جامعة المنارة
قسم هندسة الميكاترونكس

الآلات الكهربائية
Electrical Machines

2

الدكتور المهندس
علاء الدين أحمد حسام الدين

مفردات المقرر

- مفاهيم عامة في الآلات الكهربائية.
- المحولات الكهربائية.
- آلات التيار المستمر.
- مبادئ عامة في آلات التيار المتناوب.
- الآلات التحريضية.
- محركات الخطوة.
- محركات السيرفو.

المحولة الثلاثية الأطوار

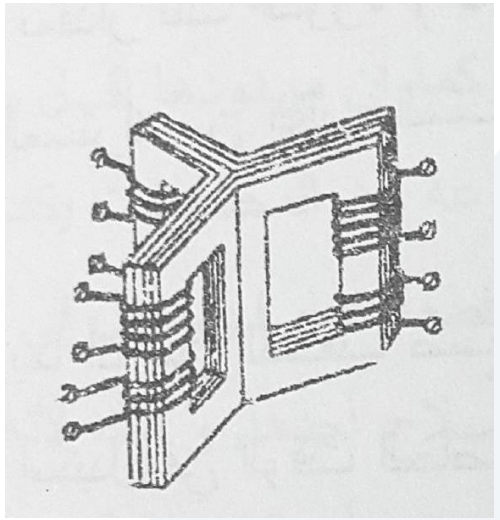
Three Phase Transformer

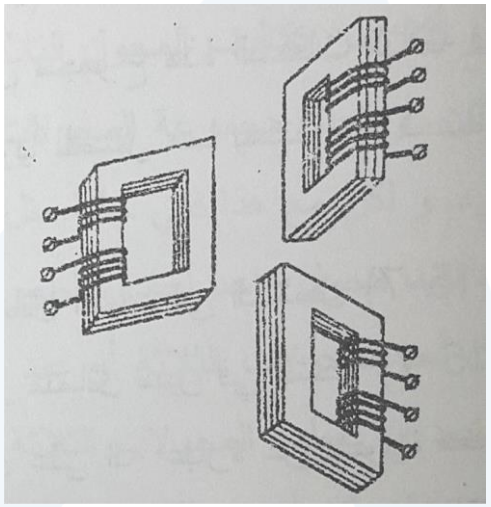
نستعمل لتحويل القدرة الكهربائية الثلاثية الأطوار: إما ثلاث محولات أحادية الطور توصل كل منها مع طور واحد من أطوار الشبكة الثلاثية الأطوار، أو محولة واحدة ثلاثية الأطوار، تتوضع ملفات الأطوار الثلاثة على نواة مغناطيسية واحدة.

تعد المحولة الثلاثية الأطوار أخف وزناً وحجماً، و أقل كلفةً، وكفاءتها أفضل مقارنة مع ثلاث محولات أحادية الطور. لذلك تستعمل هذه المحولة في محطات توليد القدرة الكهربائية لرفع جهد التوليد إلى قيمة جهد النقل، كما تستعمل المحولات الثلاثية الأطوار أيضاً في محطات التوزيع لخفض جهد النقل إلى قيمة تناسب المستهلك.

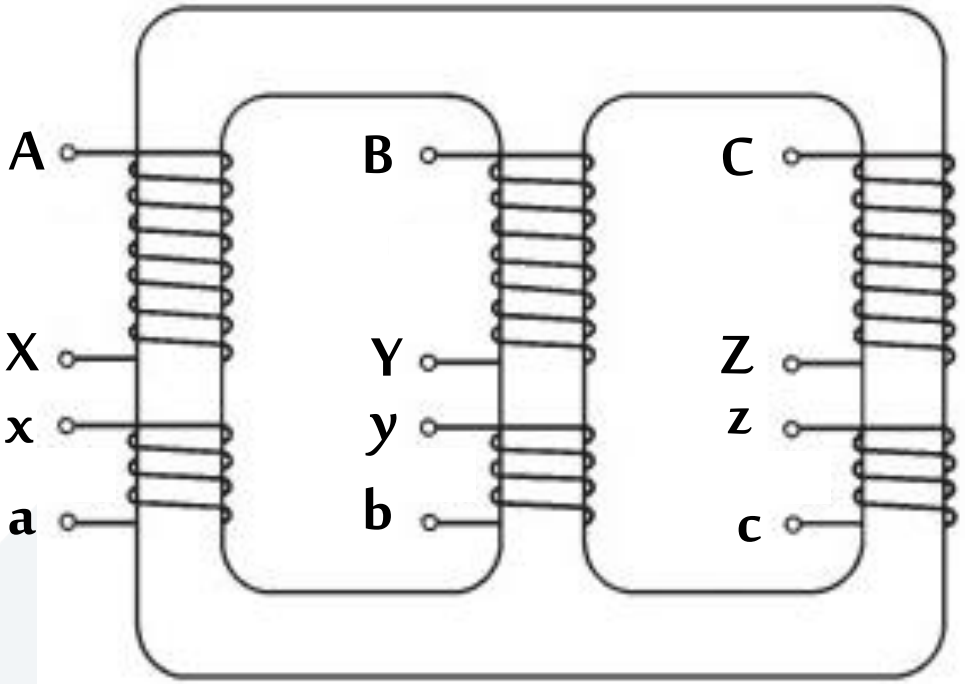
يبين الشكل الأجزاء الرئيسية المحولة الثلاثية الأطوار:

تتألف المحولة الثلاثية الأطوار من ثلاثة ملفات أولية وثلاثة ملفات ثانوية، يتوضّع ملفا كل طور على عمود مستقل من أعمدة المحولة التي تشكل مع الجسور ما يسمى بالنواة المغناطيسية للمحولة الثلاثية الطور. في المحولة الثلاثية الطور المثالية يجب أن تكون القضبان متباعدة عن بعضها بزاوية فراغية مقدارها 120^{o} كما في الشكل.





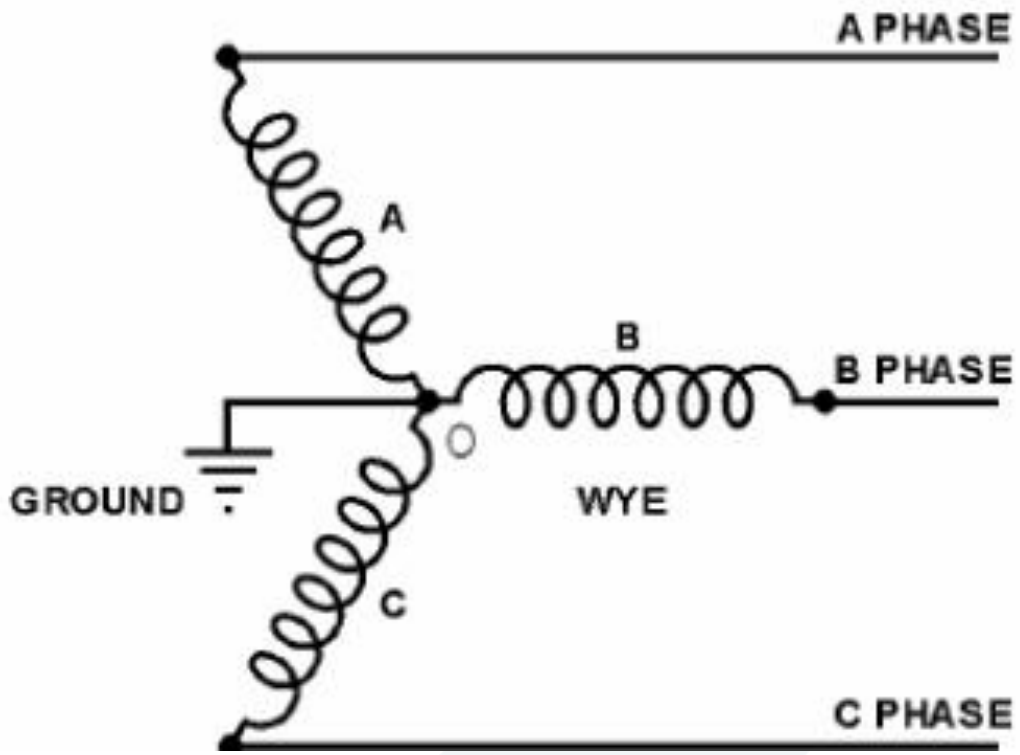
لأسباب تقنية، ولسهولة التصنيع وتقليل الحجم الفراغي تصنع النواة المغناطيسية للمحولة الثلاثية الطور في مستوى واحد. نرمز للأطوار الأولية عادة بالرمز (A, B, C) وللأطوار الثانوية بالرمز (a, b, c).

