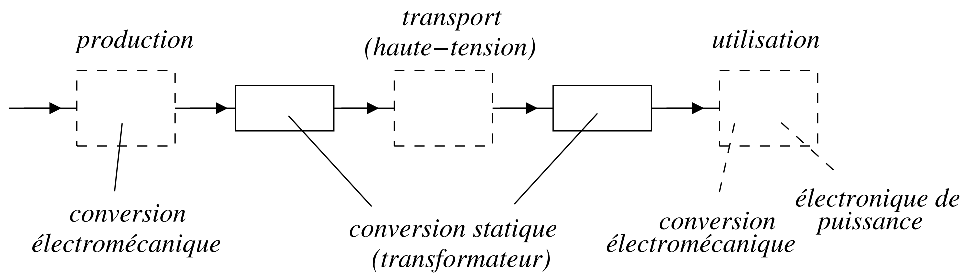
Lycée Naval, Spé 2.
Conversion de puissance.
01. Puissance électrique en régime sinusoïdal
02. Transformateur

Puissance électrique en régime sinusoïdal. Transformateur.

1 Nécessité de la conversion de puissance

L'énergie électrique n'est pas nécessairement produite là où elle est consommée. Il faut en général considérer l'enchaînement : production, transport, utilisation.



La production d'électricité résulte souvent d'une conversion électromécanique (phénomène d'induction) : ainsi, une turbine Pelton, mise en rotation par l'eau d'un barrage, entraîne un rotor constitué d'un électroaimant. Les enroulements du stator sont le siège de courants induits générés par les variations du flux magnétique.

Pour limiter les pertes dans les conducteurs, on est amené à élever la tension lors du transport (lignes haute-tension de 225 à 400 kV) puis à l'abaisser avant son utilisation. Cette conversion statique de puissance est effectuée à l'aide de transformateurs.

Pour un TGV, l'énergie électrique alimente un moteur (conversion électromécanique) ; les progrès de l'électronique de puissance ont permis de passer des moteurs à courant continu, aux moteurs synchrones puis aux moteurs asynchrones. Plus généralement, l'électronique de puissance permet d'adapter les différentes sources d'énergie à leur utilisation.

Ce chapitre d'introduction s'intéresse à la puissance en régime sinusoïdal et présente le modèle du transformateur idéal. La conversion électromécanique sera abordée dans le deuxième chapitre, les dispositifs liés à l'électronique de puissance seront étudiés dans le troisième chapitre.

2 Puissance électrique en régime sinusoïdal

2.1 Prérequis

Valeurs instantanée, moyenne et efficace

Pour un signal périodique $s(t)$ de période T, on définit :

→ la grandeur instantanée $s(t)$,

→ la valeur moyenne $\langle s\rangle = \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} s(t)dt$

→ la valeur efficace $S_{\text{eff}} = \sqrt{< s^2 >} = \sqrt{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t)dt}$

Application à un signal sinusoïdal :

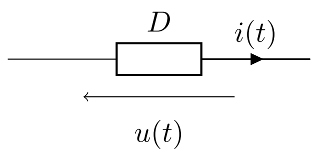
→ la grandeur instantanée s'écrit $s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi)$, avec S_m l'amplitude, $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ la pulsation et φ la phase à l'origine.

→ la valeur moyenne est bien évidemment nulle $\langle s(t)\rangle = 0$

→ la valeur efficace vaut $\boxed{S_{\text{eff}} = \dfrac{S_m}{\sqrt{2}}}$, c'est cette grandeur qu'un multimètre affiche en mode ∼.

Impédance et admittance complexes

Soit un dipôle linéaire D soumis à une tension $u(t) = U_m \cos(\omega t)$ et parcouru par un courant d'intensité $i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ en convention récepteur.



On définit l'impédance complexe du dipôle $\underline{Z} = \dfrac{\underline{U}}{\underline{I}}$ de module $|\underline{Z}| = U_m/I_m$ et d'argument $\arg \underline{Z} = -\varphi$.

Il est toujours possible d'écrire ce nombre complexe : $\underline{Z} = R + jX$, avec :
- R la résistance du dipôle,
- X la **réactance** du dipôle.

