

الآلات الكهربائية

Electrical Machines

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.

مفاهيم عامة في الآلات الكهربائية

General definition of Electrical Machine

تعريف الآلة الكهربائية:

The definition of Electrical Machine

الآلات الكهربائية هي عبارة عن معدات تقوم بتحويل القدرة من شكل إلى آخر: كالمحركات الكهربائية التي تقوم بتحويل القدرة الكهربائية إلى قدرة ميكانيكية، والمولدات التي تقوم بتحويل القدرة الميكانيكية إلى كهربائية، والمحولات التي تقوم بتحويل القدرة الكهربائية من شكل إلى آخر، كتحويل القدرة الكهربائية أحادية الطور إلى قدرة كهربائية ثلاثية الطور مثلاً.

تصنيف الآلات الكهربائية:

Classification of Electrical Machine

تصنّف الآلات الكهربائية بطرق مختلفة، وذلك حسب:

- ❖ طرق تحويلها للقدرّة.
- ❖ التيارات التي تعمل عليها.
- ❖ طريقة حركتها.
- ❖ استطاعاتها

تصنّف الآلات الكهربائية بحسب طرق تحويلها للقدرة إلى:

- ❖ محولات كهربائية Electric Transformer – تقوم بتحويل القدرة الكهربائية من شكل إلى آخر، كتحويل القدرة الكهربائية من 220 V إلى 24 V مثلاً، أو تحويل القدرة الكهربائية الثلاثية الطور إلى قدرة أحادية الطور أو متعددة الأطوار.
- ❖ محركات كهربائية Electric Motors – تقوم بتحويل القدرة الكهربائية إلى قدرة ميكانيكية.
- ❖ مولدات كهربائية Electric Generators – تقوم بتحويل القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية.

تصنّف الآلات الكهربائية بحسب طريقة حركتها إلى:

- ❖ آلات كهربائية ساكنة ميكانيكياً – **Non-Rotating Electric Machines**
كالمحولات الكهربائية، وهي آلات لا تحتوي أية أجزاء دوارة أو متحركة.
- ❖ آلات كهربائية دوارة – **Rotating Electric Machines** كالمحركات والمولدات الكهربائية
- ❖ محركات كهربائية خطية – **Liner Electric Motors** – تنجز حركة خطية مستقيمة.
- ❖ محركات الخطوة – **Stepper Motors** – تدور بزاوية محددة أو خطوة محددة.

تصنّف الآلات الكهربائية بحسب استطاعاتها إلى:

- ❖ آلات دقيقة (ميكروية – Micro Machines) – تتراوح استطاعاتها من أجزاء الواط وحتى عشرات الواط.
- ❖ آلات متوسطة ومنخفضة الاستطاعة Small & Middle Machines – تتراوح استطاعاتها من عشرات الواط وحتى عدة كيلوواط.
- ❖ آلات ضخمة عالية الاستطاعة Large Machines – تصل استطاعاتها حتى عدة آلاف الكيلوواط.

تصنّف الآلات الكهربائية بحسب تياراتها إلى:

❖ آلات تيار مستمر

Direct Current (DC) Machines

❖ آلات تيار متناوب

. Alternative Current (AC) Machines

تقسم آلات التيار المستمر بحسب طريقة تهيجها إلى:

❖ آلات التيار المستمر ذات التهيج المستقل

Separate-Excitation (DC) Machines

وهي آلات يتم تهيجها من منبع تيار مستمر خارجي أو مستقل أو من مغناط دائمة

Permanent Magnet (DC) Machines

❖ آلات ذات تهيج ذاتي **Self-Excitation (DC) Machines**.

وتقسم بدورها إلى:

✓ آلات ذات تهيج تفرعي **Shunt DC Machines**

✓ آلات ذات تهيج تسلسلي **Series DC Machines**

✓ آلات ذات تهيج مختلط **Compound DC Machines**

تصنيف آلات التيار المتناوب بحسب عدد اطوارها إلى:

❖ **Single-Phase Machines** آلات أحادية الطور

❖ **Three-Phase Machines** آلات ثلاثية الطور

❖ **Multi-Phase Machines** آلات متعددة الأطوار

تصنّف آلات التيار المتناوب بحسب مبدأ عملها إلى:

❖ آلات تزامنية أو توافقية (متواقتة) Synchronous Machines – تكون سرعة دورانها متزامنة مع سرعة دوران الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية، وتستعمل في الغالب لتوليد الطاقة الكهربائية في محطات التوليد، وهي نوعان:

✓ ذات أقطاب بارزة

Salient-pole Synchronous Machines

وهي مولدات بطيئة السرعة (أصغر أو تساوي 500 rpm). تستعمل في محطات التوليد الهيدروليكية.

✓ ذات أقطاب غير بارزة أو اسطوانية

Non Salient-pole Synchronous Machines

أو Cylindrical-pole Synchronous Machines

وهي مولدات عالية السرعة (حتى 3000 rpm)، تستعمل في محطات التوليد الحرارية والغازية.

تصنّف آلات التيار المتناوب بحسب مبدأ عملها إلى:

❖ آلات لا تزامنية أو لا توافقية (غير متواقتة) **Asynchronous Machines** – تكون سرعة دورانها غير متزامنة مع سرعة دوران الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية، وتسمى غالباً آلات تحريضية **Induction Machines**. تستعمل الآلات التحريضية بشكل أساسي كمحركات مستهلكة للقدرة الكهربائية ونسُميها المحركات التحريضية **Induction Motors** وهي نوعان:

✓ بدائر مقصور (ذات قفص سنجابي)

Squirrel-Cage Rotor Induction Machines

✓ بدائر ملفوف

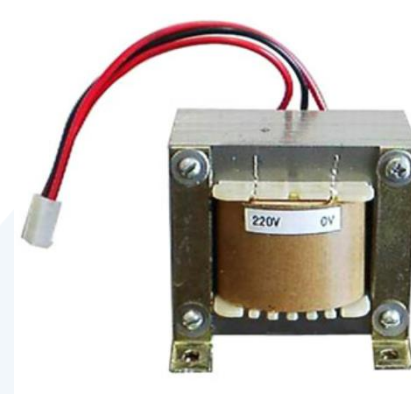
Wound- Rotor (or slip ring rotor) Induction Machines

يعتمد مبدأ عمل جميع الآلات الكهربائية، مهما كان نوعها على مبدأ فاراداي في التحريض المغناطيسي الذي يبحث في العلاقة بين ناقل كهربائي والمساحة المغناطيسية الموجود فيها هذا الناقل. وعند وجود حركة نسبية بين الاثنين سوف تتعرض في الناقل قوة محرّكة كهربائية، وسيمر فيه تيار إذا كان هذا الناقل يشكل جزءاً من دائرة مغلقة.