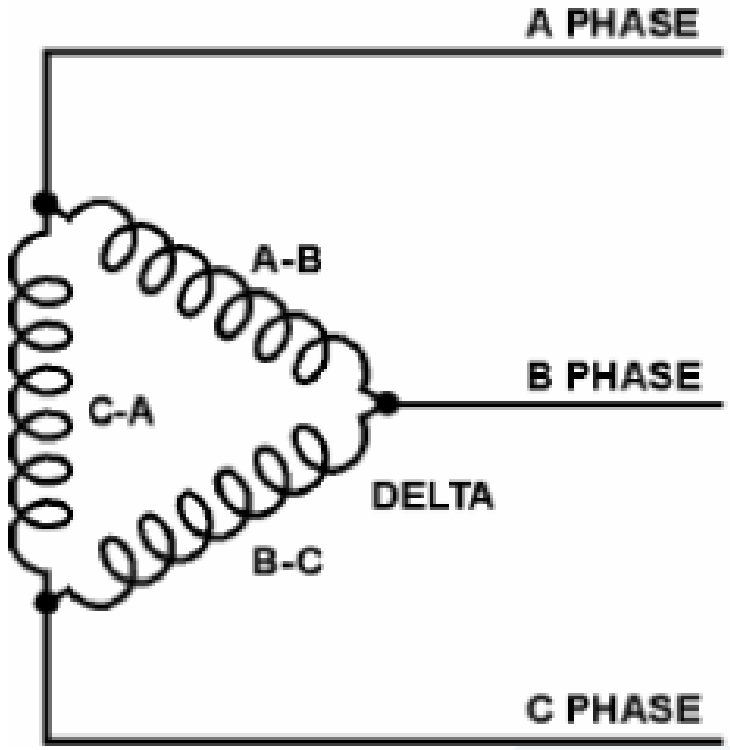


توصل الملفات الأولية والثانوية في المحولة الثلاثية الأطوار بإحدى الطرق الآتية:

1. بشكل Y (Star-Connection)-

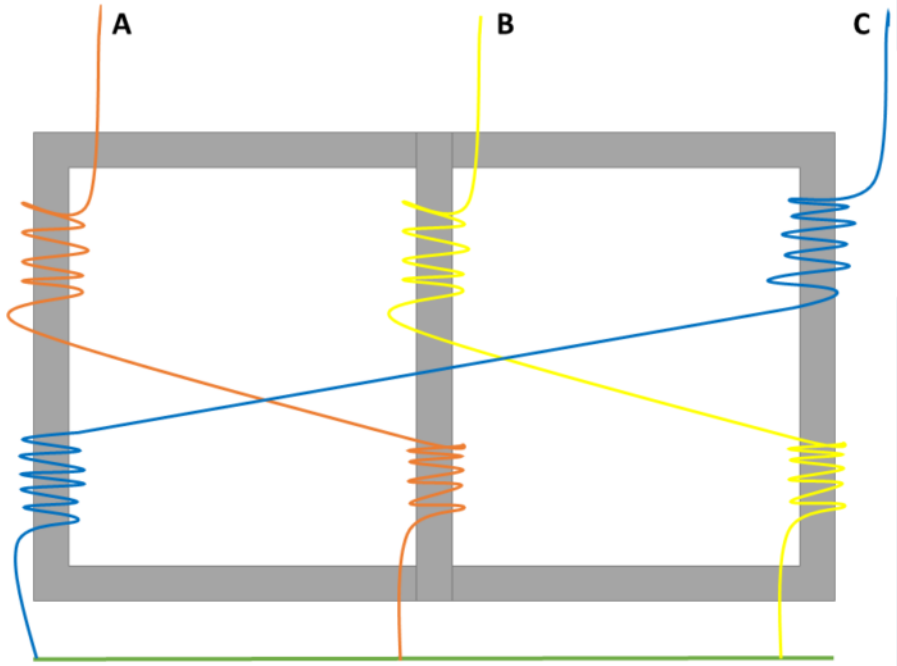
عندما تكون نهايات الأطوار مقصورة فيما بينها في نقطة واحدة تسمى النقطة الحيادية، وتوصل الأطراف الحرة إلى خطوط الشبكة أو إلى الحمولة

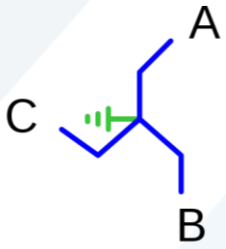




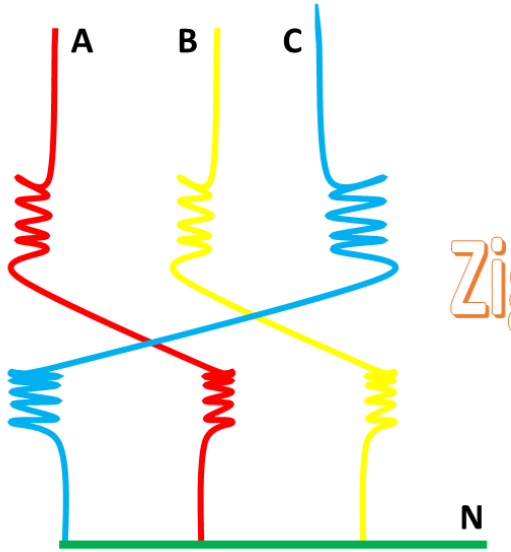
2. بشكل Δ (Delta-Connection)- حيث توصل نهاية الطور الأول مع بداية الطور الثاني ونهاية الطور الثاني مع بداية الطور الثالث، ونهاية الطور الثالث مع بداية الطور الأول لتشكل فيما بينها دارة مغلقة.

3. بتوصيل ملتوي (ZIG ZAG-Connection)- حيث يقسم ملف كل طور إلى نصفين متساويين، يتوضّع كل قسم على قلب مغناطيسي منفصل.





