

TD de conversion de puissance n° 2

Le transformateur

1 — Détermination des caractéristiques d'un transformateur

On veut construire un transformateur de puissance apparente $1,5 \text{ kV}\cdot\text{A}$ qui, alimenté sous 380 V , à la fréquence de 50 Hz , ait, en régime nominal, une tension secondaire de 24 V sur charge résistive. Les valeurs fournies sont les valeurs efficaces.

On dispose d'un circuit magnétique torique de section $S = 25 \text{ cm}^2$ et de longueur moyenne $\ell = 60 \text{ cm}$ présentant une perméabilité magnétique $\mu_r = 3180$ pour un champ magnétique variant entre 0 et 1 T . On désire faire travailler ce circuit avec un champ magnétique maximal en régime nominal de $0,9 \text{ T}$.

Enfin, on impose une chute de tension relative au secondaire (entre le fonctionnement nominal et le fonctionnement à vide) de 4% du fait de la résistance de l'enroulement secondaire.

1. La puissance apparente est définie comme étant la valeur maximale qui peut être prise par la puissance active pour des amplitudes de tension et d'intensité fixées. À quel facteur de puissance correspond-elle? Quelle est son expression en fonction de la tension efficace et du courant efficace?

2. Calculer le courant efficace I_2 du courant secondaire nominal.

3. Déterminer la tension secondaire à vide U_{2v} .

4. Déterminer le rapport des nombres de spires $m = N_2/N_1$.

5. Quels doivent être les nombres de spires N_1 et N_2 à donner au primaire et au secondaire?

6. Quel est le courant efficace appelé au primaire lorsque le secondaire est vide?

2 — Ligne à haute tension

On considère une ligne bifilaire en cuivre de conductivité $\gamma = 5,9 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ et de section $S = 1 \text{ cm}^2$, acheminant sur une distance de 20 km de l'énergie électrique à une charge résistive de résistance $R_0 = 5 \Omega$, alimentée sous une tension efficace de 230 V .

On dispose de deux transformateurs identiques dont le rapport du nombre de spires des deux enroulements est de 10 .

Comment les connecter pour réduire au maximum les pertes dans la ligne bifilaire? Calculer la puissance ainsi économisée.

3 — Impédance ramenée au primaire

On considère un transformateur idéal de rapport de transformation $m = N_2/N_1$. Son primaire est alimenté par une tension sinusoïdale $u_1(t)$. Un dipôle linéaire, d'impédance complexe \underline{Z} , est branché au secondaire. On note $u_2(t)$ la tension à ses bornes.

1. Montrer que l'ensemble {transformateur + impédance \underline{Z} } est équivalent à une unique impédance $\underline{Z}_{\text{éq}}$ à déterminer.

2. Le réseau américain délivre une tension efficace $U_{1,\text{eff}} = 110 \text{ V}$ de fréquence $f_1 = 60 \text{ Hz}$. Pour le réseau français, on donne $U_{2,\text{eff}} = 220 \text{ V}$ et $f_2 = 50 \text{ Hz}$. Une ampoule électrique de puissance $P = 110 \text{ W}$ est assimilée à un simple dipôle résistif.

2.a) Comparer les résistances respectives R_1 et R_2 de l'ampoule américaine et de l'ampoule française.

2.b) Montrer qu'une ampoule américaine peut fonctionner sur le réseau français à condition d'utiliser un transformateur convenable.

4 — Facteur de puissance apparent d'un transformateur

Le primaire d'un transformateur est alimenté sous 220 V à la fréquence de 50 Hz . La section droite de son circuit magnétique est de 10 cm^2 et le champ magnétique maximal qui y règne est de 1 T . Le rapport m de transformation est de $0,06$. On néglige les pertes cuivre, les pertes fer et les fuites magnétiques.