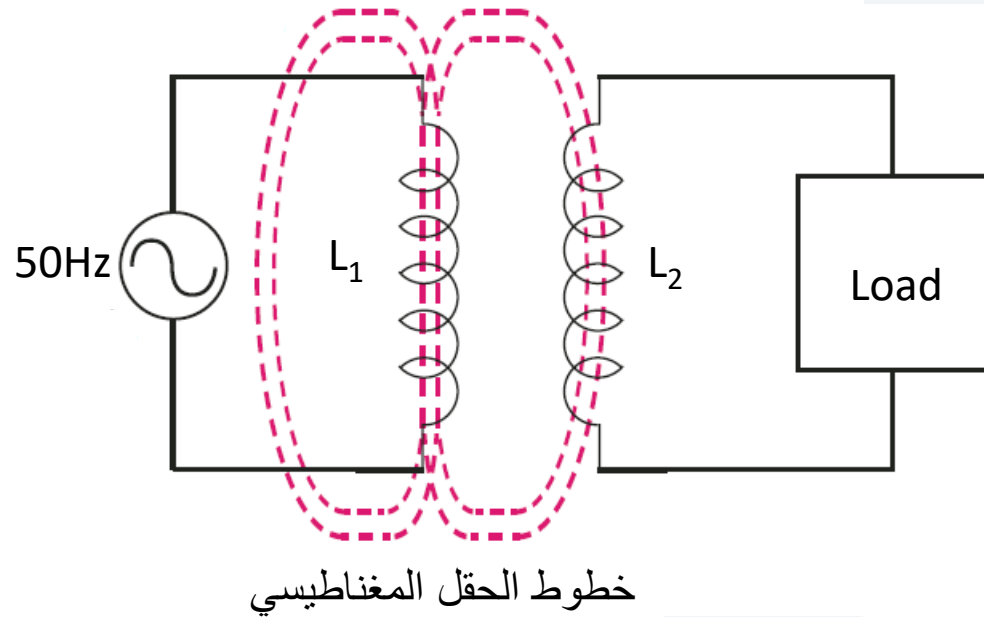
سنركز في هذا المقرر على المحولات والمحركات
الكهربائية لما لها من دور أساسي في أنظمة التحكم
والقيادة، ولأهميتها في عمل الروبوتات الحديثة.

المحولات الكهربائية

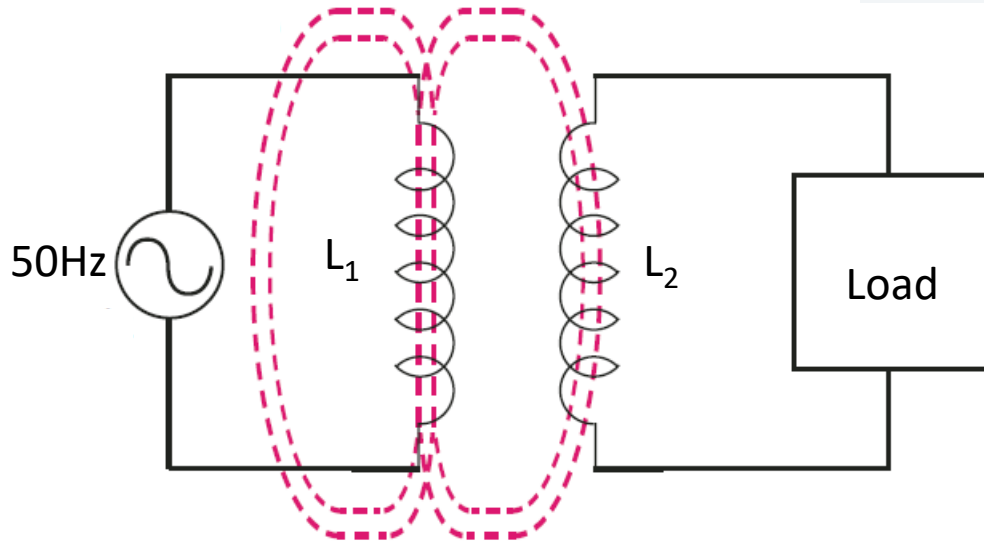
Electric Transformers



التحريض المتبادل Mutual Inductance:



عندما يتغير الحقل المغناطيسي في ملف، يتولد جهداً بالتأثير في ملف آخر مجاور له كما في الشكل. تسمى هذه الظاهرة بالتأثير المتبادل، فإذا قمنا بوصل أحد الملفات L_1 بمنبع جهد متناوب، يتولد حول هذا الملف حقل مغناطيسي متناوب أيضاً، حيث يزداد ويتناقص بحسب تغيرات شدة التيار المار في الملف. يقوم هذا الحقل المتناوب باختراق الملف الثاني المجاور L_2 ، ويولد فيه جهداً بالتأثير يستفاد منه في تشغيل حمل كهربائي موصول معه.

