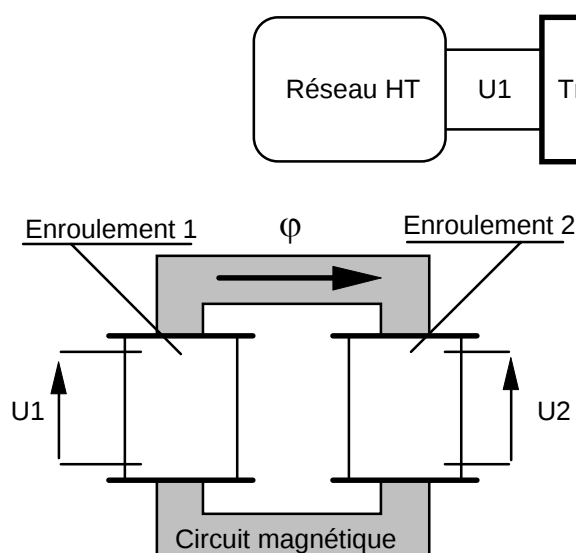


LE TRANSFORMATEUR DE TENSION

1. Description rapide

Le transformateur peut être considéré comme un convertisseur alternatif alternatif. Il est construit afin d'adapter les tensions entre deux réseaux ayant des caractéristiques différentes. Les valeurs efficaces des tensions et des courants sont changées mais la fréquence est conservée.



La figure ci-dessus présente un exemple classique.

Le transformateur est constitué de deux enroulements de cuivre¹ placés sur un circuit magnétique fermé. Les deux enroulements sont isolés électriquement l'un de l'autre. Le passage de la puissance se fait par l'intermédiaire du champ magnétique.

Le principe de base du transformateur est le suivant :

- l'enroulement 1 comporte n_1 spires

- l'enroulement 2 comporte n_2 spires

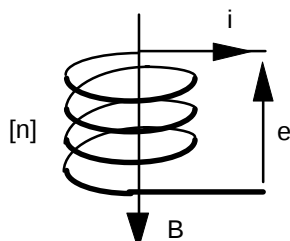
Le flux produit par l'enroulement 1 étant variable il induit une tension dans l'enroulement 2.

La valeur efficace de la tension U_2 est liée à celle de U_1 par :

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot U_1$$

2. Mise en équations

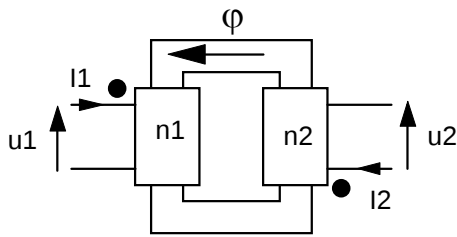
2.1. Les orientations des grandeurs



Le vecteur induction du champ magnétique B est orienté arbitrairement. Le sens du courant i s'en déduit par la règle du tire-bouchon. Le sens de la tension e est placé en convention générateur. Ici le sens d'enroulement est visible.

$$e = -n \frac{d\phi}{dt}$$

¹ De plus en plus les enroulements sont en aluminium pour alléger le poids et le prix du transformateur



Les grandeurs électriques sont orientées de manière habituelle, les points permettent de tenir compte du sens d'enroulement des bobines.

Conséquence : lorsque le courant entre par la borne portant le point, le flux produit par la bobine est positif.

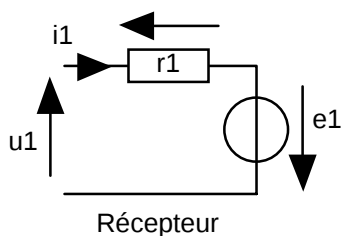
2.2. Les équations selon les électrotechniciens

Les équations montrent le lien entre :

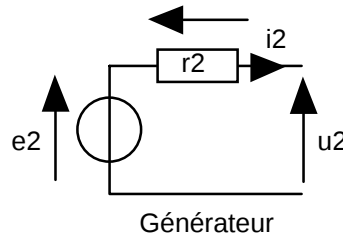
- les tensions au primaire et au secondaire,
- les courants au primaire et au secondaire,
- les grandeurs du récepteur.

Les électrotechniciens considèrent le primaire comme un récepteur et le secondaire comme un générateur.

Voyons les deux modélisations au sens général



$$u_1 = -e_1 + r_1 \cdot i_1$$



$$e_2 = u_2 + r_2 \cdot i_2$$

Appliquons ceci au cas particulier du transformateur.

e1 est la f.e.m. produite par la variation du flux ϕ , avec les orientations ci-dessus

$$e_1 = -n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

de la même manière, pour le secondaire,

$$e_2 = -n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

2.3. Équations des tensions

$$u_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} + r_1 \cdot i_1$$

$$-u_2 = n_2 \frac{d\phi}{dt} + r_2 \cdot i_2$$

Questions :

- retrouvez les signes de ces équations.
- Interprétez le signe moins de la deuxième équation. *Il faut raisonner sur le schéma du § 2.1*

2.4. Équation des courants

Les courants sont liés par l'obligation d'obéir à la loi d'Hopkinson²

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = 0$$

(le circuit magnétique est supposé parfait)

² Analogue de la loi d'Ohm pour le circuit magnétique, elle dit $n \cdot i = R \cdot \phi$

Questions :

- Recherchez, dans la littérature technique, l'énoncé de la loi d'Hopkinson.
- Appliquez-la au transformateur pour retrouver l'équation.

2.5. Équation liée au récepteur

La tension et le courant au secondaire sont liés par les caractéristiques du récepteur.

$$e_2 = r \cdot i_2$$

(on considère que le récepteur est résistif)

2.6. Le rapport de transformation

C'est une grandeur caractéristique du transformateur. Il est donné par :

$$-\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

mais aussi

$$-\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

Attention le rapport de transformation est calculé avec des grandeurs **à vide**.

