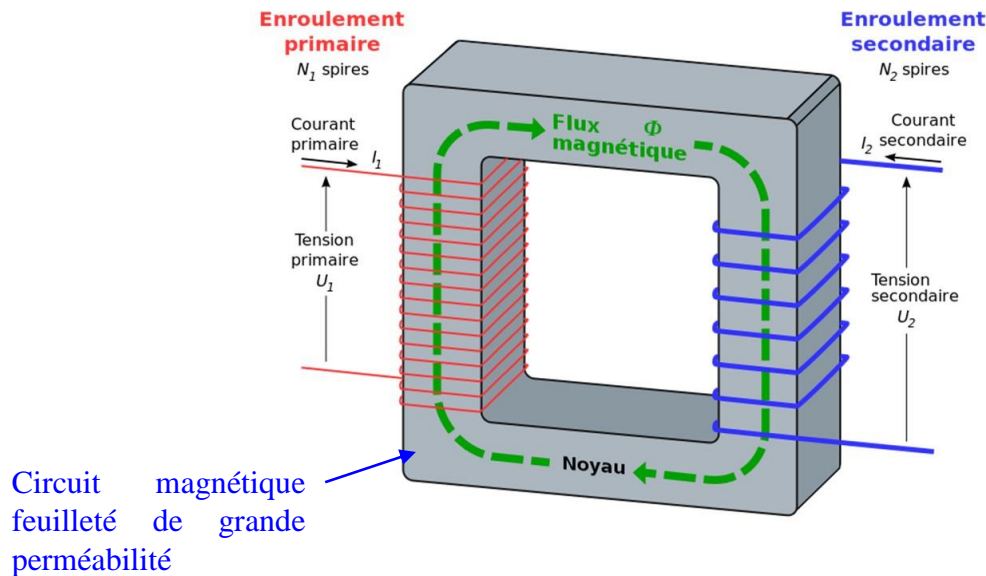


Les transformateurs monophasés

Un transformateur électrique est une machine électrique qui permet de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, sans modifier la forme ou la fréquence. Le rendement de transformation est excellent.

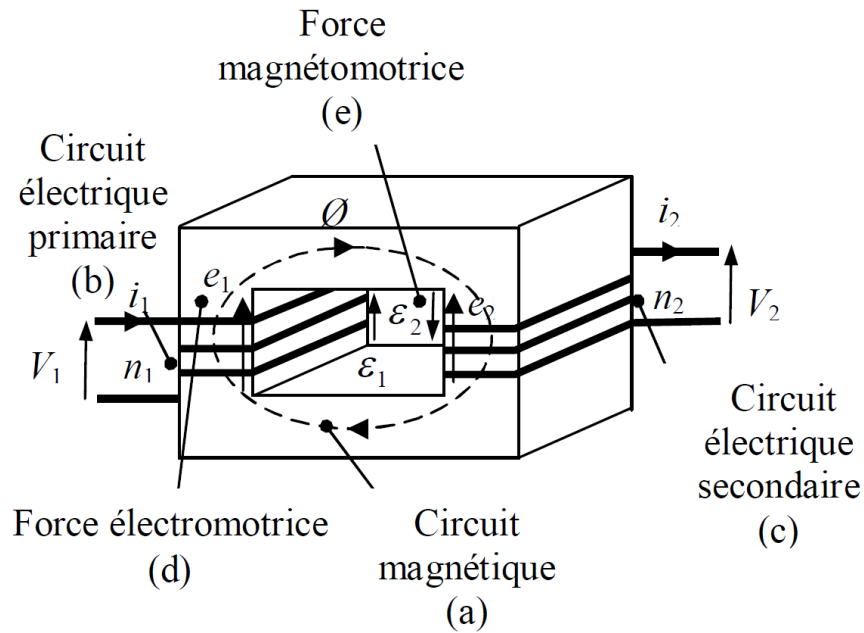


« Transformateur monophasé » original téléversé par BillC sur Wikipedia français

On distingue les transformateurs statiques et les commutatrices :

- Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur.
- Dans une commutatrice,

I. Le transformateur parfait



- e_1, e_2 : (f.e.m) forces électromotrices ;
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: (f.m.m) forces magnétomotrices.