On définit enfin l'admittance complexe $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$.

Puissance instantanée

Pour un dipôle en convention récepteur, on définit la puissance électrique instantanée reçue par ce dipôle :

$$p(t) = u(t) \times i(t)$$

2.2 Puissance moyenne en régime sinusoïdal

On s'intéresse à la puissance moyenne reçue par un dipôle dans le cas d'un régime sinusoïdal.

Expressions

→ à l'aide des grandeurs efficaces :

La puissance moyenne reçue par un dipôle en régime sinusoïdal est :

$$P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos\varphi$$

$\cos\varphi$ est appelé, **facteur de puissance** ; φ représentant le déphasage du courant par rapport à la tension.

→ à l'aide de l'impédance ou l'admittance complexes :

La puissance moyenne reçue par un dipôle en régime sinusoïdal est :

$$P = \mathcal{R}_e(\underline{Z}) I_{\text{eff}}^2 = \mathcal{R}_e(\underline{Y}) U_{\text{eff}}^2$$

Démonstration :

On part de la définition de la puissance moyenne :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \cos(\omega t) I_m \cos(\omega t + \varphi) dt$$

$$P = U_m I_m \times \frac{1}{T} \int_0^T \left[\cos^2(\omega t)\cos(\varphi) - \cos(\omega t)\sin(\omega t)\sin\varphi\right] dt = \frac{U_m I_m}{2}\cos\varphi$$

avec $U_m = U_{\text{eff}}\sqrt{2}$ et $I_m = I_{\text{eff}}\sqrt{2}$, on obtient $P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos\varphi$.

De plus $\underline{Z} = \frac{\underline{U_m}}{\underline{I_m}} = \frac{U_m}{I_m} e^{-j\varphi}$, donc $\mathcal{R}_e(\underline{Z}) = \frac{U_m}{I_m}\cos\varphi = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}\cos\varphi$, c'est à dire $U_{\text{eff}}\cos\varphi = \mathcal{R}_e(\underline{Z}) I_{\text{eff}}$, ce qui fournit la deuxième formule.

De même $\underline{Y} = \frac{\underline{I_m}}{\underline{U_m}} = \frac{I_m}{U_m} e^{j\varphi}$, donc $\mathcal{R}_e(\underline{Y}) = \frac{I_m}{U_m}\cos\varphi = \frac{I_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}}\cos\varphi$, c'est à dire $I_{\text{eff}}\cos\varphi = \mathcal{R}_e(\underline{Y}) U_{\text{eff}}$, ce qui fournit la dernière formule.

2.3 Puissance moyenne reçue par les dipôles classiques

Le conducteur ohmique : $\underline{Z} = R$, $u(t)$ et $i(t)$ sont en phase, donc :

$$P = RI_{\text{eff}}^2$$

La bobine : $\underline{Z} = jL\omega$, $u(t)$ et $i(t)$ sont en quadrature :