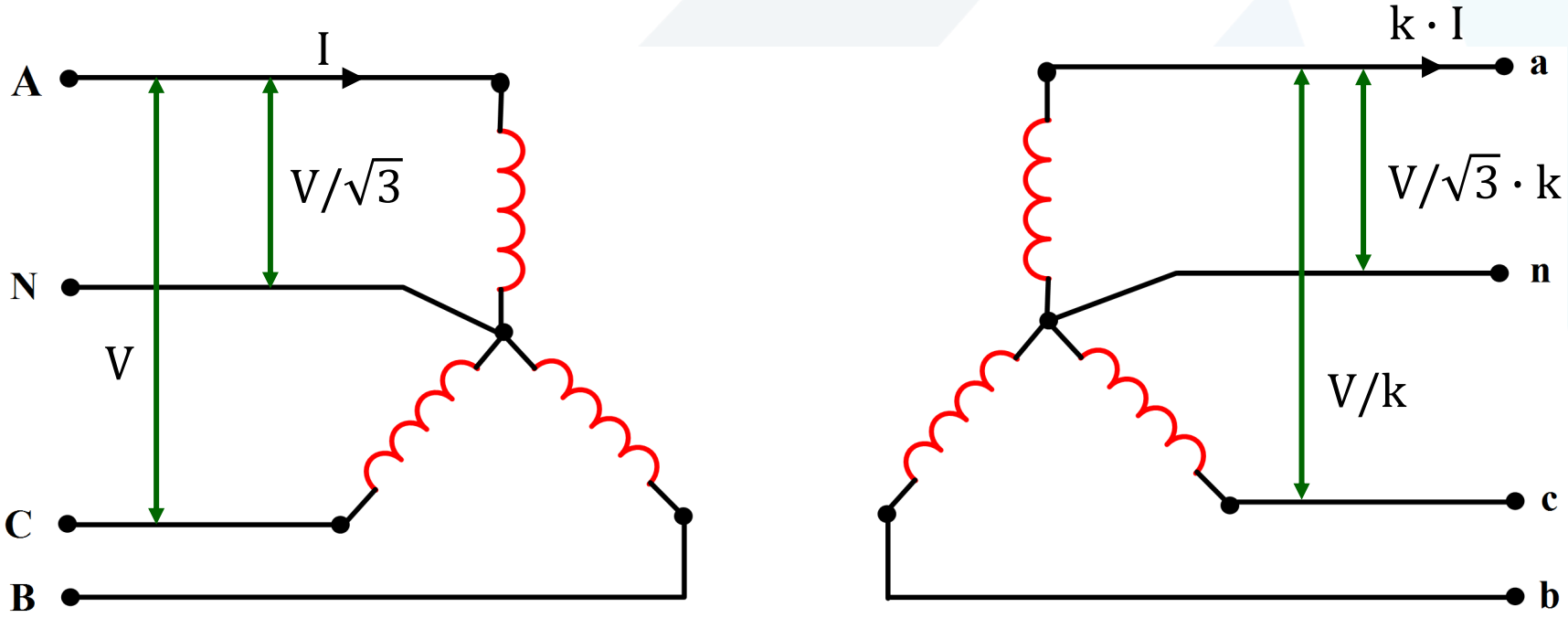
Zigzag winding



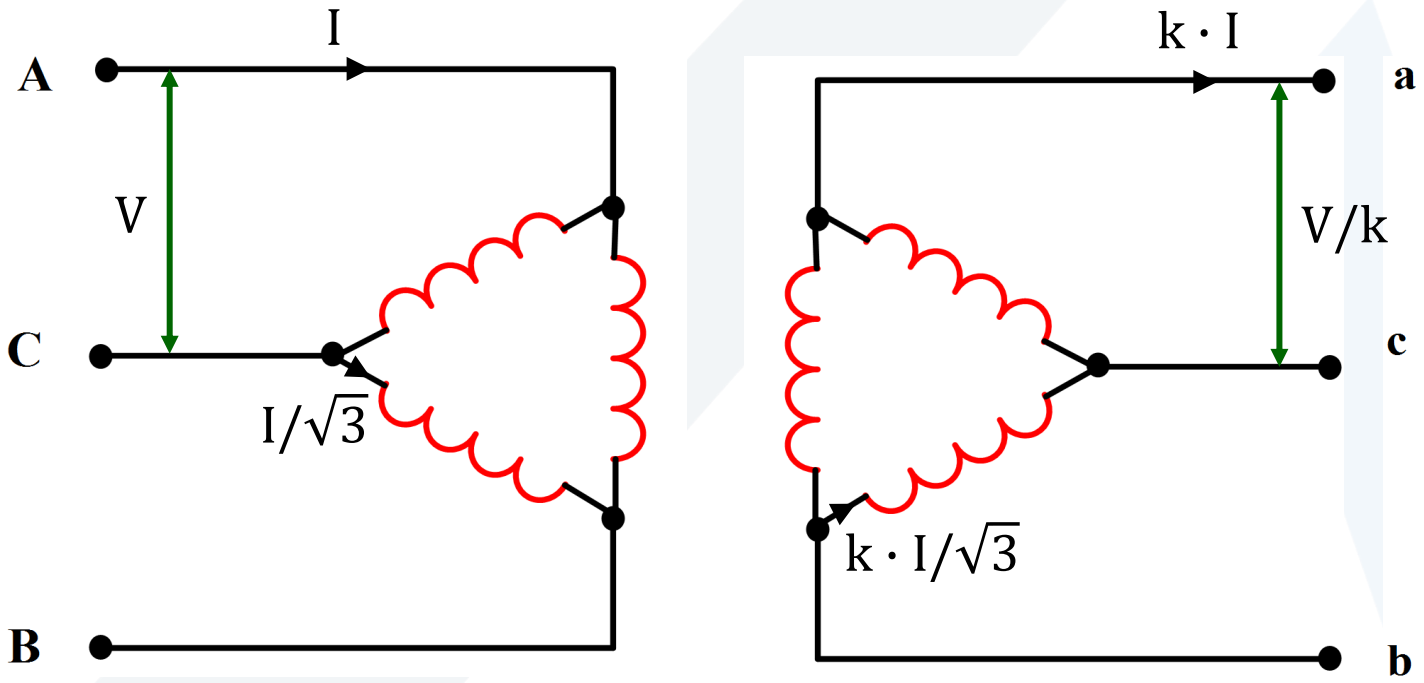
Zig Zag

ويمكن تلخيص أهم طرق التوصيل لملفات المحولات الثلاثية الأطوار كالآتي:

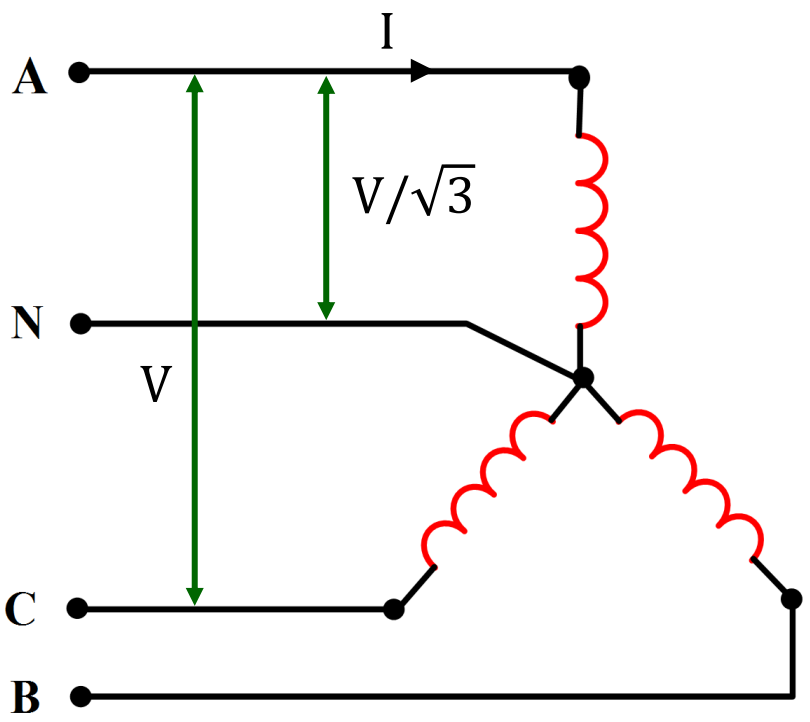
1. توصيل نجمي-نجمي (Star-Star Y-Y) حيث يوصل الأولي والثانوي بشكل نجمي Y.