On désigne par un transformateur parfait lorsqu'il possède les caractéristiques suivantes :

Les courants de Foucault sont des courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ils sont une conséquence de l'induction électromagnétique. Ces courants sont responsables d'une partie des pertes (pertes par courants de Foucault) dans les circuits magnétiques des machines électriques alternatives et des transformateurs. C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques sont feuilletés afin de limiter ces courants et les pertes par effet Joule, ce qui améliore ainsi le rendement global des transformateurs. Les pertes par courant de Foucault sont liées directement à la variation temporelle du champ magnétique :

Les pertes par hystérésis sont liées au changement de direction permanent du flux qui oblige le fer à se réorienter lui aussi en permanence, cela ne se fait pas sans frottement ce qui crée ces pertes. Elles sont minimisées par l'utilisation d'un matériau ferromagnétique doux. En effet, elles sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis, celui-ci doit donc être le plus étroit possible, d'où les matériaux doux. Ces pertes sont de plus proportionnelles à la fréquence et à la nature des matériaux :

I.1. Schéma équivalent

Un transformateur parfait sera représenté par le schéma suivant :

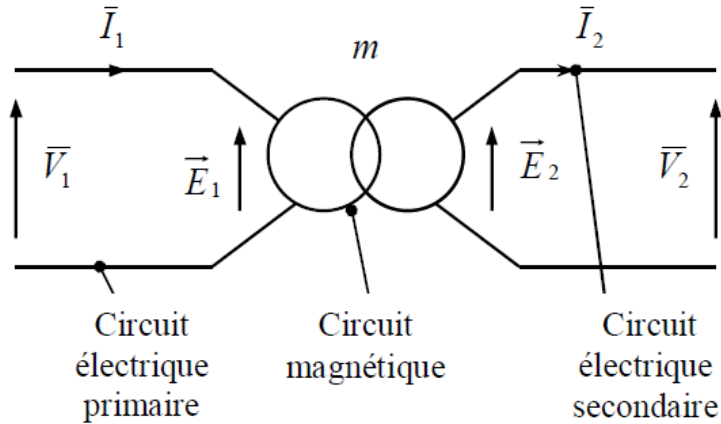


Schéma équivalent d'un transformateur parfait

La loi de Faraday : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$

Puisque l'induction magnétique est uniforme dans le circuit magnétique ($B_1 = B_2 = B$), et le flux élémentaire dans une spire $\Phi_1 = \frac{B_1}{S}$ et $\Phi_2 = \frac{B_2}{S}$ alors $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$

Si on considère le flux sous sa forme mathématique : $\Phi = \Phi_0 \cdot e^{j\omega t}$

$$\text{On a } \bar{V}_1 = jn_1\omega \cdot \bar{\Phi} \quad \text{et} \quad \bar{V}_2 = jn_2\omega \cdot \bar{\Phi}$$

On désigne par m le rapport de transformation et le signe (-) par un déphasage de π entre les vecteurs tensions \bar{V}_1 et \bar{V}_2 .

si

Remarque : pour qu'il y ait "transformation", il faut que le flux soit variable en fonction du temps, soit, par exemple, un flux sinusoïdal tel que $\frac{d\Phi}{dt} \neq 0$.

I.2. Equation aux intensités :

Théorème d'Ampère (Relation d'Hopkinson)

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \sum nI = \mathfrak{R} \phi \Rightarrow \int H dl = n_1 i_1 + n_2 i_2$$

Le nombre d'Ampère-tours sera égal à la somme des forces magnétomotrices "f.m.m". Lorsque la perméabilité du circuit magnétique μ_r étant infinie, la réluctance \mathfrak{R} est nulle. Ce qui implique :

