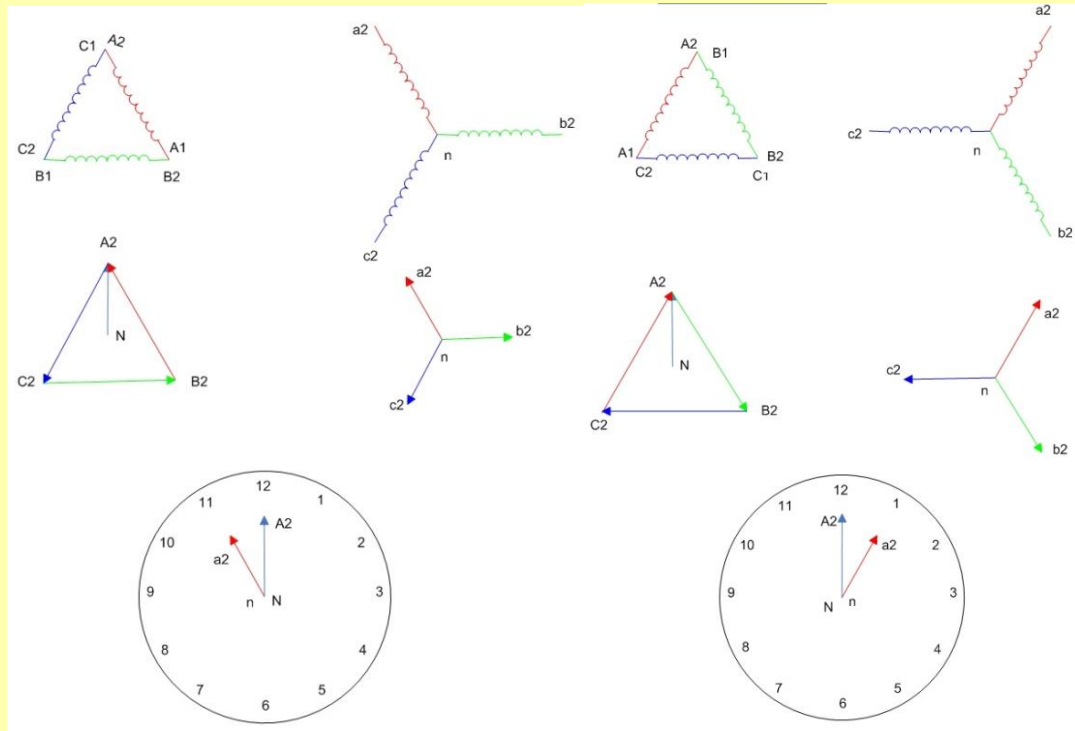
شكل 6-7 طريقة ثانية لتوصيل ملفات الدلتا مقارنة بالشكل 4-7

وكلا الطريقتين تحققان نفس الهدف كما ذكرنا هو أن  $a2a1$  يوازي  $A2A1$  ، والملف الثاني B2B1 يوازي  $b2b1$  والملف الثالث C2C1 يوازي  $c2c1$  ، غير أن  $\text{phase displacement}$  بين الـ Phases المتناظرة ستكون مختلفة كما سنرى كما في الجزئين السفليين من الشكل 5-7 ، والشكل 6-7 .

لاحظ وجود وجه آخر من أوجه الاختلاف بين الطريقتين ، وهو أن اتجاه الدوران Phase Rotation لملفات الدلتا في الطريقة الأول سالب لأنه في اتجاه عقارب الساعة ، بينما اتجاه الدوران موجب في الحالة الثانية .

### مثال 3-7

حدد اتجاه الدوران و حدد أيضا الـ Vector Group لكل من المحولين المرسومين في الشكل 7-7 (اعتبر المحولين من النوع الـ Step-Down أى أن جهد الابتدائى هو الأعلى :



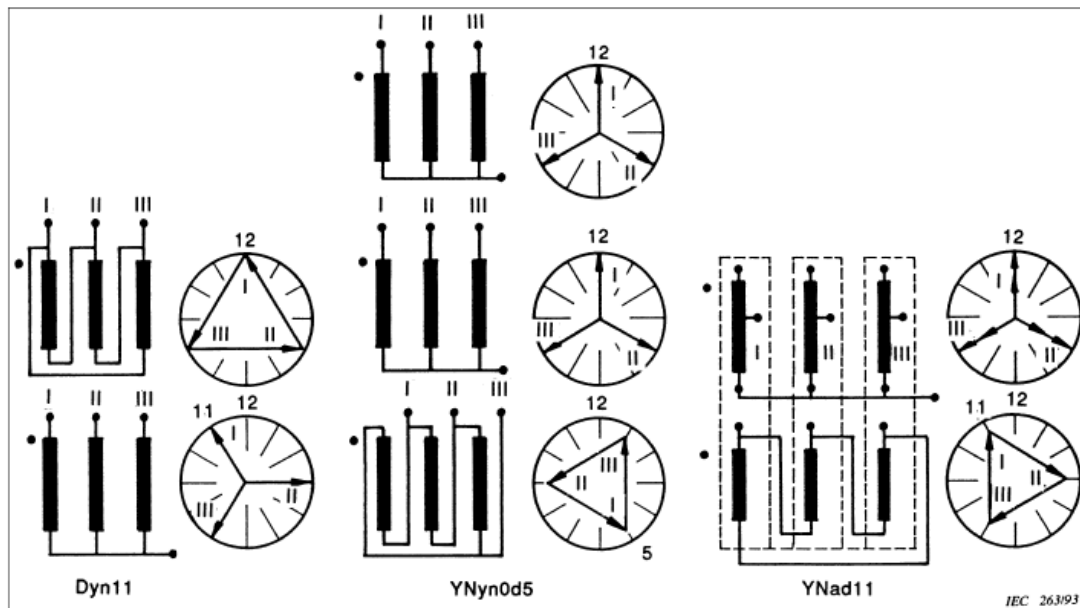
شكل 7-7 المثال 3-7

اتجاه الدوران في المحول الأيمن موجب ( عكس عقارب الساعة ) في كلتا جانبيه ، لكن اتجاه الدوران في المحول الأيسر موجب بالنسبة لـ Star ، لكنه سالب في جانب الـ Delta لأنه يدور مع عقارب الساعة (لاحظ اتجاه الاسهم ) .

فى المحول الأيمن أيضا ، نجد جهد الابتدائي الموصل على شكل دلتا ويمثله عقرب الدقائق (الأطول) ، بينما جهد الثانوى الموصل على شكل ستار ويمثله عقرب الساعات ( الأقصر ) ، والزواية بينهما كما هو واضح من رسمة الساعة هي ( - 30 درجة ) لان جهد الثانوى هو الذى يسبق جهد الابتدائي فى عكس اتجاه عقارب الساعة ، ومن ثم تكتب العلاقة بينهما Dy11. (لاحظ أن الساعة تمثل الحادية عشر).

أما فى المحول الأيسر ، نجد جهد الابتدائي الموصل على شكل دلتا ويمثله عقرب الدقائق (الأطول) ، بينما جهد الثانوى الموصل على شكل ستار ويمثله عقرب الساعات (الأقصر) لكن الساعة تشير إلى الواحدة (الزواية تساوى 30 درجة) ، ومن ثم يكون الـ Vector group الممثل لهذا المحول هو Dy1 (الساعة الواحدة). (الثنى هنا متأخر عن الابتدائي والدوران عكس عقارب الساعة)

والشكل التالى يمثل مثال آخر تطبيقا على طريقة تعبير مواصفات الـ IEC عن المجموعة الاتجاهية فى المحولات



ويمكن بسهولة قراءة وتحديد الـ Vector Group بنفس طريقة الساعة السابقة.

#### مثال 4-7

عبر عن المجموعة الاتجاهية لمحول موصل على شكل نجمة فى الابتدائي والثانوى وكلاهما له نقطة التعادل خارجية ، وبدون أى Phase shift ، أما ملف الـ Tertiary فموصل على شكل دالتا ، ومتجهه متأخر بزواية 150 درجة.

الحل :

المجموعة الاتجاهية السابقة يعبر عنها كما يلي :

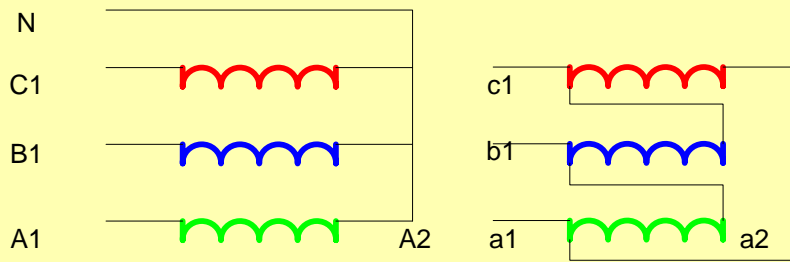
YNyn0d5

## 4-7 تحديد المجموعة الاتجاهية من طريقة توصيل الأطراف

هذا نوع مختلف عن المثال رقم 3 ، لأن الملفات مرسومة بالطريقة العادية التي لا يظهر معها زاوية الملف ، والواقع أن هذا النوع هو الأقرب للواقع ، ولذا يجب أن يكون المهندس قادرا على اكتشاف المجموعة الاتجاهية من طريقة توصيل الأطراف معا كما في المثال التالي:

### مثال 5-7

حدد الـ Vector Group للمحول في الشكل 8-7 .



شكل 8-7 مثال رقم 5

لحل هذه النوعية من المسائل ، إتبع الخطوات التالية (كما في الشكل 9-7) :

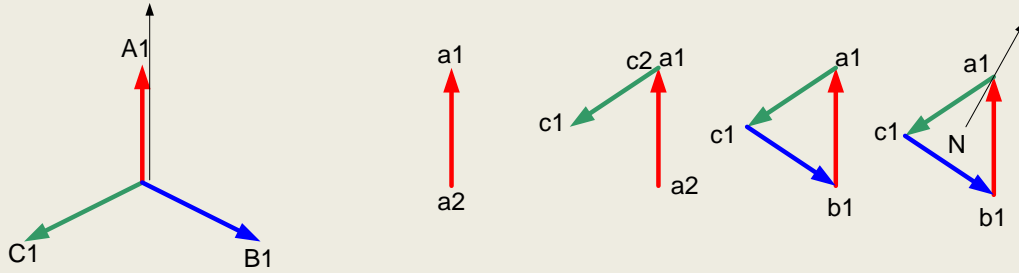
1- ارسم متجهات الابتدائي ( الـ Star ) بحيث يكون اتجاه الدوران عكس عقارب الساعة (أي أن لدينا Positive Phase Rotation مالم ينص على غير ذلك) ، واجعل متجه الـ A للسهولة يشير إلى أعلى أي الساعة 12.

2- ارسم متجه a1a2 الخاص بالدلتا بحيث يوازي متجه A1A2 الخاص بالـ Star

3- حدد الطرف المتصل بـ 1a في توصيلة الدلتا ، وستجده في هذا المثال هو c2 ، وعلى هذا ارسم متجه الـ c1c2 يوازي C1C2 الخاص بالـ Star و بحيث تكون نقطة c2 منطبقة على a1

4- أكمل بقية الدلتا

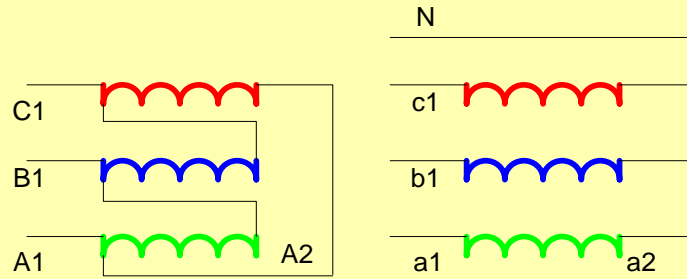
5- ارسم متجه الـ N-a1 في الدلتا وحدد الزاوية بينه وبين متجه الـ A1 في الـ Star ، ومنها تجد أن الساعة تكافئ (الساعة الواحدة) أى أن المجموعة الاتجاهية هـ Yd1 ، ومنها تحدد الـ Phase Displacement وستجدها هنا تساوى 30 درجة (لاحظ أنها موجبة لأنها في متأخرة عن الابتدائي في عكس اتجاه عقارب الساعة).



شكل 7- 9

## مثال 7-6

حدد المجموعة الاتجاهية والـ Phase Displacement للتوصيلة في الشكل 7-10 .



شكل 7-10

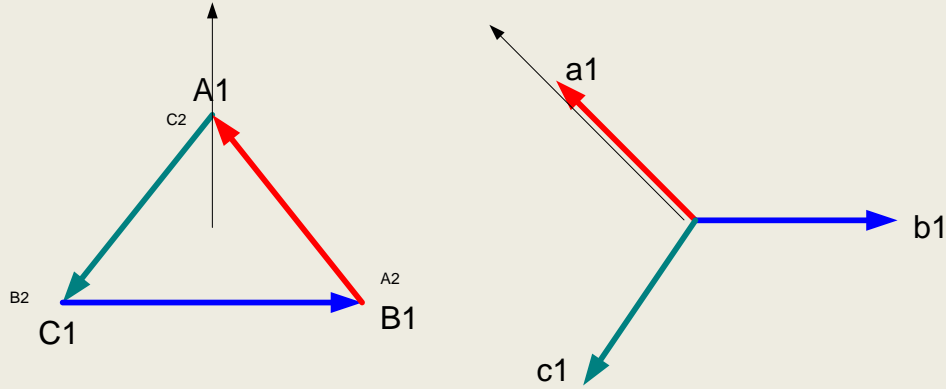
اتبع نفس الخطوات السابقة ، وهى هذه المرة أكثر سهولة من السابقة (كما في الشكل 7-11):

- 1- ارسم متجهات الابتدائي (الدلتا) بحيث يكون اتجاه الدوران عكس عقارب الساعة ( هذا هو الأصل ما لم ينص على غير ذلك) ومتجه الـ NA1 يشير إلى أعلى أى الساعة 12. ولاحظ أن A1 متصلة بـ C2 حسب الرسم.
- 2- ارسم متجه a1a2 الخاص الـ Star بحيث يوازي متجه A1A2 الخاص بالدلتا (لاحظ الألوان).



## 3- أكمل بقية الـ Star

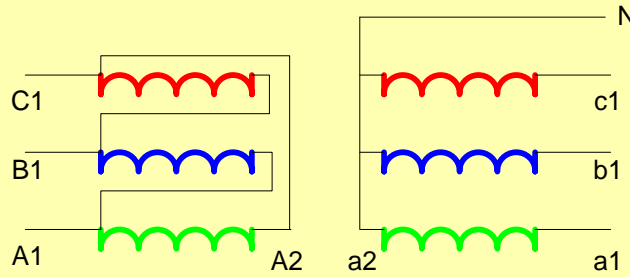
4- حدد الزاوية بين متجه  $NA1$  وبين متجه الـ  $a1$  في الـ Star ومنها تحدد المجموعة الاتجاهية (قيمة الساعة) وهي في هذا المثال الحادية عشر ، أى أن المجموعة الاتجاهية هي  $Dy11$  ، ومنها نجد أن الـ Phase Displacement تساوى سالب 30 (الساعة الحادية عشر) .



شكل 11-7

## مثال 7-7

حدد المجموعة الاتجاهية والـ Phase Displacement للتوصيلة في الشكل 12-7 .



شكل 12-7

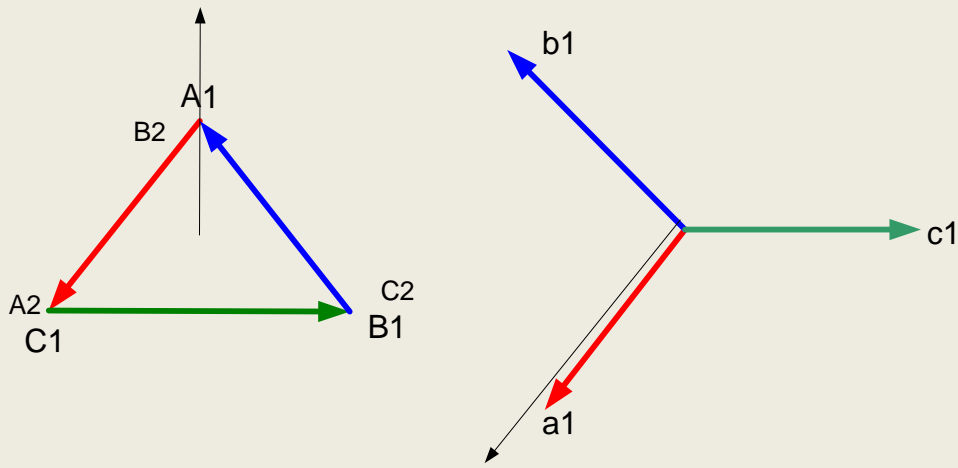
اتبع نفس الخطوات المرسومة في الشكل 13-7 :

1- ارسم متجهات الابتدائي (الدلتا) بحيث يكون اتجاه الدوران عكس عقارب الساعة ومتجه الـ  $NA1$  يشير إلى أعلى أى الساعة 12. ولاحظ أن  $A1$  متصلة بـ  $B2$  حسب الرسم.

2- ارسم متجه  $a1a2$  الخاص الـ Star بحيث يوازي متجه  $A1A2$  الخاص بالدلتا (لاحظ الألوان).

3- أكمل بقية الـ Star

4- حدد الزاوية بين متجه  $NA1$  وبين متجه الـ  $a1$  في الـ Star ومنها تحدد المجموعة الاتجاهية (قيمة الساعة) وهى فى هذا المثال يشير إلى الساعة السابعة ، أى أن المجموعة الاتجاهية هى  $Dy7$  ، ومنها نجد أن الـ Phase Displacement تساوى  $-210$  درجة أو  $+150$  درجة.



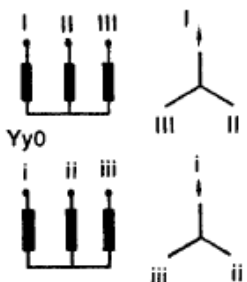


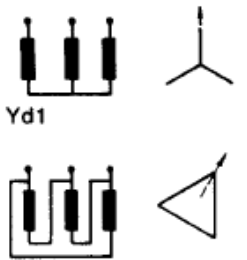
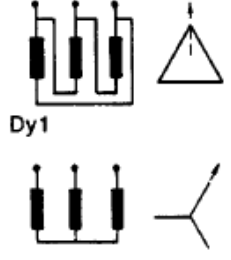
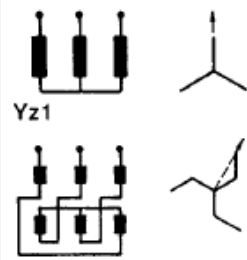
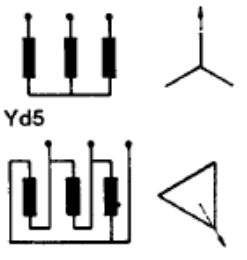
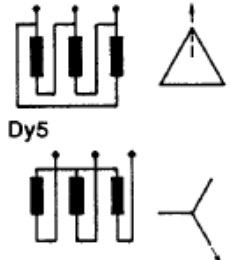
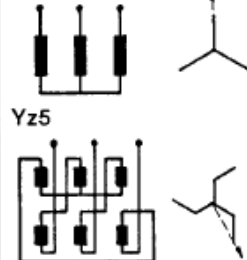
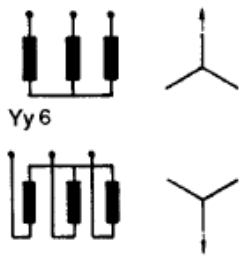
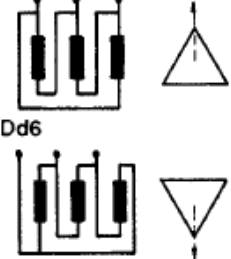
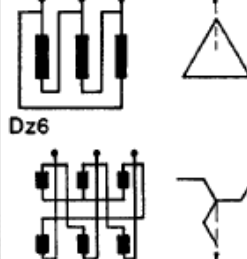
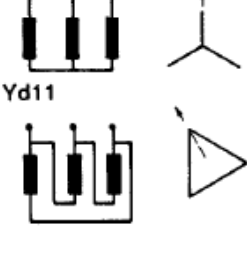
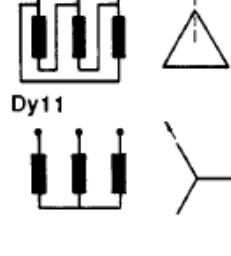
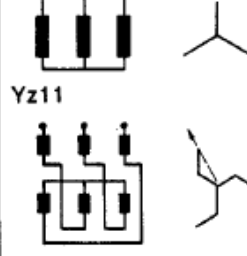
شكل 7-13

والجدول التالى يعطى نماذج أخرى لحساب الـ Phase Displacement طبقاً للتوصيلات فى الـ IEC Code

(راجع باب الاختبارات فى هذا الكتاب لتتعرف على طريقة معرفة المجموعة الاتجاهية معملياً)

Vector-symbol & Clock hour Number	Phase Displacement	Line Terminal Markings and Phasor Diagram of Induced voltages (Rotation Anti clockwise)		Winding connections	
Yy0	$0^\circ$				
Dd0	$0^\circ$				
Yy6	$-180^\circ$				
Dd6	$-180^\circ$				
Dy1	$-30^\circ$				
Yd1	$-30^\circ$				
Dy11	$-330^\circ$				
Yd11	$-330^\circ$				

وهذه بعض التوصيلات من الـ IEC

0	 Yy0	 Dd0	 Dz0
1	 Yd1	 Dy1	 Yz1
5	 Yd5	 Dy5	 Yz5
6	 Yy6	 Dd6	 Dz6
11	 Yd11	 Dy11	 Yz11

IEC 265/93

# الفصل الثامن

## مميزات وعيوب التوصيلات المشهورة في المحولات

ذكرنا في الفصل السابع أنه على حسب قيمة الزاوية الاتجاهية بين متجهات الابتدائي والثانوي فإننا يمكن أن نحصل من هذه التوصيلات على مجموعات اتجاهية Vector Groups عديدة ، من أشهرها (هذه فقط بعض المجموعات وليست كلها):

Zero phase displacement (Yy0, Dd0, Dz0)	Group 1: -1
180° phase displacement (Yy6, Dd6, Dz6)	Group 2: -2
-30° phase displacement (Yd1, Dy1, Yz1)	Group 3: -3
+30° phase displacement (Yd11, Dy11, Yz11)	Group 4: -4

وسبق أن ذكرنا في الفصل الرابع أن أشهر طرق توصيل ملفات المحولات Connections هي :

1. Wye – Wye ( Star-Star )
2. Wye – Delta (Star-Delta)
3. Delta – Wye (Delta-Star)
4. Delta – Delta

وسنعرض في هذا الفصل لمميزات وعيوب كل طريقة من هذه الطرق ، بالإضافة إلى طرق أخرى مثل الزجراج. ولكننا سنبدأ بشرح بعض المفاهيم العامة التي سيراد ذكرها كثيرا عند عمل مقارنات بين التوصيلات المختلفة. وتحديدنا سنعرض لموضوعين:

- 1- تأثير نوعية التوصيلة على ظهور أو منع الـ Harmonics .
- 2- تأثير وجود تأريض للتوصيلة من عدمه.

## 8-1 تأثير نوعية التوصيل على ظهور الـ HARMONICS

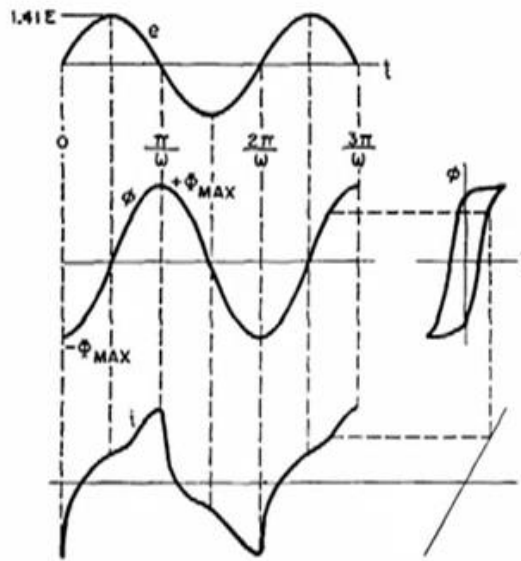
في حالة المحولات الأحادية 1-Ø فإننا لكي نحصل على جهد Sinusoidal يحقق المعادلة :

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \sin(\omega t + \alpha)$$

فإنه يلزمنا أن يكون لدينا أيضا فيض magnetic Flux له نفس المنحنى الجيبي لأن الجهد الناشئ ليس إلا نتاج لتفاضل معادلة الفيض طبقا لقانون فارادى :

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

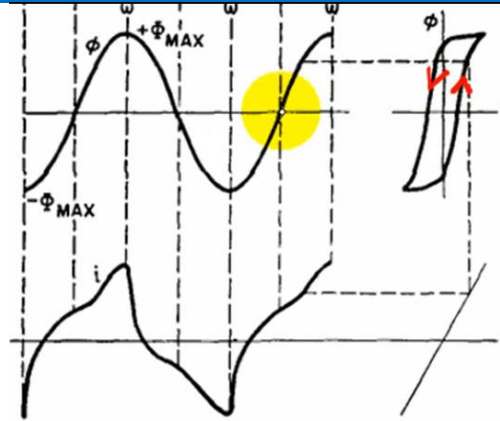
والسؤال هو : كيف نحصل على فيض sin من تيار الـ magnetization current والذي يبدو فى الجزء الثالث فى الشكل 1-8 مشوها ولا يمثل Pure Sin ؟



شكل 1-8 شكل الفيض الناشئ وشكل تيار المغناطيسية

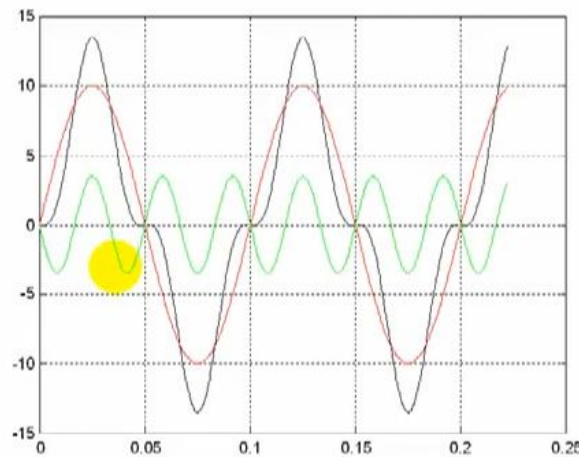
والحقيقة أنه لكى نحصل على فيض Sin لابد أن يكون تيار المغناطيسية Magnetization Current مشوها بهذه الصورة التى يظهر بها فى الشكل 1-8 ، وذلك لأن منحنى المغناطيسية فى الـ Core والذي يحدد العلاقة بين قيمة الفيض والتيار المنشأ له يتبع شكل الـ Hysteresis Loop المرسومة فى أقصى يمين الشكل 1-8.

ومنحنى الـ Hysteresis غير خطى أى Non linear ، ومن ثم فإنه عند عمل Re-construct للتيار المنشئ للفيض سنجد أن لدينا قيمتين مختلفتين للتيار عند كل قيمة للفيض كما فى الشكل 2-8 ، وهذا يعنى كما ذكرنا أنه لكى نحصل على شكل الفيض الجيبي لابد أن يكون تيار magnetization Current بهذا الشكل الغير جيبي non-sinusoidal .



شكل 8-2 استنتاج الفيض الناشئ من تيار المغناطيسية

وإذا طبقنا قواعد فوريير Fourier Transform على شكل تيار المغناطيسية الممثل باللون الأسود في الشكل 8-3 سنجد أنه يتكون من عدة ترددات من أهمها التردد الرئيسي بالطبع ( 50Hz ) والممثل باللون الأحمر في الشكل 8-3 ، ويعرف أيضا بالـ Fundamental Component ، ولدينا كذلك التردد ( 150Hz ) والممثل باللون الأخضر وهو ما يعرف بالـ 3<sup>rd</sup> harmonics .



شكل 8-3 : التوافقيات الثلاثة الأولى

وبالطبع هناك ترددات أخرى كثيرة لكنها محدود القيمة والتأثير . ومن ثم يمكن أن نقول أن تيار المغناطيسية Magnetization current هو مجموع تيارين أساسيين أحدهما له تردد 50 Hz والآخر تردده 150 Hz .

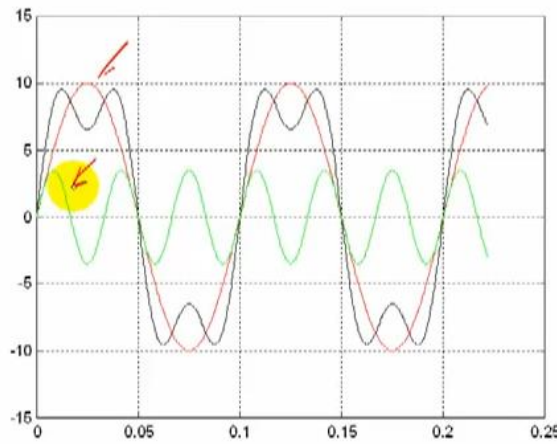
والخلاصة في محولات الـ 1-phase لكي نحصل على جهد sinusoidal لابد أن يكون منحنى الفيض sinusoidal ، ولكي نحصل على فيض sinusoidal لابد أن نسحب من المصدر تيار المغنطة Magnetization current وشكله غير جيبي لأنه مكون من تيارين أحدهما له تردد 50Hz والآخر تردده 150 Hz .



## 8-1-1 ماذا يحدث لو تم عمل فلتر للتيار المسحوب من المصدر

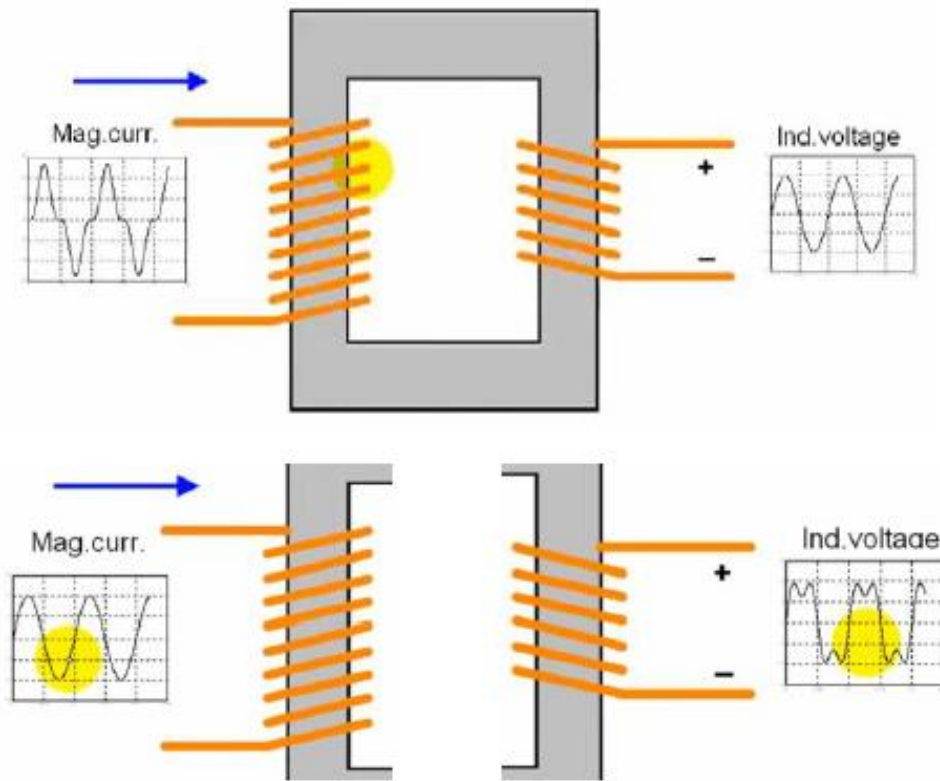
والسؤال الآن : ماذا يحدث لو تم عمل فلتر للتيار المسحوب من المصدر والداخل إلى الملف الابتدائي بغرض منع التردد 150 Hz من الظهور؟ ، بمعنى آخر ماذا يحدث لو كان تيار المغناطيسية pure sin وليس كما في الشكل السابق؟

المفاجأة هي أنه إذا كان تيار المغناطيسية pure sin فسيصبح الجهد الناشئ حسب قانون فارادى هو المشوه ، ويشبه المنحنى الأسود في الشكل 4-8:



شكل 4-8 شكل الجهد الناشئ من تيار مغناطيسي pure sin

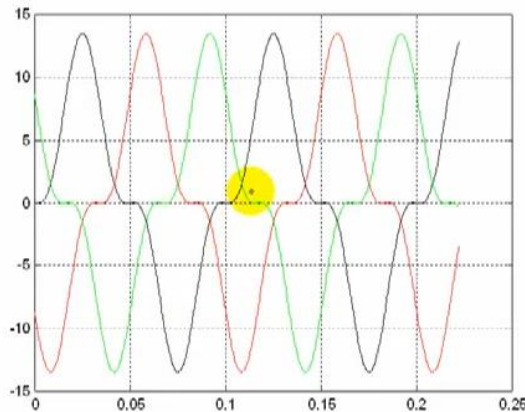
والذى إذا تم تحليله بـ Fourier Transform فسنتكشف أنه مكون من ترددين أساسيين هما الـ 50Hz (الأحمر) ، و الـ 150Hz (الأخضر) فى نفس الشكل 4-8 ، أى أن المفاجأة الغير سارة هي أنك إذا منعت الـ 3<sup>rd</sup> Harmonic من تيار المغناطيسية المسحوب من المصدر (الابتدائي) فستظهر الـ 3<sup>rd</sup> Harmonic لك فى الجهد المتولد فى الثانوى الذى يذهب للمستهلكين ، وهذا بالطبع غير مرغوب فيه. والخلاصة موضحة فى الشكل 5-8 : إذا التيار المسحوب non sinusoidal ستحصل على جهد sinusoidal ، والعكس بالعكس.



شكل 5-8 خلاصة العلاقة بين شكل تيار المغناطيسية وشكل الجهد الناشئ

الآن : ماذا يحدث إذا وصلنا ثلاثة محولات من النوع الـ 1-Phase معا ليكونوا محول واحد من النوع الـ 3-phase ؟

في هذه الحالة سيكون لدينا ثلاثة تيارات لا magnetization وجميعهم محملين بالـ 3<sup>rd</sup> Harmonic كما سبق ، وكما يظهرون في الشكل 6-8 :

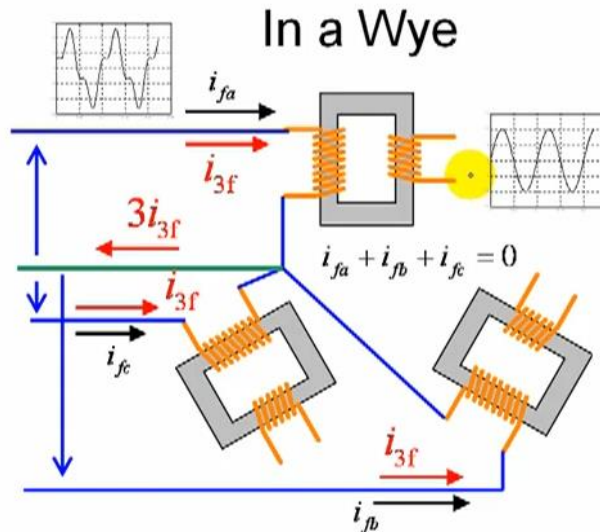


شكل 6-8 تيارات المغناطيسية في الأوجه الثلاثة

وبالتبع كل منحنى منهم لو تم تحليله بواسطة فوريير فستجد أنه يحتوى على التردد الأصلي 50 Hz وعلى الـ 3<sup>rd</sup> harmonic (150Hz) ، لكن الجديد هنا أن المنحنى الممثل للتردد الأصلي في كل Phase يتساوى في المقدار مع المنحنيين الآخرين لكن بينه وبين المنحنيين الآخرين 120 درجة phase shift كما هو معلوم ، أما المنحنيات الممثلة للـ 3<sup>rd</sup> harmonic في الأوجه الثلاثة فمتساوية في المقدار والاتجاه وليس بينهم أى Phase Shift . أى جميعهم In-phase ، أى أنهم منطبقين على بعض وليس بينهم أى Phase Shift.

### 8-1-2 تأثير توصيلة الـ Star على وجود الـ 3rd Harmonic

في حالة توصيل المحولات الثلاثة على شكل ستار كما في الشكل 7-8



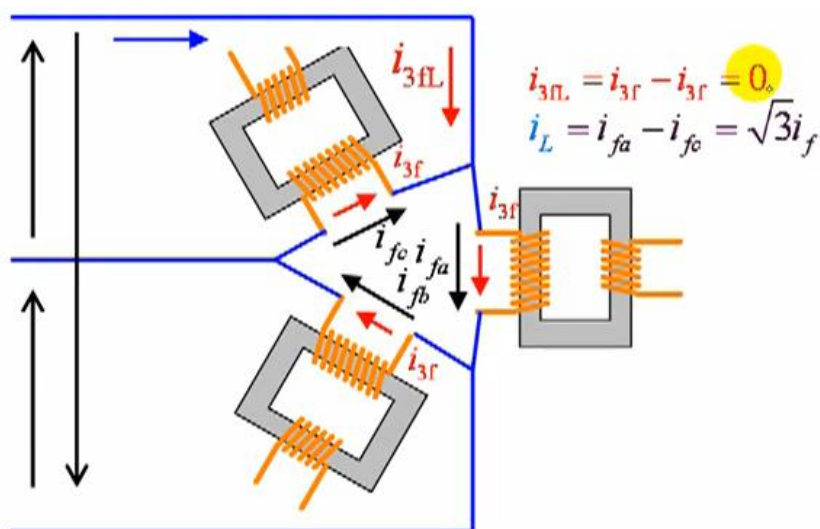
شكل 7-8 تأثير توصيلة النجمة على شكل الجهد في المحولات الثلاثة

لاحظ أن الجهد الموجود على كل phase في الابتدائي هو sinusoidal voltage ، وأنه يسحب تيار المغناطيسية المكون من Fundamental + 3<sup>rd</sup> Harmonic كما سبق ، لكن عند جمع تيارات الـ Fundamental الثلاثة (  $i_{fa} + i_{fb} + i_{fc}$  ) الراجعة خلال خط الـ Neutral ستجد أننا نحصل على صفر (جمع اتجاهي لثلاثة تيارات متساوية في المقدار وبينها 120 درجة) ، لكننا حين نجمع تيارات الـ  $i_{3f}$  الراجعة في الـ Neutral فسنحصل على  $3i_{3f}$  لأنهم جميعاً لهم نفس الـ Phase .

وهذا يعنى في الخلاصة أن توصيلة الـ Star لا تمنع تيارات الـ 3<sup>rd</sup> harmonic من الظهور في تيار الابتدائي لكنها تعطى جهد على شكل Sin في الثانوي في كل phase كما في الشكل السابق لأن شرط وجود الـ 3<sup>rd</sup> harmonic في تيار المغناطيسية متحقق في كل phase .

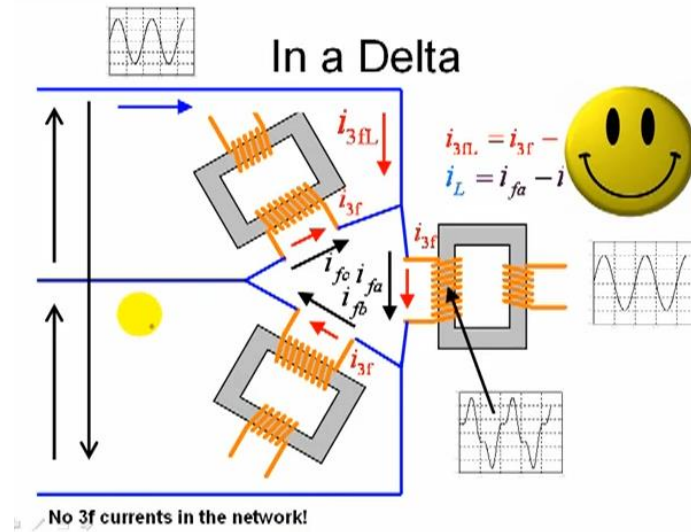
## 3-1-8 تأثير توصيلة الدلتا على وجود الـ 3rd Harmonic

في حالة الدلتا كما في الشكل 8-8 سنجد أن الجهد الموجود على كل phase في الابتدائي هو sinusoidal voltage كما في السابق ، وأنه يسحب تيار المغناطيسية المكون من Fundamental + 3<sup>rd</sup> Harmonic على phase في كل حدة كما سبق ، لكن عند حساب قيم تيارات الـ Fundamental في الـ Line current عند أى Node ستجد مثلاً عند الـ Node العليا أنها تساوى (  $i_{fa} - i_{fb}$  ) كما في الشكل ، لكننا حين نحسب قيمة تيار الـ 3<sup>rd</sup> harmonic عند أى Node فسنحصل على صفر ، لأنهم جميعاً لهم نفس الـ Phase ، وهذا يعنى أن تيارات الـ 3<sup>rd</sup> Harmonic لا يوجد له أى ظهور في الـ Line currents .



شكل 8-8 التيارات في توصيلة الدلتا

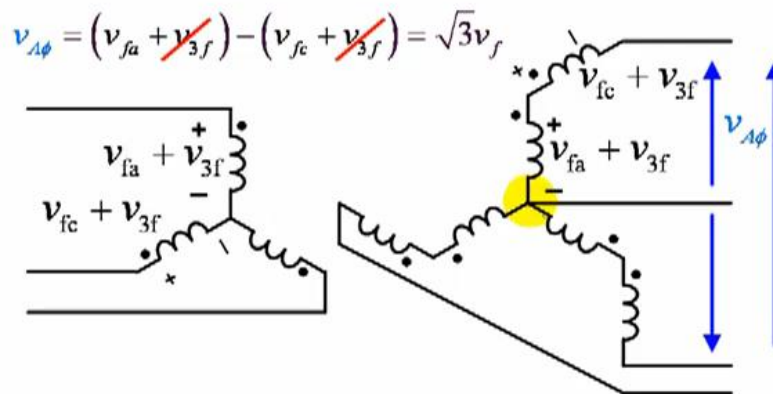
وهذا يعنى في الخلاصة أن توصيلة الـ Delta تمنع تيارات الـ 3<sup>rd</sup> harmonic من الظهور في تيار الابتدائي ، وفي نفس الوقت تعطى جهد على شكل Sin في الثانوى في كل phase لأن تيار الـ magnetization في كل Phase يحتوى على مركبة الـ 3<sup>rd</sup> Harmonic ، ولكنه يدور circulate داخل الدلتا ولا يظهر خارجها ، ومن ثم يعطى sin wave في كل Phase ، وفي نفس الوقت لا تظهر الـ 3<sup>rd</sup> Harmonic في الـ Line currents المسحوبة من الابتدائي كما في الشكل 8-9.



شكل 8-9 تأثير توصيلة الدلتا على شكل الجهد

### 8-1-4 وجود الـ 3rd Harmonic في توصيلة الـ Zig Zag

في حالة توصيل الابتدائي على شكل ستار ( بدون خط Neutral ) ، وتوصيل ملف الثانوي وكذلك الملف الثالث المعروف باسم الـ Tertiary winding على شكل Zig-Zag كما في الشكل 8-10 سنلاحظ التالي :



شكل 8-10 توصيلية نجمة - زجراج

سنفترض أن عدد اللغات متساوية في الملفات الثلاثة فهذا يعني أن نسب التحويل تساوى 1.

نتيجة عدم وجود مسار رجوع للـ 3<sup>rd</sup> harmonic في الابتدائي ستظهر مركبة الـ 3<sup>rd</sup> harmonic في الملفات الثلاثة في الابتدائي . وحسب اتجاهات الـ Polarity المفترضة في الشكل السابق سنجد أن الـ Line voltage وهو المحصلة الاتجاهية للجهد على two phases سيساوى مثلاً بين A and C قيمة

الـ line voltage المعروفة ، لكن المفاجأة السارة هنا هي اختفاء مركبة الـ 3<sup>rd</sup> harmonic فيه كما هو واضح من المعادلة المكتوبة أعلى الشكل 8-10 .

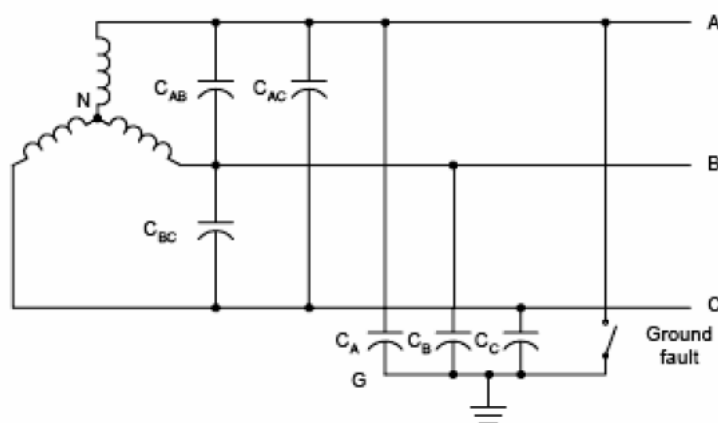
وهذا يعنى فى الخلاصة أننا أمام توصيلة فريدة جدا ، فرغم أن الجهد على كل ملف منفردا يحتوى على مركبة الـ 3<sup>rd</sup> harmonic وبالتالي فشكله non sinusoidal ، إلا أن هذه المركبة لا تظهر عند المستهلك ومن ثم فالجهد يظهر فى شكل Sinusoidal للمستهلك ، ولو استخدمنا توصيلة Delta فى الابتدائى أيضا فلن تظهر هذه المركبة لا فى المصدر ( الابتدائى ) ، ولا عند المستهلك ( الثانوى ) ، ومن هنا كانت أهمية هذه التوصيلة ( Delta / Zig Zag ) فى شبكات التوزيع حيث الأحمال غالبا تكون Unbalanced ، واحتمالات الـ harmonic عالية ونحتاج لهذه التوصيلة لمنع ظهورها.

## 2-8 تأثير التأسيس على عمل المحولات

عند الحديث عن تأسيس نقطة التعادل تذكر أن لدينا نوعين من الأنظمة مصنفة حسب وضع نقطة التعادل ، وهما :

### 8-2-1 أولاً : النظام المعزول ( Ungrounded system ) .

و فى هذا النظام لا يوجد اتصال بين نقطة التعادل و الأرض ، و تمثل المعاوقة Z بين أي موصل و الأرض بمكثف ، و بين أي موصلين بمكثف أيضاً . و تكون المكثفات الموجودة بين الموصلات مجموعة دلتا ، أما المكثفات بين الموصلات و الأرض فتكون على شكل ستار كما فى الشكل 8-11.



شكل 8-11 : النظام المعزول

وحيث أن تأثير مجموعة مكثفات الدلتا على الخصائص الأرضية للنظام لا تذكر حيث أنها غير متصلة بالأرض فيمكن إهمالها .

أما بالنسبة لتوصيلة الـ Star ، والتي تكون نقطة التعادل فيها غير مؤرضة (معزولة) فإن التيارات خلال المكثفات الثلاثة متساوية و بينهما زاوية  $120^\circ$  . و حيث أن نقطة التعادل للمكثفات هو جهد الأرض و بالتالي تكون نقطة التعادل للمحول جهداً يساوي جهد الأرض و بذلك يمكن اعتبار أن المحول في هذه الحالة مؤرض لكن من خلال مجموعة مكثفات افتراضية  $(C_A, C_B, C_C)$  .

ويتميز نظام نقطة التعادل المعزولة عن الأرض بالآتي :

- تيار القصر يكون صغير جداً لأنه يمر إلى الأرض خلال مكثفات ذات معاوقة Z عالية جداً.
- تكون قيمة ( KVA SC ) وقت القصر صغير جداً ( Short Circuit Level ) .

ولكن يعيب هذا النظام :

- في حالة حدوث قصر بين Phase ، و الأرض فسيرتفع الجهد على Two Phases الأخران بقيمة  $V_{Line} = \sqrt{3}V_{phase}$  فإذا استمر هذا الجهد على العوازل لمدة طويلة فقد تنهار العوازل .
- قيمة تيار القصر بين الـ Phase و الأرض صغير جداً و لا يكفي لتشغيل أجهزة الوقاية .
- يمكن نشوء جهود عابرة مرتفعة ( Transients ) تكون لها آثار تدميرية في حالة وجود عطل بين الـ Phase و الأرض قد تصل قيمته من 4 إلى 6 مرات من جهد الـ Phase مع الأرض.
- في حالة حدوث قصر لا يمكن تحديده بسهولة .
- قد ينشأ قوس الأرضي مستمر Arcing Voltage بين الخط وبين الأرض عند حدوث قصر .

## 2-2-8 ثانياً : النظام المؤرض

تأريض نقطة التعادل يضمن حدوث تأثير أكبر على أجهزة الوقاية لحظة حدوث قصر أرضي (وهذا مرغوب فيه لزيادة حساسية الأجهزة) ولا يتسبب في ارتفاع في الجهد. وحيث أن تيار القصر يمر في دائرة القصر من الخط إلى نقطة التعادل خلال الأرض فإنه يمكن التخلص من القوس الأرضي المستمر Arcing Voltage الذي يحدث عندما تكون الشبكة غير مؤرضة .

في حالة التأريض المباشر فإن الجهد بين أى خط و خط آخر لا يزيد عن  $(\sqrt{3} V_{ph})$  و تحت جميع الظروف يكون جهد نقطة التعادل صفر فلا يكون هناك جهد عائم غير محدد ( No Floating Voltage ) و هذا يسمح بتقليل العزل لنقط التعادل للمحولات و المكونات الأخرى . ويعتبر نظام تأريض نقطة التعادل بصفة عامة أكثر أماناً للأشخاص و المعدات .

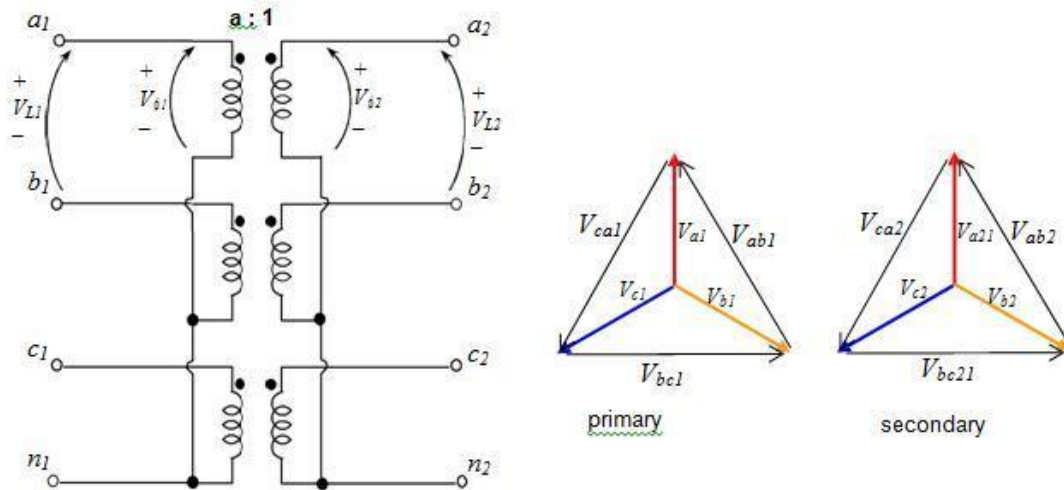
ملاحظات هامة:



- 1- عند تأريض نقطة التعادل يجب فصل أرضي نقطة التعادل عن أرضي جسم المحول حتى لا يرتفع الجهد على جسم المحول أثناء حدوث قصر بين وجه و الأرض .
- 2- يظهر أثر تأريض أو عدم تأريض نقطة التعادل بشدة عند دراسة الأعطال الغير متماثلة Unsymmetrical Faults والتي تدرس بطريقة الـ Symmetrical Components وملخصها تجده في الجزء التالي.

## 3-8 التوصيل بطريقة Y Y :

هناك عدة طرق مشهورة للتوصيل ملفات المحولات من بينها طريقة Y Y أي توصل ملفات الابتدائي على شكل Y وملفات الثانوي على شكل Y ، ويمكن أن تكون نقطة الـ N موصلة بالأرض أو معزولة عنها ، وبالطبع يمكن أن تكون الـ Phase Displacement بينهما صفر أو 180 درجة كما في الشكل 14-8 .



شكل 14-8 : طريقة Y Y

وبالطبع يتم لف كل two phases متشابهين في الابتدائي والثانوي معا على نفس الـ Limb في القلب الحديدي.

### 1-4-8 مميزات طريقة الـ Y Y :

هذه الطريقة يكثر استخدامها في خطوط نقل القوى ذات الجهد المرتفع لأن الجهد الموجود على كل phase =  $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$  ومن ثم تكون العوازل أقل تكلفة لأن الجهد عليها أقل . وهو أنسب المحولات في حالة الجهود العالية والتيارات المنخفضة.

وهي أيضاً تتميز بعدة مميزات منها :

1- أن جهد الابتدائي والثانوي يكون In-phase ، ومن ثم لا توجد Phase Displacement ، وهذه الميزة مفيدة في المحولات التي تستخدم في شبكات الربط ذات الجهود المختلفة فلو كان لدينا شبكة بها درجات من الجهود المختلفة مثل جهد 66 , 132 , 220 , 500 KV ، فمن السهولة ربط أي جهدين معاً بواسطة محول واحد مباشرة من 66-500 مثلاً ، أو من 132 إلى 220 ، وهكذا دون أي تعقيدات فنية أو تصنيعية في المحولات في أي مكان بالشبكة طالما أن جميع المحولات Cascaded أى متتابعة وراء بعضها فقط بتغيير نسبة لتحويل ، وعلى عكس من ذلك ، لو كان لدينا محول من نوع آخر (دلتا/ستار مثلاً) وسط هذه المجموعة فإننا نحتاج لضبط phase أيضاً ، وهذه يعقد الأمور .

2- ومن مميزات هذه التوصيلة أيضاً أننا نحتاج لعدد أقل من اللفات في كل phase لتنتج نفس الفيض مقارنة بمحول موصل Delta ، وذلك لأن جهد  $V_{phase}$  يساوي تقريباً 57% من جهد  $V_{line}$ .

3- ومن مميزاتها أن الـ Capacitance بين الملفات تكون كبيرة نسبياً ، وذلك لكبر حجم الموصلات ، وهذا يؤدي إلى صغر قيمة الـ Surge impedance والتي تساوى  $\sqrt{\frac{L}{C}}$  ، وهذا يؤدي إلى زيادة تحمل المحول للتغيرات في الجهد نتيجة عمليات فتح وغلق القواطع ، أو نتيجة البرق.

4- ومن مميزاتها أنه يمكن تغذية أحمال أحادية من محول ثلاثي بل يمكن جعله يغذى حملاً واحداً أحادياً إذا حدث عطل على أحد الـ Phases ، وذلك بفصل الـ phase المعطل من الجهتين وعمل Short على طرفي أحد الـ Phases الاثنتين السليمين ، وبذلك نستفيد من  $(\frac{1}{\sqrt{3}})$  أى ما يقرب من 60% من الطاقة.

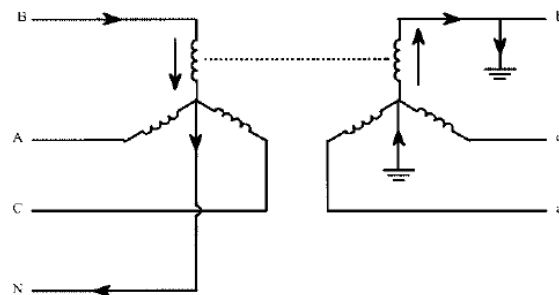
#### 8-4-2 عيوب طريقة الـ YY :

1- العيب الأول يظهر فقط إذا كانت نقطة الـ N غير مؤرضة ، ففي هذه الحالة فإن جهد الثانوي سيكون مشوهاً distorted wave لأن تيار الـ zero sequence لن يجد مسار ليرجع من خلاله.

2- أيضاً لو حدث تحميل غير متزن على المحول فإن الجهد عند الحمل سيصبح غير متزن وتصبح نقطة التعادل غير مستقرة ، ما لم يتم توصيل الـ N الخاصة بالحمل بالـ N الخاصة بالثانوى.

3- وجود 3<sup>rd</sup> harmonics في حالة المحولات الغير المؤرضة يتسبب أيضاً في حدوث Over voltage عند انخفاض الأحمال .

4- كل المشاكل السابقة تحدث عند عدم تأريض نقطتي التعادل ، وعلاج ذلك يكون بتأريض الـ N، لكننا إذا وصلنا نقطتي التعادل بالأرض فستظهر مشكلة مختلفة وهي أنه في حالة حدوث عطل أرضي ground fault في دائرة الـ Secondary فإن تيار العطل ستظهر له مركبة خلال دائرة الـ Primary كما في الشكل 8-15 . ويمكن أن يتسبب في تشغيل أجهزة الوقاية المركبة على الـ N الـ primary بسبب أعطال أرضية في دائرة الثانوي .



شكل 8-15 : اتجاه تيارات الأعطال الأرضية في محولات الـ YY

5- ومن عيوب هذه الطريقة أن الجهود الميكانيكية اثناء الأعطال تكون عالية جدا بسبب كبر مساحة مقطع الملفات حيث أن التيار المار في كل Phase هو نفسه الـ Line current .

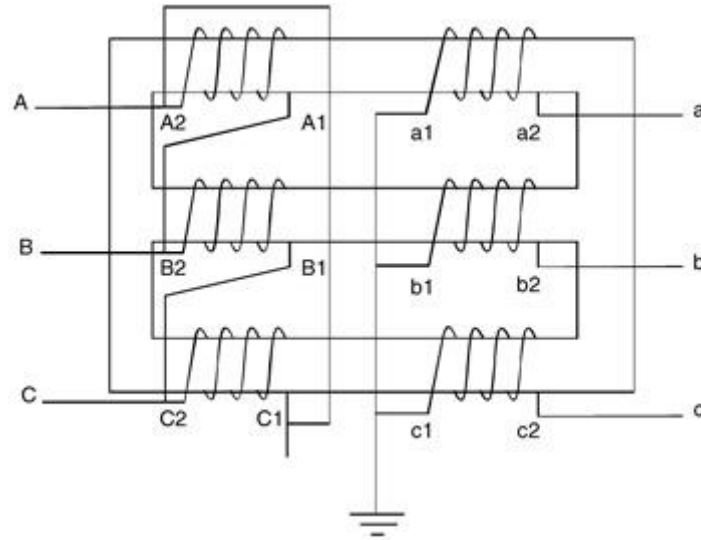
ملحوظة هامة:

لا يصح توصيل حجم single phase بين أحد الأطراف والأرض في محول YY إلا إذا كان المحول من النوع الـ Core Type لأن النوع الآخر سيعاني من مشكلة Unsymmetrical Flux

## 8-5 التوصيل بطريقة Δ-Y

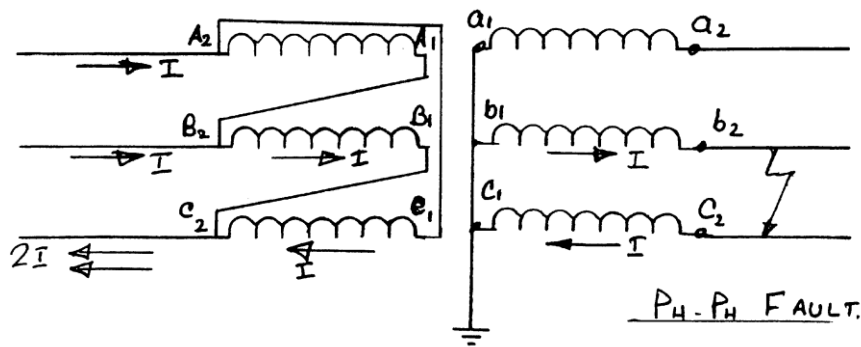
من الطرق الأكثر انتشاراً في توصيل المحولات طريقة Δ-Y كما في الشكل 8-16 ، والمقصود هنا أن يكون الابتدائي هو الدلتا والثانوي هو الـ Y ، وفيها نتجنب الكثير من مشاكل YY التي أشرنا إليها سابقاً. فتوصيل جانب LV على شكل Delta يعطيك ميزة التيار المنخفض في كل وجه  $I_{ph}$  ، وتوصيل جانب الـ HV على شكل Star يعطيك ميزة الجهد المنخفض  $V_{ph}$  في كل وجه. لاحظ أن عدم وجود نقطة تعادل في الابتدائي لا تعتبر عيباً لأنه غالباً يتم توصيله بالمولد من هذه الجهة. ومن مميزات هذه الطريقة أيضاً أن تيار 3<sup>rd</sup> Harmonic الموجود في Voltage Signals القادمة من المصدر يظل يدور داخل الـ Δ ولا ينتقل إلى الجانب الثانوي.

ومن أهم مميزات هذه الطريقة أن تيار العطل الأرضي في الجانب الثانوي سيجد مساراً له خلال الـ N الخاص بجانب الـ Star ومن ثم يحدث نوع من عزل هذه الأعطال عن المصدر، ومن ثم لا تؤثر على أجهزة ground protective Relays الموجودة في الابتدائي. وبناء عليه ، يمكن عمل تنسيق بين أجهزة الوقاية ضد الأعطال الأرضية في الجانبين.