$$P = 0$$

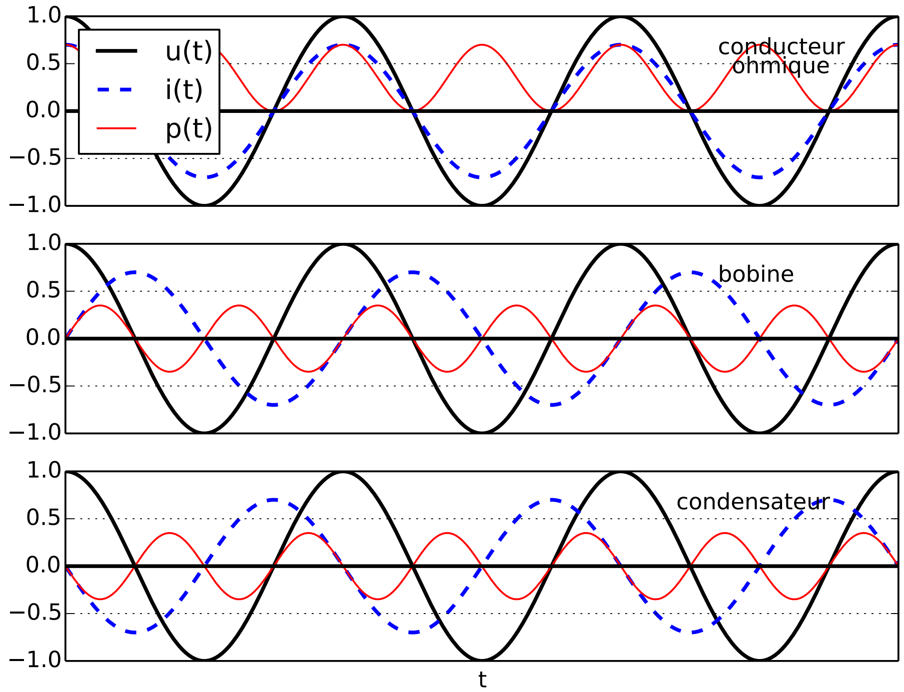
Le condensateur : $\underline{Z} = 1/(jC\omega)$, $u(t)$ et $i(t)$ sont en quadrature :

$$P = 0$$

La puissance instantanée reçue par une bobine ou un condensateur est en général non nulle. Cependant, en moyenne sur une période, l'énergie accumulée sous forme magnétique ou électrique est restituée.

Très généralement, un dipôle purement réactif $\underline{Z} = jX$ ne consomme aucune puissance en moyenne.

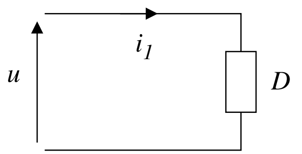
Le tracé des courbes donnant l'intensité et la tension au cours du temps permet de comprendre comment le déphasage influe sur la valeur de la puissance moyenne.



2.4 Application : relèvement du facteur de puissance

On considère une installation industrielle modélisée par un dipôle D d'impédance $Z = R + jX$, de réactance $X > 0$, ce qui modélise une installation inductive.

De son côté le fournisseur apporte la puissance nécessaire et garantit la tension aux bornes de l'installation de l'utilisateur.



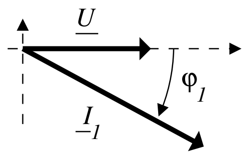


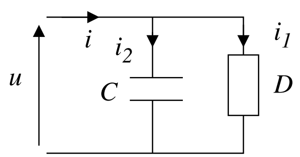
diagramme de Fresnel

La puissance moyenne consommée par l'installation vaut : $P = U_{\text{eff}} I_{1,\text{eff}} \cos\varphi_1$.

D'après cette formule, on constate qu'à puissance moyenne consommée fixée et à tension garantie, le courant appelé est d'autant plus important que le facteur de puissance est faible.

Une intensité appelée plus importante augmente les pertes en ligne lors de l'acheminement et provoque une chute de tension en ligne. Le fournisseur d'électricité impose donc une valeur minimale pour le facteur de puissance (en pratique $\cos\varphi \geq 0,9$).

Le relèvement du facteur de puissance est réalisé en plaçant un condensateur en parallèle sur l'installation. Ceci se comprend aisément à l'aide d'un diagramme de Fresnel :



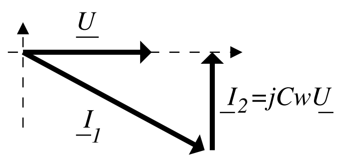


diagramme de Fresnel

Le choix d'un condensateur adapté permet de ramener l'intensité i en phase avec la tension, ce qui impose :

$$I_{1,\text{eff}}\,|\sin\varphi_1| = C\omega U_{\text{eff}}$$

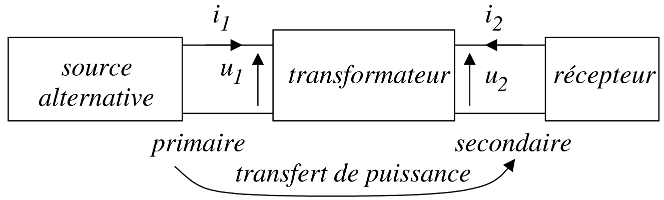
avec $I_{1,\text{eff}} = \dfrac{P}{U_{\text{eff}}\cos\varphi_1}$, on en déduit :

$$\frac{P}{U_{\text{eff}}}\,|\tan\varphi_1| = C\omega U_{\text{eff}} \quad\Rightarrow\quad C = \frac{P}{\omega U_{\text{eff}}^2}\,|\tan\varphi_1|$$