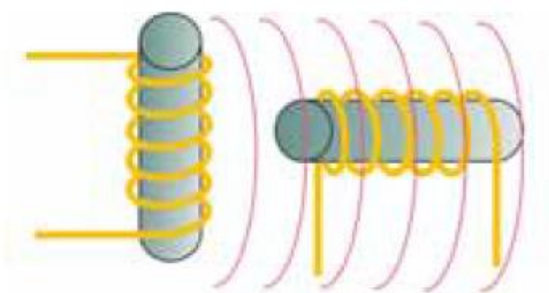
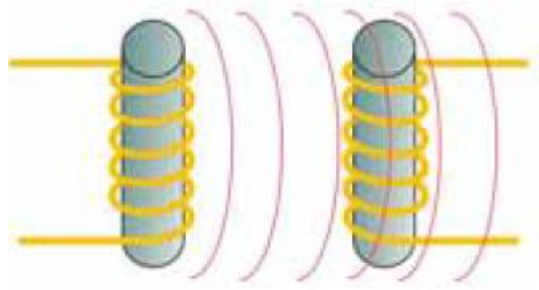
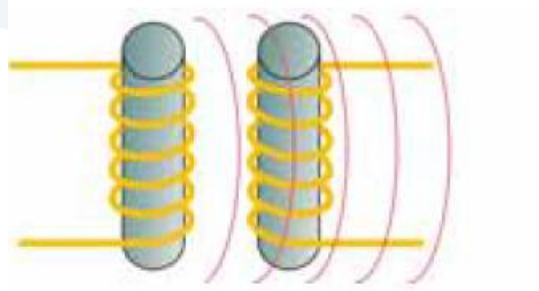


خطوط الحقل المغناطيسي

وفقاً لذلك نقول أن الطاقة الكهربائية انتقلت من دائرة الملف L_1 إلى دائرة الملف L_2 دون اتصال كهربائي مباشر بينهم، واستعيض عن ذلك باتصال مغناطيسي. نسمي الملف L_1 المتصل بمصدر التغذية بالملف الأولي (الإبتدائي)، والملف L_2 الموصول بالحمل بالملف الثانوي.

يقاس التحريض المتبادل بين ملفين بنفس واحدة التحريض الذاتي وهي الهنري [H]، وبذلك يكون التحريض المتبادل بين الملفين L_1 و L_2 في الشكل مساوٍ 1[H] إذا تولد بين طرفي الملف الثانوي L_2 جهداً مقداره 1[V] نتيجة تغير قيمة التيار بمقدار 1[A/sec] في الملف الأولي L_1 .

يمكن زيادة التحريض المتبادل بين ملفين بالطرق الآتية:



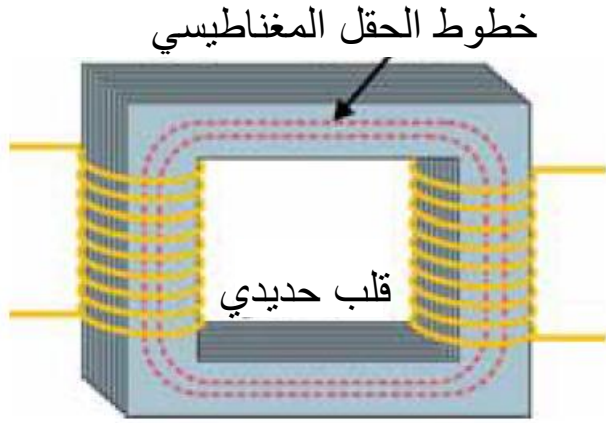
1. تقليل المسافة الفاصلة بينهما.

2. وضع الملفين بحيث يكون محوراها متوازيين، حيث ينعدم التأثير المتبادل في الوضع الذي يتعامد فيه محورا الملفين، ويستفاد من هذه الظاهرة عندما يراد حماية ملف من تأثير المجال المغناطيسي لملف آخر قريب منه.

يمكن زيادة التحريض المتبادل بين ملفين بالطرق الآتية:

3. زيادة عدد اللفات لكل منهما: حيث يزداد الجهد المغناطيسي المتولد نتيجة تقاطع الملف مع مجال مغناطيسي معين.

4. نوع الوسط الفاصل بين الملفين: حيث يزداد التحريض المتبادل عن استخدام وسط ذي نفوذية مغناطيسية عالية كالحديد، حيث يتم لف الوشيعة على قلب حديد يشكل مسار متصل للحقل المغناطيسي الناتج عن سريان التيار الكهربائي في الملف الأولي L_1 .



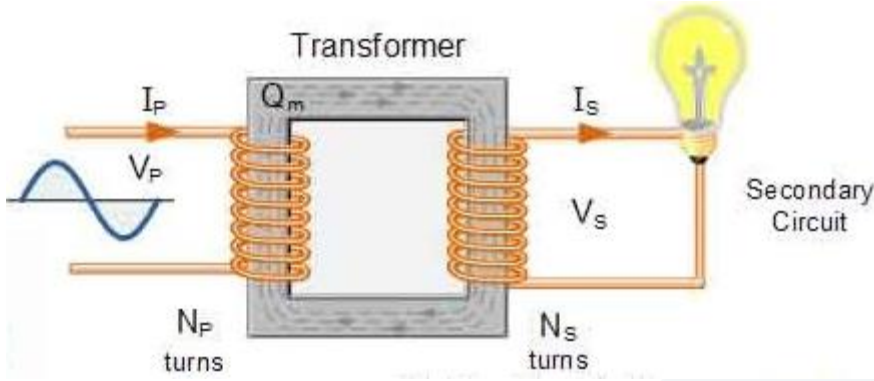
عامل الربط (الارتباط) Coupling Coefficient:

يشير عامل الربط إلى مدى تأثر لفات أحد الملفين بالحقل المغناطيسي للملف الآخر، فإذا فرضنا أن كل خطوط الحقل المغناطيسي لأحد الملفين تتقاطع مع كل لفات الملف الآخر، عندها يقال إن عامل الربط يساوي الواحد. أما في الحالة التي لا تتقاطع فيها جميع خطوط الحقل المغناطيسي مع كل اللفات الخاصة بالملف الآخر (وهي الحالة العامة) عندها يكون عامل الربط أقل من الواحد. ويعطى التحريض المتبادل في هذه الحالة بالعلاقة:

$$\left. \begin{aligned} M^2 &= k^2 \cdot L_1 \cdot L_2 \Rightarrow M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \\ &\Rightarrow k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \end{aligned} \right\}$$

