

# Conversion de puissance 2

## Transformateur

### COMPÉTENCES

A la fin de ce chapitre, je saurai :

- 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 de stockage 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.

# RÉSUMÉ DU COURS

## 1 Présentation du transformateur

Le transformateur est constitué d'un circuit magnétique sans entrefer sur lequel sont enroulé deux enroulements appelés primaire et secondaire.

SCHÉMA Transformateur

Le transformateur est utilisé pour modifier l'amplitude de la tension et de l'intensité du courant en régime alternatif.



(a) Transformateur domestique.



(b) Transformateur source sur un poteau ENEDIS.



(c) Transformateur dans un poste source.

FIG. 1 : Transformateurs de différentes tailles.

## 2 Modèle du transformateur idéal

### 2.1 Présentation du modèle

Dans le modèle du transformateur idéal,

- toutes les pertes (cuivre et fer) sont négligées,
- le matériau ferromagnétique est doux hors saturation, de perméabilité magnétique infinie,
- les lignes de champ sont parfaitement canalisées et



- le champ magnétique est de norme uniforme dans le circuit magnétique.

### SCHÉMA Schéma électrique du transformateur idéal

## 2.2 Loi de transformation des tensions

### Loi de transformation des tensions



#### Hypothèses

- En régime alternatif.
- Pour un transformateur idéal.

---


$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = m$$

#### Avec

- $v_1(t)$  la tension aux bornes du primaire (en V)
- $v_2(t)$  la tension aux bornes du secondaire (en V)
- $m = \frac{N_2}{N_1}$  le rapport de transformation (sans unité)
- $N_1$  le nombre de spires de l'enroulement primaire (sans unité)
- $N_2$  le nombre de spires de l'enroulement secondaire (sans unité)

### APPLICATION



Quel rapport de transformation doit avoir un transformateur permettant d'alimenter un moteur  $12\text{ V}_{\text{eff}}$  à partir du secteur ?

## 2.3 Loi de transformation des courants

### Loi de transformation des courants



#### Hypothèses

- Pour un transformateur idéal.

---


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

#### Avec

- $i_1(t)$  le courant dans le primaire (en A)
- $i_2(t)$  le courant dans le secondaire (en A)
- $m = \frac{N_2}{N_1}$  le rapport de transformation (sans unité)
- $N_1$  le nombre de spires de l'enroulement primaire (sans unité)
- $N_2$  le nombre de spires de l'enroulement secondaire (sans unité)



Un transformateur permet de passer du réseau moyenne tension à 25 kV au réseau basse tension 600 V. Le courant efficace au secondaire est de 75 A. Déterminer le courant efficace au primaire.

## 2.4 Transfert de puissance entre primaire et secondaire

### Transfert de puissance



#### Hypothèses

- En régime alternatif.
- Pour un transformateur idéal.

Il n'y a pas de perte ni de stockage d'énergie électromagnétique.

## 2.5 Transfert d'impédance

Afin de simplifier l'analyse des circuits comportant un transformateur, il est possible de déterminer un schéma équivalent ne comportant pas de transformateur.

### Ramener le primaire au secondaire



#### Hypothèses

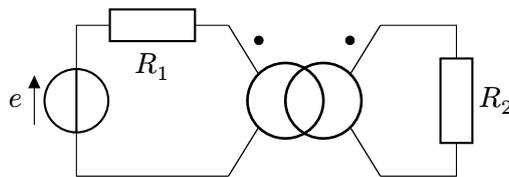
- En régime alternatif.
- Pour un transformateur idéal.

Les impédances sont multipliées par  $m^2$ . Les tensions sont multipliées par  $m$ .

### APPLICATION



Déterminer la tension aux bornes de la résistance  $R_2$  dans le montage ci-dessous en fonction de  $m$ ,  $e$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .



### Ramener le secondaire au primaire



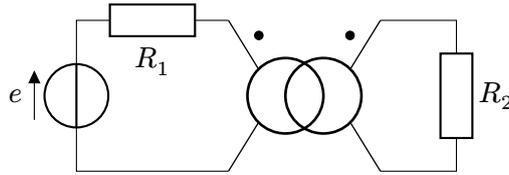
#### Hypothèses

- En régime alternatif.
- Pour un transformateur idéal.

Les impédances sont divisées par  $m^2$ . Les tensions sont divisées par  $m$ .



Déterminer le courant au primaire dans le montage ci-dessous en fonction de  $e$ ,  $m$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .