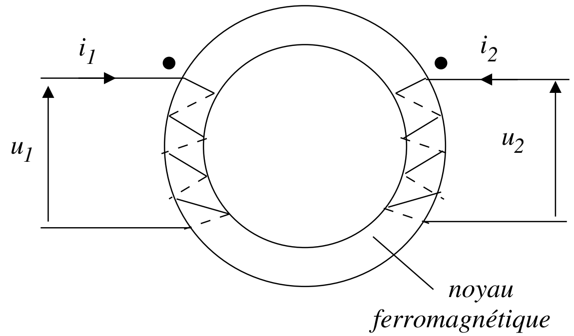
3 Le transformateur

3.1 Principe

Un transformateur est un convertisseur d'énergie électrique. Il transfère, **en alternatif**, de la puissance électrique d'une source placée au primaire à une charge placée dans le circuit secondaire.



3.2 Réalisation pratique



Deux circuits conducteurs, galvaniquement isolés, sont bobinés sur un noyau torique constitué d'un matériau ferromagnétique. Le circuit d'entrée est appelé *primaire*, il est constitué de N_1 spires, le circuit de sortie est appelé *secondaire*, il est constitué de N_2 spires.

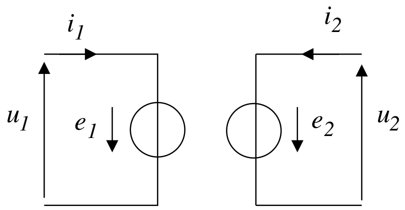
Un courant variable au primaire génère un champ magnétique variable au sein du noyau qui canalise les lignes de champ. Il apparaît au secondaire un flux magnétique variable et donc une force électromotrice.
Le primaire et le secondaire sont couplés *via* le noyau.

3.3 Modèle du transformateur idéal

On suppose que le matériau est linéaire, isotrope et homogène, que la canalisation des lignes de champ est parfaite et on néglige l'ensemble des pertes.
On fait enfin l'hypothèse d'une perméabilité relative μ_r infinie.

Loi de transformation des tensions

En négligeant les résistances des enroulements, le circuit équivalent au transformateur est le suivant :



Le noyau ferromagnétique se comportant comme un tube de champ, $\mathrm{div}\vec{B} = 0$ assure que le flux du champ magnétique est le même à travers toute section droite du transformateur. En conséquence :

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(N_1 B(t) S\right) = -N_1 S\frac{dB(t)}{dt} \quad \text{et} \quad e_2 = -N_2 S\frac{dB(t)}{dt}$$

Pour un régime variable, $\dfrac{dB(t)}{dt}$ est non nul et on en déduit :

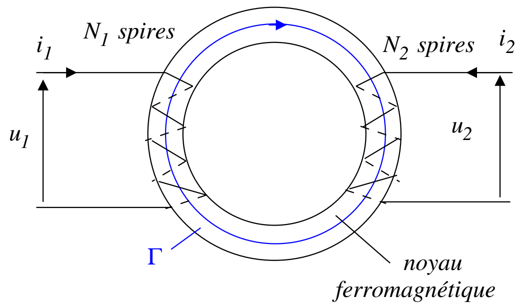
$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{N_2}{N_1}$$

En régime alternatif, les tensions au primaire et au secondaire sont reliées par le rapport de transformation m :

$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Un rapport de transformation adapté permet donc d'abaisser ou d'élever la tension.