$$n_1 \cdot l_1 = - n_2 \cdot l_2$$

I.3. Propriétés des transformateurs parfaits

I.3.1. Equivalence des puissances

- **Puissance active :** $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$

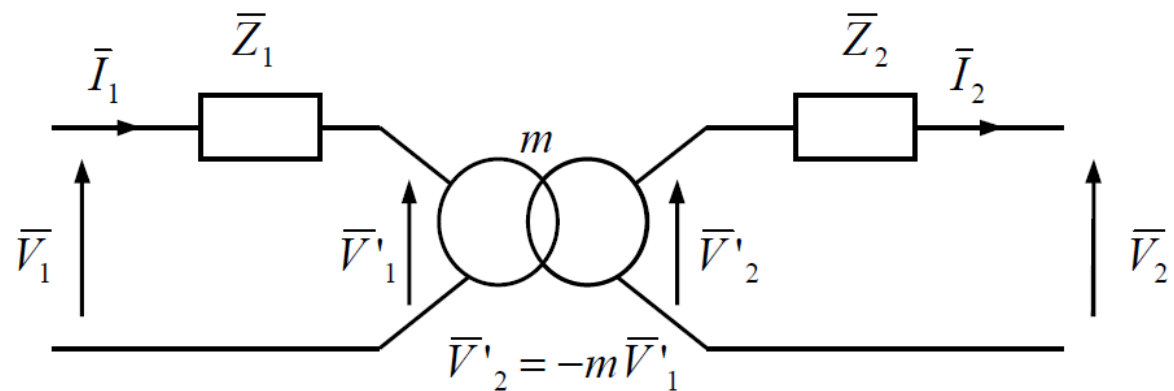
- **Puissance réactive :** $Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1$

- **Puissance apparente :** $S_1 = V_1 I_1$

I.3.2. Impédance ramenée

Soient, \bar{Z}_1 l'impédance complexe du premier enroulement et \bar{Z}_2 l'impédance complexe du second enroulement.

Fig.3.4. Schéma équivalent



La loi de Faraday donne la relation $\bar{V}'_2 = -m\bar{V}'_1$ et le théorème d'Ampère fait apparaître la relation $\bar{I}_1 = -m\bar{I}_2$.

I.3.2.1. Impédance ramenée au secondaire

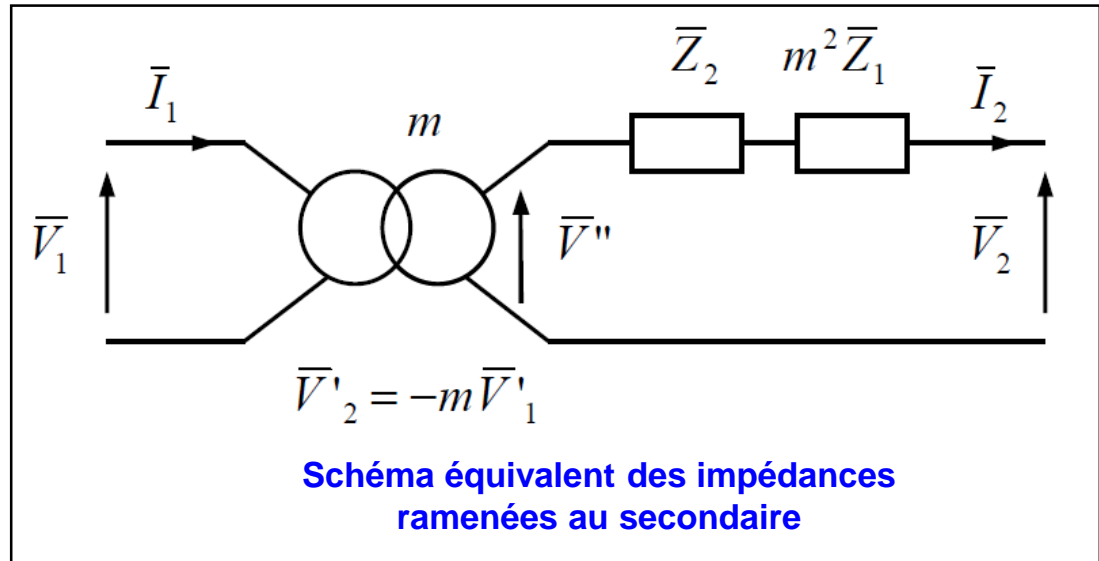
On a les relations suivantes :

$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}'_1 \quad (1)$$

$$\bar{V}'_2 = \bar{V}_2 + \bar{Z}_2 \bar{I}_2 \quad (2)$$

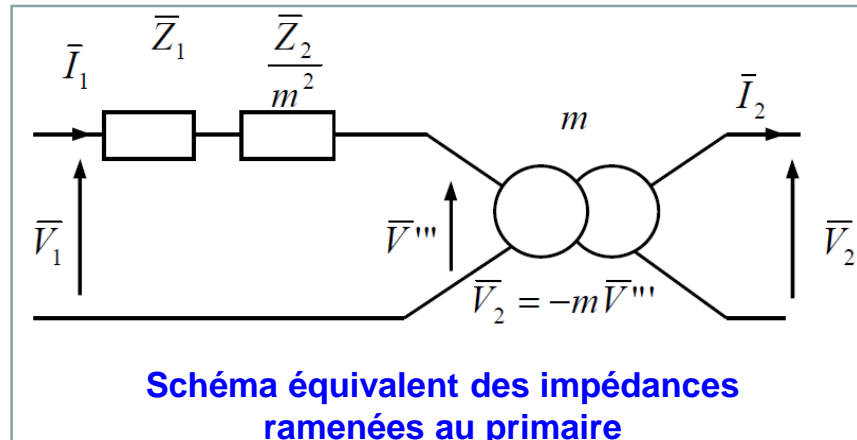
$$\bar{V}'_2 = -m \bar{V}'_1 \quad (3)$$