شكل 8-16 : طريقة Δ-Y

أما أعطال الـ Phase-to-Phase في هذا النوع من المحولات فتتميز بشئ غريب وهو أنه إذا حدث عطل من هذا النوع في الثانوي فستتأثر الـ Phases الثلاثة في الابتدائي بنسب 2:1:1 كما في الشكل التالي .



حيث يتضح من الشكل أن الخط الأسفل في الجانب الابتدائي يمر به ضعف التيار المار في الخطين الآخرين ، ورغم الخط العلوي في الثانوي لا يمر به أى تيار كما هو مفترض وكذلك نظيره في الابتدائي لا يمر به أى تيار إلا أن خطوط الدخول الثلاثة في الابتدائي يمر بها تيار العطل كما ذكرنا بنسب 2:1:1 . وهذا يستلزم أن يركب جهاز OC Relay على كل Phase بصورة منفصلة في هذه النوعية من المحولات. لاحظ ان تيار العطل في الثانوي يحسب كالتالى:

$$I_{STAR} = \frac{E_{ph} - p_h}{2X_t} = \frac{\sqrt{3}E_{ph} - n}{2X_t}$$

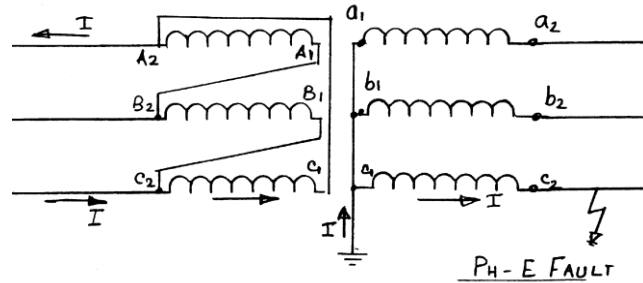
$$I_{STAR} = 0.866 \times \frac{E_{ph} - n}{X_t}$$

$$I_{STAR} = 0.866I$$

$$I_{DELTA} = \frac{I_{star}}{\sqrt{3}} = \frac{I}{2}$$

$$I_{LINE} = I$$

أما إذا وقع العطل على خط واحد فقط فستكون مسارات التيار كما في الشكل التالي :



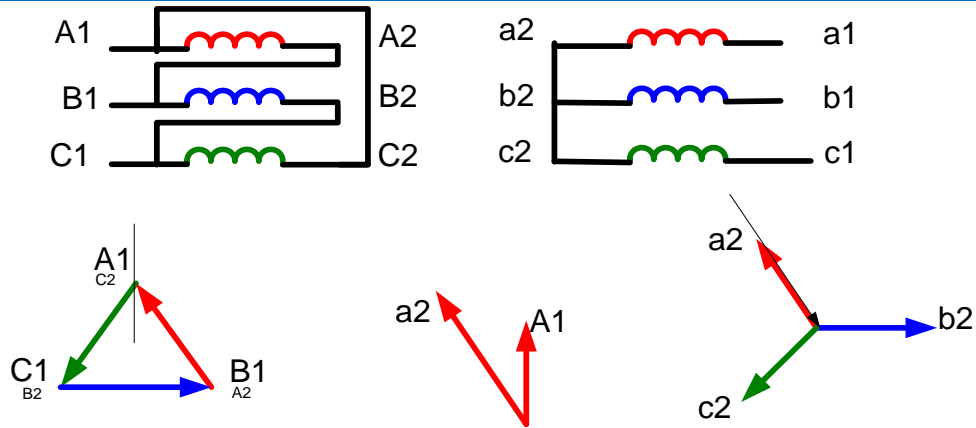
ومن المهم أن نشير أن جميع مجموعات Generator/transformers يكون فيها المحول من النوع  $\Delta$ -Y حيث الـ  $\Delta$  في جانب الـ Generator و Y في جانب الـ Lines ، وذلك للاستفادة من ميزات الـ  $\Delta$  التي تمنع Zero sequence currents من العبور من جهة الخط إلى جهة المولد والتي يمكن أن تتسبب في اهتزازات عنيفة Vibrations للمولد.

كما أن هذه التوصيلة تعزل الأعطال الأرضية في جهة الخط من التأثير على أجهزة الحماية من الأعطال الأرضية Ground fault protection المركبة على أجهزة المولدات والتي عادة تكون حساسة جداً ومن ثم نضمن استقرارها بالنسبة للأعطال الخارجية.

لكن مع هذه التوصيلة إذا حدث عطل على أحد الأوجه فيجب إخراج المحول كله من الخدمة .

وهذه الطريقة أيضاً تختلف عن YY في شيء جوهري وهو أننا لدينا الآن phase shift أو phase angle Displacement بين الجهد والتيارات الموجودة في HV وتلك الموجودة في LV.

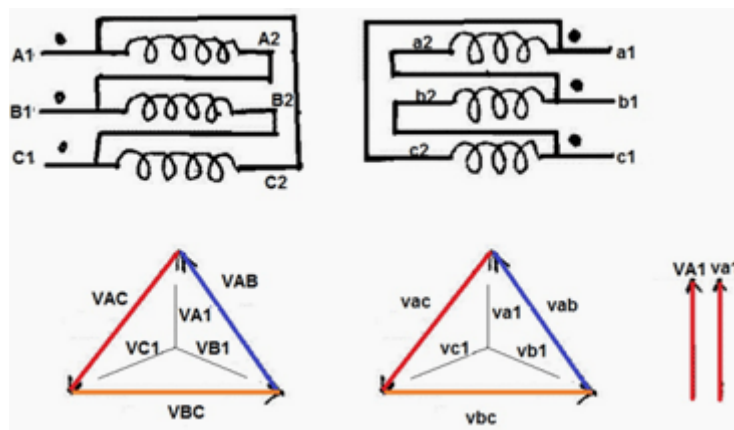
بالرجوع للمبادئ التي شرحناها في الفصل السابع عن كيفية حساب الـ phase بين الجانبين يمكن بسهولة أن نستنتج من الشكل 8-17 أن HV والـ LV بينهما سالب 30 بحيث يسبق الجهد الموجود في Sec نظيرة الموجود في الـ Pri ، وهي تتبع Dy11=Vector group . ويمكن من نفس التوصيلة يكون لدينا Dy1 أيضاً.

شكل 8-17 : تحديد الزاوية الاتجاهية في توصيلة الـ  $\Delta$ -Y

## 6-8 توصيلة الـ $\Delta\Delta$ :

تظهر أهمية هذه التوصيلة مقارنة بـ Y-Y في الجهود المنخفضة ذات التيار المرتفع لأن تيار  $I_{ph}$  في هذه التوصيلة يمثل 57% من  $I_{line}$  ، وهذا يعني أن ملفات المحول أقل من حيث المقطع وكمية النحاس. وهو أنسب المحولات في حالة التيارات العالية والجهود المنخفضة. لكنه أضعف المحولات في تحمل الجهود الميكانيكية بسبب صغر مساحة مقطع الموصل ، كما أن الأجهادات الكهربائية على عوازل أكبر ما يمكن.

وفي حالة حدوث عطل في أحد ملفات الثلاثة بعد فصل الملف المعطل من الجهتين. لكن عموماً هذا النوع نادر الاستخدام لعدم وجود نقطة تعادل فيه.

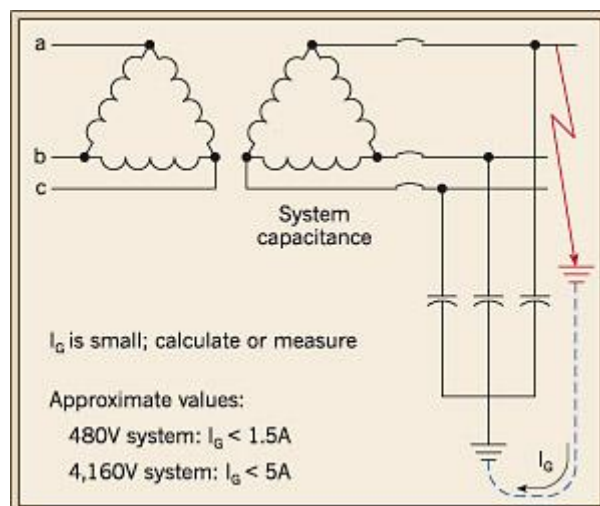
شكل 8-18 : توصيلة الـ  $\Delta\Delta$ :

ومن أهم مميزات هذه التوصيلة أن 3<sup>rd</sup> Harmonic ومضاعفاتها تظل تدور داخل ملفات الـ Delta ولا تخرج إلى الخطوط خارج المحول كما أنه لا زاوية اتجاهية بين الجانبين (شكل 8-18) .

وللتذكير فالجهود في هذه الـ Harmonies يكون الـ phase shift بينها لا يساوى 120 درجة كما في الجهود الخاصة بالتردد الأصلي ، بل تكون متساوية 360 درجة ، وهذا يعني أن جميع الجهود ( $V_c$  ,  $V_b$  ,  $V_a$  ) جميعا In-phase ، وتسبب في مرور 3<sup>rd</sup> Harmonic currents داخل الملفات الخاصة بالـ Delta فقط .

أما أهم عيوب هذه التوصيلة فهو عدم وجود N ، ومن ثم لا يمكن تأريضه ، فإذا حدث عطل أرضي فإنه يتسبب في ارتفاع الجهود على الملفات الثلاثة ، وهذا يستلزم أن يكون مستوى العزل مرتفع في مثل هذه المحولات مقارنة بالمحولات الأخرى ولذا فهو أكثر كلفة من غيرها .

ولفهم مسار تيار العطل خلال الأعطال الأرضية في هذه المحولات يمكن متابعة الرسومات التالية :



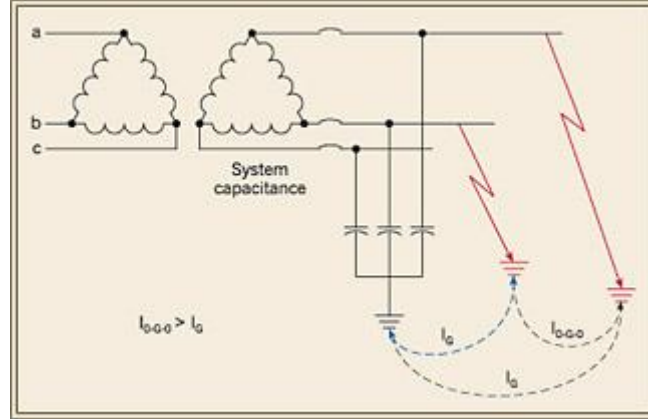
شكل 8-20 : الاعطال الأرضية في توصيلة الـ Δ Δ

فعند حدوث عطل أرضي على أحد الـ phase فإن المسار الوحيد لمرور تيار العطل ليكمل closed circuit هو الـ capacitance الخاصة بالخطوط كما في الشكل 8-20 ، وبالطبع سيكون تيار العطل صغير جداً لارتفاع معاوقة هذه المكثفات ، ومن ثم يمكن للمحول أن يستمر في العمل في وجود هذا العطل ، ونقول أننا في حالة system floating.

لكن هذا السيناريو الذي قد يبدو لطيفاً قد يتحول لكابوس ينتج تيار عطل مرتفع جداً ، وذلك إذا كان العطل من النوع الذي يحتوي على شرارة Arcing Fault ، أو كان متقطع Intermittent Fault ( يوصل ثم يفصل وهكذا ) ، ففي هذه الحالات هناك احتمال لحدوث ارتفاع كبير في الجهد over voltage قد يصل إلى 6-8 أمثال phase voltage ، وهذه الجهود العالية يمكن أن تسبب في انهيار العوازل على الخطوط في أماكن مختلفة. وهذا يمكن أن يؤدي بعد ذلك لحدوث عطل أرضي آخر ، ومن



ثم ينشأ مسار جديد كما في الشكل 21-8 يسمح بمرور تيار العطل الأول لكنه يتميز بمقاومة منخفضة هذه المرة ، فترتفع قيمة تيار العطل الأول بشدة ، ويتسبب في مخاطر كبرى ، ولذلك تكون تكلفة الصيانة أحياناً في هذا النوع مرتفعة جداً .



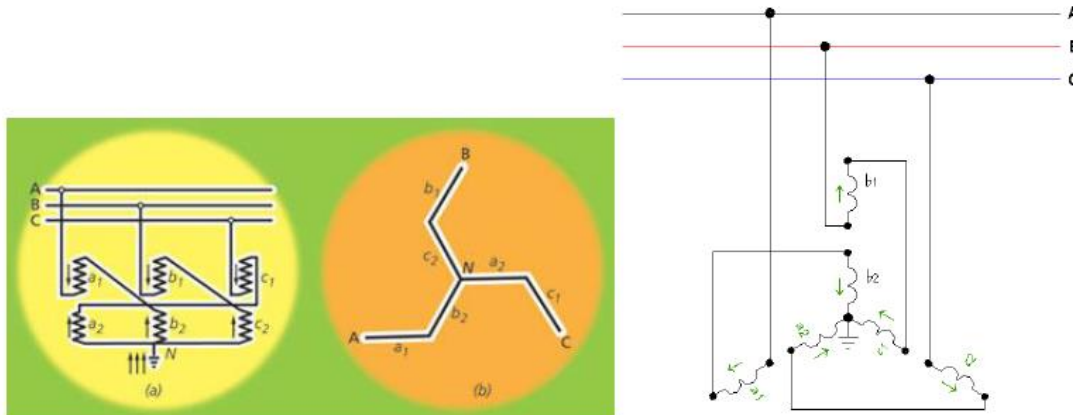
شكل 21-8 : الأعطال الأرضية المتعددة في توصيلة الـ  $\Delta \Delta$

## 7-8 توصيلة الـ ZIG ZAG

هذه التوصيلة تستخدم بعدة أساليب :

### 1-7-8 الأسلوب الأول : Interconnected star

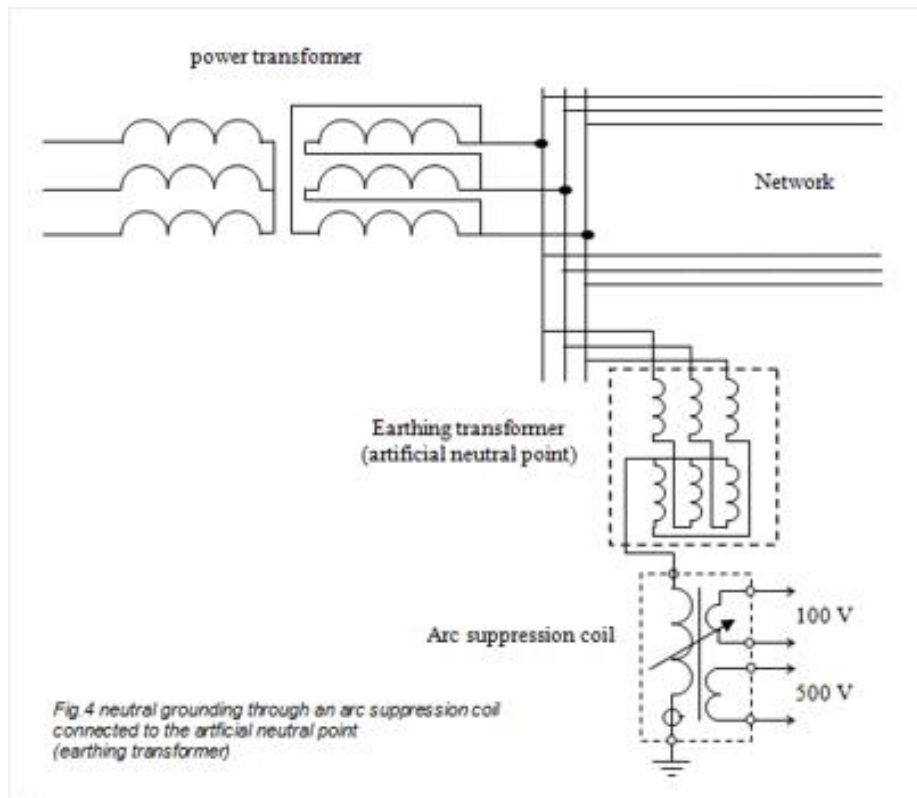
في هذا الأسلوب تستخدم توصيلة الـ Zig zag منفردة ، وهي في هذه الحالة تعرف أيضاً باسم Interconnected star ، والمقصود بكونها منفردة أنه ليس لها ابتدائي وثنائي ، بل هي مجرد توصيلة لمجموعة ملفات كما في الشكل 22-8.



شكل 22-8

و تتميز هذه التوصيلة في المحولات بميزة هامة وفريدة حيث تسمح بمرور التيارات التي لا يوجد Phase shift بينهما ، أي التيارات التي تكون In-Phase ، بينما تمنع تماماً مرور التيارات التي يكون بينهما Phase shift قدره 120 درجة . وهذه الميزة تعني ببساطة أن هذه التوصيلة تستخدم كموصل أرضي للتيارات Zero sequence. ولذا فهو أساساً تستخدم في محولات التأريض Earthing Transformers كما في الشكل 8-23 ، وهي أحد أهم الاستخدامات لهذه التوصيلة .

لاحظ أنها في هذه الحالة تعتبر أفضل بكثير من استخدام Transformer Two- windings كمحولات أرضية لأنها ستصبح أصغر حجماً وتكلفة .



شكل 8-23 : استخدام محولات الزجراج في التأريض

وهذه التوصيلة أيضاً تستخدم في محولات L-V عندما يكون هناك تحميل غير متزن Unbalance ، كما تستخدم أيضاً لتخليق neutral للتوصيلة الدلتا التي لا توجد لها N كما نعلم ، وتسمى هذه الـ N المخلفة بالـ (Artificial Neutral) .

### 8-7-2 توصيلة Delta – Zigzag :

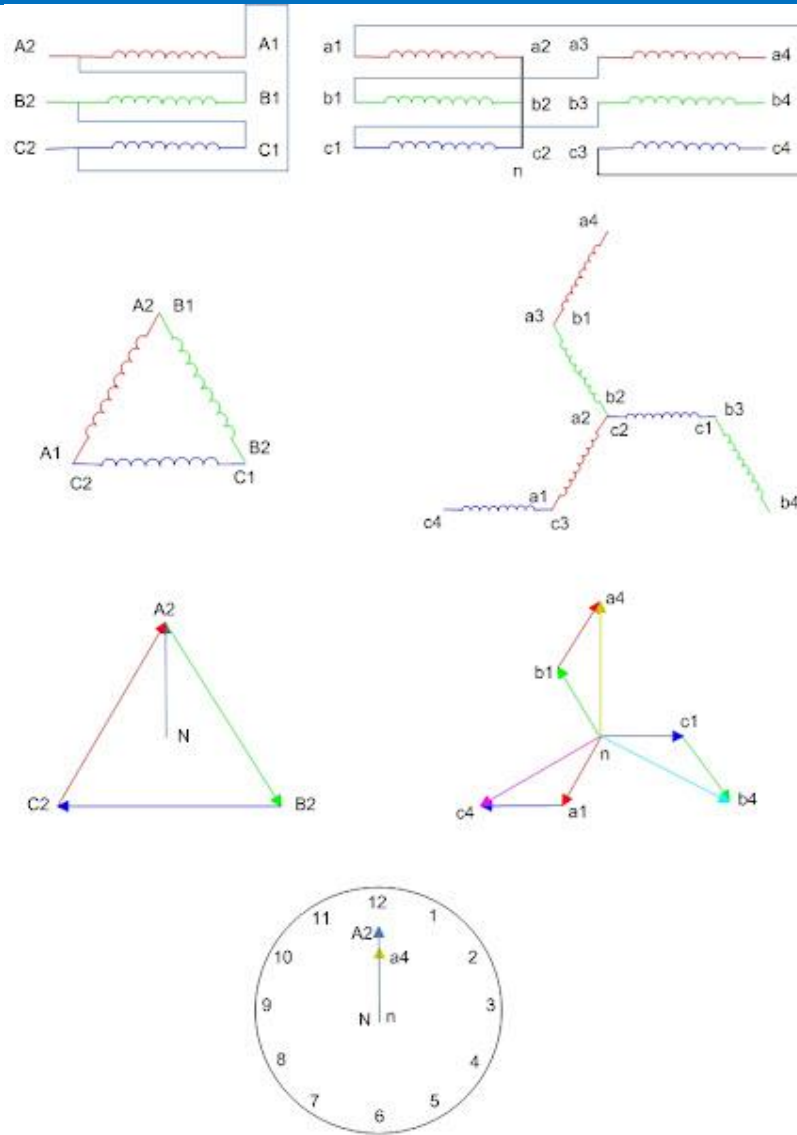
أما الأسلوب الثاني والأكثر استخداماً لتوصيلة الـ Zigzag فهي استخدامها ضمن محول موصل بطريقة D-Z ، أي أن الابتدائي يوصل على شكل Delta ، أما الثانوي (المتصل بالحمل) فيوصل على شكل Zigzag .

وتشبه هذه الطريقة طريقة D-Y في منع مرور 3<sup>rd</sup> Harmonics، وفي عمل عزل بين جانبيين المحول عن بعضهما البعض ، لكنها تزيد بميزة إضافية جديدة وهي أنه لا يوجد Phase shift بين الجهد في الثانوي ( Zigzag ) والجهد في الابتدائي ( Delta ) ، وهذا يعني أنها تشبه في ذلك محولات YY أو محولات DD ، بمعنى آخر أن هذه التوصيلة جمعت بين ميزات جميع التوصيلات السابقة في وقت واحد ، ولذا يكثر استخدامها في محولات التوزيع .

ولأهمية هذه التوصيلة فإننا نعرضها هنا بالتفصيل .

### 8-7-3 طريقة توصيل الـ Delta-Zig Zag

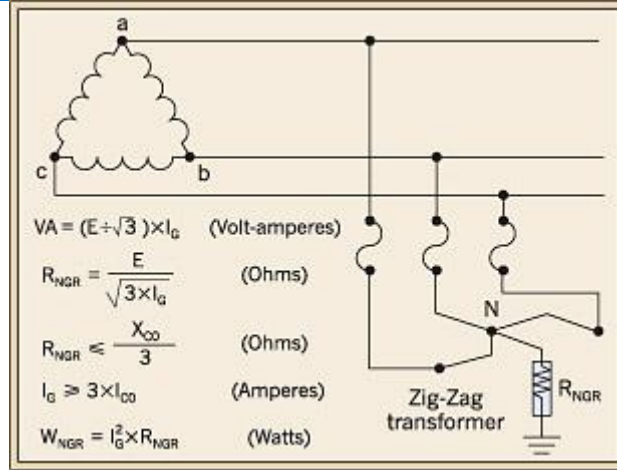
المعروف أن توصيلة الـ Zigzag لوحدها تتكون من مجموعتين من الملفات ، لكن هاتين المجموعتين تتصلان معاً ليكون لهما ثلاث أطراف فقط للتوصيل ، ومن ثم فتوصيلة D / Z لو نظرت لها من الخارج ستري أنها تتكون من 3 أطراف للدخول ( Delta ) وثلاثة أطراف للخروج ( Z ) ، أما داخلياً فكل Limb داخل المحول سيتربك عليها 3 ملفات ، أحدهما خاص بالـ Delta ( A1A2 ) ، والاثنين الآخرين خاصين بالـ ( Z ) ( a1 a2 / a3 a4 ) كما في الشكل 8-24 . وفي هذه الحالة تكون أطراف primary هي A2B2C2 وأطراف الـ Secondary الثلاثة التي تخرج من الـ Bushings هي a4- b4- c4.



شكل 8-24 : طريقة توصيل الـ Delta-Zig Zag

#### 8-7-4 هل يمكن عمل N حقيقي لمحول موصل $\Delta$ ؟

في بعض الأحيان نحتاج لجعل مقاومة الأرضية عالية في هذه المحولات وهذا ممكن إذا تم توصيل محول zigzag على التوازي مع المحول  $\Delta$  ثم توصيل مقاومة أرضية في الـ N الخاصة بمحول الـ zigzag كما في الشكل 8-25 مع ملاحظة أنه لا يجب توصيل أي أحمال على هذه الـ N مطلقاً باستثناء فقط الـ Ground Resistance .

شكل 8-25 : عمل N حقيقي لمحول موصل  $\Delta$

## البَابُ الرَّابِعُ

# تشغيل المحولات

- الفصل التاسع : التشغيل على التوازي
- الفصل العاشر : المفقودات Losses في المحولات
- الفصل الحادي عشر : عوامل مؤثرة على تشغيل المحولات
- الفصل الثاني عشر : تشغيل الأنواع الخاصة من المحولات
- الفصل الثالث عشر : نظم التبريد

## مقدمة الباب الرابع

يمكن القول أن الأبواب الثلاثة السابقة تعتبر كلها تمهيد لهذا الباب ، فالهدف الأساسي من المحول هو تشغيله وليس مجرد التعرف على مكوناته ولا أساسياته ، بل إن كل ذلك يكون بغرض فهم المفردات التي تستخدم في شرح ما يتعلق بتشغيل المحول.

وهذا الباب هو أكبر أبواب الكتاب ، حيث يشتمل على خمسة فصول ، فأولهم وهو الفصل التاسع يتحدث عن تشغيل المحولات على التوازي ، والفصل العاشر يدرس جميع أنواع المفقودات في المحولات ، وهو بذلك يخدم الفصل الحادي عشر الذي يليه الذي يتحدث عن العوامل المؤثرة في تشغيل المحول ، حيث يشتمل على ثمانية مواضيع مختلفة ذات علاقة مباشرة بتشغيل المحولات ، وهو بذلك يكون أكبر فصل في هذا الباب ، بل هو أكبر فصل في الكتاب ، ثم أضفت لهذا الباب فصل عن تشغيل المحولات ذات الطبيعة الخاصة مثل محولات الـ Auto-Transformers ومحولات الـ Phase Shifting وهو الفصل الثاني عشر ، أما الفصل الأخير وهو الفصل الثالث عشر فيتحدث عن موضوع له صلة مباشرة بتشغيل المحولات وهو موضوع التبريد ، فكما سنرى في هذا الفصل فإن تشغيل المحول يعتمد بدرجة كبيرة على كفاءة منظومة التبريد ، ولذا تم ضم هذا الفصل إلى باب تشغيل المحولات.



# الفصل التاسع

## تشغيل المحولات على التوازي

معلوم أنه لتغذية القدرات العالية يفضل دائما تقسيم الحمل على أكثر من محول ، حيث توجد صعوبات في تصنيع المحولات العالية القدرة ، وهذا ما يدفعنا للتفكير في توصيل المحولات على التوازي . وفرضا لو تخيلنا أنه أمكن تصنيع محولات فائقة القدرة فسيكون دائما من الأفضل استخدام 10 محولات قدرة كل منهم 200 ميجا ثم توصلهم على التوازي بدلا من تصنيع محول واحد قدرته 2000 ميجا - بفرض أنه أمكن تصنيعه أصلا - وذلك لأسباب عديدة سنعرض لها هنا .

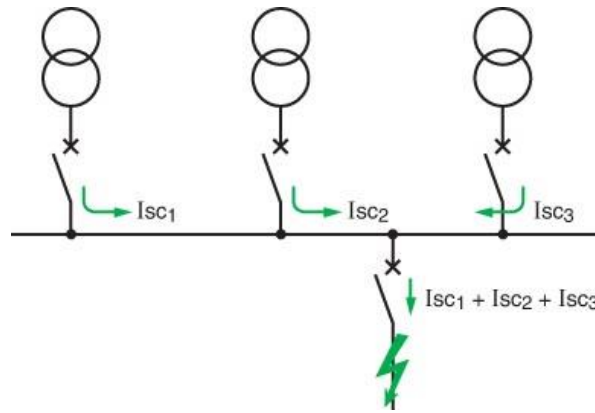
### 9-1 الحاجة للتوصيل على التوازي

هناك العديد من النقاط الأخرى التي تزيد من احتياجنا لتوصيل المحولات على التوازي منها أيضا :

- 1- لو كان الحمل كله على محول واحد ثم خرج بسبب عطل ما فسنخسر كل الحمل في وقت واحد ، بينما لو تم توزيع الحمل على مجموعة محولات على التوازي فخرج محول يمثل جزء من القدرة الإجمالية يمكن تعويضه بسهولة أكبر من تعويض القدرة الإجمالية كلها .
- 2- سهولة عمل spare للمجموعة التي تتكون من محولات صغيرة .
- 3- إذا انخفض الحمل يمكن فصل بعض المحولات ، على العكس لو كان الحمل كله على محول واحد فمن المستحيل فصله حتى لو انخفض الحمل إلى 10 % ( ملحوظة : كلما ارتفعت نسبة التحميل كلما ازدادت كفاءة التشغيل )
- 4- أضف إلى ما سبق سهولة نقل و فك و تركيب المحولات الأصغر قدرة مقارنة بالمحولات الكبيرة التي تحتاج تجهيزات خاصة ذات كلفة عالية .

## 2-9 عيوب و مشاكل التوصيل على التوازي

من المقدمة السابقة يتبين أن تصنيع و تجميع المحولات الصغيرة عموماً أسهل و مشاكلها أقل ، لكن لو فرض أن الحمل الكلي أمكن تغذيته من مجموعة من المحولات الصغيرة فأيهما أفضل: هل تقسم الحمل الكلي بين المحولات ثم تركها تعمل بصفة منفصلة أم تجمع المحولات كلها على التوازي لتغذية الحمل ؟. فكل أسلوب ميزاته و عيوبه ، فالعيب الأساسي للتوصيل المنفرد هو ضعف Reliability أي الاعتمادية للمنظومة لأن خروج المحول معناه خروج الحمل كله. أما العيب الأساسي للتوصيل على التوازي فهو ارتفاع مستوى القصر short circuit . و لتوضيح هذه النقطة يمكن ملاحظة الشكل 1-9 .



شكل 1-9 ارتفاع قيمة القصر عند التوصيل على التوازي

فعند وقوع عطل على الـ BB العمومي أو على أي خط خارج منه فإن تيار القصر يأتي من المحولات الثلاثة و ليس فقط من المحول القريب و هذا يعني أن short circuit current سيكون مرتفعاً جداً. بينما لو كان كل محول يغذي جزء فقط من الحمل لكان القصر مغذى من محول واحد و ليس من ثلاث محولات.

و ارتفاع الـ short circuit current يستلزم بالضرورة أن يكون الـ BB مصمماً لتحمل هذا التيار المرتفع ، و كذلك الكابلات التي سيمر بها تيار القصر ، و أيضاً القواطع CB وخلافه ، وكله هذا يعني شيئاً واحداً هو ارتفاع تكلفة المنظومة مقارنة بنفس المنظومة لو كان الحمل مقسماً على مجموعة محولات منفصلة ، حيث سينخفض تيار القصر في الحالة الثانية لأنه يأتي من محول واحد فقط ، و من ثم ستخفض مستويات القصر التي يصمم عليها الـ BB و الـ CB و الكابلات و غيرها . لكن على الجانب الآخر تذكر أن الاعتمادية أيضاً ستخفض.

الآن ، الأمر صار واضحاً : إما أن تحصل على اعتمادية عالية فلا بد أن تدفع أكثر ، أو أنك تدفع أقل و تحصل على منظومة ضعيفة في الإعتمادية . وفي الغالب يستبعد الخيار الثاني و يلجأ الفنيون للتوصيل على التوازي رغم تكلفته العالية طمعا في استمرارية التوصيل و جودة الخدمة.

## 3-9 شروط التوصيل على التوازي :

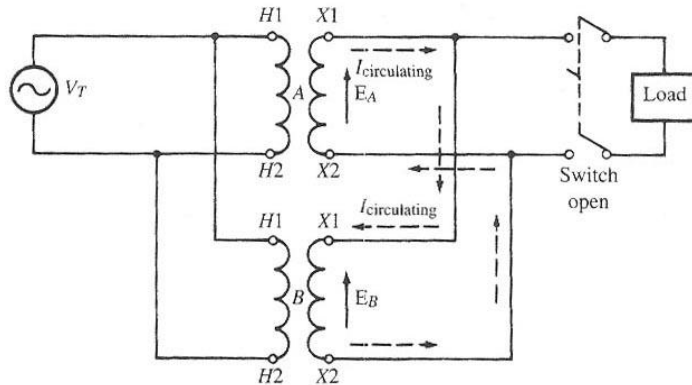
عند توصيل المحولات على التوازي يتم توصيل الملفات الابتدائية للمحولات معا إلى الـ BB الخاص بمصدر التغذية ، وكذلك يتم توصيل ملفات الجانب الثانوي معا إلى الـ BB الحمل . وهناك شروط أساسية يستلزم تحقيقها بدقة قبل توصيل مجموعة محولات على التوازي . و هذه الشروط هي :

1. نسبة التحويل يجب أن تكون متساوية تماما في جميع المحولات same voltage ratio
2. جميع المحولات يجب أن يكون لها نفس القطبية Polarity
3. جميع المحولات يجب أن يكون لها نفس ( Z% ) percentage impedance
4. جميع المحولات يجب أن يكون لها نفس التتابع phase sequence
5. جميع المحولات يجب أن يكون لها نفس phase displacement

والشروط الثلاثة الأولى تعتبر شروط عامة لكافة أنواع المحولات ، سواء محولات  $1-\phi$  أو محولات الـ  $3-\phi$  ، أما الشرطين الرابع و الخامس فهما خاصين بمحولات الـ  $3-\phi$  فقط.

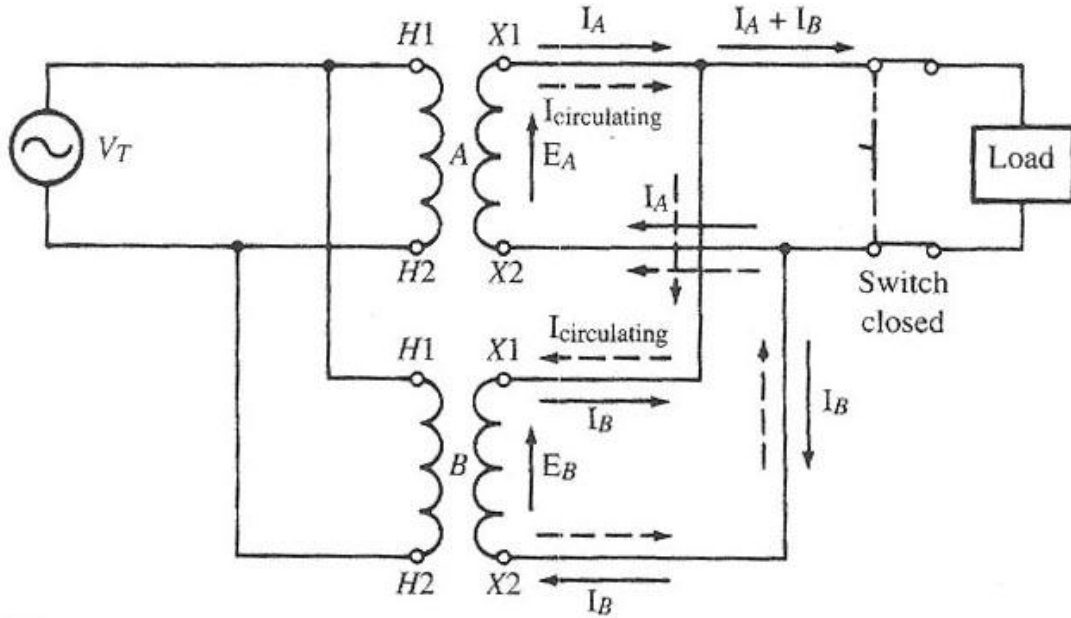
### 1-3-9 لماذا يجب أن تكون للمحولات نفس الـ voltage ratio ؟

لو فرض أن لدينا محولين موصلين على التوازي ، و أن هناك فرق بسيط بين نسب التحويل في كلا المحولين ، فالذي سيحدث هو مرور ما يعرف بالـ circulating current حتى لو كان الحمل مفصولا ( No- load ) كما في الشكل 2-9 ، بالطبع هذا التيار يمثل فقد للقدرة غير مرغوب .



شكل 2-9 : تأثير نسب التحويل

لاحظ في الشكل أننا فرضنا  $E_A$  أكبر من  $E_B$  ومن ثم تحدد اتجاه التيار الذي يدور بين أطراف الـ secondary في كلا المحولين ، أما عند توصيل الحمل ( ومشكلة اختلاف نسب التحويل لا تزال قائمة ) فإن هذا الـ circulating current سيتسبب في مشكلة من نوع آخر كما في الشكل 3-9 .



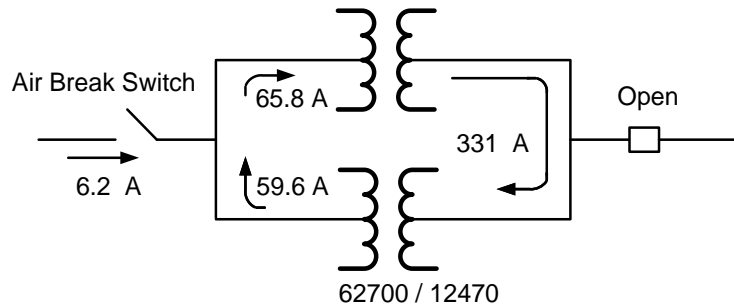
شكل 3-9 : اختلاف الجهد في وجود الحمل

حيث سنلاحظ أن  $I_{circulating}$  قد تم جمعه على  $I_A$  ، بينما يتم طرحه من  $I_B$  أي أن أحد المحولين ( هو A ) نسحب منه تياراً أعلى من التيار المسحوب من المحول الآخر (محول B) ، وهذا يعني أن التحميل غير متوازن على كلا المحولين ، وربما يحدث لأحدهما ( محول A ) over Load ، وربما يفصل. وحسب مواصفات IEEE فإن الاختلاف في النسب التحويل لو كان أقل من 0.5% فإنه يعتبر مقبولا ولا يتسبب في مشاكل ( لاحظ أنه من المستحيل عمليا أن يتم التطابق بين المحولين بنسبة 100% ، و لابد أن سيكون هناك فرق لكن من المهم ألا يزيد هذا الفرق عن 0.5% ) .

### 9-3-2 ماذا يحدث لو كان الفرق بين نسب التحويل كبيراً ؟

لو فرض أن لدينا محولين قدرة كل منهما 10 MVA ونسبة التحويل 66/12.47 kv ، وكانا موصلين على التوازي كما في الشكل 4-9

62700 / 12470



شكل 4-9 : اختلاف كبير في الجهد

لنفرض أيضا أن لدينا مفتاح Air Break Sw لغلق الدائرة وفتحها في عدم وجود التيار ( فقط isolator وليس CB ) ، وكان هذا المفتاح يتحمل فقط 1A ( الأصل ألا يمر فيه شيء أصلا لأنه يغلق والـ CB لا يزال مفتوحا ) عند توصيل المفتاح يفترض ألا يمر تيار خلاله أكبر من magnetizing current طالما أن الـ Secondary مفتوح .

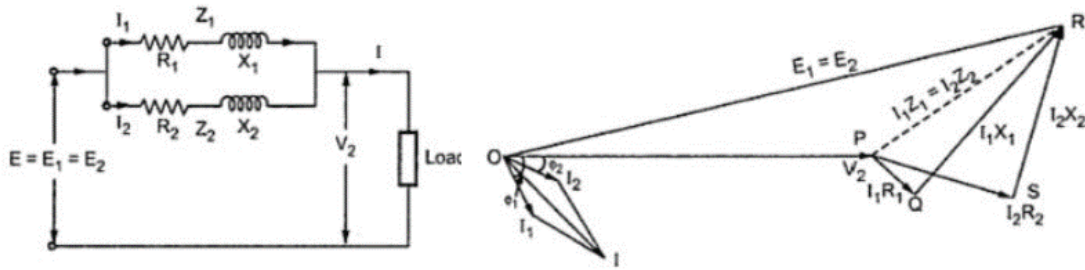
لكن في إحدى الحالات قام العامل بغلق المفتاح فحدثت شرارة هائلة أحرقت المفتاح و بالفحص تبين الآتي:

أن أحد المحولين كان مركب عليه Tap Changer جهة الابتدائي ، ومضبوط على قيمة مختلفة عن المحول الآخر ، فوصل الجهد في الأول إلى 62700 ، بينما كان الجهد على الثاني 69300 ، ورغم أن  $Z\%$  لهما كانت واحدة ، و تساوي 7% ، إلا أن فرق الجهد الكبير بين الطرفين تسبب في مرور تيار ضخمة في جهة الثانوي  $= \frac{\Delta V_s}{2Z} = 331A$  رغم أن secondary مفتوح.

المشكلة الثانية والأساسية هي أن تيار الـ Circulating في الابتدائي له قيمتين مختلفتين بسبب اختلاف نسب التحويل ( لو كانت نسب التحويل متساوية لكان التيارين يلاشى أحدهما الآخر ) فأحدهما هو 68.8 ، و الثاني 59.6 ، وعند غلق المفتاح فقد مر فيه الفرق بين التيارين ( 6.2 A ) ، و لما كان المفتاح مصمما على تحمل 1A فقط فقد حدثت فيه شرارة هائلة واحترق.

### 3-3-9 ماذا لو تغيرت $Z\%$ أو تغيرت X/R ratio في المحولين؟

الأصل أن يستخدم محولين لهما نفس rating ، و لهما نفس  $Z\%$  ، ولهما نفس القدرة وذلك حتى يتم توزيع الحمل بينهما بالتساوي ، فإذا اختلفت قدرة المحولين فإن الحمل سيتوزع بينهما حسب الـ MVA rating ، فإذا اختلفت  $Z\%$  فإن الحمل سيتوزع بينهما حسب المعادلات التالية المشتقة من الرسم 5-9.



شكل 9-5 : متجهات التيار والجهد للمحولات الموصلة على التوازي

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_1 = I \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$I_2 = I \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

لاحظ من المعادلات أنه لو كانت  $Z_1$  and  $Z_2$  متساويتان لما كانت هناك أى مشكلة .

وليس يكفي أن تكون  $Z$  متساوية ، بل يجب أيضا أن تتساوى النسبة بين  $\frac{X}{R}$  في كلا المحولين ، وإلا فإن الـ phase angle للتيارين تكون مختلفة ، وهذا يعني أن أحد المحولين سيكون له معامل قدرة power factor أكبر من الآخر، وبناء عليه فإن توزيع القدرة بينهما سيكون غير متساوي (سيكون حسب الـ MVA rating ) حتى لو تساوت الـ  $Z$  كمقدار كما في المعادلة التالية.

$$kVA1 = \frac{\frac{kVA1}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$$

$$kVA2 = \frac{\frac{kVA2}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$$

**Example 32.96.** Two 1-phase transformers with equal turns have impedances of  $(0.5 + j3)$  ohm and  $(0.6 + j10)$  ohm with respect to the secondary. If they operate in parallel, determine how they will share a total load of 100 kW at p.f. 0.8 lagging ? (Electrical Technology, Madras Univ. 1987)

**Solution.**  $Z_A = 0.5 + j3 = 3.04 \angle 80.6^\circ$   $Z_B = 0.6 + j10 = 10.02 \angle 86.6^\circ$

$$Z_A + Z_B = 1.1 + j13 = 13.05 \angle 85.2^\circ$$

Now, a load of 100 kW at 0.8 p.f. means a kVA of  $100/0.8 = 125$ . Hence,

$$S = 125 \angle -36.9^\circ$$

$$S_A = S \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{125 \angle -36.9^\circ \times 10.02 \angle 86.6^\circ}{13.05 \angle 85.2^\circ} = 96 \angle -35.5^\circ$$

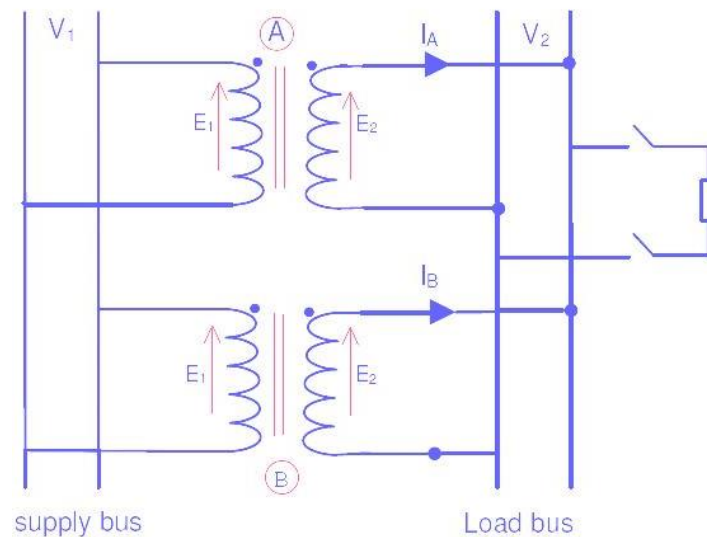
= a load of  $96 \times \cos 35.5^\circ = 78.2$  kW

$$S_B = S \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} = \frac{125 \angle -36.9^\circ \times 3.04 \angle 80.6^\circ}{13.05 \angle 85.2^\circ} = 29.1 \angle -41.5^\circ$$

= a load of  $29.1 \times \cos 41.5^\circ = 21.8$  kW

### 4-3-9 ماذا يحدث لو تغيرت الـ Polarity

من النقاط الأساسية في توصيل المحولات على التوازي أن تتشابه الـ polarity لجميع المحولات ، وإلا فإن الـ emf للمحول الأول ستكون باتجاه معاكس للـ emf في المحول الثاني ، وهذا يعني أن هناك short circuit سيحدث بالجانب الثانوي تماما كما لو وصلت كابل مباشرة بين طرفي محول في الشكل 6-2 بالفصل السادس. أما التوصيل الصحيح فيظهر في الشكل 6-9 .



شكل 6-9 : التوصيل الصحيح للقطبية

## 9-3-5 ماذا لو اختلف الـ Phase Sequence ؟

سيحدث في حالة اختلاف الـ Phase Sequence تماما كما حدث في حالة اختلاف الـ Polarity ، ولكن بصورة متكررة كل Cycle ، فمع تغير الـ Cycle سيكون لدينا short circuit في كل مرة بين زوجين من الـ Phases .

## 9-3-6 لماذا يجب أن يكون Phase Displacement يساوي صفر ؟

لابد أخيرا أن يكون الفرق بين phase displacement للمحولين المتصلين على التوازي يساوي صفر ، بمعنى آخر أن يكون المحولين ينتميان إلى نفس الـ vector group . على سبيل المثال ، لو كان المحول الأول من النوع Yy0 فيجب أن يكون الثاني إما Yy0 ، أو Dd0 ، أو Zz0 ، أى من نفس المجموعة ، كما درسنا تفصيلا في الفصل السابع.

ولضمان أن يكون الـ phase displacement مساويا للصفر يجب أن تكون جميع المحولات الموصلة على التوازي تنتمي لمجموعة واحدة من مجموعات من الـ Vector Groups الأربعة المشهورة والشائعة وهي :

1. Zero Group 1: phase displacement (Yy0, Dd0, Dz0)
2. Group 2: 180° phase displacement (Yy6, Dd6, Dz6)
3. Group 3: -30° phase displacement (Yd1, Dy1, Yz1)
4. Group 4: +30° phase displacement (Yd11, Dy11, Yz11)

ولا يصح أن يكون المحولين خليطا من مجموعتين باستثناء المجموعة 1 و 2 .

أما مجموعة 3 و 4 فيمكن أن يوصلا معا بشرط عكس طرفي التوصيل في أحدهما .

## مثال 9-1 : Equal Impedances, Ratios and kVA

احسب كيفية توزيع التيار بين محولين متصلين على التوازي في ظل الظروف التالية:

two 2000 kVA, 5.75% impedance transformers in parallel, each with the same turn ratios to a 4000 kVA load.

$$\begin{aligned}
 \bullet \text{ Loading on the transformers} &= kVA1 = \frac{\frac{kVA1}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA \\
 &= \frac{\frac{2000}{5.75}}{\frac{2000}{5.75} + \frac{2000}{5.75}} \times 4000 = \frac{348}{348+348} \times 4000 = 2000kVA
 \end{aligned}$$



وبالمثل سيكون التحميل على المحول الثاني وهذا التساوي ناتج بسبب تحقق الشروط الثلاثة وهي تساوي Ratio, Power and Z%

### مثال 9-2 : Equal Impedances, Ratios and Different kVA

احسب كيفية توزيع التيار بين محولين متصلين على التوازي في ظل الظروف التالية:

3000 kVA and 1000 kVA transformers in parallel, each with 5.75% impedance, each with the same turn ratios, connected to a common 4000 kVA load.

- $$\text{Loading on the transformers-1} = kVA1 = \frac{\frac{kVA1}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$$

$$= \frac{\frac{3000}{5.75}}{\frac{3000}{5.75} + \frac{1000}{5.75}} \times 4000 = \frac{522}{522+174} \times 4000 = 3000kVA$$
- $$\text{Loading on the transformers-2} = kVA2 = \frac{\frac{kVA2}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$$

$$= \frac{\frac{1000}{5.75}}{\frac{3000}{5.75} + \frac{1000}{5.75}} \times 4000 = \frac{174}{522+174} \times 4000 = 1000kVA$$

وهو كما ذكرنا سابقا فإن التوزيع بينهما يكون حسب kVA لكل منهما (الأكبر يتحمل أكبر)

### مثال 9-3 : Unequal Impedance but Same Ratios and kVA

احسب كيفية توزيع التيار بين محولين متصلين على التوازي في ظل الظروف التالية:

Two 2000 kVA transformers in parallel, one with 5.75% impedance and the other with 4% impedance, each with the same turn ratios, connected to a common 3500 kVA load.

- Loading on the transformers-1  $=kVA1 = \frac{\frac{kVA1}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$   
 $= \frac{348}{348+500} \times 3500 = 1436kVA$
- Loading on the transformers-2  $=kVA2 = \frac{\frac{kVA2}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$   
 $= \frac{500}{348+500} \times 3500 = 2064kVA$

وهو كما ذكرنا سابقا فإن التوزيع بينهما غير متساوي ويكون حسب النسبة العكسية لـ Z (الأكبر في الـ Z يتحمل أقل) وأصبح أحدهما Overloaded (2064 < 2000) بنسبة 3% تقريبا بينما الآخر محمل بنسبة 72% فقط من قدرته المقننة.

#### مثال 9-4 : Unequal Impedance and KVA Same Ratios

احسب كيفية توزيع التيار بين محولين متصلين على التوازي في ظل الظروف التالية:

Two transformers in parallel with one 3000 kVA (kVA1) with 5.75% impedance, and the other a 1000 kVA (kVA2) with 4% impedance, each with the same turn ratios, connected to a common 3500 kVA load.

- Loading on the transformers-1  $=kVA1 = \frac{\frac{kVA1}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$   
 $= \frac{522}{522+250} \times 3500 = 2366kVA$
- Loading on the transformers-2  $=kVA2 = \frac{\frac{kVA2}{Z\%}}{\frac{kVA1}{Z1\%} + \frac{kVA2}{Z2\%}} \times kVA$   
 $= \frac{250}{522+250} \times 3500 = 1134kVA$

مرة أخرى يصبح المحول الذي له Z أقل Overloaded (1134 < 1000) .

## مثال 9-5 : Equal Impedance and KVA Unequal Ratios

Two 2000 kVA transformers connected in parallel, each with 5.75% impedance, same X/R ratio (8), transformer 1 with tap adjusted 2.5% from nominal and transformer 2 tapped at nominal. What is the percent circulating current (%IC).

$$\%Z_1 = 5.75, \text{ So } \%R' = \%Z_1 / \sqrt{[(X/R)^2 + 1]} = 5.75 / \sqrt{(8)^2 + 1} = 0.713$$

$$\%R_1 = \%R_2 = 0.713$$

$$\%X_1 = \%R \times (X/R) = \%X_1 = \%X_2 = 0.713 \times 8 = 5.7$$

Let %e = difference in voltage ratio expressed in percentage of normal and k  
= kVA1/ kVA2

$$\text{Circulating current } \%IC = \%e \times 100 / \sqrt{(\%R_1 + k\%R_2)^2 + (\%Z_1 + k\%Z_2)^2}$$

$$\%IC = 2.5 \times 100 / \sqrt{(0.713 + (2000/2000) \times 0.713)^2 + (5.7 + (2000/2000) \times 5.7)^2}$$

$$\%IC = 250 / 11.7 = 21.7$$

The circulating current is **21.7% of the full load current.**

## مثال 9-6 : Equal Impedance and KVA Unequal Ratios

Two transformers connected in parallel, 2000 kVA1 with 5.75% impedance, X/R ratio of 8, 1000 kVA2 with 4% impedance, X/R ratio of 5, 2000 kVA1 with tap adjusted 2.5% from nominal and 1000 kVA2 tapped at nominal.

$$\%Z_1 = 5.75, \text{ So } \%R' = \%Z_1 / \sqrt{[(X/R)^2 + 1]} = 5.75 / \sqrt{(8)^2 + 1} = 0.713$$

$$\%X_1 = \%R \times (X/R) = 0.713 \times 8 = 5.7$$

$$\%Z_2 = 4, \text{ So } \%R_2 = \%Z_2 / \sqrt{[(X/R)^2 + 1]} = 4 / \sqrt{(5)^2 + 1} = 0.784$$

$$\%X_2 = \%R \times (X/R) = 0.784 \times 5 = 3.92$$

Let %e = difference in voltage ratio expressed in percentage of normal and k  
= kVA<sub>1</sub> / kVA<sub>2</sub>

$$\text{Circulating current } \%IC = \%e \times 100 / \sqrt{(\%R_1 + k\%R_2)^2 + (\%Z_1 + k\%Z_2)^2}.$$

$$\%IC = 2.5 \times 100 / \sqrt{(0.713 + (2000/2000) \times 0.713)^2 + (5.7 + (2000/2000) \times 5.7)^2}$$

$$\%IC = 250 / 13.73 = 18.21.$$

The circulating current is **18.21% of the full load current.**

# الفصل الحادي عشر

## المفايد في المحولات

### Power Loss in Transformers

دراسة موضوع الـ Loss في المحول هام جدا لأنه أساسي في حساب كفاءة التشغيل ، وأساسي أيضا في دراسة التشغيل الأمثل للمحول . وعموما فإن الـ Loss في المحولات يمكن تقسيمها لمجموعتين :

1- مجموعة No-Load Loss

2- مجموعة Load Loss

## 1-10 مجموعة NO-LOAD LOSS :

عند فصل الأحمال عن المحول مع استمرار توصيله بالمصدر فإن المحول يستمر في سحب طاقة من المصدر ، هذه الطاقة كلها تعتبر loss ، لأنه لا يوجد (output) . ولكن هذه الطاقة لها فائدة أساسية وهي جعل المحول energized أى جاهز للخدمة ، ولها عدة مسميات منها أنها تسمى بالـ Core loss أو Magnetic loss ، وبالطبع كل التسمية لها أسبابها كما سنرى . ومجموعة الـ no-load loss يندرج تحتها ثلاثة أنواع :

- Hysteresis loss
- Eddy current loss
- Dielectric loss

وهذه الطاقة رغم أن اسمها no load loss إلا أنها ستستمر كطاقة مسحوبة من المصدر حتى بعد تحميل المحول ، ولكن بعد التحميل سيضاف إليها المجموعة الثانية أى مجموعة الـ Load Loss . ويمكن قياس الـ no-load loss بصورة مجمعة بواسطة open circuit test كما سنرى في فصل الاختبارات .

### 1-1-10 الطاقة المغناطيسية الغير مسترجعة Hysteresis Loss

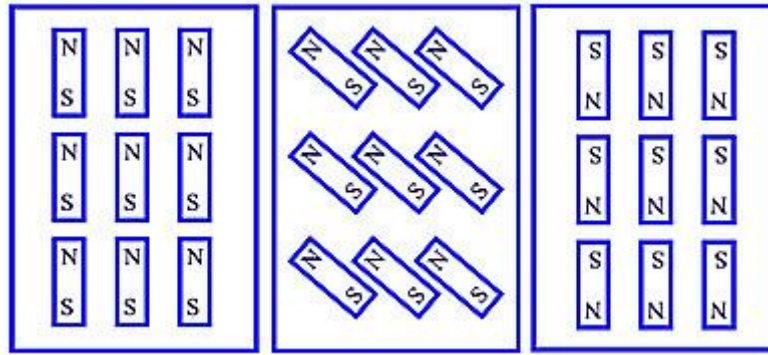
هذه الطاقة تعتبر جزءا من الـ Core loss ، أو هي نوع من أنواع الـ no load loss أي أنها تحدث سواء كان المحول متصل بالحمل أم لا . وفكرة هذا النوع من loss ببساطة أنه في كل مرة ينعكس اتجاه

المجال المغناطيسي فإن جزءا بسيطا من الطاقة يفقد نتيجة الـ hysteresis ، وهذه الكلمة تعنى نزوع المادة الممغنطة للبقاء على حالتها القديمة.

والواقع أنه يتبقى في المادة الحديدية جزء من المغناطيسية يسمى residual flux أي أننا فقدنا جزءاً من القدرة المغناطيسية داخل المادة الحديدية هذه القدرة تسمى Hysteresis Loss ، ويتم تمثيل تأثيرها في الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي Real Transformer على شكل ملف لها معاوقة قدرها  $X_m$ .

فعند مرور تيار Sinusoidal في الملف الابتدائي ينتج كما نعلم فيضا مغناطيسيا يشبه تماما الجهد الذي أنشأه أي أنه له منحنى جيبي Sinusoidal ، وهذا المجال المغناطيسي الناشئ عند مرور التيار يتسبب في النصف Cycle الأولى من منحنى الـ sinusoidal في مغنطة المادة المغناطيسية الموجودة في الـ Core والتي يمكن أن نعتبرها مكونة داخليا من مجموعة من domains التي تصطف نتيجة المجال المغناطيسي في اتجاه واحد كما في الشكل 1-10.

وعندما ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي في نصف الدورة الثاني من منحنى الـ sinusoidal فإن الـ domains داخل الـ Core يجب أن تغير اتجاهها ويجب على الأقطاب أن تصطف متوازية في الاتجاه الجديد للمجال كما في الشكل 1-10 . ومن ثم يمكن أن نعتبر الـ Hysteresis Loss هي الطاقة التي تفقد في احتكاك جزيئات المادة وتحريك أقطابها في كل دورة من دورات المجال المغناطيسي.



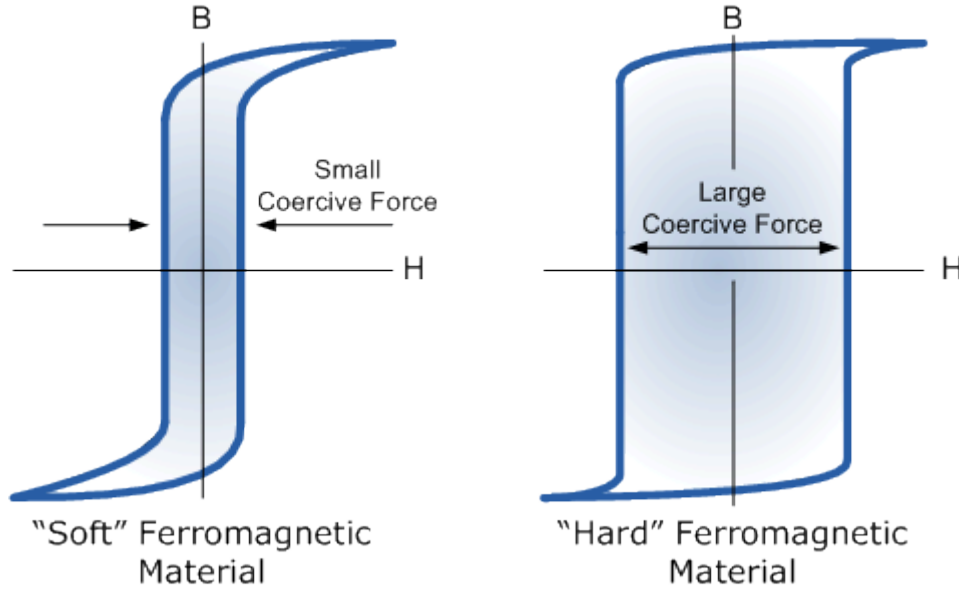
شكل 1-10 : تغير اتجاه الأقطاب

والحقيقة أن الطاقة التي تستهلك في صف أقطاب المادة المغناطيسية تأتي من input power ، وبالطبع لا تنتقل هذه الطاقة للجانب الثانوي أي لا تنتقل للـ load ومن ثم نعتبرها طاقة مفقودة. وبالطبع كلما كان المجال المغناطيسي قويا ، وكلما كان التردد عاليا كلما كانت الطاقة المستهلكة في صف وتغير اتجاه الاقطاب داخل المادة أكبر.

ويمكن تقدير حجم الطاقة الكهربائية المستهلكة في الـ hysteresis من خلال المعادلة التالية :

$$W_h = k_h B_{\max}^{1.6} fV$$

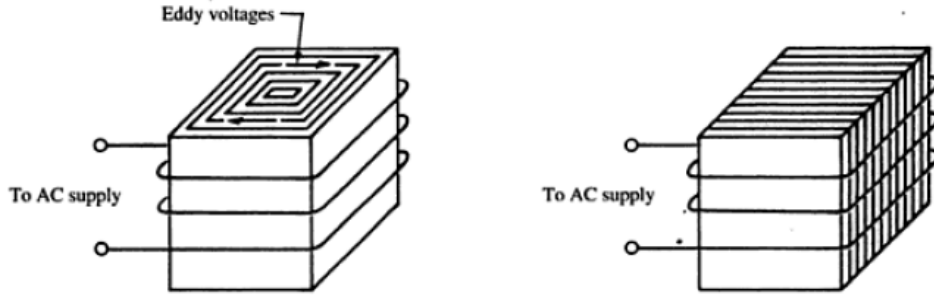
ويمكن حسابها بطريقة تقديرية من خلال المساحة داخل الحلقة المعروفة بـ Hysteresis Loop والتي تظهر في الشكل 2-10 ، فكلما كان الجزء المحصور داخل الـ Loop كبيرا كلما كان ذلك يعني أن الـ Hysteresis Loss كبيرة. ويمكن تقليل هذه النوعية من الطاقة المفقودة بتحسين نوعية المادة المغناطيسية المستخدمة في الـ Core.