1. Calculer le nombre de spires de chaque enroulement.

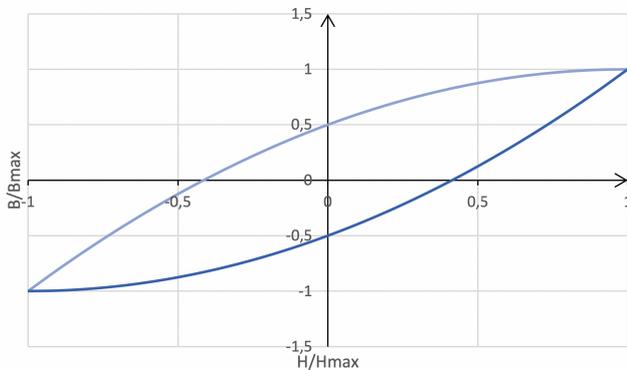
2. Le circuit magnétique du transformateur est modélisé par un milieu linéaire de perméabilité relative $\mu_r = 5000$. Sa longueur moyenne est $\ell = 60 \text{ cm}$. Le secondaire est relié à une résistance $R = 5 \Omega$. Calculer les courants au primaire et au secondaire du transformateur.

3. En déduire alors la puissance moyenne consommée au primaire et le facteur de puissance apparent du transformateur (une grandeur apparente est la valeur de cette grandeur mesurée au primaire du transformateur en charge).

5 — Étude énergétique d'un transformateur

On considère un transformateur monophasé utilisé en régime d'excitation sinusoïdale forcé, le générateur

branché au primaire fournissant la tension $u_p(t) = U\sqrt{2}\cos\omega t$. Les nombres de spires des enroulements primaires et secondaires sont notés N_p et N_s et la résistance des bobinages est négligée, dans un premier temps. Le circuit magnétique présente un cycle d'hystérésis représenté ci-après :



1. Expliquer pourquoi le flux ϕ dans le circuit magnétique est lui aussi sinusoïdal.
2. Le transformateur est refermé sur une charge résistive. Que peut-on dire dans ces conditions sur le courant secondaire i_s ? Le courant primaire est-il sinusoïdal?
3. Donner l'expression générale de la puissance instantanée absorbée au primaire par le transformateur. Montrer que la valeur moyenne de la puissance fournie ne fait intervenir que l'harmonique d'ordre 1, appelé fondamental, du courant primaire.
4. Le circuit secondaire du transformateur est ouvert. On suppose que malgré l'existence du cycle d'hystérésis qu'il n'y a ni pertes par hystérésis, ni pertes par effet Joule, ni pertes par courants de Foucault. Quelle est dans ce cas la puissance absorbée par le transformateur? Quel est le déphasage entre la tension $u_p(t)$ et l'harmonique 1 du courant primaire?
5. À l'aide de la caractéristique $B(H)$ du milieu magnétique représentée en unités absolues sur la figure, préciser les notions de champ coercitif et de champ rémanent. Faut-il, pour un transformateur, préférer un milieu doux ou un milieu dur? Pour quelle raison?

On considère désormais que les pertes énergétiques ne sont plus négligeable, c'est-à-dire que l'on tient compte des pertes fer et des pertes Joule. La puissance nominale du transformateur est de 2,2 kV·A.

Essai à vide : le secondaire est ouvert.

On applique au primaire sa tension efficace nominale $U_{p,nom} = 230$ V. La valeur efficace du courant mesuré au primaire est $I_p = 1$ A; la puissance mesurée est $P_{p0} = 80$ W.

6. À quoi correspond cette puissance fournie au transformateur? Quel est le déphasage entre l'harmonique 1 du courant primaire et la tension appliquée au primaire?

Essai en court-circuit : le secondaire est en court-circuit.

On applique au primaire une tension U_{cc} telle que le courant secondaire I_{cc} soit égal à la valeur nominale du courant que peut débiter le transformateur. Dans ces conditions, la tension au primaire est nettement plus faible que la tension nominale de fonctionnement. La puissance fournie au primaire est $P_{cc} = 75$ W.