$$\bar{I}_1 = -m \bar{I}_2 \quad (4)$$



I.3.2.2. Impédance ramenée au primaire

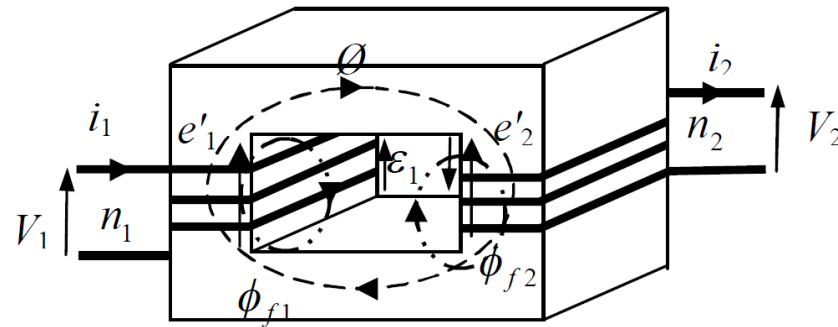
On a les relations suivantes : (1), (2), (3) et (4)



I.3.2.3. Exemple

Soient les impédances complexes $Z_1 = r_1 + j.X_1$ et $Z_2 = r_2 + j.X_2$ respectivement de l'entrée et de la sortie. Déterminez les impédances ramenées (formes algébriques et polaires).

II. Le transformateur monophasé réel



e'_1, e'_2 les forces électromotrices (f.e.m), telles que $e'_1 = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_{f1}}{dt}$ (avec la

convention récepteur) et $e'_2 = -n_2 \frac{d\phi_2}{dt} - \frac{d\phi_{f2}}{dt}$ (avec la convention générateur).

ψ_1, ψ_2 les flux totaux respectivement au primaire et au secondaire.

II.1. Equation aux tensions

Chaque enroulement admet son propre résistance, telles que r_1 la résistance du premier enroulement et r_2 a résistance du second enroulement.

II.1.1. L'enroulement primaire

Les écritures instantanées des f.e.m sont les suivantes :

$$V_1 = e'_1 + r_1 i_1 \quad (8)$$

$$e'_1 = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_{f1}}{dt} \text{ avec la convention du récepteur} \quad (9)$$

On pose $\frac{d\psi_1}{dt} = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_{f1}}{dt}$, $n_1 \frac{d\phi_1}{dt} = n_1 \frac{d\phi}{dt} = -e_1$ et $\frac{d\phi_{f1}}{dt} = l_1 \frac{di_1}{dt}$ ce qui implique

$$V_1 = -e_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 \quad (10)$$

L'écriture complexe serait : $\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1 + r_1 \bar{I}_1 \quad (11)$

II.1.2. L'enroulement secondaire

Les écritures instantanées des f.e.m sont les suivantes :

$$V_2 = e'_2 - r_2 i_2 \quad (12)$$

$$e'_2 = -n_2 \frac{d\phi_2}{dt} - \frac{d\phi_{f2}}{dt} \text{ avec la convention du générateur} \quad (13)$$

On pose $\frac{d\psi_2}{dt} = n_2 \frac{d\phi_2}{dt} + \frac{d\phi_{f2}}{dt}$, $-n_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -n_2 \frac{d\phi}{dt} = e_2$ et $\frac{d\phi_{f2}}{dt} = l_2 \frac{di_2}{dt}$ ce qui

implique $V_2 = e_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} - r_2 i_2 \quad (14)$

L'écriture complexe serait : $\bar{E}_2 = \bar{V}_2 + j l_2 \omega \bar{I}_2 + r_2 \bar{I}_2 \quad (15)$

II.2. Equation des Ampère-tours

$\oint_C \vec{H} \vec{dl} = \sum nI = R \phi \Rightarrow n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = \bar{\phi} \int \frac{dl}{S\mu_a}$ alors $n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = \bar{\phi} R \neq 0$, puisque la

réductance du fer est non nulle.