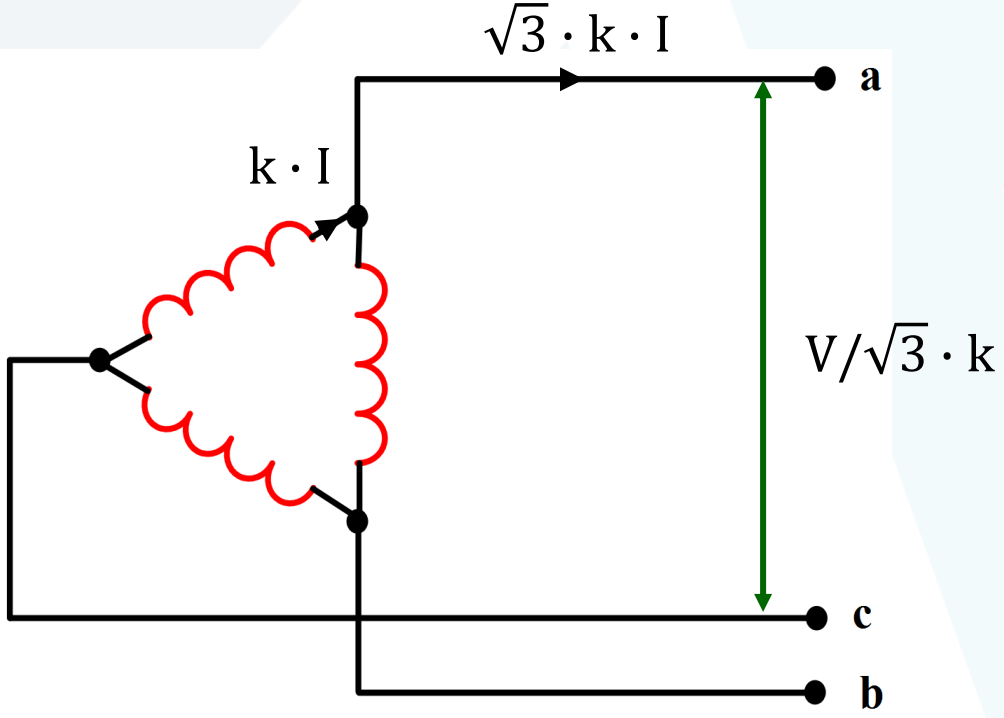


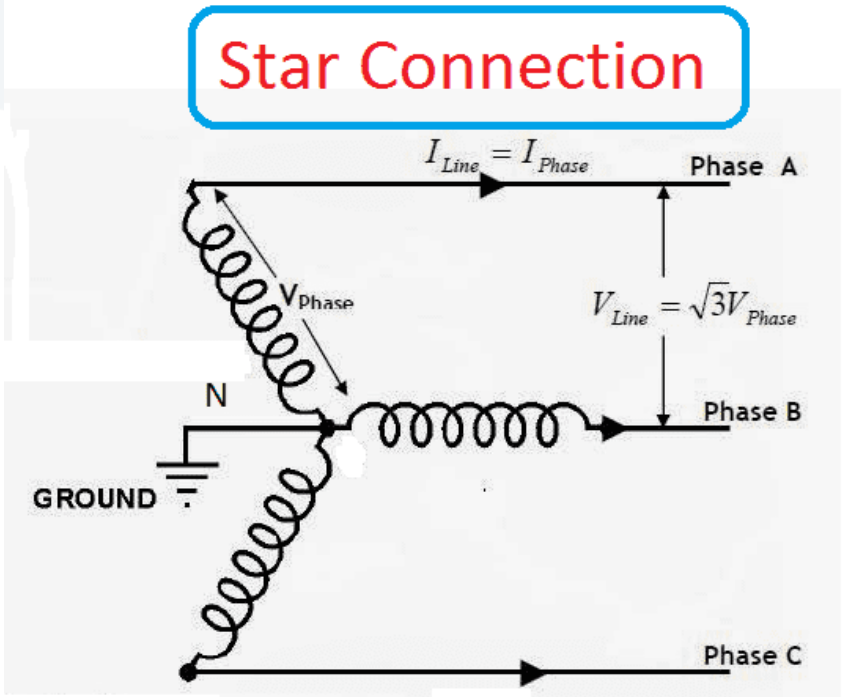
2. توصيل مثلثي-مثلثي (Delta-Delta Δ-Δ) حيث توصل ملفات الأولي والثانوي بشكل مثلثي Δ.



3. توصيل نجمي-مثلثي (Star-Delta Y-Δ) حيث توصل الملفات الأولية بشكل نجمي Y والثانوية بشكل مثلثي Δ.







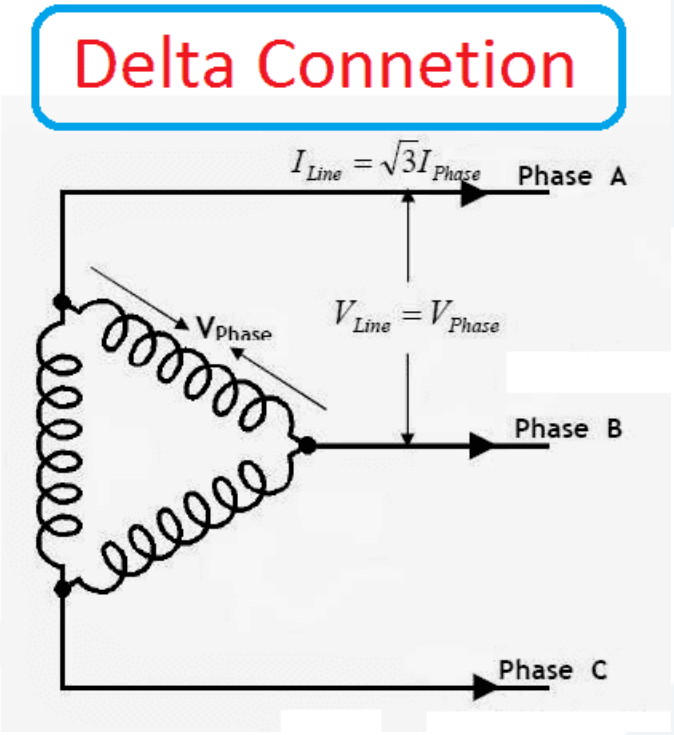
تحسب استطاعة المحولة الثلاثية الطور كالآتي:

1. في حالة التوصيل النجمي لملفاتها:

$$I_{Ph} = I_L \quad ، \quad V_{Ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

الاستطاعة الظاهرية: $S = 3 \cdot V_{Ph} \cdot I_{Ph} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$

الاستطاعة الفعلية: $P = 3 \cdot V_{Ph} \cdot I_{Ph} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$



تحسب استطاعة المحولة الثلاثية الطور كالآتي:

2. في حالة التوصيل المثلثي لملفاتها:

$$I_{Ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad ، \quad V_{Ph} = V_L$$

الاستطاعة الظاهرية: $S = 3 \cdot V_{Ph} \cdot I_{Ph} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$

الاستطاعة الفعلية: $P = 3 \cdot V_{Ph} \cdot I_{Ph} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$

توصيل المحولات على التفرع Parallel connection of Transformers

كي يتحقق العمل الأمثل للمحولات المربوطة على التفرع فيما بينها يجب أن تتوزع الحمولة بين المحولات بحسب نسب استطاعاتها الظاهرية الاسمية، ولتوفير ذلك يجب تحقيق ثلاثة شروط أساسية لربط المحولات على التفرع:

1. أن تكون مجموعات التوصيل (في المحولات الثلاثية الطور) واحدة، أي تعاقب الأطوار واحداً في جميع المحولات الموصولة على التفرع.
2. أن تكون الجهود الاسمية للملفات الأولية والثانوية متساوية فيما بينها، وبالتالي أن تكون نسب التحويل متساوية لجميع المحولات. ويجب الانتباه إلى أن مساواة نسب التحويل ليس شرطاً كافياً لربط المحولات على التفرع.
3. أن تكون جهود القصر النسبية المئوية ومركباتها الفعلية والردية متساوية لجميع المحولات.

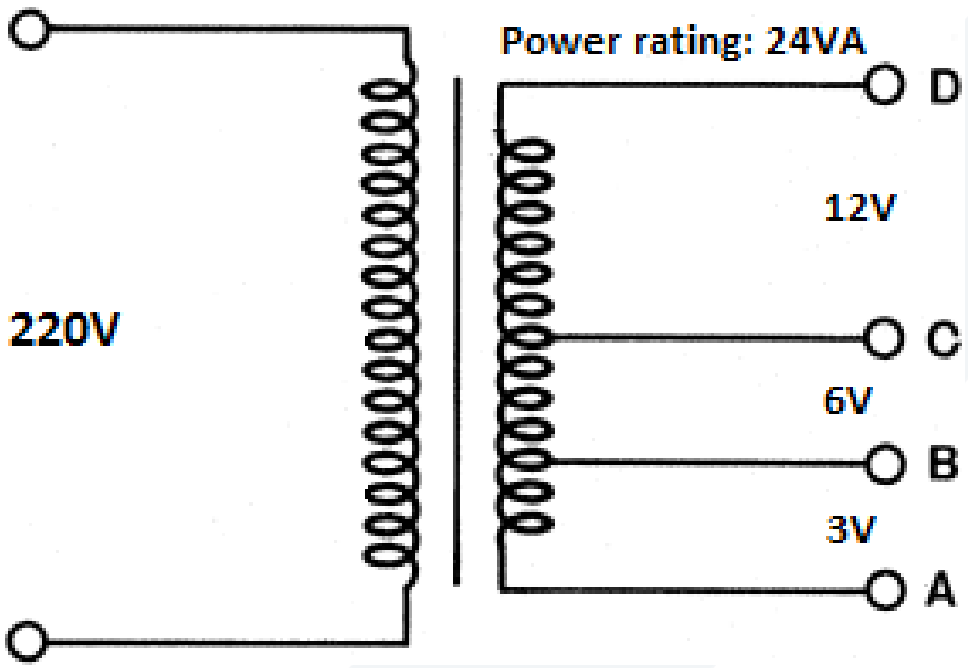
تحقيق الشرطين الأول والثاني يمنع مرور تيارات داخلية بين المحولات الموصولة فيما بينها على التفرع. أم تحقيق الشرط الثالث فيؤمن توزيع الحمولة بين المحولات بما يتناسب واستطاعاتها الظاهرية الاسمية.

