Conversion de puissance

Conversion électromagnétique statique

Matériaux magnétiques

Aimantation

L'aimantation volumique $\vec{M}$ (ou aimantation) d'un milieu magnétique est définie par

$$\boxed{\mathrm{d}\vec{\mathcal{M}} = \vec{M}\,\mathrm{d}\tau},$$

où $\mathrm{d}\vec{\mathcal{M}}$ est le moment dipolaire magnétique du volume $\mathrm{d}\tau$.
Le champ magnétique $\vec{B}$ possède deux composante : une due à l'aimantation l'autre due à l'excitation magnétique «extérieure», caractérisée par le champ d'excitation magnétique $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 - \vec{M}$. On a

$$\vec{B} = \mu_0\left(\vec{H} + \vec{M}\right).$$

Équations locales

$$\mathrm{div}\,\vec{B} = 0\,; \quad \boxed{\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}\,; \quad \mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}\,; \quad \boxed{\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{H} = \vec{\jmath}},$$

où $\vec{\jmath}$ est le courant volumique de conduction.

- Le théorème d'Ampère s'écrit $\boxed{\oint_\Gamma \vec{H}\cdot\mathrm{d}\vec{\ell} = I_{\text{enlacé}}}$.
- La loi de Faraday n'est pas modifiée : $e = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$, où Φ est le flux de $\vec{B}$ à travers le circuit.
- Les relations de passage s'écrivent $\vec{B}_{\perp 2} - \vec{B}_{\perp 1} = \vec{0}$ et $\vec{H}_{//2} - \vec{H}_{//1} = \vec{\jmath}_s \wedge \vec{n}_{1\to 2}$.

Relation constitutive

Pour un milieu magnétique linéaire, homogène et isotrope (l.h.i.), l'aimantation est proportionnelle à l'excitation magnétique appliquée : $\boxed{\vec{M} = \chi\vec{H}}$, où χ est la susceptibilité magnétique du milieu (sans dimension).

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\chi_{\mathrm{m}})\vec{H} = \mu_0\mu_{\mathrm{r}}\vec{H} = \mu\vec{H},$$

où μ_{r} est la perméabilité relative, sans dimension, et μ la perméabilité absolue.

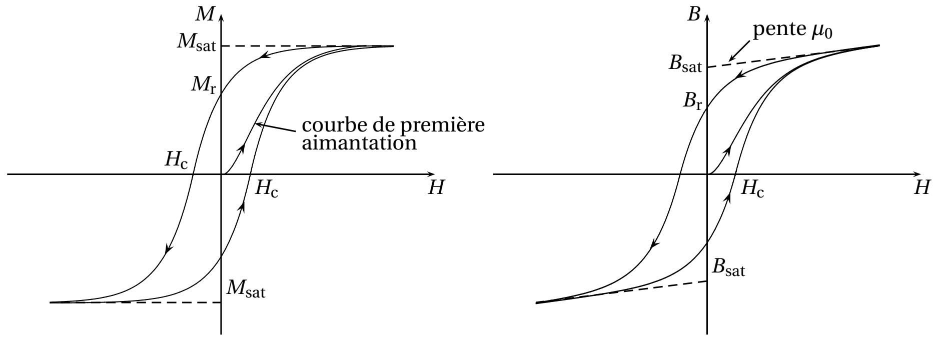
Matériau ferromagnétique

Un matériau ferromagnétique a la propriété de s'aimanter fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur : $\boxed{\chi \gg 1}$.

- On a donc $\chi \approx \mu_{\mathrm{r}}$.
- Typiquement $\chi \approx 10^2$ à 10^6. On utilise industriellement le fer, le nickel et le cobalt.
- Un bobinage parcouru par un courant I créée une excitation $H \propto I$ (théorème d'Ampère). Placer un matériau ferromagnétique dans le bobinage permet d'obtenir un champ magnétique $B = \mu H \gg B_0 = \mu_0 H$ bien supérieur au champ B_0 en l'absence de ce milieu.

Cycle d'hystérésis

Les courbes $M(H)$ et $B(H)$ ont la même allure :



Aimantation de saturation : aimantation maximum M_{sat} que peut acquérir le matériau.

Aimantation rémanente : aimantation M_{r} qui demeure quand l'excitation magnétique est nulle (on a alors un aimant permanent).

Excitation coercitive : excitation H_{c} qui annule l'aimantation.

On distingue deux types de matériaux ferromagnétiques :

Matériaux doux : l'aire du cycle est faible comparée à l'aire du rectangle dans lequel il s'inscrit.

Matériaux durs : l'aire du cycle est du même ordre de grandeur que l'aire du rectangle.

Pertes par hystérésis

On considère un matériau ferromagnétique soumis à une excitation de fréquence f. Si $\mathcal{A}$ est l'aire du cycle, la puissance moyenne absorbée dans le volume V du matériau s'écrit

$$\boxed{P = Vf\mathcal{A}}.$$

Le transformateur

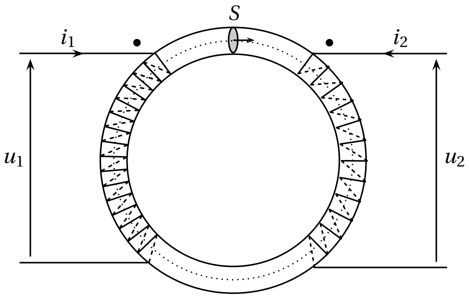
Un transformateur est constitué par un circuit magnétique fermé, constitué d'un matériau ferromagnétique, sur lequel sont bobinés deux enroulements électriques galvaniquement indépendants[1] : le primaire (côté source) et le secondaire (côté charge). Le circuit magnétique canalise les lignes de champ magnétique, et permet d'obtenir un champ magnétique fort avec des courants faibles.