On suppose que les ferromagnétiques sont localisées au primaires, alors on peut estimer que $\bar{\phi} R = n_1 \bar{I}_{10}$, avec \bar{I}_{10} est le courant complexe de fuit au primaire.

$$n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = n_1 \bar{I}_{10} \quad (16)$$

On divise l'équation (16) par le rapport de transformation m , ce qui implique $\bar{I}_1 + m\bar{I}_2 = \bar{I}_{10}$, avec $\bar{I}'_1 = m\bar{I}_2$, d'où $\bar{I}_1 - \bar{I}'_1 = \bar{I}_{10}$

II.3.1. Schéma équivalent

I_{10} est le courant de fuite dans la réluctance, qui est l'association électrique de deux composantes, une résistance désigné par R_f et une inductance nommée X_μ , telles que ces deux derniers termes font l'objet d'une impédance magnétisante fictive. On a les relations ci-dessous des tensions et des courants, qui font l'objet du schéma équivalent un transformateur parfait.

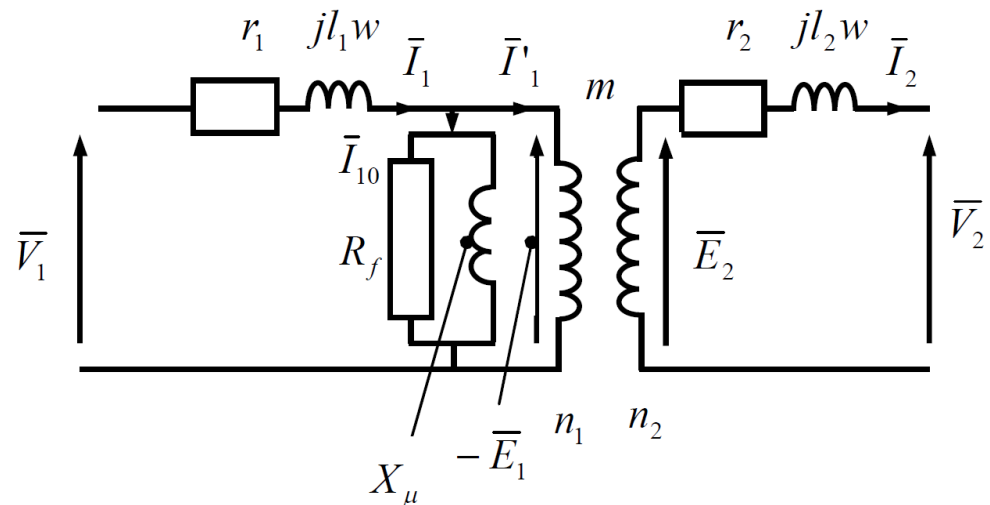


Schéma équivalent d'un transformateur réel

II.3.1. Etude avec l'hypothèse de Kapp

Cette hypothèse consiste à négliger I_{10} à vide devant le courant de charge, ce qui revient à supposer que le circuit à une réluctance nulle, $R = \frac{L}{S \cdot \mu_a} = \frac{L}{S \cdot \mu_0 \cdot \mu_{r_{fer}}} \rightarrow 0$.

Cette hypothèse permet d'éliminer dans le schéma l'impédance fictive magnétisante Z_m , telle qu'elle est l'association d'une résistance R_f et d'une inductance X_μ en parallèle.

Etude des pertes

La puissance absorbée est la somme de la puissance utile plus les pertes.

$$P_1 = P_2 + \sum \text{pertes} \text{ avec } \sum \text{pertes} = P_{1j} + P_{2j} + P_{10} = P_j + P_{10}$$