بعض أنواع المحولات الكهربائية الخاصة المستعملة في الدارات الكهربائية:

Some Special Type of Electric Transformers

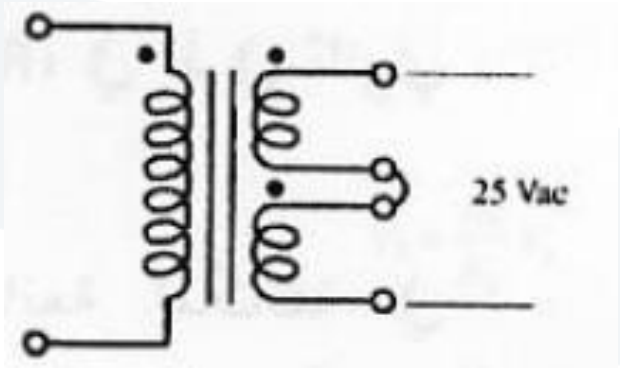
تتنوع كثيراً المحولات الكهربائية المستعملة في الدارات الكهربائية والالكترونية، وسنتعرف هنا على بعض أنواع هذه المحولات ومجالات استعمالاتها في أنظمة التحكم والقيادة وفي أنظمة الميكاترونيكس. ومثل هذه المحولات يستعملها الطلبة بكثرة في مشاريعهم التطبيقية.

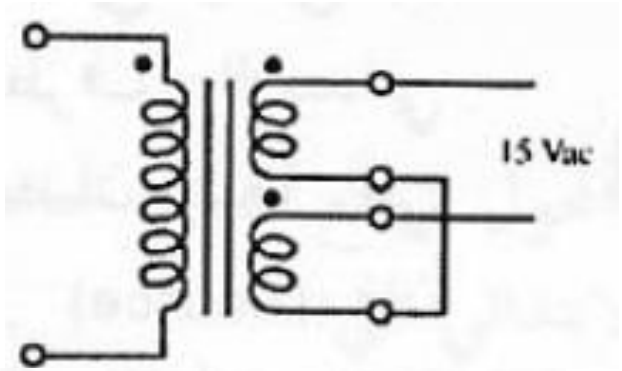
1. المحولة المتعددة المخارج: Multi Tapped Transformers

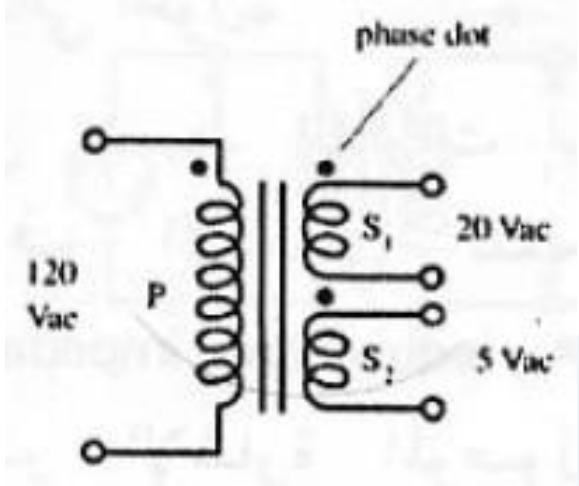


تتألف هذه المحولة من ملفين. يكون الملف الأولي عادة من دون أية تفريعات، وله طرفان يتغذيان من منبع الجهد، أما الملف الثانوي فيخرج منه عدة تفريعات تتناسب مع جهود خرج المحولة. المحولة المبينة بالشكل مثلاً تعطينا ثلاث قيم لجهود الخرج هي : 12 V، 6 V، 3 V.

2. المحولة المتعددة الملفات: Multi Winding Transformers





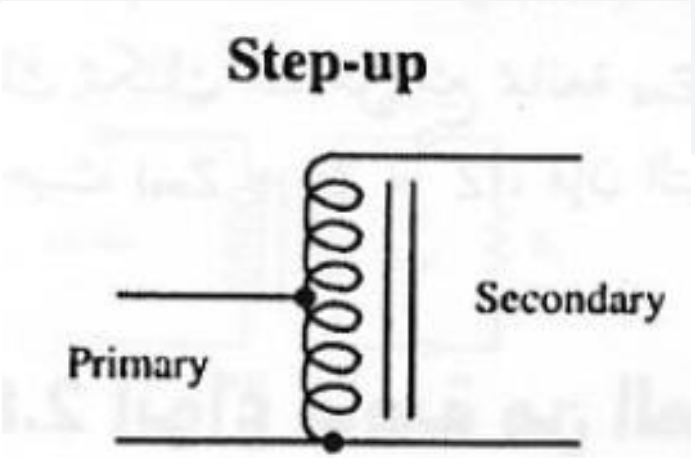


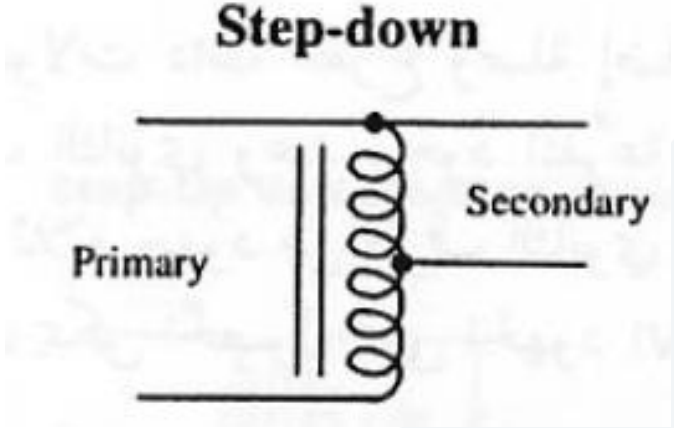
تتألف في العادة من ثلاثة ملفات: ملف أولي وملفين ثانويين. وبحسب طريقة توصيل الملفات الثانوية نحصل على قيم مختلفة لجهود الخرج. فالمحولة المبينة بالشكل يمكن أن تعطينا أربع قيم مختلفة لجهود الخرج وذلك بحسب طريقة توصيل الملفين الثانويين: 20V و 5V (أثناء بروز أربعة أطراف منفصلة من ثانوي المحولة) و 25V (أثناء توصيل الملفين الثانويين على التطابق)، و 15V (أثناء توصيل الملفين الثانويين على التضاد).

3. المحولة الذاتية: Autotransformer

تتميز هذه المحولة عن المحولة العادية بوجود اتصال كهربائي بين الملفين الأولي والثانوي بالإضافة إلى وجود تشابك كهرومغناطيسي.

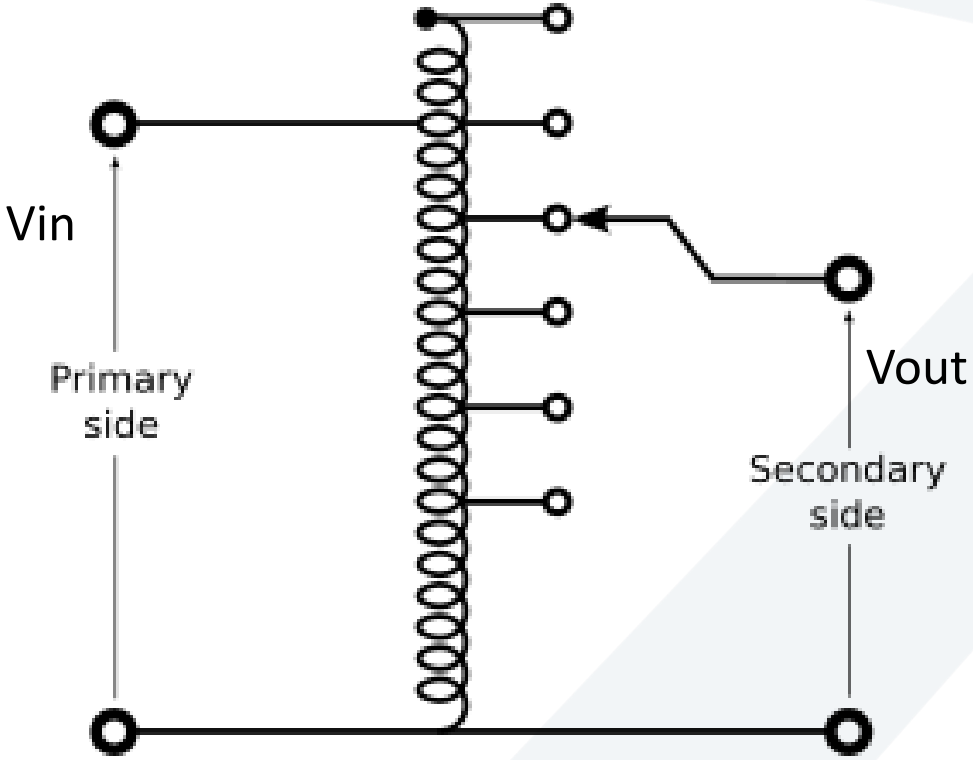
يمكن أن تكون هذه المحولة إما رافعة للجهد