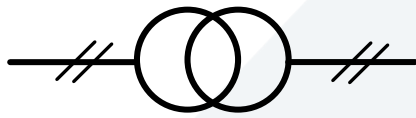
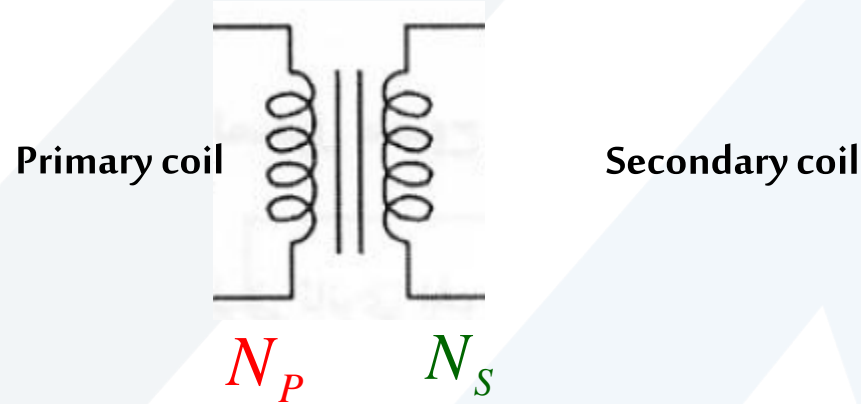
المحولة الكهربائية عبارة عن جهاز يقوم بتحويل القدرة الكهربائية من قيمة جهد إلى قيمة أخرى أو من تردد لآخر، أو تحويل شكل النبضة الكهربائية.

سنتناول فقط المحولات التي تحول الجهد الكهربائي من قيمة لأخرى مع المحافظة على التردد وشكل الموجة دون تغيير.

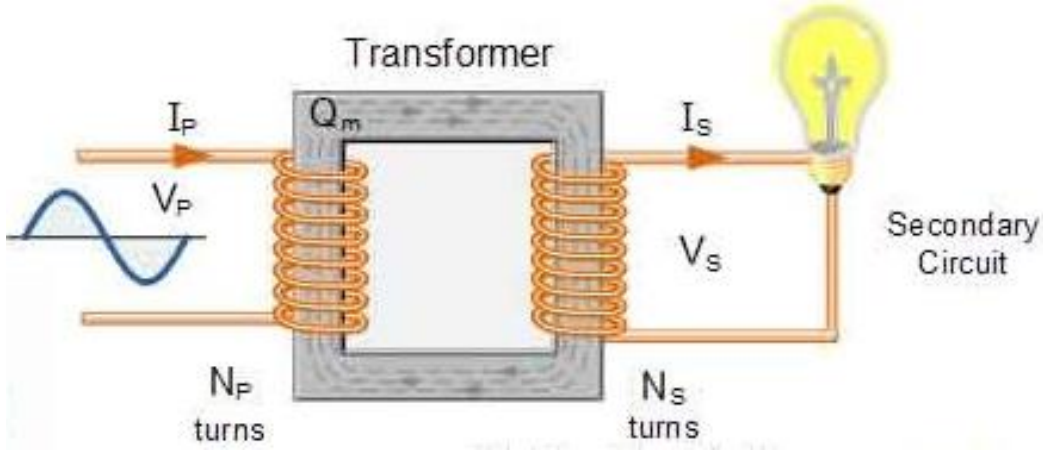


تتألف أبسط أنواع المحولات الكهربائية من ملفين على الأقل منفصلين كهربائياً عن بعضهما، وملفوفين على نواة مغناطيسية واحدة كما في الشكل.

يتم تغذية أحد الملفين من منبع التغذية. يسمى هذا الملف بالملف الابتدائي (الأولي) (Primary winding (coil))، وعدد لفاته (N_p)، أما الملف الثاني الذي يغذي الحمل فيسمى بالملف الثانوي (Secondary winding (coil)) وعدد لفاته (N_s). يرمز للمحولة في مخططات الدارات الكهربائية بالرمز التالي:



ويرمز للمحولة في الشبكات الكهربائية بالرمز التالي:



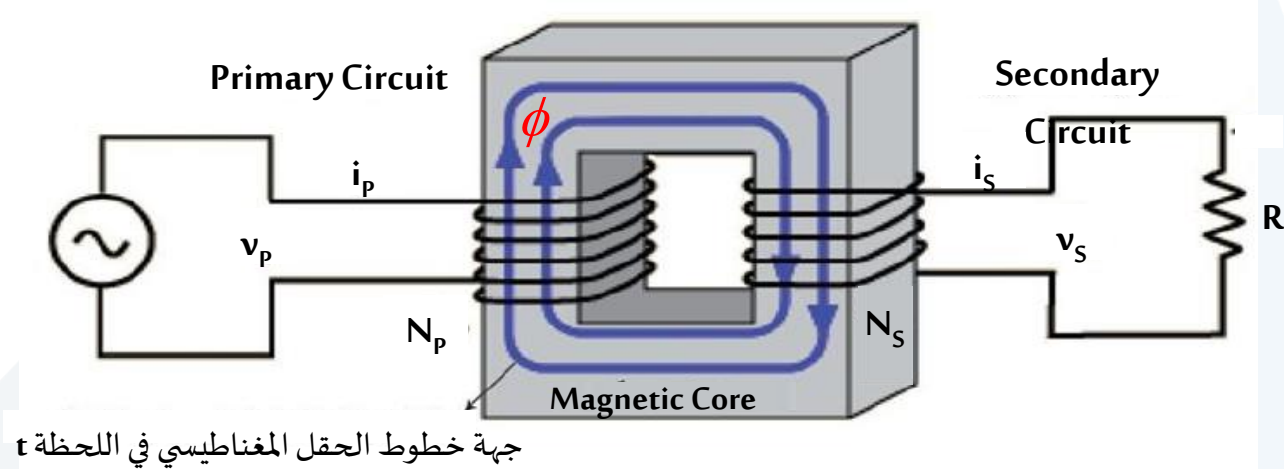
يعتمد عمل المحول على ظاهرة التأثير المتبادل بين ملفين متجاورين، فإذا تم وصل طرفي الملف الأولي إلى منبع جهد متناوب V_p فإن الحقل المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتغير بالملف الأولي سيقطع كلياً أو جزئياًً الملف الثانوي، مما يتسبب في توليد جهد متناوب بين طرفي الملف الثانوي مقدارها V_s ، تؤدي إلى سريان تيار كهربائي بالحمل الكهربائي الموصول بين طرفي الملف الثانوي.