Les pertes dans le cuivre

Rendement

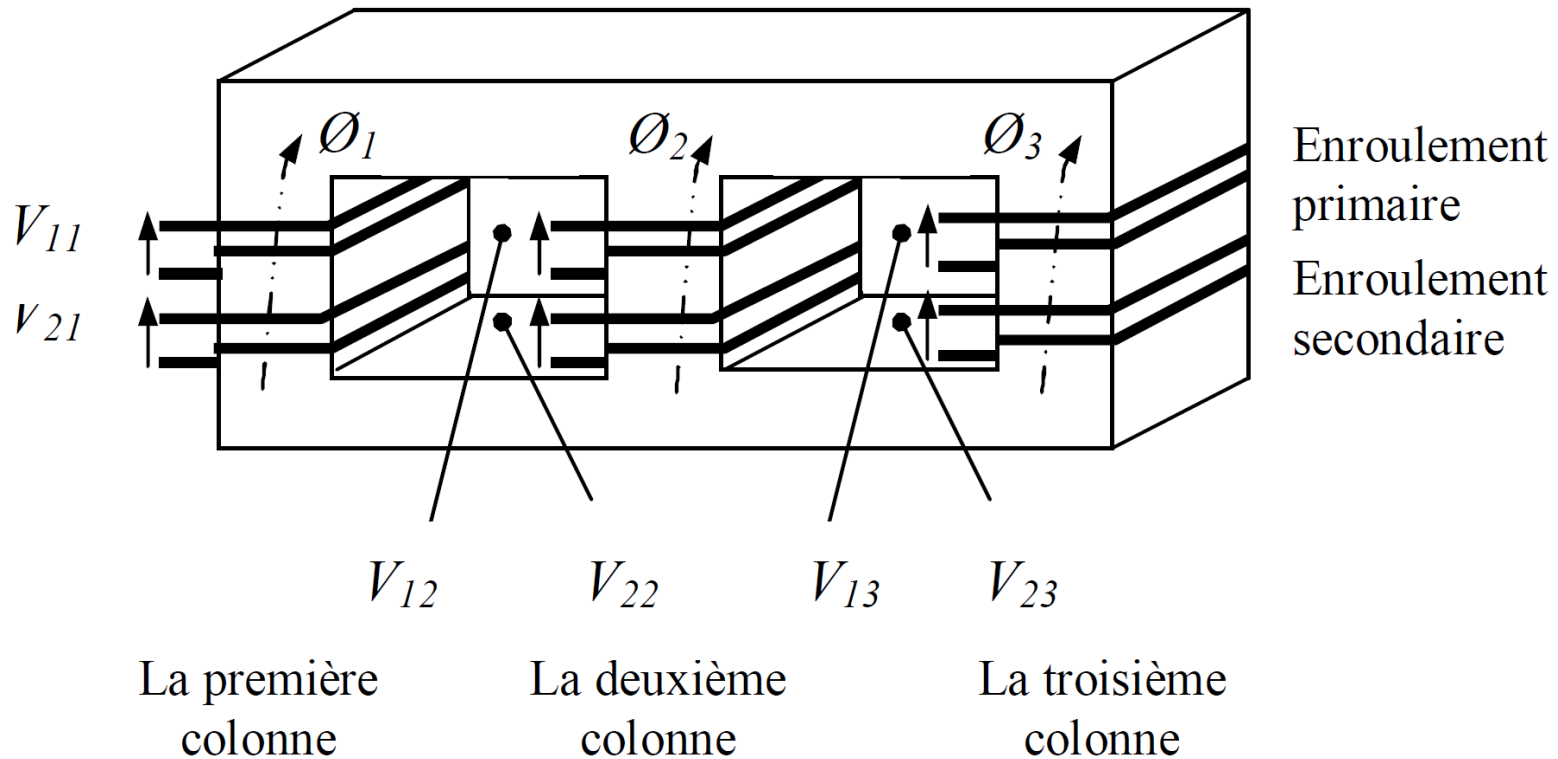
Étude du rendement maximal

Bilan des puissances

Transformateur en triphasé

Le transformateur triphasé est composé de deux circuits :

- un circuit magnétique (la culasse).
- un circuit électrique comportant trois enroulements primaires et trois secondaires.



Symbol et orientation

- a.** Les symboles en majuscule correspondent au mode de câblage des enroulements primaires.

Prenant les exemples suivants :

Y : Couple en étoile.

Δ : Couplage en triangle.