أو خافضة للجهد

4. المحولة الذاتية المنزلقة: Continuous Tapped Transformer

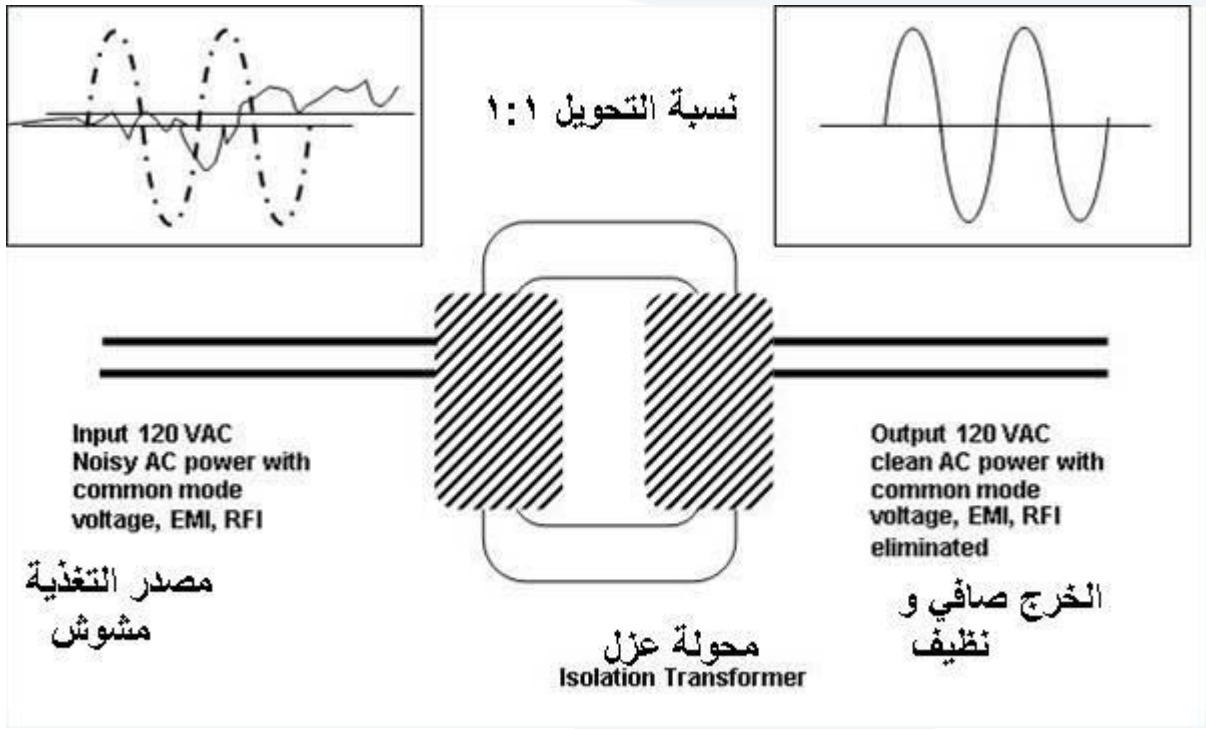


هي محولة ذاتية لها لسان منزلق على الطرف الثانوي. يتميز تنظيم الجهد في هذه المحولة بالنعومة. مجال تنظيم الجهد V_{out} في هذه المحولة كبير، ويتراوح من الصفر وحتى قيم يمكن أن تزيد عن V_{in}.

5. محولات العزل : Isolation Transformers

تستعمل بكثرة في الدارات الكهربائية والالكترونية وخاصة في دارات الجهد العالي، وتستعمل كجهاز عزل فقط لعزل طرفي الدارة الكهربائية عن بعضها البعض. نسبة تحويل هذه المحولات k=1، وجهدا الملفين الأولي والثانوي متساويان $V_p=V_s$، وكذلك $I_p=I_s$.

من أهم فوائد محولات العزل أننا نحصل على الخرج على موجة صافية ونظيفة مهما كان مصدر التغذية مشوش.

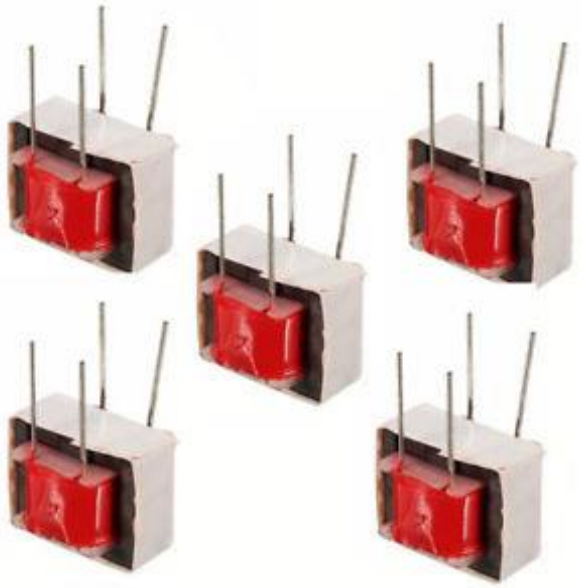


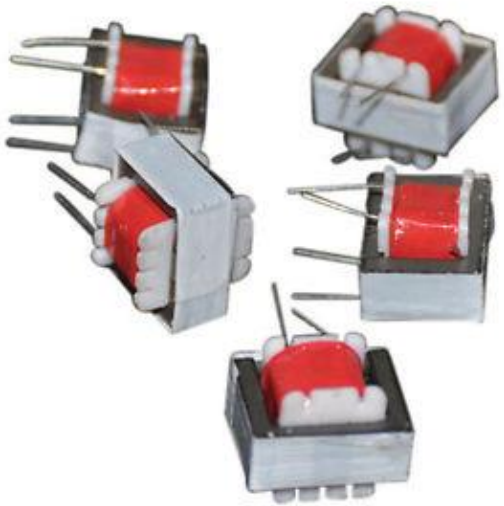
6. محولات تحويل القدرة : Power Conversion

تستخدم بشكل أساسي لتخفيض الجهد، وتتوفر بأنواع وأشكال وحجوم مختلفة، وكذلك بنسب تحويل مختلفة. توجد أنواع من هذه المحولات ذات ثانوي مفرّع و انواع اخرى ذات ملفات ثانوية متعددة، ويستخدم الترميز اللوني للأسلاك لتمييز أسلاك الدخل (جهة الأولي) وأسلاك الملف الثانوي (فمثلاً تكون الأسلاك السوداء للملف الأولي، والخضراء للثانوي والصفراء للتفريعة)، وتستخدم الأرجل المعدنية في بعض أنواع المحولات لكل من الأولي والثانوي ونقطة التفريع في الثانوي وذلك ليكون المحول جاهزاً للتركيب مباشرة على الدارة المطبوعة.

7. المحولات الصوتية: Audio Transformers

تستعمل بشكل أساسي لتحقيق تو افق في الممانعات (تلاؤم الممانعة) بين العناصر والدارات الصوتية (مثلاً بين الميكروفون والمضخم، او بين المضخم ومكبر الصوت Speaker). تعمل هذه المحولات بشكل أفضل في المجال الترددي من 15Hz وحتى 15 KHz. لها أشكال و أنواع مختلفة، ولكن معظمها يحتوي على نقطة مشتركة. معظم هذه المحولات مزودة بأرجل لتثبيتها على اللوحة المطبوعة.