شكل 2-10 : اختلاف الفقد حسب نوعية المادة

### 2-1-10 Loss في القلب الحديدي بسبب الـ eddy current

المواد المغناطيسية مثل الحديد لها أيضا قدرة على توصيل التيار الكهربائي وليس فقط على تمرير الفيض المغناطيسي ، فعندما تقطع خطوط الفيض أسلاك الملفات النحاسية فإنها تولد جهدا كبيرا طبقا لقانون فاراداي ، لكنها وهي تقطع هذه الملفات فإنها أيضا تقطع القلب الحديدي فيتولد فيه أيضا تيار كهربائي يسمى eddy current كما في الشكل 3-10 ، وتعرف هذه التيارات بالتيارات الدوامية. وبالطبع فهذا التيار غير مرغوب فيه البتة ، فهو لا يصل للحمل ، وهو أيضا يتسبب في تسخين القلب الحديدي بلا داع ، وهذا كله نوع من الطاقة المفقودة . وعادة يتسبب الـ eddy current في حوالي 50% من مفقودات القلب الحديدي.



شكل 10-3 : التيارات الدوامية داخل القلب

لاحظ أن هذه الطاقة المفقودة ستفقد حتى لو كان الحمل مفصولاً ، ولذا فهذا النوع من losses يصنف ضمن no load loss ، مع الإشارة إلى بقائها أيضاً بعد التحميل . وهذا النوع من الـ loss يعتمد بالأساس على نوع المادة المغناطيسية والتردد وكثافة المجال المغناطيسي طبقاً للمعادلة :

$$W_e = k_e B_{\max}^2 f^2$$

حيث  $K_e$  ثابت يتوقف على نوع المادة وسمكها

وهذه الطاقة تتأثر بشدة بقيمة سمك المادة المغناطيسية ، فكلما قل السمك كلما زادت المقاومة الكهربائية ، وبالتالي يقل التيار المار في القلب ، وهذا هو السبب في أن جميع القلوب الحديدية في المحولات الكهربائية تكون على شكل شرائح معزولة عن بعضها ومضغوطة معاً.

فمن الناحية المغناطيسية فمجموعة الشرائح تعطي المساحة المطلوبة لمقطع القلب ليتحمل مرور الفيض فيه ، ومن الناحية الكهربائية فهي ذات مقاومة عالية لصغر مساحة المقطع في كل شريحة فلا يمر فيها إلا تيار صغير ، ومن ثم يمكن بهذه الطريقة تقليل قيمة eddy current ، وعادة لا تزيد سمك الشريحة الواحدة عن 0.35 mm.

### 3-1-10 dielectric losses الخسائر في العزل

المواد العازلة التي تستخدم لعزل الموصلات عن بعضها داخل المحول تتسبب في وجود نوع من المكثفات يعرف بالمكثفات الشاردة Stray Capacitors ، وهي مكثفات ليست منظورة بالعين ولا تمسك باليد ، لكنها تعمل نفس عمل المكثفات الحقيقية ويحدث فيها نوع من الفقد في الطاقة .

ومعلوم أن المكثف النموذجي Ideal capacitor يمثل بـ capacitance فقط دون مقاومة ، حيث لا يوجد فيه أي فقد في الـ power ، فهو يشحن بالطاقة في النصف دورة الأولى من الـ Sin ثم يفرغها في النصف الثاني ، ثم يشحن ثم يفرغ وهكذا ، ولا يفقد شيئاً من الـ Active Power ، ولذا تكون الزاوية بين الجهد والتيار فيه تساوي 90 درجة.



لكن هذا الكلام يعتبر نظرياً فقط فلا يوجد في الواقع مكثف عبارة عن capacitance فقط ، بل دائماً يكون مع هذه الـ capacitance مقاومة صغيرة ، ومن ثم فالزاوية بين الجهد والتيار تقل قليلاً عن 90 درجة بمقدار زاوية صغيرة تسمى  $\delta$ , delta ، ويعتبر  $\tan \delta$  مقياساً متعارفاً عليه ليعطي مؤشراً على حجم تباعد المكثف عن كونه ideal capacitor ، فكلما صغرت هذه الزاوية كلما كان الـ capacitor أقرب للنموذجية . وعلى هذا فالطاقة المفقودة في عوازل المحول dielectric losses تتناسب هي الأخرى مع  $\tan \delta$  ، وهذا المقدار يعرف أيضاً بـ dissipation factor. وتتناسب قيمة الـ Dielectric Power Loss مع الجهد والتردد حسب المعادلة :

$$P_d = 2\pi f C V^2 \tan \delta$$

where

$P_d$  = dielectric losses, W

$f$  = applied frequency, Hz

$C$  = capacitance , F

$V$  = operating voltage, rms V

$\tan \delta$  = dissipation factor

#### 10-1-4 خطورة الـ dielectric loss

هذا النوع من الطاقة يمثل جزءاً ضئيلاً من الطاقة المفقودة ، ورغم ذلك فهي من أخطر أنواع الـ power loss ، وذلك لأن  $\tan \delta$  تتأثر بشدة بدرجة الحرارة فكلما ارتفعت درجة الحرارة زادت  $\tan \delta$  ، وكلما زادت  $\tan \delta$  زادت الطاقة المفقودة ، وبالتالي زادت درجة الحرارة أكثر ، وتزيد  $\tan \delta$  أكثر ، وهكذا حتى يحدث إنهيار حراري للعزل .

أخيراً تعتبر هذه الطاقة أيضاً من أنواع الـ no load loss لأنها موجودة حتى لو كان الحمل مفصولاً.

## 10-2 مجموعة LOAD LOSS

هذه المجموعة من الـ losses تظهر فقط أثناء تحميل المحول نتيجة مرور تيار الحمل خلال الملفات ، ولذا فهي تتكون أساساً من المفقودات النحاسية Copper Loss في مقاومة الملفات سواء في ملفات الابتدائي أو الثانوي ، والتي تمثل حوالي 90% من الـ load loss ، ويضاف إليها جزء يعرف بالـ stray loss ، وتمثل حوالي 10% من هذه الـ Loss .

بالطبع فإن أهمية حساب الـ load loss تكمن في أنها عنصر أساسي عند تقدير حجم المحول ، فالحرارة الناشئة عن مرور التيار في الملفات ترفع درجة الحرارة في الملفات إلى درجة الخطر ، ولذا فمن الضروري العمل على خفض هذه الـ Loss والذي يتم غالبا عن طريق خفض قيمة مقاومة الملفات .

### 10-2-1 ملفتودات النحاسية Copper Loss

هذه أول نوع من أنواع الـ load loss ، بمعنى أنها لا تظهر كقيمة مؤثرة إلا إذا حدث تحميل للمحول ، وكلما زاد التحميل زادت الطاقة المفقودة. فالمعروف أن الملفات النحاسية - ابتدائي وثانوي - لها مقاومة معينة ، ومن ثم فمرور تيار فيها يتسبب في فقد للقدرة يحسب من المعادلة المعروفة

$$P = I^2 R$$

وللدقة ، يجب أن نشير إلى أنه يوجد فقد في الملفات النحاسية حتى أثناء No Load وذلك نتيجة مرور تيار اللاحمل no load current ، فتيار اللاحمل no load current هو التيار الذي يمر في الملف الابتدائي فقط عندما يسلب عليه الجهد المقنن ، مع كون الملف الآخر مفتوحا ، و يكون غالبا في حدود من 1-2% من تيار الحمل الكامل. وتتأثر قيمته أساسا بقيمة الفيض ، ولذا يجب الأخذ في الاعتبار أن تكون كثافة الفيض المغناطيسي تحت نقطة التشبع الحرجة ( Critical Saturation point ) و ألا تحتوي شرائح القلب الحديد على ثغرات هوائية و ذلك للحفاظ على قيمة تيار اللاحمل .

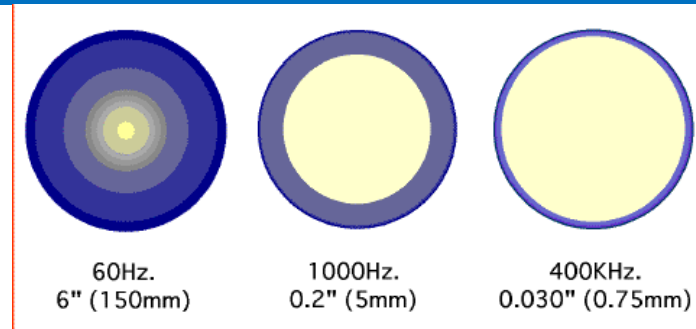
(في المحولات الـ Ideal تكون قيمة الفيض ثابتة أثناء الحمل وأثناء اللاحمل بسبب إهمال قيمة الـ Loss).

### 10-2-2 تأثير الحرارة على Copper Loss

مع ارتفاع درجة الحرارة ترتفع قيمة  $I^2 R$  بسبب ارتفاع قيمة المقاومة على عكس eddy current loss التي تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة . وإحصائيا ، يمكن القول أن كل ارتفاع قدره درجة مئوية واحدة يتسبب في ارتفاع قيمة الـ load loss بمقدار 0.4%.

### 10-2-3 تأثير نوعية التيار على الملفتودات

من المعلوم أن قيمة المقاومة تحسب من القانون  $R = \frac{\rho L}{A}$  ، لكن هذا القانون صحيح تماما في حالة DC فقط ، أما إذا كان التيار AC فيعتبر هذا القانون نوع من التقريب المقبول وليس دقيقا تماما. وذلك لأن التيار المتردد يميل إلى المرور في أطراف الموصل بعيدا عن مركزه كما في الشكل 10-4 . وتركيز التيار في الأطراف يجعل مساحة المقطع الفعلية للموصل أقل من المساحة الهندسية ، ومن ثم تزيد  $R_{AC}$  عن قيمة الـ  $R_{DC}$  وهذا ما يعرف بـ Skin Effect.



شكل 10-4 : تأثير التردد على ظاهرة الـ Skin Effect

وعلى هذا فالمفقودات النحاسية تزيد أكثر إذا كان التيار متردد ، وبالطبع هذا التأثير يظهر بوضوح كلما كانت مساحة المقطع للموصل أكبر، أما في الموصلات الصغيرة فيمكن إهمال هذا التأثير .

### 4-2-10 المفقودات الشاردة

بالإضافة إلى أنواع المفقودات السابقة فهناك أنواع أخرى وإن كانت أقل تأثيراً من الأنواع السابقة ، لكن مجموعها يمثل أحيانا 5% من قيمة الـ Loss في المحول ، وربما أقل قليلا من ذلك . وهي تنتج بتأثيرات متنوعة منها:

### 5-2-10 المفقودات نتيجة Leakage Flux

فمن المعلوم أن الفيض الذي ينشأ عند مرور التيار في ملف ما لا يرتبط كلياً بالملف الآخر، بل يكون هناك جزء مفقود ، وهذا الجزء المفقود من الفيض يعبر عنه بـ leakage flux ، أو الفيض المتسرب. وهذا الفيض المتسرب قد يقطع الأجزاء الحديدية الخارجية للمحول فينشأ فيها تيارات eddy current ويتسبب في سخونة هذه الأجزاء المعدنية الغير حاملة للتيار أصلاً ، وهذا نوع من فقد الطاقة ويظهر تأثيره فقط في المحولات الكبيرة .

وهناك نوع آخر من الطاقة المفقودة بسبب الفيض المتسرب لكنه أقل تأثيراً ، وهو وجود eddy current داخل الموصلات النحاسية نتيجة الـ leakage flux ، وتأثيرها أيضاً ضعيف . وجميع هذه القيم من الطاقة المفقودة تحسب بالتجربة والقياس وليس من خلال المعادلات .

## 3-10 طرق تقليل المفقودات في المحولات

### 1-3-10 تأثير نوع المادة

تعتمد الـ Core loss أساساً على التردد و كثافة الفيض ونوع مادة القلب ، وفيما عدا التردد فإنه يمكن التحكم في بقية العوامل حيث يمكن مثلاً اختيار نوع مادة القلب الحديدي بحيث تكون صفاتها أجود .

وغالبا تقاس الكفاءة لكل كجم من المادة ، ( أي حسب الوزن المستخدم ) . وأغلب المصنعين يستخدمون نوع من الـ Steel لا يتسبب في Hysteresis ولا يتسبب في eddy current عالي . وهناك أمثلة كما في الجدول 1-10 .

جدول 1-10 : الفقد حسب نوعية المادة

Year (Approx.)	Core Material	Thickness (Mm)	Loss (W/Kg At 50hz)
1910	Warm rolled FeSi	0.35	2 (1.5T)
1950	Cold rolled CRGO	0.35	1 (1.5T)
1960	Cold rolled CRGO	0.3	0.9 (1.5T)
1965	Cold rolled CRGO	0.27	0.84 (1.5T)
1975	Amorphous metal	0.03	0.2 (1.3T)
1980	Cold rolled CRGO	0.23	0.75 (1.5T)
1985	Cold rolled CRGO	0.18	0.67 (1.5T)

من الجدول يتبين أن لدينا نوعين أساسيين في المواد المستخدمة في تصنيع القلب الحديدي .

- الأولي هي amorphous metal وهي المواد غير المتبلورة .
- الثانية : هي CRGO material .

والمفقدات في النوع الأول تقل بنسبة 25% عن النوع الثاني حيث السماحية المغناطيسية permeability أعلى ، ويمكن تصنيعها في شرائح دقيقة جدا مثل الشرائط .

### 10-3-2 تأثير كثافة الفيض على الفقد في القدرة

إحدى طرق تقليل الفقد في الطاقة هي تقليل قيمة  $B_{max}$  عن طريق تقليل الجهد لكل لفة voltage per turn ، والتي تحسب من المعادلة :

$$E/N = 4.44 B_m A f \times 10^{-6}$$

ولإنجاز ذلك يستلزم زيادة عدد اللفات وبالطبع لا بد أن تكون الزيادة واحدة في الابتدائي والثانوي لضمان ثبات turns ratio

لكن على الجانب الآخر فإن زيادة عدد اللفات سيزيد من طول الموصل ، وبالتالي زيادة مقاومته ، وهذا سيؤدي لزيادة نوع آخر وهو copper loss ، اللهم إلا إذا كبرنا أيضا مساحة المقطع للموصل وهذا يعني تكلفة أكبر ، علما بأن زيادة مساحة المقطع ستؤدي لزيادة نوع آخر من الـ loss وهي eddy current في الموصل ، ومن ثم ، فكما تري ، فإن الأمر ليس صريحا وسهلا لتقليل الفقد في الطاقة ، ويحتاج لنوع من الـ compromise بين كل هذه الأنواع.

## 3-10-3 تقليل load loss بتحسين PF

وحيث أن load loss تتناسب طردياً مع مربع التيار ، وبما أن تحسين الـ Power Factor ينتج عنه تقليل قيمة التيار فإن أى طريقة نقل بها التيار ( مثل تحسين pf ) تعتبر فعالة جداً في تقليل الـ load loss.

فإذا فرضنا أن KW المسحوب من الـ load ثابت ، فإننا يمكن أن نعتبر أن التيار المسحوب يتناسب مع  $KW/pf$ .

والمعادلة التالية تعطي مقدار التوفير في الطاقة المفقودة load loss اذا تحسن الـ pf ليصبح 1 وذلك حسب قيمة pf الفعلي.

*Saving In Load Losses*

$$= (Per\ unit\ loading\ as\ per\ kW)^2 \\ \times Load\ losses\ at\ full\ load \times \left( \left[ \frac{1}{pf} \right]^2 - 1 \right)$$

بمعني لو pf الفعلي 0.8 وتحسن إلي 1 فإن التوفير يساوي 56.25% ، وبالطبع سيضاف لذلك التوفير في cable loss والتي يمكن أن تكون ضعف الـ loss الموجودة في المحول نفسه .

والجدول التالي من كتالوج شركة الماكو المصرية للمحولات ويعطى بعض الحدود القصوى للمفقودات في محولات القوى حسب قدرتها.



## GUARANTEE FIGURE

## NORMAL LOSSES

## VOLTAGE SYSTEM (12 KV)

POWER K.V.A	LOAD LOSSES AT 75 (W)	NO LOAD LOSSES (W)	% IMPEDANCE	A (mm)	D (mm)	F (mm)	Oil (kg)	Total Weight (kg)	K (mm)	P (mm)	R (mm)	FIG
25	680	120	4	730	645	1250	90	320	520	50	125	1
50	1300	190	4	750	645	1295	95	400	520	50	125	1
63	1430	215	4	875	645	1330	120	475	520	50	125	1
100	2190	300	4	875	715	1330	130	580	520	50	125	1
160	2930	420	4	1210	710	1575	250	890	520	50	125	1
200	3730	510	4	1620	940	1575	260	1030	520	50	125	2
300	5440	610	4	1780	990	1690	365	1345	670	50	125	2
500	7900	890	4	1700	1020	1770	440	1785	670	50	125	2
630	8750	1100	4	1740	950	1800	470	1990	670	50	125	3
800	10720	1250	4.5	1925	1170	1870	590	2800	670	50	125	3
1000	14230	1400	5	1995	1140	1915	600	2850	820	50	125	3
1500	20200	1900	6.5	2260	1300	2130	915	3800	820	50	125	3
1600	20250	2170	6.5	2190	1300	2275	1140	4600	820	50	125	3
2000	23400	2350	6.5	2365	1280	2350	1190	5000	820	50	125	3
2500	30500	2850	7	2585	1875	2385	1510	6500	1000	70	200	4
3000	35000	3300	7	2570	1875	2485	1550	7310	1000	70	200	4

## REDUCED LOSSES

## VOLTAGE SYSTEM (12 KV)

POWER K.V.A	LOAD LOSSES AT 75 (W)	NO LOAD LOSSES (W)	% IMPEDANCE	A (mm)	D (mm)	F (mm)	Oil (kg)	Total Weight (kg)	K (mm)	P (mm)	R (mm)	FIG
63	1150	195	4	995	645	1370	160	610	520	50	125	1
100	1150	300	4	1050	645	1450	230	910	520	50	125	1
160	1840	360	4	1210	645	1470	265	1060	520	50	125	1
200	2090	440	4	1580	650	1600	305	1210	520	50	125	2
300	3260	520	4	1650	740	1750	390	1095	670	50	125	2
500	4850	720	4	1720	820	1790	495	2215	670	50	125	2
800	6300	1000	4.5	2050	1040	1880	600	3000	670	50	125	3
1000	9400	1100	5	2130	1050	1960	705	3860	820	50	125	3
1500	13500	1800	6.5	2290	1170	2120	910	4720	820	50	125	3
2000	20420	2350	6.5	2365	1270	2415	1130	4800	820	50	125	3
2500	26870	2850	7	2800	2000	2550	2175	7750	1000	70	200	4

## NORMAL LOSSES

## VOLTAGE SYSTEM (24 KV)

POWER K.V.A	LOAD LOSSES AT 75 (W)	NO LOAD LOSSES (W)	% IMPEDANCE	A (mm)	D (mm)	F (mm)	Oil (kg)	Total Weight (kg)	K (mm)	P (mm)	R (mm)	FIG
25	570	120	4	730	645	1250	90	320	520	50	125	1
50	1180	210	4	875	650	1330	160	495	520	50	125	1
63	1450	250	4	875	680	1330	190	600	520	50	125	1
100	2230	300	4	995	680	1475	235	750	520	50	125	1
160	3220	420	4	1210	710	1575	250	910	520	50	125	1
200	3700	510	4	1600	935	1575	255	1010	520	50	125	2
300	5220	610	4	1780	990	1690	365	1345	670	50	125	2
500	7050	890	4	2030	1150	1940	610	2090	670	50	125	2
630	8550	1100	4	1740	950	1800	470	1990	670	50	125	3
800	10600	1250	4.5	1925	1065	2030	700	2850	670	50	125	3
1000	12700	1400	5	2035	1200	2040	810	3360	820	50	125	3
1500	19800	1900	6.5	2260	1300	2130	915	3800	820	50	125	3
1600	20580	2170	6.5	2195	1280	2275	1140	4600	820	50	125	3
2000	25200	2350	6.5	2365	1270	2350	1190	5060	820	50	125	3
2500	29500	2850	7	2585	1875	2385	1505	6550	1000	70	200	4
3000	35300	3300	7	2570	1875	2485	1550	7310	1000	70	200	4

**Large Distribution Transformers**

Typical datas for 20/10 kV transformer with off-load or on-load tap-changer						
Rated power kVA	Tap-changer	No-Load Loss W	Load Loss W	Impedance %	Total Weight kg	Oil kg
3150	±2x2.5%	3500	25000	6.35	6250	1210
	±9x1.67%	3800	25500	6.35	10000	2780
4000	±2x2.5%	4200	29000	6.35	7500	1440
	±9x1.67%	4500	31000	6.35	12100	3220
5000	±2x2.5%	4900	35000	7.15	9300	1670
	±9x1.67%	5000	39000	7.15	13400	3620
6300	±2x2.5%	6000	45000	7.15	13200	2750
	±9x1.67%	6200	45000	7.15	15400	3960
8000	±2x2.5%	7000	56000	8.35	15300	3140
	±9x1.67%	7200	56000	8.35	18100	4760
10000	±2x2.5%	8100	65000	8.35	17200	3480
	±9x1.67%	8200	68000	8.35	20600	5090

## الفصل الحادي عشر

### عوامل مؤثرة على تشغيل المحول

هناك عدة موضوعات لها علاقة مباشرة بتشغيل المحولات ، ويجب دراستها بعمق بسبب تأثيرها المباشر على أداء المحول ، ومنها:

- 1- حساب الكفاءة Efficiency.
  - 2- حساب الـ Voltage Regulation
  - 3- العناصر المؤثرة على تحميل المحول (درجة الحرارة - دورة الأحمال )
  - 4- تأثير الـ Harmonics
  - 5- تأثير تيارات الاندفاع Inrush currents
  - 6- الضوضاء الناشئة عن التشغيل
  - 7- اختلاف التردد عن Rated value
  - 8- تأثير استخدام جهود مختلفة عن Rated value .
- وهذه المواضيع جميعا ستدرس في هذا الفصل الهام.



## 1-11 الموضوع الأول : كفاءة المحول

كفاءة المحول تحسب بنفس طريقة حساب كفاءة أي عنصر كهربائي أي حساب نسبة الـ input/output ، وكفاءة المحولات الكهربائية عموماً تكون عالية جداً ( في حدود 99.5% ) حيث الفقد في الطاقة كما ذكرنا سابقاً ليس كبيراً .

ويمكن حساب الكفاءة بطريقتين : إما من خلال أجهزة قياس القدرة مباشرة wattmeter ، وإما من خلال اختبارات المحول المعروفة بـ Open /Short circuit tests . والطريقة الثانية أكثر دقة . وعموماً فإن كفاءة المحول تعتبر ثابتة ، وإن كانت تقل قليلاً مع زيادة التحميل . وتحسب عادة الكفاءة Efficiency من المعادلة .

$$loss = \frac{P_{fe}}{\cos \varphi_0} + \frac{P_{cu}}{\cos \varphi_s}$$

$$\eta = \frac{Output}{Input} = \frac{kVA(out)}{kVA(in)} = \frac{kVA(in) - loss}{kVA(in)}$$

حيث :

$P_{fe}$  : قيمة المفقودات الحديدية ( Iron Losses ) عند الجهد و التردد المقنن .

$P_{cu}$  : قيمة المفقودات النحاسية ( Cupper Losses ) عند الحمل الكامل .

$\cos \varphi_0$  : معمل القدرة عند اللاحمل .

$\cos \varphi_s$  : معمل القدرة عند الحمل

وتتغير الكفاءة بتغير نسبة التحميل حسب المعادلة التالية:

$$\eta = \frac{x \times \text{full-load kVA} \times p.f.}{(x \times \text{full-load kVA} \times p.f.) + W_{cu} + W_i} \times 100$$

حيث x هي نسبة التحميل

علماً بأن أقصى كفاءة تحدث إذا تحقق الشرط التالي:

$$Cu \text{ Loss} = Iron \text{ Loss}$$

كما تتغير الكفاءة مع تغير معامل القدرة ونسبة التحميل طبقاً للاستنتاج التالي:

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{Input} - \text{Losses}}{\text{Input}}$$

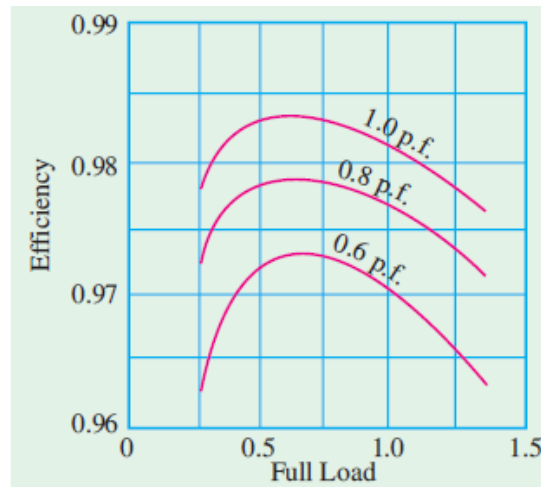
$$= 1 - \frac{\text{Losses}}{\text{Input}} = 1 - \frac{\text{Losses}}{(V_2 I_2 \cos \phi + \text{losses})}$$

Let, losses/ $V_2 I_2 = x$

$$\therefore \eta = 1 - \frac{\text{losses}/V_2 I_2}{\cos \phi + (\text{losses}/V_2 I_2)}$$

$$= 1 - \frac{x}{(\cos \phi + x)} = 1 - \frac{x/\cos \phi}{1 + (x/\cos \phi)}$$

والشكل التالي يعبر عن هذه النتيجة النهائية



**Example 32.63.** A 200-kVA transformer has an efficiency of 98% at full load. If the max. efficiency occurs at three quarters of full-load, calculate the efficiency at half load. Assume negligible magnetizing current and p.f. 0.8 at all loads. (Elect. Technology Punjab Univ. Jan. 1991)

**Solution.** As given, the transformer has a F.L. efficiency of 98 % at 0.8 p.f.

$$\text{F.L. output} = 200 \times 0.8 = 160 \text{ kW} ; \text{F.L. input} = 160/0.98 = 163.265 \text{ kW}$$

$$\text{F.L. losses} = 163.265 - 160 = 3.265 \text{ kW}$$

This loss consists of F.L. Cu loss  $x$  and iron loss  $y$ .

$$\therefore x + y = 3.265 \text{ kW} \quad \dots(i)$$

It is also given that  $\eta_{\max}$  occurs at three quarters of full-load when Cu loss becomes equal to iron loss.

$$\therefore \text{Cu loss at 75 \% of F.L.} = x (3/4)^2 = 9x/16$$

$$\text{Since } y \text{ remains constant, hence } 9x/16 = y \quad \dots(ii)$$

Substituting the value of  $y$  in Eqn. (i), we get  $x + 9x/16 = 3265$  or  $x = 2090 \text{ W}$ ;  $y = 1175 \text{ W}$

**Half-load Unity p.f.**

$$\text{Cu loss} = 2090 \times (1/2)^2 = 522 \text{ W} ; \text{total loss} = 522 + 1175 = 1697 \text{ W}$$

$$\text{Output} = 100 \times 0.8 = 80 \text{ kW} ; \eta = 80/81.697 = 0.979 \text{ or } 97.9 \%$$

**Example 32.59.** In a 25-kVA, 2000/200 V, single-phase transformer, the iron and full-load copper losses are 350 and 400 W respectively. Calculate the efficiency at unity power factor on (i) full load (ii) half full-load.

(Elect. Engg. & Electronic, Bangalore Univ. 1990 and

Similar example in U.P. Technical University 2001)

**Solution. (i) Full-load Unity p.f.**

$$\text{Total loss} = 350 + 400 = 750 \text{ W}$$

$$\text{F.L. output at u.p.f.} = 25 \times 1 = 25 \text{ kW}; \eta = 25/25.75 = 0.97 \text{ or } 97\%$$

**(ii) Half F.L. Unity p.f.**

$$\text{Cu loss} = 400 \times (1/2)^2 = 100 \text{ W. Iron loss remains constant at } 350 \text{ W, Total loss} = 100 + 350 = 450 \text{ W.}$$

$$\text{Half-load output at u.p.f.} = 12.5 \text{ kW}$$

$$\therefore \eta = 12.5/(12.5 + 0.45) = 96.52\%$$

**Example 33.4.** A 120-kVA, 6,000/400-V, Y/Y 3-ph, 50-Hz transformer has an iron loss of 1,600 W. The maximum efficiency occurs at 3/4 full load.

Find the efficiencies of the transformer at

(i) full-load and 0.8 power factor

(ii) half-load and unity power factor

(iii) the maximum efficiency.

(Elect. Technology Utkal Univ. 1987)

**Solution.** Since maximum efficiency occurs at 3/4 full-load, Cu loss at 3/4 full-load equals iron loss of 1,600 W.

$$\text{Cu loss at } 3/4 \text{ F.L.} = 1,600 \text{ W; Cu loss at F.L.} = 1,600 \times (4/3)^2 = 2,845 \text{ W}$$

$$(i) \text{ F.L. output at } 0.8 \text{ p.f.} = 120 \times 0.8 = 96 \text{ kW} = 96,000 \text{ W}$$

$$\text{Total loss} = 1,600 + 2,845 = 4,445 \text{ W}$$

$$\therefore \eta = \frac{96,000}{100,445} \times 100 = 95.57\%$$

$$(ii) \text{ Cu loss at } 1/2 \text{ full-load} = (1/2)^2 \times 2,845 = 710 \text{ W}$$

$$\text{Total loss} = 710 + 1,600 = 2,310 \text{ W}$$

$$\text{Output at } 1/2 \text{ F.L. and u.p.f. is } 60 \text{ kW} = 60,000 \text{ W; } \eta = \frac{60,000}{62,310} \times 100 = 96.57\%$$

(iii) Maximum efficiency occurs at 3/4 full-load when iron loss equals Cu loss.

$$\text{Total loss} = 2 \times 1,600 = 3,200 \text{ W}$$

$$\text{Output at u.p.f.} = (3/4) \times 120 = 90 \text{ kW} = 90,000 \text{ W}$$

$$\text{Input} = 90,000 + 3,200 = 93,200 \text{ W} \therefore \eta = \frac{90,000}{93,200} \times 100 = 96.57\%$$

## 2-11 الموضوع الثاني : انتظام الجهد VOLTAGE REGULATION

وهو يمثل موضوع آخر من المواضيع الأساسية عند دراسة تشغيل المحولات ، فنظرياً يمكن أن نقول أن جهد الجانب الثانوي في المحولات يفترض أنه لا يتغير سواء كان المحول متصلاً بالحمل أم لا ، لكن الواقع يقول أنه - وحسب نوع الحمل - فغالباً كلما زاد تحميل المحول كلما انخفض جهد الجانب الثانوي.

ويعبر عن هذا الانخفاض في الجهد - والذي يفترض أن يكون صغيراً - بانتظام الجهد أو الـ voltage regulation, VR، وهذا يعني أنه نظرياً يجب أن تكون قيمة VR = 0% لكن عملياً ستكون له قيمة في حدود 3:5% . وبالطبع كما كان الـ VR صغيراً كلما كان أفضل ، لأن معناه أن جهد المحول لا يتأثر بالتحميل ، ومن ثم تتحسن كفاءة الخدمة وجودة القدرة وثبات الجهد.

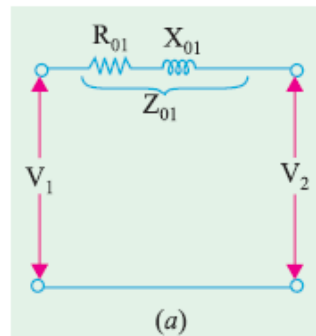
والسبب في انخفاض قيمة جهد الثانوي مع تحميل المحول هو حدوث voltage drop على مقاومة المحول نتيجة ارتفاع قيمة التيار المار بها حيث  $VD = I \cdot (R + jX)$  ، ولذا يعبر عن الـ VR بمقدار التغير الذي يطرأ على جهد الثانوي بعد إزالة الحمل من أطرافه باعتبار أن جهد الابتدائي ثابت ، وهذا التغير في جهد الثانوي يحسب كنسبة من جهد الثانوي المقنن rated secondary voltage ويعبر عنه بالمعادلة

$$VR = \frac{V_{s,nl} - V_{s,fl}}{V_{s,fl}}$$

يمكن أيضاً التعبير عن انتظام الجهد بحساب التغير بالقسمة على جهد الابتدائي  $V_1$  وليس بالقسمة على  $V_2$  ، والأسلوبان مستخدمان.

### 11-2-1 حساب الـ Regulation بدلالة الـ Parameters

ل للوصول إلى معادلة تحسب قيمة VR بدلالة قيم  $X$  و  $R$  للمحول فإننا نعود مرة أخرى إلى الدائرة المكافئة التي سبق أن استنتجناها وخاصة الصورة المبسطة النهائية كما في الشكل 11-1 .



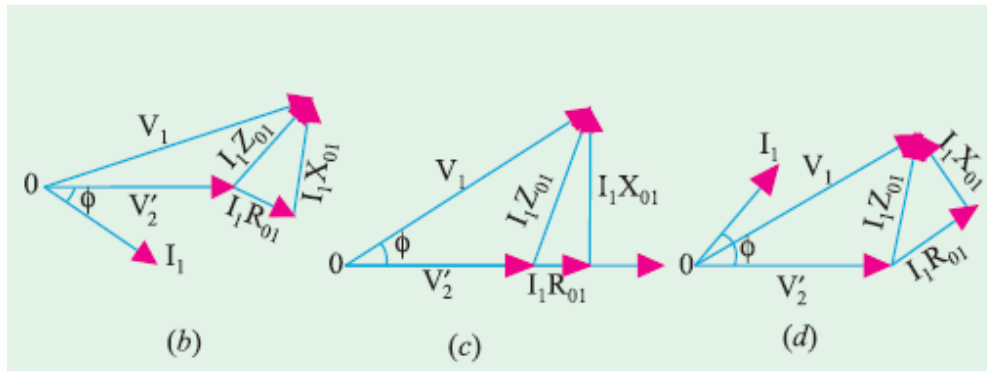
شكل 11-1 الصورة المبسطة للدائرة المكافئة للمحول

تذكر أن المقاومة  $R_{01}$  في الشكل تمثل مجموعة مقاومات الـ Sec + Pri ، وهي تعبر عن Copper Loss أثناء التحميل ، أما المعاوقة  $X_{01}$  فهي تعبر عن الفيض المتسرب.

## 2-2-11 رسم الـ Phasor Diagram تمهيدا لحساب VR

ومن الدائرة المكافئة السابقة يمكن أن نرسم المخطط المعروف باسم phasor diagram والذي يمثل الجهود المختلفة في المحول وعلاقاتها ببعضها ، فالجهد المكافئ لجهد الـ Primary Voltage إذا نقل إلى ناحية الـ Secondary فستصبح قيمته هي  $V_p' = \frac{V_p}{a}$  ( لاحظ أنه ليس  $V_p$  ، بل هو  $V_p$  مقسوماً على turns ratio ) ، وهذه القيمة تمثل قيمة جهد الـ Secondary Voltage,  $V_s$  ، مضافاً إليه مجموعة الهبوط في الجهد على  $R_{eq}$  ، وعلى  $X_{eq}$ .

والشكل 2-11 يمثل الـ Phasor diagram في حالة وجود حمل في الـ Secondary side من النوع Resistive load كما في الجزء c ثم inductive كما في الجزء b وأخيراً Capacitive كما في الجزء d .



شكل 2-11 : متجهات الجهد والتيار

## 3-2-11 الصورة المبسطة للـ VR

لو اعتمدنا على الرسمة الأخيرة والتي تمثل حمل Inductive كما هو الحال في معظم الأحمال الواقعية ستجد أن معادلة VR يمكن كتابتها على الصورة التالية إذا كان المرجع هو  $V_{pri}$  ( $V_1$ ):

$$\% \text{ regn} = \frac{I_1 R_{01} \cos \phi + I_1 X_{01} \sin \phi}{V_1} \times 100$$

أما إذا كان المرجع هو  $V_{sec}$  ( $V_2$ ) وهو الأشهر فيكتب على الصيغة التالية:

$$VR = \frac{I_s R_{eq} \cos \theta \pm I_s X_{eq} \sin \theta}{V_s}$$

لاحظ من المعادلة أن الـ VR يعتمد على الـ parameters الأساسية للمحول  $R_{eq}$  ،  $X_{eq}$  ، كما يعتمد على معامل القدرة  $(\cos \theta)$

وتستخدم الإشارة الموجبة (+) في المعادلة السابقة إذا كان لدينا lagging PF ، وتستخدم الإشارة السالبة (-) إذا كان لدينا Leading P.F.

**Example 32.43.** A-100 kVA transformer has 400 turns on the primary and 80 turns on the secondary. The primary and secondary resistances are  $0.3 \Omega$  and  $0.01 \Omega$  respectively and the corresponding leakage reactances are  $1.1$  and  $0.035 \Omega$  respectively. The supply voltage is  $2200 \text{ V}$ . Calculate (i) equivalent impedance referred to primary and (ii) the voltage regulation and the secondary terminal voltage for full load having a power factor of  $0.8$  leading.

(Elect. Machines, A.M.I.E. Sec. B, 1989)

**Solution.**  $K = 80/400 = 1/5$ ,  $R_1 = 0.3 \Omega$ ,  $R_{01} = R_1 + R_2/K^2 = 0.3 + 0.01/(1/5)^2 = 0.55 \Omega$

$$X_{01} = X_1 + X_2/K^2 = 1.1 + 0.035/(1/5)^2 = 1.975 \Omega$$

$$(i) \quad Z_{01} = 0.55 + j 1.975 = 2.05 \angle 74.44^\circ$$

$$(ii) \quad Z_{02} = K^2 Z_{01} = (1/5)^2 (0.55 + j 1.975) = (0.022 + j 0.079)$$

$$\text{No-load secondary voltage} = K V_1 = (1/5) \times 2200 = 440 \text{ V}, I_2 = 10 \times 10^3 / 440 = 227.3 \text{ A}$$

Full-load voltage drop as referred to secondary

$$= I_2 (R_{02} \cos \phi - X_{02} \sin \phi)$$

$$= 227.3 (0.022 \times 0.8 - 0.079 \times 0.6) = -6.77 \text{ V}$$

$$\% \text{ regn.} = -6.77 \times 100 / 440 = -1.54$$

$$\text{Secondary terminal voltage on load} = 440 - (-6.77) = 446.77 \text{ V}$$

### مثال

The equivalent parameters of a 150kVA, 2400V/240V transformer, are  $R_1=0.2\Omega$ ,  $R_2=2\text{m}\Omega$ ,  $X_1=0.45\Omega$ ,  $X_2=4.5\text{m}\Omega$ ,  $R_c=10\text{k}\Omega$ , and  $X_m=1.55\text{k}\Omega$ . The transformer is operating at rated load and rated voltage with  $0.8$  lagging power factor. Using the approximate equivalent circuit referred to the primary side, determine:

1. Voltage regulation.

**Solution**

Using the approximate circuit we can get:

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 = 0.2 + (10)^2 * (2) * 10^{-3} = 0.4 \Omega$$

$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2 = 0.45 + (10)^2 * (4.5) * 10^{-3} = 0.9 \Omega$$

$$P_{core} = \frac{V_1^2}{R_c} = \frac{2400^2}{10 * 10^3} = 5.76 \text{ w}$$

$$P_{cu fl} = (I_{2 fl})^2 R_{eq} = \left( \frac{S_{fl}}{V_2} \right)^2 R_{eq} = \left( \frac{150 * 10^3}{2400} \right)^2 (0.4) = 1562.5 \text{ w}$$

$$X = \text{load factor} = 1 \text{ (because stated at rated load)}$$

$$pf = \text{power factor} = \cos(\phi) = 0.8 \text{ lag}$$

**1. Voltage Regulation**

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{X \cdot S_{rated}}{|V_2|^2} [R_{eq} \cos \phi + X_{eq} \sin \phi] \\ &= \frac{(1)(150 * 10^3)}{(2400)^2} [(0.4)(0.8) + (0.9) \sin((\cos^{-1} 0.8))] \\ &= 2.24 \% \end{aligned}$$

**4-2-11 العلاقة بين الـ Voltage Drop وبين الـ Voltage Regulation**

بالنسبة للمحول Ideal Transformer ، أو المحول عند عدم تحميله ومرور فقط التيار magnetization current ( الذي لا يمثل أكثر من 0.5% من التيار المقنن) فإننا يمكن أن نهمل تأثير الهبوط في الجهد ( الـ Voltage Drop ).

أما عند تحميل المحول فالبعض يظن خطأ أنه إذا كان Regulation للمحول يساوي مثلاً 10% فهذا يعني أن الـ Drop سيساوي 10% ، وبالطبع هذا غير صحيح ، فمرور التيار أثناء التحميل يخفض جهد الثانوي ، لكنه يخفض أيضاً جهد الـ Primary ، ولذلك فالهبوط الذي يحدث في بين جهد الـ Primary نتيجة التحميل ، أو الهبوط في جهد الثانوي نتيجة مرور تيار الحمل وهو ما نعبر عنه بالـ V. Drop ،

يختلف تماما عن الهبوط الذى يحدث فى جهد الثانوي قبل وبعد التحميل وهو ما يعبر عنه بالـ V Regulation .

## 3-11 الموضوع الثالث : العناصر المؤثرة على تحميل المحول

هناك عدة عوامل تؤثر على تحميل المحول ، منها :

### 11-3-1 درجة الحرارة

من المواصفات ANSI code نجد أن محولات توزيع القوى يجب ألا تزيد الـ temperature rise فيها عن 65 درجة أي أن الارتفاع فوق الـ ambient temperature - والمفترض أنها 30 درجة عند التحميل الكامل full load - يجب ألا يزيد عن 65 درجة.

وغالبا نعتبر درجة حرارة الزيت في أعلى الـ tank transformer هي المقياس بالنسبة لنا ، ومن ثم يجب ألا ترتفع بأكثر من 65 درجة عن درجة الحرارة الطبيعية التي هي (30) درجة. وعموما فإن أعلى درجة حرارة نقطة في الـ Winding ( أيأ كان مكانها ) يجب ألا ترتفع بأكثر من 80 درجة فوق الـ 30 درجة التي تمثل الـ ambient temperature.

وهذه النقطة والتي تسمى بالـ hot spot ، بالإضافة إلى النقطة العليا في الزيت هما محل اهتمام المصنعين للمحولات لأن عمر المحول وتناقصه يعتمد بالأساس على مدى الارتفاع في هاتين النقطتين.

### 11-3-2 دورة الأحمال

من العناصر المؤثرة أيضا في تحميل المحول ما يعرف بالـ load cycle ، فالمعروف أنه لو كانت دورة الأحمال ثابتة لكان اختيار نسبة تحميل المحول مسألة سهلة ، لكن الأحمال تتغير من ساعة لأخرى ، ومن يوم لآخر ، ومن فصل لفصل ، ومسألة نسبة التحميل مسألة هامة جدا لأنه يتوقف عليها معدلات الإرتفاع في درجة الحرارة ، وهذه المعدلات ستؤثر بالضرورة على عمر العوازل التي تتأثر بشدة بدرجة الحرارة المتراكمة .

وبناء عليه ، فالمفروض أن يكون هناك نوع من التوازن بين الفترات التي يعمل فيها المحول وترتفع خلالها درجة حرارة الملفات عن 110 درجة (80+30) ، وبين الفترات التي تنخفض فيها درجة الحرارة عن هذه الدرجة.



### 11-3-3 تأثير Thermal time constant

المحولات الزيتية عموماً لها القدرة على تحمل أحمال زائدة over load لمدة قصيرة ، ويرجع ذلك إلى وجود كتلة الزيت الضخمة ، ووجود التانك الحديدي ، وكل هذه المواد لها Thermal time constant كبير ، فبعضها قد يصل إلى ساعتين أو 6 ساعات حسب حجم الزيت والتانك.

#### ملحوظة

هذه العوامل التي ذكرناها لا تؤثر فقط في معدلات التشغيل لكنها تؤثر أيضاً على عمر المحول والذي يقدر في العادة بـ 30 سنة ، لكن استمرار حدوث فترات over load طويلة ، أو بكثرة ، أو ارتفاع معدلات الأعطال وخطورتها ، كل ذلك يؤثر بشدة على عمر المحول وينقصه.

### 11-3-4 دورة أحمال محولات التوزيع

بعض شركات التوزيع يكون لديها جداول لنسبة الزيادة المسموح بها في الحمل over load وذلك حسب ثلاث عناصر أساسية : درجة الحرارة - شكل load cycle - هواء التبريد. وبناء على هذه العوامل يتم تقسيم فصول السنة إلى فترات الصيف - الربيع - الشتاء.

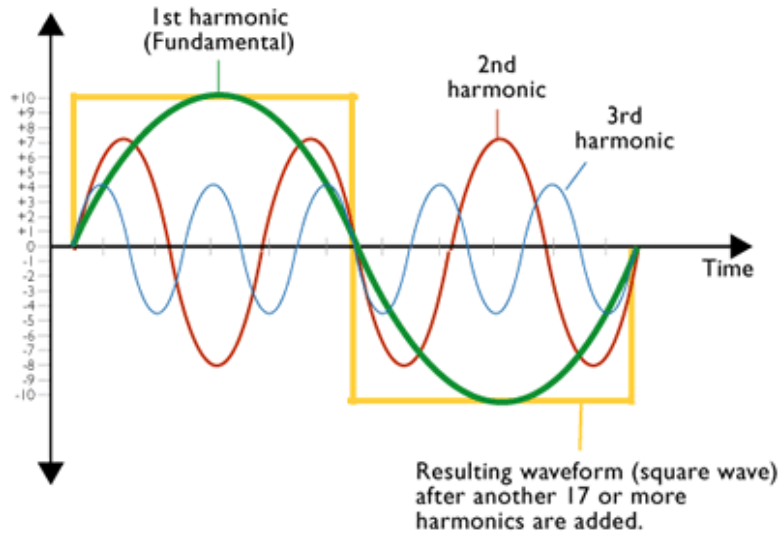
وبعد ذلك تنظر شركات المحولات في طريقة تركيب المحول وهل هي خارجية وموضوع مثلاً في مكان مرتفع ، أم قريب من السطح ، أم داخل غرفة أو قبو مثلاً ، وحسب هذه العناصر جميعاً تكون النسب المسموح بزيادتها فوق rated load كما في الجدول 1-11 والذي ستلاحظ أن أحمال محول 100 KVA يمكن أن تتراوح بين 249 KVA : 87 حسب العوامل التي أشرنا إليها .

جدول 1-11

Transformer			Peak-Day Load Factor									
Location	Temperature District	kVA	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Overhead or pad-mounted	Summer	100	205	196	187	177	168	159	149	140	131	122
	interior											
	Summer coastal	100	216	206	196	186	176	166	156	146	136	126
	Winter	100	249	236	224	211	198	186	173	160	148	135
Surface operable	Summer	100	147	140	133	127	120	113	107	100	93	87
	interior											
	Summer coastal	100	154	147	140	133	126	119	111	104	97	90
	Winter	100	178	169	160	151	142	133	124	115	105	96
Vault	Summer	100	173	164	156	147	139	130	122	113	105	96
	interior											
	Summer coastal	100	182	173	164	155	146	137	127	118	109	100
	Winter	100	185	176	166	157	147	138	128	119	110	100

## 4-11 HARMONICS الموضوع الرابع : تأثير الـ

تعرف الـ Harmonics بأنها ترددات من مضاعفات التردد الأصلي ، فإذا كان التردد الأصلي 50Hz فالـ Harmonics سيكون لها ترددات تساوي 100 ، 150 ، 200 ، وتسمى بالـ 2<sup>nd</sup> Harmonic و 3<sup>rd</sup> Harmonic ، وهكذا كما في الشكل 5-11.



شكل 5-11 التوافقيات الأساسية

وتنشأ هذه الترددات نتيجة وجود أحمال غير خطية Non linear ، فيمر فيها تيارات non-Sinusoidal ، وهذه التيارات الـ non-Sinusoidal إذا تم تحليلها طبقاً لقواعد Fourier series فإنها تتكون من التردد الأصلي محملاً عليه ترددات مختلفة ، والتي نسميها بالـ Harmonics.

ومن أهم أسباب ظهور Harmonics وجود مصادر للتغذية متصلة بـ Power Electronic devices مثل أجهزة الـ (Rectifiers + Inverters) بغرض الحصول على تحكم أكبر في قيمة الجهد ، لكن الجهود الناشئة من هذه الأجهزة تكون غالباً على شكل Pluses ، وهذه الـ pluses تشبه شكل منحنى الـ Sinusoidal wave الأصلي ومن هنا تظهر الـ Harmonics .

### 1-4-11 ما معنى Non-linear load ؟

كما ذكرنا فإن أحد مصادر الـ Harmonics وجود ما يسمى Non-linear load ، وهذه الأحمال ببساطة تعنى أنها لا تتبع قانون أوم في العلاقة بين الجهد والتيار والتي يفترض أنها ثابتة  $R = \frac{V}{I}$  ، لكن في حالة الـ non-linear لا تكون هذه النسبة ثابتة بل تتغير مع تغير قيم الفولت والتيار ، أي أن مقاومة

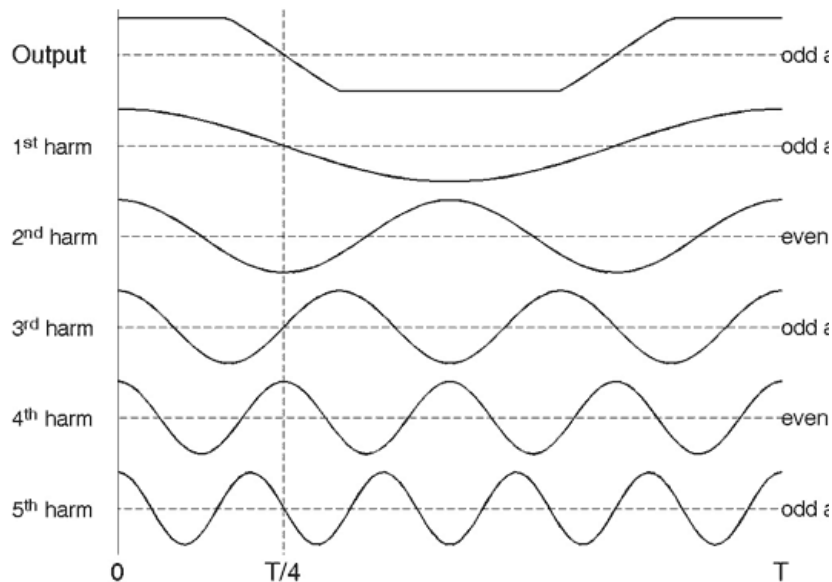
هذه الأحمال غير ثابتة . ومن أشهر أنواع الأحمال الغير خطية في الـ 1-Ø systems لمبات التفريغ discharging lamps مثل لمبات الزئبق والصوديوم وخلافه.

والـ Harmonics التي تنشأ في دوائر 1-Ø مع الأحمال الغير خطية المركبة في نظام الـ 3-Ø : 4-wire system تكون من درجة الـ 3<sup>rd</sup> Harmonic ، ومضاعفاتها أي 3 ، 9 ، 15 ، 21 وهكذا . وجميع هذه الـ Harmonics تعتبر Zero sequence أي لا يوجد زاوية بين تيارات الـ 3-phases ، بل جميعها في اتجاه واحد ، ومن ثم فمجموعها الاتجاهي لا يساوي صفر كما هو الحال في الـ 3-phases الأصلية أو بقية أنواع الـ Harmonics مثل 2<sup>nd</sup> , 4<sup>th</sup> , 6<sup>th</sup> etc ، وبالتالي لا يلغي بعضها بعضاً بل تجمع جبرياً ، وهذا يتسبب في مرور تيار عالي جداً في خط الـ Neutral لهذه الأنظمة ( ولذا يجب أن يكون مقطع الـ N مساوياً لمقطع الـ Phase العادي في هذه الحالات ) .

### 11-4-2 تأثير المكونات المختلفة للـ Harmonics على تشغيل المحول:

كما ذكرنا فإنه باستخدام Fourier analysis يمكن تحليل أي إشارة تيار/ جهد بأي شكل إلى مجموعة من الترددات الـ Sinusoidal كما في الشكل 11-6 ، تمثل الـ Harmonic + fundamentals ، وهذه الـ Harmonics طبقاً لـ Fourier قسمت إلى ثلاث مجموعات:

- الأولى تسمى Odd Harmonics وتمثل الترددات 3 ، 5 ، 7 ، 9 ، ....
- والثاني تسمى even Harmonics وتمثل الترددات 2 ، 4 ، 6 ، ....
- والثالث هي DC أي التردد صفر .



شكل 11-6 : أنواع مختلفة من التوافقيات

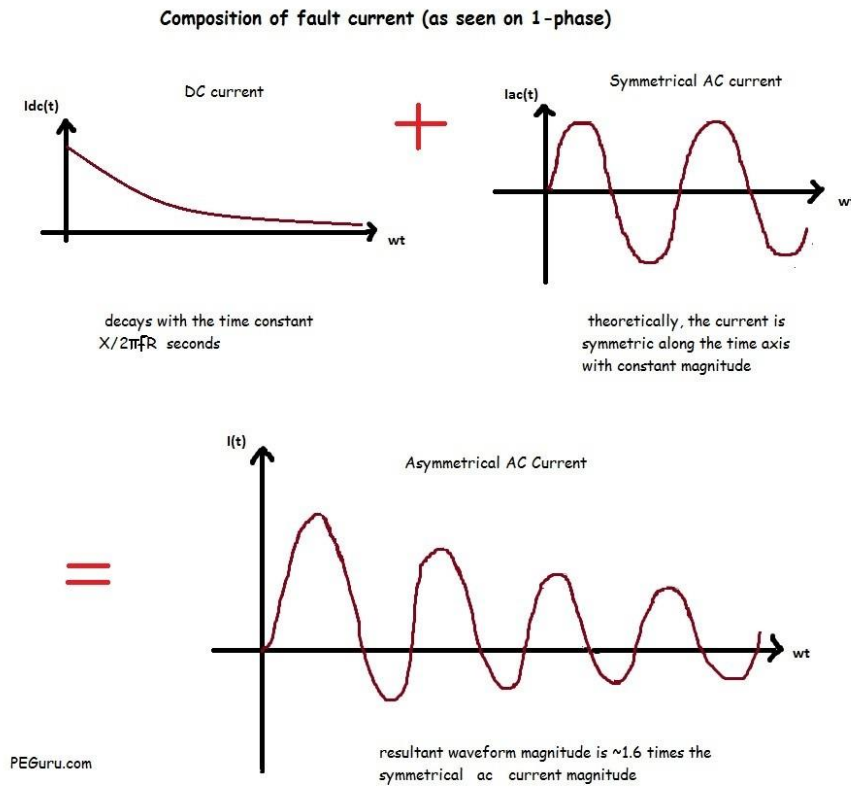
**11-4-3 تأثير الـ Odd Harmonics على المحولات :**

إذا كان المحول يمر فيه تيارات بها Odd Harmonics فإننا نتوقع زيادة الـ eddy loss وغيرها من Stray loss داخل المحول . فإذا كانت هذه الـ Harmonics موجودة دائماً ، وليست خلال فترات فقط فيجب عمل De-rating للمحول للتغلب على زيادة الـ eddy loss ، وعموماً طبقاً للـ ANSI Standard فإنه إذا زادت Total Harmonics distortion عن 5% فيجب عمل De-rating للمحول حسب جداول المواصفات .

**11-4-4 تأثير الـ Even Harmonics :**

في الغالب تكون الـ Harmonics الثانية ، الرابعة ، .... نسبتها قليلة جداً ، لكن الأهم في هذه المجموعة هو DC offset وهو السبب الرئيسي في جعل الـ Core يدخل إلى مرحلة Saturation ، وذلك إذا كانت نسبته عالية ، وهذا يتكرر في كل دورة . لاحظ في الشكل 11-7 كيف تجمع الـ DC Component مع الـ Signal الأصلية ، فتغير من شكلها.

وخطورة الـ Saturation أو التشبع أن قيمة التيار المسحوب في Primary لإنتاج الفيض (exciting current) يكون مرتفعاً جداً مما قد يؤدي إلى احتراق الملف الابتدائي في لحظات . ويمكن أن نتعرف بسهولة على وجود DC offset في تيار الابتدائي من خلال الصوت المرتفع الذي يصدر من قلب المحول . وعموماً فإن قيمة DC offset يجب أن لا تتعدى 1% من قيمة التيار المتقن .



شكل 11-7 : تأثير DC Offset

#### 11-4-5 ما المقصود بالـ K-factor ؟

نشأ عن التوسع في استخدام بعض الأجهزة الحديثة التي تعتمد على الـ Rectifiers والـ Inverters أن زادت نسبة الـ Harmonics بشدة في إشارات الجهد والتيار عموماً ، ومن ثم صار من المهم أن يصمم المحول بحيث يتحمل هذه النسبة العالية من Harmonics التي ستمر من خلال موصلات المحولات ولاسيما خط التعادل وتسمى هذه المحولات التي تصمم على تحمل الـ Harmonics تسمى K-factor transformers

ويعرف الـ K-Factor بأنه النسبة بين الفقد الإضافي في الطاقة الناشئ عن الـ Harmonics وبين eddy current loss

وهناك قيم معروفة للـ K هي 4, 7, 13, 20, 30 . فالمحول مثلاً الذي له  $K\text{-factor} = 4$  يعني أنه نسبة الأحمال الـ Non linear تصل إلى 50% من قيمة الحمل المتقن ، أما المحول الذي له  $K = 13$  فهذا يعني أن 100% من أحماله هي أحمال non-linear .

A K-4 reading would mean that the stray loss heating effect are four times normal. A standard transformer is, in effect, a K-1 transformer.

راجع تفاصيل أكثر عن هذا الموضوع في الفصل رقم 30 في كتابي هندسة القوى الكهربائية.

## 5-11 الموضوع الخامس : تيارات الاندفاع في المحولات

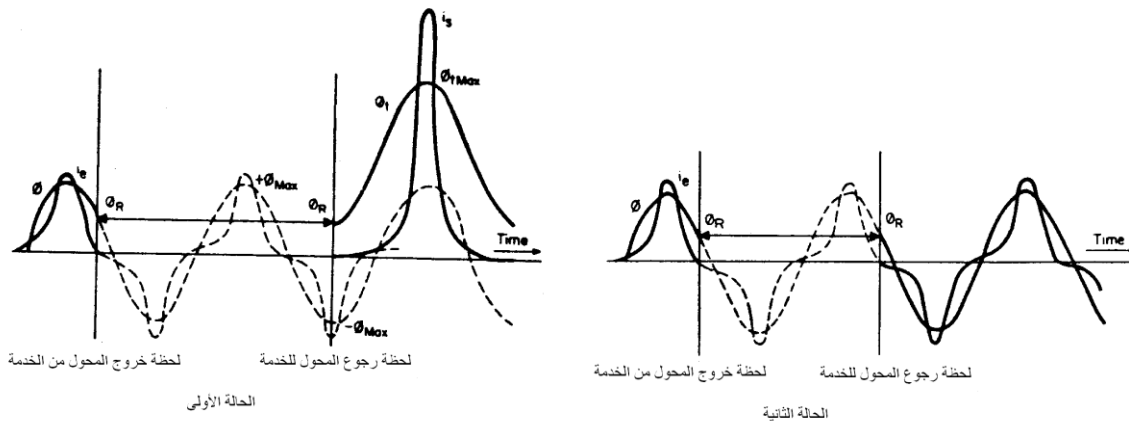
من المهم ونحن نتحدث عن تشغيل المحولات أن نعرض لمشكلة هامة موجودة في كل المحولات ، وهي مشكلة تيار الاندفاع Inrush Current ، وهي أحد أهم المشاكل التي يمكن أن تسبب فصل خاطئ.

### 1-5-11 أسباب هذا التيار

ولشرح أسباب هذا التيار بدون تفاصيل كثيرة يمكن الرجوع إلى الشكل 8-11 ومنه يمكن تلخيص أسباب المشكلة فيما يلي:

1- عند فصل أى Power Transformer فإنه يتبقى داخل القلب الحديدي جزء من الفيض ، يسمى الفيض المتبقى  $\phi_R$  Residual Flux.

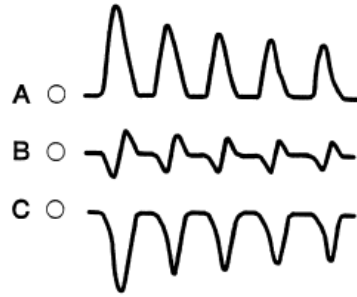
2- عند رجوع المحول للخدمة ، وحيث أنه يستحيل التحكم في لحظة رجوعه لتكون هي نفسها اللحظة التي خرج عندها ، وبالتالي فالفيض المفترض أن يبدأ بالظهور مع رجوع التيار يحتاج في بعض الأحيان أن يكون عالياً لتعويض القيمة الناشئة عن الفيض المتبقى ، وهذا يستلزم سحب تيار عالى هو Inrush Current لتوليد هذا الفيض التعويضي ، كما في الحالة الأولى في الشكل 8-11 . فالمحول في هذه الحالة رجع في لحظة تكافئ فيضا مقداره  $-\phi_{max}$  بينما الفيض المتبقى يكافئ قيمة موجبة قدرها  $\phi_R$  ، ولتعويض هذا الاختلاف يتم سحب Inrush Current بقيمة عالية.