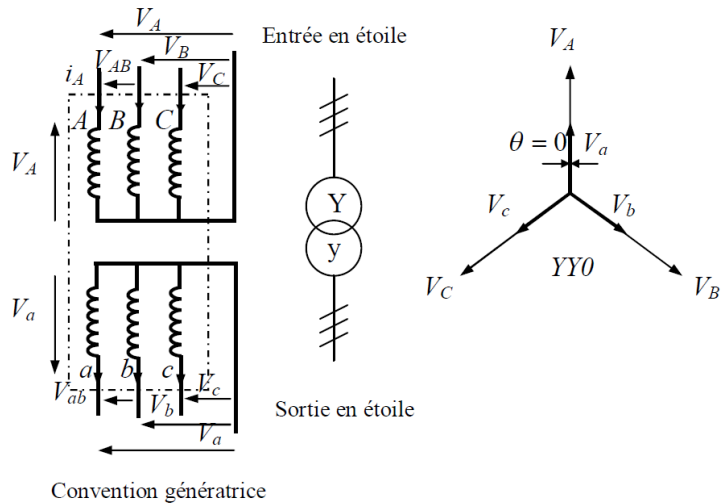
- b.** Les symboles en minuscule correspondent au mode de câblage des enroulements secondaires.

Citant les exemples suivants :

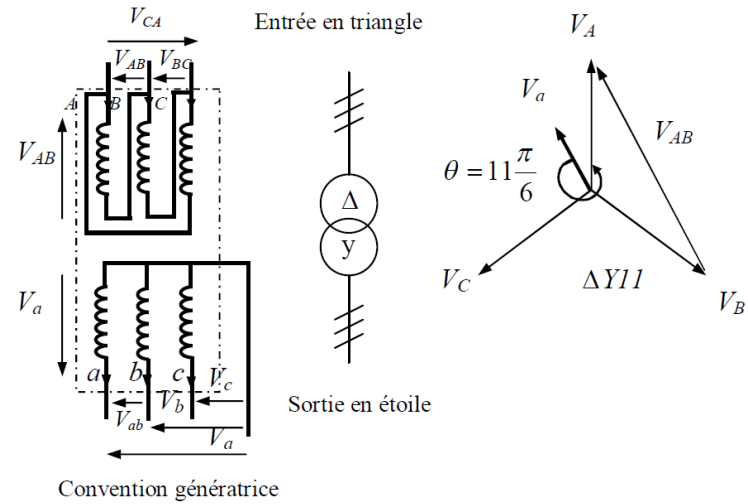
y : Couple en étoile.

d : Couplage en triangle.

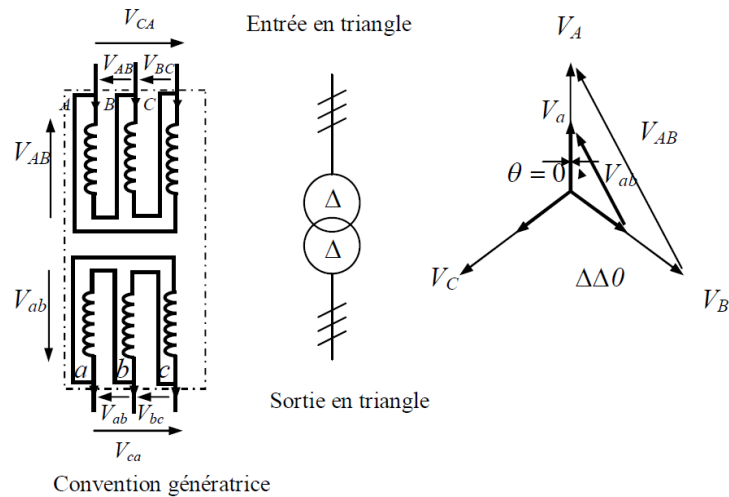
Transformateur étoile-étoile



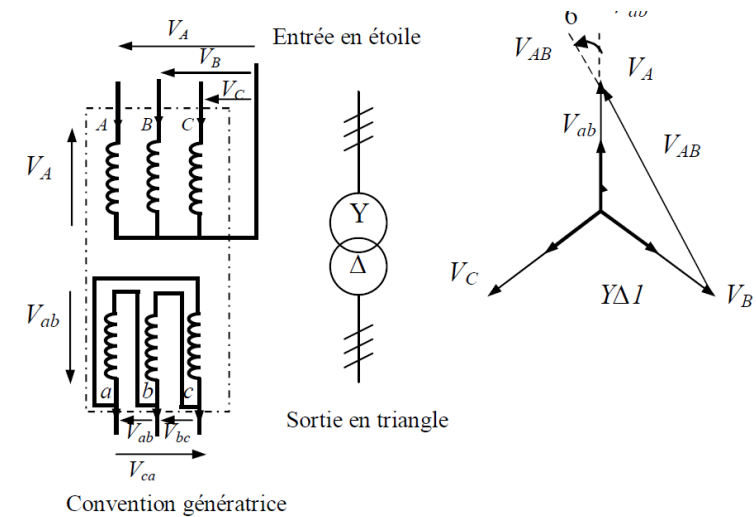
Transformateur triangle-étoile



Transformateur triangle-triangle



Transformateur étoile-triangle



Exercices d'application

1/ Le primaire d'un transformateur parfait, de rapport de transformation $m=0,4$, est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace 220V et de fréquence 50Hz. Le secondaire alimente une bobine de résistance 10Ω et d'inductance 0,03 H.