Loi de transformation des courants



On applique le théorème d'Ampère au contour Γ fermé et orienté de rayon R ; compte tenu des orientations, on obtient :

$$\oint_\Gamma \vec{H}.\vec{dl} = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad \Rightarrow \quad 2\pi R \times H = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

Pour un matériau linéaire $B = \mu_0 \mu_r H$, on a donc :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \frac{B \times 2\pi R}{\mu_0 \mu_r}$$

Dans l'hypothèse d'une perméabilité relative infinie, le membre de droite tend vers zéro, on obtient :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 \simeq 0$$

Pour un transformateur en charge, les intensités des courants au primaire et au secondaire sont reliées par le rapport de transformation m :

$$\frac{i_2(t)}{i_1(t)} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{m}$$

Remarque : la formule précédente n'est valable que si un courant est débité au secondaire.

Loi de transformation des puissances

La puissance électrique instantanée reçue par le transformateur est la somme des puissances reçues au primaire et au secondaire :

$$P = u_1 i_1 + u_2 i_2$$

Du fait des relations précédentes, cette puissance est nulle :

$$P = u_1 i_1 \left(1 + \frac{u_2}{u_1}\frac{i_2}{i_1}\right) = u_1 i_1 \left(1 + m \times \frac{-1}{m}\right) = 0$$

La puissance instantanée absorbée au primaire $p_1 = u_1 i_1$ est égale à la puissance cédée au secondaire $p_2 = -u_2 i_2$. **Le rendement d'un transformateur idéal est donc égal à 1**.

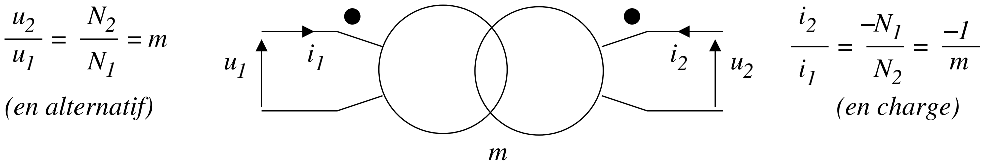
Cette relation s'explique simplement dans le modèle du transformateur idéal : absences de pertes, et perméabilité relative infinie (pas d'énergie électromagnétique stockée en volume).

En réalité, les pertes sont de différentes natures : pertes cuivre, pertes par courant de Foucault, pertes par hystérésis. En feuilletant la carcasse ferromagnétique on limite les courants de Foucault, en faisant le choix d'un matériau doux, on limite les pertes par hystérésis.

La minimisation des pertes permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 95% pour des puissances de l'ordre du kW et jusqu'à 99% pour les plus grosses unités, ce qui légitime le modèle du transformateur idéal.

Schéma normalisé du transformateur idéal

On obtient ainsi le modèle du transformateur idéal, symbolisé comme suit :



Sur cette représentation, on indique à l'aide de points (•), les **bornes homologues** ; ces bornes remplacent le tracé des bobinages, le courant doit arriver par ces bornes pour que les enroulements soient bien orientés et que les formules de transformation s'appliquent.

3.4 Applications

Transformateur élévateur de tension

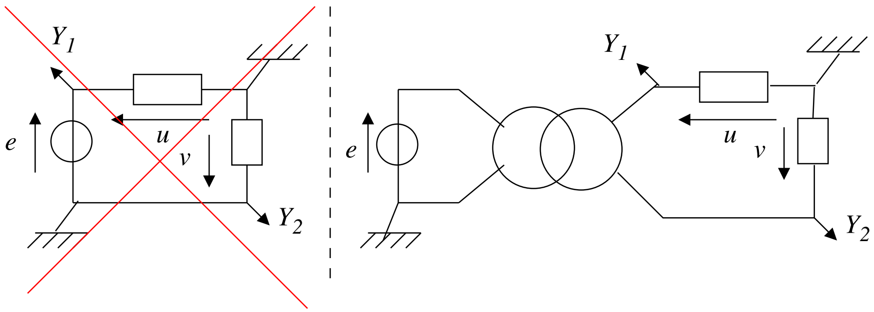
Les alternateurs des centrales électriques fournissent une tension sinusoïdale, de fréquence 50 Hz, d'une valeur efficace de l'ordre du kV.

