

Transformateur monophasé

PARTIE THEORIQUE

Rappels d'électromagnétisme

1 - Ferromagnétisme

1-1) Définition

Tous les matériaux réagissent à l'excitation magnétique **H** créée par un courant **i**. Les matériaux ferromagnétiques (Fe, Co, Ni et alliages) réagissent en renforçant très fortement l'induction **B** : $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$, où μ_r (perméabilité magnétique relative du matériau) peut valoir de 1000 à 50000.

Un morceau de fer vierge de toute aimantation contient un grand nombre de moments magnétiques élémentaires μ orientés au hasard. Dès qu'on lui impose une excitation magnétique **H**, une partie de ces moments s'aligne sur **H**, contribuant à augmenter l'induction **B**. Plus **H** est élevé, plus il y a des moments magnétiques μ alignés avec **H** et plus **B** sera grand (régime **B(H)** linéaire). Lorsque tous les moments sont alignés, on dit que le fer est saturé : toute augmentation ΔH de **H** n'entraîne plus qu'une augmentation $\Delta B = \mu_0 \Delta H$ de l'induction. La courbe de première aimantation **B(H)** ci-dessus montre que $\mu_r = B/(\mu_0 H)$ est constant dans la partie linéaire puis diminue dès que le coude de saturation est passé.

La valeur élevée de μ_r a une conséquence cruciale : l'induction "passe" μ_r fois plus facilement dans le fer que dans l'air. Dès que l'on place un morceau de fer dans un lieu où existe un champ magnétique, les lignes d'induction s'y engouffrent et sont canalisées par le circuit magnétique (tant que le fer n'est pas saturé). Ainsi toutes les machines électrotechniques classiques comportent un circuit presque totalement constitué de fer. L'espace d'air (entrefer) qui sépare la partie fixe (stator) de la partie tournante (rotor) est réduit au minimum.

Sans ferromagnétisme il n'y aurait pas d'électricité industrielle (alternateurs, transformateurs, moteurs).

1-2) Inductance d'une bobine à noyau de fer

Comparons l'inductance d'un solénoïde bobiné sur un tore de longueur **l** avec ou sans noyau de fer. Elle est donnée par $\Phi \text{ (weber)} = L i$ (Φ est le flux de **B** traversant la bobine $\Phi = n \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ (l'induction est supposée uniforme, **n** est le nombre de spires de l'enroulement, **S** est la surface de la spire en m²).

- sans fer $B = \mu_0 H = \mu_0 n i / l$ (théorème d'Ampère)

d'où $\Phi/S = n^2 \mu_0 i / l$ et $L_0 = \mu_0 n^2 S / l$

- avec fer $B = \mu_0 \mu_r H$ et $L = \mu_r L_0$

Ainsi la self d'une bobine à noyau de fer est considérablement plus élevée que sans fer.

Lorsqu'on passe en courant alternatif (hormis le phénomène d'hystérésis - voir plus loin) la loi de Lenz donne une fem $E = (-d\Phi/dt) = -j\omega \Phi = -j L\omega I$. Si le fer n'est pas saturé, l'inductance $L\omega$ est un bon paramètre, constant, mais qui devient inutilisable dès que le fer sature (μ_r variable).

Les proportionnalités de E avec Φ et B d'une part, et de H avec i d'autre part, permettent d'affirmer que le graphe $E(i)$ a la même allure que $B(H)$. Dans les graphes $E(i)$ que l'on relève en TP, le coude de saturation est beaucoup moins marqué que sur le graphe $B(H)$ ci-dessus : l'induction n'étant pas uniforme, la saturation ne se manifeste pas pour le même i pour tout le circuit magnétique d'une machine.

1-3) Phénomène d'hystérésis

Le graphe $B(H)$ ci-dessus concerne la première aimantation d'un morceau de fer. Que se passe-t-il lorsque, en alternatif, i passe périodiquement de la valeur $+i_{\max}$ à $-i_{\max}$, puis de $-i_{\max}$ à $+i_{\max}$? Lorsque i passe de 0 à $+i_{\max}$, c'est la courbe de première aimantation, B passe de 0 à $+B_{\max}$. Quand i revient de $+i_{\max}$ à 0, le retour ne se fait pas par le même chemin que l'aller. Si bien que pour $i=0$, l'induction B_r rémanente n'est pas nulle : le morceau de fer est devenu un aimant permanent. B_r étant proportionnelle à B_{\max} (et à H_{\max} ou i_{\max} s'il n'y a pas saturation), B_r est la "mémoire" de i_{\max} . C'est le principe de l'enregistrement magnétique (cassettes, bandes et disques magnétiques d'ordinateur, cartes bancaires, tickets de tram ...)

Pour annuler B_{\max} , il faut imposer un champ négatif H_c (champ coercitif). Finalement lorsque i oscille entre $+i_{\max}$ et $-i_{\max}$, $B(H)$ décrit un cycle d'hystérésis : chemins différents à l'aller et au retour.

1-4) Pertes fer (courants alternatifs)

1-4-a) Pertes fer par hystérésis

La surface du cycle s'exprime en Joule/m³. Elle correspond à un échauffement du matériau dû aux frottements des moments magnétiques, orientés dans une direction pour $+H_{\max}$ et dans la direction opposée pour $-H_{\max}$, c'est-à-dire une demi période plus tard (en courant alternatif).