Calculer les différentes puissances fournies au secondaire.

2/ On branche successivement aux bornes du secondaire d'un transformateur parfait, de rapport de transformation $m = 2$, une résistance de 10Ω , une inductance 1 H et une capacité de $1 \mu\text{F}$. Calculer dans chaque cas la valeur de l'impédance ramenée au primaire.

3/ Le rapport de transformation d'un transformateur parfait est égal à $0,127$. Calculer la valeur efficace de la tension secondaire lorsque le primaire est alimenté sous 220V , 50Hz . L'enroulement secondaire comportent 30 spires quel est le nombre de spires au primaire?

En charge, le primaire absorbe une intensité efficace de $0,5 \text{ A}$. Calculer la valeur efficace du courant secondaire.

4/ La mesure des valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire d'un transformateur parfait a donné : $U_1 = 220V$; $U_2 = 24V$

Calculez :

a- Calculez le rapport de transformation;

b- le nombre de spires du secondaire si le primaire en comporte 1030

Le secondaire débite 2,5A dans une charge inductive de facteur de puissance égal à 0,8. Calculez l'intensité efficace du courant primaire et les différentes puissances du primaire et du secondaire.

5/ Dans le circuit magnétique d'un transformateur parfait, dont l'aire de la section droite vaut $39,6\text{cm}^2$, règne un champ maximum de 1 Tesla, à la fréquence de 50Hz. Les enroulements comportent 250spires au primaire et 28 au secondaire.

Calculer :

a- le rapport de transformation

b- Les valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire

Le secondaire débite dans un récepteur de résistance $12\ \Omega$. Calculer les intensités efficaces des courants secondaire et primaire et la puissance apparente du transformateur.

EXERCICE N° 1 :

Un circuit magnétique est réalisé par un empilement d'anneaux de tôles de rayon moyen $R = 15\text{cm}$. La section du circuit magnétique est un carré de 3 cm de côté. La courbe de magnétisation normale a donné les résultats suivants :

<i>H</i>	œrsted	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	4	8
<i>B</i>	Kilogauss	4,5	5,5	6	6,4	6,7	7,5	7,9	8,2	8,4
μ_r		45 000	27 500	20 000	16 000	13 400	7 500	3 950	2 050	1 050

N. B. $1 \text{ A/m} = 4\pi 10^{-3} \text{ œrsted}$

$1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ tesla}$

Soit 500 spires jointives sont bobinées sur le circuit.

On supposera le matériau primitivement désaimanté. On demande :

1. Quelle est la force magnétomotrice nécessaire pour établir un flux de $6 \cdot 10^{-4}$ weber ?
2. Quel est le courant nécessaire pour obtenir une induction égale à 0,75 T ?
3. Quelle est l'induction correspondante pour un courant de 20 mA ?

EXERCICE N° 2 :

On dispose d'un transformateur monophasé de distribution $S = 120 \text{ KVA}$, $15 \text{ KV} / 220 \text{ V}$, pour une fréquence de 50 Hz .

Pour un essai à vide sous une tension nominale $U_{20} = 228 \text{ V}$, $I_{10} = 0,5 \text{ A}$ et $P_{10} = 600 \text{ W}$.

L'essai en court-circuit sous une tension réduite a donné :

$$U_{1cc} = 485 \text{ V} , \quad I_{2cc} = 820 \text{ A} , \quad P_{1cc} = 3100 \text{ W}$$

1. Sachant que la section nette du noyau est de section 160 cm^2 et que l'induction maximale $B_{\max} = 1,147 \text{ T}$. Déduire alors les nombres de spires au primaire et au secondaire.
2. Pour le fonctionnement à vide, déterminer le facteur de puissance $\cos \varphi_{10}$, la puissance magnétisante Q_{10}