3. Le transfert de puissance

Le récepteur réclame une certaine puissance au secondaire du transformateur, le primaire, lui, la réclame au secteur.

Comment se fait le passage de la puissance entre le primaire et le secondaire ?

3.1. La formule de Boucherot

Considérons la formule bien connue :

$$|e| = n \cdot \frac{d\phi}{dt}, \text{ on peut faire apparaître les grandeurs du circuit magnétique en remarquant}$$

que $\phi = B \cdot S$ où S est la section du circuit magnétique et B l'induction du champ magnétique le traversant.

En supposant que le champ magnétique est sinusoïdal et que B est la valeur efficace de l'induction on arrive à une formule qui relie la valeur efficace de la f.e.m. à l'induction du champ et aux dimensions de la bobine inductrice :

$$E = 4,44 B \cdot n \cdot S \cdot f$$

où n est le nombre de spires de la bobine et f , la fréquence des grandeurs sinusoïdales.

3.2. Interprétations

Pour une bobine, une tension d'alimentation et un circuit magnétique donnés, le flux est imposé par la tension d'alimentation³. On dit que le transformateur est une **machine à flux**

³ La résistance des enroulements est négligée.

forcé.

Étant donné que la valeur de l'induction est limitée par la saturation, on voit que la valeur efficace de la tension d'alimentation d'un transformateur est liée au produit **n.S.f**.

Conséquence : les dimensions d'un transformateur industriel sont fixées par la fréquence du réseau, l'induction maximale du champ magnétique, la puissance du transformateur. La puissance fixe la section S du circuit magnétique.

Si la limitation du poids est importante, il faut réduire aussi bien la quantité de cuivre que la quantité de fer, la seule solution est d'augmenter la fréquence (c'est ce qui est fait dans la construction aéronautique).

3.3. La puissance transite par le circuit magnétique

Étudions un transformateur destiné à alimenter un récepteur résistif de résistance R sous la tension U_2 . On en déduit que le transformateur doit fournir une puissance P avec une intensité I_2 . La connaissance de l'intensité nous permet de déterminer le diamètre du fil de cuivre de l'enroulement secondaire, nous n'en dirons pas plus car ce n'est pas notre propos.

Exprimons la puissance fournie par le transformateur :

$$P = U_2 \cdot I_2 = E_2 \cdot I_2 = I_2 \cdot 4,44 B \cdot n \cdot S \cdot f$$

Cette expression nous montre que la puissance électrique extraite au secondaire est soutirée au primaire par l'intermédiaire du flux (le flux est commun aux deux enroulements).

D'autre part nous voyons que le circuit magnétique intervient par sa section.

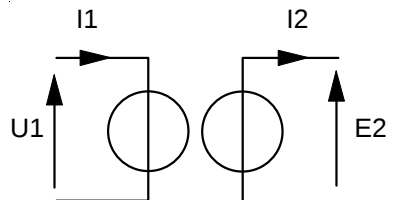
3.4. Le transformateur réducteur de tension est amplificateur de courant

Le transformateur, supposé parfait, possède un rendement égal à 1 donc la puissance P réclamée par le récepteur est également celle que le primaire réclame au secteur. Cette égalité s'exprime par l'expression : $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$.

4. Modèle équivalent d'un transformateur parfait

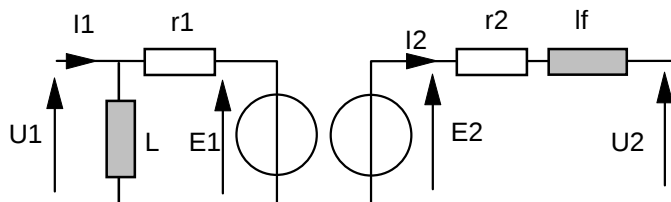
Vu par le récepteur, le transformateur est un générateur de tension sinusoïdale parfait de f.e.m. E_2 .

Si on considère le quadripôle transformateur parfait, on peut le modéliser comme suit :



Bien sûr les enroulements comportent une résistance qu'il faut faire figurer. D'autre part le circuit magnétique est imparfait lui aussi et introduit deux grandeurs nouvelles : le courant magnétisant et l'inductance de fuite.

Le transformateur réel peut être modélisé par :



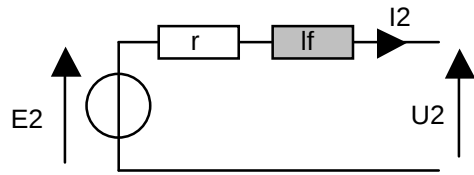
Le courant magnétisant est représenté par le courant traversant l'inductance L sous l'influence de U_1 .

Exercices :

- Donner la relation liant E_2 à E_1 si on connaît le nombre de spires de chaque enroulement.
- Si on néglige L (donc le courant magnétisant), il est possible de reporter au secondaire l'influence de r_1 . Comment peut-on faire ce déplacement ?
- Simplifier le modèle équivalent.

4.1. Diagramme de Kapp

Le modèle simplifié demandé ci-dessus est de la forme :



La résistance r représente r_2 et l'influence de r_1
 Le diagramme de Kapp est tout simplement le diagramme de Fresnel représentant les tensions du schéma ci-contre.
 Le récepteur, non représenté ici, fixe le déphasage entre U_2 et I_2

Exercice :

Tracez le diagramme de Kapp issu du modèle simplifié. *Vous tracerez un diagramme sans échelle, il faut cependant savoir que E_2 et U_2 sont du même ordre de grandeur.*