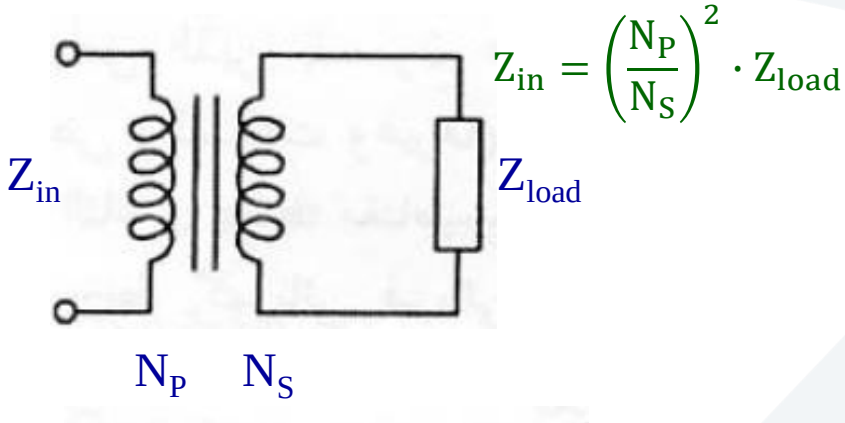
تلاؤم الممانعة:

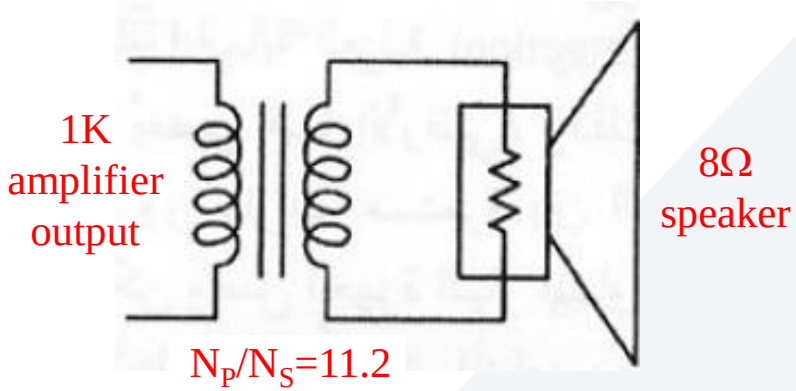
أي جهاز موصول إلى أولي محول يُحس بممانعة مكافئة للمحول نحصل على قيمتها كما يلي:

$$\frac{Z_{in}}{Z_{Load}} = \frac{\frac{V_P}{I_P}}{\frac{V_S}{I_S}} = \frac{V_P \cdot I_S}{V_S \cdot I_P} = \frac{V_P}{V_S} \times \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \times \frac{N_P}{N_S}$$

$$\Rightarrow Z_{in} = \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \cdot Z_{Load}$$

وذلك إذا كان الطرف الثانوي محملاً بالممانعة Z_{LOAD}. ويمكن عن طريق الاختيار المناسب للنسبة N_P/N_S جعل الممانعة المكافئة تساوي ممانعة الجهاز على الرغم من ان ممانعة الحمل لا تساوي ممانعة الجهاز. مثلاً إذا اردنا استخدام محول لتحقيق تو افق في الممانعة بين سماعة مقاومتها (8Ω) ومضخم موصول إلى الأولي ممانعته ($1K\Omega$) عندها تكون $Z_{LOAD}=8\Omega$ و $Z_{in}=1000\Omega$ وتنحل المعادلة بالنسبة لـ (N_P/N_S) كما يلي:

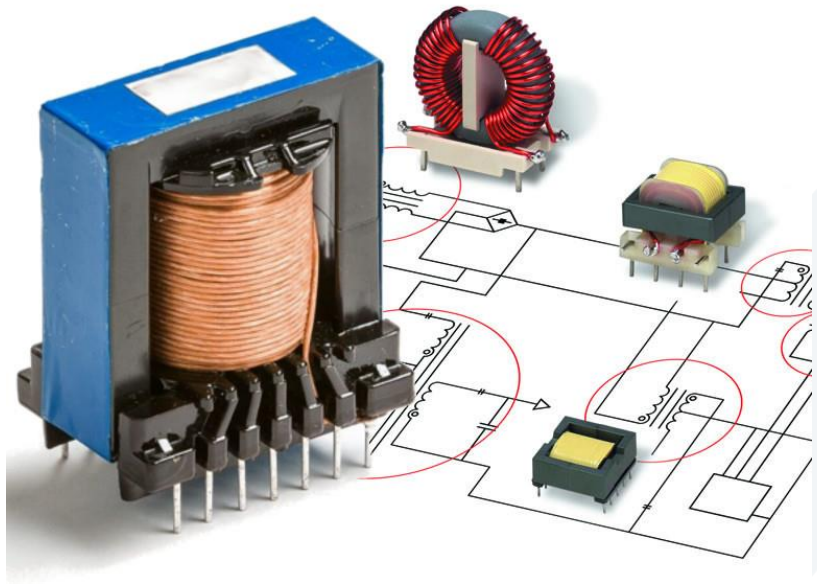




$$Z_{Load} = 8\Omega$$
$$Z_{in} = 1000\Omega$$
$$\Rightarrow 1000 = (\frac{N_P}{N_S})^2 \times 8 \Rightarrow (\frac{N_P}{N_S})^2 = \frac{1000}{8}$$
$$\Rightarrow \frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\frac{1000}{8}} = 11.2$$

وهذا يعني أن عدد لفات الأولي يجب أن يكون أكبر بمقدار 11.2 مرة من عدد لفات الثانوي.

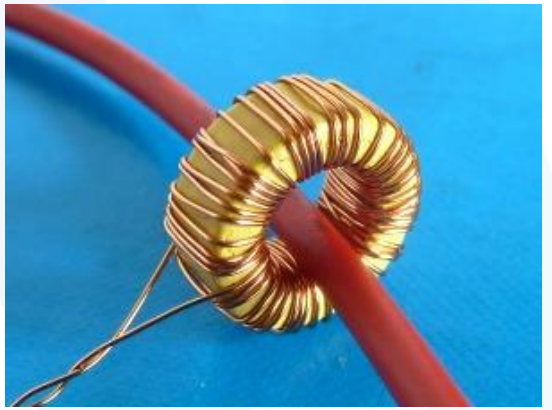
8. المحولات العالية التردد: High Frequency Transformers



غالباً ما تكون ملفوفة على قلب هوائي أو كهرومغناطيسي أو قلب مصنوع من بودرة الحديد (بدلاً من الصفائح التي تستخدم عادة في المحولات العادية)، وتستخدم في تطبيقات الترددات الراديوية.

9. محولات القياس: Measurement Transformers

تستخدم لقياس جهود وتيارات الشبكات الكهربائية عالية الجهد، ولوصل أجهزة الحماية والقياس المختلفة لهذه الشبكات. تقوم محولات القياس بتخفيض الجهود والتيارات العالية جداً إلى قيم صغيرة قابلة للقياس في أجهزة القياس المألوفة، لا تتعدى استطاعة محولة القياس بضع مئات من الفولط امبير، ويجب أن تصمم بحيث تتحمل داراتها الأولية التيارات والجهود المطبقة عليها.



9. محولات القياس: Measurement Transformers

تصنع محولات القياس بمجالات مختلفة لجهود وتيارات الملف الأولي:

$$I_{1n} = (5 - 15000)A, V_{1n} = (0.38 - 500)kV$$

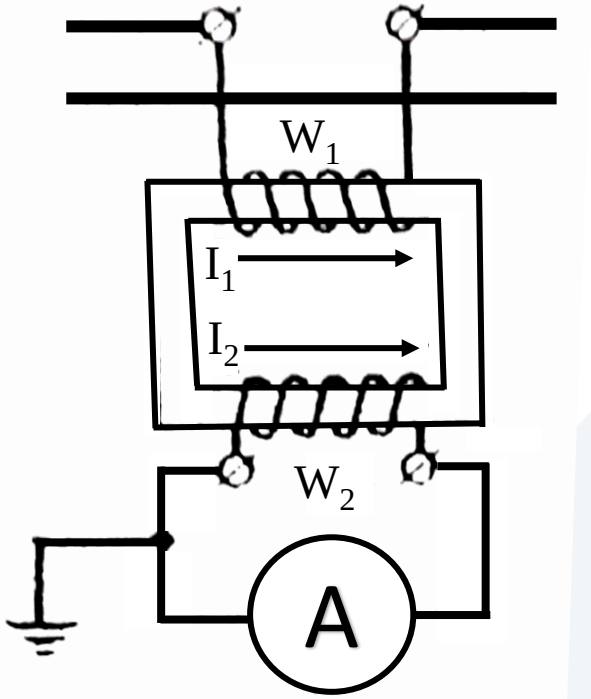
وبمجالين أو أكثر لتيارات وجهود الملف الثانوي: 5A أو I_{2n}=1A

$$V_{2n} = (100 \text{or} \frac{100}{\sqrt{3}} \text{or} \frac{100}{3})V$$

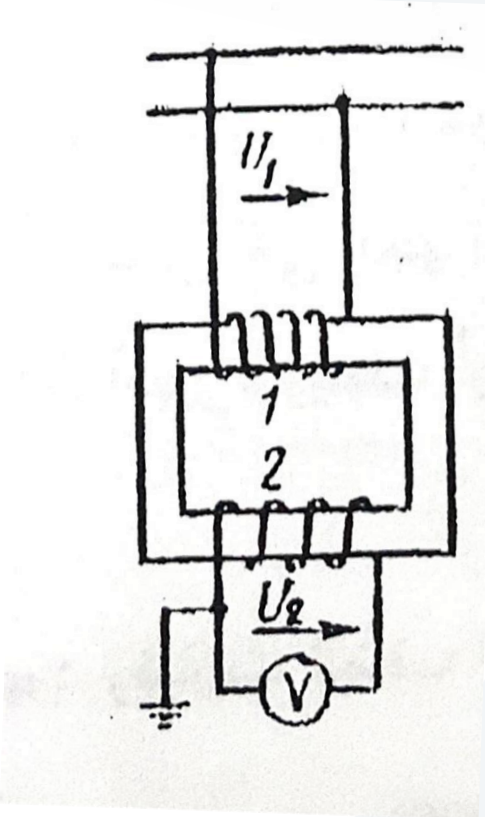
وبالتالي فإن نسبة التحويل في محولات القياس كبيرة جداً، وعدد لفات الأولي والثانوي يكون متفاوتاً جداً.