شكل 8-11 تفسير سبب تيار الاندفاع

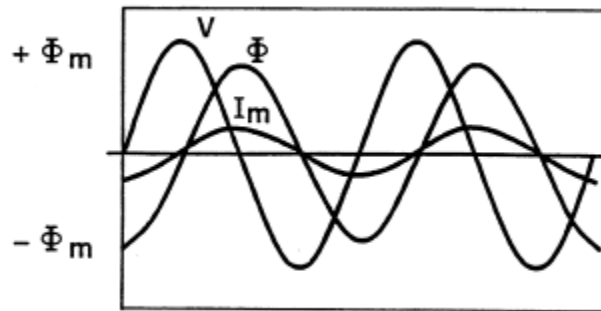
وكما يبدو من الشرح فإن تيار الاندفاع ليس له قيمة محددة ، فقد يكون عاليا جدا كما في الحالة الأولى من الشكل 8-11 ، غير أنه في بعض الأحيان يكون قريب جداً من التيار العادي ، إذا تحقق شرطان :

1. ألا يكون هناك فيض متبقى داخل المحول .
  2. إذا تصادفت لحظة الدخول مع لحظة التيار العظمى  $I_{max}$  والتي يكون فيها الفيض أقل ما يمكن .
- حيث من المعلوم أن الفيض دائماً متأخر بزاوية  $90^\circ$  عن التيار  $(e \propto \frac{d\phi}{dt})$ .
- وبين هاتين الحالتين توجد العديد من الحالات التي تجعل ، كما قلنا ، قيمة تيار الاندفاع غير محددة لا شكلاً ولا قيمة ، لأنه يعتمد أساساً - كما ذكرنا - على قيمة متغيرين عشوائيين : الأول هو قيمة الفيض المتبقى ، والثاني هو لحظة دخول المحول في الخدمة ، ولذا يختلف قيمة هذا التيار حتى بين الأوجه الثلاثة كما في الشكل 9-11 .



شكل 9-11 شكل تيار الاندفاع في الأوجه الثلاثة

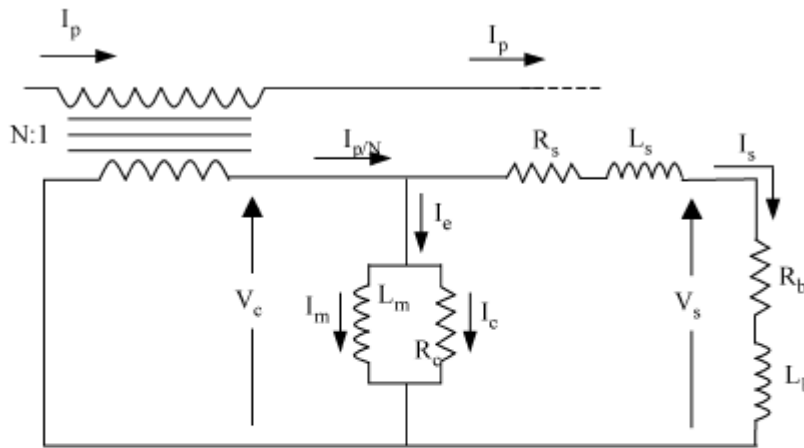
لاحظ أنه لو أمكن التحكم في لحظة الغلق لتكون عند القيمة العظمى للجهد ، وفي نفس الوقت إذا لم يكن هناك فيض متبقى في القلب الحديدي فإن تيارات الاندفاع ستختفي وتصبح قيمتها هي نفس قيمة الـ Magnetization Currents في فترة الـ Steady State كما في الشكل 10-11 .



شكل 10-11 تقليل تيار الاندفاع

## 11-5-2 خطورة هذا التيار

هذا التيار يظهر فقط عند بداية التشغيل ، وقد تصل قيمته إلى خمس أو ستة أمثال التيار الطبيعي ، بل قد تصل إلى عشرين مثل التيار الطبيعي حسب سعة المحول ، لكن هذا ليس أساس المشكلة خاصة أن تيار الاندفاع لا يستغرق سوى ثانية أو أكثر قليلا ، كما أن قيمته تتناقص سريعا خلال هذه المدة الوجيزة ، ولكن المشكلة الكبرى أن هذا التيار لا يمر إلا في الجانب الابتدائي للمحول فقط ، وهو الجانب الموصل على المصدر ، ولا يمر في الجانب الثانوي ، لأنه يمر خلال ما يسمى بالدائرة المغناطيسية بالمحولات Magnetizing Circuit، وهي تظهر في الشكل 11-11.



$I_p$ = Primary current	$N$ = CT turns ratio
$I_p/N$ = Ideal secondary current	$R_c$ = Core loss resistance
$I_s$ = Secondary current	$R_s$ = Secondary resistance
$I_e$ = Exciting current	$R_b$ = Burden resistance
$I_c$ = Core eddy loss current	$L_s$ = Secondary Inductance
$I_m$ = Magnetizing current	$L_b$ = Burden Inductance
$L_m$ = Magnetizing inductance, $L_m = \lambda_m / I_m$	
$\lambda_m$ = Magnetizing flux	

شكل 11-11 الدائرة المكافئة للمحول

وبالتالي فإن أى جهاز Differential Relay سيرى أن هناك تيار داخل إلى المحول يختلف بقيمة كبيرة عن التيار الخارج منه ، وهذا سيسبب فصل خاطئ للمحول بواسطة Differential Relay ، وهو فصل خاطئ لأنه لم يفصل بسبب وجود عطل ما ، وإنما بسبب هذه الظاهرة الطبيعية الموجودة في كل المحولات ، والتي ستختفي عادة بعد فترة وجيزة. ومن هنا لابد من التفكير في طريقة لمنع تشغيل جهاز الوقاية خلال هذه الفترة العابرة.

## 11-5-3 طرق تجنب الفصل الخاطئ بسبب تيار الاندفاع

هناك عدة طرق لمنع اشتغال أجهزة الوقاية خلال فترة تيار الاندفاع :



منها ما هو بسيط حيث يقوم أحياناً بعض مهندسى التشغيل بتعطيل الوقاية لمدة ثوانى ، حتى يدخل المحول فى الخدمة وينتهى تيار الاندفاع ، ثم يعيدها مرة أخرى. وهذا الحل على بساطته فيه خطورة كبيرة لأنه قد يتصادف حدوث عطل حقيقى أثناء بدء دخول المحول للخدمة ويتسبب هذا فى تدمير المحول لأن الوقاية معطلة ولذا نستبعد هذا الحل تماماً.

وأحياناً يتم ذلك بطريقة أقل خطورة وذلك بتقليل حساسية جهاز الوقاية لفترة زمنية عقب دخول المحول الخدمة .

ومن الطرق المشهورة لحل هذه المشاكل طريقة استخدام التوافقية الثانية  $2^{nd}$  Harmonic فى منع اشتغال جهاز الوقاية. وسبب اختيار  $2^{nd}$  Harmonic هو أنه من تحليل إشارات تيارات الاندفاع وجد أنها غنية إلى حد كبير بهذه الدرجة من التوافقيات ، حيث يمكن أن تصل نسبتها من % 40 : 50 من قيمة التيار ، بينما قيمة هذه التوافقية فى حالة الأعطال الحقيقية لا تتعدى 7% .

وعلى هذا فقد تم عمل مرشح (Filter) لاستخلاص قيمة  $2^{nd}$  Harmonic من تيار الاندفاع ، ثم بعد ذلك - وبناء على قيمة هذه التوافقية - يمكن إرسال إشارة منع اشتغال Blocking Signal لجهاز الوقاية إذا تعدت قيمة  $2^{nd}$  Harmonic مثلاً من 10% : 20% ، لأن ذلك يعنى بالضرورة أن هذا التيار المرتفع هو تيار اندفاع ، و ليس نتيجة عطل.

أما إذا كانت القيمة صغيرة فعندها لن يتم إرسال إشارة المنع هذه ، ويترك لجهاز الوقاية الحرية فى العمل. ومثل هذا الأسلوب يتم استخدامه فى أجهزة الوقاية التقليدية ، وحتى فى أجهزة الوقاية الرقمية الحديثة ، التى تتميز فقط فى هذه النقطة بسهولة تنفيذ هذه الأفكار دون تعقيدات .

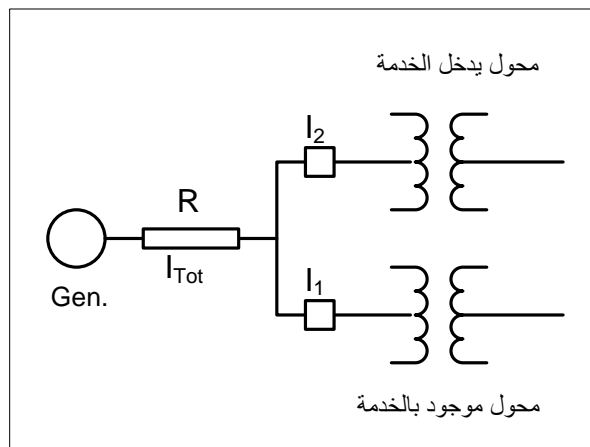
#### 11-5-4 تيار الاندفاع فى المحولات الموصلة على التوازي Sympasatic Inrush

من المعروف أنه لا يمكن توصيل محولين على التوازي ما لم يكونا متماثلين . و توصيل محولين على التوازي أمر شائع فى الشبكات ، لكن هناك مشكلة تتعلق بـ Inrush Currents تظهر عند توصيل محولين على التوازي.

لنفترض الآن أن أحد المحولين فى الخدمة ، والآخر نريد إدخاله كما فى الشكل 11-13 ، فعند دخول الثانى للخدمة فإنه سيسحب Inrush Current وهذا غير مستبعد. أما الغريب فى الأمر ، فهو أن المحول الأول الذى كان أصلاً فى الخدمة سوف يمر به هو الآخر Inrush Current. مع ملاحظة أن تيار الاندفاع فى المحول الموجود فى الخدمة تكون قيمته أقل من ذلك الداخلى حديثاً ، لكن المشكلة أن كلا التيارين يظلان موجودان لمدة أطول من تلك التى يقضيها تيار الاندفاع فى المحولات الموصلة منفردة ، وسنفسر هنا هذه الظواهر تباعاً.

ويمكن فهم تفسير هذا التيار بصورة مبسطة حيث أن تيار الـ Inrush للمحول الداخل للخدمة يجد أمامه مسارين متوازيين بعد مروره على المقاومة  $R$  في الشكل 11-13 ، فيتوزع بالنسبة العكسية للمقاومات ، وبالتالي يظهر مع المحول الموجود أساساً بالخدمة .

ويسمى تيار الاندفاع في هذه الحالة Sympasatic Inrush ، وهذه الكلمة تعني أنه تيار عارض . وهذا التيار لن يسبب أى خطأ في تشغيل Differential Relay للمحولات إلا إذا كان هناك Relay واحد للمحولين معا ، و من ثم فأحسن الطرق لاكتشاف وتجنب هذه النوعية من تيار الاندفاع في المحولات الموصلة على التوازي هي استخدام نظم وقاية منفصلة لكل محول على حده. أما في حالة استخدام نظام وقاية واحد للمحولين معا فالأمر سيستلزم دوائر أكثر تعقيداً لاكتشاف وتجنب المشكلة.



شكل 11-13 تيار الاندفاع في المحولات الموصلة على التوازي

## 6-11 الموضوع السادس : الضوضاء ( NOISE ) في المحولات

الأصوات المنبعثة من المحولات شيء مألوف لكل من يمر بجوار المحولات ، وهي بالطبع قد تكون في مستوى مقبول وقد تصل إلى مستويات مرتفعة من الصوت . وللعمل على خفض هذه الأصوات ينبغي أولاً أن نفهم مصادر هذه الضوضاء .

فمن هذه المصادر اهتزاز الـ Core ، واهتزاز الملفات . وهذه الاهتزازات تنتقل إلى الـ Tank من خلال الزيت ، ولأسف فإن الزيت لا يخفف هذه الاهتزازات ( أي لا يعمل لها damping ) لأنه نسبياً غير قابل للضغط .

### 1-6-11 الضوضاء بسبب اهتزاز الـ Core :

وهو المصدر الرئيسي للضوضاء من خلال ظاهرة تسمى Magnetosriction فعندما تتمغنط شريحة من الصلب فإنها تتكمش / تتمدد بنسبة صغيرة جداً تصل إلى حوالي 10 ميكرو لكل متر ، وهذا التغير

في الأبعاد يحدث 100 مرة في الثانية (50Hz) ، ومن ثم فهذا التمدد والانكماش هو الذي يتسبب في الصوت الذي يشبه Puzzing أو الزن . مع ملاحظة أن هذه الضوضاء تقل جداً إذا كان ال Flux في القلب أقل من 1.4 T وذلك في حالة الأحمال الخفيفة وهذا يفسر انخفاض الضوضاء مع قلة الأحمال وزيادتها مع زيادة الأحمال .

### 11-6-2 الضوضاء نتيجة الملفات :

بالإضافة للظاهرة السابقة فإن الملفات تتأثر بالمجال المغناطيسي المتردد الذي يؤثر عليها بقوة متغيرة Fluctuating force بين ملفات الابتدائي وملفات الثانوي وهذه القوى تحدث اهتزازات في الملفات بنفس المعدل 100 مرة في الثانية . وهذه الضوضاء يمكن تقليلها باستخدام مواد Pressboard لها high damping co-efficient أى لها القدرة على امتصاص الاهتزازات .

### 11-6-3 الضوضاء نتيجة أجهزة التبريد :

أحد أهم مصادر الضوضاء هي صوت مراوح التبريد نتيجة مرور الهواء على ريش هذه المراوح ، وبالطبع تزيد الضوضاء بزيادة كمية الهواء وسرعة المروحة أيضاً ، وهناك أيضاً ضوضاء نتيجة عمل مضخات الزيت . بالطبع لخفض هذه الضوضاء يمكن تخفيض سرعة المراوح لكن هذا يستلزم زيادة عدد المراوح .

### 11-6-4 المستويات المقبولة للضوضاء :

عموماً لن يستطيع أحد خفض الضوضاء الصادرة من المحولات ، خاصة تلك الموجودة في المناطق السكنية إلى مستويات غير مسموعة ، فهذا مكلف جداً ، لكن يمكن أن نعتبر أن الضوضاء إذا لم تصل إلى غرف النوم القريبة من المحول ليلاً في المناطق السكنية فإن ذلك يعتبر مقبولاً .

ولجعل هذا المقياس أكثر دقة فإن القياسات تكون على بعد أكثر من 15 متراً للمحولات ذات قدرة 200 ميجا ، و 25 متر للمحول الـ 500 ميجا ، أما المسافات الأقل من ذلك فالضوضاء يقبل أن تكون نسبياً مرتفعة ولا يقبل أن ترتفع في المسافات الأبعد من ذلك .

أما المحولات ذات القدرة الأكبر فمن الصعب جعل المسافة تصل لـ 100 متر مثلاً حتى ينخفض صوت الضوضاء ، وفي هذه الحالة يجب استخدام مخفضات للصوت أو عمل حوائط عازلة حول المحولات .

مع ملاحظة أن الضوضاء يمكن أن تنتقل أيضاً من خلال الأرضيات والتي يمكن في بعض الأحيان أن تكبر هذه الضوضاء ولذا نستخدم أحياناً أرضيات ماصة للصوت مثل المطاط بسمك لا يقل عن 4 سم وعرض 8 سم وبالطبع يمكن وضع المحول في غرف مغلقة ذات حوائط وأرضيات عازلة للصوت لمنع انتقال الضوضاء نهائياً خارج حدود المحول. والجدول 11-2 يحدد مستويات الضوضاء المسموح بها في محولات التوزيع طبقاً للمواصفات الأمريكية :

جدول 11-2 : مستويات الضوضاء المسموح بها في محولات التوزيع طبقاً للمواصفات الأمريكية

مستوى الضوضاء dB				مقنن المحول K.V.A
محول معلق	محول جاف تبريد قشري	محول جاف	محول مغمور في الزيت	
57	67	58	55	300 – 151
59	67	60	56	500 – 301
61	67	62	57	700 – 501
63	67	64	58	1000 – 701
64	67	65	60	1500 – 1001
65	69	66	61	2000 – 1501
66	71	68	62	3000 – 2001

والجدول 11-3 يحدد القيم الضوضاء الناتجة عن المحولات المصنوعة في مصر (شركة الماكو)

جدول 3-11 : القيم الضوضاء في المحولات المصنوعة في مصر (شركة الماكو)

**ELMACO**  
Power Transformers - Distribution Transformers - Fuses.

**NOISE LEVEL**  
ELMACO transformers are friends to the environmental conditions. For this reason the noise created by ELMACO transformers in service are within the minimum level according to DIN 42540.

THE NOISE LEVELS MEASURED AT 1 M FOR TRANSFORMERS UP TO 1600 KVA

RATED POWER (K.V.A)	NOISE LEVEL (dB)
25 up to 50	45
63 up to 100	46
125 up to 160	47
200 up to 250	48
315 up to 400	50
500 up to 630	52
800 up to 1000	54
1250 up to 1600	56

THE NOISE LEVELS AT 1 M FOR TRANSFORMERS UP TO 5000 KVA

RATED POWER (K.V.A)	NOISE LEVEL (dB)
2000	52
2500	53
3150	55
4000	56
5000	57

**INSULATION LEVELS :**  
The following table indicates the testing voltage for different system voltages of transformers according to IEC - 76

SYSTEM HIGHEST VOLTAGE (K.V.) r.m.s.	POWER FREQUENCY TEST (K.V.) r.m.s.	IMPULSE TEST VOLTAGE (K.V.) PEAK
1.1	3	8
3.6	16	45
7.2	22	60
12	28	75
24	50	125
36	70	170

300 KVA, 22/0.4 KV TRANSFORMER

Power Transformers - Distribution Transformers - Fuses. EL NASR TRANSFORMERS A

24

## 7-11 الموضوع السابع : تأثير اختلاف قيمة التردد

هناك بعض الأسئلة المتعلقة بموضوع تشغيل المحولات لابد أن تكون إجاباتها واضحة :

### 1-7-11 هل يمكن لمحول يعمل على 60Hz أن يركب في شبكة 50Hz ؟

من معادلة الـ Emf التي تنشأ في المحول نجد أنها تتناسب طرديا مع التردد وقيمة كثافة الفيض المار بالقلب الحديدي.

$$E_{rms} = \frac{2\pi f N a B_{peak}}{\sqrt{2}} \approx 4.44 f N a B$$

كذلك فإن الـ Loss في Core تزيد مع زيادة كثافة الفيض ، فلو كان المحول مصمما للعمل على 60 Hz ثم نقل للعمل في شبكة 50 Hz فإن  $f$  في المعادلة السابقة ستخفض ، ولضمان ألا تقل  $E$  فإن  $B$  سوف ترتفع ، وهذا يؤدي لحدوث saturation في القلب ، كما سيؤدي لارتفاع قيمة المفقودات في الـ Core ، وكذلك في eddy loss ، وكل هذا سيؤدي لارتفاع درجة الحرارة. وبناء عليه لا يصح هذا الاختيار.

### 2-7-11 هل يمكن لمحول في شبكة 50Hz أن ينقل لشبكة 60Hz ؟

في الواقع أنه كلما ارتفع التردد كلما قل حجم المحول ، لأننا على عكس السؤال السابق سنحتاج لقيمة أقل للـ  $B$  ، ومن ثم عدد لفات أقل ، لكن يجب وضع جهاز وقاية من النوع Volt per Hertz لضمان حماية المحول من حدوث over voltage ، لأن رفع التردد إلى قيمة عالية يجعله نظريا يتحمل (V/F) أكبر وهذا قد لا يكون مناسباً للعزل المستخدم في المحول.

## 8-11 الموضوع الثامن : تأثير اختلاف الجهد

### 1-8-11 هل يمكن للمحول أن يعمل مع جهد DC متزايد؟

هذا بالطبع مستحيل علميا حتى لو كان نظريا ممكن ، فنظريا لو كان الفيض يتزايد خطيا فإننا يمكن أن نحصل على معدل لتغير الفيض ومن ثم نحصل على جهد في الثانوى ، لكن كون هذا التزايد موجب فقط (DC) سيجعل قلب المحول يدخل سريعا في مرحلة التشبع saturation ومن ثم يزيد current magnetizing المسحوب بغرض انتاج الفيض ، ويحدث over heating ، ولذا فجميع المحولات تعمل على جهد AC ، إما إذا كان لابد من العمل على جهد DC فإن الـ Voltage Signal لابد أن تكون على الشكل Pulses.

### 11-8-2 هل يمكن استخدام المحول نفسه كمحول رافع أو محول خافض ؟

أغلب محولات التوزيع يمكن استخدامها في كلا الإتجاهين ، بمعنى أنه يمكن أن يوصل المصدر على الـ HV والحمل مركب في LV ، أو العكس لنفس المحول دون حدوث تخفيض في القدرة ، لكن اذا كان المحول أصلا  $\Delta/Y$  حيث الـ  $\Delta$  موصلة للمصدر ، ثم تم عكس الأطراف فصار المحول  $Y/\Delta$  ، فعندئذ يجب الانتباه إلى أن نقطة الـ N لا بد أن تكون معزولة كما أنه عند توصيل الـ Y ناحية المصدر فإن الـ inrush current عند بدء التشغيل سيكون أعلى ، وهذا يستلزم زيادة قيمة الفيوزات المركبة على خط الدخول.

### 11-8-3 لماذا يوصل الـ HV side أولا ويفصل ثانيا؟

الأصل دائما في الفصل أن تفصل الجانب الثانوى (جهد الحمل) أولا ، والعكس عند التوصيل حيث يجب أن يوصل المفتاح جهة المصدر أولا. أما السبب في منع فتح مفتاح الابتدائي أولا فلأن ذلك سيزيد من احتمال حدوث مشكلتين:

- المشكلة الأولى أن فتح المفتاح جهة المصدر أولا سيجعل احتمالية حدوث over Voltage جهة الحمل الذى لا يزال متصلا عالية ، ولذا فأغلب الأحمال المهمة التي توصل مباشرة على المحول ينص صراحة في كتالوجها على ضرورة فصل مفتاح الثانوى أولا خوفا من تأثرها بالارتفاع في الجهد (Voltage spikes due to Inductive Kicks).
- المشكلة الثانية هي ان احتمالية حدوث Breaker faulure للمفتاح جهة المصدر أثناء الفتح في هذه الحالة ستكون كبيرة ، على عكس لو كان الثانوى مفتوحا أولا . ومفتاح الجهد العالى لا يفصل أولا إلا في حالة حدوث عطل داخلى وعندها سيتدخل الـ Interlock ويفصل الثانوى أيضا.

والعكس صحيح عند توصيل المحول يجب توصيل جهة المصدر أولا لأنه في حالة توصيل الثانوى أولا (وهذا خطأ) ثم المصدر سيجعل تيار الاندفاع Inrush أعلى بكثير من لو وصلت المصدر أولا والثانوى لا يزال مفتوحا

والخلاصة - على حد علمي - أن أى محول يجب عند الدخول توصيل جهة المصدر أولا ثم جهة الحمل ، والعكس عند الفصل ، فيجب فصل الثانوى أولا ثم المصدر. ما لم يكن لمهندسي التشغيل رأى آخر لا أعلمه.



## الفصل الثاني عشر

# تشغيل الأنواع الخاصة من المحولات

كان التركيز في هذا الكتاب كله منصبا على محولات القوى الكهربائية ومنها محولات التوزيع ، لكن الشبكة الكهربائية تحتوى على أنواع أخرى من المحولات تختلف تماما في خصائصها عن محولات القوى ولذا يجب أن تدرس بالتفصيل في مراجعها ، وقد أردت فقط من هذا الفصل إعطاء فكرة سريعة عن خمسة من هذه الأنواع لكامل الصورة وليس للتفصيل.

## 1-12 محولات الـ PHASE SHIFTING

جميع الشبكات الكهربائية في دول العالم هي من النوع المتصل ببعضه Inter-connected Grid ، وذلك بغرض زيادة إعتماذية الشبكة بالدولة الواحدة ، وفي هذا النوع من الشبكات يتم ربط جميع محطات التوليد معا وكذلك المحطات الفرعية بطرق مختلفة للربط.

وفي بعض الأحيان يتم ربط محطتين معا بواسطة خطين على التوازي Two Parallel Lines ويجب في هذه الحالة أن يكون الخطين متماثلين تماما في كل شيء سواء الطول أو قيم الـ Impedance حتى يتم توزيع التيار بينهما بالتساوى ، فإذا حدث اختلاف بين الخطين فإن القدرة المنقولة خلالهما تتوزع بالنسبة العكسية للـ Impedance ، فالخط الذى له Z صغيرة سيمر به قدرة أكبر والعكس صحيح ، وهذا بالطبع غير مرغوب فيه لأنه يمكن أن يتسبب في حدوث Overloading على أحد الخطوط وبالتالي نفقد ميزة النقل على خطين متوازيين.

وفي أحيان أخرى يتم الربط بين دولتين لهما خصائص كهربية مختلفة لشبكتيهما ، وفي نفس الوقت نحتاج للتحكم في القدرة المنقولة بينهما سواء في قيمتها أو في اتجاهها ، وجميع هذه الظروف تجعلنا نحتاج إلى عنصر جديد لحل هذه المشاكل وهذا العنصر هو الـ Phase Shifting Transformer, PST



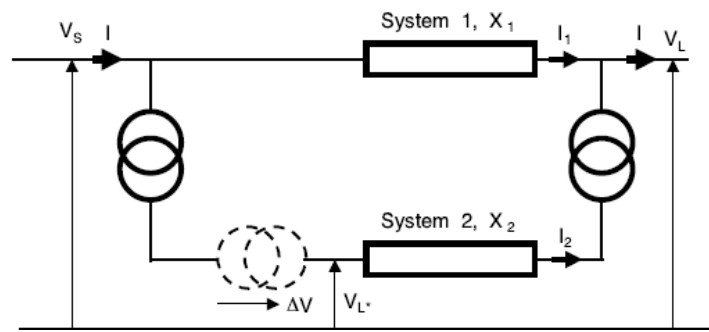


الفكرة الأساسية لهذه المحولات مبنية على أساس معادلة نقل القدرة بين نقطتين :

$$P = \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta$$

حيث  $\delta$  هي الـ Phase angle بين جهد الإرسال  $V_S$  وجهد الاستقبال  $V_R$  وحيث  $X$  هي الـ Reactance الخاصة بخط النقل الرابط بين النقطتين كما في الشكل 1-12.

ومن هذه المعادلة يتبين أننا يمكننا التحكم في القدرة المنقولة عن طريق تغيير الزاوية أو الجهد أو كلاهما ، والجهاز الوحيد الذى يمكنه عمل هذين التغيرين معا فى وقت واحد هو PST حيث يمكنه تغيير الـ Turns Ratio له بنسب صغيرة تكفى لعمل فرق بين جهد النقطتين بالزيادة أو بالنقصان ومن ثم يتغير اتجاه سريان القدرة ، كما يمكنه تغيير الـ Phase أيضا.

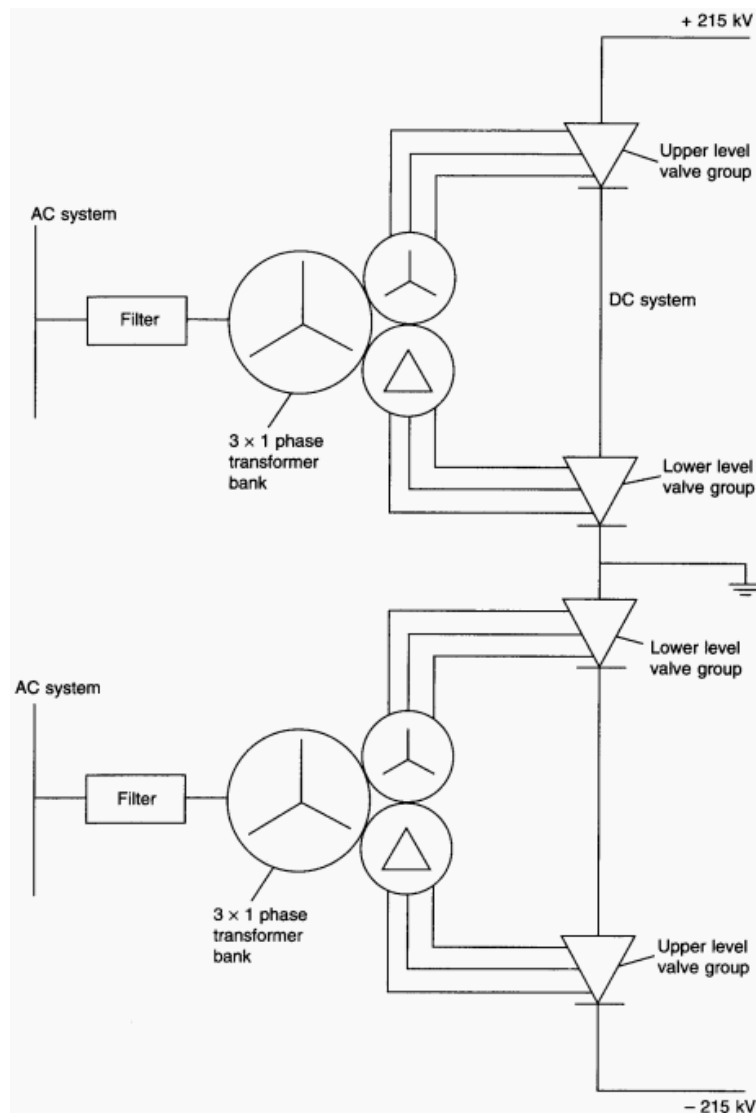


شكل 1-12 نقل القدرة

## 2-12 محولات التحويل CONVERTER TRANSFORMERS

عند نقل القدرة عبر خطوط الـ DC عالية الجهد والمعروفة بالـ HVDC فإننا نحتاج أولاً لتحويل القدرة من AC إلى DC باستخدام Inverters ثم نقلها عبر خطوط HVDC ، وفى نهاية الخط سنحتاج

لتحويل القدرة مرة أخرى إلى AC كما في الشكل 12-2. وواضح من الشكل أننا نحتاج لمحولات من نوع خاص في بداية ونهاية الخط حيث أحد جهتي المحول بها ما يعرف بـ Mixed AC/DC وتحتاج لتصميم خاص لاسيما لعلاج مشكلة الـ Harmonics العالية في هذه المنظومات.

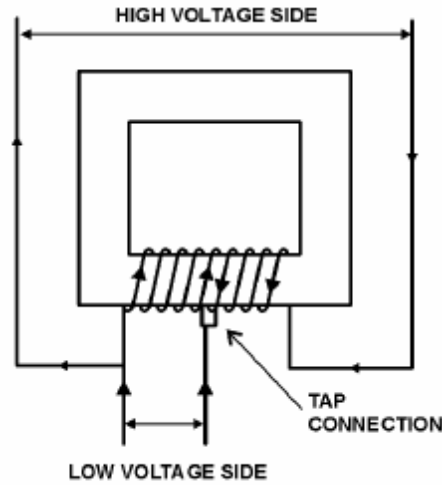


شكل 12-2

## 3-12 محولات الـ AUTO TRANSFORMERS

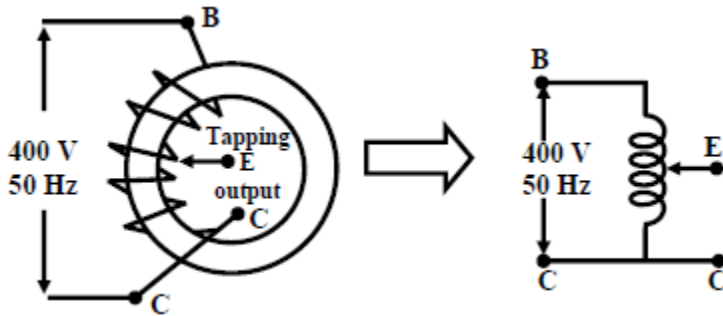
المحول الذي درسناه في الكتاب حتى الآن هو المعروف بالـ Two winding وفيه يكون ملف الابتدائي منفصلا كهربيا تماما عن ملف الثانوي ، لكنه متصل به مغناطيسيا من خلال الفيض الذي يمر في القلب

الحديدي ويقطع الملفين. أما محول الـ Auto فيختلف تماما في تركيبه ، إذ أنه مكون من ملف واحد وليس اثنين كما في الشكل 3-12.



شكل 3-12 محول الـ Auto

والفكرة العامة لهذا النوع من المحولات يمكن فهمها من خلال الرسم المبسط في الشكل 4-12 .



شكل 4-12 دائرة مبسطة لمحول الـ Auto

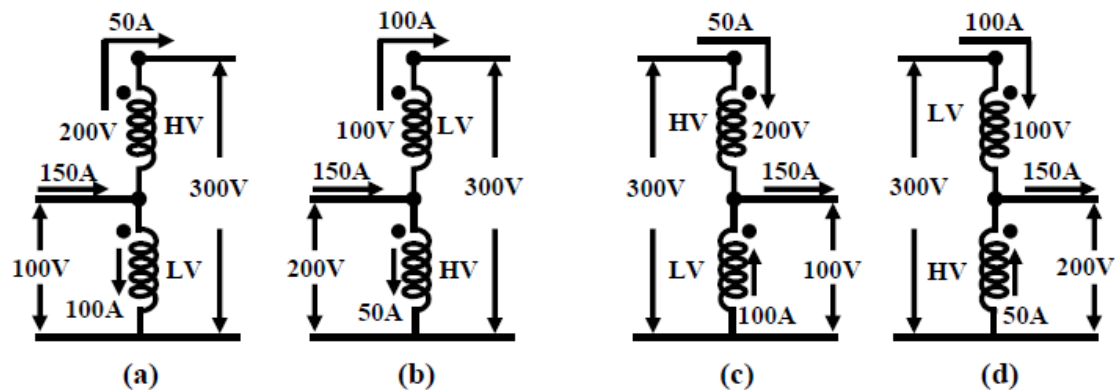
فلو فرضنا أن لدينا ملف BC عدد لفاته 200 لفة ، ملفوف حول قلب حديدي ، وعليه جهد قدره 400V ، كما في الشكل 4-12. من هذا الشكل نستطيع أن نقول أن لدينا جهد قدره 2V لكل لفة. فلو أخذنا Tap من أى نقطة E فإن جهد نقطة E سيتناسب مع عدد اللفات ، فلو E في المنتصف مثلا سيكون جهدا 200V .

### 1-3-12 الحصول على محول Auto Tr من محول Two-winding Tr

بفرض أن لدينا محول عادى له جهده 200/100 V ، وقدرته 10 kVA ، فهذا يعنى أن التيار الـ Rated في جهة الجهد العالى سيكون 50A بينما التيار المقنن في جهة الجهد المنخفض سيكون 100A

. الآن لنفرض أننا قمنا بتوصيل الملفين معا (كهربيا) ليصبحا ملفا واحدا كما في الشكل 5-12 أى أننا حولنا المحول العادى إلى Auto فما هو الجديد الذى سنحصل عليه؟

واضح من الشكل 5-12 أننا يمكن أن نوصل الملفين بأكثر من طريقة حسب الـ Polarity marks (dot) لنحصل على نسب تحويل مختلفة.



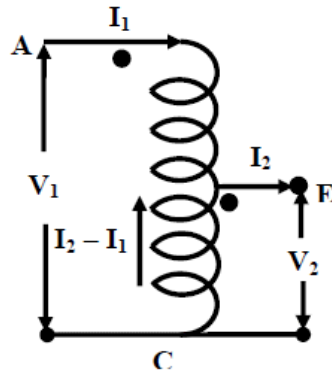
شكل 5-12

فى الشكل ( b ) على سبيل المثال كانت توصيل الـ Polarity بحيث تكون Additive ، وهذا أمكننا من الحصول على جهد فى الثانوى قدره 300V عندما كان جهد الدخول 200V. لكن ليس هذا هو المهم !! . فالواقع أن هناك مفاجأة سعيدة تخص القدرة . فبالطبع فى أى توصيلة جديدة يجب ألا تتجاوز قيمة التيار الجديد قيمة أصغر تيار مقنن للجهة التى يمر فيها ، ومن ثم ففى حالة الشكل ( b ) وحيث أن الحمل متصل على التوالى بملف الجهد المنخفض الذى تياره المقنن هو 100A كما ذكرنا ، ومن ثم لن نسمح بتجاوز هذه القيمة. وبتطبيق قانون KCL وجمع التيارات سنجد أن التيار المسحوب من المصدر فى الكابل الخارجى - وليس فى أى من الملفين - قد أصبح 150A . وواضح الآن أن القدرة المنقولة أصبحت 30kVA ( حاصل ضرب جهد الدخول فى تيار الدخول) رغم أنها كانت تساوى فقط 10kVA فى المحول الأصلى الموصّل بالطريقة التقليدية.

وتفسير السبب فى هذه الزيادة ليس صعبا لأنه فى الواقع أن محولات الـ Auto Tr تنقل القدرة بطريقتين : الأولى Inductively ، أى بواسطة الـ Transformation كما فى المحولات العادية ، والثانية Conductively أى بالتوصيل المباشر ، وفى حالتنا ( الوضع b ) القدرة المنقولة بالطريقة الأولى تساوى 10 kVA بينما الـ 20 kVA الإضافية نقلت بالطريقة الثانية.

لاحظ فى الـ Auto Transformer أن جزءا من الملف الابتدائي يعمل مشتركا بين ملف الجهد العالى ( الابتدائي) والجهد المنخفض (الثانوى) . ولاحظ أيضا أن كل من تيار الابتدائي والثانوي يكونان متضادين فى الجزء المشترك بينهما كما فى الشكل 6-12 ، مما يترتب على ذلك انخفاض قيمة التيار فى هذا الجزء ومن ثم انخفاض الفقد فى الطاقة به (وهذا يعنى كفاءة أعلى) ، كما ينتج عن انخفاض قيمة

التيار إنخفاض أيضا في مساحة مقطع هذا الجزء المشترك مما يساعد على وفر النحاس وتقليل وزن المحول ، وهذه هي الميزة الأساسية التي تجعله مفضلا في استخدامه على استخدام المحولات العادية حين نحتاج لنسب تحويل منخفضة . وبالطبع يمكن تصميم محول تقليدي ذو ملفين بحيث تكون الـ Turns Ratio الخاصة به هي 3 إلى 1 ، أو 2 إلى 1 ، ولكن مثل هذا المحول سيكون أضخم وأثقل من مثيله من نوع الـ Auto.



شكل 6-12

وأحد مميزات محولات الـ Auto أن أبعاده الهندسية تتناسب مع جزء القدرة المنقولة بالـ Transformation فقط ، ومن ثم لو قارنت بين محول عادى (له نفس القدرة) وبينه ستجد دائما أن محول الـ Auto أصغر وأخف كثيرا.

### 12-3-2 العلاقات بين التيارات

في الشكل 6-12 السابق يعتبر الجزء AC هو الملف الابتدائي وسنعتبر عدد لفاته  $N_1$ ، ويعتبر الجزء EC هو الملف الثانوي وعدد لفاته  $N_2$  . ولدراسة العلاقة بين تيارى الابتدائى  $I_1$  والثانوى  $I_2$  يجب أن نعتبر أن المحول إذا تم تحميله فيجب أن يبقى الفيض المتبادل متساويا دون تغيير ، بمعنى آخر أن الـ Ampere-turn لكلا الملفين يجب أن تتساوى . وبتطبيق هذه المعلومة ، ومن توزيعات التيار على الرسم (وبإهمال قيمة  $I_0$ ) يتبين اللآتى:

$$(N_1 - N_2)I_1 = N_2(I_2 - I_1)$$

ومنها نجد أن

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

ومنها نصل إلى أن :

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = a I_2$$

**Example 32.94.** An 11500/2300 V transformer is rated at 100 kVA as a 2 winding transformer. If the two windings are connected in series to form an auto-transformer, what will be the possible voltage ratios ?  
(Manonmaniam Sundaranar Univ. April 1998)

**Solution.** Fig. 32.66 (a) shows this 2-winding transformer with rated winding currents marked.

Rated current of 11.5 kV winding =  $100 \times 100 / 11500 = 8.7$  Amp

Rated current of 2300 V winding = 43.5 Amp

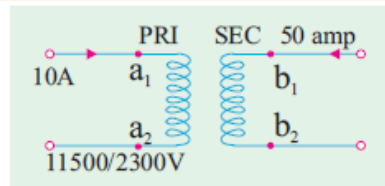


Fig. 32.66 (b) and Fig. 32.66 (c) show autotransformer connections. Fig. 32.66 (a). 2 winding transformer

connections. On H.V. side, they have a rating of 13.8 kV. On L.V. side, with connection as in Fig. 32.66 (b), the rating is 2300 V. On L.V. side of Fig. 32.66 (c), the output is at 11.5 kV.

Thus, possible voltage ratios are : 13800/2300 V and 13800/11500 V.

With both the connections, step-up or step-down versions are possible.

**Extension of Question :** Calculate kVA ratings in the two cases.

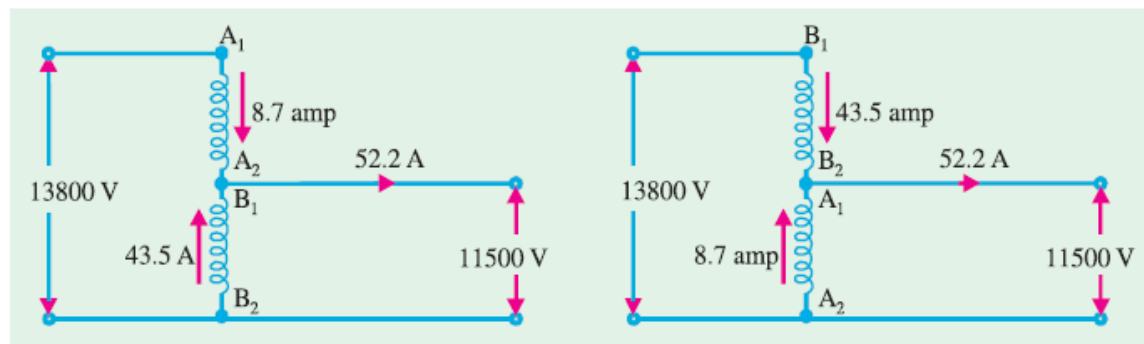


Fig. 32.66

Windings will carry the rated currents, while working out kVA outputs.

In Fig. 32.66 (b), Input current (into terminal  $A_1$  of windings  $A_1-A_2$ ) can be 8.7 Amp with H.V.-side-voltage ratings as 13.8 kV. Transformation ratio =  $13800/2300 = 6$

Hence, kVA rating =  $13.8 \times 8.7 = 120$

Output current =  $120 \times 1000 / 2300 = 52.2$  Amp

Current in the winding  $B_1-B_2$

= Difference of Output current and Input current

=  $52.2 - 8.7 = 43.5$  A, which is the rated current of the winding  $B_1-B_2$ .

In Fig. 32.66 (c). Similarly, transformation ratio =  $13800/11500 = 1.2$

kVA rating =  $13800 \times 8.7 \times 10^{-3} = 120$

Output current =  $120 \times 1000 / 11500 = 10.4$  Amp

Current carried by common winding =  $52.2 - 43.5 = 8.7$  A, which is rated current for the winding  $A_1-A_2$ . Thus, with the same two windings give, a transformation ratio closer to unity gives higher kVA rating as an auto transformer.

Thus, a 100 kVA two winding transformer is reconnected as an autotransformer of 120 kVA with transformation ratio as 6, and becomes a 600 kVA autotransformer with transformation ratio as 1.2.

## 12-3-3 الوفر في النحاس

لمقارنة كمية النحاس المستخدمة في كلا النوعين من المحولات فإننا نفترض أن كمية النحاس ستتناسب مع طول الملف ومع شدة التيار ، أى أنها تتناسب مع حاصل ضرب  $N \cdot I$  . وعلى هذا يمكن الوصول لنسبة النحاس في النوعين من المعادلات التالية:

$$\frac{\text{Amount of copper required in an autotransformer}}{\text{Amount of copper required in a two winding transformer}} = \frac{(N_1 - N_2)I_1 + N_2(I_2 - I_1)}{N_1I_1 + N_2I_2}$$

$$\text{Noting that } N_1I_1 = N_2I_2 = \frac{2N_1I_1 - 2N_2I_1}{2N_1I_1}$$

$$= \frac{N_1 - N_2}{N_1}$$

لو استخدمنا  $a = N_2/N_1$  فنصل إلى أن النسبة بينهما تساوى

$$\frac{\text{Copper in Auto Tr}}{\text{Copper in Traditional Tr}} = 1 - a$$

وعلى هذا كلما كانت نسبة التحويل في محولات الـ Auto صغيرة كلما كانت الفائدة أعظم لأن الوفر في النحاس والوزن سيكون أكبر ، فلو كانت نسبة التحويل مثلا تساوى 500:400 فهذا يعنى أننا نحتاج إلى 20% فقط من كمية النحاس المستخدمة في مثيله العادى ، أما إذا كانت مثلا نسبة التحويل تساوى 500:100 فستجد أنه لا فرق بين النوعين تقريبا ، وهذا هو السبب فى أن محولات الـ Auto لا تجد نسبة التحويل فيها تتجاوز 3:1.

## مثال 12-1

إذا كان جهد الابتدائى هو 500 فولت وجهد الثانوى 400 فولت و تيار الحمل 100A احسب قيم التيارات فى الابتدائى والثانوى والوفرى فى النحاس.

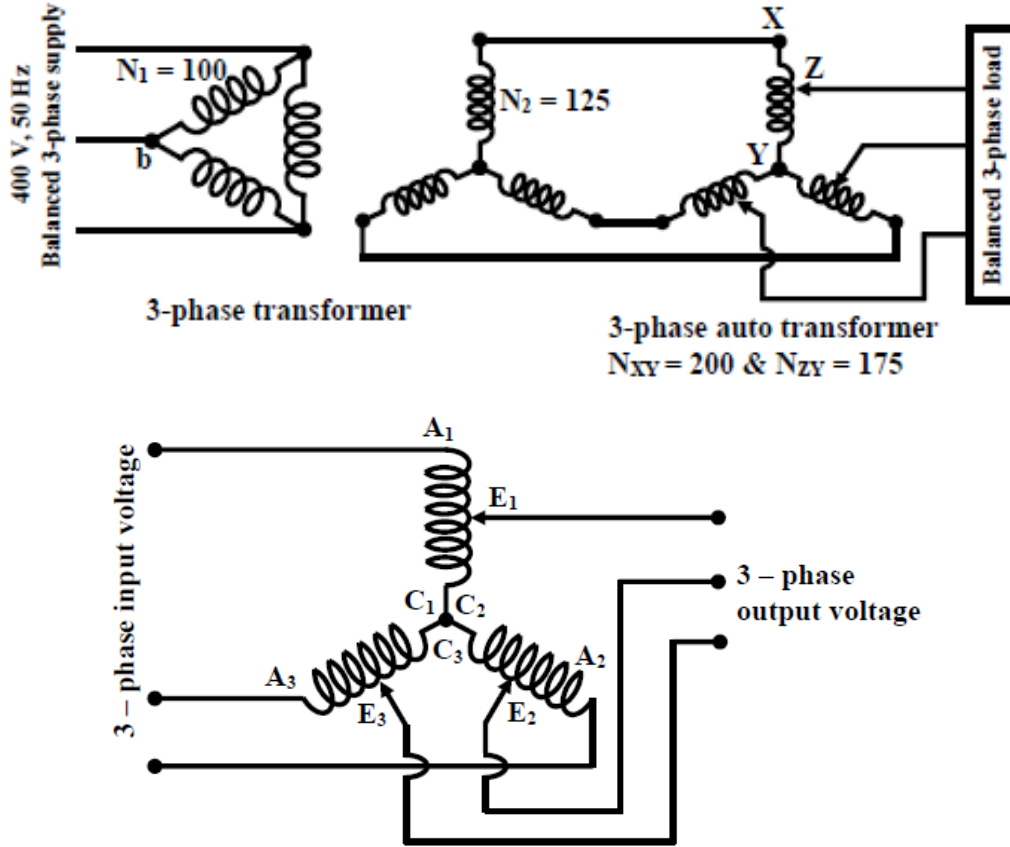
$$a = \frac{N_2}{N_1} = \frac{400}{500} = 0.8$$

$$I_1 = aI_2 = 0.8 \times 100 = 80A$$

$$\frac{\text{Copper in Auto Tr}}{\text{Copper in Traditional Tr}} = 1 - a$$

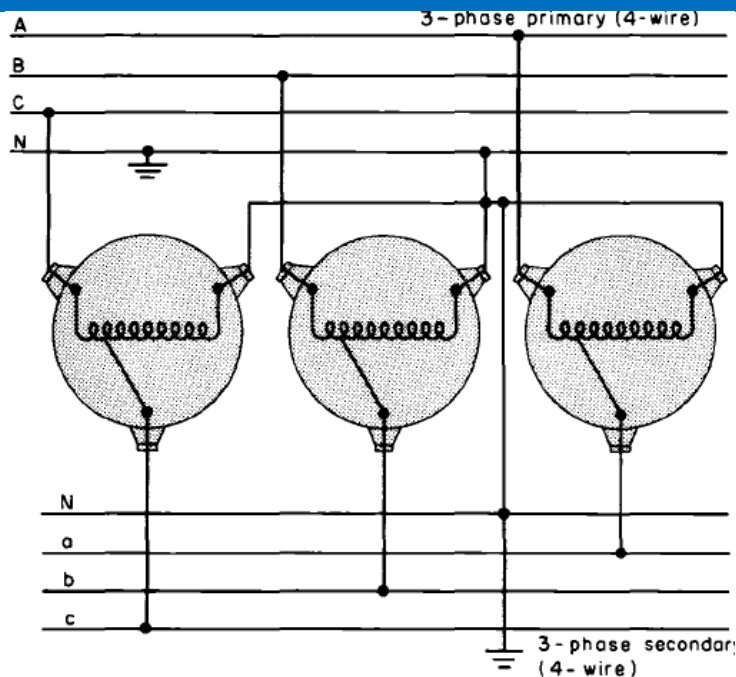
ومنها نجد أن وزن النحاس بمحول الـ auto يساوى  $(0.8 = 1 - 0.2)$  من وزن النحاس في المحول العادى ، وهذا يعنى اننا وفرنا 80% من وزن النحاس.

ويمكن الحصول على محول 3-phase كما فى الشكل 7-12 وشكل 8-12 .



شكل 7-12 : محول 3-phase Auto transformer





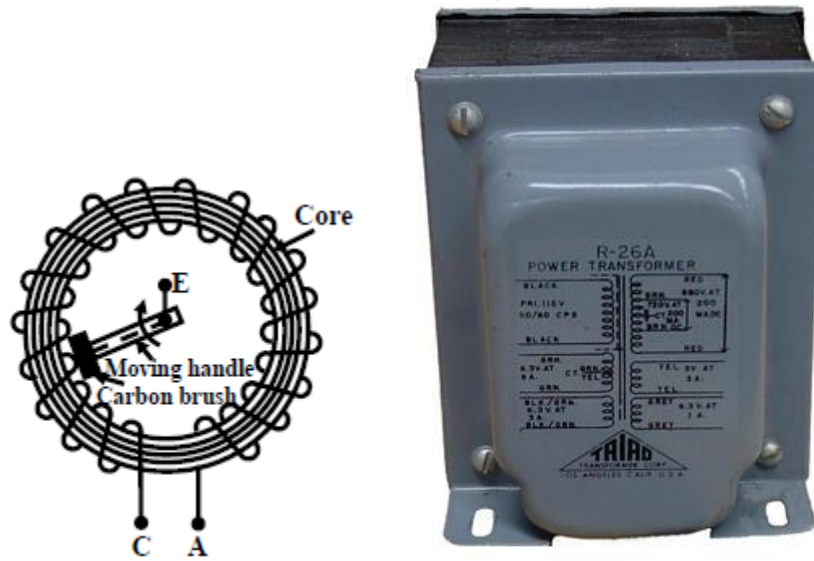
شكل 8-12 : محول 3-phase Auto transformer

### 4-3-12 استخدامات محولات الـ Auto Tr .

معظم استخدامات هذه المحولات تكون في تطبيقات الجهد المنخفض للحصول على جهد متغير في حدود ضيقة ، لكنها أيضا موجودة في تطبيقات الجهد العالي لتبادل الطاقة بين الشبكات الرئيسية والفرعية (من شبكة 500 إلى شبكة 220 مثلا في مصر أو شبكة 300 وشبكة 132 في الكويت) لاسيما أنه في هذه الحالة ستكون الـ Turns Ratio منخفضة جدا لا تتعدى غالبا 3 إلى 1 .

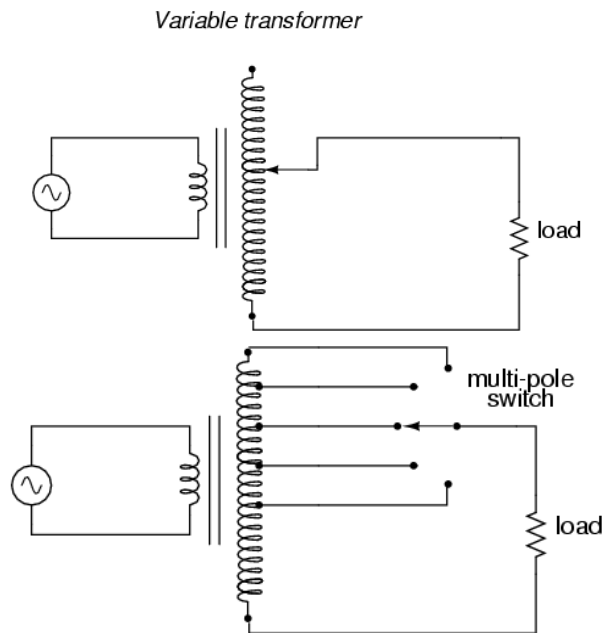
لكن أغلب استخداماته تكون في الجهد المنخفض حيث يستخدم مثلا في دوائر التحكم في محركات الـ Induction Motors أو في أجهزة تثبيت الجهد Stabilizer ، حيث تعمل محولات تثبيت الجهد الأتوماتيكي بنفس نظرية محولات الـ Auto .

فالمحول فيها يحتوى على دائرة إلكترونية وموتور صغير جهد 12 فولت كما في الشكل 12-9 ، ويكون الملف ملفوف حول قلب مستدير على هيئة اسطوانة تتركز في محورها على محور ثابت ، بحيث تدور اسطوانة الملفات حوله بسهولة ، ويتحكم في دورانها ذلك الموتور عن طريق التروس. وتتناسب حركة هذا الموتور طرديا مع الفولت الخارج له من دائرة التحكم فعند زيادة أو نقصان الفولت الداخل للمحول يخرج له فولت موجب أو سالب يجعله يلف لفات محسوبة للأمام أو للخلف حتى يعوض الزيادة والنقصان الداخل إلى المحول مما يجعل الخرج غالبا ثابت لا يتأثر بزيادة أو نقصان التيار الداخل.



شكل 9-12

كما يستخدم محول الـ Auto في أجهزة تغيير الجهد Variac للحصول على جهد متعدد أو متغير بنفس النظرية كما في الشكل 10-12 .



شكل 10-12

### 5-3-12 مميزات المحولات الـ Auto :

- جودة مرتفعة في حدود التشغيل المسموح به

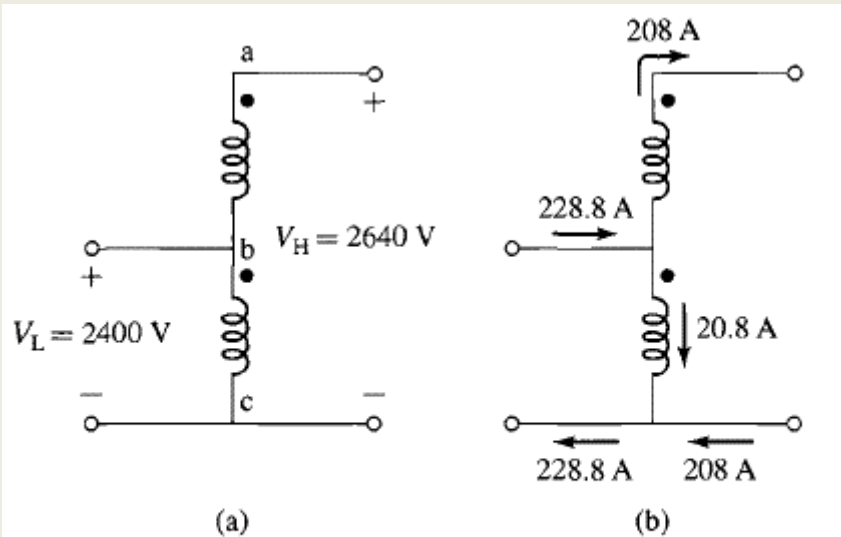
- وفر في حجم المحول وحجم النحاس المستخدم
- المفاويز النحاسية به قليلة جدًا إذا ما قورن بالمحولات الأخرى

## مثال 2-12 ( من كتاب Fitzgerald )

The 2400:240-V 50-kVA transformer of Example 2.6 is connected as an autotransformer, as shown in Fig. 2.18a, in which ab is the 240-V winding and bc is the 2400-V winding. (It is assumed that the 240-V winding has enough insulation to withstand a voltage of 2640 V to ground.)

- Compute the voltage ratings  $V_H$  and  $V_X$  of the high- and low-voltage sides, respectively, for this autotransformer connection.
- Compute the kVA rating as an autotransformer.
- Data with respect to the losses are given in Example 2.6. Compute the full-load efficiency as an autotransformer operating with a rated load of 0.80 power factor lagging.

الحل



**Figure 2.18** (a) Autotransformer connection for Example 2.7. (b) Currents under rated load.

- a. Since the 2400-V winding bc is connected to the low-voltage circuit,  $V_L = 2400$  V. When  $V_{bc} = 2400$  V, a voltage  $V_{ab} = 240$  V in phase with  $V_{bc}$  will be induced in winding ab (leakage-impedance voltage drops being neglected). The voltage of the high-voltage side therefore is

$$V_H = V_{ab} + V_{bc} = 2640 \text{ V}$$

- b. From the rating of 50 kVA as a normal two-winding transformer, the rated current of the 240-V winding is  $50,000/240 = 208$  A. Since the high-voltage lead of the autotransformer is connected to the 240-V winding, the rated current  $I_H$  at the high-voltage side of the autotransformer is equal to the rated current of the 240-V winding or 208 A. The kVA rating as an autotransformer therefore is

$$\frac{V_H I_H}{1000} = \frac{2640(208)}{1000} = 550 \text{ kVA}$$

Note that, in this connection, the autotransformer has an equivalent turns ratio of  $2640/2400$ . Thus the rated current at the low-voltage winding (the 2400-V winding in this connection) must be

$$I_L = \left( \frac{2640}{2400} \right) 208 \text{ A} = 229 \text{ A}$$

At first, this seems rather unsettling since the 2400-V winding of the transformer has a rated current of  $50 \text{ kVA}/2400 \text{ V} = 20.8$  A. Further puzzling is that fact that this transformer, whose rating as a normal two-winding transformer is 50 kVA, is capable of handling 550 kVA as an autotransformer.

The higher rating as an autotransformer is a consequence of the fact that not all the 550 kVA has to be transformed by electromagnetic induction. In fact, all that the transformer has to do is to boost a current of 208 A through a potential rise of 240 V, corresponding to a power transformation capacity of 50 kVA. This fact is perhaps best illustrated by Fig. 2.18b which shows the currents in the autotransformer under rated

conditions. Note that the windings carry only their rated currents in spite of higher rating of the transformer.

- c. When it is connected as an autotransformer with the currents and voltages shown in Fig. 2.18, the losses are the same as in Example 2.6, namely, 803 W. But the output as an autotransformer at full load, 0.80 power factor is  $0.80(550,000) = 440,000$  W. The efficiency therefore is

$$\left( 1 - \frac{803}{440,803} \right) 100\% = 99.82\%$$

The efficiency is so high because the losses are those corresponding to transforming only 50 kVA.

## 12-3-5 عيوب المحولات الـ Auto :

- يمثل خطراً في حالة استخدامه في دوائر الجهد العالي لأن دائرة الملف الثانوي جزء من الملف الابتدائي ذو الجهد العالي ، فكل موجات الـ Overvoltage تنتقل بالتوصيل إلى جانب الـ Secondary ، حيث لا يوجد Galvanic Isolation كما في المحولات العادية التي تتعزل فيها ملفات الابتدائي عن ملفات الثانوي بالقلب الحديدي.
- في حالة استخدامه بنسبة تحويل مرتفعة تقل كفاءته جداً ويصبح غير اقتصادي في التشغيل.
- يؤدي قلة الفيض المتسرب فيه إلى انخفاض قيمة الـ Inductance, L ومن ثم تضعف قيمة معاوقته لتيار القصر وهذا هو السبب في احتياج هذا النوع من المحولات لوجود Reactor معه في أغلب الأحيان .