يستخدم المحول كأداة لرفع أو خفض مستوى الجهد المتناوب تبعاً للحاجة، فبتغيير النسبة بين عدد لفات الملف الأولي والملف الثانوي، يمكن تغيير مقدار الجهد المتولد بالتأثير في الملف الثانوي، وبالتالي يمكن خفض أو رفع مقدار الجهد المتناوب باستخدام نسبة عدد لفات ملائمة.

تعرف نسبة عدد اللفات k (نسبة التحويل) بأنها نسبة عدد لفات الملف الثانوي N_s إلى عدد لفات الملف الأولي N_p :

مبدأ العمل Principle of Operation:

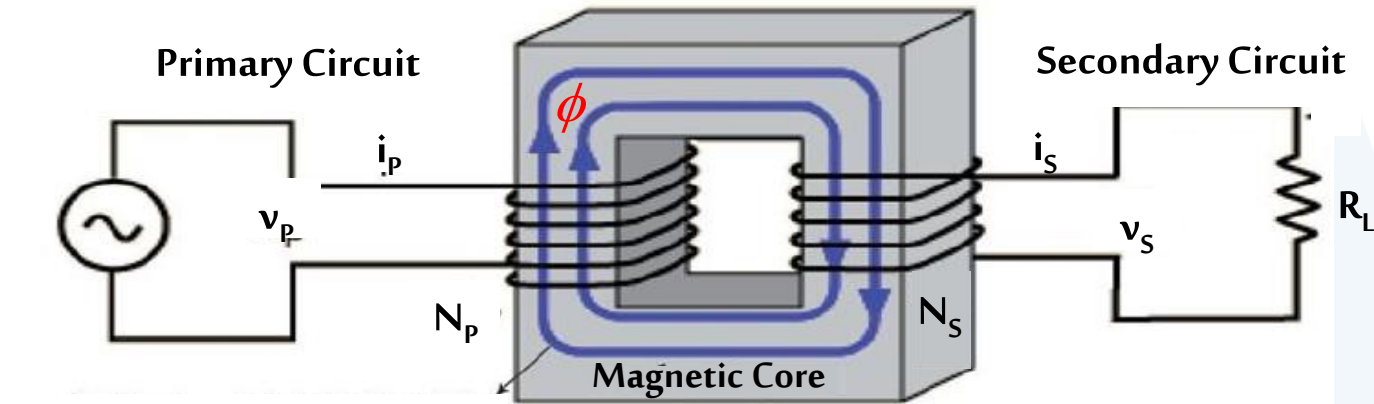
عندما تغذي الملف الأولي ذي عدد اللفات N_p بجهد متناوب قيمته اللحظية: $v_p = V_{mP} \cdot \sin \omega t$ يمر فيه تيار متناوب i_p يؤدي إلى توليد فيض مغناطيسي متناوب يغلق دارته عبر النواة المغناطيسية الحديدية magnetic core ويحرض في الملف الأولي قوة محرّكة كهربائية تتناسب قيمتها مع عدد اللفات ومع قيمة الفيض المغناطيسي ومع التردد، وتعطى بالعلاقة:

$$e_p = 4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_p$$


مبدأ العمل Principle of Operation:

يتشابك هذا الفيض مع لفات الملف الثانوي ذي عدد اللفات N_s . وبما أن الفيض المتشابك هو فيض متناوب، فوفقاً لقانون فاراداي في التحريض الكهرومغناطيسي، سيتعرض في الملف الثانوي قوة محرّكة كهربائية تتناسب قيمتها مع عدد اللفات أيضاً، ومع قيمة الفيض المغناطيسي، ومع التردد، وتعطى بالعلاقة:

$$e_s = 4.44 \cdot \phi \cdot f \cdot N_s$$



جهة خطوط الحقل المغناطيسي في اللحظة

t

تسمى النسبة k بنسبة التحويل أو نسبة عدد لفات الملف الأولي إلى الثانوي، وتعطى بالعلاقة:

$$k = \frac{e_P}{e_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

وفقاً لذلك يعطى الجهد الثانوي بدلالة جهد الملف الأولي ونسبة عدد اللفات بالعلاقة:

$$V_P \cdot N_S = V_S \cdot N_P \Rightarrow V_S = V_P \frac{N_S}{N_P}$$

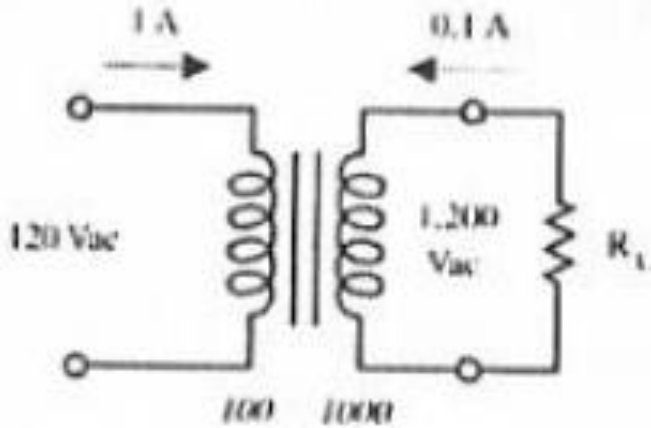
❖ إذا كان عدد لفات الملفين متساوياً يكون الجهد الأولي مساو للجهد الثانوي (نسبة التحويل 1:1)، والمحولة هنا تقوم بدور العزل بين طرفي الدارة الأولي والثانوي. نسمي مثل هذه المحولة بمحولة العزل Isolating transformer

تستخدم محولات العزل لحماية دارات الثانوي من الصدمات الكهربائية (وكذلك لحماية الأشخاص الذي يلمسون عناصر من دارة الثانوي كالمفاتيح والمقابض والمسكات... وغيرها). والسبب في تأمين الحماية هو أن الملف الثانوي يرتبط مغناطيسياً مع الأولي، وليس كهربائياً، فلا يوجد ربط كهربائي فيزيائي مباشر مع الأولي.

