

# Transformateurs électriques

Ce TD a pour but de détailler le fonctionnement et les principales propriétés des transformateurs électriques. Ceux-ci sont par exemple utilisés par EDF en bout de ligne, d'un côté pour élever la tension électrique de la tension de production (6000 V) à la tension de transport (300 kV), puis à l'autre extrémité pour abaisser successivement cette tension jusqu'à la tension d'utilisation (230 V ou 380 V). Nous utilisons également des transformateurs pour charger les batteries (téléphones et ordinateurs portables par exemple), ils convertissent la tension du secteur de 230V à 12V.

On peut justifier l'utilisation de tensions élevées pour le transport d'énergie en se basant sur l'exemple suivant : on veut fournir 10 MW à une usine distante de 50 km avec moins de 10% de pertes. Quel doit être le diamètre des fils pour une tension de 220 V ou 200 kV ?

## 1 Le transformateur électrique

Le transformateur est constitué d'un matériau ferromagnétique (**le noyau**) sur lequel sont bobinés deux conducteurs en cuivre : le primaire et le secondaire

- *primaire* :  $n_1$  spires, tension  $u_1$ , intensité  $i_1$ ,
- *secondaire* :  $n_2$  spires, tension  $u_2$ , intensité  $i_2$

Le noyau est un matériau ferromagnétique présentant la perméabilité relative  $\mu_r$  la plus élevée possible. *Pourquoi ?*.

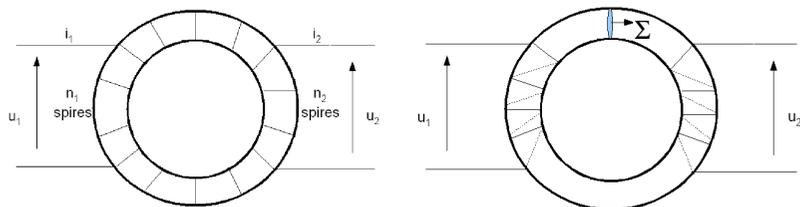


Figure 1: Transformateur torique et conventions d'orientation.

## 2 Équations de fonctionnement

### 2.1 Hypothèses simplificatrices

Nous considérerons dans un premier temps que :

- le noyau est de perméabilité  $\mu_r$ , supposé **Linéaire**, **Homogène** et **Isotrope** (milieu LHI). *Rappeler la relation entre  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{H}$ ,*
- l'enroulement en cuivre est supposé parfaitement conducteur (*i.e.* pas de pertes par effet Joule),
- le noyau magnétique est torique et sans fuites magnétiques (les lignes de champs sont assimilables à des cercles concentriques. De plus, on suppose que le diamètre de la section ( $\Sigma$ ) du tore est très inférieur au rayon  $R$  de ce dernier, de façon à considérer les champs uniformes sur une section.

### 2.2 Questions

1. Donnez la relation en  $u_1$  et  $u_2$ . On notera  $m = n_2/n_1$ .
2. En appliquant le théorème d'Ampère, donnez une relation entre  $i_1$ ,  $i_2$  et  $\mathbf{H}$ .
3. Montrez alors que le flux magnétique  $\phi$  à travers toute section du tore est de la forme
 
$$\phi = \frac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{2\pi R} \mu_r \mu_0 \Sigma. \quad (1)$$
4. Donner alors la forme de  $u_1$  et  $u_2$ . Quelles grandeurs caractéristiques des enroulements retrouve-t-on ?

## 3 Le transformateur parfait

On suppose que  $\mu_r \rightarrow +\infty$ .

- Que peut-on déduire sur l'expression de  $\phi$  précédente ?
- Donnez alors la relation entre  $i_1$  et  $i_2$ .
- Quel est le rendement du transformateur parfait ?
- On considère une impédance de charge  $Z_2$ , connectée au secondaire. Comment est vue cette impédance depuis le primaire. Intérêt ?
- On suppose qu'on alimente le primaire par une source de tension sinusoïdale d'amplitude  $e_0$  et de résistance interne  $r$ . Le secondaire alimente une charge résistive  $R$ . Quelle valeur de  $m$  maximise la puissance dissipée dans la charge ?