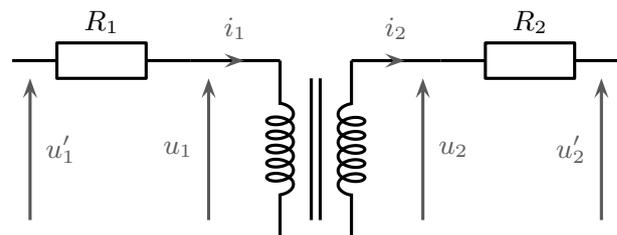
7. À quoi correspond cette puissance fournie au primaire du transformateur?

Essai sur charge résistive

8. Dans les conditions nominales de fonctionnement, on fournit à la charge une puissance $P_{p,nom} = 2$ kW. Déduire de l'ensemble des résultats précédents le rendement du transformateur dans les conditions de l'essai réalisé.

6 — Méthode des pertes séparées

Pour étudier les pertes dans un transformateur, on raisonne sur le schéma électrique suivant : les résistances des enroulements sont notées R_1 et R_2 . Le transformateur au centre du schéma est uniquement le siège de pertes fer. Les orientations du schéma sont arbitraires.



Les grandeurs instantanées sont notées en minuscules. Les grandeurs efficaces associées sont notées avec des majuscules.

1. Rappeler les différents types de pertes énergétiques dans un transformateur électrique. On note P_1 la puissance moyenne reçue au primaire et P_2 la puissance moyenne délivrée au secondaire. Donner schématiquement un bilan de puissance faisant intervenir ces deux grandeurs ainsi que les différents termes de pertes.

On appelle tension et intensité nominales, notées U'_n et I_n , les valeurs que prennent U'_{eff} et I_{eff} en fonctionnement normal pour un enroulement (primaire ou secondaire) d'un transformateur. Ces grandeurs sont notées avec l'indice n.

Une puissance apparente est le produit $U_{eff}I_{eff}$ (puissance moyenne sans le facteur de puissance $\cos\varphi$ dû à l'éventuel déphasage entre U et I). Tension et intensité n'étant pas toujours en phase, une puissance apparente ne correspond pas nécessairement à une véritable puissance moyenne. Pour cette raison, on l'exprime en volt ampères (V·A) et non en watts. Pour un

transformateur, la puissance nominale apparente est définie comme le produit de la tension nominale par l'intensité nominale.

La « méthode des pertes séparées » consiste à faire des mesures de puissances moyennes, en régime sinusoïdal, dans des conditions qui annulent ou rendent négligeables certains termes de pertes énergétiques. Cela permet de mesurer *séparément* chacune des causes de pertes.

La puissance nominale apparente du transformateur considéré est $P_n = 2,2 \text{ kV} \cdot \text{A}$. Sa tension nominale au primaire est $U'_{1n} = 230 \text{ V}$. On applique la méthode des pertes séparées à ce transformateur.

2. Première expérience. Le secondaire est en circuit ouvert et on applique au primaire sa tension nominale $U'_{1n} = 230 \text{ V}$. La valeur efficace de l'intensité mesurée au primaire est alors $I_{1mrmeff} = 1,0 \text{ A}$. La puissance moyenne fournie au primaire est mesurée comme $P_{10} = 80 \text{ W}$. Par des arguments numériques, montrer que P_{10} correspond principalement aux pertes fer nominales.

3. Deuxième expérience. Le secondaire est en court-circuit ($u'_2(t) = 0$) et on applique au primaire une tension efficace U'_{1cc} (tension primaire de court-circuit) telle que l'intensité efficace au secondaire I_{2cc} soit égale à la valeur nominale d'intensité que peut débiter le transformateur.

3.a) Dans ces conditions, la tension efficace U'_{1cc} est très inférieure à la tension nominale U'_{1n} au primaire. Expliquer pourquoi.

3.b) La puissance fournie au primaire est mesurée comme $P_{1cc} = 75 \text{ W}$. À quelles pertes correspond cette puissance?

4. Troisième expérience. On branche au secondaire une charge résistive et on alimente le primaire de manière que le transformateur fonctionne près des conditions nominales. La charge reçoit alors la puissance efficace $P_2 = 2,0 \text{ kW}$. Calculer le rendement et vérifier la cohérence avec les résultats des questions précédentes.