❖ إذا كان عدد لفات الملف الثانوي أكبر من عدد لفات الملف الاولي $N_s > N_p$ ، أي $k = N_p/N_s < 1$ ويكون $V_s > V_p$ ، ونقول عن المحولة أنها رافعة للجهد **Step-up transformer**.

إذا كان عدد لفات الملف الأولي 100 لفة مثلاً، وعدد لفات الملف الثانوي 1000 لفة وكان جهد الابتدائي 120 V وتيار الأولي 1A. احسب جهد وتيار الملف الثانوي. ماذا تستنتج؟

Step-Up Voltage/Step-Down Current



$$V_s = \frac{1000}{100} \times 120 = 1200V$$

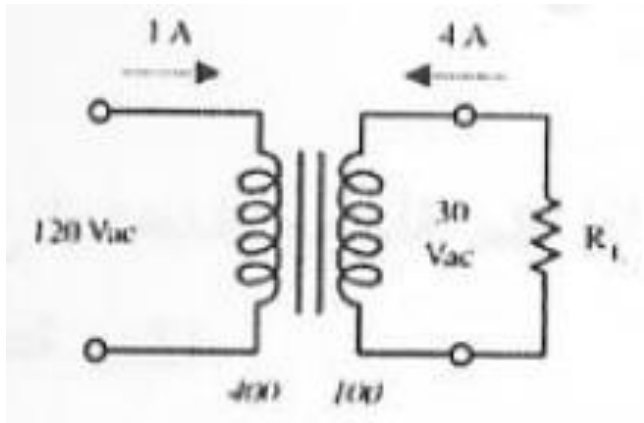
$$I_s = \frac{100}{1000} \times 1 = 0.1A$$

نستنتج أن المحول الذي يعطي جهد ثانوي أكبر من الجهد الأولي هو محول رافع للجهد.

❖ إذا كان عدد لفات الملف الثانوي أقل من عدد لفات الملف الاولي $N_s < N_p$ ، أي $k = N_p/N_s > 1$ ويكون $V_s < V_p$ ، ونقول عن المحولة أنها خافضة للجهد **Step-down transformer**.

إذا كان عدد لفات الملف الأولي 400 لفة مثلاً، وعدد لفات الملف الثانوي 100 لفة وكان جهد الابتدائي 120 V وتيار الأولي 1A. احسب جهد وتيار الملف الثانوي. ماذا تستنتج؟

Step-Down Voltage/Step-Up Current



$$V_s = \frac{100}{400} \times 120 = 30V$$

$$I_s = \frac{400}{100} \times 1 = 4A$$

نستنتج أن المحول الذي يعطي جهد ثانوي أقل من الجهد الأولي هو محول خافض للجهد.

النتيجة: يجب أن يكون عدد لفات الثانوي أكبر من عدد لفات الأولي كي يكون الجهد الثانوي أكبر من جهد الأولي، وعندما يكون جهد الثانوي أكبر من جهد الأولي فإن تيار الثانوي يكون أقل من تيار الأولي. أما إذا أردت أن يكون جهد الثانوي أصغر من جهد الأولي فإن عدد لفات الثانوي يجب أن يكون أصغر من عدد لفات الأولي، وفي هذه الحالة يكون تيار الثانوي أكبر من تيار الأولي. وباختصار: المحول الرفع للجهد هو خافض للتيار، أما المحول الخافض للجهد هو رافع للتيار.

نقول عن المحولة التي تحوي ملفين فقط: أولي وثانوي بأنها محولة ثنائية الملفات. اما إذا احتوت المحولة على عدد أكبر من الملفات من جهة الأولي أو من جهة الثانوي أو من الجهتين معاً فنقول عنها أنها محولة متعددة الملفات.

المعادلات الأساسية والدائرة الكهربائية المكافئة للمحولة:

Equations and electrical equivalent circuit

بإهمال الضياعات في المحولة تكون الاستطاعة التي يستهلكها الملف الأولي من المنبع تساوي استطاعة الملف الثانوي التي يقدمها للمستهلك، وبالتالي:

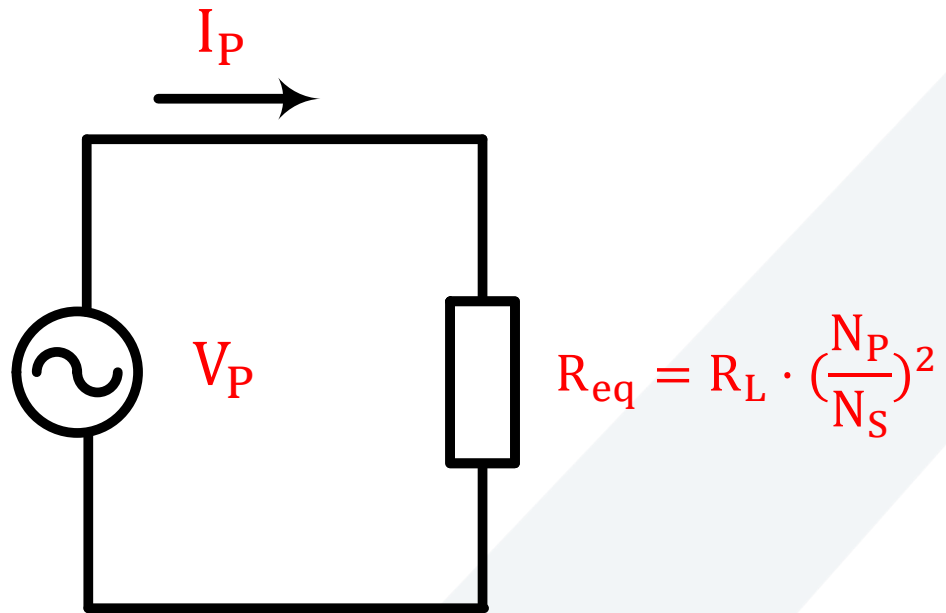
$$P = V_P \cdot I_P = V_S \cdot I_S \Rightarrow \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = k$$