### 3 Le transformateur réel

Un transformateur réel comporte des pertes cuivres dues à l'effet Joule dans les fils qui constituent les enroulements primaire et secondaire. Pour limiter les pertes cuivre, on utilise un bon conducteur électrique (quasiment toujours du cuivre), de section suffisamment grande et aussi courts que possible.

Un transformateur réel comporte des pertes par hystérésis. Pour les limiter, les transformateurs sont réalisés avec des matériaux ferromagnétiques doux.

Un transformateur réel comporte des pertes par courants de Foucault. Pour les limiter, le circuit magnétique est feuilleté.

#### SCHÉMA Feuilletage du transformateur

Pertes par hystérésis et pertes par courant de Foucault sont regroupées sous le terme « pertes fer ».

## 4 Applications du transformateur

### 4.1 Isolement

Le transformateur d'isolement est un transformateur dont le rapport de transformation  $m$  est égal à 1.

Le transformateur d'isolement sert à isoler électriquement deux parties d'un circuit électrique tout en ayant des tensions identiques au primaire et au secondaire.

#### EXEMPLE

On souhaite afficher sur un oscilloscope la tension et le courant dans un moteur.

#### SCHÉMA



## 4.2 Transport du courant à haute tension

### Puissance perdue lors du transport du courant

10

$$P_J = R \left( \frac{P}{U_{\text{eff}} \cos \varphi} \right)^2$$

Avec

- $P_J$  la puissance moyenne dissipée par effet Joule dans les fils lors du transport (en W)
- $R$  la résistance des fils (en  $\Omega$ )
- $P$  la puissance moyenne consommée par le client (en W)
- $U_{\text{eff}}$  la valeur efficace de la tension (en V)
- $\cos \varphi$  le facteur de puissance (sans unité)

Afin de limiter les pertes par effet Joule lors du transport, on cherche à rapprocher le facteur de puissance le plus possible de 1.

Afin de limiter les pertes par effet Joule lors du transport, on utilise une tension aussi élevée que possible. Pour ce faire, un transformateur augmente la tension en sortie de centrale de production et un transformateur abaisse la tension avant de la distribuer au client.

#### EXEMPLE

Le réseau Très Haute Tension qui transporte le courant sur des longues distances a une tension de 400 kV

#### APPLICATION

11

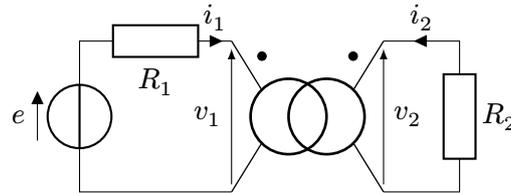
Par combien divise-t-on les pertes par effet Joule dans les câbles en utilisant une tension de 20 kV (ligne moyenne tension) plutôt que de 230 V ?



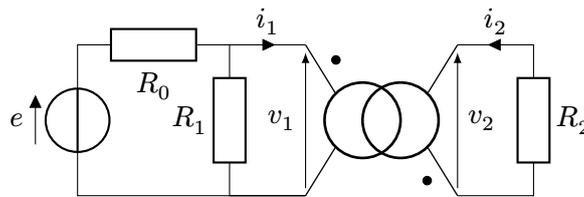
# TD

## 1 Impedance matching

A voltage generator gives a sinusoidal voltage  $e$  to the primary of a transformer through a resistor  $R_1$ . At which condition on the transformation ratio  $m$  is the power dissipated by the resistor  $R_2$  maximal?



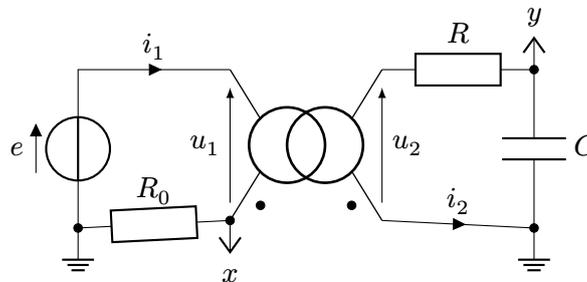
## 2 Utilisation d'un transformateur



1. Calculer  $v_1$  en fonction de  $e$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  et  $m$ .
2. En déduire  $i_2$  en fonction de  $e$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  et  $m$ .
3. Application numérique : que vaut  $i_2$  dans le cas où  $R_0 = R_1 = R_2 = 1 \times 10^2 \Omega$ ,  $e = 2 V_{\text{eff}}$  et  $m = 10$ ?