## 4-12 محولات الـ GROUNDING TRANSFORMERS

في حالة الأنظمة المعزولة Isolated System وهي الأنظمة الغير مؤرضة لا يوجد مسار لرجوع تيار العطل الأرضي SLG مثلاً ومن ثم لا يمر تيار أصلاً ، وهذا شئ ليس بالجيد لأن الواقع أن الجهد على الـ Two Phases الأخرى سيرتفع بنسبة 173% متسبباً في حدوث Over Voltage.

ومحولات الـ Grounding Tr تعالج هذه المشكلة لأننا يمكن أن نضعه في أي مكان بالشبكة لتخليق نقطة تأريض كما في الشكل 11-12 ، ويمكن أيضاً إضافة مقاومة أرضية من خلال هذا المحول لتقليل تيار العطل ومن ثم يعالج المشكلة السابقة.

وهناك نوعين من هذه المحولات : الأول هو الـ Zigzag ، والثاني هو الـ Y/Δ.



شكل 11-12

## 5-12 المحولات الجافة DRY TYPE TRANSFORMERS

فى هذا النوع لا تغمر الملفات ولا الدائرة المغناطيسية بالزيت وإنما توضع فى الهواء مباشرة. وهذا النوع هو المفضل فى العمارات السكنية والـ Indoor عموماً لأنه أكثر أماناً من المحولات الزيتية. و تتميز المحولات الجافة عموماً بسهولة صيانتها. لكن جميع تطبيقات الـ Dry Tr تكون منخفضة القدرة ، و سعره يزيد بنسبة 70% عن مثيله فى القدرة من المحولات الزيتية.

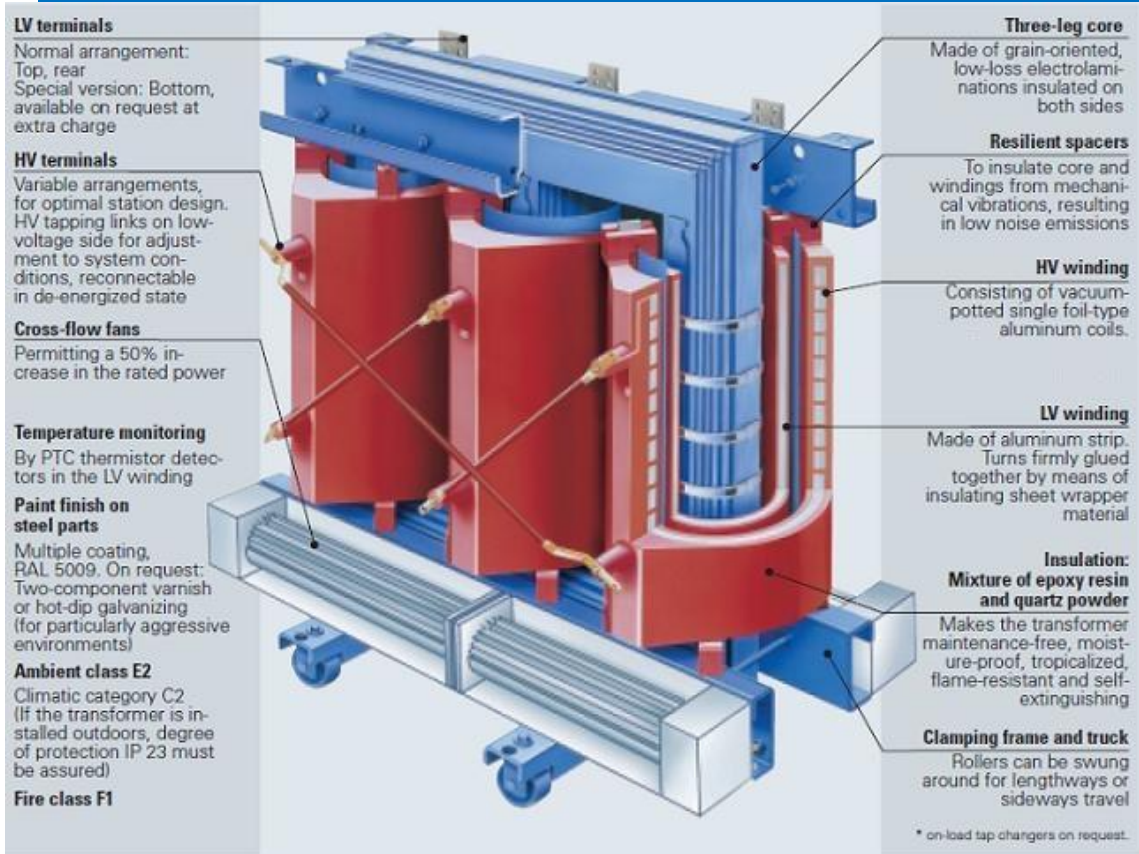
وفى النسخة الأبسط من هذه المحولات وهى المعروفة بـ Self-Air Cooled فإن الملفات تكون محاطة بالهواء تحت الضغط الجوى العادى ، وفى هذا الحالة فإن الحرارة الناشئة داخل الملفات يتم طردها عن طريق تيارات الحمل الهوائية Convection وأيضاً عن طريق الأشعاع Radiation من الأجزاء المختلفة ، وهذا يصلح مع المحولات الصغيرة فقط. وتمتاز برخص ثمنها وسهولة تصنيعها ، لكن يجب ألا تترك دون تشغيل لمدة طويلة حتى لا تكون معرضة لامتصاص الرطوبة من الهواء المحيط.

والعيب الأساسى لهذا النوع المبسط هو أن قيمة الـ Surge Impedance لها عالية بسبب كبر ممرات الهواء وهذا يؤدى إلى ارتفاع قيمة الـ Transient Voltage الناتجة عن فتح وغلق القواطع.

والنوع الثانى من هذه المحولات وهى المعروفة بالـ Cast Resin ، و فيها تم التغلب على المشاكل السابقة ، حيث تكون فيها الملفات مسبوكة داخل عازل خارجى كما فى الشكل 12-15 ، وهذه المادة العازلة لها نفس معامل التمدد الحرارى لمادة الملفات فلا تتأثر بالرطوبة ، ولا يتكون فيها ممرات هوائية .

وهذا النوع أكثر أماناً من النوع السابق ولذا يستخدم فى الأنفاق والمدارس والمستشفيات وغيرها من المباني الهامة لأن احتمالات الحريق فيه محدودة جداً ، لكن تكلفته أيضاً مرتفعة وكفاءة تسريب الحرارة فيه منخفضة ولذا فالقدرة المستخدمة فى هذا النوع تكون منخفضة .





شكل 12-15 : محولات الـ Cast Resin

وهذا النوع ( Cast Resin ) يتميز عموماً بعدة ميزات منها الإطفاء الذاتي إذا كان مصدر الحريق من خارجه ، ومنها أنه بطيء التأثير بالحرارة وهذا يعنى أن التجاوز فى تحمل نسبة تحميل زائد يكون مقبولا فيه أكثر من المحولات الزيتية ، ومنها أيضا أنه بسيط فى تصميمه و Compact ولا تصدر عنه اهتزازات . ونتيجة للـ Cast Resin المحيط بالملفات فإنه أكثر قدرة على مقاومة القوى الميكانيكية التى تنشأ عند حدوث Short circuit .

## الفصل الثالث عشر

# منظومة التبريد في المحولات

منظومة التبريد هي روح المحولات ، فعن طريقها يمكن رفع أو خفض القدرة الاسمية للمحول ( الـ rating ) فهو يعتمد بالأساس على طريقة التبريد ، بمعنى أننا يمكن أن نحصل على أكثر من قيمة للـ rating لنفس المحول حسب طريقة التبريد. ومن ثم فلها التأثير الأكبر على تشغيل المحول ، ولهذا السبب أضفت هذا الفصل في نهاية باب تشغيل المحولات.

## 1-13 مصادر الحرارة ومشاكلها

المصدر الرئيسي للحرارة المتولدة في المحولات هي الملفات ، ثم الدائرة المغناطيسية ، فهما معا المصدر لمعظم الـ Loss ، والتي تترجم إلى حرارة ، فالـ Core loss والمفقودات النحاسية copper loss بالإضافة إلى stray loss كلها مصادر للطاقة المفقودة على شكل حرارة ، وهذه الحرارة إذا لم يتم تصريفها بكفاءة فإنها تتراكم ، ويمكن أن تؤدي إلى انهيار العزل أو انخفاض قيمة أو تدمير الـ gaskets. والارتفاع الزائد أيضا في درجة حرارة الملفات أو المحول عموما يؤدي إلى تقصير عمر المحول ، فكل ارتفاع قدرة 8 درجات عن الدرجة الطبيعية يخفض عمر المحول إلى النصف ، وهذا يفسر أهمية وضرورة منظومة التبريد وصيانتها.

## 2-13 الوسط المبرد COOLANT

هناك عدة أوساط مستخدمة كما في الجدول 1-13 الذي يوضح الحروف الرمزية المستخدمة للوسط المبرد للملفات :

جدول 1-13 : الأوساط المبردة

نوع وسط التبريد	الرمز
زيت معدني	Mineral Oil
سائل صناعي عازل	Askarel
غاز	Gas



W		Water	ماء
A		Air	هواء
S		Solid Insulator	عازل صلد

وبالطبع فإن النوعين الأساسيين للـ coolant والأكثر انتشاراً ، هما الهواء والزيت .

فأما الهواء فيستخدم في المحولات المعروفة بـ Dry Transformer . ومن عيوب التبريد بالهواء :

- لا يسمح بتحميل المحول إلا لفترات زمنية صغيرة .
- قلة متانة العزل.
- تعرض الملفات للآتربة والأوساخ مما يؤدي إلى إضعاف متانة العزل .
- زيادة حجم الملفات ليتخللها الهواء .

وأما الزيت فهو الأشهر والأكثر انتشاراً لاسيما في محولات القوى الكبيرة oil filled transformer ، وسيكون التركيز في هذا الفصل فقط على تبريد المحولات الزيتية.

## 3-13 مكونات منظومة التبريد في المحولات الزيتية

العناصر الأساسية لمنظومة التبريد في محولات الـ oil filled transformer هي : الزيت و الراديتير و المراوح و المضخات و مواسير التبريد. وبالطبع سيكون العنصر الأول الذي يجب دراسته هو الزيت.

### 13-3-1 زيت المحولات

هو نوع من الزيوت المعدنية Mineral oil تستخرج مباشرة من عملية الـ Distillation في مصافي البترول دون أى إضافات كيميائية ، ويستخدم لغمر الملفات والقلب الحديدي داخل Tank المحول حيث يقوم الزيت بالعديد من الوظائف كما ذكرنا سابقاً - في الباب الثانى - من أهمها التبريد والعزل.

### 13-3-2 أهم خواص زيت المحولات

بالطبع لكي يقوم الزيت بوظائفه (وأهمها العزل والتبريد) فإنه يجب أن تتحقق فيه عدة سمات أهمها.

#### (1) قوة العزل : Dielectric Strength

يجب ألا تقل قوة عزل الزيت في جهاز الاختبار بالنسبة لجهد 11 ك.ف عن 30 ك.ف لكل 2.5 مم ، وبالنسبة لجهد 66 ك.ف تكون 50 ك.ف/ 2.5 مم .

**(2) درجة السيولة Viscosity**

تؤثر لزوجة الزيت ( Viscosity ) بدرجة كبيرة على عملية التبريد إذ أن حركة الزيت داخل المحول تزداد كلما قلت لزوجته . و يجب ألا تزيد لزوجة الزيت عن حد معين حتى لا يكون غليظ القوام مما يعوق حركته داخل مجاري وفراغات المحول . كما أنه كلما كانت سيولة الزيت كبيرة كلما كانت صلاحيته لنقل الحرارة من قلب المحول إلى الخارج أفضل ، ولكن لا يجب أن تكون سيولة الزيت أكثر من اللازم ، لأن تأثيره حينئذ بالتبخير يكون أعلى ، وبخار الزيت - كما هو معلوم - قابل للاشتعال ، وبالتالي يزداد الخطر إذا تعرض لأي لهب . و تقاس اللزوجة بـ ( السنتيستوك ) (  $\text{mm}^2 / \text{sec}$  ) والقيمة المعتادة تكون حول 37 سنتيستوك.

**(3) قلة المفقود بالبخر :**

يجب أن تكون النسبة المئوية لتبخر الزيت أقل ما يمكن ، وذلك لأنها تزيد من التكاليف وتعرض المحول للانفجار لتراكم البخار القابل للاشتعال فوق سطح الزيت . وقد حددت المواصفات البريطانية أقصى مقدار للتبخر 1.6 في المائة بعد خمس ساعات عند درجة حرارة 100° مئوية . و هذه النسبة أقل بكثير مما يحدث فعلياً في الحياة العملية لأن درجة حرارة التشغيل تكون أقل من 100 م° .

**(4) نقطة الاشتعال Flash Point**

المقصود بنقطة الاشتعال هو درجة الحرارة التي عندها تعطى كمية من الزيت بخاراً كافياً للاشتعال المؤقت عند تعريضه للهب أو إذا زادت درجة الحرارة عن حد معين ، فبخار الزيت يشتعل حتى بدون تعرضه للهب مباشر إذا ارتفعت درجة حرارته . وقد حددت المواصفات البريطانية ألا تقل درجة الاشتعال للزيت المستخدم عن 145 م° .

**(5) مقدار Tan  $\delta$** 

يكون الحد الأعلى لظل زاوية الفقد 0.005 مقاسة عند درجة حرارة 90° م على أن يكون القياس على عينة جافة مفلترة ، و عند إجهاد تتراوح قيمته بين 500 فولت / مم ، و 100 فولت / مم ، وعند تردد يتراوح بين 40 هرتز و 62 هرتز " .

**(6) الحرارة النوعية**

هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام من المادة درجة واحدة مئوية . فكلما كانت الحرارة النوعية لزيوت المحولات عالية كلما كان الزيت أصح للاستعمال . والحرارة النوعية تتراوح قيمتها بين 0.4 - 0.58 كيلو كالورى / كجم.

## (7) نسبة الأحماض والقلويات والكبريت والمواد الغريبة

الأحماض والقلويات والكبريت كلها ذات أثر سيئ على النحاس والمواد العازلة . وهى أيضا تقلل من قوة العزل فيجب أن تقل هذه المواد إلى أقصى حد ممكن . وقد يحتوى الزيت على بعض العناصر مثل الحديد والنحاس و الكبريت ، كما قد يحتوى على بعض الأحماض ، علاوة على ذلك فإن تشغيل المحول وارتفاع درجة حرارة الزيت وملامسته لقلب وملفات المحول ينتج عنه تكون بعض الأكاسيد التي تتسبب في تكوين الأحماض والكتل الصلبة (Sludge) . و الأضرار التي تنتج عن وجود الأحماض تتمثل في الآتى :

- يؤدي وجود الأحماض في الزيت إلى تآكل جسم الخزان للمحول و يؤدي ذلك أحيانا إلى سقوط الصدا المتكون على ملفات و قلب المحول مما يؤدي الى حوادث خطيرة قد تصل إلى حدوث قصر في الدائرة .

- قد يؤدي تكون بعض الأحماض إلى تكوين ( كتل صلبة ) ( Sludge ) حيث تترسب هذه الكتل على العوازل الصلبة للقلب الحديدي والملفات مما يقلل كفاءة عملية التبريد كما يمكن أن تترسب في مجاري التبريد للزيت ( مواسير التبريد - زعانف التبريد ) مما يسبب ضعف عملية التبريد .

## (8) الكثافة :

تعتبر الكثافة من أهم خواص الزيت التي تساعد على حساب وزنه ، وكذلك تعطى فكرة عن قبول الزيت للترسيب. وزيت المحولات عادة يكون سائل أصفر رائق كثافته حوالي 0.88 جم /سم<sup>3</sup> عند 15° مئوية ، كفاءته فى نقل الحرارة تعادل 21 مرة كفاءة الهواء ، معامل التمدد الحجمي 0.069 % لكل 1° م .

## (9) قلة نسبة الرطوبة

الأصل ألا يحتوى الزيت على أى رطوبة ، فإذا وجدت الرطوبة فيجب التخلص منها ، وكلما كان الزيت خاليا من الرطوبة ( أو به نسبة قليلة جدا من الرطوبة) كلما كان استعماله أفضل فى الجهود العالية ، علما بأن الرطوبة بنسبة 0.06% يمكن أن تخفض العازلية بنسبة 50% مقارنة بالزيت الذي لا يحتوى على رطوبة. و تنص المواصفات على ألا تزيد نسبة الماء في الزيت الجديد عن 35 مللي جرام / كجم ( 35 جزء في المليون ) . وهناك عدة طرق لطرد الرطوبة من الزيت منها رفع درجة حرارة الزيت فوق 100 درجة لعدة أيام أو إدخاله في عمليات فلترة كما سنتعرض لذلك تفصيلاً في باب الاختبارات.

## 3-3-13 إضافة موانع الأكسدة Inhibitors :

رغم عمليات التنقية التي تتم للزيت إلا أنه قد يحتوى بعدها على نسب من الكبريت والنحاس والحديد أو بعض الأحماض سواء المتبقية بعد التنقية أو الناتجة من تكون بعض الأكاسيد الناتجة من تشغيل المحول وارتفاع حرارة الزيت وملامسته للقلب والملفات. ونظرا لخطورة آثار هذه المواد على تآكل الخزان أو تكون الصدا أو ظهور الحمأة الصلبة Sludge مع مرور الوقت لهذا ينصح دائما بإضافة موانع للأكسدة للزيت.

## 2-3-13 Radiator في المحولات

في المحولات الصغيرة يمكن أن يتم تبريد الزيت بطريقة طبيعية حيث يرتفع الزيت الساخن لأعلى ليحل محله زيت أقل سخونة ثم من خلال اتصاله بجسم المحول فإن الحرارة تخرج للخارج بمروره ، وأحيانا يمرر الزيت خلال أنابيب خارجية كما في الشكل 1-13 ، وتعرف هذه الطريقة بالتبريد الطبيعي (nature circulation).



شكل 1-13 التبريد الطبيعي

أما في المحولات الكبيرة فإن هذه الطريقة لا تكفي لطرد كمية الحرارة الضخمة التي تتولد في المحول ولذا فإننا نلجأ لتركيب رديتيرات خارجية (خارج الـ Tank) كما في الشكل 2-13 ، مع ملاحظة أن حجم الرديتيرات ربما يكون أكبر من حجم الـ tank نفسه ، ويتم ضخ الزيت إلى الخارج ليمر خلال هذه الـ Radiator ثم يضخ للداخل مرة أخرى بعد تبريده.

## 4-3-13 إضافة مراوح

لزيادة كفاءة التبريد فإننا نستخدم أحيانا مراوح توضع إما أسفل Radiator أو أمامه ، فيقوم الهواء المتحرك بواسطة هذه المراوح بطرد الحرارة بسرعة أكبر من التبريد الطبيعي وتعرف هذه الطريقة Forced circulation مع ملاحظة أن هذه المراوح يتم التحكم في تشغيلها أو إيقافها أوتوماتيكيا بواسطة Thermostat حتى لا تظل تعمل دون داع بل تعمل فقط إذا ارتفعت درجة الحرارة لقيمة محددة وتقف أوتوماتيكيا إذا انخفضت الحرارة عن قيمة أخرى توفيراً للطاقة.



شكل 13-2 أوضاع المراوح

**ملاحظة:**

إذا وضعت المراوح أمام Radiator فيجب التأكد من عدم حدوث اهتزازات Vibration إضافية ، وهذا هو السبب في تفضيل وضع المراوح أسفل الـ Radiator حتى يمكن عمل حوامل أرضية لها غير متصلة بالـ Radiator ، والنوع الأول يستخدم مع المراوح الخفيفة والصغيرة الحجم فقط ، أما المراوح الضخمة فتستخدم مع النوع الثاني (أسفل الـ Radiator).

## 4-13 توصيف درجات التبريد COOLING CLASSES

طبقاً للمواصفات العالمية هناك طريقتين لتوصيف لدرجات التبريد classes في المحولات ، فالمواصفات الأقدم ، وهى التى تستخدم في الولايات المتحدة ، أما الأحدث والأكثر انتشاراً في التوصيف فهى مواصفات الـ IEC. الذي يعتبر أيضاً معبراً بطريقة أكثر وضوحاً من الطريقة الأمريكية القديمة .

في توصيف IEC نستخدم أربعة أحرف مرتبة حسب الجدول 13-2 :

جدول 13-2 : توصيف IEC

الحرف الرابع	الحرف الثالث	الحرف الثاني	الحرف الأول
نوع التقليل	نوع وسط التبريد الملامس لنظام التبريد الخارجي	نوع التقليل	نوع وسط التبريد الملامس مباشرة للملفات (داخلي)

على سبيل المثال

O	N	A	N
وسط التبريد الداخلي للمحول ( زيت )	نوع التقلب الداخلي طبيعي	وسط التبريد الخارجي هواء	نوع التقلب الخارجي طبيعي

وجداول 3-13 يعطى كافة رموز طرق التبريد طبقاً للمواصفات الدولية ( IEC )

جدول 3-13 : رموز طرق التبريد طبقاً للمواصفات الدولية ( IEC )

الرمز	طريقة التبريد
1- ONAN	تبريد بالزيت الطبيعي و الهواء الطبيعي
2- ONAF	تبريد بالزيت الطبيعي و الهواء المدفوع
3- OFAF	تبريد بالزيت المدفوع و الهواء المدفوع
4- ODWF	تبريد بالزيت الموجه و المياه المدفوع
5- AN	تبريد بالهواء الطبيعي ( للمحولات الجافة )
6- AF	تبريد بالهواء المدفوع ( للمحولات الجافة ) .

وجداول 4-13 يعطى رموز التبريد للمحولات المغمورة في الزيت طبقاً للمواصفات الأمريكية

جدول 4-13 : رموز التبريد للمحولات المغمورة في الزيت طبقاً للمواصفات الأمريكية

الرمز	طريقة التبريد
OA	تبريد ذاتي بالزيت
OA/FA	تبريد ذاتي بالزيت و مدفوع بالهواء
OA/FA/FA	تبريد ذاتي بالزيت و مدفوع بالهواء على مرحلتين
OW/A	تبريد ذاتي بالزيت و تبريد الزيت بالماء

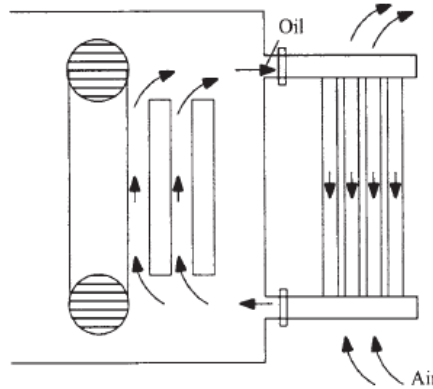
## 5-13 نماذج لبعض الـ CLASSES

### 1-5-13 التبريد بـ ONAN (Class OA)

هذه الطريقة تصلح مع المحولات الصغيرة ، حيث يتحرك الزيت ( الوسط المبرد الداخلي ) بطريقة طبيعية ارتفاعاً وهبوطاً داخل الـ Tank بتأثير الحرارة ، ويتلامس مع جسم الـ Tank فيقوم الهواء الخارجي بطرد الحرارة ، ولذا بدأت تسميته بـ O وهو Oil ( أي الوسط المبرد الداخلي ) ثم حرف N لتشير أن الميكانيزم

الخاص بتحرك الزيت هو Nature ، ثم حرف A ( Air ) ويشير للوسط المبرد الخارجي ، ثم حرف N تشير إلى الميكانيزم الخاص بحركة الهواء الخارجي.

بالطبع يمكن أن يزود المحول برادياتير أو أنابيب ، لكن في كل الأحوال لا توجد مضخات أو مراوح. والشكل 3-13 يبين حركة التبريد في هذه الـ Class. لاحظ أن الـ Radiator غالبا يكون مزودا بأنابيب واسعة لسهولة حركة الزيت فيه ( لا سيما أنه لا توجد مضخات في هذا النوع ).



شكل 3-13 ONAN

لاحظ أن الزيت يسخن فيرتفع لأعلى ليدخل في الـ Radiator من فوق وينزل بسهولة في أنابيب الـ Radiator فيبرد ثم يعود مرة أخرى للـ Tank.

#### مميزات وعيوب هذه الطريقة

الميزة الأساسية لهذه الطريقة هي البساطة وقلة التكلفة والاعتمادية العالية ، فهي لا تعتمد في أليتها على أي أجهزة إضافية ، وبالتالي صيانتها أيضا أقل تكلفة ، ورغم أنه في هذه الطريقة يكون الـ Radiator أكبر وأعلى تكلفة إلا أن التكلفة الإجمالية تظل أقل لغياب المضخات والمراوح والتي يؤدي غيابها إلى إضافة ميزة هامة وهي قلة الضوضاء ، لكن تظل هذه الطريقة محدودة فقط بالمحولات الصغيرة.

#### 2-5-13 طريقة ONAF ( Class OA/FA )

مع ارتفاع قدرة المحولات ترتفع الحرارة المتولدة وتزداد الحاجة لتحسين كفاءة منظومة التبريد ، وفي هذه الـ Class لاحظ أن الحرف الأخير فقط هو الذي تغير ، بمعنى أن الميكانيزم الخاص بحركة الوسط المبرد الخارجي ( Air ) صار Forced بدلا من Nature وهذا بسبب إضافة مراوح على جسم الـ Radiator.

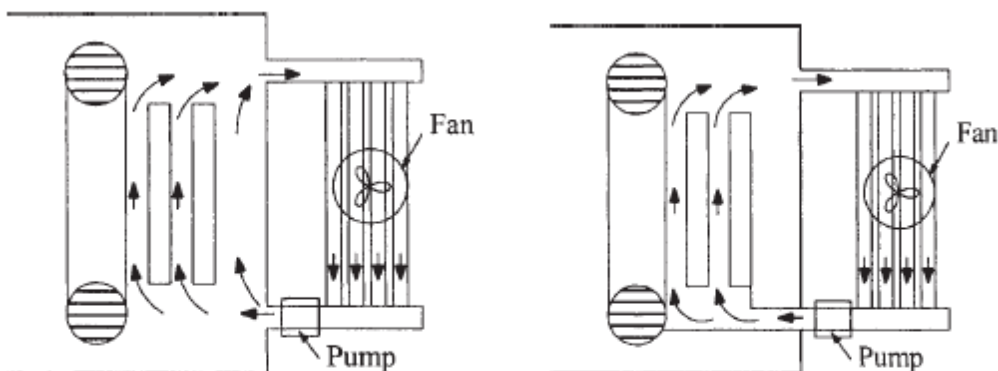
وفي هذه الحالة يكون للمحول قدرتين اسميتين Two ratings الأولى بدون المراوح ، والثانية بالمراوح ( الثانية بالطبع هي الأعلى ) . وكما ذكرنا سابقا ، فهذه المراوح تعمل ON/OFF أوتوماتيكيا حسب حرارة Thermostat خاص يركب في المحول حتى لا تظل تعمل بصورة دائمة ، وكما ذكرنا أيضا

فالمراوح يمكن أن توضع أمام Radiator أو تحته ، ووضعها تحته أفضل لأنه في هذه الحالة يكون اتجاه الهواء المندفع بالمراوح في نفس اتجاه الهواء الطبيعي ( الذي يرتفع لأعلى مع الحرارة ) . ونزيد فقط هنا أن المراوح إذا وضعت أمام الـ Rad يجب أن توزع بانتظام على كامل الوجه Face وليس في الوسط مثلا فقط.

### 3-5-13 طريقة OFAF أو FOA

هذه هي أقوى طريقة للتبريد حيث تستخدم مضخات لتحريك الزيت ومراوح لتبريد الهواء .

لاحظ في الشكل 4-13 أن هناك تعديلا يمكن إضافته لتحسين كفاءة منظومة OFAF ، ففي الجزء الأيسر من الشكل ستجد أن جزءا من الزيت يمكن أن يمر من أسفل لأعلى دون أن يمر على أي من الملفات ، وبالتالي لا تستفيد منه. وهذه المشكلة تم تداركها في الجزء الأيمن من الشكل حيث تم توجيه الزيت Directed في اتجاهات محددة لضمان مروره على الملفات والقلب . ولذا تسمى هذه الطريقة المعدلة ODAF ، حيث أضيف حرف D للإشارة إلى التحكم في الاتجاه Direction



شكل 4-13 الطريقة المعدلة ODAF (يمين)

### 4-5-13 التبريد المتعدد المراحل

هناك بعض المحولات كما ذكرنا يكون لها أكثر من rating حسب أسلوب التبريد ، والجدول 5-13 يبين تغير قيمة الـ rating مع تغير أسلوب التبريد على اعتبار أن القدرة الاسمية ( 100% ) تكون مع ONAN ثم ترتفع القدرة مع تغير الأسلوب كما في الجدول .



جدول 5-13 : تغير قيمة الـ rating مع تغير أسلوب التبريد

TABLE II — TRANSFORMER COOLING STAGES AND LOADING CAPACITY	
TYPE OF COOLING	LOADING CAPACITY
ONAN	100 PER CENT
ONAN/ONAF	100/133 PER CENT
ONAN/ONAF/ONAF	100/133/167 PER CENT
ONAN/ONAF/OFAF	100/133/167 PER CENT
ONWF	125 PER CENT
OFAF	167 PER CENT

وفي بعض الأحيان يكون المحول مزودا بأكثر من Thermostat لينتقل من أسلوب لآخر أوتوماتيكيا كلما تغيرت درجة الحرارة ، و تظهر هذه المعلومة على الـ Name plate للمحول كما في المثال التالي:

### مثال 1-13

ما معنى هذه العبارة المكتوبة على لوحة بيانات أحد المحولات :

transformer with “45/60/75 MVA OFAF cooling class / OFAF / ONAN  
? Continuous at 65°C Temperature Rise”

هذا يعني أن لدينا محول إذا كان يعمل دون أي مراوح أو مضخات ( ONAN ) فإن قدرته لا تتعدى 45 MVA ، أما إذا استخدمنا المراوح لتبريد الهواء الخارجي وحركنا الزيت ( المبرد الداخلي ) بواسطة مضخات فإننا يمكن أن نحصل على قدرة 60 MVA في مرحلة أولى ، ويمكن أن تصل إلى 75 MVA في مرحلة ثانية ، أي أن له Two Stages ( حسب عدد المراوح والمضخات المستخدمة في كل مرحلة ) ، وهذه المراحل الثلاثة كل منها يمكن أن يعمل متواصلا دون أن يتسبب ارتفاع في درجة الحرارة أكبر من 65 درجة فوق الحرارة الطبيعية للجو .

لاحظ أن نسبة 60/45 هي 133% ونسبة 75/45 هي 166.6% وهذا ينطبق مع الجدول 5-13.

# البَابُ الْخَامِسُ

## الاختبارات والصيانة

- الفصل الرابع عشر : إختبارات المحولات
- الفصل الخامس عشر : صيانة المحولات

## مقدمة الباب الخامس

للحفاظ على كفاءة تشغيل المحول ، ولضمان استمرارية الخدمة فلا بد من وجود خطة للصيانة . وأساس هذه الخطة هي المعلومات ، والمعلومات لا تحصل عليها إلا من الاختبارات . ومن هنا كانت أهمية هذا الباب الذى يشتمل على فصلين فقط هما الفصل الرابع عشر عن اختبارات المحولات ، والفصل الخامس عشر عن صيانة المحولات.

## الْفَصْلُ الرَّابِعُ عَشَرَ

### إختبارات المحولات

بالإضافة إلى أهمية الاختبارات في توفير المعلومات اللازمة لتصميم خطة الصيانة فإن الاختبارات الخاصة بالمحولات لها أهمية أخرى ، فبواسطتها يمكن تحديد عمر المحول وكفاءته ، بل وإمكانية تشغيله سواء بعد نقله أو بعد تجميعه أو بعد عمل صيانة شاملة له.

## 1-14 أشهر المواصفات

الاختبارات عموماً لا بد أن تتم طبقاً لمواصفات محددة فهي يجب أن تكون قياسية Standard ، و إذا أجريت في أي بلد فإنها تتم بنفس الطريقة التي تتم بها في بلد آخر ، وإلا صارت هذه الاختبارات عديمة القيمة.

ولضمان أن تكون هذه الاختبارات قياسية فقد تم توحيد طرق تنفيذها ، وتم جمعها في مجموعة خاصة ضمن المواصفات العالمية التي من أشهرها ANSI Standard ، حيث تقع مجموعة مواصفات المحولات تحت المجموعة التي تبدأ ب C57.

والجزء الخاص بالاختبارات تجده تفصيلاً في المواصفات التالية:-

1. IEEE C57.12.90, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed

Distribution, Power, and Regulating.

2. Transformers; and Guide for Short-Circuit Testing of Distribution

and Power Transformers (ANSI).

## 2-14 أنواع الاختبارات

الواقع أن هناك مجموعة كبيرة من الاختبارات كل منها يخدم مجال معين ، ويختلف توقيت إجراء الاختبار حسب نوعه.

ويمكن تصنيف الاختبارات من وجهة نظر التوقيت إلى عدة تصنيفات:

1- الاختبارات الدورية المنتظمة وهي هامة جدا لاكتشاف الأعطال في مراحلها المبكرة ، مثل اختبار قياس مقاومة العزل مثلا ، فإذا حدث وانخفضت عن معدلاتها الطبيعية فإن ذلك يدل على بداية حدوث مشاكل في العزل.

2- وهناك اختبارات تتم فقط لمحاولة البحث عن سبب لمشكلة ما ، فمثلا إذا وجد أن درجة حرارة الملفات مرتفعة رغم أن المراوح تعمل بكفاءة فعندها يمكن عمل اختبار قياس مقاومة الملفات أو عمل تحليل للزيت المستخدم.

3- بعض الاختبارات تتم عند الحاجة لقياس قيم معينة ، فمثلا إذا أردت أن توصل محولين على التوازي فلا بد من التأكد من تحقق جميع الشروط التي سبق الحديث عنها في فصل التوصيل على التوازي ، ولضمان ذلك تجري بعض الاختبارات مثل Ratio test ، و Z% test ، والـ Polarity test .

كما يمكن تقسيم الاختبارات بطريقة أخرى إلى :

1- اختبارات التصميم.

2- اختبارات الإنتاج.

3- اختبارات الروتينية.

4- اختبارات بدء التشغيل.

5- اختبارات أخرى

## 14-2-1 Design tests اختبارات التصميم

وتسمى أيضا بالاختبارات النوعية ، وهذه الاختبارات يجريها المصنع على عينة فقط من الإنتاج ، وليس على كل المحولات المنتجة ، لأن بعض هذه الاختبارات (مثل اختبار تحميل القصر) تعتبر اختبارات مدمرة حتى لو اجتازه المحول ، لأنه يتسبب في تقصير عمره ، ولذا فهو يتم إجراؤه فقط لضمان اتساق القياسات العملية مع الاختبارات النظرية والمحاكاة. ومن أهم اختبارات التصميم اختبارات مستوى الضوضاء واختبار معدل الارتفاع في درجة الحرارة واختبار تحمل القصر Short circuit و اختبار جهد الموجة الفائقة BIL .

## 14-2-2 Production Tests اختبارات الإنتاج

وهذه الاختبارات يجب أن تتم على كل محول منتج من المصنع مثل اختبار ratio test ، والقطبية ، والفقد في الطاقة ، فمثل هذه الاختبارات مهمة للمعلومات التي تكتب على Name plate ، ومنها أيضا:

test, Iron Loss test, Load Loss test, Impedance test, Phase–Displacement  
Open Circuit test, Short Circuit test, etc

### 14-2-3 الاختبارات الروتينية Routine Tests

هذه الاختبارات ضرورية لاكتشاف أي مشاكل في مراحل مبكرة ، ومن أمثلتها

Oil Dielectric test (1)

Gas in Oil Analysis (2)

Moisture in Oil (3)

Megger tests (4)

ومنها أيضا اختبارات نسبة التحويل ، ومقاومات الملفات ، وقياس المعاوقة ، وقياس الـ Loss في حالة الحمل و اللا حمل.

### 14-2-4 اختبارات خاصة

مثل اختبار التفريغ الجزئي و اختبار التداخل مع الراديو ، واختبار حجم الاهتزازات .

### 14-2-5 ترتيب إجراء الاختبارات Sequence of Tests

بالإضافة لطريقة إجراء الاختبار ، فقد حددت المواصفات أيضا الترتيب الـ Sequence الذي يجب أن تتم به الاختبارات ، وفيما يلي مثال على ذلك.

#### 1. Tests before tanking:

- . Preliminary ratio, polarity, and connection of the transformer windings
- . Core insulation tests
- . Ratio and polarity tests of bushing–current transformers

#### 2. Tests after tanking (final tests)

- . Final ratio, polarity, and phase rotation
- . Insulation capacitance and dissipation factor
- . Insulation resistance
- . Control–wiring tests
- . Lightning–voltage impulse tests
- . Applied–voltage tests

- . Induced-voltage tests and partial-discharge measurements
  - . No-load-loss and excitation-current measurements
  - . Temperature-rise tests (heat runs)
  - . Tests on gauges, accessories, LTCs, etc.
  - . Sound-level tests
3. Tests before shipment
- . Dew point of gas
  - . Core-ground megger test
  - . Excitation-frequency-response test
4. Commissioning tests (عند الاستلام)
- . Ratio, polarity, and phase rotation
  - . Capacitance, insulation dissipation factor, and megger tests
  - . LTC control settings check
  - . Test on transformer oil
  - . Excitation-frequency-response test
  - . Space above the oil in the transformer tank.

ومن الواضح أن بعض الاختبارات تدخل في أكثر من تصنيف ، لذلك سوف نعرض الاختبارات في هذا الكتاب ضمن تصنيف نوعي من حيث الأهمية وكثرة الاستخدام في محطات التحويل ، حيث سنقوم بتقسيمها إلى :

- 1- مجموعة اختبارات مقاومة العزل
- 2- مجموعة اختبارات تحمل العزل للجهد
- 3- مجموعة اختبارات الزيت
- 4- مجموعة الاختبارات لقياس الـ Parameters الكهربائية الخاصة بالمحول وملفاته.

## 3-14 مجموعة الاختبارات المتعلقة بالعزل DIELECTRIC TESTS

المقصود بالعازل هنا هو كافة أنواع العوازل في المحول وما يتعلق بها ، سواء الزيت أو العوازل الصلبة (الورق مثلاً) أو حتى مسافات العزل ، فهناك مسافات محددة بالمليمتر بين الموصل والسطح الداخلي لخزان المحول ، وأي انحراف سيؤدي إلى ظاهرة الـ **flash over** ومن ثم فشل المحول.

والعازلية للمعدات الكهربائية عموماً تتخفّض بمرور الزمن Degradation نتيجة لمختلف أنواع الضغوط والتأثيرات أثناء التشغيل الاعتيادي لتلك المعدات ، ولذلك أصبح لزاماً إجراء الفحص الدوري لبيان درجة تأثر قيم العازلية ، علماً بأن تغير قيم العازلية هو تغير لا خطي nonlinear بحيث يصبح من الصعب تلافي فشل المحول. وقد وجد أن أسباب فشل المحولات يرجع 60% منها إلى ضعف العازلية .

وبدون إجراء اختبارات روتينية لفحص العزل يمكن أن يحدث انهيار مفاجئ ومكلف جداً لعزل المحول ، وقد يكلفك المحول نفسه ، ولذا فهذه المجموعة من الاختبارات هامة جداً وضرورية لأي محول لسرعة اكتشاف مشاكل العزل في المحولات.

- Insulation Resistance (IR)
- Polarization Index (PI)
- Dielectric loss angle ( $\tan \delta$ )
- Partial discharge tests

وقد يضاف إليهم أحياناً نوعين آخرين هما:

- Frequency response analysis
- Acoustic emission tests (in conjunction with partial discharge tests)

وسنبداً قبل دراسة تفاصيل هذه الاختبارات بمراجعة أسباب ضعف العزل أو ما يعرف بـ Degradation.

### 14-3-1 ما المقصود بتقادم العزل أو الـ Degradation؟

كل منظومة عزل يحدث لها تقادم (degradation) خلال فترة عمرها ، وهذا في حد ذاته ظاهرة طبيعية ، لكن الغير طبيعي أن يكون معدل الـ degradation مرتفع أو أن يحدث في فترة مبكرة من عمر العزل. وبالطبع فجودة العزل هي الحصن الحصين من تيارات القصر short circuits.



وضعف العزل أو التقادم أو Degradations (كلها مترادفات) يمكن أن يبدأ بحدوث Cracks في العزل أو تسرب للرطوبة (في بعض أنواع العوازل السائلة مثل الزيت) أو وجود أي مادة غريبة على سطح العازل ثم يحدث لها ionization بفعل الجهد العالي محدثة مسار له مقاومة منخفضة كما في حالة التيار المتسرب من سطح الـ Bushings.

كل ذلك يمكن أن يؤدي إلى Degradation للعزل ويصبح درجة العزل أقل مما ينبغي ، وقد تتطور مع الوقت لتتحول من انهيار جزئي Partial Breakdown ، إلى انهيار كلي للعزل.

### 14-3-2 أسباب تقادم العزل Degradation:

1- الارتفاعات مفاجئة في الجهد over voltages ، فالعوازل عامة مصممة على تحمل جهد معين وحدوث هذه الارتفاعات تتسبب في إجهاد العازل stress ويمكن أن تؤدي لحدوث cracks.

2- الإجهادات الميكانيكية: يمكن أن تتسبب الصدمات الميكانيكية - كأن تصطدم شوكة الحفار بعازل الكابل مثلاً - في حدوث ضعف في نقاط معينة من العزل سواء كان ملحوظاً (في أحسن الأحوال) أو ربما لا يلاحظه أحد لكنه يتطور بعد ذلك . وليس بالضرورة أن تكون هذه الإجهادات الميكانيكية نتيجة صدمة بل إن الاهتزازات الزائدة vibration ، والفتح والغلق المتكرر للماكينة كل ذلك يسبب نوعاً من الإجهادات الميكانيكية على العزل وتؤدي في النهاية لحدوث Degradation.

3- الإجهادات الحرارية: فالعمل في ظروف حارة فوق العادة أو حتى باردة تحت العادة تؤدي لحدوث إنكماشات أو تمديدات للعزل يمكن أن تؤدي بعد حين إلى حدوث cracks ، وحتى عند تشغيل أي معدة بمعدل فوق العادة يمكن أن يتسبب ذلك في حدوث هذه الإجهادات ما لم تكن المعدة مصممة لتحمل الفتح والغلق المتكرر.

4- التلوث الجوي : وهو يؤثر بشدة على عوازل الـ Bushings في المحولات لاسيما إذا كان المحول مثلاً بجوار البحر حيث يتراكم عليه بخار الملح.

## 14-4 اختبار العزل: (IR) INSULATION RESISTANCE

ويسمى أيضاً بالـ Megger Test ، لأنه يتم بواسطة جهاز الـ megger ، والاختبار سهل تطبيقه لكنه يقيس المقاومة في منطقة العينة فقط ، حيث يتم وضع DC Volt مرتفع يصل لحوالي 500 V وربما 1000 V على معدات الجهد المنخفض ويرتفع لحوالي 2500 V - 5000 V في معدات الجهد العالي

لقياس المقاومة بين طرفي الجهاز ، وبالطبع تكون المقاومة المتوقعة في حدود الـ  $M\Omega$ . وتصل القيمة إلى  $500 M\Omega$  للمحولات الجديدة.

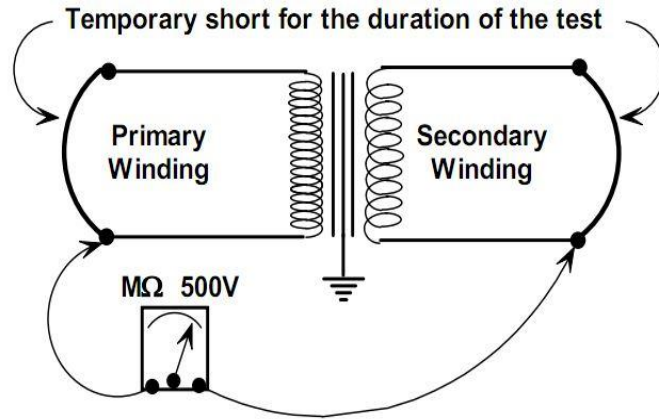
والقيمة المقاسة تشير إلى حالة العزل بين نقطتي القياس ، ولذا فهذه القيمة لا تعبر بصدق عن حالة العازلية الكاملة ، كما أن التيار يمكن أن يتسرب من خلال سطح العازل وليس خلاله ، ولذا فقياس Leakage current أي التيار المتسرب وقيمه فيما بعد ستعطي إشارة أخرى مع قياس مقاومة العازل.

وهذا النوع من الاختبارات (IR) يستخدم كخطوة أخيرة قبل إطلاق التيار في الدائرة لضمان عدم وجود أي مسارات للتسرب ، حيث تقاس المقاومة بين الموصل من جهة و العزل من جهة أخرى ، أو بين phase و phase آخر ، أو بين أي phase والأرض ، و المفترض أن تكون كل هذه المقاومات عالية جدا ما لم يكن هناك Cracks. وتقاس أيضا المقاومة بين ملف الجهد العالي وملف الجهد المنخفض .

لاحظ أن استخدام الجهد المنخفض في القياس غير كاف ، لأن العزل قد يخدعك ، فربما كان موجودا لكنه ضعيف في نقطة ما ، فإذا وضعنا جهد منخفض فلن نستطيع كسر هذا العزل الضعيف أما الجهد العالي فسيكسره بسهولة ليظهر وجود هذا الـ Cracks في العزل الخادع. أما لو كان العزل سليما فإن هذه القيم من الجهود المرتفعة نسبيا لن تؤثر فيه (1000 V – 5000 V) ومن ثم يعتبر هذا النوع من الاختبارات غير مدمر. و بالنسبة لمحولات القدرة يجب أن تكون الفولتية المستخدمة ما بين 1000 إلى 10000 فولت.

#### 14-4-1 خطوات عمل الاختبار

- 1- يجب أولا فصل التيار الكهربائي عن المحول وتأريضه.
- 2- يجب تفريغ أي شحنات استاتيكية ربما تكون متراكمة على المحول ، وذلك بواسطة عصا التفريغ أو استخدام جهاز قياس للـ IR مزود بتفريغ أوتوماتيكي للشحنات.
- 3- يتم قياس المقاومة أولا بين طرفي LV والـ HV مع عمل short في كليهما من دون تأريض كما في الشكل 14-1.



شكل 1-14 : دائرة اختبار الـ Insulation Resistance

4- قياس المقاومة بين HV وبين LV وكلاهما short مثل السابق ، لكن مع تأريض LV ، بحيث يوصل الطرف الموجب للـ Megger بالـ Shorten HV بينما يوصل الطرف الآخر بالـ Grounded LV.

5- أعد نفس الاختبار مع تأريض HV بدلا من LV.

#### 14-4-2 تأثير وجود الزيت على قيمة المقاومة المقاسة

عند استخدام DC Voltage لقياس المقاومة بين ملفات LV ، HV في وجود زيت بالـ Tank تكون المقاومة أعلى منها في حالة عدم وجود زيت لأن مقاومة الزيت أعلى من مقاومة الهواء ، أما عند استخدام AC voltage فإن الزيت يعمل كأنه مكثف بين الطرفين فتقل المقاومة.

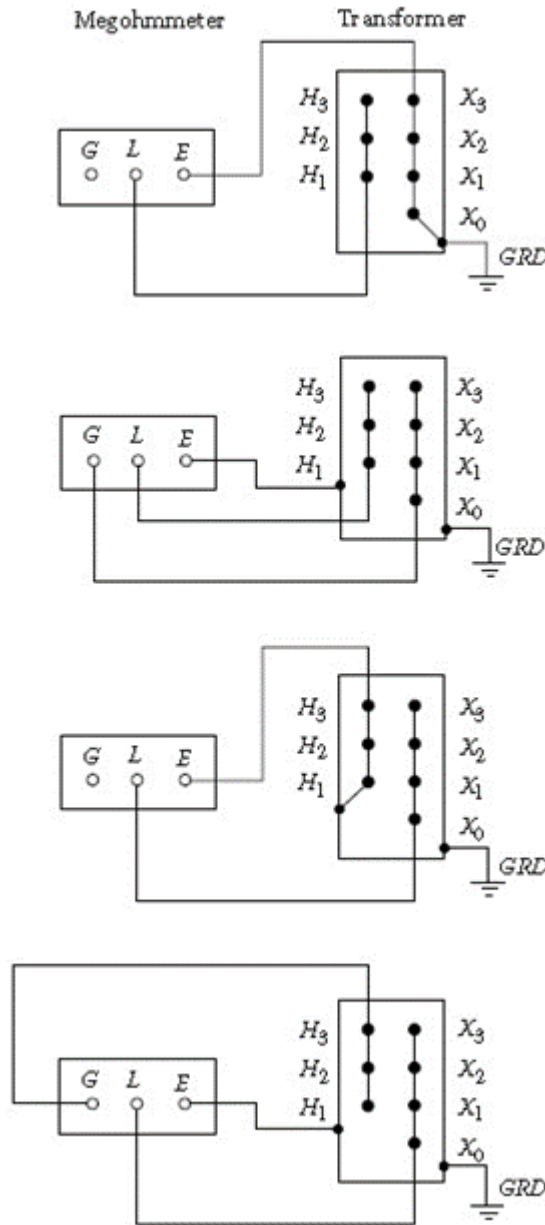
#### 14-4-3 تأثير الحرارة على قيمة المقاومة المقاسة

الحرارة لها علاقة عكسية مع مقاومة العزل ، ولذا يجب تصحيح قيمة المقاومة حسب درجة الحرارة ، فمقاومة العزل تنزل للنصف مع ارتفاع قدره 10 درجات مئوية ، فلو كانت المقاومة المقاسة تساوي  $2M\Omega$  عند 20 درجة فإنها ستكون  $1M\Omega$  عند 30 درجة ، وهي أيضا ستساوي  $4M\Omega$  عند 10 درجات.

#### 14-4-4 تأثير الزمن على قيمة المقاومة المقاسة Polarization Index

زمن القياس له أيضا تأثير على القيم المقاسة ، ولذا فغالبا تقاس المقاومة بوضع الجهاز لمدة 1 min ، ثم تقاس بوضعه لمدة 10 min ، ثم يحسب معامل اسمه polarization index وهذا يعتبر مقياس للجفاف النسبي لمقاومة العزل فكلما كانت  $R_{10}$  قريبة من  $R_1$  كلما كان ذلك أفضل.

والشكل التالي يظهر جميع توصيلات الحالات السابقة.

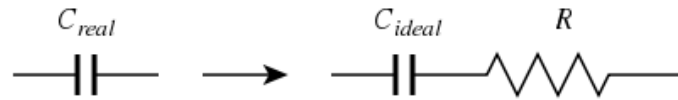


## 5-14 اختبار العزل الثاني : DIELECTRIC LOSS ANGLE

ويسمى أيضا باختبار الـ  $\tan \delta$  ، ويسمى أيضا DISSIPATION FACTOR ، وأهمية هذا الاختبار أنه يعطي إشارة واضحة لمدى فقد الطاقة خلال العزل ، وذلك من خلال قياس الزاوية بين الجهد والتيار المار خلال العزل . وحيث أن  $\cos$  هذه الزاوية هو الـ (Power Factor) الخاص بالعازل ( وهو بالطبع

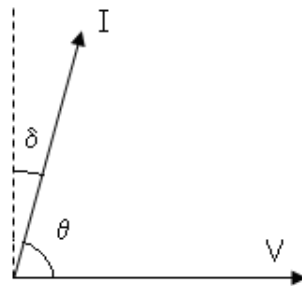
مختلف تماما عن الـ PF الخاص بالـ Load ) ، ومن هنا جاءت التسمية الرابعة ، حيث يسمى أيضا بـ power factor test

وهذه النقطة تحتاج لبعض التفاصيل. ففي المكثف النموذجي ideal capacitor نفترض وجود Capacitance فقط دون أي مقاومة ، أما المكثف الحقيقي فهناك مقاومة  $R$  تكون على التوالي من الـ  $C$  كما في الشكل 2-14 . والـ Dissipation Factor هو النسبة بين المقاومة ومعاوقة المكثف.



شكل 2-14 : الدائرة المكافئة لمكثف

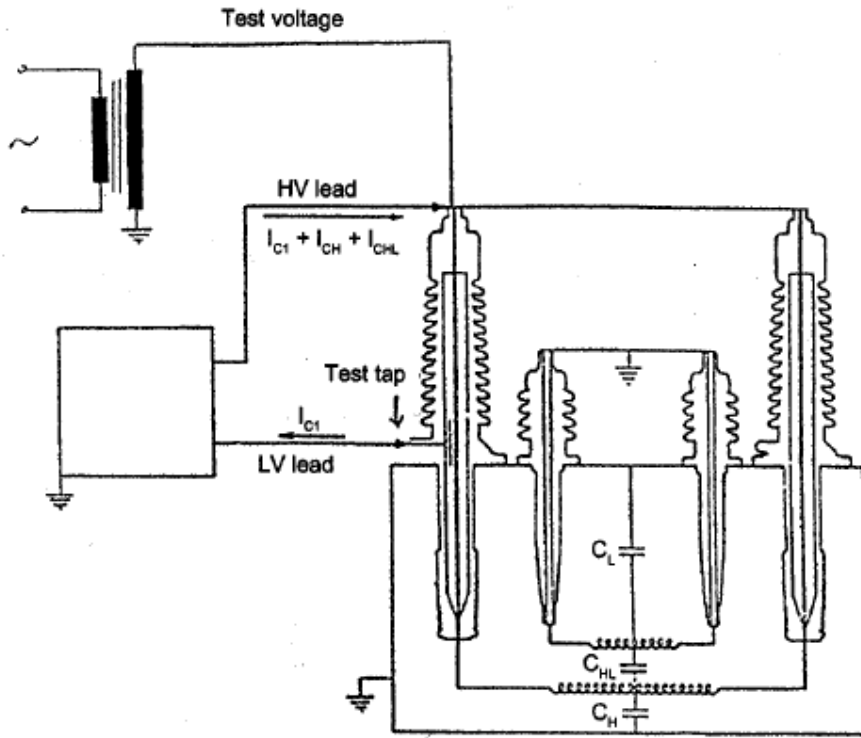
فإذا كانت الزاوية بين الجهد والتيار خلال العازل هي  $\theta$  ، فإن الزاوية المكملة لها هي  $\delta$  ، كما في الشكل 3-14 ، وهي بالطبع ستكون صغيرة جدا . وقيمة  $\tan \delta$  تقترب فعليا من قيمة  $\cos \theta$  ، ومن هنا كان هناك أكثر من اسم لهذا الاختبار .



شكل 3-14 : الزاوية بين الجهد والتيار خلال العازل  $\theta$  ، و الزاوية المكملة لها  $\delta$

وتعرف القيمة  $\tan \delta$  بأنها الـ Dissipation factor وهي تساوي تقريبا الـ power factor ، وتتراوح قيمتها عمليا بين 0 - 0.08 ، وبالطبع كلما اقتربت من الصفر كان أفضل ، أما إذا كان وضع العازل سيئاً والفقد فيه كبير فستكون قيمة  $\tan \delta$  عالية.

والشكل 4-14 يوضح كيفية عمل هذا الاختبار ، حيث يقيس الجهاز الزاوية بين الجهد والتيار المار خلال العزل ، والمقصود بالعزل هنا هو العزل بين ملفات الابتدائي والثانوي.

شكل 4-14 : كيفية عمل باختبار الـ  $\tan \delta$ 

ويمكن القول أن آلية إجراء هذا الفحص لا تختلف عن آلية إجراء فحص مقاومة العازلية حيث يتم وضع دائرة قصر Short على فيزات كلا الملفين العالي والمنخفض وقياس المقاومة بين الأطراف التالية (حرف الـ E يعنى أرضي Earth):

HV – LVE

LV – HVE

HV– LV

و قيمة  $\tan \delta$  النموذجية هي 0,5% في درجة حرارة 20 مئوية . وكذلك يكون هنالك قياس لقيم الـ Capacetance في نفس الوقت عند قياس  $\tan \delta$  ، وتكون قيمتها في حدود البيكو فاراد ، حسب حجم وسعة المحول.

## 6-14 اختبار العزل الثالث : PARTIAL DISCHARGE

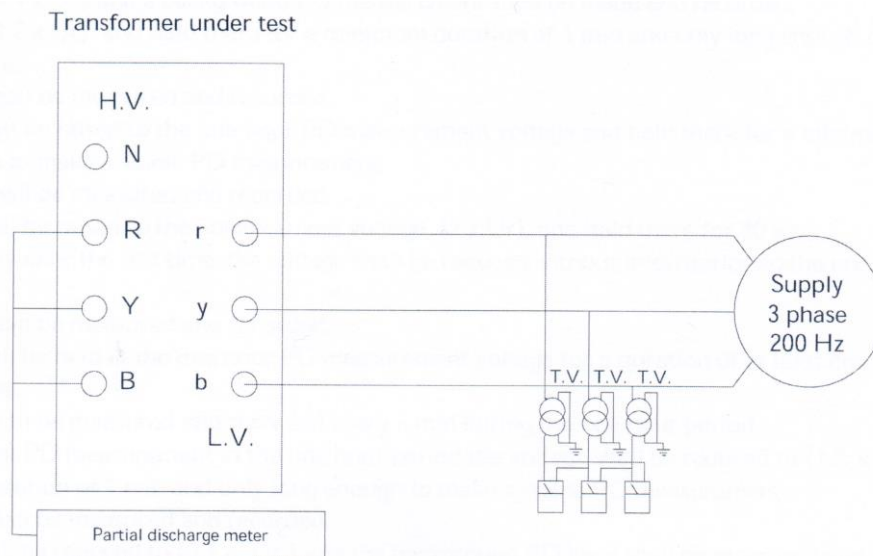
هذا الاختبار يتم إجراؤه لكشف وجود أى تفريغ جزئى في العوازل في المحولات ، حيث يمكن أن يحدث نوع من أنواع الـ Partial Discharge, PD في أي جزء من أجزاء العازل ، وقيمة المجال الكهربى الداخلي يمكن أن تكون كافية لتحويله من PD إلى انهيار كامل .

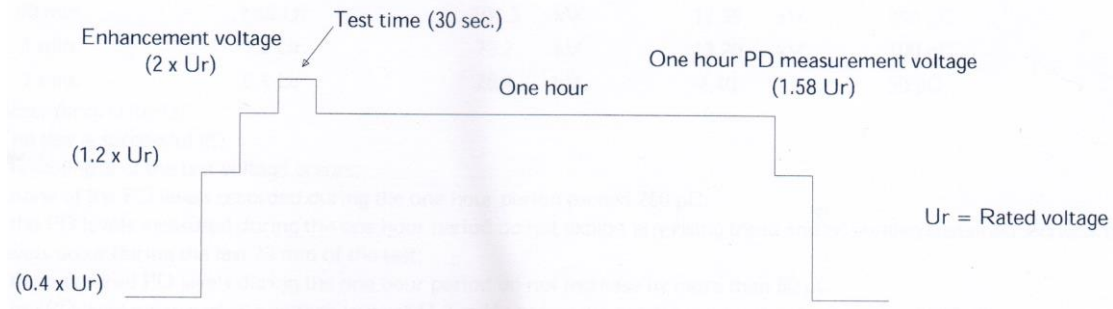
والـ PD يمكن أيضا أن يحدث بالزيت فينتج هيدروجين مذاب داخل الزيت ، وهذا من الصعب اكتشافه لأن عينة الزيت التي نأخذها ربما تكون من مكان ليس فيه هذا التفريغ . وأهم أسباب الـ PD وجود رطوبة في العوازل السائلة أو وجود cavity في العزل نتيجة عيوب تصنيع في العوازل الصلبة ، أو وجود شوائب (فقايع /أجزاء معدنية ) نتيجة حدوث fault مثلا.

وهناك طريقتين لقياس مستوى PD : الطريقة الكهربائية و الطريقة الصوتية وهما غالبا غير شائعتين فى المحطات لكنى أعرضهما فى نهاية هذا الجزء لتمام الصورة.