وبدلالة مقاومة الحمولة تكون الاستطاعة مساوية:

$$P = V_S \cdot I_S = V_S \cdot \frac{V_S}{R_L} = \frac{V_S^2}{R_L}$$

بتعويض قيمة V_S من العلاقة نجد: $V_S = V_P \frac{N_S}{N_P}$

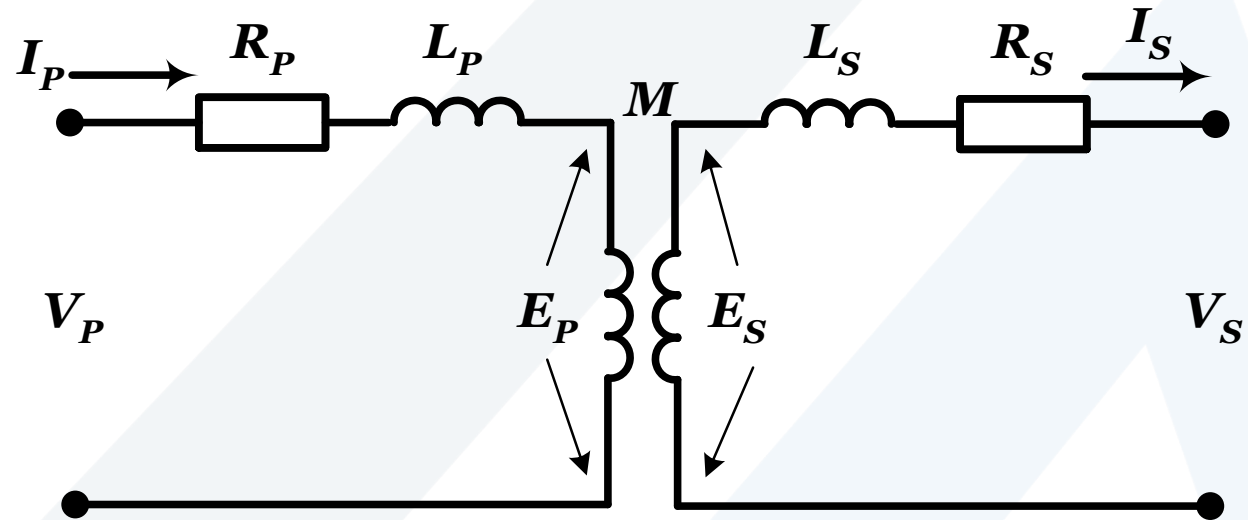
$$P = \frac{V_P^2}{R_L} \cdot \left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2 = \frac{V_P^2}{R_L \cdot \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2} = \frac{V_P^2}{R_L \cdot k^2}$$

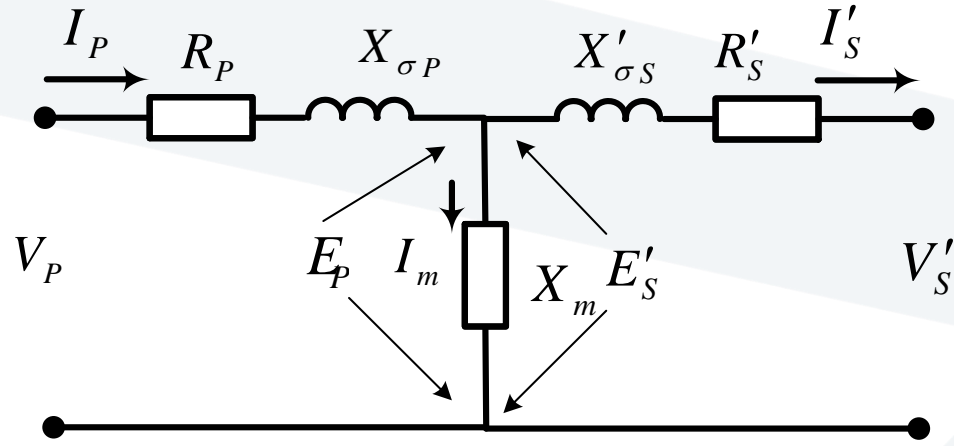


تبين هذه العلاقة أنه يمكن تمثيل المحولة العملية المعقدة، والمؤلفة من دارتين منفصلتين كهربائياً ومتشابكتين مغناطيسياً بدارة كهربائية مكافئة مبسطة، كما في الشكل:

الدارة المكافئة السابقة لا تعطي تصوراً واضحاً ومفصلاً عن المحولة الكهربائية: جهدي الملفين الأولي والثانوي، تياري الملفين وعناصر الأولي والثانوي.

يمكن تمثيل المحولة العملية المؤلفة من ملفين أولي وثانوي بالدارة الكهربائية المكافئة التالية:





ويمكن تمثيل المحولة العملية المؤلفة من ملفين
أولي وثانوي بالدارة الكهربائية التالية:

R_p - المقاومة الأومية للملف الأولي، $[\Omega]$

R'_S - المقاومة الأومية للملف الثانوي المنسوب إلى الأولي، $[\Omega]$ $R'_S = k^2 \cdot R_S$