## 3 Etude graphique d'un cycle d'hystérésis

Un matériau ferromagnétique est destiné à réaliser la carcasse d'un transformateur. On se propose de visualiser le cycle d'hystérésis de ce matériau sur un écran d'oscilloscope c'est-à-dire la courbe  $B(H)$  où  $B$  et  $H$  représentent les valeurs algébriques de  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$ . Pour cela, on réalise le montage suivant. Sur le noyau



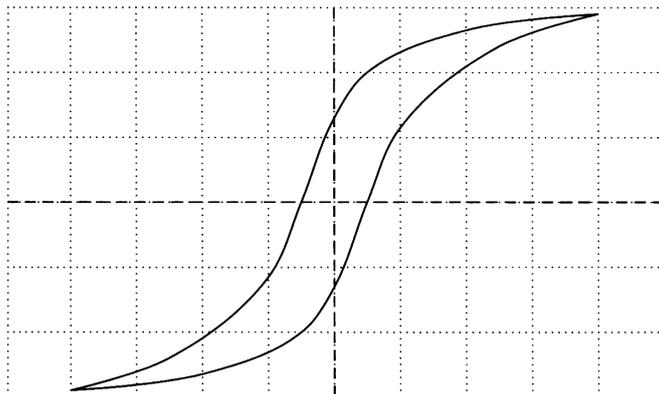
ferromagnétique de forme torique, de section  $S$ , de circonférence moyenne  $l$  ( $l^2 \gg S$ ), on enroule  $n_1$  spires constituant l'enroulement primaire et  $n_2$  spires constituant l'enroulement secondaire.

Le générateur de f.é.m.  $e(t) = E \cos(\omega t)$  est une source de tension sinusoïdale de fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$ .

La résistance  $R = 100 \text{ k}\Omega$  est telle que le produit  $n_2 i_2$  est négligeable devant le produit  $n_1 i_1$ .

1. Pourquoi est-il judicieux de choisir un tore ?
2. Dans ce montage, le circuit  $RC$  (entrée  $u_2$ , sortie  $v_y$ ) fonctionne en intégrateur. Quelle condition la capacité  $C$  doit-elle satisfaire pour cela ? Quelle(s) valeur(s) peut-on choisir pour  $C$  parmi les valeurs usuelles suivantes : 10 nF, 47 nF, 100 nF, 1 F et 4,7 F ?
3. Exprimer  $H$  en fonction de  $v_x$  et expliquer pourquoi le montage permet de visualiser le cycle d'hystérésis.
4. Applications numériques :  $l = 50 \text{ cm}$ ,  $S = 20 \text{ cm}^2$ ,  $C = 1 \text{ F}$ ,  $R_0 = 5 \Omega$ ,  $n_1 = n_2 = 50$ . Donner, en précisant les unités, les expressions de  $H$  en fonction de  $v_x$  puis de  $B$  en fonction de  $v_y$ .

On obtient l'oscillogramme suivant.  $v_x$  est en ordonnée (1 graduation représente  $2V$ ).  $v_y$  est en abscisse (1 graduation représente  $1V$ ).



5. Dédurre de cet oscillogramme les valeurs approximatives (à 20% près) du champ magnétique rémanent  $B_r$ , de l'aimantation rémanente  $M_r$  et du champ coercitif  $H_c$ .

Dans le schéma du montage, on peut raisonnablement négliger la puissance dissipée par effet Joule dans les enroulements primaire et secondaire. Pour simplifier, on suppose également négligeables les pertes dues aux courants de Foucault dans le tore. Dans ces conditions, la puissance  $p_H = u_1 i_1$  dissipée est uniquement due aux propriétés ferromagnétiques du noyau.

6. Établir la relation liant  $P_H$ , valeur moyenne de  $p_H$ , à l'aire  $\mathcal{A}$  du cycle d'hystérésis représentant l'évolution de  $B$  en fonction de  $H$ .
7. Sur l'oscillogramme, on évalue l'aire du cycle à 6 carreaux. En déduire la valeur de la puissance moyenne  $P_H$  dissipée à cause du phénomène d'hystérésis dans l'ensemble du tore dans l'essai réalisé.
8. A-t-on intérêt pour la fabrication des transformateurs à utiliser un matériau ferromagnétique ayant un champ coercitif important ou faible au contraire ? Justifier.