### 1-6-14 الطريقة الكهربائية للقياس PD

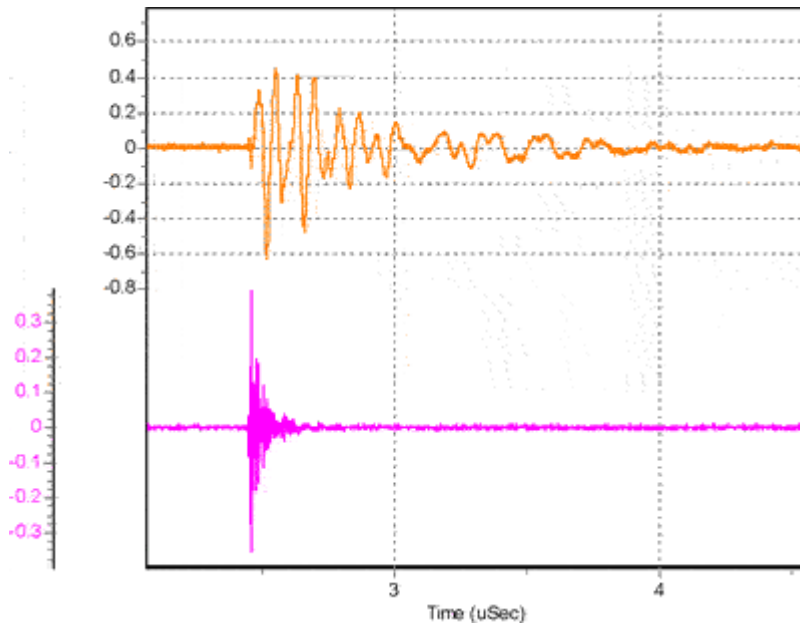
بفرض أن لدينا فجوة هوائية في عزل الـ Bushings نتيجة عيوب تصنيع أو التقادم ، وأن هذه الفجوة بدأت في التسبب في حدوث partial discharge ، ولاكتشاف هذا الـ PD فإننا نزيد الجهد الموضوع على المحول تدريجيا حتى يبدأ الـ PD. في الحدوث. ويكون الجهد المطبق متدرجا في الزيادة كما في الشكل التالى ، ويصل إلى ضعف المعتاد ويستمر الجهد موجودا بما يعادل (حوالى 30 ثانية) ، ثم ينخفض إلى حوالى مرة ونصف المعتاد ويستمر لمدة ساعة كاملة كما في الشكل التالى الذى تظهر فيه أيضا دائرة الاختبار





وتسمى قيمة الفولت هذه بجهد البداية Inception Voltage ، وبالطبع سنكتشف ذلك من خلال الارتفاع في قيمة التيار المتسرب كما في الشكل 5-14 لأنه عند هذه القيمة من الجهد سيكسر المجال الكهربائي قيمة العزل ويصبح هناك bridge أي كوبري فوق الفجوة ومن ثم تقل قيمة العزل الإجمالية بسبب هذا الكوبري وترتفع قيمة التيار، بعدها نبدأ في خفض الجهد تدريجياً حتى يتوقف الـ PD وتسمى هذه النقطة بجهد التوقف Extinction V. الآن إذا كانت قيمة الـ Extinction V أقل من جهد التشغيل فهذا يعني وجود خطورة حقيقية على المحول لأن ذلك يعني أن الـ PD لن يتوقف أبداً. أما إذا كانت أعلى من جهد التشغيل فإن الـ PD الموجود ليس خطيراً. لاحظ أننا نضع مكثفات على التوازي مع الجزء المراد اختباره لقياس الشحنة التي تنتج من الـ PD.

وأخيراً فإن المعلومات التي نحصل عليها من هذا الاختبار (مثلاً شكل الـ Pulses ، وقيمتها ومدتها ) كل ذلك يدرس ليعطى تقييماً لخطورة الـ PD.



شكل 5-14 : نتائج الطريقة الكهربائية للقياس PD



## 14-6-2 الطريقة الصوتية للقياس PD

تتميز هذه الطريقة بأن المحول المختبر يظل في الخدمة في الظروف الطبيعية لكن نضع sensors في الأماكن على سطح المحول التي يشتبه في حدوث PD عندها ، وترسل هذه الـ sensors إشارات لمحلل كهربائي Electric analyzer على الكمبيوتر كما في الصورة ليقوم أولاً بعمل filters للـ noise ثم تحليل للترددات المختلفة الواردة من كل مكان وضع فيه الـ sensor لتحديد مكان الـ PD .



## 14-6-3 قوة عزل الورق المشبع بالزيت

الورق المستخدم في العزل يتعرض لضعف في عازليته مع العمر ، ولابد من متابعة قوته بالاختبارات كل فترة حتى لا ينهار فجأة. ومن المعروف أن جزيئات السيليلوز في الورق تتكون من حلقات طويلة تعطى القوة لجزيئات الورق ، واختبار الـ PD يقيس متوسط عدد هذه الحلقات في الجزيء الواحد ، والتي تتناقص مع العمر ، ففي حالة العزل الجديد يكون عددها في حدود 1000-1400 أما عند الانهيار فيصل حوالي 200 فقط.

## المجموعة الثانية من الاختبارات

## 14-7 اختبارات تحمل العازل للجهود المختلفة

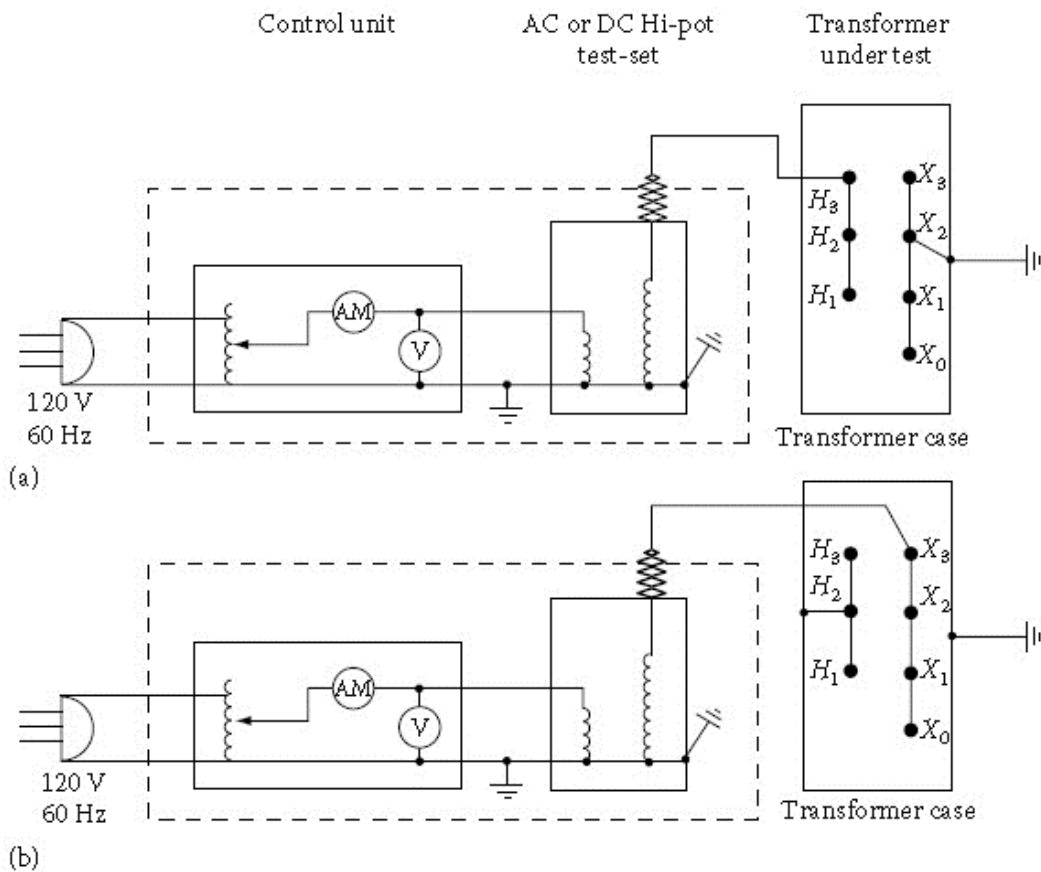
الهدف من هذه النوعية من الاختبارات هو التأكد من تحمل العازل لكافة الجهود التي يمكن أن يتعرض لها في الحياة الواقعية سواء الجهد العادي أو الجهد المرتفع . وبالطبع سيكون تحميله للجهد المرتفع لمدة زمنية وجيزة كما سنرى .

## 14-7-1 اختبار الـ Applied Voltage Test (High Pot. Test)

في هذا الاختبار نضع جهد يساوي تقريبا ضعف الـ Line Voltage ، أى  $2V_L$  ، على كل Winding ( يجرى مرة على الـ High side ومرة أخرى على الـ Low side كما في الشكل التالي ) لمدة دقيقة لنختبر تحمل كل Phase لهذا الجهد الذي سيظهر عمليا عليه إذا حدث فقد لأحد الـ 3-phases ، وأصبح المحول يعمل على Two-Phases فقط. أو عند حدوث Phase/Ground Fault على أحد الـ Phases مما يؤدي لحدوث doubling للجهد نتيجة Transient Reflection .

ويسمى هذا الاختبار أيضا withstand voltage test ، ويمكن أن يتم اجراءه مرة على أطراف الجهد العالية ومرة أخرى على أطراف الجهد المنخفض كما في الشكل التالي.

يجرى تطبيق الاختبار لمدة 60 ثانية ويتم تسجيل قيمة الـ Leakage current المتسرب أثناء الاختبار والذي يجب نظريا أن يساوى صفر لكن سيكون له قيمة منخفضة تقدر بالميكرو أمبير .



وتجدر الإشارة إلى أن مقدار الجهد المسلط للاختبار يعتمد على مقدار فولتية الملف فمثلا ملف 11 كيلو فولت نسلط عليه 28 كيلو فولت ، وملف الـ 33 كيلو فولت نسلط عليه 70 كيلو فولت . أما ملف 132 كيلو فولت فنسلط عليه 140 كيلو فولت ، وملف الـ 400 كيلو فولت نسلط عليه 50 كيلو فولت فقط.

لاحظ أن ملفي 132 و 400 كيلو فولت فيهما عزل متدرج - graded insulation ، ولذلك يكون مقدار جهد الاختبار كما ذكرنا ، وليس ضعف الفولتية للملف.

خطوات التنفيذ تجرى حسب الوصف التالي:

- 1- Connect hi-pot test set between high-voltage winding and ground.
- 2- Gradually increase test voltage to the desired value.
- 3- Allow test voltage duration of 1 min, after which gradually decrease voltage to zero.
- 4- Remove low-voltage to ground jumper and connect hi-pot test set between low-voltage winding and ground. Also connect the short-circuited high-voltage winding to ground.
- 5- Gradually increase test voltage to desired value.
- 6- Allow the test voltage duration of 1 min, after which gradually decrease voltage to zero.

إذا لم يحدث انهيار للعزل أثناء الاختبار فالمحول سليم ويمكن وضعه في الشبكة.

ملاحظات:

- المحولات الأعلى من 33 كيلو فولت لا يستخدم معها الـ DC .
- هذا الاختبار لا يدخل ضمن الـ routine tests ولكنه يستخدم فقط بعد عمليات الصيانة الكبيرة.

## 14-7-2 اختبار الـ Induced Voltage (with partial discharge measurement)

في هذه الحالة نضع جهد عالي على الابتدائي في حين أن الثانوي يكون open ، ثم يعاد بوضع الجهد العالي على المنخفض لنختبر جودة عزل turn-to-turn.

وحتى نضمن ألا يحدث saturation للقلب core أثناء الاختبار بسبب الـ High Excitation. فإننا نستخدم جهدا عاليا له تردد أعلى من الطبيعي ، و في الغالب يكون 200 Hz .

وترجع أهمية هذا الاختبار إلى أن المحول في حالة العمل قد يتعرض إلى قطع في أحد خطوط التغذية الكهربائية ، وهذا يؤدي إلى حدوث ظاهرة resonant effect مما يتسبب في ظهور موجات فولتية عالية ذات ذبذبة عالية قد تدمر المحول إذا كان هناك ضعف بالعزل ، ومن هنا جاءت أهمية هذا الاختبار.

وهذا الفحص من الفحوصات القاسية على عوازل المحول لكنه مفيد جدا حيث يبين كفاءة العزل بين طبقات الملف وبين هذه الطبقات والطبقات الأخرى من خلال اكتشاف الفجوات الهوائية بين تلك الطبقات ، والتي تكتشف بواسطة الفولت العالي ذو الذبذبة العالية الذي نستخدمه ، حيث أن الذبذبة العالية تضرب بشدة على تلك الفجوات - إن وجدت بالعوازل - مما يؤدي إلى حدوث spark في منطقة الفجوات الهوائية

تؤدي إلى حدوث تيار عالي في أجهزة الفحص ، وفي هذه الحالة نعتبر المحول قد فشل في اجتياز الفحص .

### 14-7-3 اختبار الـ Impulse Voltage

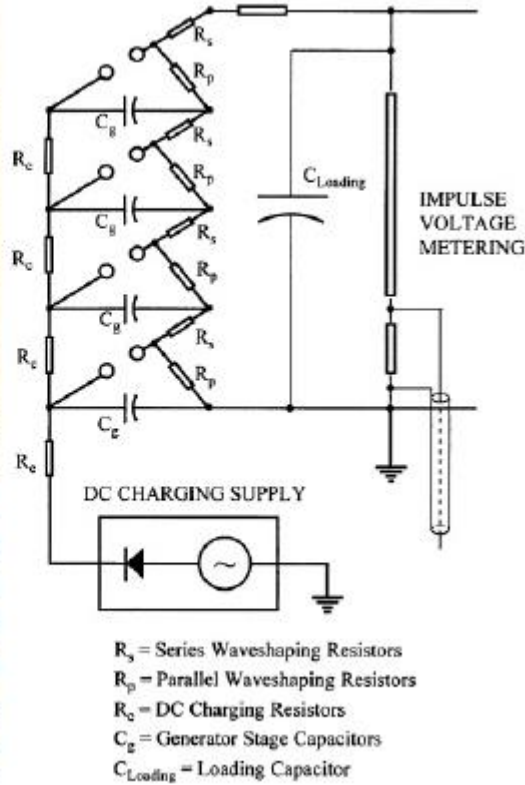
الاختبار الثالث الذي يطبق لفحص جودة العزل عند الجهود المختلفة هو اختبار الـ impulse حيث يطبق جهد عالي جداً لمدة وجيزة جداً وذلك لمحاكاة حدوث high transient بسبب البرق مثلاً أو بسبب فتح أو غلق مكثفات أو قواطع في الشبكة .

وهذا الاختبار يستخدم لقياس منسوب عزل ( BIL ) ( Basic Impulse Insulation level ) أي يحدد قدرة العوازل داخل المحول على تحمل الارتفاع المفاجئ في الجهد نتيجة - كما ذكرنا - للصواعق أو أي مصدر داخلي من مصادر ارتفاع الجهد المفاجئ كقصر الدائرة و عمليات الفصل والتوصيل على المحول .

#### ملاحظات هامة

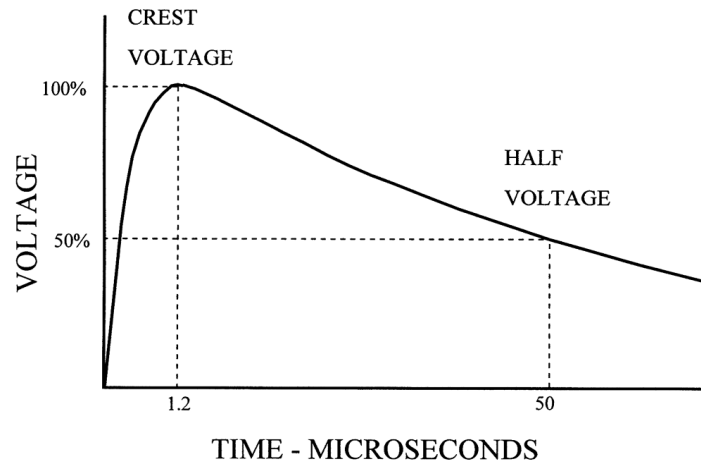
- إذا كان المحول موصولاً بكابلات على كلاً من جانبيه فإن احتمال تعرضه لموجة جهد Impulse ناتجة عن صاعقة أو عوامل خارجية يكون ضئيلاً جداً نظراً لأن الكابلات تكون مدفونة كما أن الكابلات لها قدرة أكبر من الخطوط الهوائية على توهين وإضعاف شدة موجة الجهد الدفعية Impulse .
  - استخدام مانعة صواعق لحماية المحول لا يعنى أننا نسمح بخفض قدرة عزل المحول المطلوبة .
  - الصواعق تظهر عادةً على شكل موجة راحلة على الخط ( Traveling Waves ) فيجب أن توضع مانعة الصواعق بحيث تكون أقرب ما يمكن من المحول .
  - قصر الدائرة و عمليات الفصل و التوصيل تؤدي إلى ارتفاع عابر في الجهد Transient بنفس تردد الشبكة ( Natural frequency ) ، أما زيادة الجهد الناشئة عن الصواعق و العوامل الجوية فتكون لها تردد أعلى بكثير من تردد الشبكة .
  - المعاوقة للجهود الدفعية ( surge Impedance ) في المحولات تكون كبيرة بالمقارنة بباقي مكونات منظومات القوى . وهي أقل في حالة المحولات الجافة عنها في المحولات المغمورة في الزيت و لهذا تكون قيمة BIL في المحولات الجافة أقل منها في المحولات المغمورة في الزيت .
- ومن المهم أن يكون الجهد المطبق موافق للمواصفات المعروفة لمثل هذا الاختبار حتى لا يحدث انهيار أو تدمير للمحول. وهذا الجهد العالي نحصل عليه من Surge Generator يكون عادة عبارة من مجموعة من المكثفات يتم شحنهم على التوازي خلال  $R_p$  من مصدر low voltage ثم يتم التفريغ إلى

التوالي في الجهاز المراد فحصه لتحصل على الجهد العالي خلال الـ  $R_s$  بعد اهيار العزل بين الكرتين كما في الشكل 6-14.



شكل 6-14 : شكل الـ Surge Generator

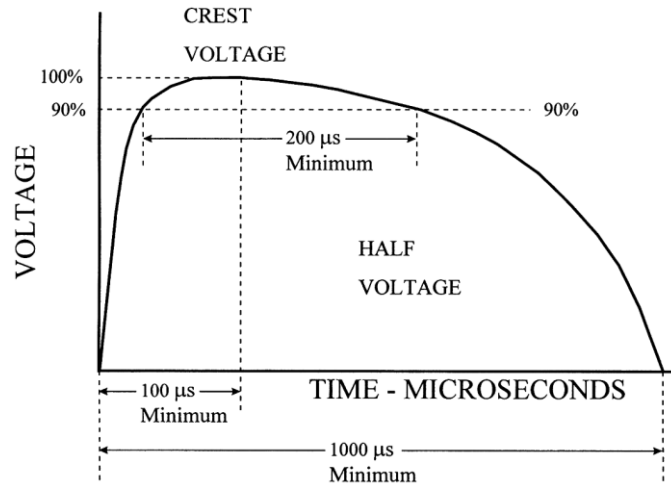
والشكل القياسي لهذه الموجة يتوقف على نوع الاختبار ، حيث أنه لدينا هنا اختبارين : الأول هو Lightning Impulse Test والموجة المستخدمة لعمل Simulation له تظهر في الشكل 7-14.



شكل 7-14 : شكل الإشارة المستخدمة في Lightning Impulse Test

وكما هو واضح من الشكل فإن الجهد الأقصى peak يحدث بعد  $1.2 \mu\text{sec}$  ، ثم ينزل إلى النصف في حوالي  $50 \mu\text{sec}$  وتتوقف قيمة الـ peak على مستوى العزل ، وتكون في الغالب بين 5-30 ضعف الجهد المقنن للعزل ويجب الرجوع لكتالوج المحول لمعرفة القيمة التي يجب إجراء الاختبار عليها .

أما الاختبار الثانى فهو Switching Impulse Test ، حيث نستخدم الموجة فى الشكل 8-14 لتمثيل حدوث High Voltage Switching وهى تختلف قليلا فى الشكل عن الموجة السابقة ، ولكنها تختلف كثيرا فى القيم لاختلاف تأثير البرق (الأخطر) عن تأثير فتح وغلق الـ Switches .



شكل 8-14 : شكل الإشارة المستخدمة فى Switching Impulse Test

والجدول التالى مأخوذ من مواصفات الـ IEC ويمكنك منه تحديد قيمة جهد الاختبار حسب جهد المحول.

**Table 2 – Rated withstand voltages for transformer windings with highest voltage for equipment  $U_m \leq 170$  kV – Series I based on European practice**

Highest voltage for equipment $U_m$ kV r.m.s.	Rated lightning impulse withstand voltage kV peak	Rated short duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s.
3,6	20	10
7,2	40	20
12	60	28
17,5	75	38
24	95	50
	125	
36	145	70
	170	
52	250	95
60	280	115
72,5	325	140
100	380	150
123	450	185
145	550	230
170	650	275
	750	325

NOTE Dotted lines may require additional phase-to-phase withstand tests to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met.

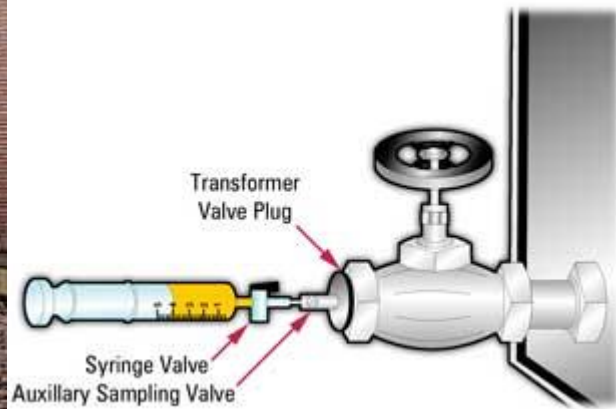
## 8-14 المجموعة الثالثة : اختبارات زيت المحول

الزيت هو أحد العوازل المستخدمة في المحول ، لكن له مجموعة خاصة بالاختبارات ، لها شروطها وأساليبها الخاصة التي تختلف عن فحص العوازل العادية .



## 14-8-1 طريقة أخذ العينة

تبدأ جميع اختبارات الزيت بأخذ عينة من المحول ، وهذه النقطة غاية في الأهمية ، لأن الخطأ في أسلوب أخذ العينة سيؤثر حتماً على النتائج التي ستحصل عليها من تحليل الزيت في المعمل الكيميائي بعد ذلك .  
وجميع المحولات تزود بمخرج خاص لأخذ عينات الزيت كما في الصورة .



ويتوقف تحديد مكان أخذ العينة على نوع السائل الموجود بالمحول ، فالسوائل التي لها كثافة نوعية أعلى من واحد صحيح مثل الـ Askarels يجب أن تؤخذ عينتها من قمة المحول لأنه لو كانت هناك فقاعات مياه مثلاً بالزيت فإنها ستطفو لأنها أقل كثافة منه ، ولذا نأخذ العينة من أعلى لتمثل حقيقة السائل الفعلية ، أما الزيوت المعدنية mineral oil فإن كثافتها أقل من الماء فتطفو فوق الماء - إن وجد الماء - ولذا تؤخذ العينة من أسفل المحول .

## 4-8-2 احتياطات عند عمل اختبار عازلية الزيت

- قنينة الزيت تمزج جيداً بطريقة الرج دون توليد فقاعات هوائية
- وعاء الفحص ينظف بزيوت المحولات مرتين أو ثلاث مرات
- يسكب الزيت في وعاء الفحص حتى يصل الى مستوى 20 مم من فوهته العليا ، ويجب أن يجري السكب بالشكل الذي يمنع تكون فقاعات هوائية . ثم يترك الوعاء على جهاز الفحص لمدة 10-15 دقيقة كي تتلاشى احتمالات وجود فقاعات هوائية.
- يمنع منعاً باتاً لمس الزيت قبل الفحص أو لمس الكرتين بالأصابع ، ويمنع تنظيف وعاء الفحص بقطعة قماش لمنع احتمالات سقوط شعيرات القماش وتلاصقها بجدران الوعاء .



**Oil Dielectric Strength Test 3-8-4 اختبار عازلية الزيت**

في هذا الاختبار نفحص قدرة تحمل الزيت للجهود العالية ، فتؤخذ عينة من الزيت وتوضع في كوب قياسي الأبعاد بين إلكترودين داخل جهاز الفحص بينها مسافة قياسية أيضا كما في الشكل 9-14 ، وبعد سكون حركة الزيت في الوعاء الفاحص ، يطبق على الكرتين الجهد الكهربائي تدريجيا بمعدل 2-5 ك.ف/ثانية ، مع ملاحظة القيم من خلال جهاز الفولتميتر ، ويستمر رفع الجهد حتى انهيار عزل الزيت ، وعندها تفصل الدائرة الكهربائية تلقائياً ، ويسجل جهد انهيار العزل . ويعاد الاختبار أكثر من مرة بعد تغيير الكوب ووضع كمية أخرى من الزيت المأخوذ من نفس العينة (العينة تكفي لعدة أكواب) وعادة يتم الاختبار 5 مرات على فترات زمنية ما بين 5 إلى 10 دقائق بين فحص وآخر ثم نحسب القيمة المتوسطة للقيم المقاسة ، وتكون النتيجة مرضية إذا لم تكسر قوته العازلة في جهاز الاختبار بالنسبة لجهد 11 ك.ف عند أقل من 30 ك.ف/ 2.5 مم وبالنسبة لجهد 66 ك.ف تكون النتيجة مرضية إذا لم تكسر قوته العازلة في جهاز الاختبار عند أقل من 50 ك.ف/ 2.5 مم. أما إذا انخفضت عن ذلك فهذا دليل على وجود شوائب أو رطوبة بالزيت أو أحماض ولا حاجة عندئذ لعمل فحص كيميائي مكلف .



شكل 9-14 : جهاز الفحص عازلية الزيت

**4-8-14 تحليل الزيت Dissolved Gas Analysis**

هذا واحد من أهم التحاليل التي يمكن من خلالها تحديد حالة المحول ويعرف اختصاراً بالـ DGA ، وهو مناسب ليس فقط لفحص حالة عازلية الزيت ولكنه يكشف بعض الظواهر التي يظهر تأثيرها مباشرة علي حالة الزيت ، فيمكن مثلاً من خلال هذا التحليل معرفة حقيقة حدوث شرارة داخلية من عدمه ، أو

حقيقة وجود bad contact ، أو وجود hot spot أو حدوث Partial Discharge ، أو حدوث حرارة زائدة من الموصلات ...الخ. فجودة الزيت تعكس جودة المحول عموماً .

والحديث هنا في هذا الجزء من الكتاب مركز على المحولات ذات الملفات المصنعة من النحاس ، والعزل المستخدم فيها عبارة عن ورق السيلولوز ، أو مواد صلبة مكبوسة ، و مملوءة بالزيت الطبيعي الهيدروكربوني ( Hydro-carbon Mineral Oil ).

ومن المعلوم أن المحولات تعمل تحت ظروف وأحمال متغيرة ، وقد يخضع عزل ملفات المحولات لدرجات حرارة عالية ، وكذلك قد يخضع لجهود حرارية وكهربية تتسبب في تآكل للمواد العازلة الصلبة ، مثل الورق المضغوط وبالتالي تنشأ غازات من أنواع مختلفة ثم تذوب هذه الغازات في زيت المحول ، ويمكن الكشف عنها بعمل تحليل كيميائي.

ومن الأسباب الرئيسية لحدوث تآكل أو انهيار للمواد العازلة حدوث الـ ( Hot Spots ) ، أو حدوث قوس كهربائي ( Arcing ) . ومثل هذه الأعطال قد لا تسبب في انهيار لحظي بل يمكن أن يستمر عمل المحول في وجود هذه الأعطال ولكن Rating للمحول ينخفض نتيجة وجود هذه الأعطال .

ويمكن تقسيم الغازات الذائبة في الزيت إلى قسمين :

غازات ناتجة من تحلل الزيت بالحرارة أثناء الأعطال وهي :

غاز الهيدروجين ويرمز له H2	غاز الميثان ويرمز له CH4
غاز الايثان ويرمز له C2H6	غاز الايثيلين ويرمز له C2H4
غاز الاستيلين ويرمز له C2H2	غاز البروبان ويرمز له C3H6

فمن المعلوم أنه نتيجة درجات حرارة التشغيل العادية قد يحدث تحلل بسيط للزيت وينتج عنه غازي هيدروجين وميثان ، أما إذا كان مستوى الطاقة مرتفع ، وحدثت مثلاً ( Hot Spots ) فإن درجات الحرارة ترتفع ما بين 150°م إلى 1000°م مسببة تحلل الزيت ، و ينتج غاز الايثان C2H6 يصاحبه قوس كهربائي ، أما إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 3000°م فينتج غاز الاستيلين C2H2 .

غازات ناتجة من تحلل المواد السليولوزية ( Cellulose ) :

ينتج عن تحلل المواد العازلة السليولوزية كل من غازي أول وثاني أكسيد الكربون ( CO<sub>2</sub> ، CO ) بنسب مرتفعة أكبر من الغازات الأخرى ، وقد ينتج كل من أول وثاني أكسيد الكربون نتيجة التشغيل العادي للمحولات ، وتزيد النسبة بزيادة عمر المحول ، بالإضافة إلى أنه نتيجة عمليات التجفيف ، ثم ملء المحولات بالزيت بالمصنع فإنه قد يحدث تحليل للمواد العازلة السليولوزية و نتيجة لذلك فإن بعضاً من غازي ( CO<sub>2</sub> ، CO ) تبقى بالمحول ، كذلك فإن المحولات التي تملأ بغاز CO أثناء عمليات النقل

، يكون من الصعوبة التخلص منه بعد ذلك ، ولذا يجب أن يؤخذ كل ذلك في الاعتبار بعد ذلك عند عمل تحليل لنسب الغازات الذائبة .

وبالإضافة إلى ذلك فإن المحولات التي تحتوى على خزان احتياطي يمكن أن يدخل غاز  $CO_2$  مع الهواء الجوى بنسب تصل إلى حوالي 300 ميكرو لتر لكل لتر من الزيت ، وعلى هذا فإنه عند تحليل الغازات الذائبة بالزيت تكون كمية  $CO_2$  الناتجة إما أنها من المواد السليولوزية نتيجة الأسباب السابقة ، أو نتيجة خلل بالمواد السليولوزية .

### 3- غازات ناتجة من ظروف طبيعية للتشغيل

درجات حرارة التشغيل العادية يمكن أن تتسبب في تحلل بسيط للزيت وينتج عنه كما ذكرنا غازي هيدروجين وميثان ، علما بأنه يمكن أن نجد غازات أخرى بالزيت في الظروف الطبيعية وبدون أعطال . ومصادر هذه الغازات في مثل هذه الحالات يمكن تلخيصها كالآتي :

- غازات تتشكل خلال عمليات التكرير ، ولا يمكن التخلص منها بواسطة عمليات طرد الغازات من الزيت ( Oil Degassing ) .
- غازات تتشكل خلال عمليات التخفيف وغمس المحولات في المصنع .
- غازات تتشكل نتيجة أعطال سابقة ولم يمكن التخلص منها بالكامل أثناء عمليات التكرير .
- غازات تتشكل أثناء عمليات التصليح مثل لحام النحاس .

وللتغلب على هذه المشاكل ، تقترح المواصفات العالمية القياسية ، أن يتم عمل تحليل للغازات الذائبة بعد التشغيل الأولى المحول ، وتسمى ( Benchmark ) وتعتبر كمرجع للمحول عند عمل تحليل للغازات المحول بعد ذلك ، وهي بالطبع تختلف من محول إلى آخر .

والجدول 1-14 يعطى التركيز المسموح به للغازات المذابة في زيت المحولات مقاسة بوحدة قياس تعرف بال جزء من المليون ( PPM ) Part Per Million

جدول 1-14 : التركيز المسموح به للغازات المذابة في زيت المحولات

الغاز	أقل من أربع سنوات فى الخدمة	4-6 سنوات فى الخدمة	أكثر من عشر سنوات فى الخدمة
هيدروجين	150/100	300/200	300/200
ميثان	70/50	150/100	300/200
استلين	30/20	50/30	150/100
إيثلين	150/100	200/150	400/200

1000/800	150/100	50/30	ايثان
700/600	500/400	300/200	أول أكسيد الكربون
12000/9000	5000/4000	3500/3000	أول أكسيد الكربون

ويتم عمل تحليل DGA غالبا بصورة نصف سنوية في المحولات 69 kV فما فوق ، وهو يشبه الفحص الطبى الشامل الذي يقوم به الإنسان على نفسه دوريا ، فتحليل الـ DGA يبحث عن وجود غازات معينة في الزيت ، وظهور أى واحد منها مؤشر على مشكلة معينة للعزل .

#### 14-8-4 الطرق العامة لتفسير النتائج

1- قوس كهربى فى الزيت بدون تحلل لأي مواد عازلة صلبة . والغازات الرئيسية فى هذه الحالة تكون :

هيدروجين	60-80% من الحجم .
أستلين	10-25% من الحجم .
ميثان	1.5-3.5% من الحجم .
اثيلين	1-2% من الحجم .

2- قوس كهربى خلال المواد العازلة الصلبة : الغازات الناتجة من حدوث قوس فى الزيت مع جزء خلال مادة عازلة صلبة مثل الورق أو الورق المضغوط عبارة عن كمية كبيرة من غاز الهيدروجين والاستيلين مصحوبا بكمية كبيرة من أول أكسيد الكربون ، نسبة الميثان اكبر منه فى الحالة الأولى .

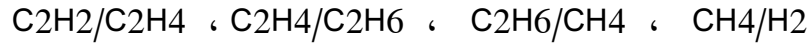
3- تفريغ جزئى فى مادة السليلوز وفى الزيت : الغازات الرئيسية فى هذه الحالة هى الهيدروجين ، ميثان ، أول أكسيد الكربون ، ثانى أكسيد الكربون ، بينما غاز الاستيلين لا يظهر .

4- تحليل حرارى للزيت : يحدث تحليل حرارى عند درجة حرارة 400 م° ويزيد بزيادة ارتفاع درجة الحرارة وشكل الغازات يكون جزيئات منخفضة هيدروكربونية أساسا ، ميثان ، ايثان ، استيلين ، هيدروجين عند درجة حرارة 600 م° الغازات المخلوطة تتكون من ميثان وهيدروجين . يوجد أيضا ثانى أكسيد الكربون ولكن تتحلل عند درجات الحرارة الأعلى .

5- تحلل حرارى لمادة سليلوز وللزيت : فى هذه الحالة الغازات الأساسية عبارة عن ثانى أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون بالإضافة الى الهيدروجين عند درجات الحرارة أعلى من 500 م° .

## 14-8-5 طريقة روجرز لتفسير النتائج Roger's Method

هذه الطريقة ممتازة في حالة الغازات الهيدروكربونية . وبمعرفة نسب الغازات يمكن الكشف عن نوع العطل . وباستخدام هذه الطريقة لا نحتاج لمعرفة حجم عينة الزيت ، حيث يتم في هذه الطريقة استخدام أربع نسب للغازات هي : ميثان : هيدروجين ، ايثان : ميثان ، ايثلين : ايثان ، استيلين : ايثلين .



وهذه النسبة يمكن أن تكون أكبر من الواحد أو أقل ، وتشخيص الأعطال المختلفة يكون عن طريق حساب النسبة بين تركيز الغازات السابقة. ويخلص الجدول 14-2 الأسباب المحتملة لظهور كل غاز في تحليل الزيت أن وجد:

جدول 14-2 : الأسباب المحتملة لظهور الغازات في تحليل الزيت

Type Of Gas	Caused By
CARBON MONOXIDE, CO	Ageing
CARBON DIOXIDE, CO <sub>2</sub>	
HYDROGEN, H <sub>2</sub>	Electric arcs
ACETYLENE, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
ETHANE, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Local overheating
ETHENE, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
PROPANE, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	
HYDROGEN, H <sub>2</sub>	Corona
METHANE, CH <sub>4</sub>	

## 14-8-6 قياس نسبة الرطوبة بالزيت

اختبار قياس الرطوبة بالزيت هو أحد الاختبارات الروتينية التي تجري على عينات الزيت المأخوذة من المحول ، وتقيم كمية الرطوبة حسب حرارة الملفات وحرارة العينة المأخوذة ، وللتدليل على خطورة وجود رطوبة بالمحولات يكفي أن نعرف أن وجود 2000 ppm ( ppm = part per million ) من الأكسجين المذاب بالزيت يعتبر مدمر للمحول ، ولذا ففي DGA يعتبر قياس نسبة الرطوبة m مقارنة بالوزن الجاف dw ( m/dw ) وتسمى أيضا بنسبة التشبع في العزل الورقي ، تعتبر هذه النسبة ذات مدلول هام وخطير ، فلو صارت هذه النسبة أكبر من 2% فلا بد من وضع خطة عاجلة لسحب الزيت من المحول وإدخاله في مرحلة التجفيف Drying ، ولا يسمح أبدا لهذه النسبة أن تتجاوز 2.5%.

والسبب في ذلك أن تجمع الرطوبة و الأكسجين المذاب مع الحرارة هم مفاتيح انهيار السيليلوز في العوازل الورقية ( Kraft paper ) المستخدمة لعزل الملفات ، ويحدث الـ Degradation بسرعة متزايدة ، ومن ثم ينهار العزل سريعا. وتذكر دائما أن عمر المحول هو تقريبا عمر الورق العازل داخله ، ومن ثم فإن تزايد الرطوبة لضعف القيمة ينزل بالعمر للنصف ، لأن عمر الورق ( Kraft paper ) يعتمد على نسبة الماء والأكسجين بالزيت.

ولإعطاء فكرة عن الأرقام الطبيعية فوجود رطوبة 35 ppm عند 60 درجة مئوية بالمحولات ذات الجهد الأعلى من 66kV يعتبر مقبولا ، أما المحولات الأعلى من 220 kV فلا يجب ألا تتجاوز الرطوبة نسبة 12 ppm عند 60 درجة.

#### 14-8-7 تجفيف المحولات

يجب تفريغ الزيت من الـ tank ونقله لفرن تجفيف إذا تجاوزت الرطوبة النسب المسموح بها ، وبالطبع فهذه طريقة مكلفة وهناك طرق أخرى للوصول لنفس النتيجة بصورة أيسر مثل طريقة hot oil flush حيث يسخن الزيت خلال فلتر ثم يسخن ثم يعود للـ tank في صورة spray فوق الـ Core والملفات . وهذا الزيت الساخن له قدرة أكبر عن جذب الرطوبة من الزيت البارد من ثم يأخذ بعض من الرطوبة الموجودة بالـ Core والملفات ، وتكرر العملية ، وكلما كان الزيت الأصلي بالمحلول باردا كلما كانت الكفاءة أعلى. ويعيب هذه العملية بالطبع أنها بطيئة نسبيا .

وهناك طريقة ثالثة حيث يتم عمل Spray للـ Hot oil في وجود تفريغ للهواء ، فحرارة الزيت مع تفريغ الهواء تجعل الرطوبة يحدث لها Flash off فتتبخر سريعا و يحدث التجفيف للمحول.



Vacuum Transformer Oil Purifier/ Dielectric Oil Filtration

## 8-8-14 مواعيد اختبارات الزيت ومواصفاته

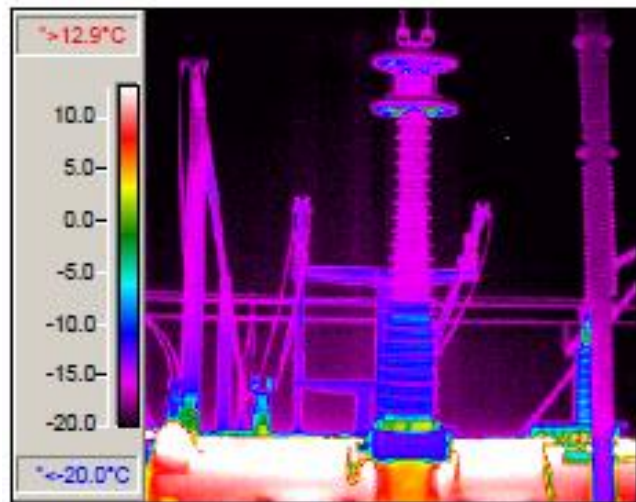
تختلف مواعيد فحص الزيت من فترة لأخرى تبعا لاختلاف جهد المحولات بالطرق التالية:

- يجرى فحص الزيت مرة واحدة كل ثلاث سنوات للمحولات والمعدات ذات الجهد 11 ك.ف
  - بالنسبة للمحولات التي جهدها 35 ك.ف تختبر قوة العزل مرة واحدة في السنة ، ويجرى التحليل الكامل مرة كل ثلاث سنوات.
  - يجرى تحليل الزيت للمعدات مرة كل سنة لجهد أكبر من 35 ك.ف
  - يجرى تحليل الزيت مرة كل سنة بالنسبة للمخارج الحاملة التيار المملوءة بالزيت
  - يجرى تحليل الزيت عقب كل عمرة للمحولات.
- أما الحدود التالية للجهد الكهربائي الذي يجب أن يتحملة الزيت قبل انهياره فتعتبر حدود صغرى يجب المحافظة عليها، بحيث بدونها يعتبر الزيت غير صالح للاستخدام :

- يجب ألا يقل جهد الانهيار عن 20 ك.ف للمحولات ذات الجهد حتى 11 ك.ف
- يجب ألا يقل جهد الانهيار عن 25 ك.ف للمحولات ذات الجهد حتى 35 ك.ف
- يجب ألا يقل جهد الانهيار عن 35 ك.ف للمحولات ذات الجهد حتى 220 ك.ف
- يجب ألا يقل جهد الانهيار عن 45 ك.ف للمحولات ذات الجهد حتى 500 ك.ف.

## 9-8-14 اختبار الـ Infra-Red

فى هذه الاختبار يتم عمل مسح تصويرى لبعض العناصر منها الـ Bushing باستخدام الأشعة الحرارية التى تعطى صورة لمستوى الزيت داخل الجزء المغلق دون فتحه كما فى الصورة.





## 9-14 المجموعة الرابعة : حسابات الـ PARAMETERS للمحول

### 1-9-14 اختبار Transformer Turns Ratio, TTR

اختبار TTR يستخدم لكشف وجود short بين اللفات في الملف الواحد ، وذلك في حالة حدوث انهيار العزل بين اللفات ، وهذا الاختبار يتم فقط أثناء فصل المحول من الكهرباء ، وقد يترتب عليه خروج المحول نهائياً من الخدمة إذا ثبت وجود انهيار كبير بين لفات الملف الواحد .

ومواصفات ANSI تحدد الحد الأقصى بين القيمة المقاسة والقيمة المكتوبة على الـ Nameplate بما لا يتجاوز 0.5% .

ولمعرفة نتيجة الاختبار نطبق العلاقة التالية

$$\frac{\text{measured value} - \text{rated value}}{\text{rated value}} \times 100 \leq \pm 0.5\%$$

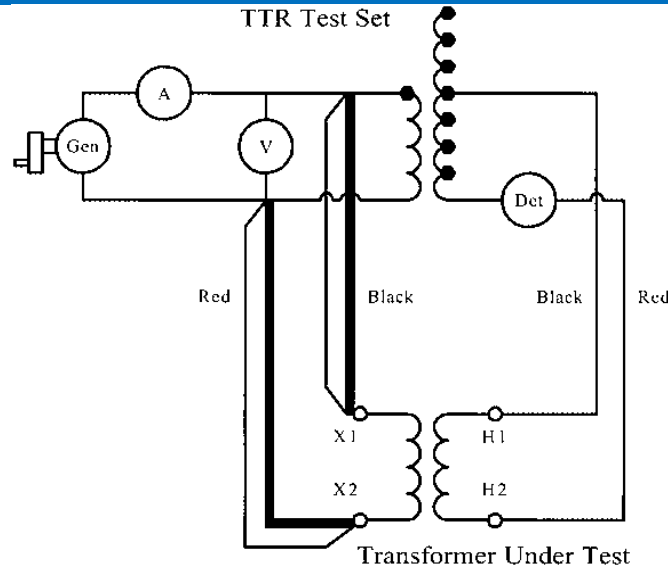
### 2-9-14 الطريقة التقليدية لإجراء اختبار الـ TTR

ويتم إجراء هذا الاختبار بتوصيل واحد من Windings ( غالباً الأعلى جهداً ) بجهد صغير ثم قياس الجهد الناشئ في الـ Winding الآخر عند كافة الـ TAPS المتاحة . ويحسن أن يوضع جهد الاختبار على الجانب الـ HV حتى نضمن ألا يرتفع الجهد في الجانب الآخر عن القيم التي يمكن قياسها أثناء الاختبار .

### 3-9-14 طريقة الـ Ratio Bridge

هذه الطريقة تعتبر من أكثر الطرق دقة في قياس TTR ونسبة الخطأ فيها أقل من غيرها . حيث يتم توصيل ملف الـ Secondary Winding للمحول المراد اختباره على التوازي مع الـ Winding Secondary لمحول قياسي ضمن أجهزة الاختبار ، وتوصيلهما معاً مع مولد جهد 8V كما في الشكل 10-14 ، ويستخدم الفولتميتر لقياس جهد الدخول ، وأميتر لقياس exciting current الذي سيسحب من المولد .





شكل 10-14 : طريقة الـ Ratio Bridge

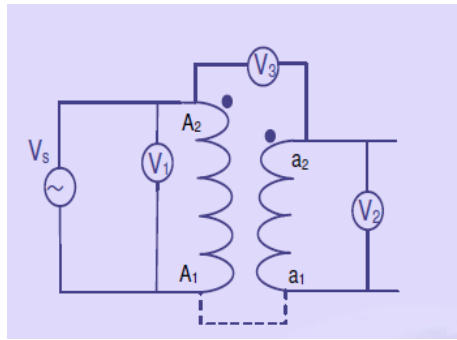
ويتم توصيل الـ primary لكلا المحولين أيضاً معاً على التوازي ، لكن من خلال جلفانومتر بحيث أنه عندما يكون الجهد المتولد في المحول المراد اختباره يساوي تماماً الجهد المتولد في المحول القياسي فإن الجلفانومتر سيقراً صفر .

والمحول القياسي ( ضمن أجهزة الاختبار ) يحتوي على قيم متعددة في primary حتى يمكن ضبط تساوي القيمتين ثم تحسب الـ TTR من المحول القياسي .

نشير هنا إلى أن جهاز فحص نسب التحويل عبارة عن محول single phase double wound transformer- أي يتكون من ملف ابتدائي وملف ثانوي ، وعند إجراء الفحص لمحول فإن الملف الثانوي للجهاز سيكون في حالة ربط توالي مع الملف الثانوي للمحول المراد فحصه أما ملف الابتدائي لجهاز الفحص فيوصل كما ذكرنا على التوازي مع الملف الابتدائي للمحول المراد فحصه (راجع الشكل 10-14) .

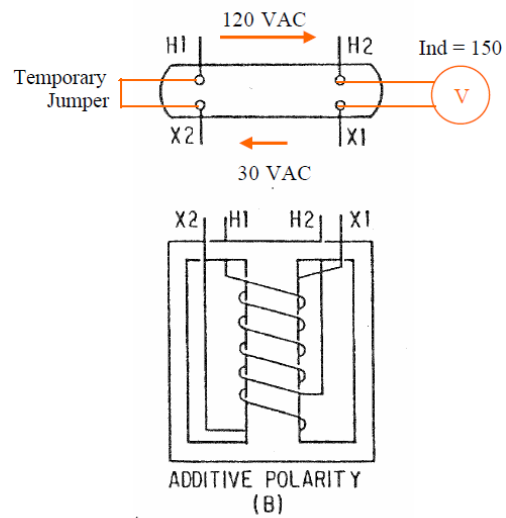
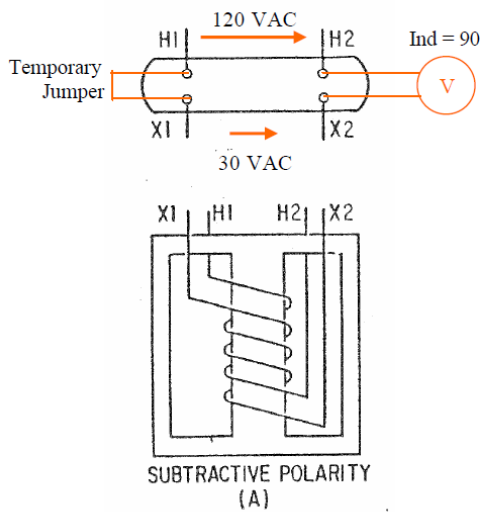
#### 4-9-14 اختبار القطبية Polarity test

هذا الاختبار هام جداً لاسيما عند توصيل محولين على التوازي ، وغالباً فإن الجهاز الذي يقيس TTR هو نفسه يمكنه أن يعطي اتجاه القطبية . ويمكن إجراء الاختبار بطريقة بسيطة كما في الشكل 11-14.



شكل 14-11 : اختبار القطبية

حيث يتم توصيل جهد منخفض ( $V_s$ ) إلى الـ primary winding وتقرأ قيم الفولتمترات  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  فمن معرفة قيمة  $V_1$ ,  $V_2$  يمكن حساب TTR ، ثم ننظر إذا كانت  $V_3 = V_1 - V_2$  فهذا يعني أن الـ dot على الرسم سليمة ، بمعنى أن الجهد يرتفع من  $A_2$  إلى  $A_1$  في الـ primary ، وهذا سيؤدي إلى ارتفاع جهد  $a_2$  بالنسبة إلى  $a_1$  في الـ Secondary ، بمعنى أنها (Subtractive polarity) ، والعكس بالعكس.

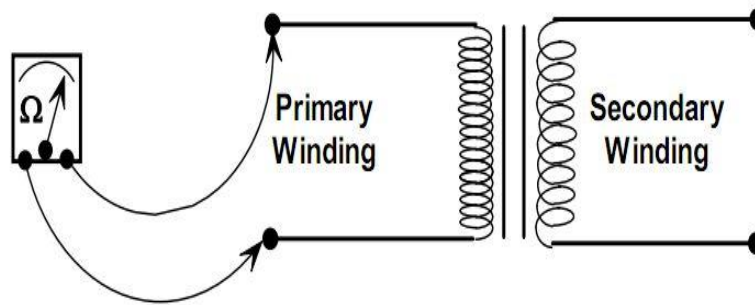


#### 14-9-5 اختبار قياس DC Resistance للملفات

ويسمى أيضا باختبار استمرارية التوصيل ، و هذا الاختبار نلجأ إليه أحيانا للتأكد من وجود أو عدم وجود توصيلات غير محكمة loose connection على الـ Bushings ، أو على الـ Tap changer ، لأن هذه التوصيلات الغير محكمة ينشأ بسببها High contact Resistance. وهذا الاختبار يؤكد وجود هذا الخلل أو ينفيه لاسيما إذا ثبت من خلال DGA وجود غاز الإيثيلين أو الإيثان أو الميثان ، فعندها يكون هذا الاختبار بمثابة التأكيد ، فهذه الغازات تنتج في أحد الاحتمالات نتيجة وجود وصلات غير محكمة . ودائما نلجأ إليه لاسيما أنه اختبار بسيط جداً ، فقط يتم توصيل D.C supply على

الملف وقياس التيار كما فى الشكل 12-14 ، ثم قسمة الجهد على التيار لحساب المقاومة . وبالطبع يمكن استخدام جهاز أفوميتر مباشرة.

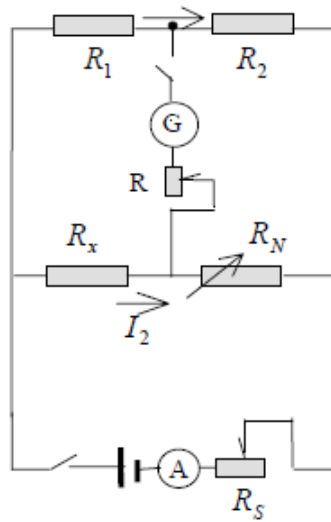
ويتم فى هذا الاختبار قياس المقاومة بين كل وجهين من جانب الجهد العالى ، والتأكد من أنهم جميعا متساويين وأيضا قياس المقاومة بين كل وجهين من جانب الجهد المنخفض والتأكد من أنهم جميعا متساويين ، وكذلك قياس المقاومة بين كل وجه و نقطة التعادل .



شكل 12-14 : اختبار قياس DC Resistance للملفات فى المحولات الأحادية والثلاثية

وهذه الطريقة تصلح جداً مع HV Winding الذي يتميز بتيار منخفض ومقاومة عالية ، أما ال LV Winding فالقياسات فيها تصبح غير دقيقة بسبب صغر مقاومة هذا الجانب ، وفى هذه الحالة يمكن استخدام إحدى طرق Resistance-Bridge ومنها على سبيل المثال قنطرة هويستون المشهورة فى الشكل 13-14 ، والتي نستخدم فيها المقاومات  $R_1$  ،  $R_2$  المعلومة القيمة ، لقياس مقاومة مجهولة هى  $R_x$  وذلك بتغيير قيمة المقاومة  $R_N$  حتى نصل لنقطة الاتزان بين الفرعين وعندها يصبح التيار المار فى الجلفانومتر يساوى صفر وهنا نطبق القاعدة :

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}$$



شكل 14-13 : قنطرة هويستون

في حالة فحص الـ Taps فربما يكون كافياً أن نأخذ قراءات للتاب الأول والأوسط والآخر وبعض شركات الإنتاج تأخذ قراءات كل الـ taps.

وتقارن القيم المقاسة بالقيمة الأصلية المدونة من قبل المصنع ، ونسبة خطأ في حدود 5% تعتبر مقبولة في هذا الاختبار ، ولمزيد من الدقة يجب مراعاة تأثير درجة الحرارة حيث أن المقاومة المقاسة في المصنع كانت عند 75 قياسياً ، ولذا يجب تصحيح القيمة المقاسة في هذا الاختبار إذا كانت درجة الحرارة للملفات مختلفة طبقاً للمعادلات التالية :

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{235 + t_2}{235 + t_1} \quad (\text{for copper}) \quad R_2 = R_1 \cdot \frac{225 + t_2}{225 + t_1} \quad (\text{for aluminium})$$

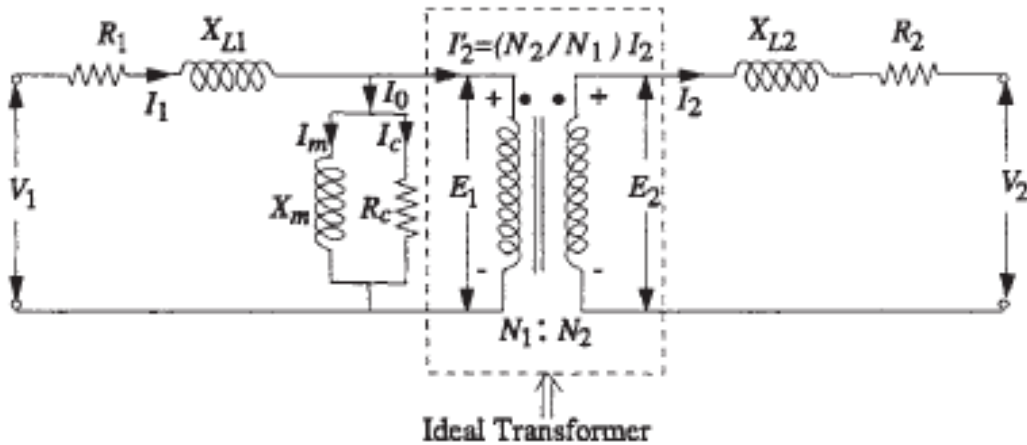
where;  $R_2 = \text{winding resistance at } t_2 \text{ temperature}$

$R_1 = \text{winding resistance at } t_1 \text{ temperature}$

ويجب إجراء هذا الاختبار في نهاية كل الاختبارات الروتينية لأنه يمكن أن يتسبب في حدوث magnetization في الـ Core ، ومن ثم يؤثر على بقية النتائج التالية إن كانت هناك اختبارات أخرى.

#### 14-9-6 اختبار ( No Load Losses ) Open Circuit Test

في الباب الأول ذكرنا أن الدائرة المكافئة للمحول يمكن أن ترسم كما في الشكل 14-14.



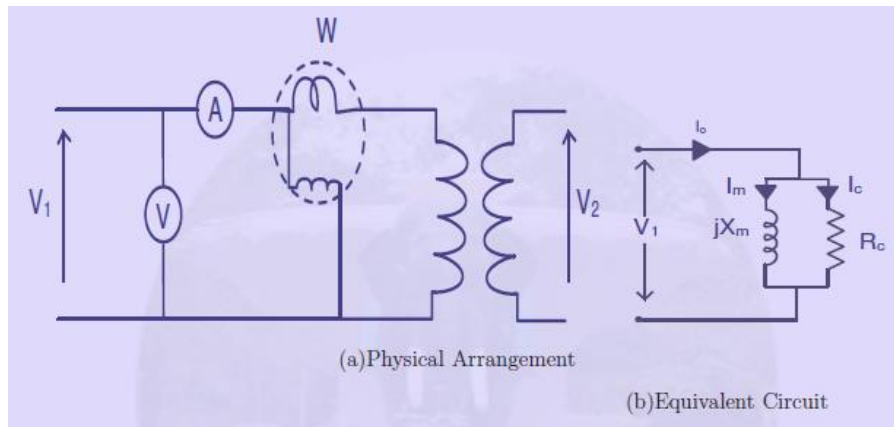
شكل 14-14 : الدائرة المكافئة

والقيم الواردة في الشكل ( $R_1, X_1, R_2, X_2, R_c, X_m$ ) تحتاج إلى إجراء تجارب لقياسها عملياً ( ما لم تكن متاحة من خلال المصمم ) ، وهذه الاختبارات تصبح لازمة إذا أعيد لف المحول بعد إجراء صيانة فيه.

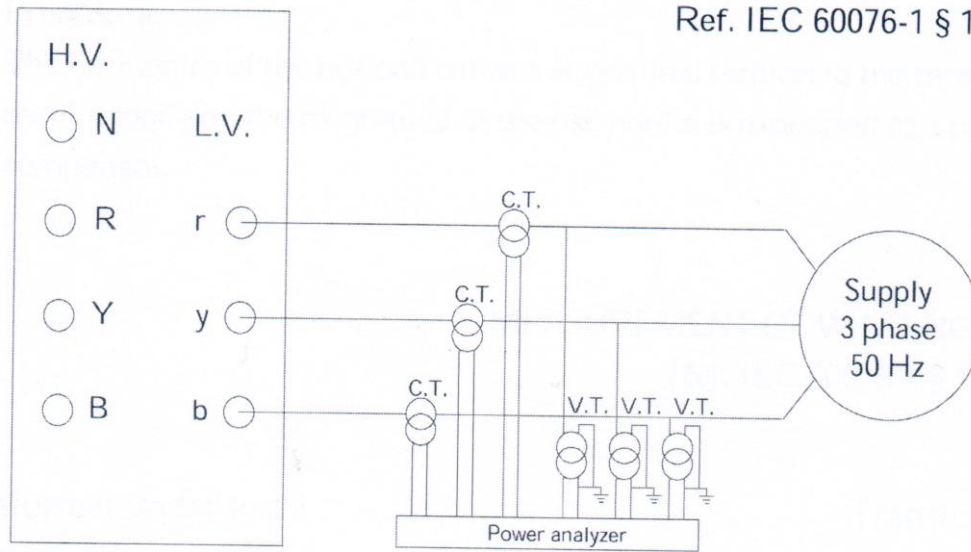
والـ Parameters الخاصة بالمحول جميعاً تقاس من خلال اختبارين أساسيين الأول هو Open circuit test ، والثاني هو Short circuit test ، ومن خلالهما يتم حساب ( $R_1, X_1, R_2, X_2, R_c, X_m$ ).

#### اختبار الـ Open circuit test

الهدف من هذا الاختبار قياس  $R_c, X_m$  ، وكذلك قياس مقدار الـ No load Losses ، وكما هو واضح من اسمه فإننا في هذا الاختبار نوصل أحد الملفين وغالباً LV Winding بمصدر الكهرباء ونترك الجانب الآخر (HV) مفتوحاً كما في الشكل 14-15 .



Ref. IEC 60076-1 § 11



شكل 14-15 : دائرة اختبار الـ Open circuit test

ويتم قياس الجهد والتيار والقدرة المسحوبة في الجانب المتصل بالـ supply ، ولنفرض أن هذه القيم هي  $W_0, I_0, V$ .

لاحظ أننا اخترنا توصيل الـ LV بمصدر الكهرباء لأننا نحتاج أن يكون الجهد مساوياً للجهد الإسمى لهذا الجانب ، وبالتطبع فالأسهل هو توصيل LV وليس HV .

لاحظ أيضاً أن التيار المسحوب في هذه الحالة لن يتعدى 1% من القيمة المقننة للتيار في هذا الجانب بسبب أن الجانب الآخر مفتوح ولا يوجد حمل على المحول ، بمعنى أن التيار المسحوب يمثل فقط exciting current ، وهذا يعني أن power loss في الجانب الابتدائي مهملة لأن  $I^2R$  تعتبر صغيرة جداً .

كما أن الـ Voltage Drop يعتبر أيضاً مهماً بسبب صغر التيار ، وهذا يعني أن القدرة المقاسة  $W_0$  تمثل فقط الـ Loss Core لأن الـ primary ohmic loss تعتبر مهملة كما ذكرنا لصغر التيار المسحوب .

أما التيار المسحوب  $I_0$  فيمكن اعتباره مكون من جزئين :

- الأول هو  $I_c$  ، Active component ، وهو الجزء المسئول عن سخونة الـ Core ، ويمر في  $R_c$  في الدائرة المكافئة ،
- الثاني هو  $I_m$  ، Reactive current ، وهو التيار المسئول عن حدوث magnetization ويمر في  $X_m$  في الدائرة المكافئة.