$X_{\sigma P}$ - المفاعلة التحريضية التسريبية للملف الأولي، $[\Omega]$

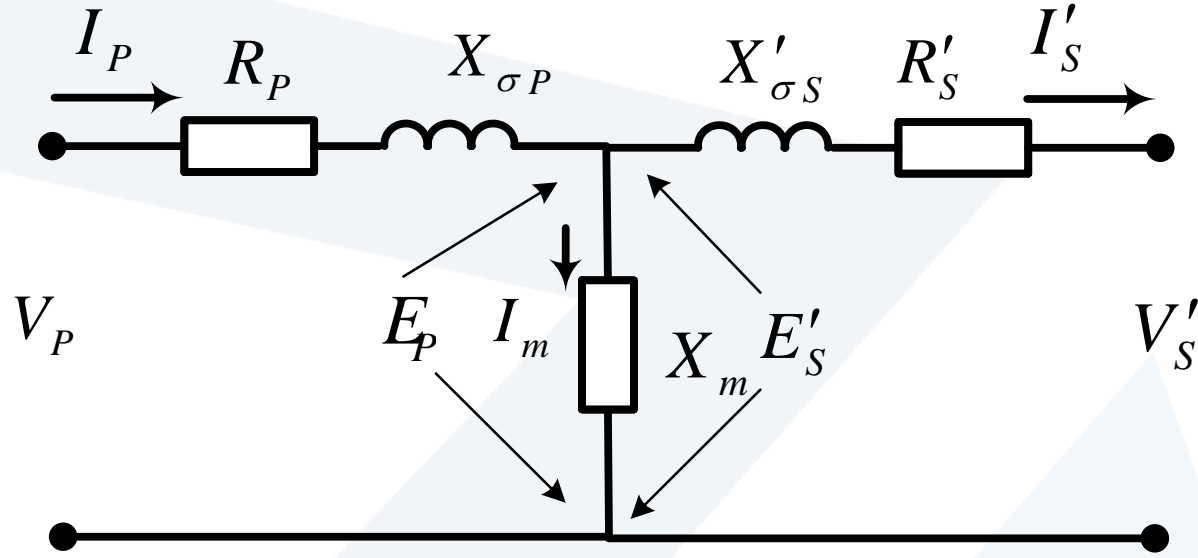
$X'_{\sigma S}$ - المفاعلة التحريضية التسريبية للملف الثانوي المنسوبة إلى الأولي، $[\Omega]$ $X'_{\sigma S} = k^2 \cdot X_{\sigma S}$

X_m - المفاعلة التحريضية لدارة المغنطة، $[\Omega]$

I_m - تيار المغنطة، [A]

V_P - جهد الملف الأولي، [V]

V'_S - جهد الملف الثانوي المنسوب إلى الأولي، [V] $V'_S = k \cdot V_S$



يمثل الضلع الأيسر من الدارة بارامترات ومتغيرات الملف الابتدائي (الأولي)، بينما يمثل الضلع الأيمن بارامترات ومتغيرات الملف الثانوي المنسوب إلى الأولي. أما الضلع الشاقولي فيمثل بارامترات ومتغيرات دائرة المغنطة، وذلك بإهمال المقاومة الأومية لحديد القلب المغناطيسي.

تمثل الدارة السابقة دائرة مكافئة عامة للمحولة الأحادية الطور، أو دائرة مكافئة لطور واحد من أطوار المحولة الثلاثية الطور أو المتعددة الأطوار.

الضیاعات:

تستهلك المحولة من الشبكة الكهربائية استطاعة ظاهرية $S_p = V_p \cdot I_p$ يُستهلك قسم منها لتغطية الضیاعات المختلفة في المحولة، ويصل الباقي إلى المستهلك $S_s = V_s \cdot I_s$.

تقسم الضیاعات في المحولة إلى ضیاعات كهربائية تتعلق بتيار الحمولة وتصرف في الملفات، لذلك تسمى الضیاعات المتغيرة أو الضیاعات النحاسية، وإلى ضیاعات حديدية (مغناطيسية) لا تتأثر بتيار الحمولة بل بالقوة المحركة الكهربائية المتحرضة في الملف الاولي أو بالتوتر المطبق على هذا الملف وهذه الضیاعات تظهر في القلب الحديدي المغناطيسي وتسمى الضیاعات الثابتة.

الضیاعات:

1. الضیاعات الكهربائية المتغيرة (النحاسية): P_{Cu}

$$P_{CuP} = R_P \cdot I_P^2$$

الضیاع في الملف الأولي:

$$P_{CuS} = R_S \cdot I_S^2$$

الضیاع في الملف الثانوي:

الضیاع النحاسي الكلي في المحولة:

$$P_{Cu} = P_{CuP} + P_{CuS} = R_P \cdot I_P^2 + R_S \cdot I_S^2$$

الضیاعات:

2. الضیاعات الثابتة الحديدية (المغناطيسية): P_{Fe}

لا تتعلق هذه الضیاعات بتيار الحمولة وإنما بالتحريض المغناطيسي في القلب الحديدي، وبمربع التردد، وبوزن القلب المغناطيسي. وتنشأ هذه الضیاعات بفعل التيارات الاعصارية داخل القلب المغناطيسي وبفعل البطء والإشباع المغناطيسي:

$$\sum P = P_{Cu} + P_{Fe}$$

$$P_{Fe} \approx B^2 \approx E^2 \approx V^2$$

3. الضیاعات الكلية في المحولة:

تعطى الضیاعات الكلية في المحولة كمجموع الضیاعات النحاسية والحديدية، أي:

تعرف نسبة التحميل للمحولة بالعلاقة:

$$I_S^* = \frac{I_S}{I_{Sn}}$$

المردود:

$$\eta = \frac{P_{Cu}}{P_P} = \frac{P_{Cu}}{P_{Cu} + \sum P} = \frac{P_P - \sum P}{P_P} = 1 - \frac{\sum P}{P_P} = 1 - \frac{\sum P}{P_{Cu} + \sum P}$$

يعرف المردود بأنه نسبة الاستطاعة المفيدة المستجرة من الملف الثانوي للمحولة إلى الاستطاعة المقدمة للمحولة من الشبكة P_P

1. محولة كهربائية احادية الطور توتراتها $V 400/6600$ ، عدد لفات ملف التوتر المنخفض 70 لفة. أوجد القيمة الأعظمية للفيض المغناطيسي في النواة إذا كان تردد التغذية 50 Hz ، ومساحة مقطع القلب المغناطيسي إذا كان التحريض الأعظمي المسموح به 0.7 [T] .

2. محولة كهربائية عدد لفاتها ملفها الأولي 900 [Turn] وملفها الثانوي 30 [Turn] . غدينا ملفها الأولي بجهد مقداره 180 [V] ووصلنا ملفها الثانوي مع حمولة مقاومتها الأومية $R_L = 2 \text{ [\Omega]}$. المطلوب:

أ. احسب جهد الملف الثانوي، ونسبة التحويل.

ب. احسب قيم التيارات المارة في الملفين الأولي والثانوي.

ج. احسب استطاعة المحولة.

د. احسب مساحة مقطع أسلاك الملفين الأولي والثانوي بفرض أن النواقل نحاسية، وان كثافة التيار متساوية في الملفين وتبلغ $2.5 \text{ [A/mm}^2]$.