- On considère le champ magnétique nul en dehors du circuit magnétique ; on a un couplage total.

Convention d'orientation

Le circuit magnétique est un tore de section S.
On note Φ le flux du champ magnétique à travers toute section du tore.
On choisit une orientation du circuit magnétique, qui définit le flux Φ. L'orientation des deux enroulements (c'est-à-dire de i_1 et i_2) s'en déduit : chacune des spires, considérée comme un contour, doit être orientée selon l'orientation choisir pour le milieu magnétique.
On oriente alors les tensions telles que le deux bornes d'entrée et de sortie soient en convention récepteur.
On définit ainsi les deux bornes homologues — borne d'entrée de chaque bobinage — représentées par un point $\bullet$ sur le schéma.

1. Ils ne sont pas reliés par un conducteur.



Hypothèses simplificatrices

Pas de fuites magnétiques : tout le flux magnétique est contenu dans le tore ferromagnétique.

Les pertes par effet Joule sont négligeables : la résistance des bobinages est considérée comme nulle. On néglige aussi les pertes magnétiques.

Le matériau ferromagnétique est de très haute perméabilité magnétique : $\mu_r \gg 1$. Pour $\overrightarrow{B}$ donné, le champ $\overrightarrow{H}$ sera donc très faible.

Mise en équations

Le théorème d'Ampère conduit à $2\pi R H = n_1 i_1 + n_2 i_2$.

Le flux du champ magnétique à travers toute section du tore s'écrit $\Phi = \dfrac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{2\pi R}\mu_0\mu_r S$.

On définit les inductances propres et mutuelle des bobinages :

$$L_1 = \frac{n_1^2}{2\pi R}\mu_0\mu_r S \quad L_2 = \frac{n_2^2}{2\pi R}\mu_0\mu_r S \quad \text{et} \quad M = \frac{n_1 n_2}{2\pi R}\mu_0\mu_r S.$$

➤ On a $L_1 L_2 = M^2$, qui est caractéristique d'un coupage total (on a négligé les fuites magnétiques).

On en déduit les équations électriques :

$$u_1 = L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$
$$u_2 = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

Rapport de transformation en tension

$$\boxed{\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_2}{n_1} = m},$$

où m est le rapport de transformation.

Transformateur parfait

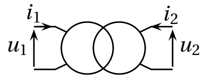
Le modèle du transformateur parfait correspond à $\mu_r \to \infty$.

On a alors $\boxed{\dfrac{i_2}{i_1} = -\dfrac{1}{m}}$.

La puissance instantanée reçue par un transformateur parfait est nulle :

$$p(t) = u_1 i_1 + u_2 i_2 = 0.$$

Il n'y a ni stockage, ni dissipation d'énergie dans un transformateur parfait.

Symbole du transformateur parfait : 

Transfert d'impédance par un transformateur parfait

Soit $\underline{Z}$ une impédance branchée au secondaire d'un transformateur parfait. On appelle impédance ramenée à l'entrée du transformateur l'impédance vue des bornes d'entrée :

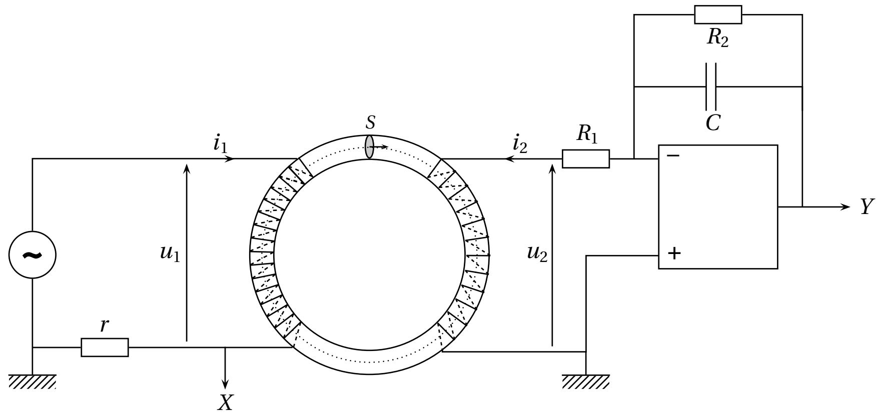
$$\underline{Z}_r = \frac{\underline{Z}}{m^2}.$$

Pertes dans un transformateur

On distingues deux types de pertes :

Pertes fer : ce sont les pertes au sein du matériau ferromagnétique. On distingue :
- les pertes par hystérésis, proportionnelles à f. On les limite en utilisant un matériau doux ;
- les pertes par courant de Foucault, proportionnelles à f^2. On les limite en feuilletant le matériau en couches isolées entre elles, et en utilisant un mauvais conducteur.

Pertes cuivre : ce sont les pertes par effet Joule dans les bobinages des circuits primaires et secondaires. Elles sont usuellement très faibles.



On se place dans le cas où $n_1 \gg n_2$, et où $|i_2| \ll |i_1|$ (impédance d'entrée élevée de l'intégrateur). On a alors $H \approx \dfrac{n_1 i_1}{2\pi R}$. On relève la tension $v_X = r\,i_1$, soit

$$v_X = \frac{r 2\pi R}{n_1} H \propto H.$$

Le montage à A.O. fonctionne en intégrateur si $f \gg \dfrac{1}{R_2 C}$. Comme $v_2 = n_2 S\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$, on relève alors

$$v_Y = -\frac{1}{R_1 C}\int v_2(t)\,\mathrm{d}t = -\frac{1}{R_1 C} n_2 S B + V_0$$

La tension sur la voie X est proportionnelle à H ; la tension sur la voie Y est proportionnelle à B : on obtient donc l'allure du cycle d'hystérésis en mode X-Y.