ويمكن حساب قيمة  $I_c, I_m$  كما في المعادلات التالية ، ومنها أيضاً يمكن حساب  $X_m, R_c$ .

$$\begin{aligned}
 W_0 &= V_1 I_c = P_{core} \\
 \therefore I_c &= \frac{W_0}{V_1} \\
 \therefore I_m &= \sqrt{I_0^2 - I_c^2} \text{ or} \\
 R_c &= \frac{V_1}{I_c} \text{ and } X_m = \frac{V_1}{I_m}
 \end{aligned}$$

## اعتبارات علمية

- 1- هذا الاختبار يعاد حوالي 5 مرات عند قيم 90% , 95% , 100% , 105% , 110% من القيمة المقننة للجهد ، وفي كل مرة يقاس  $W_0$  ,  $I_0$  ,  $V$  .
- 2- إذا اختلفت القيم المقاسة كثيراً عن القيم المدونة على nameplate فهذا يعني أن لدينا مشكلة في القلب الحديدي وربما هناك short بين الـ Laminations ، أو هناك فراغات بين طبقات القلب الحديدي ، أو نتوءات في مقاطع القلب الحديدي.
- 3- هذا الاختبار أيضاً مفيد لمعرفة ما إذا هناك Unsymmetrical في الـ Structure الخاص بالقلب الحديدي وذلك إذا لوحظ مثلاً أن التيار المسحوب في أحد الـ phases يختلف كثيراً عن التيارين الآخرين.
- 4- وكذلك فإن الصعود بالقيمة الى 110% من القيمة المقننة للجهد ضروري لمعرفة تحمل المحول للفولتية الزائدة عن المقننة .

**Example. 32.27.** In no-load test of single-phase transformer, the following test data were obtained :

Primary voltage : 220 V ; Secondary voltage : 110 V ;

Primary current : 0.5 A ; Power input : 30 W.

Find the following :

(i) The turns ratio (ii) the magnetising component of no-load current (iii) its working (or loss) component (iv) the iron loss.

Resistance of the primary winding = 0.6 ohm.

Draw the no-load phasor diagram to scale.

(Elect. Machine A.M.I.E. 1990)

**Solution.** (i) Turn ratio,  $N_1/N_2 = 220/110 = 2$

(ii)  $W = V_1 I_0 \cos \phi_0$  ;  $\cos \phi_0 = 30/220 \times 0.5 = 0.273$  ;  $\sin \phi_0 = 0.962$

$I_\mu = I_0 \sin \phi_0 = 0.5 \times 0.962 = 0.48 \text{ A}$

$$\begin{aligned}
 (iii) \quad I_w &= I_0 \cos \phi_0 = 0.5 \times 0.273 = 0.1365 \text{ A} \\
 (iv) \quad \text{Primary Cu loss} &= I_0^2 R_1 = 0.5^2 \times 0.6 = 0.15 \text{ W} \\
 \therefore \quad \text{Iron loss} &= 30 - 0.15 = 29.85 \text{ W}
 \end{aligned}$$

**Example 32.28.** A 5 kVA 200/1000 V, 50 Hz, single-phase transformer gave the following test results :

O.C. Test (L.V. Side) : 2000 V, 1.2 A, 90 W

S.C. Test (H.V. Side) : 50 V, 5A, 110 W

- (i) Calculate the parameters of the equivalent circuit referred to the L.V. side.  
(ii) Calculate the output secondary voltage when delivering 3 kW at 0.8 p.f. lagging, the input primary voltage being 200 V. Find the percentage regulation also.

(Nagpur University, November 1998)

**Solution.** (i) Shunt branch parameters from O.C. test (L.V. side) :

$$\begin{aligned}
 R_0 &= V^2/P_i = 200^2/90 = 444 \text{ ohms}, \quad I_{ao} = 200/444 = 0.45 \text{ amp} \\
 I_\mu &= (1.2^2 - 0.45^2)^{0.5} = 1.11 \text{ amp}, \quad X_m = 200/1.11 = 180.2 \text{ ohms}
 \end{aligned}$$

All these are referred to L.V. side.

(ii) Series-branch Parameters from S.C test (H.V side) :

Since the S.C. test has been conducted from H.V. side, the parameters will refer to H.V. side.

They should be converted to the parameters referred to L.V. side by transforming them suitably.

From S.C. Test readings,  $Z = 50/5 = 10 \text{ ohms}$

$$R = 110/25 = 4.40 \text{ ohms}, \quad X = (10^2 - 4.4^2)^{0.5} = 8.9 \text{ ohms}$$

These are referred to H.V. side.

For referring these to L.V. side, transform these using the ratio of turns, as follows :

$$\begin{aligned}
 r_1 &= 4.40 \times (200/1000)^2 = 0.176 \text{ ohm} \\
 x_1 &= 8.98 \times (200/1000)^2 = 0.36 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

Equivalent circuit can be drawn with  $R_0$  and  $X_m$  calculated above and  $r_1$  and  $x_1$  as above.

L.V. Current at rated load =  $5000/200 = 25 \text{ A}$

L.V. Current at 3 kW at 0.8 lagging p.f. =  $(3000/0.80)/200 = 18.75 \text{ A}$

$$\begin{aligned}
 \text{Regulation at this load} &= 18.75 (r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi) \\
 &= 18.75 (0.176 \times 0.80 + 0.36 \times 0.6) \\
 &= +6.69 \text{ Volts} = + (6.69/200) \times 100\% = +3.345\%
 \end{aligned}$$

This is referred to L.V. side, and positive sign means voltage drop.

Regulation in volts ref. to H.V. side =  $6.69 \times 1000/200 = 33.45 \text{ V}$

With 200 V across primary (i.e. L.V. side), the secondary (i.e. H.V. side)

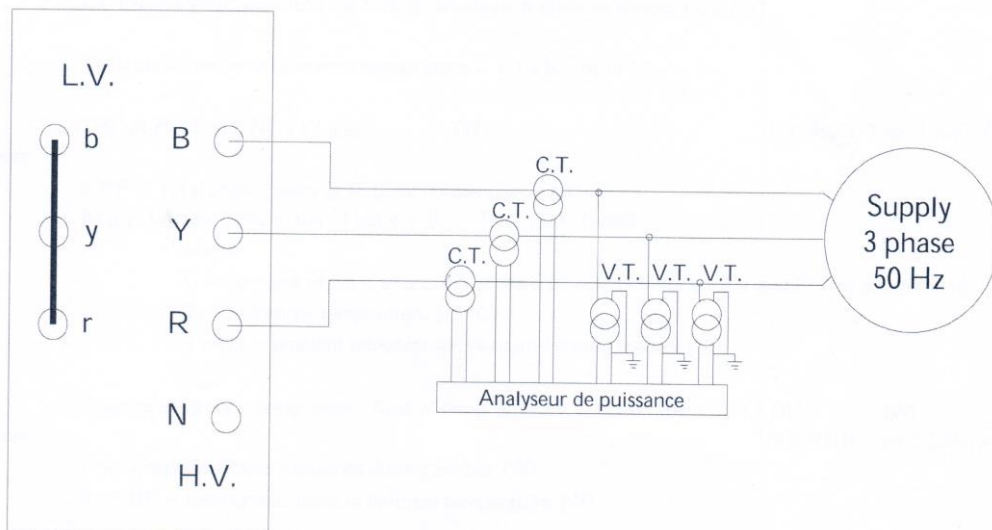
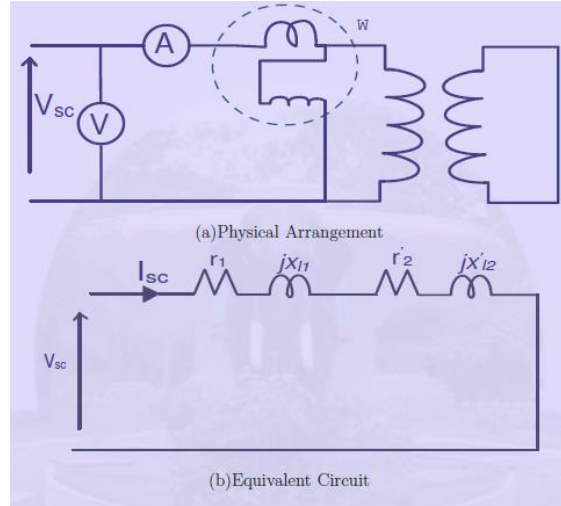
$$\text{terminal voltage} = 1000 - 33.45 = 966.55 \text{ V}$$

## 14-9-7 اختبار الـ Short circuit Test ) Load losses and Impedance ( voltages

الهدف من هذا الاختبار هو تحديد قيمة  $X_2$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $R_1$  أو ما يعرف بـ Series impedance في كل جهة من جهتي الدائرة المكافئة للمحول . ويسمى هذا الاختبار أيضاً بـ Percent Impedance test، ويسمى أيضاً بالـ Z% test ، ويسمى كذلك بالـ Load Losses test ، والسبب في اختلاف التسمية هو أننا نحصل على كل هذه المعلومات من هذا الاختبار.



وكما يبدو من اسمه فإننا نوصل مصدر الكهرباء هذه المرة في جهة ونجعل الجهة الأخرى للمحول short ، وغالباً أيضاً نوصل جهة الـ HV بمصدر الكهرباء ، ونجعل جهة الـ LV هي الـ short ، ونأخذ القياسات  $I, V, W_{sc}$  من جهة الـ HV كما في الشكل 14-16.



شكل 14-16 : اختبار الـ Short circuit Test

وكما ذكرنا في الباب الأول بان المحول الذي له  $Z\%$  تساوي مثلاً  $5\%$  فهذا يعني أن  $5\%$  فقط من الجهد كافي لجعل الـ Rated current يسري في الجهة الأخرى التي هي (short) وهذا مفهوم ، فطالما أن الحمل تقريباً له zero impedance لأنه short فأقل جهد في جهة المصدر سيجعل التيار مرتفعاً جداً في الجهة الأخرى . ولذا يسمى الجهد اللازم ليمر الـ Rated current في جهة الـ short يسمى بالـ impedance voltage ، وهو قيمة الجهد الصغير الذي نستخدمه في هذا الاختبار.

الآن جهة الـ H.V. موصلة بجهد قدره  $5\%$  من القيمة الاسمية ، ومن ثم لا تتجاوز قيمة تيار exciting current حوالي  $2\%$  من قيمته الأصلية التي تمر إذا كان الجهد كاملاً ، وهذا يجعل الطاقة المفقودة

في shunt circuit ( الموصلة على التوازي ) وهى التى نسميها بالـ No load loss مهملتها تماماً ( جهد صغير و تيار صغير ) ، ومن ثم يمكن أن نهمل الـ Shunt branch تماماً ، ونعتبر الدائرة المكافئة للمحول تبدو كما في الجزء السفلي من الرسم ، وتصبح القدرة المقاسة تقريباً هي القدرة المفقودة في series impedance ، والتي تمثل في الرسم بالمقاومات  $R_1$  و  $R_2'$  ، حيث  $R_2'$  هي صورة  $R_2$  كما تبدو في الجهة الأخرى.

$$R_2' = R_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

الآن القدرة  $W_{sc}$  هي القدرة المستهلكة في  $R_1$  ،  $R_2$  معاً ، حيث يمكن الحصول على قيمتهم وكذلك  $(X_2$  )  $X_1$  ، كما في المعادلات التالية .

$$\begin{aligned} W_{sc} &= I_{sc}^2 (r_1 + r_2') \\ Z_{sc} &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \\ (x_{l1} + x_{l2}') &= \sqrt{Z_{sc}^2 - (r_1 + r_2')^2} \end{aligned}$$

والخطأ المقبول هنا لا يتجاوز 10% من القيمة الموجودة في nameplate.

لاحظ أن الخطأ المتوقع كبير نسبياً لأن القيم التي حسبت بالمصنع كانت محسوبة والمحول تحت التحميل الكامل ، وهو ما يصعب عمله في معظم الأحيان في الواقع العملي .

ومن النتائج المهمة من هذا الاختبار حساب قيمة %Z حيث يمكن حسابها من المعادلة التالية:

$$\%Z = \frac{\text{measured voltage}}{\text{rated voltage}} \times 100$$

أهمية هذا الاختبار

- بالإضافة لمعرفة قيمة الـ Parameters الخاصة بالمحول فإن هذا الاختبار يتم عمله أيضاً أحياناً لاكتشاف أى عيوب deformation في الملفات نتيجة الشحن والنقل أو نتيجة short داخلي أو توصيلات أرضية خاطئة.
- ويستخدم أيضاً في حالة وجود ارتفاع غير مبرر في درجة الحرارة حيث يتم معرفة الـ phase المعيب إذا وجد فيه تيار أعلى من الـ Two-phases الآخرين ، وعندها يتم إيقاف الفحص وفحص المحول لمعرفة الاسباب.

- تذكر أنه في حالة الربط على التوازي مع محول آخر يجب أن تكون percentage impedance معلومة ، وهو ما نحصل عليه أيضاً من هذا الاختبار. أيضاً من المعلوم أن ال short circuit level تتحدد قيمته بناء على قيمة ال percentage impedance ومن ثم تتحدد مواصفات ال CB الذي سيحمي المحول.

## ملاحظة

قد يكون ال V. Percentage الخاص بالمحول مرتفع ( على سبيل المثال فإن 5% من محول 132 kV معناه أننا نحتاج لجهد قدره 6.6 kV ، وهذا أحياناً لا يكون متوفراً بالموقع فعندها يمكن استخدام أي جهد منخفض متاح بالموقع ، ثم يتم تصحيح للقيمة حسب المعادلة التالية .

$$\%Z = \frac{\text{applied voltage}}{\text{measured current}} \times \frac{\text{rated current}}{\text{rated voltage}} \times 100$$

**Example 32.36.** Obtain the equivalent circuit of a 200/400-V, 50-Hz, 1-phase transformer from the following test data :

O.C test : 200 V, 0.7 A, 70 W – on L.V. side

S.C. test : 15 V, 10 A, 85 W – on H.V. side

Calculate the secondary voltage when delivering 5 kW at 0.8 p.f. lagging, the primary voltage being 200V. (Electrical Machinery-I, Madras Univ. 1987)

**Solution. From O.C. Test**

$$\begin{aligned} V_1 I_0 \cos \phi_0 &= W_0 \\ \therefore 200 \times 0.7 \times \cos \phi_0 &= 70 \\ \cos \phi_0 &= 0.5 \text{ and } \sin \phi_0 = 0.866 \\ I_w &= I_0 \cos \phi_0 = 0.7 \times 0.5 = 0.35 \text{ A} \\ I_\mu &= I_0 \sin \phi_0 = 0.7 \times 0.866 = 0.606 \text{ A} \\ R_0 &= V_1 / I_w = 200 / 0.35 = 571.4 \Omega \\ X_0 &= V_1 / I_\mu = 200 / 0.606 = 330 \Omega \end{aligned}$$

As shown in Fig. 32.48, these values refer to primary i.e. low-voltage side.

**From S.C. Test**

It may be noted that in this test, instruments have been placed in the secondary i.e. high-voltage winding whereas the low-voltage winding i.e. primary has been short-circuited.

Now, as shown in Art. 32.32

$$Z_{02} = V_{sc} / I_2 = 15 / 10 = 1.5 \Omega ; K = 400 / 200 = 2$$

$$Z_{01} = Z_{02} / K^2 = 1.5 / 4 = 0.375 \Omega$$

$$\text{Also } I_2^2 R_{02} = W ; R_{02} = 85 / 100 = 0.85 \Omega$$

$$R_{01} = R_{02} / K^2 = 0.85 / 4 = 0.21 \Omega$$

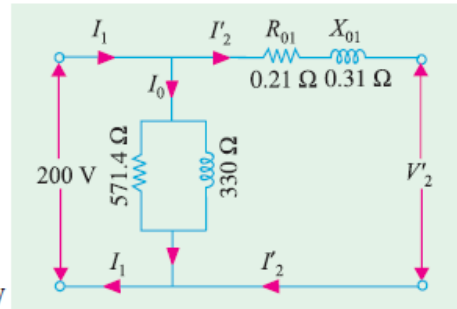


Fig. 32.48

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{0.375^2 - 0.21^2} = 0.31 \Omega$$

$$\text{Output kVA} = 5/0.8; \text{ Output current } I_2 = 5000/0.8 \times 400 = 15.6 \text{ A}$$

This value of  $I_2$  is approximate because  $V_2$  (which is to be calculated as yet) has been taken eq to 400 V (which, in fact, is equal to  $E_2$  or  $0V_2$ ).

$$\text{Now, } Z_{02} = 1.5 \Omega, R_{02} = 0.85 \Omega \quad \therefore X_{02} = \sqrt{1.5^2 - 0.85^2} = 1.24$$

Total transformer drop as referred to secondary

$$= I_2 (R_{02} \cos \phi_2 + X_{02} \sin \phi_2) = 15.6 (0.85 \times 0.8 + 1.24 \times 0.6) = 22.2 \text{ V}$$

$$\therefore V_2 = 400 - 22.2 = 377.8 \text{ V}$$

**Example 32.44.** The corrected instrument readings obtained from open and short-circuit tests on 10-kVA, 450/120-V, 50-Hz transformer are :

O.C. test :  $V_1 = 120 \text{ V}; I_1 = 4.2 \text{ A}; W_1 = 80 \text{ W}; V_1, W_1$  and  $I_1$  were read on the low-voltage side.

S.C. test :  $V_1 = 9.65 \text{ V}; I_1 = 22.2 \text{ A}; W_1 = 120 \text{ W}$  – with low-voltage winding short-circuited  
Compute :

- the equivalent circuit (approximate) constants,
- efficiency and voltage regulation for an 80% lagging p.f. load,
- the efficiency at half full-load and 80% lagging p.f. load.

**Solution.** It is seen from the O.C. test, that with primary open, the secondary draws a no-load current of 4.2 A. Since  $K = 120/450 = 4/15$ , the corresponding no-load primary current  $I_0 = 4.2 \times 4/15 = 1.12 \text{ A}$ .

$$(i) \text{ Now, } V_1 I_0 \cos \phi_0 = 80 \quad \therefore \cos \phi_0 = 80/450 \times 1.12 = 0.159$$

$$\therefore \phi_0 = \cos^{-1}(0.159) = 80.9^\circ; \sin \phi_0 = 0.987$$

$$I_w = I_0 \cos \phi_0 = 1.12 \times 0.159 = 0.178 \text{ A and } I_\mu = 1.12 \times 0.987 = 1.1 \text{ A}$$

$$\therefore R_0 = 450/0.178 = 2530 \Omega \text{ and } X_0 = 450/1.1 = 409 \Omega$$

During S.C. test, instruments have been placed in primary.

$$\therefore Z_{01} = 9.65/22.2 = 0.435 \Omega$$

$$R_{01} = 120/22.2^2 = 0.243 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{0.435^2 - 0.243^2} = 0.361 \Omega$$

The equivalent circuit is shown in Fig. 32.52.

(ii) Total approximate voltage drop as referred to primary is  $I_1 (R_{01} \cos \phi + X_{01} \sin \phi)$ .

$$\text{Now, full-load } I_1 = 10,000/450 = 22.2 \text{ A}$$

$$\therefore \text{Rated Current} = \frac{3000}{230} = 13 \text{ amp}$$

$$\text{Regu} \quad \text{Cu-losses at rated load} = 120 \text{ watts, from S.C. test}$$

$$\text{F.L.} \quad \text{Core losses} = 100 \text{ watts, from O.C. test}$$

$$\text{F.L.} \quad \text{At full load, VA output} = 3000$$

$$(iii) \text{ At 0.8 lag p.f., Power output} = 3000 \times 0.8 = 2400 \text{ watts}$$

$$\text{Iron} \quad \text{Required efficiency} = \frac{2400}{2400 + 220} \times 100\% = 91.6\%$$

$$\text{Total} \quad \text{From S.C. test, } Z = \frac{15}{13} = 1.154 \text{ ohms}$$

$$R = \frac{120}{15 \times 15} = 0.53 \text{ ohm, } X = \sqrt{1.154^2 - 0.53^2} = 1.0251 \text{ ohm}$$

Approximate voltage regulation

$$= IR \cos \phi + IX \sin \phi = 13[0.53 \times 0.8 + 1.0251 \times 0.6]$$

$$= 13[0.424 + 0.615] = 13.51 \text{ volts}$$

$$\text{req} \text{ In terms of \%, the voltage regulation} = \frac{13.51}{230} \times 100\% = 5.874\%$$

**Example 33.9.** A 2000-kVA, 6,600/400-V, 3-phase transformer is delta-connected on the high voltage side and star-connected on the low-voltage side. Determine its % resistance and % reactance drops, % efficiency and % regulation on full load 0.8 p.f. leading given the following data :

S.C. test ; H.V. data : 400 V, 175 A and 17 kW

O.C. test; L.V. data : 400 V, 150 A and 15 kW (Basic Elect., Machines Nagpur Univ. 1993)

**Solution.** From S.C. test data, we have

Primary voltage/phase = 400 V; Primary current/phase =  $175 / \sqrt{3} = 100$  A

$$\therefore Z_{01} = \frac{400}{101} = 3.96 \Omega$$

$$I_1^2 R_{01} = \frac{17000}{3} \text{ or } R_{01} = 0.555 \Omega; X_{01} = \sqrt{3.96^2 - 0.555^2} = 3.92 \Omega$$

$$\% R = \frac{I_1 R_{01}}{V_1} \times 100 = \frac{101 \times 0.555}{6,600} \times 100 = 0.849$$

$$\% X = \frac{I_1 X_{01}}{V_1} \times 100 = \frac{101 \times 3.92}{6,600} \times 100 = 6$$

$$\% \text{ regn} = v_r \cos \phi - v_x \sin \phi = 0.49 \times 0.8 - 6 \times 0.6 = -2.92\%$$

Full-load primary line current can be found from

$$\sqrt{3} \times 6,600 \times I_1 = 2000 \times 1,000; I_1 = 175 \text{ A}$$

It shows that S.C. test has been carried out under full-load conditions.

Total losses = 17 + 15 = 32 kW; F.L. output = 2,000 × 0.8 = 1600 kW

$$\eta = 1,600 / 1,632 = 0.98 \text{ or } 98\%$$

## 14-9-8 اختبار Load Test

جميع الاختبارات السابقة سواء short circuit أو الـ open circuit كانت تتم بدون تحميل حقيقي للمحول ، ومن ثم فلولوصول إلى قيمة حقيقية للـ loss لابد من تحميل المحول تحميلاً كاملاً ، وذلك إذا كنا مثلاً نريد حساب كفاءة المحول بدقة أو حساب قيمة Regulation . فهناك بعض أنواع من الـ loss لا تظهر إلا في وجود الجهد الكامل أو التيار الكامل مثل stray loss ، وهذا لا يحدث في الاختبارات المكافئة التقريبية السابقة.

وبالتبع يجب أن يكون التحميل سليماً بحيث لا يؤدي إلى ارتفاع زائد في الحرارة ، وفي نفس الوقت تتحقق الظروف الطبيعية للتشغيل وتصبح القياسات أقرب للواقع بدلاً من الاختبارات التقريبية السابقة . لاحظ أن جزء من القدرة يذهب أيضاً في تشغيل أجهزة التبريد أثناء التحميل الحقيقي وهذه أيضاً لا تظهر في الاختبارات المكافئة .

كل ما سبق يؤكد ضرورة عمل اختبار حقيقي للمحول وهو ما يعرف بـ load test .

## صعوبات هذا الاختبار

قد يكون ممكناً عمل هذا الاختبار في المحولات الصغيرة حيث يمكن تحميل المحول بالحمل المقنن بسهولة ، أما المحولات الضخمة فهناك مشكلة في عمل تحميل كامل داخل المختبر والوصول للتيار المقنن لاسيما في الجهود العالية والتيارات المرتفعة .

ومن المعلوم أن كفاءة المحول تكون حول 99% ، فهذا يعني أن القدرة المفقودة داخل المحول ستكون 1% فقط بينما 99% من القدرة يجب أن تستهلك خارج المحول خلال الحمل الخارجي وهذه طاقة كبيرة لا يمكن إضاعتها في مجرد اختبار روتيني.

وهذا يؤدي بنا إلى أسلوب خاص لعمل الـ load test ، بحيث يعطينا النتائج المرجوة ويختلف في نفس الوقت عن المفهوم الصريح للاسم ، وهذا الأسلوب الخاص لإجراء هذا الاختبار يعرف بـ Back to Back test.

## 14-9-9 اختبار الـ Back to Back Test

لإجراء هذا الاختبار نحتاج لمحولين اثنين متماثلين ومتصلين بطريقة Back to back أى بالعربي "خلف خلف" ، كما في الشكل 14-17 ، حيث يتم توصيل جهد مناسب ( $V_2$ ) للـ Loop التي تضم الـ two Secondaries بحيث يمر فيهما تيار يساوي Rated current ، ومن ثم فهو المصدر المسئول عن تغذية تيار يساوي تيار الحمل ، لكن هذا التيار لا يفقد في مقاومة كبيرة ، بل مجرد يمر في ملفات الثانوي للمحولين ، ومن ثم فالقدرة المفقودة هي فقط الـ Copper Loss في المحولين الناتجة عن مرور التيار المقنن.

أما المصدر ( $V_1$ ) المتصل بملفي الابتدائي فهو قادر على تمرير تيار الـ excitation في الملفين الابتدائيين ومن ثم فهو مصدر الـ Core loss .

لاحظ أنه لا يوجد حمل حقيقي ومن ثم لا توجد طاقة ضائعة باستثناء الـ Core loss و copper loss ، وهذا يعني أن قدرة المصدرين  $V_1$  .  $V_2$  ليست كبيرة .

لاحظ أن القدرة ( أو التيار ) الواصلة إلى الملف الثانوي الثاني - الذي يعمل كحمل بالنسبة للمحول الأول - ترجع مرة أخرى للمصدر ، ولذا سمي الاختبار بالـ Back to Back . وتعتبر القدرة المقاسة من خلال هذا الاختبار أقرب للواقع لأن كلاً من الابتدائي والثانوي يمر فيها التيار المقنن لكل جانب .





1W-2w	<	1V-2w	=	1W-2v	>	1W-2w	<	1U-1V	*
1W-2w	<	1V-2w	>	1W-2v	=	1W-2w	<	1U-1V	١
1W-2w	<	1V-2w	>	1W-2v	<	1W-2w	<	1U-1V	٢
1W-2w	<	1V-2w	>	1W-2v	<	1W-2w	≥	1U-1V	٣
1W-2w	<	1V-2w	>	1W-2v	<	1W-2w	>	1U-1V	٤
1W-2w	=	1V-2w	>	1W-2v	<	1W-2w	>	1U-1V	٥
1W-2w	>	1V-2w	=	1W-2v	<	1W-2w	>	1U-1V	٦
1W-2w	>	1V-2w	<	1W-2v	=	1W-2w	>	1U-1V	٧
1W-2w	>	1V-2w	<	1W-2v	>	1W-2w	>	1U-1V	٨
1W-2w	>	1V-2w	<	1W-2v	>	1W-2w	≥	1U-1V	٩
1W-2w	>	1V-2w	<	1W-2v	>	1W-2w	<	1U-1V	١٠
1W-2w	=	1V-2w	<	1W-2v	>	1W-2w	<	1U-1V	١١

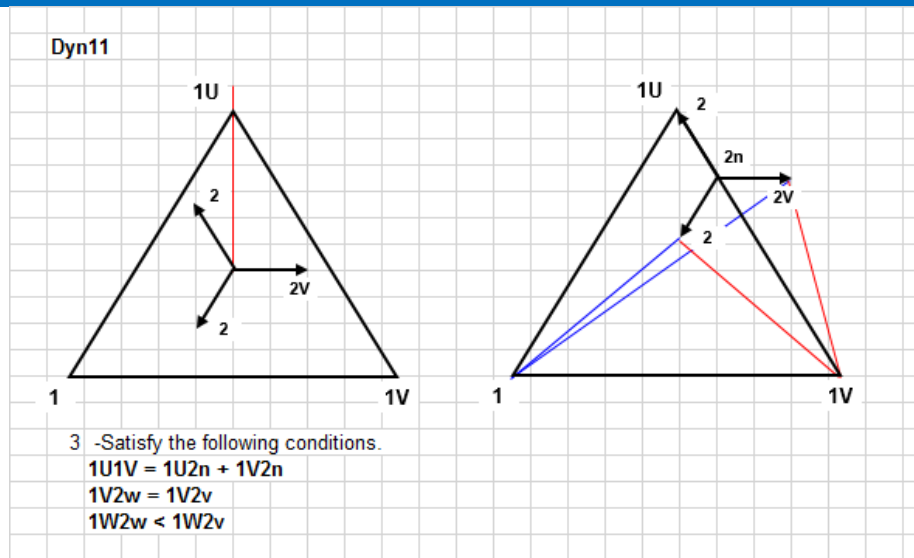
وإذا كنت معتاد على الترميز بـ ABC ، فلنفرض أن لديك محول أقطابه Primary A B C Winding وفي الجانب الآخر a b c Secondary Winding

ولاجراء الفحص يتطلب تسليط 3-phase votage على ملف الجهد العالي ( الابتدائي ) ، مع ربط short بين A – a ثم قياس الفولتية بين كافة الأطراف كما ذكرنا ، ومن قياس قيم الجهد تكون النتائج واحدة مما يلي:

فهذا يعني ان المحول مربوط بزاوية 330 درجة	$C c = B b = B c < C b$
فهذا يعني ان المحول مربوط بزاوية 30 درجة	$B b = C c = C b < B C$
فهذا يعني ان المحول مربوط بزاوية صفر درجة	$Bb = C c < B c = C b$

وهذه العلاقات مستنبطة من الـ phasor diagram الخاص بكل مجموعة اتجاهية ، فعلى سبيل المثال فإن الشكل التالي يمثل الـ phasor diagram للمجموعة الاتجاهية Dyn11 . لاحظ أن العلاقات المكتوبة أسفل الرسم متحققة تماما على الرسم . فعلى سبيل المثال فإن الجهد بين 1U and 1V(1U1V) يساوى فعلا مجموع الجهدين  $1U_{2n} + 1V_{2n}$  .





Assumed the transformer vector group is DYn11;

1. 1U1V1W-which is primary –Delta Connection
2. 2U2V2W- Which is secondary–Star connection
3. join 1U& 2U terminals
4. Supply 1U–1V–1W 440v and then Measure:
  - a. 1U–1V
  - b. 1V–1w
  - c. 1W–1U
  - d. 1W–2W
  - e. 1V–2W
  - f. 1V–2V
  - g. 1W–2V
  - h. 1U–2N
  - i. 1V–2N

Then CHECK

1.  $1V-2W = 1V-2V$
2.  $1W-2V > 1W-2W$
3.  $1U-1V = 1V-2N+1U-2N$

الشروط الثلاثة الأخيرة هي التي تظهر في السطر الأخير المقابل للمجموعة الاتجاهية رقم 11

For Dy 11 Transformers	For Dy1 Transformers
$1V-2W = 1V-2V$	$1W-2W = 1W-2V$
$1W-2W < 1W-2V$	$1V-2V < 1V-2W$
$1V-2W < 1V-1U$	$1W-2V < 1W-1U$
(See fig 2.2)	(See fig 2.3)

A typical format for recording the vector group test of a Dy11 transformer is given below:

Conditions to be fulfilled.

$$1V-2W = 1V-2V$$

$$1W-2W < 1W-2V$$

$$1V-2W < 1V-1U$$

Volts	Volts	Remarks
$1V-2W =$	$1V-2V =$	OK / Not OK
$1W-2W =$	$1W-2V =$	OK / Not OK
$1V-2W =$	$1V-1U =$	OK / Not OK

## الفصل الخامس عشر صيانة المحولات الزيتية

لإعطاء فكرة عن قيمة وأهمية عملية الصيانة للمحولات يكفي أن تعرف أن المحول المرتبط بمولد Generator Step Up GSU تبلغ قدرة الواحد من هذا النوع عدة مئات من الـ MVA ويتكلف تصنيعه ما يقرب من 20 مليون جنيه ويستغرق تصنيعه نحو السنتين ، فإذا خرج واحد من هذه المحولات من الخدمة فمعناه أن وحدة التوليد المرتبطة به قد خرجت أيضا وهذا يعنى خسارة هائلة ، ومن ثم يجب الاهتمام الكامل بصيانة المحولات فهي عنصر حساس ورئيسي في الشبكة الكهربائية.

وبرنامج صيانة المحولات عموما يعتمد على قراءات دورية تؤخذ من المواقع بعضها يومي أو أسبوعي مثل ملاحظة مستوى الزيت ودرجة الحرارة ، وبعضها له دورية أكبر من ذلك مثل اختبار عينات الزيت وتحليلها. وربما كانت هناك رقابة على المحول من خلال SCADA System لكنها لا تغني أبدا عن ملاحظات رجال الصيانة ذوي الخبرة.

هناك أنواع مختلفة من المعلومات التي يمكن الحصول عليها لتخطيط برنامج الصيانة ، وبعض هذه المعلومات يمكن الحصول عليه بمجرد النظر ، كأن يلاحظ المراقب أن الصمامات موضوعة بطريقة غير صحيحة أو أن الـ Radiator لا يعمل أو يلاحظ صدور أصوات غير اعتيادية سواء من المضخات أو المراوح أو غيره ، وقد يلاحظ أيضا وجود بقع من الزيت أو شروخ ، وكل هذا يستلزم وجود فريق مدرب وكفاء ليكتشف ذلك بمجرد النظر . والبعض الآخر من المعلومات يمكن الحصول عليه من خلال فحص مؤشرات مختلفة ، كمؤشرات الحرارة والتي من أهمها بالطبع المؤشرات الخاصة بالزيت فهي تقيس الحرارة الداخلية للزيت عند نقطة علوية باستخدام Probe خاص بهذه العملية.

### 1-15 الصيانة الدورية للمحولات

هناك نوعان من الصيانة الدورية للمحولات :

- الأول لا يحتاج إلى إخراج المحول من خزانه الرئيسي وفترة الصيانة تكون بمعدل مرة واحدة في السنة تقريبا .
- والنوع الثاني الذي تتطلب الصيانة فيه إلى إخراج المحول من الخزان ويتم ذلك مرة واحدة كل 10 سنوات على وجه التقريب.

## 15-2 أهم الفحوصات الخارجية

هناك عدة فحوصات ومتابعات لقيم مؤشرات في المحول يجب النظر إليها دورياً ومن أهمها:

### 15-2-1 فحص الـ Tank

يجب فحص الـ Tank ظاهرياً للتأكد من خلوّه من أى شقوق أو صدأ أو أى مظهر من مظاهر تسرب الزيت ، لاسيما في أماكن وجود الـ Flanges والصمامات واللحامات وبالطبع هذا يشمل الفحص البصري للـ Bushings .

ويقوم الفاحص بملاحظة وتسجيل حالة ربط الصواميل وكذا سطح وأنابيب الـ Radiator . أما إذا كان الخزان قد جرى استبداله تحت ظروف معينة ففي هذه الحالة يجب التأكد من القياسات والأبعاد من ارتفاع وعرض وسمك الخزان وكذا مواسير التبريد من أعدادها وترتيبها وأقطارها . وتعطى أهمية متزايدة للتأكد من عدم تواجد شقوق أو ثقوب - حتى وإن كانت ضئيلة وبسيطة - يحتمل رشح الزيت منها إلى جانب التأكد من طلاء الخزان وتناسقه كوحدة متكاملة.

### 15-2-2 فحص غطاء المحول :

ويشمل ذلك ملاحظة الغطاء نفسه والتأكد من خلوّه من الانبعاج أو أي ضرر ميكانيكي آخر وكذلك مناطق اللحام واحتمالات رشح الربط إلى جانب فحص أجزاء المحول الأخرى المثبتة على غطاء المحول مثل مخارج التيار للجهدين الابتدائي والثانوي خاصة سلامة العزل من التشقق أو الخدش أو التصدع وربطه وإحكامه. كما يجب ربط أطراف المخارج والتأكد من نوعية العزل المستخدم للجهد الابتدائي وكذا الثانوي وعددها وخلو الأطراف من آثار الانصهار ( Arc ) أو القطع أو الحرارة العالية غير العادية وكذا وضع اللحام ونظافة العزل.

### 15-2-3 فحص الخزان المساعد :

يقوم الفاحص بملاحظة موقع الخزان المساعد والمسافة بينه وبين الأجزاء الحاملة للتيار ، والتأكد من خلو الخزان من الضرر الميكانيكي الخارجي ، وعدم وجود أى رشح من الزيت في مواضع الربط واللحام وكذا ملاحظة سلامة مبيّن الزيت والصنابير والشكل العام للخزان. ويلحق به فحص ماسورة الحماية الغازية (ماسورة التسريب) ملاحظة أبعادها وزاوية ميلها وغطائها الزجاجي وكذا عدم رشح الزيت من مواضع الربط عند قاعدتها وملاحظة جودة أدوات الربط.

## 15-2-4 فحص الـ Winding Temperature Indicator

مجموعة قياس درجة حرارة الملفات تعتمد غالبا على مبدأ التقريب الرياضى أو الـ Simulation للوصول لدرجة حرارة الملفات حيث يصعب عمليا قياس درجة حرارتها مباشرة لصعوبة وضع Sensors داخل الملفات. لكننا نتحايل على ذلك بوضع الـ Sensors فى أماكن قريبة ثم عمل تقريب رياضى للوصول لمعرفة أعلى قيمة حقيقية لدرجة الحرارة بالملفات والتي تسمى بالـ Hot Spot.



وهناك طريقة أخرى لقياس الـ Hot Spot للملفات وذلك باستخدام Current Transformers, CTs لقراءة قيم التيار ثم استخدام هذه القيم فى تقدير الحرارة الناشئة عن مرور هذا التيار من خلال دوائر كهربية .

وحديثا استخدمت Fiber Optic Sensors داخل الملفات أثناء تصنيع المحول لتعطى قيم حقيقية مباشرة عن حرارة الملفات وبالطبع فهذا أدق وافضل.

## 15-2-5 مقارنة قيم مؤشرات الحرارة

أثناء وجود المحول بالخدمة يفترض أن تكون درجة الحرارة المؤخوذة من Winding Temperature Indicator أعلى من تلك المؤخوذة من Top Oil Temp indicator بمقدار حوالى 15 درجة مئوية ، وهذا منطقى لأن حرارة الملفات هو المصدر الرئيسى لرفع درجة حرارة كافة العناصر بما فيها الزيت ، فإذا لم تكن كذلك فهذا يعنى أن أحدهما أو كلاهما (مؤشر حرارة الملفات أو مؤشر حرارة الزيت) غير سليم. أما إذا كان المحول خارج الخدمة فيجب أن تكون الدرجتين متساويتين تماما.

## 15-2-6 فحص مؤشر مستوى الزيت فى الـ Conservator

هذا المؤشر له أهمية كبرى ، وذلك لأهمية الزيت فى موضوع العزل والتبريد كما ذكرنا ، وهذا المؤشر ويعرف بالـ Liquid Level, LL يكون غالبا دائري الشكل ويثبت فى جانب الـ Tank ومزود داخليا بعوامة تحرك مؤشره كلما تغير وضع الزيت كما فى الشكل 1-15 .



شكل 1-15 : مؤشر الـ Liquid Level

ويرتبط بهذا الموضوع أيضا فحص مستوى الزيت في الـ Breather إذا كان من النوع الزيتي وكذلك فحص لونه شكل 2-15 والتأكد من عدم تحوله إلى اللون Pink الذي يعنى تسلل قطرات الماء أو الرطوبة للزيت.



شكل 2-15 : شكل الـ Breather

### 7-2-15 فحص الـ Pressure Relief Device

وهذا المؤشر يوضع فوق الـ Tank لتخفيف الضغوط الداخلية التي تنشأ أثناء التشغيل. وفي المحولات الكبيرة يكون هناك أكثر من جهاز لهذا الغرض.

### 8-2-15 فحص الـ Sudden Pressure Relay

هذا الجهاز شكل 3-15 يستخدم للتدليل على وجود ضغط مرتفع بدرجة خطيرة أثناء الأعطال ويركب أعلى الـ Tank في جانب المحول ويمكنه أن يرسل إشارات إنذار Alarm في حالة الضغوط الغير خطيرة ويمكنه أيضا إرسال إشارة Trip لفصل المحول في حالة الأعطال الخطيرة.



شكل 15-3 : Sudden Pressure Relay

## 3-15 فحوصات منظومة التبريد الخارجية

فى بعض الأحيان يكون المحول غير محمل ومع ذلك يحدث له Overheating وقد يكون ذلك بسبب انسداد زعانف التبريد Cooling Fins بأعشاش الطيور أو أتربة أو طين أو غيره ، وفى هذه الحالة نحتاج فقط لعملية تنظيف خارجية باستخدام هواء مضغوط.

وقد يكون السبب هو تكدس الزيت Sludge حيث تلاحظ أحيانا وجود مايشبه الطين فى أسفل الزيت وهذا يمكن كشفه من فحص الـ DGA ، فزيادة نسبة الأكسجين والرطوبة بالفحص يعنى وجود هذا الكدر الذى قد لا يكون سائلا مع الزيت بل أحيانا يتراكم على الملفات أو داخل القلب الحديدى وربما يزداد حجمه وسمكه وصلادته إذا أهمل العلاج المبكر بتنظيف الزيت ومن ثم تنشأ مشكلة السخونة الزائدة حتى مع التحميل الخفيف.

### 15-3-1 فحص الـ Radiator :

يجب أن يتركز الإهتمام على معرفة عدد الأنابيب وقطرها والمسافة بين بعضها البعض ، وخلوها من الرشح فى مواضع الربط وكذا مواضع اللحام وسلامة عمل الصنابير.

### 15-3-2 فحص مؤشر سريان الزيت Oil Flow Indicator

هذا المؤشر يستخدم إذا كانت هناك مضخات مستخدمة مع المحول وذلك لضمان أن الزيت يسري ويدور بكفاءة ، فلو انخفض معدل السريان إلى 5 Ft/sec فسوف يبدأ المؤشر فى الحركة ولكنه لن يعطى إنذارا إلا إذا توقف السريان تماما.

مع ملاحظة أنه فى بعض الأحيان يحدث إنعكاس لاتجاه سريان الزيت وهذا لا يمكن اكتشافه بفحص المؤشر لكن يمكن اكتشاف ذلك بقياس تيار الموتور ، فإذا حدث إنعكاس لاتجاه سريان الزيت فسيكون

التيار أعلى قليلا من قيمته المقننة. علما بأن قيمة تيار الموتور بصفة عامة تعتبر مؤشر على حالة المضخة.

وعند وجود أى تغير يجب فحص الصمامات الموجودة فى مسار الزيت فوراً . وقد لوحظ أن تراكم الزيت الكدر والتصاقه بالمواسير يعيق سريان الزيت ويؤدى إلى ارتفاع فى قيمة التيار المقاس.

ومضخة الزيت يمكن أن تتسبب فى مشكلة من نوع آخر وهى إذا حدث تآكل فى الـ Bearing فهذا سيتسبب فى ارتفاع نسبة المعادن بالزيت ويمكن اكتشاف ذلك من خلال تحليل الـ DGA ، فإذا وجد أن نسبة المعادن مرتفعة بالزيت وجب فوراً إصلاح الـ Bearing وإلا فإن زيادتها لقيم مرتفعة يمكن أن تؤدى فى النهاية إلى حدوث Flashover داخل الزيت محدثة كارثة.

### 15-3-3 فحص المراوح

عند فحص المروحة فإن أهم شئ يجب التأكد منه هو اتجاه دوران المروحة ، حيث يجب أن يكون اتجاه دوران الهواء إلى الخارج وليس العكس ويمكن معرفة ذلك بوضع اليد أمام المروحة وفى هذه الحالة يجب أن يدفع الهواء اليد بعيداً ، لأنه لو انعكس الاتجاه فهذا يعنى أن المروحة تدفع الهواء الساخن الذى مر على الـ Rad إلى المحول لتزيد من سخونته وهذا بالطبع خطأ قاتل.

ومن الفحوصات الشكلية المرتبطة بالمروحة أنك إذا مررت بالمحول فى يوم حار فيجب أن تتوقع أن تكون جميع المراوح تعمل فإذا وجدت مروحة متوقفة فهذا يعنى وجود خلل بها على عكس لو مررت بالمحول فى يوم بارد فيجب أن تتوقع أن تجد مروحة أو أكثر فى حالة توقف.

وأخيراً يجب متابعة صوت المروحة ، وهذا لا يدركه غير الفنى الخبير المتابع دائماً للمحول فإن أى تغيير فى الصوت معناه مشكلة ما.

### 15-3-4 مشكلة تسرب الزيت

قد يحدث التسريب نتيجة شرخ أو لحامات سيئة أو من خلال الـ Flanges ، ومنها قد تتسرب الرطوبة أيضاً للداخل فتصبح المشكلة مزدوجة : انخفاض الزيت وتسرب الرطوبة ، ولذا فالعلاج السريع مهم جداً ، ويستخدم لذلك مادة الـ Epoxy أو غيرها من المواد اللاصقة. وقد نحتاج لعمل لحام لهذه الشروخ إذا كانت كبيرة ، وفى هذه الحالة يجب أن يكون اللحام بحذر حتى لا تتسرب غازات للداخل ، وفى كل الأحوال يجب عمل DGA قبل وبعد عملية اللحام. أما إذا كان الشرخ عميقاً فيجب تفريغ المحول من الزيت أولاً قبل إجراء عملية اللحام.



## 4-15 تحليل مشاكل المحولات

### 1-4-15 مشاكل ارتفاع درجة حرارة المحول .

المشكلة	السبب	الحل
درجة الحرارة مرتفعة داخل المحول (الزيت أو الملفات )	(1) الهواء المدفوع غير كاف	- يجب التأكد من أن سريان الزيت طبيعي وكذلك الهواء
	(2) المبردات ليست نظيفة ( بها شوائب )	- يجب تنظيف المبردات من الداخل من أى شوائب وذلك باستخدام الهواء المضغوط .
	(3) زيادة التيار	- تقليل الحمل إن أمكن - يمكن تقليل درجة الحرارة بتحسين معامل القدرة للأحمال - مراجعة الدوائر الموصلة بالتوازي واختبار نسب التحويل للمحولات و Z
	(4) ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط .	- يتم علاج هذا بالتهوية الجيدة لغرفة المحولات
	(5) التبريد غير كاف	- لو أن تبريد المحول عن طريق استخدام وحدات تبريد ( مراوح ) يجب مراجعة وحساب كفاءة الوحدات المركبة و عددها .
	(6) انخفاض مستوى الزيت فى المحول .	- يجب تزويد المحول بالزيت إلى المنسوب الصحيح .
	(7) زيت ملوث بالألياف Sludge Oil	- فى هذه الحالة يستخدم مرشح ذو قوة ضغط
	(8) قصر فى القلب الحديدي	- إجراء اختبار تيار Exciting Current وكذلك معاوقة المحول بدون حمل

## Oil Troubles 2-4-15 مشاكل زيت المحول

المشكلة	السبب	الحل
1-انخفاض قيمة العزل الكهربائي للزيت	(1) زيادة كثافة بخار الماء في الجو المحيط بالمحول بسبب التهوية غير الجيدة	التأكد من أن فتحات التهوية لغرف المحولات غير مسدودة أو معوقة التهوية
	(2) تحطم رق المحول Broken relief diaphragm	يجب تركيب واحد آخر جديد
	(3) تسريب الفلانشات والوصلات الموجودة بتتك المحول	مراجعة هذه الأشياء
2- تغير لون الزيت بصورة سيئة	(1) تلوث الزيت بالألياف	ترشيح واختبار قوة العزل الكهربائي
	(2) كربنة الزيت نتيجة الأقواس الكهربائية	القيام باختبار قوة عزل الزيت الكهربائية على الفور والتأكد من أن قيمته سليمة
3- أكسدة الزيت ( الحموضة )	(1) ارتفاع درجة حرارة المحول	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تقليل الحمل إن أمكن</li> <li>- تحسين التبريد واختبار عملية تتابع مجموعات التبريد في العمل .</li> </ul>

## Electrical Troubles 3-4-15 المشاكل الكهربائية

## 1- أعطال الملفات:

وهناك ثلاثة أنواع من الأعطال المتعلقة بالملفات : الأول هو حدوث Short Circuit او قصر داخل الملف ، والثاني حدوث قطع أو Open Circuit بالملف. والثالث هو حدوث Short بين Two Phases.

أولا القصر ( Short ) داخل الملف.

أ. كيفية الاستدلال عليه: ويستدل عليه من اشتغال الـ Buchholz Relay أو حدوث ارتفاع غير عادي في حرارة الزيت أو ارتفاع غير عادي في شدة التيار الابتدائي.

ب. أسبابه : من أهم الأسباب التي تؤدي لحدوث Short الصواعق ، أو تدهور قوة العزل الكهربائي للملف أو تلف العازل بسبب ميكانيكي أو بسبب التقادم أو بسبب انخفاض مستوى الزيت في هذا الموضوع وربما بسبب حدوث تحميل زائد overload.

ت. الحل : قياس مقاومة الملفات في كل الـ phases باستخدام جهد DC منخفض حيث سيظهر الدخان في منطقة الـ Short ، ثم يبدأ الإصلاح. ويجب أيضا التأكد من مستوى الزيت وسلامة منظومة التبريد.

### ثانيا القطع ( Open Circuit ) داخل الملف.

- أ. كيفية الاستدلال عليه: يستدل عليه بسبب تولد شرارة Arc عند نقطة القطع وتحلل الزيت.
- ب. أسبابه : ضعف اللحام ، أو احتراق الموصل بسبب قصر انفصال الـ terminals بسبب قوى كهرومغناطيسية ناتجة عن قصر قوى.
- ت. الحل : الفحص بواسطة أميتر لقياس تيار كل Phase وقياس مقاومة الملفات كما في العطل السابق في توصيلة الدلتا للأوجه الثلاثة ، وفي حالة القطع الكامل ستجد أن المقاومة متساوية في الوجهين السليمين أما في الوجه المقطوع فستحصل على ضعف قيمة المقاومة . أما لو كان القطع غير كامل فستجد أن مقاومة الوجه المعطوب أكبر بنسبة ما - لكن ليس الضعف- من الآخرين.

### ثالثا القصر بين Two Phases

- أ. كيفية الاستدلال عليه: يستدل عليه بسبب اشتغال أجهزة الحماية الغازية وتطاير الزيت من ماسورة الحماية.
- ب. أسبابه: تلف العوازل الرئيسية بسبب التقادم - رطوبة في الزيت - انخفاض مستوى الزيت - ارتفاع كبير في الجهد الكهربائي بسبب صاعقة مثلا.
- ت. الحل : فحص الملفات بواسطة الميجر.

### 15-4-4 أعطال القلب الحديدي

أعطال القلب المغناطيسي متعددة ، ومنها :

#### ضعف العزل بين صفائح الشرائح:

- أ. كيفية الاستدلال عليه: يستدل عليه من تدهور حالة الزيت كارتفاع حموضته وانخفاض عازليته وكذلك يستدل على هذا العطل من ارتفاع نسبة No-load Loss .

ب. أسبابه : التقادم سواء كلى أو موضعى

ت. الحل : إخراج القلب وتجديد العزل ثم عمل فحوصات.

#### احتراق صفائح الشرائح:

أ. كيفية الاستدلال عليه: يستدل عليه من ظهور الغازات فى الـ Buchholz واستنشاق رائحة احتراق الزيت وتغير لون الزيت للأسود.

ب. أسبابه : حدوث Short بين نقطتين معدنيتين داخل المحول بسبب انهيار العزل بينهما ، أو بسبب تلف عوازل الربط للشرائح.

ث. الحل : إخراج القلب وتجديد العزل ثم عمل فحوصات.

#### صوت غير طبيعى :

أ. كيفية الاستدلال عليه: أى شخص متابع لحالة المحول يوميا يمكنه أن يعرف الصوت الطبيعى من غير الطبيعى.

ب. أسبابه : ضعف عملية ربط الشرائح - ضعف الربط لمجموع القلب - ارتفاع غير طبيعى فى جهد الابتدائى.

ت. الحل: التأكد من جهد الابتدائى أو إخراج القلب وإحكام ربطه.

#### صوت مسموع للأقواس الكهربائية الصغيرة.

أ. يستدل عليه من تصاعد صوت الشرر الكهربى من داخل المحول عند ارتفاع الجهد

ب. أسبابه : قطع سلك الأرضى - أجزاء معدنية داخل المحول غير مؤرضة.

ت. الحل : يجب التأكد من أن كل الأجزاء المعدنية داخل المحول مؤرضة مثل القلب الحديدي والكلامبات الخاصة به .

#### 15-4-5 مشاكل أخرى متنوعة :

1- الوميض (Flash Over) المرتفع على Bushings :

أ. أسبابها : صواعق ، تلوث البوشنجات

ب. الحل : مراجعة والتأكد من الوقايات ضد الصواعق كافية بورسيلين البوشنجات على فترات زمنية تعتمد على تلوث المنطقة .

2- قيمة جهد غير صحيحة

أ. السبب : نسبة التحويل غير مضبوطة

ب. الحل : إما تغيير لوحه الأطراف Terminal board وضبط النسبة أو تغيير توصيلة المحول .

## ملاحق الكتاب

## الملحق الأول

## قراءة لوحة بيانات المحول

## Name Plate Reading

البيانات الهامة والأساسية الخاصة بالمحول تدون بالحفر على صفيحة معدنية تعرف بالـ Name Plate ، ثم تثبت على جدار المحول. ويتوقف حجم المعلومات التي تدون على الـ Name Plate على حجم المحول نفسه والقدرة المنقولة خلاله ، فكلما كان المحول كبيراً كلما زادت المعلومات التي يجب تدوينها على لوحة بياناته. وسنعرض في هذا الملحق نماذج لمحولات متعددة القدرة ونشرح أهم البيانات المدونة عليهم وكيفية الاستفادة من هذه البيانات.

بداية ، فإن المعلومات المدونة على لوحة البيانات ستكون بعض أو كل البيانات التالية حسب حجم المحول ، ( والترتيب هنا غير مقصود ) :

## أولاً معلومات سريعة

- 1- اسم الشركة المصنعة : وهو ضروري للتواصل معها في حالة وجود أعطال أو مشاكل في الصيانة.
- 2- سنة التصنيع Manfact. Date : قد توضع منفردة في بعض المحولات
- 3- عدد الأوجه No of Phases : هل هو 1-Ø أم 3-Ø .
- 4- أقصى ارتفاع مسموح به في درجة الحرارة Max Temp rise : ويقصد به أقصى ارتفاع فوق درجة الحرارة العادية.
- 5- التردد Frequency
- 6- القطبية Polarity
- 7- نوع العزل Insulation Class
- 8- رقم مسلسل Serial number
- 9- القدرة Rated Power
- 10- مجموعة التوصيل الاتجاهية Vector Group connection
- 11- جهد المعاوقة Impedance voltage

- 12- زمن القصر Short circuit time
- 13- الوزن الكلي Total weight
- 14- وزن الزيت Oil weight
- 15- طريقة التبريد Type of cooling/Cooling Class
- 16- التيار المقنن Rated current
- 17- الجهد المقنن ( عند كل نقطة من نقاط مغير الجهد ) Rated voltage
- 18- منسوب عزل الدفع الأساسي ( BIL ) ( Basic Impulse Insulation level )
- وبعض من هذه المعلومات تحتاج إلى شيء من التفصيل كما يلي:

## ثانيا معلومات تحتاج لتفصيل

رقم التصنيع Serial Number :

ويمكن من خلاله معرفة سنة التصنيع وقدرة المحول

مثال 1	
وجد الرقم: 925554 محفورا على جسم محول. حدد ما يمكن استنباطه من هذا الرقم	
الحل:	
❖ الرقمين الأول والثاني من اليسار دائما يعبران عن سنة تصنيع المحول فـ "92" هنا تعنى 1992 ، و "75" فى مثال آخر تعنى 1975 ، و "02" تعنى 2002 ، وهكذا).	
❖ أما الرقم الثالث من الشمال ، فهو أهم رقم ، لأنه يبين قدرة المحول ، ويقرأ على النحو التالى:	
1 يعنى محول ذو قدرة تساوى	50 KVA
2 يعنى محول ذو قدرة تساوى	100 KVA
3 يعنى محول ذو قدرة تساوى	200 KVA
4 يعنى محول ذو قدرة تساوى	300 KVA
5 يعنى محول ذو قدرة تساوى	500 KVA

800KVA	6 يعنى محول ذو قدرة تساوى
1000 KVA	7 يعنى محول ذو قدرة تساوى
1500 KVA	8 يعنى محول ذو قدرة تساوى

وأخيرا ، فالرقم الأول والثانى والثالث من اليمين فيعبروا معا عن الـ Serial Number الخاص بخط الإنتاج بالمصنع . وعلى هذا فالرقم المذكور بالمثل يعبر عن محول بقدرة 500 kVA مصنوع سنة 1992.

### أسلوب التبريد Cooling Class : ( ONAN – ONAF – OFAF )

وإذا كان هناك أكثر من طريقة تبريد للمحول فستظهر قرين كل طريقة القدرة المقننة للمحول عند استخدام هذه الطريقة أو تلك. على سبيل المثال فبعض المحولات يتم تبريدها بتيارات الحمل Convection إذا كانت درجة الحرارة اقل من T1 م يتم تشغيل جزء من المراوح إذا كانت الحرارة بين T1-T2 ، ثم تشغيل كافة المراوح إذا تجاوزت الحرارة T2 ، وفى حالة هذا المحول فإن الـ Cooling Class ستكتب هكذا : 45/60/75 ONAN / ONAF / ONAF ، والأرقام الثلاثة تمثل قدرة المحول المقننة المناسبة لكل طريقة تبريد .

### قدرة المحول MVA Rating :

ونلاحظ هنا أنه يمكن أن يكون لدينا أكثر من قدرة للمحول الواحد وذلك حسب أسلوب التبريد كما فى البند السابق ، أو فى حالة وجود ملف ثالث Tertiary Winding ففى هذه الحالة ستكون القدرة المنقولة خلاله مختلفة عن القدرة فى الملفين الآخرين. أما المحولات التى لها ملفين فقط فتكتب لها قدرة واحدة (مالم يكن هناك تغير فى الـ Cooling Class كما ذكرنا) .

### هل تحدد قدرة المحول بالـ KVA أم بالـ KW؟

المحولات على عكس الموتور ليس لها mechanical output بل لها Electrical output فقط ، وهذا يعني أن التيار الخارج من المحول يمكن أن يكون له power factor تتراوح قيمته من 0 : 1 حسب طبيعة الحمل المتصل به ، ومن ثم يصبح غير مناسب أن تعرف المحول بالـ KW لأنها ستكون قيمة متغيرة حسب الحمل ، وإنما يعرف بالـ KVA ، ثم تحسب أن قيمة الحمل بالـ KW حسب الـ P.F الخاص بالحمل.



## الجهد المقنن Voltage Rating

وعند كتابة الجهد المقنن فإننا نستخدم ثلاث علامات متنوعة لكل واحدة منها معنى مختلف وهي :  
 (/) or slash ( \_\_\_\_ ) or Long Dash ( - ) or Dash . فالـ Dash تفصل بين الجهود المختلفة  
 لملفات الـ HV and LV . وأما الـ Slash فتستخدم عند وجود Taps ، أو للفصل بين الـ Line  
 voltage وبين الـ Phase Voltage ، وبالطبع يمكن التمييز بين الاستخدامين لأن الفرق بين الـ  
 Phase Voltage معروف ويساوى  $\sqrt{3}$  . وفى حالة أن الـ Line Voltage والـ Phase  
 Voltage كلاهما مكتوبين فهذا يعنى أن نقطة التعادل Neutral يمكن الوصول إليها Accessible .

## مثال 2

مامعنى : 230000GR.Y/132800 – 69000GR.Y/39840 – 12470

## الحل:

هذا المحول له 3-windings ، وهذا واضح بسبب وجود ثلاث (-) Dash . فملفات الجهد العالى  
 فيه جهدها 230kV وموصلة على شكل Y ومؤرضة ، و الـ Phase Voltage للجهد العالى يساوى  
 132.8 kV ، وقد عرفنا ذلك لأنه مكتوب بعد Slash والفرق بين الرقمين يساوى جذر 3 ، ثم ننتقل  
 للملف الثانى ومعلوماته تظهر بعد الـ Dash الأولى ، ومنها نعرف أن الـ Line voltage الخاص  
 به يساوى 69 kV ، وهو موصل بطريقة الـ Y ومؤرض أيضا ، و الـ Phase Voltage للجهد  
 المنخفض يساوى 39.84 kV . وطالما أن الـ Line Voltage والـ Phase Voltage كلاهما  
 مكتوبين فهذا يعنى أن نقطة التعادل Neutral يمكن الوصول إليها ، وأخيرا فإن الملف الثالث ومكتوب  
 بعد الـ Dash الثانية له جهد واحد وهو 12.47 kV أى أنه موصل دلتا.

## مثال 3

مامعنى بيانات الجهد التالية : 69000-12470Gr Y/7200

## الحل:

هذا المحول ملفات جهده الابتدائى موصلة دلتا ويساوى 69 kV ، وملفات الجهد الثانوى موصلة ستار  
 ومؤرضة ونقطة التعادلة فيها متاحة ، والـ line voltage لها يساوى 12.47 kV بينما الـ Phase  
 Voltage يساوى 7.2 kV . مع ملاحظة أنك إذا أردت أن تحصل على الـ turns ratio فيجب أن  
 تقسم 69 على 7.2 وليس على 12.47 .

**منسوب الـ ( BIL ) ( Basic Impulse Insulation level )**

تحدد قيمة ( BIL ) قدرة العوازل داخل المحول على تحمل الارتفاع المفاجئ في الجهد نتيجة للصواعق أو أي مصدر داخلي من مصادر ارتفاع الجهد المفاجئ كقصر الدائرة و عمليات الفصل والتوصيل على المحول .

**معلومات الـ Vector Diagram**

هذه المعلومة يمكن أن تعطى بالرسم ويمكن أيضا أن تكون معطاة بالرموز وليس بالرسم كأن يكتب مثلا أن هذا المحول Dy11 or YY3 or YY1 إلخ. والرقم 1 أو 3 أو 11 إلخ يسمى رقم المجموعة الاتجاهية. ومنه نحدد الزاوية بين جهد الخط في جانب الجهد المنخفض وجهد الخط في جانب الجهد الأعلى وهي المعروفة بزاوية طور ( Phases shift ) ويحدد مقدارها بضرب (رقم المجموعة الاتجاهية)  $\times 30$  ، حسب القواعد التي سبق شرحها في موضعها بالكتاب.