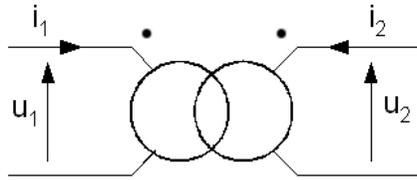


Figure 2: Schéma équivalent du transformateur parfait.

## 4 Le transformateur réel

Dans cette section, on se propose d'étudier les différents écarts d'un transformateur réel à un transformateur idéal.

### 4.1 Perméabilité du matériau (modèle linéaire)

Supposons que  $\mu_r$  est finie. On obtient alors

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = \frac{2\pi R}{\mu_r \mu_0 \Sigma} \phi. \quad (2)$$

Donner la relation entre  $u_{10}$  et  $i_{10}$ , tension et courant primaires lorsque le secondaire est en circuit ouvert. Commentaires.

Donner alors un schéma équivalent à ce transformateur réel en utilisant le symbole du transformateur parfait.

Quelles sont les autres déviations à ce modèle que l'on doit prendre en compte ? Quelles en sont les causes ? Est-il possible de les rendre aussi faibles que possible ? Donner alors un schéma électrique équivalent à un tel transformateur.

### 4.2 Non-linéarité

Un milieu ferromagnétique est non-linéaire lorsque les champs sont "suffisamment importants" (par rapport à quoi ?). On observe alors un comportement hystérétique. Apparaissent des courants non sinusoïdaux. À quoi sont reliées les pertes par hystérésis ? Quelle propriété doit présenter le milieu magnétique pour les minimiser ?

## 5 Détermination expérimentale des pertes

Pour déterminer expérimentalement le rendement d'un transformateur, on dispose d'une méthode efficace dite *des pertes séparées*. Les pertes sont de deux sortes :

- les pertes cuivres  $\mathcal{P}_c$  : pertes par effet Joule dans les bobinages primaires et secondaires,
- les pertes fer  $\mathcal{P}_f$  : pertes par hystérésis.

Pour  $\mathcal{P}_1$  et  $\mathcal{P}_2$  les puissances respectivement au primaire et au secondaire, on a la relation

$$\mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_c - \mathcal{P}_f. \quad (3)$$

L'obtention du rendement consiste donc en pratique à la détermination de  $\mathcal{P}_c$  et  $\mathcal{P}_f$ , dans les conditions les plus proches de celle du point de fonctionnement considéré.

- Les pertes fer ne dépendent que de  $\mathbf{B}$ , et donc uniquement de  $u_1$ , indépendamment de la charge. En effet, on peut considérer que le champ magnétique dans le noyau ne dépend que de la tension du primaire

$$u_1 = \frac{d\phi}{dt} \approx n_1 \Sigma \frac{dB}{dt} \approx n_1 \Sigma \omega B \sin(\omega t), \quad (4)$$

dans la limite linéaire. Donc en fixant  $u_1$  à sa valeur prise en charge, mais **secondaire ouvert**, la puissance dissipée par le primaire est bien  $\mathcal{P}_f$ , en supposant que le courant magnétisant est faible et que par conséquent la dissipation par effet joule qu'il génère est négligeable.

- En ce qui concerne les pertes cuivre, il suffit de mesurer les résistances des bobinages primaires et secondaires à l'ohmmètre. Attention toutefois à se rapprocher le plus possible des conditions de fonctionnement. Il existe une méthode plus précise qui consiste à court-circuiter le secondaire et ajuster l'alimentation du primaire pour donner à  $i_1$  la valeur souhaitée. La puissance dissipée au primaire est alors  $\mathcal{P}_c$ .

This work is licensed under a Creative Commons "Attribution-NonCommercial-NoDerivatives" license.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>