Pour réduire les pertes en ligne lors du transport, il faut augmenter la tension afin de diminuer l'intensité I du courant et donc les pertes par effet Joule.

On utilise à cet effet deux étages de transformateurs qui portent la tension à 400 kV. À l'arrivée la tension est progressivement abaissée.

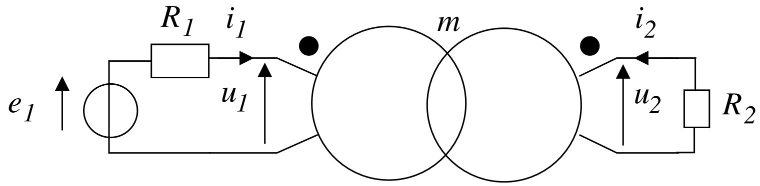
Transformateur d'isolement

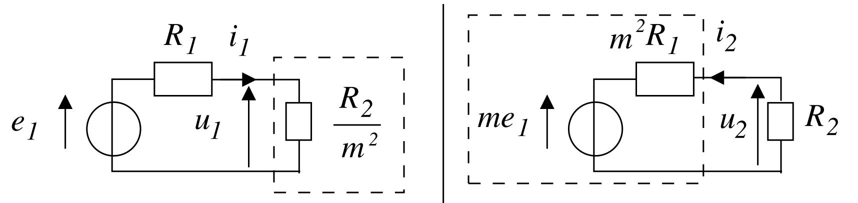
En cas de problème de masse dans un montage, on peut se servir d'un transformateur, le primaire et le secondaire étant galvaniquement isolés.



Transfert d'impédance

Il est possible de simplifier des circuits contenant des transformateurs en utilisant les règles de transfert d'impédance.





secondaire ramené au primaire | *primaire ramené au secondaire*

→ <u>Secondaire ramené au primaire</u> :

Avec $u_2 = mu_1$ et $i_2 = -i_1/m$, la relation $u_2 = -R_2 i_2$ peut se réécrire :

$$mu_1 = R_2 i_1/m \quad \Rightarrow \quad u_1 = \frac{R_2}{m^2} \times i_1$$

Vu du primaire, l'ensemble {transformateur + secondaire} est équivalent à un unique dipôle de résistance R_2/m^2.

→ <u>Primaire ramené au secondaire</u> :

De la même manière, la loi $e_1 = R_1 i_1 + u_1$ peut se réécrire :

$$e_1 = -R_1 m \times i_2 + u_2/m \quad \Rightarrow \quad me_1 = u_2 - R_1 m^2 \times i_2$$

Vu du secondaire, l'ensemble {transformateur + primaire} est équivalent à un dipôle de fem me_1 et de résistance $m^2 R_1$.

Capacités exigibles :

Puissance électrique en régime sinusoïdal :

→ Définir le facteur de puissance, faire le lien avec la représentation des tensions et des courants sur un diagramme de Fresnel.
Citer et exploiter la relation $P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos\varphi$.

→ Citer et exploiter les relations $P = \mathcal{R}_e(\underline{Z}) I_{\text{eff}}^2 = \mathcal{R}_e(\underline{Y}) U_{\text{eff}}^2$.
Justifier qu'un dipôle purement réactif n'absorbe aucune puissance en moyenne.

Transformateur :

→ Citer les hypothèses du transformateur idéal.
Établir les lois de transformation des tensions et des courants du transformateur idéal, en respectant l'algébrisation associée aux bornes homologues.

→ Relier le transfert instantané et parfait de puissance à une absence de pertes et à un stockage nul de l'énergie électromagnétique.

→ Citer les pertes cuivre, les pertes fer par courant de Foucault et par hystérésis.
Décrire des solutions permettant de réduire ces pertes.

→ Expliquer le rôle du transformateur pour l'isolement.
Établir le transfert d'impédance entre le primaire et le secondaire.
Expliquer l'intérêt du transport de l'énergie électrique à haute tension afin de réduire les pertes en ligne. Expliquer l'avantage d'un facteur de puissance élevé.
Mettre en œuvre un transformateur et étudier son rendement sur charge résistive.