**رسومات الـ Connection Diagram**

وهذه المعلومة مهمة جدا لاسيما إذا كان المحول به Tap Changer ، فبدونها لا تستطيع تحديد التوصيلة المناسبة للجهد المطلوب.

**قيمة الـ Percentage Impedance Z%**

وهي قيمة واحدة في المحولات الـ Two Windings وتكون محسوبة بناء على MVA Base تساوى الـ Power rated للمحول. أما إذا كان المحول به 3-Windings فستختلف Z من ملف لآخر كما في المثال.

**مثال 4**

ما معنى :

*Impedance Volts 16% 230000Gr.Y*

*– 69000 Gr.Y Volts at 75000 kVA*

*Impedance Volts 14% 230000Gr.Y – 12470 Volts at 26250 kVA*

*Impedance Volts 12% 69000Gr.Y – 12470 Volts at 26250 kVA*

**الحل:**

المثال واضح في كون أن لدينا Z% لها قيم مختلفة في محول له winding 3 فالقيمة بين الابتدائي والثانوي تساوي 16% ومحسوبة على  $MVA = 75$  بينما قيمة Z% الموجودة بين الـ HV وبين الـ Tertiary Winding تساوي 14% ومحسوبة على  $MVA = 26.250$  والثالثة الموجودة بين الـ LV وبين الملف الثالث قيمتها 12% ومحسوبة على  $MVA = 26.250$ .

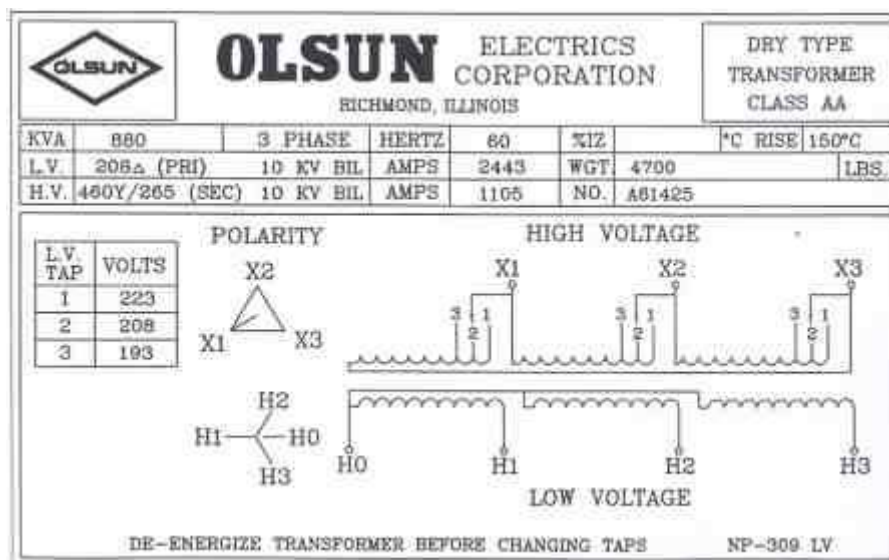
#### الوزن التقريبي :

هذه المعلومة مهمة في المحولات الكبيرة لتقدير حجم سيارة النقل التي ستنقله من مكان آخر، وتفيد أيضا في معرفة وزن الزيت الأصلي .

#### معلومات الضغوط القصوى Pressures

لوحة البيانات تحتوى أيضا على معلومات حول أقصى Positive Pressure يتحمله الـ Tank وأقصى negative Pressure يسمح به أثناء عمل Vacuum Filling ومعلومات حول حجم الزيت ومستواه عند 25 درجة مئوية .

## نماذج للوحات البيانات



VERIFIE

BEAVER ELECTRICAL MACHINERY LTD.  
7440 LOWLAND DRIVE, BURNABY B.C. CANADA V5J 5A4  
LR 34493

CAT. NO. BA30C-N1/Z/B KVA 30 ENCL. TYPE-3R  
SERIAL NO. C 88203 HZ 60 TYPE ANN  
TRANSFORMER 3 PH ISO. % IMP. 6.5 AT 170 C.  
INSULATION CLASS 220 C. TEMPERATURE RISE 150 C.  
PRI. VOLTAGE 240 DELTA X1-X2-X3 BIL. 10 KV.  
SEC. VOLTAGE 400Y/231 H0-H1-H2-H3 WT 305 LBS.

PRI. VOLTAGE	CONNECTION CONNEXION
105.0%	1-1-1
102.5%	2-2-2
100.0%	3-3-3
97.5%	4-4-4
95.0%	5-5-5

MANUFACTURED BY REX POWER MAGNETICS (J 10)

SPRINKLER PROOF WHEN THE ANGLE BETWEEN SPRINKLER HEADS AND OPENINGS IN THE ENCLOSURE DOES NOT EXCEED 45° FROM THE VERTICAL

A L'ÉPREUVE DES INFILTRATIONS D'EAU LORSQUE L'ANGLE ENTRE LES GICLERS ET LES OUVERTURES DU BOITIER N'EST PAS SUPÉRIEUR

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS****WEIGHTS & DIMENSIONS**

20/25 M.V.A 66/11.86 K.V. TRANSFORMER

<b>DESCRIPTION</b>	
<b>Standards</b>	IEC60076
Type Reference	3-Phase Oil Immersed Power Transformer
Installation	Outdoor
Max.Altitude Of Installation	1000M
Rated Power	20/25 M.V.A
Type Of Cooling	ONAN/ ONAF
Rated Voltage Ratio At No Load At Principle Tapping	66/ 11.86 K.V.
Rated Voltage Ratio At Full Load At Principle Tapping	66/11 K.V.
Frequency	50 Hz
Vector Group	Dyn 11
Load Losses At 95 °C Full Load ONAF And Principle Tapping	93 Kw
No Load Losses	20 Kw
Impedance Voltage At Rated Current And 95 °C	10 %
Fans Power Consumption	3.3 Kw
<b>Temperature Rise</b>	
Max.Ambient Temperature	45 °C
Max. Winding Temperature Rise Over Ambient	50 °C
Max. Core Temperature Rise Over Ambient	50 °C
Max. Oil Temperature Rise Over Ambient	45 °C
Hot Spot Temperature Rise over Ambient	60 °C
<b>Noise Level</b>	< 73 dB
<b>Weights</b>	
Total Weight Of Oil	11.3 T
Weight Of Transformer Ready For Shipping	43.3 T
Weight Of Transformer Ready For Operation	51.5 T
<b>Dimensions</b>	
Dimensions Of Transformer Ready For Operation In Meter	5.65 X 3.9 X 4.05 M



## الملحق الثاني

وفيما يلي بعض أهم أعمال الصيانة في النوعين ، وهي منقولة من مطبوعات إدارات صيانة المحولات:

### أعمال الصيانة التي تجرى مرة واحدة في السنة

وهذه تقتصر على تنظيف وملاحظة الأجزاء الخارجية التالية للمحول وهي:

- خلو عوازل مخارج التيار من أضرار الكسر أو التشقق أو التصدع وإزالة الأتربة والأوساخ المتراكمة واستبدال غير الصالح منها.
- تنظيف وضبط Contacts الخاصة بالمصهرات الضغط العالي واستبدال المعطوب منها.
- التأكد من انعدام رشح الزيت من مناطق اللحام والتأكد من الإحكام الجيد لها.
- التأكد من عدم ارتفاع درجة حرارة الزيت عن المعدلات المسموح بها.
- التأكد من سلامة عمل مراوح التهوية ونظافة أنابيب التبريد والريدياتير.
- يجب أن تكون التهوية جيدة في المحولات المركبة داخل غرف مسقوفة
- يجب تسجيل الحمل بواسطة أجهزة القياس التابعة للمحول
- التأكد من سلامة عمل أجهزة الحماية وإشارات التحذير وكذا الإنارة الخارجية
- يجب التأكد من مطابقة مكونات المحول وأدائه للمواصفات والخصائص المذكورة في كتيب الشركة المصنعة.

### أما الصيانة التي تجرى مرة واحدة كل 10 سنوات فتشمل الأعمال التالية:

- إخراج جسم المحول (القلب الحديدي) من خزانه الرئيسي وإجراء الفحوصات الكهربائية علي ملفات المحول للتأكد من مقدار المقاومة وقوة العزل وعدم تواجد حالات Open كاملة أو ناقصة
- عند إخراج الملفات من القلب الحديدي يتطلب فك الصفائح الحديدية السليكونية وتنظيفها والتأكد من سلامة عزلها ومن ثم تجميعها وربطها بإحكام
- إعادة ربط التآريض بإحكام والتأكد من استمراريته وتنظيف الدعامة الأمامية للمحول وربطها بإحكام
- تجفيف الملفات واستبدال عوازلها التالفة وتنظف من رواسب الزيت ويعاد تركيبها
- فك مفتاح تحويل الضغط وتنظيف الـ Contact الخاصة به
- تنظيف نهايات الملفات واستبدال عوازلها التالفة والتأكد من متانة لحاماتها

- تنظيف الخزان الرئيسي من رواسب الزيت وإعادة صب جدرانه الخارجية والداخلية بورق التنظيف الخاص والتأكد من عدم تواجد لحامات رديئة والتأكد من عمل عجلات الخزان واستبدال العزل المطاطي على حافة فوهته العلوية
- تنظيف الغطاء العلوي والخزان المساعد من الزيت والشوائب والتأكد من سلامة مبيّن درجة الحرارة ومستوى الزيت.
- فحص أجهزة الوقاية وملاحظة مدى انتظام عملها واستبدال الأجزاء التالفة منها



## الملحق الثالث

## الاحتياطات الواجب مراعاتها قبل وضع المحول في الخدمة :

- مراجعة لوحة البيانات والتأكد مما يلي :-
- 1- تطابق الجهود على لوحة بيانات المحول وجهد الشبكة .
- 2- التأكد من وضع مغير الجهد على الوضع الملائم لجهد الشبكة.
- 3- يجب أن تكون قدرة المحول اكبر من قدرة الحمل بحيث تكون قدرة الحمل  $\geq 85\%$  من قدرة المحول.
- الفحص الظاهري للمحول والتأكد مما يلي :-
- 4- عدم وجود أي تسريب في الزيت من جوانات الخزان الرئيسي أو جوانات عوازل الاختراق.
- 5- التأكد من نظافة عوازل المحول (البوشينج ) وعدم وجود أي كسر أو شروخ بها .
- 6- التأكد من ارتفاع مستو الزيت في زجاجة البيان وألا يكون اقل من العلامة السفلية في خزان التمدد.
- 7- التأكد من صلاحية مادة السيليكا جل بحيث يكون لونها أزرق وإذا تغير إلى الأبيض أو الوردي فيمكن تجفيفها في فرن 200 °م حتى تستعيد لونها الأزرق أو تغييرها .
- 8- التأكد من صلاحية الأجهزة الخاصة بالمحول مثل البوخلز والترمومتر .
- 9- اختبار المحول والتأكد من سلامة مقاومة العزل ونسبة التحويل واستمرارية التوصيل وعزل الزيت .
- 10- في حالة تركيب المحول داخل غرفة يراعى أن تكون غرفة المحول مناسبة مع حجمه ، ويجب وجود فتحتين للتهوية في اتجاهين متضادين إحداها قريبة من الأرض لدخول الهواء البارد والأخرى في الاتجاه المضاد أعلى المحول لخروج الهواء ، ويجب تغطية هذه الفتحات بسلك شبك معدني .

## الملحق الرابع

## قواعد الأمان للعمل على شبكات توزيع الكهرباء

إجراءات الأمان الصناعي عند العمل في كشك أو محول :-

1- الفصل الكلي وأسبابه .

- عند إجراء الصيانة الجسيمة .

- عند إجراء صيانة طارئة لسكاكين الدخول والخروج .

2- الفصل الجزئي وأسبابه .

- عند تغيير زيت المحول نفسه.

- عند تغيير مصهرات الجهد المتوسط للمحول .

أهم إجراءات الأمان الصناعي قبل البدء في العمل

\* عند الفصل الكلي :

- فصل جميع مغذيات الجهد المنخفض بالكشك المراد العمل به .
- فصل جميع المغذيات التي يمكن أن تغذى منها الكشك بالتيار من جميع الجهات (محطة - محولات - لوحة توزيع - أكشاك أخرى) . مع فصل ووضع أرضى على الخط والتفريغة في حالة المحولات المعلقة مع وضع لوحات تحذير ( ممنوع التوصيل - عمال قائمون بالعمل ) .
- التأكد من عدم وجود جهد باستخدام مبين الجهد على جميع أطراف السكاكين الموصلة والمفتوحة (الربط) .
- وضع أرضى على أطراف كابلات الجهد المتوسط التي من الممكن أن توصل التيار الكهربى إلى الكشك .

عند الفصل الجزئي

( ١ ) - عند تغيير زيت المحول او صيانة المحول نفسه:

- فصل جميع مغذيات الجهد المنخفض بالكشك المراد العمل به .
- فصل سكينه الجهد المتوسط للمحول من اليد المعزولة او استخدام الخطاف المعزول مع لبس جاونتى عازل .

- عمل سور حول الأجزاء الحاملة للتيار ووضع لوحات تحذير عليها ( خطر ) إذا لم يكن هناك حاجز موجود .
- التأكد من عدم وجود جهد على أطراف المحول ( دخول - خروج ) باستخدام مبيان الجهد .
- وضع أرضى محلى .
- ( ب ) عند تغيير مصهرات الجهد المتوسط للمحول .
  - عند تشعير الفيوزات من الخارج .
  - وضع التشعيرة المقننة للفيوزات من الداخل .
  - التأكد من عدم وجود مادة السيليكا داخل الفيوز لإطفاء الشرارة وذلك عند تغيير التشعيرة.
  - عدم تركيب تشعيرة عارية كفيوز داخل كابينة أو حجرة المحولات أو بالسكاكين المركبة على المحولات المعلقة .
  - إعداد فيوزات وتشعيرات احتياطي مقننة حسب قدرة كل محول .

### التأكد من عدم وجود الجهد

التأكد من عدم وجود الجهد بالطرق الآتية :-

- ( ١ ) - استعمال مبيان جهد معتمد ومناسب لجهد المعدة . ويجب عند استعمال مبيان الجهد اتباع الآتي :
  - الاطلاع على شهادة صلاحيته والتأكد من استمرار سريانها .
  - أن يكون جافاً ونظيفاً وأن يكون دهان الورنيش إن وجد سليماً وليس به أي خدش .
  - يجب أن يراعى عند مسك المبيان باليد عدم تعدى العلامة المحددة لذلك .
  - اختبار لمبته وصوته بالطريقة المقننة للمبين .
  - إعادة اختبار لمباته وصوته بالطريقة المقننة للمبين وفي حالة سقوطه أثناء العمل فيجب إعادة اختبار لمباته وصوته.
  - يحظر اختبار مبيان الجهد بتقريبه من موصل حي ، بل يجب اختبار مبيان الجهد بالطريقة المقننة طبقاً لتعليمات جهة الصنع .

( ب ) - تتبع الدوائر الرئيسية الناقلة للتيار بالنظر والتأكد من أن جميع السكاكين المتصلة بمصادر التغذية مفصولة .

( ج ) - بالإضافة إلى الطريقتين السابقتين يجب ملاحظة الآتي :-

- عدم وجود أصوات الشرارة عند أطراف السكاكين و على العوازل والموصلات .
- عدم ظهور صوت أو ضوء تأين الهواء ( كورونا ) حول الموصلات .
- عدم وجود صوت بالمحولات وأن تكون قراءة الفولتميتر على الصفر .

### وضع الأرضي

١ - بعد التأكد من عدم وجود الجهد يتم وضع الأرضي الرئيسي على الثلاثة أوجه للأجزاء الناقلة للتيار التي تم فصلها ومن جميع الجهات التي يمكن عن طريقها وصول الجهد إليها وذلك بتعليمات من مهندس التحكم المتخصص أو المشرف على العمل . ويجب تأريض الثلاثة أوجه حتى لو كن العمل على وجه واحد .

ب - يتم عمل أرضي إضافي قبل وبعد مكان العمل .

ويجب أن تتوافر الشروط الآتية في الأرضي الإضافي :-

- ألا يقل مقطع موصلات الأرضي عن 35مم<sup>2</sup> نحاس من السلك الشعر .
- أن يتم تثبيت كلابات وصلات الأرضي بواسطة مواسير وألا يقل مقطع التلامس عن مقطع السلك المستخدم .
- يجب أن يتم فحص موصلات الأرضي الإضافي والكلمبات الخاصة به قبل كل استعمال ودوريا كل ثلاث شهور .
- يجب ترقيم مجموعات الأرضي الإضافية الموجودة في كل موقع مع ترقيم أماكن معظمها .
- يجب قياس مقاومة شبكة الأرضي العمومية للمعدة ( كشك/ لوحة توزيع ... ) كل عام في الأماكن المحددة لذلك والتأكد من وجود اتصال جميع الأجزاء المؤرضة بهذه الشبكة العمومية .

### طريقة وضع ورفع الأرضي

يجب اتباع الخطوات الآتية في وضع ورفع الأرضي :

( ا ) يجب تفريغ الشحنة الكهربائية المحتمل أن تكون بالمعدة قبل وضع الأرضي وأن يتم وضع الأرضي بمعرفة شخصين أحدهما من الفئة الرابعة والآخر من الفئة الثالثة في الأمن الصناعي على الأقل. ويجب أن يكون مسئول التشغيل او منفذ العمل أحد الشخصين القائمين بوضع الأرضي .

( ب ) في حالة وضع الأرضي الإضافي يجب اتباع الخطوات الآتية :-

- تنظيف مكان تثبيت كلمبات الأرضي بشبكة الأرضي .
- فحص موصلات الأرضي .
- تثبيت موصلات كلمبات الأرضي بشبكة الأرضي تثبيتاً جيداً بواسطة مسامير .
- يتم التأكد من عدم وجود الجهد بواسطة مبین الجهد ويتم عمل أرضي مؤقت باستخدام برش (عصا عازلة ) ويشترط أن يكون السلك المتصل بالبرش معزولاً بمادة شفافة للتأكد من سلامته وأن يستخدم القفاز العازل عند مسك البرش .
- يتم ربط الأطراف الأخرى لمجموعة الأرضي الإضافي واحد بعد الآخر جهة الموصلات.
- عمل سور حول مكان العمل وتعليق لافتات التنبيه والتحذير .

( ح ) يتم رفع الأرضي الإضافي بالطريقة الآتية :

- يتم رفع كلمبات الأرضي الإضافي الموصلة بالموصلات باستخدام العصا العازلة .
- يتم فك ورفع كلمبات موصلات الأرضي الإضافي الموصلة بشبكة الأرضي .

## الملحق الخامس

### أسئلة متنوعة عن المحولات

### FAQ



**1. What is an Air Cooled transformer?**

It is a transformer that uses "air" as the cooling medium. This term is abbreviated with the ANSI designation AA, indicating open, natural draft ventilated construction.



**2. What is Ambient Noise Level?**

The noise level of the surrounding area, measured in decibels (dB).



**3. What does ANSI stand for?**

The American National Standards Institute Inc. - one of the recognized organizations that specify the standards for transformers.



**6. What is an Autotransformer?**

It is a transformer that has only one winding per phase, part of which is common to both the primary and secondary circuits.



**7. What does the term Banked describe?**

Two or more single-phase transformers connected together to supply a three-phase load.



**8. What does the term BIL mean?**

Basic impulse level is a means to express the ability of the insulation system to withstand high voltage surges.



**16. What is the term Continuous Rating?**

The constant load which a transformer can carry its rated primary voltage and frequency, without exceeding its specified temperature rise.

☐ **17. What is a Control Transformer?**

It is a transformer that is designed to supply good voltage regulation characteristics when low power factor or high inrush current is drawn. Usually referred to as an Industrial Control Transformer.

☐ **18. What is the Core of a transformer?**

It is the electrical grade steel laminations, which carry the magnetic flux.

☐ **19. What is Core Loss?**

Losses in watts caused by magnetization of the core and its resistance to magnetic flux when excited or energized at rated voltage and frequency. Also referred to as excitation loss or no-load loss.

☐ **23. What are "Dielectric Tests"?**

These tests consist of the application of a voltage higher than the rated voltage for a specified time, for the purpose of determining the adequacy against breakdowns of insulating materials and spacing under normal conditions.

☐ **24. What is a "Dry Type" transformer?**

A dry type transformer is one in which the transformer core and coils are not immersed in a liquid.

☐ **27. What is an "Electrostatic Shield"?**

It is Copper or other conducting material placed between the primary and secondary winding and grounded to reduce electrical interference and to provide additional protection.

☐ **28. What is "Exciting Current (No-Load Current)"?**

Current which flows in any winding used to excite the transformer when all other windings are open-circuited. It is usually expressed in percent of the rated current of a winding in which it is measured.

☐ **36. What is a Full Capacity Tap?**

A full capacity tap is one through which the transformer can deliver its rated kVA output without exceeding the specified temperature rise.

☐ **37. What is a Grounding Transformer?**

It is a special three-phase autotransformer for establishing a neutral on a 3-wire delta secondary. Also referred to as a 'Zigzag' transformer.

☐ **42. Describe Hi Pot?**

It is a high potential dielectric test impressed on the windings to check insulation materials and clearances.

☐ **44. What is an Impulse Test?**

It is a dielectric test that determines the BIL capability by applying high frequency, steep wave-front voltage between windings and ground.

☐ **47. What is Inrush Current?**

It is an abnormally high transient current, caused by residual flux in the core, which maybe drawn when a transformer is energized.

☐ **49. What is an Isolation Transformer?**

It is a transformer that insulates the primary circuit from the secondary circuit. Also referred to as a two-winding or insulating transformer.

☐ **59. What does the abbreviation NEMA?**

National Electrical Manufacturers Association.

☐ **60. What are No-Load Losses (Excitation Losses)?**

It is the loss in a transformer that is excited at rated voltage and frequency, but without a load connected to the secondary. No-load losses include core loss, dielectric loss, and copper loss in the winding due to exciting current.

☐ **64. What is Polarity?**

It designates the instantaneous direction of voltages in the primary compared to the secondary.

☐ **69. What is a Primary Winding?**

The primary winding is the winding on the energy input (supply) side.

☐ **75. What is a Rectifier Transformer?**

A transformer designed to supply AC input to a rectifier to obtain the desired DC output and have the ability to withstand the heating effects caused by rectifier commutation or ripple.



☐ **90. What is Temperature Class?**

It is the maximum temperature that the insulation can continuously withstand. The classes of insulation systems in a transformer are rated as follows:

Class 105°C

Class 150°C

Class 180°C

Class 220°C

☐ **95. What are some of the Tests performed on transformers?**

Normal, routine production tests include: (1) core loss; (2) load loss - winding or copper loss;

(3) Impedance; (4) hi-pot - high voltage between windings and ground; (5) induced - double induced two times voltage. Optional special tests include: (a) heat run - temperature testing;

(b) Noise tests - sound level measurement; (c) impulse tests - BIL tests: (d) partial discharge.

☐ **149. What are K-Factor Transformers and where are they used?**

K-factor transformers are used as a general-purpose transformer but are designed to withstand the variety of harmonics created in today's office and industrial environments. The expanding use of devices with switch-mode power supplies and rectifier circuits with the subsequent wave distortion requires transformers to withstand the higher harmonics in the neutral conductor in the distribution system.

☐ **150. Define K-Factor?**

K-Factor is defined as a ratio between the additional losses created by the harmonics and the eddy losses at the rated 60 Hz. This factor is used to specify the size of the transformer to meet the magnitude of the harmonic load in the circuit. A standard general-purpose transformer does not have the shielding, conductor sizes, core cross-section, or the capacity in the neutral to provide the same service.

☐ **161. What are Power Transformers?**

Hammond offers a wide range of dry type power transformers, rated from 750kVA up to 25 MVA. They are suitable for commercial, industrial, manufacturing or production process applications. With three phase ratings to 46 kV class and up to 25 MVA, Hammond offers the latest technology and manufacturing processes available today.

☐ **162. Explain the Banking of Transformers?**

Two or three, single-phase transformers can be connected to make a three-phase bank. The primary windings of the single-phase transformers can be connected in delta or

Wye and the secondary windings can be connected in either a delta or Wye configuration. The equivalent capacity of the bank will be equal to three times the nameplate rating of each single-phase transformer. Usually this type of installation is more expensive than using a single three phase transformer.

□ **163. What are Primary Voltage Taps?**

In some cases, the actual supply voltage to the primary of the transformer is either slightly higher or lower than the nameplate rating. Taps are provided on most transformers on the primary winding to correct this condition and maintain full rated output voltage and capacity. Standard taps are usually in 2 1/2% or 5% increments. Example: The transformer has a 480V primary rating and the incoming voltage is at 504V. The primary connection should be made at the +5% tap in order to maintain the nominal secondary voltage.

□ **164. Can you operate a 60Hz Transformer at 50 Hz?**

Transformers rated at 60Hz should not be used on a 50Hz supply due to higher losses and core saturation, and the resultant higher temperature rise. Transformers rated for 50Hz, however, can be operated on a 60Hz supply.

□ **165. Explain Balance Loading on Single and Three Phase Transformers?**

A single-phase transformer with 120/240V secondary has two separate 120V secondary windings and is usually connected into a 3-wire system. Care must be exercised in distributing the load on the two 120V windings evenly, so each winding is carrying about half of the total load.

Similarly for a three-phase transformer, each phase should be considered as a single-phase transformer. When distributing single-phase loads between the three phases, each of the three windings should be evenly loaded.

□ **166. When is Sound Level an issue in the design?**

Sound needs to be considered when transformers are located in close proximity to occupied areas. All energized transformers emanate sound due to the alternating flux in the core. This normal sound emitted by the transformer can be a source of annoyance unless it is kept below acceptable levels. There are ways of minimizing sound emission as discussed in the Hammond "Field Service Guide". Hammond Transformers are built to meet the latest ANSI, CSA and UL standards. These standards are outlined in the accompanying table.

□ **168. Under what circumstance does need D.C. Resistance Measurement?**

Current from a D.C. resistance bridge is applied to the transformers windings to determine the D.C. resistance voltage of the coils. This test is important for the calculation of I<sup>2</sup>R for use in the winding temperature test, and as base data for future

assessment in the field.

□ **169. What is a Polarity and Phase-Relation test for?**

Polarity and phase-relation tests are made to determine angular displacement and relative phase sequence to facilitate connections in a transformer. Determining polarity is also essential when paralleling or banking two or more transformers.

□ **170. Explain Voltage Ratio (turns ratio)?**

To confirm the voltage ratio of a transformer, the ratio of the number of turns in the high-voltage winding with respect to the number of turns in the low-voltage winding, is measured.

□ **171. What are No-Load and Excitation Current tests?**

No-load losses (excitation losses) are the core losses of a transformer that are "excited" at rated voltage and frequency, but which do not supply load. No-load losses include core loss, dielectric loss, and losses in the windings due to exciting current. The transformer is excited at rated voltage with all other windings open circuited. The exciting current and no load loss is then measured.

(Note: This is a standard test only on units over 500kVA. It will only be carried out on lower kVA units when specifically requested.)

□ **172. What are Dielectric tests?**

The purpose of dielectric tests is to demonstrate that the transformer has been designed and constructed to withstand the voltages associated with specified insulation levels.

□ **174. What is an Induced Voltage test?**

The induced voltage test is applied for 7200 cycles or 60 seconds whichever is shorter. The voltage applied is twice the operating voltage, and confines the integrity of the insulation

□ **175. What are Impedance Voltage and Load Loss tests?**

The voltage required to circulate the rated current under short-circuit conditions when connected on the rated voltage tap, is the impedance voltage. Rated current is circulated through the windings with the secondary short-circuited. The impedance voltage and load loss is measured. They are corrected to rise +20°C reference temperature. (Note: This is a standard test only on units over 500kVA. It will only be carried out on lower kVA units when specifically requested.)

☐ **176. What are Type Tests?**

Type Tests are required either to qualify a new product or to further certify a production product. The following is a list of type tests performed on Hammond Transformers.

Temperature Rise Test

Sound Level Test

Partial Discharge (corona)

Basic Impulse Insulation Level (BIL)

Short-Circuit Test

☐ **177. What is a NEMA 1 enclosure?**

This is a general-purpose ventilated enclosure for indoor use primarily designed to provide a degree of protection against limited amounts of falling dirt. It is ideal for normal factory environments.

☐ **178. What is a NEMA 1-N enclosure?**

This is a general-purpose non-ventilated enclosure for indoor use primarily designed to provide a degree of protection against limited amounts of falling dirt. It is ideal for normal factory environments.

☐ **179. What is a NEMA 2 enclosure?**

This is a general-purpose enclosure for indoor use primarily to provide a further degree of protection against limited amounts of falling water (drip proof) and dirt.

☐ **181. What is a NEMA 3 enclosure?**

This is a general purpose ventilated enclosure for outdoor use designed primarily to provide a degree of protection against rain, sleet, wind blown snow or dust and damage from external ice formation. It is considered ideal for construction sites, subways etc.

☐ **182. What is a Non-ventilated enclosure?**

A non-ventilated enclosure is constructed to restrict unintentional circulation of external air through the enclosure.

☐ **183. What is a Ventilated enclosure?**

A ventilated enclosure is constructed to provide circulation of external air through the enclosure to remove excess heat.

☐ **186. What is a NEMA 4 enclosure?**

NEMA 4 is a non-ventilated indoor or outdoor enclosure designed primarily to provide a degree of protection against windblown dust and rain, splashing water, hose-directed water, and damage from external ice formation. It is suitable in areas where exposure to large amounts of water from any direction. (Note: not submersible)

□ **187. What is a NEMA 4X enclosure?**

This enclosure is the same as the NEMA 4, and is also corrosion resistant. It is ideal for environments such as food processing plants and refineries.

□ **188. What is a NEMA 12 enclosure?**

This is a non-ventilated indoor enclosure designed primarily for providing a degree of protection against circulating dust, falling dirt, and dripping non-corrosive liquids. This enclosure is both oil and rust resistant suitable for applications such as oil refineries where oil or other chemical liquids may be prevalent. (Note: not watertight)

□ **189. Why is Clean Power so critical?**

Your computer is a delicate electronic instrument. When you use the keyboard, you're sending a series of tiny electronic impulses through the computers circuits. The computer 'reads' these electronic impulses and makes calculations or performs tasks according to your programmed instructions. If the electrical power feeding your computer is smooth and clean, your computer will behave normally. However, if the power fed into your computer is "dirty", you could be in for many unpleasant surprises.

□ **190. What is Dirty Power?**

Dirty power is caused by a number of things. Simply put, dirty power is what causes your radio or telephone to 'crackle' during an electrical storm; or what causes 'snow' on your TV when someone is using a power tool, sewing machine or other appliances in your house. This dirty power, or electrical noise, is a nuisance when it appears on your radio, TV or telephone. When it gets into your computer, it can cause serious errors; improper readouts, printing problems, or even damage your computers circuit.

□ **191. How does Dirty Power affect my electronic equipment?**

Your computer operates by reading electronic impulses. Dirty power contains a great number of random pulses riding on the normally smooth surface of a power wave. As these random pulses enter the circuits, your computer 'reads' them as data. This can cause a whole range of problems. You may suddenly get garbled numbers or letters in a readout or printout.

You could loose files, skip program steps, have trouble loading programs or have

connection problems while on the Internet.

□ **192. How bad can the Dirty Power problem get?**

One form of dirty power usually called a surge can burn out computer, audio, video or nay other electronic circuitry in seconds. A surge is a high voltage pulse riding the normal power wave. Surges will commonly measure 600 to 2500 volts. Even though they occur for only mille-seconds, this is enough time to melt down circuits.

□ **194. What are Voltage Fluctuations?**

Under voltages and over voltages are caused by faults on power lines, and the subsequent actions of fault clearing devices. Also, by heavy loads, such as machinery start-up and by the slow reaction of power company regulating equipment. Since computer equipment is designed to operate close to nominal voltages, the effects of these voltage variations can cause serious problems. Voltages can drop as much as 20% of nominal. This can result in expensive and time consuming errors, loss of information, downtime, recovery and rerun costs and possible equipment damage.

□ **195. What is electrical Noise?**

Noise is a very broad term that can be applied to a number of AC power line disturbances. Lightening surges or any other sudden changes in load, such as switching motor loads or power factor correcting capacitors can produce voltage spikes and ringing. Phase controlled rectifier loads and arcing devices produce continuous noise unless adequately filtered. Noise sources are either common mode, which appears between both sides of a power line and ground or of transverse mode, which appears from line to line. Hammond Clean Power products, such as our Computer Regulators remove these noise sources.

□ **196. What are Harmonics?**

Harmonics, in an electrical system, are currents created by non-linear loads that generate non-sinusoidal (non-linear) current waveforms. These current and voltage wave forms operate on frequencies that are in multiples of the fundamental 60hz frequency. That is, the fundamental frequency is at 60 hertz, the 2nd harmonic is at 120hz frequency (60 x 2), the 3rd at 180 hertz, and so forth. Harmonics are principally the by-product of switch-mode power supply technology where AC is rectified to DC, and back again. In the process, a capacitor is charged in the first half-cycle, and then discharged in the next half-cycle, in supplying current to the load. This cycle is repeated. This action of recharging causes AC current to flow only during a portion of the AC voltage wave, in abrupt pulses. These abrupt pulses distort the fundamental wave shape causing distortion to the various harmonic frequencies.

□ **197. What are Non-Linear Loads?**

Today, non-linear loads make up a large percentage of all electrical demand. Rectified input, switching power supplies and electronic lighting ballasts are the most common single-phase non-linear loads. Harmonic currents and voltages produced by single phase, non-linear loads which are connected phase-to-neutral in a three phase four wire system, are third order, zero sequence harmonics (the third harmonic and its odd multiples - 3rd, 9th, 15th, 21st, etc., phasors displaced by zero degrees). These third order, zero sequence harmonic currents, do not cancel but add up arithmetically on the neutral bus, creating a primary source of excessive neutral current.

□ **198. Explain the K-Factor rating?**

K factor is defined as a ratio between the additional losses due to harmonics and the eddy current losses at 60Hz. It is used to specify transformers for non-linear loads. Transformers with a rated K factor of 4, 7, 13, 20 and 30 are available. For balanced loading, a transformer with a K factor of 4 should be specified when no more than 50% of the total load is non-linear. A transformer with K factor 13 should be specified when 100% of the load is non-linear.

## المراجع

### أولا المراجع العربية:

- 1- م. رباح فارس ، بحث في الفحوصات الموقعية لمحولات القدرة الكهربائية.
- 2- م. محمد الفيومي ، مذكرة حول : صيانة محطات التحويل
- 3- م. محمود بدر ، مذكرة عن : المحولات الكهربائية
- 4- محاضرات مركز تدريب الكوادر الفنية بالإسماعيلية - المنطقة الصناعية
- 5- د. مهدى العريني : المحولات الكهربائية - الهيئة العامة للتعليم التطبيقي والتدريب
- 6- د. محمد أحمد قمر : المحولات الكهربائية وآلات التيار المستمر - دار الراتب الجامعي
- 7- بيريلوتر - ترجمة عيسى الزيدى : الف وال عزل في الماكينات والمحولات الكهربائية - دار مير موسكو

### ثانيا المراجع الأجنبية

- 1- Stephen L. Herman , Electrical transformers and rotating machines, 3rd Edition, © 2012, 2006 Delmar, Cengage Learning.
- 2- ABB-Transformer Handbook, © 2004 ABB Ltd.
- 3- James H. Harlow, Electric power transformer engineering, © 2004 by CRC Press LLC.
- 4- John J. Winders, Jr., Power Transformers Principles and Applications, © 2002 by Marcel Dekker, Inc.
- 5- Martin J. Heathcote, The J & P Transformer Book, 12th edition, © 1998, Reed Educational and Professional Publishing Ltd
- 6- S.V.Kulkarni, S.A.Khaparde, Transformer Engineering Design and Practice, © 2004 by Marcel Dekker, Inc.
- 7- William T, Taylor, Transformer Practice, © 1909, 1913, by the McGraw-Hill Book Company, Inc.
- 8- Anderson, L.R., "Electrical Machines and Transformers", 1981.



- 9– Harlow, James H. "Transformers", The Electric Power Engineering Handbook, CRC Press LLC, 2001.
- 10– Transformer Diagnostics, Hydroelectric Research and Technical Services Group, Volume 3–31, JUNE 2003.
- 11– Transformer Maintenance, Hydroelectric Research and Technical Services Group, Volume 3–30, 2000.
- 12– Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics, Hydroelectric Research and Technical Services Group, 2005.
- 13– Site Tests Manual Of The Power Transformers, AREVA T&D.

## IEC Standards

General requirements	60076-1
Temperature rise	60076-2
Insulation levels, dielectric tests, and external clearances in air	60076-3
Guide for lightning impulse and switching impulse testing	60076-4
Ability to withstand short circuit	60076-5
Reactors (IEC 289)	60076-6
Loading guide for oil-immersed power transformer (IEC 354)	60076-7
Power transformers — application guide	60076-8
Terminal and tapping markings (IEC 616)	60076-9
Determination of transformer reactor sound levels	60076-10
Dry-type transformers	60076-11
Loading guide for dry-type transformers	60076-12

Self-protected liquid-filled transformers	60076-13
Gas-filled-type power transformers	60076-15

## IEC Standards

General requirements	60076-1
Temperature rise	60076-2
Insulation levels, dielectric tests, and external clearances in air	60076-3
Guide for lightning impulse and switching impulse testing	60076-4
Ability to withstand short circuit	60076-5
Reactors (IEC 289)	60076-6
Loading guide for oil-immersed power transformer (IEC 354)	60076-7
Power transformers — application guide	60076-8
Terminal and tapping markings (IEC 616)	60076-9
Determination of transformer reactor sound levels	60076-10
Dry-type transformers	60076-11
Loading guide for dry-type transformers	60076-12
Self-protected liquid-filled transformers	60076-13
Gas-filled-type power transformers	60076-15

# قائمة المحتويات

## قائمة المحتويات قائمة المحتويات قائمة المحتويات

4	.....	ما الجديد في نسخة 2019
5	.....	أهمية هذا الكتاب
5	.....	لغة الكتاب
5	.....	لمن هذا الكتاب
6	.....	وأخيرا
7	.....	<b>شكر وتقدير</b>
8	.....	نبذة تاريخية عن المحولات
9	.....	لماذا هذا الانتشار الواسع للمحولات في الشبكات الكهربائية؟
10	.....	مزايا أخرى للمحولات
11	.....	نبذة عن التركيب
12	.....	تصنيفات المحولات
14	.....	مجالات استخدام محولات القوى داخل محطات التوليد
15	.....	هل يصلح نفس المحول لرفع أو خفض أى جهد؟
15	.....	هل هناك فرق بين POWER TR وبين DISTRIBUTION TR ؟
18	.....	لماذا تدرس المحولات غالبا ضمن كتب الآلات الكهربائية ؟
19	.....	<b>الباب الأول</b>
19	.....	<b>الباب الأول: الأساسيات العامة للمحولات</b>
20	.....	<b>الفصل الأول: مبادئ المغناطيسية</b>
20	.....	1-1 القواعد الأساسية للمغناطيسية
20	.....	1-1-1 تأثير المغناطيس
20	.....	1-1-2 المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربى
22	.....	1-1-3 القوة الدافعة المغناطيسية MMF
23	.....	1-1-4 العلاقة بين الفيض والمجال المغناطيسي
23	.....	1-1-5 الممانعة لمرور المغناطيسية
23	.....	1-1-6 التشابه مع القوانين الكهربائية
24	.....	1-1-7 الجهد الناشئ بالحث المغناطيسى Induced Voltage

2-1	المبادئ الحاكمة لعمل المحولات	28
1-2-1	هل يمكن رفع أو خفض جهد DC بواسطة المحول ؟	30
2-2-1	مفهوم Transformer Action	31
3-1	أسئلة هامة لفهم المحول	31
1-3-1	لماذا تلف الملفات حول قلب حديدي ؟	32
2-3-1	ماذا يحدث في حالة No-load condition ؟	33
3-3-1	ماهي القوة الدافعة العكسية Back emf ؟	34
4-3-1	كيف يشعر الملف الابتدائي بإضافة حمل جديد في الثانوي ؟	35
5-3-1	هل تتغير قيمة الفيض داخل Core المحولات النموذجية ؟	35
4-1	خلاصة سمات المحول النموذجي IDEAL TR.	36
38	<b>الفصل الثاني: التمثيل الحقيقي للمحولات</b>	
1-2	الوجه الأول للاختلاف : مقاومة الملفات	38
2-2	الوجه الثاني للاختلاف : الفيض المتسرب	38
3-2	الوجه الثالث للاختلاف : مفايد الدائرة المغناطيسية	40
1-3-2	أخذ تأثير eddy loss في الاعتبار	40
2-3-2	أخذ تأثير Hysteresis loss	41
4-2	تبسيط الدائرة المكافئة	43
5-2	أهمية حسابات PER UNIT	47
6-2	ما أهمية معرفة قيمة % X ؟	50
7-2	حساب القوى الداخلية بين الموصلات بالمحول	52
1-7-2	القوة المؤثرة على موصل منفرد	52
2-7-2	حسابات القوى المغناطيسية بين موصلين :-	53
3-7-2	ما هي العناصر المسؤولة عن هذه القوى الميكانيكية ؟	54
4-7-2	اتجاه القوى المغناطيسية الميكانيكية أثناء الأعطال	54
56	<b>الفصل الثالث: المحولات الثلاثية الأوجه</b>	
1-3	الطريقة الأولى للحصول على محولات 3-0	56
2-3	الطريقة الثانية لتصنيع المحولات 3-0 :	58
	الفرق بين طريقتي تكوين المحولات الثلاثية	60
3-3	توصيل الملفات وحسابات الجهد والقدرة في الـ 3-0	60
1-3-3	العلاقات الحاكمة للجهد في محولات الـ 3-0	62
2-3-3	العلاقات الحاكمة للقدرة Power Relations في المحولات الثلاثية	63
3-3-3	ما الفرق بين استخدام الـ Amp واستخدام الـ Volt-Amp في التعبير عن قدرة محول Three Phase ؟	65

4-3	المحولات ثلاثية الملفات	65
1-4-3	هل تحدد قدرة المحول بالـ kVA أم بالـ kW ؟	66
67	<b>الباب الثاني: تركيب وتصنيع المحولات</b>	
68	مقدمة الباب الثاني	
69	<b>الفصل الرابع: قلب المحول وملفاته</b>	
72	<b>الجزء الأول : تصنيع وتجميع القلب الحديدي</b>	
1-4	القلب ( CORE )	72
2-4	سمات المواد المستخدمة في صناعة القلب الحديدي	72
1-2-4	السماحية Permeability	73
2-2-4	عدم التشبع	73
3-2-4	سمات أخرى	73
3-4	تجميع القلب الحديدي ( CORE )	74
1-3-4	طريقة الـ Core Type	76
2-3-4	طريقة الـ Shell Type	78
3-3-4	الفروق بين طريقتي التصنيع	79
4-4	تجميع شرائح القلب الحديدي	79
1-4-4	تأريض القلب الحديدي	82
5-4	موصلات ملفات المحولات	83
1-5-4	عمل الـ Transposition في الموصلات	84
6-4	أنواع الملفات	84
1-6-4	النوع الأول : Helical Winding	84
2-6-4	النوع الثاني : Disc Winding	85
3-6-4	النوع الثالث : Layer Winding	86
4-6-4	النوع الرابع : Ban cake Winding	87
5-6-4	مقطع الملف	87
7-4	العوازل المستخدمة في المحولات	88
8-4	تجفيف المحول	88
90	<b>الفصل الخامس: الأجهزة المساعدة في المحولات</b>	
1-5	وظائف زيت المحول	90
2-5	الخزان TANK	92
1-2-5	فائدة الخزان الرئيسي	92
2-2-5	أنبوبة الطرد ( قذف الزيت ) :	92

93	3-5 صندوق التمدد CONSERVATOR TANK
94.....	1-3-5 جهاز الوقاية الغازية Bochholz relay
95.....	2-3-5 وحدة التنفيس (Breather unit)
96	4-5 منظومة حماية الزيت
97.....	1-4-5 Sealing في المحولات الصغيرة
98.....	1-4-5 N - POSITIVE PRESSURE
99	5-5 منظومة تبريد الزيت
100	6-5 مغير الجهد (TAP CHANGER)
101.....	1-6-5 Tap Changer الحاجة للـ
102.....	2-6-5 Tap Changer فكرة عمل الـ
104.....	3-6-5 Tap Changer مقارنة بين نوعي الـ
105	7-5 أطراف التوصيل BUSHINGS
106.....	1-7-5 Skirts دور الـ
107.....	2-7-5 استخدام الـ Corona Rings
107.....	3-7-5 أهمية الـ Flange
108.....	4-7-5 Rod Gap إستخدام فتحة التفريغ
108	شكل 19-5 : شكل فتحة التفريغ
108	8-5 معدات القياس والتحكم ACCESSORIES
111.....	<b>الباب الثالث: توصيل الملفات في المحولات الثلاثية</b>
112	مقدمة الباب الثالث
112.....	لماذا ندرس هذا الموضوع؟
114.....	<b>الفصل السادس: قطبية المحولات</b>
114	1-6 تجربة عملية لتوضيح المفهوم
115.....	الأهمية العملية لتحديد الـ Polarity
116	2-6 ترميز أطراف المحول طبقاً للمواصفات المختلفة
116.....	1-2-6 الترميز في مواصفات الـ IEC
117.....	2-3-6 الترميز في مواصفات IEEE / ANSI
117	4-6 تحديد الـ POLARITY من الرموز
120 ..	<b>الفصل السابع : حساب الـ Phase Displacement وتحديد الـ Vector Group</b>
120	1-7 تعريف الـ PHASE DISPLACEMENT
121.....	1-1-7 كتابة الـ Phase Displacement حسب الـ IEC
122.....	2-1-7 استنتاج الـ Phase Displacement بالرسم
124.....	3-1-7 تحديد اتجاه الدوران Phase Rotation

- 3-7 طريقة رسم الملفات والمتجهات 125
- 126 ..... 1-3-7 طريقة رسم ملفات الـ Delta
- 129 ..... 4-7 تحديد المجموعة الاتجاهية من طريقة توصيل الأطراف
- 135 ..... **الفصل الثامن: مميزات وعيوب التوصيلات المشهورة في المحولات**
- 1-8 تأثير نوعية التوصيل على ظهور الـ HARMONICS 135
- 138 ..... 1-1-8 ماذا يحدث لو تم عمل فلتر للتيار المسحوب من المصدر
- 140 ..... 2-1-8 تأثير توصيلة الـ Star على وجود الـ 3rd Harmonic
- 141 ..... 3-1-8 تأثير توصيلة الـ Delta على وجود الـ 3rd Harmonic
- 142 ..... 4-1-8 وجود الـ 3rd Harmonic في توصيلة الـ Zig Zag
- 2-8 تأثير التآريض على عمل المحولات 143
- 143 ..... 1-2-8 أولاً : النظام المعزول ( Ungrounded system )
- 144 ..... 2-2-8 ثانياً : النظام المأرض
- 3-8 التوصيل بطريقة Y Y : 145
- 145 ..... 1-4-8 مميزات طريقة الـ Y Y :
- 146 ..... 2-4-8 عيوب طريقة الـ Y Y :
- 5-8 التوصيل بطريقة  $\Delta$ -Y 147
- 150 ..... شكل 17-8 : تحديد الزاوية الاتجاهية في توصيلة الـ  $\Delta$ -Y
- 150 ..... 6-8 توصيلة الـ  $\Delta\Delta$  :
- 7-8 توصيلة الـ ZIG ZAG 152
- 152 ..... 1-7-8 الأسلوب الأول : Interconnected star
- 153 ..... 2-7-8 توصيلة Delta - Zigzag :
- 154 ..... 3-7-8 طريقة توصيل الـ Delta-Zig Zag
- 155 ..... 4-7-8 هل يمكن عمل N حقيقي لمحول موصل  $\Delta$  ؟
- 157 ..... **الباب الرابع: تشغيل المحولات**
- 158 ..... مقدمة الباب الرابع
- 159 ..... **الفصل التاسع: تشغيل المحولات على التوازي**
- 159 ..... 9-1 الحاجة للتوصيل على التوازي
- 160 ..... 9-2 عيوب و مشاكل التوصيل على التوازي
- 161 ..... 9-3 شروط التوصيل على التوازي :
- 161 ..... 1-3-9 لماذا يجب أن تكون للمحولات نفس الـ voltage ratio ؟
- 162 ..... 2-3-9 ماذا يحدث لو كان الفرق بين نسب التحويل كبيراً ؟
- لو فرض أن لدينا محولين قدرة كل منهما 10 MVA ونسبة التحويل 66/12.47 kv، وكانا
- 162 ..... 4-9 موصليين على التوازي كما في الشكل 4-9

- 163 ..... 3-3-9 ماذا لو تغيرت %Z أو تغيرت X/R ratio في المحولين؟
- 165 ..... 4-3-9 ماذا يحدث لو تغيرت الـPolarity.....
- 166 ..... 5-3-9 ماذا لو اختلف الـPhase Sequence ؟
- 166 ..... 6-3-9 لماذا يجب أن يكون Phase Displacement يساوي صفر ؟

## 171 ..... الفصل العاشر: المفاتيح في المحولات

- 171 ..... 1-10 مجموعة NO-LOAD LOSS :
- 171 ..... 1-1-10 الطاقة المغناطيسية الغير مسترجعة Hysteresis Loss
- 173 ..... 2-1-0 Loss في القلب الحديدي بسبب الـ eddy current
- 174 ..... 3-1-10 dielectric losses في العزل
- 175 ..... 4-1-10 dielectric loss خطورة الـ
- 175 ..... 2-10 مجموعة LOAD LOSS

- 176 ..... 1-2-10 Copper Loss النحاسية
- 176 ..... 2-2-10 تأثير الحرارة على Copper Loss
- 176 ..... 3-2-10 تأثير نوعية التيار على المفقودات
- 177 ..... 4-2-10 المفقودات الشاردة
- 177 ..... 5-2-10 Leakage Flux المفقودات نتيجة

## 177 ..... 3-10 طرق تقليل المفقودات في المحولات

- 177 ..... 1-3-10 تأثير نوع المادة.
- 178 ..... 2-3-10 تأثير كثافة الفيض على الفقد في القدرة
- 179 ..... 3-3-10 تقليل load loss بتحسين PF

## 182 ..... الفصل الحادي عشر: عوامل مؤثرة على تشغيل المحول

- 183 ..... 1-11 الموضوع الأول : كفاءة المحول
- 185 ..... 2-11 الموضوع الثاني : انتظام الجهد VOLTAGE REGULATION
- 186 ..... 1-2-11 حساب الـ Regulation بدلالة الـ Parameters
- 187 ..... 2-2-11 رسم الـ Phasor Diagram تمهيدا لحساب VR
- 187 ..... 3-2-11 الصورة المبسطة للـ VR
- 189 ..... 4-2-11 العلاقة بين الـ Voltage Drop وبين الـ Voltage Regulation
- 190 ..... 3-11 الموضوع الثالث : العناصر المؤثرة على تحميل المحول
- 190 ..... 1-3-11 درجة الحرارة
- 190 ..... 2-3-11 دورة الأحمال
- 191 ..... 3-3-11 Thermal time constant تأثير
- 191 ..... 4-3-11 دورة أحمال محولات التوزيع
- 192 ..... 4-11 الموضوع الرابع : تأثير الـ HARMONICS
- 192 ..... 1-4-11 ما معنى Non-linear load ؟



- 193 ..... 2-4-11 تأثير المكونات المختلفة للـ Harmonics على تشغيل المحول:
- 194 ..... 3-4-11 تأثير الـ Odd Harmonics على المحولات :
- 194 ..... 4-4-11 تأثير الـ Even Harmonics :
- 195 ..... 5-4-11 ما المقصود بالـ K - factor ؟
- 196 ..... 5-11 **الموضوع الخامس : تيارات الاندفاع في المحولات**
- 196 ..... 1-5-11 أسباب هذا التيار
- 198 ..... 2-5-11 خطورة هذا التيار
- 198 ..... 3-5-11 طرق تجنب الفصل الخاطئ بسبب تيار الاندفاع
- 199 ..... 4-5-11 تيار الاندفاع في المحولات الموصلة على التوازي Sympasatic Inrush
- 200 ..... 6-11 **الموضوع السادس : الضوضاء ( NOISE ) في المحولات**
- 200 ..... 1-6-11 الضوضاء بسبب اهتزاز الـ Core :
- 201 ..... 2-6-11 الضوضاء نتيجة الملفات :
- 201 ..... 3-6-11 الضوضاء نتيجة أجهزة التبريد :
- 201 ..... 4-6-11 المستويات المقبولة للضوضاء :
- 204 ..... 7-11 **الموضوع السابع : تأثير اختلاف قيمة التردد**
- 204 ..... 1-7-11 هل يمكن لمحول يعمل على 60HZ أن يركب في شبكة 50HZ ؟
- 204 ..... 2-7-11 هل يمكن لمحول في شبكة 50HZ أن ينقل لشبكة 60HZ ؟
- 204 ..... 8-11 **الموضوع الثامن : تأثير اختلاف الجهد**
- 204 ..... 1-8-11 هل يمكن للمحول أن يعمل مع جهد DC متزايد ؟
- 205 ..... 2-8-11 هل يمكن استخدام المحول نفسه كمحول رافع أو محول خافض ؟
- 205 ..... 3-8-11 لماذا يوصل الـ HV side أولاً ويفصل ثانياً ؟
- 206 ..... **الفصل الثاني عشر: تشغيل الأنواع الخاصة من المحولات**
- 206 ..... 1-12 محولات الـ PHASE SHIFTING
- 207 ..... 2-12 محولات الـ CONVERTER TRANSFORMERS
- 208 ..... 3-12 محولات الـ AUTO TRANSFORMERS
- 209 ..... 1-3-12 الحصول على محول Auto Tr من محول Two-winding Tr
- 211 ..... 2-3-12 العلاقات بين التيارات
- 213 ..... 3-3-12 الوفر في النحاس
- 215 ..... 4-3-12 استخدامات محولات الـ Auto Tr
- 216 ..... 5-3-12 مميزات المحولات الـ Auto :
- 219 ..... 5-3-12 عيوب المحولات الـ Auto :
- 219 ..... 4-12 محولات الـ GROUNDING TRANSFORMERS
- 220 ..... 5-12 المحولات الجافة DRY TYPE TRANSFORMERS
- 222 ..... **الفصل الثالث عشر: منظومة التبريد في المحولات**

222	1-13	مصادر الحرارة ومشاكلها
222	2-13	الوسط المبرد COOLANT
223	3-13	مكونات منظومة التبريد في المحولات الزيتية
223	1-3-13	زيت المحولات
223	2-3-13	أهم خواص زيت المحولات
225	3-3-13	إضافة موانع الأكسدة : Inhibitors
226	4-3-13	إضافة مراوح
227	4-13	توصيف درجات التبريد COOLING CLASSES
228	5-13	نماذج لبعض الـ CLASSES
228	1-5-13	التبريد بـ ONAN (Class OA)
229	2-5-13	طريقة ONAF (Class OA/FA)
230	3-5-13	طريقة OFAF أو FOA
230	4-5-13	التبريد المتعدد المراحل
232		<b>الباب الخامس: الاختبارات والصيانة</b>
233		مقدمة الباب الخامس
234		<b>الفصل الرابع عشر: إختبارات المحولات</b>
234	1-14	أشهر المواصفات
234	2-14	أنواع الاختبارات
235	1-2-14	اختبارات التصميم Design tests
235	2-2-14	اختبارات الإنتاج Production Tests
236	3-2-14	الاختبارات الروتينية Routine Tests
236	4-2-14	اختبارات خاصة
236	5-2-14	ترتيب إجراء الاختبارات Sequence of Tests
238	3-14	مجموعة الاختبارات المتعلقة بالعزل DIELECTRIC TESTS
238	1-3-14	ما المقصود بتقادم العزل أو الـ Degradation؟
239	2-3-14	أسباب تقادم العزل Degradation:
239	4-14	اختبار العزل: INSULATION RESISTANCE (IR)
240	1-4-14	خطوات عمل الاختبار
241	2-4-14	تأثير وجود الزيت على قيمة المقاومة المقاسة
241	3-4-14	تأثير الحرارة على قيمة المقاومة المقاسة
241	4-4-14	تأثير الزمن على قيمة المقاومة المقاسة Polarization Index
242	5-14	اختبار العزل الثاني: DIELECTRIC LOSS ANGLE
245	6-14	اختبار العزل الثالث: PARTIAL DISCHARGE

245	14-6-1 الطريقة الكهربائية للقياس PD
247	14-6-2 الطريقة الصوتية للقياس PD
247	14-6-3 قوة عزل الورق المشبع بالزيت
247	14-7 اختبارات تعمل العازل للجهود المختلفة
248	14-7-1 اختبار الـ Applied Voltage Test (High Pot. Test)
	14-7-2 اختبار الـ Induced Voltage (with partial discharge measurement)
249	
250	14-7-3 اختبار الـ Impulse Voltage
253	14-8 المجموعة الثالثة : اختبارات زيت الحول
254	14-8-1 طريقة أخذ العينة
254	14-8-2 احتياطات عند عمل اختبار عازلية الزيت
255	14-8-3 اختبار عازلية الزيت Oil Dielectric Strength Test
255	14-8-4 تحليل الزيت Dissolved Gas Analysis
258	14-8-4 الطرق العامة لتفسير النتائج
259	14-8-5 طريقة روجرز لتفسير النتائج Roger's Method
259	14-8-6 قياس نسبة الرطوبة بالزيت
260	14-8-7 تجفيف المحولات
261	14-8-8 مواعيد اختبارات الزيت ومواصفاته
261	14-8-9 اختبار الـ Infra-Red
262	14-9 المجموعة الرابعة : حسابات الـ PARAMETERS للمحول
262	14-9-1 اختبار الـ Transformer Turns Ratio, TTR
262	14-9-2 الطريقة التقليدية لإجراء اختبار الـ TTR
262	14-9-3 طريقة الـ Ratio Bridge
263	14-9-4 اختبار القطبية Polarity test
264	14-9-5 اختبار قياس الـ DC Resistance للملفات
266	14-9-6 اختبار الـ Open Circuit Test ( No Load Losses )
267	اختبار الـ OPEN CIRCUIT TEST
269	اعتبارات علمية
	14-9-7 اختبار الـ Load losses and Impedance voltages Short circuit Test
270	(
272	أهمية هذا الاختبار
275	14-9-8 اختبار الـ Load Test
276	صعوبات هذا الاختبار
276	14-9-9 اختبار الـ Back to Back Test
277	14-10 اختبار تحديد الـ VECTOR GROUP

**الفصل الخامس عشر: صيانة المحولات الزيتية** 2811-15 **الصيانة الدورية للمحولات** 2812-15 **أهم الفحوصات الخارجية** 282

1-2-15 فحص Tank 282

2-2-15 فحص غطاء المحول : 282

3-2-15 فحص الخزان المساعد : 282

4-2-15 فحص Winding Temperature Indicator 283

5-2-15 مقارنة قيم مؤشرات الحرارة 283

6-2-15 فحص مؤشر مستوى الزيت في 283

7-2-15 فحص Pressure Relief Device 284

8-2-15 فحص Sudden Pressure Relay 284

3-15 **فحوصات منظومة التبريد الخارجية** 285

1-3-15 فحص Radiator : 285

2-3-15 فحص مؤشر سريان الزيت Oil Flow Indicator 285

3-3-15 فحص المراوح 286

4-3-15 مشكلة تسرب الزيت 286

4-15 **تحليل مشاكل المحولات** 287

1-4-15 مشاكل ارتفاع درجة حرارة المحول 287

2-4-15 مشاكل زيت المحول Oil Troubles 288

3-4-15 المشاكل الكهربائية Electrical Troubles 288

4-4-15 أعطال القلب الحديدي 289

5-4-15 مشاكل أخرى متنوعة : 290

**ملاحق الكتاب** 291**الملحق الأول** 292**قراءة لوحة بيانات المحول** 292

أولا معلومات سريعة 292

ثانيا معلومات تحتاج لتفصيل 293

رقم التصنيع Serial Number : 293

أسلوب التبريد Cooling Class : ( ONAN – ONAF– OFAF ) 294

قدرة المحول MVA Rating : 294

هل تحدد قدرة المحول بالـ KVA أم بالـ KW؟ 294

الجهد المقنن Voltage Rating 295

معلومات الـ Vector Diagram 296

296	رسومات الـ Connection Diagram
296	قيمة الـ Percentage Impedance Z%
297	معلومات الضغوط القصوى Pressures
301	<b>الملحق الثاني</b>
301	أعمال الصيانة التي تجرى مرة واحدة في السنة
301	أما الصيانة التي تجرى مرة واحدة كل 10 سنوات فتشمل الأعمال التالية:
303	<b>الملحق الثالث</b>
303	الاحتياطات الواجب مراعاتها قبل وضع المحول في الخدمة :
304	<b>الملحق الرابع</b>
304	قواعد الأمان للعمل على شبكات توزيع الكهرباء
308	المراجع
311	الفهرس