9. محولات القياس: Measurement Transformers

يوجد نوعان لمحولات القياس:



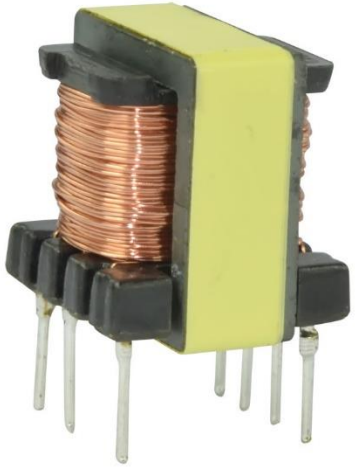
محولات التيار Current Transformer – CT،
حيث يوصل الملف الأولي لمثل هذه المحولة على التسلسل مع الشبكة المراد قياس التيار فيها، ويوصل الملف الثانوي مع المقياس ذي الممانعة الداخلية الصغيرة، وتربط معه على التسلسل أجهزة الحماية والمراقبة المختلفة إن وجدت.



محولات الجهد Voltage Transformer – VT،

وتوصل على التفرع مع الشبكة المراد قياس جهدها، يربط مع ملفها الثانوي أجهزة القياس، ذات الممانعة الداخلية الكبيرة نسبياً.

9. محولات النبضة: Pulsating Transformers



تستخدم في مولدات النبضات لقياس مطال النبضة، وللقضاء على المركبات الثابتة، ولزيادة عدد النبضات...الخ. من أهم المتطلبات الواجب توافرها في محولات النبضة هو أن يحقق أقل تشويه ممكن للنبضات.

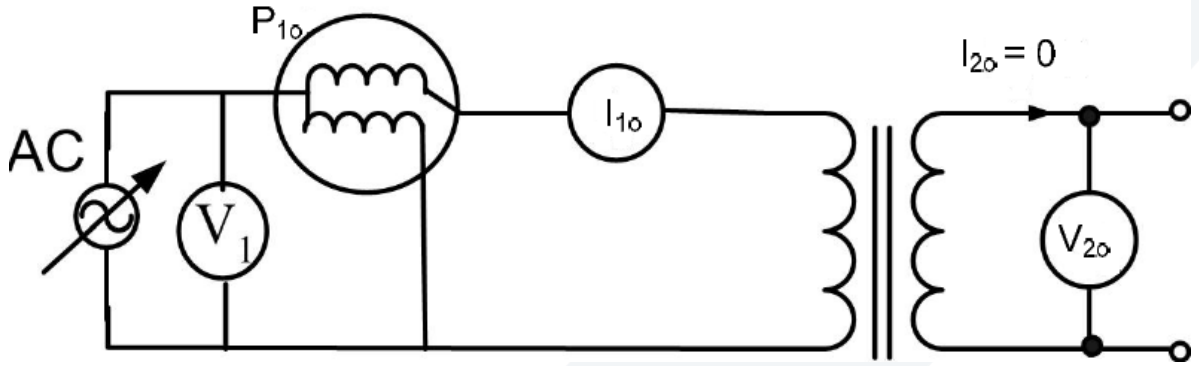
تجارب المحولات الكهربائية: Testing of Transformer

سنقوم بإجراء تجربتين أساسيتين للمحولات: تجربة العمل على فراغ (بدون حمولة)، وتجربة العمل على قصر (قصر الملف الثانوي).

تجربة العمل على فراغ (اللاحمل) للمحول الأحادي الطور:

Open-circuit test of single-phase transformer

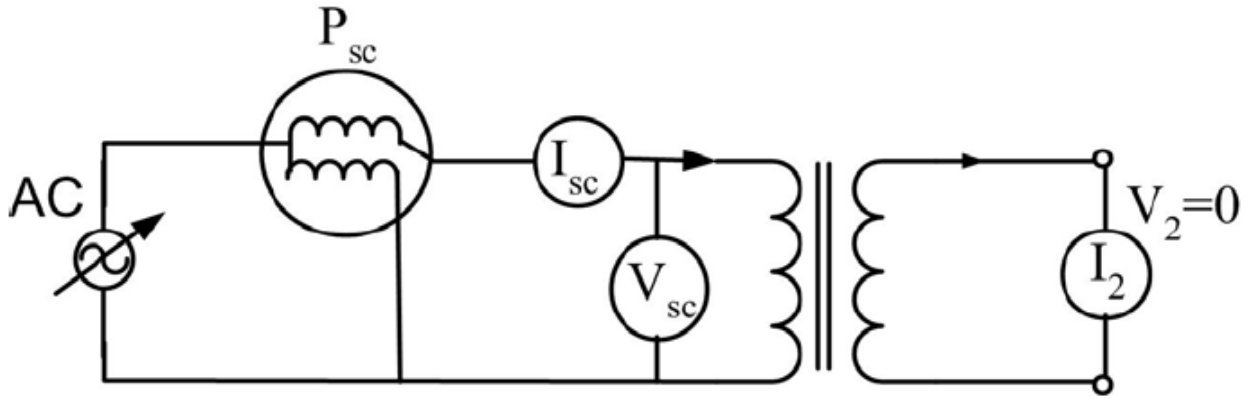
تهدف هذه التجربة لتعيين ثوابت الدارة المكافئة للمحول، ودراسة خصائص المحول عند اللاحمل، كالضياعات الحديدية، وتيار اللاحمل. كما تهدف لرسم منحنيات الخواص للمحول في حالة العمل على فراغ. يتم توصيل المحول كما في الدارة التالية:



تجربة العمل على قصر للمحول الأحادي الطور:

Short-circuit test of single-phase transformer

تهدف هذه التجربة لتعيين ثوابت الدارة المكافئة للمحول، ودراسة خصائص المحول عند العمل على قصر، كالضياعات النحاسية، والمقاومة والممانعة للملفين الأولي والثانوي. كما تهدف لرسم منحنيات الخواص للمحول عند القصر. يتم توصيل المحول في هذه الحالة كما في الدارة التالية:



تمارين

1. مكبر صوت مقاومة ملفه 9Ω وصل مع منبع جهد $10V$ مقاومته الداخلية 1Ω. المطلوب:

أ. حساب القدرة المستهلكة في مكبر الصوت حين وصله مباشرة مع المنبع.

ب. لتضخيم القدرة المستهلكة في المكبر نوصله مع المنبع عبر محولة نسبة تحويلها (1/3), احسب القدرة المستهلكة في المكبر.

---

2. محولة أحادية الطور جهودها [V] 6300/200 وترددها [Hz] 50. وصلنا معها حمولة من جهة الجهد المنخفض مقدارها [A] 10، مقطع نواتها [cm^2] 10 وكثافة الفيض الأعظمي [T] 0.087. بإهمال الضياعات وتيار المغنطة، المطلوب:

أ. احسب التيار الذي تستجره المحولة من شبكة التغذية.

ب. احسب عدد لفات كل من ملفي المحولة.

3. محولة أحادية الطور استطاعتها الاسمية [kVA] 25، عدد لفات الأولي [Turn] 500، والثانوي [Turn] 40. وصلنا الملف الأولي إلى شبكة جهدها [kV] 3 وترددها [Hz] 50، بإهمال الضياعات وتيار المحولة على فراغ (تيار المغنطة)، المطلوب:

أ. احسب الجهد على طرفي الملف الثانوي.

ب. احسب تيار الحمل الكامل في الملفين الأولي والثانوي.

ج. الفيض المغناطيسي الأعظمي في النواة.