

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 μ_r la plus élevée possible. *Pourquoi ?*.

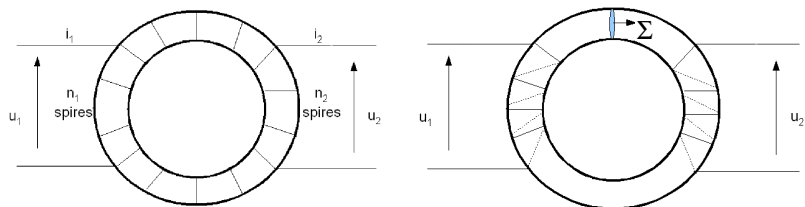


Figure 1: Transformateur torique et conventions d'orientation.

2 Équations de fonctionnement

2.1 Hypothèses simplificatrices

Nous considérerons dans un premier temps que :

- le noyau est de perméabilité μ_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 (Σ) 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 ϕ 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 ϕ 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 ?

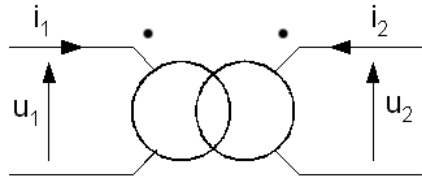


Figure 2: Schéma équivalent du transformateur parfait.

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 μ_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>