Ainsi la puissance de pertes fer par hystérésis est proportionnelle à :

$$p_h \approx f V S_h \approx f V (B_{\max})^2 \text{ où}$$

- f est la fréquence de l'excitation magnétique
- V est le volume de fer subissant le cycle
- S_h est la surface du cycle qu'on admet être proportionnelle à $(B_{\max})^2$

On essaie de diminuer ces pertes en choisissant un matériau de surface S_h la plus faible possible.

1-4-b) Pertes fer par courants de Foucault

Le fer, ferromagnétique, est aussi conducteur électrique. Si on découpe par la pensée, dans le matériau, un anneau de surface S perpendiculaire à \mathbf{B} , cette spire, traversée par un flux $\Phi = B_{\max} S \cos \omega t$, est le siège d'une fem de Lenz $e = -d\Phi/dt$ qui fait circuler un courant e/r (r résistance de l'anneau) donnant des pertes Joule $e^2/r = (B_{\max} S \omega \sin \omega t)^2/r$ dont la valeur moyenne est non nulle. Pour l'ensemble du fer la puissance de pertes par courants de Foucault est donnée par :

$$p_{CF} \approx (B_{\max})^2 f^2 / \rho \text{ où } \rho \text{ est la résistivité du fer utilisé.}$$

L'acier au silicium, avec son ρ élevé, minimise ces pertes. L'intensité des courants de Foucault est diminuée en feuilletant le fer en tôles parallèles à \mathbf{B} et recouvertes d'un vernis isolant.

1-4-c) Mesure des pertes fer

Cette puissance perdue dans les circuits magnétiques soumis à une induction alternative se traduit par un échauffement du matériau ; ces pertes existent dans les machines à courant alternatif mais aussi dans le rotor des machines à courant continu. Elles diminuent le couple utile d'un moteur comme s'il y avait frottement fluide du rotor dans un bain d'huile.

On les mesure toujours par un essai à vide, c'est-à-dire lorsque l'induction dans le fer atteint des valeurs maximales que l'on peut retrouver en charge (secondaire d'un transformateur ouvert par exemple).

1-5) Pertes Joule

Aux pertes fer s'ajoutent pour une machine électrique des pertes par effet Joule dues aux courants électriques dans les enroulements. Elles sont facilement calculables si on connaît la résistance des enroulements (généralement en cuivre). On peut aussi les mesurer lors de l'essai de la machine en court-circuit (l'induction B est alors négligeable, ce qui rend les pertes fer voisines de zéro).

2 - Le transformateur monophasé

2-1) Présentation

Un transformateur est un appareil statique permettant de modifier la présentation de l'énergie électrique. **Basé sur la loi de Lenz , il ne fonctionne qu'en alternatif.** Avec un excellent rendement (99% pour un transfo industriel), il permet de monter (ou abaisser) la tension tout en abaissant (ou montant) l'intensité.

Son utilisation est fondamentale pour le transport de l'énergie électrique à longue distance : les lignes haute tension (donc faible intensité I) sont le siège de pertes Joule RI^2 réduites. Le transfo sert aussi beaucoup pour abaisser la tension 220V du réseau européen jusqu'à obtenir la valeur recherchée pour construire une alimentation à courant continue nécessaire pour tout appareil transistorisé (ampli, ordinateur, radio, télé, magnétoscope, etc...) consommant trop de puissance pour être alimenté par piles. On peut aussi l'utiliser en adaptateur d'impédances et, mis en série avec un ampèremètre, comme transformateur de courant nécessaire pour la mesure d'intensités élevées ($> 5 \text{ A}$).

2-2) Etude du transformateur monophasé

Deux enroulements sont bobinés sur un noyau de fer canalisant le flux magnétique Φ :

- primaire - enroulement de n_1 spires (les grandeurs le concernant sont affectées de l'indice 1)
- secondaire - enroulement de n_2 spires (les grandeurs le concernant sont affectées de l'indice 2)
- noyau de fer traversé par le flux Φ d'induction magnétique : tôles feuilletées au silicium (pour abaisser les pertes fer par courants de Foucault et hystérésis)

Fem dues à la loi de Lenz : $e_1 = - n_1 d\Phi/dt$ et $e_2 = - n_2 d\Phi/dt$.

En régime sinusoïdal pour un tel transfo supposé parfait $\underline{E_1/E_2} = \underline{n_1/n_2}$ = rapport de transformation, mais en réalité il y a :

- des pertes fer proportionnelles au carré de l'induction dans le noyau de fer
- des pertes Joule dues aux résistances r_1 et r_2 des 2 enroulements
- des fuites magnétiques de flux Φ_{f1} et Φ_{f2} au niveau de chaque enroulement : l'enroulement primaire est traversé par un flux magnétique $\Phi_1 = \Phi_{f1} + \Phi$ (Φ_{f1} dans l'air et Φ dans le fer). Au flux de fuite Φ_{f1} correspond une inductance de fuites l_1 constante (car l'air n'est pas saturable comme le fer) telle que $\Phi_{f1} = l_1 i_1$ où i_1 est le courant primaire.

Ainsi le schéma électrique équivalent le plus général du transfo monophasé est :

La résistance R_μ rend compte des pertes fer par V_1^2/R_μ et la réactance X_μ permet de décrire la puissance magnétisante V_1^2/X_μ .

Les lois d'Ohm, de Lenz, le théorème d'Ampère s'écrivent :

- au primaire : $\dot{V}_1 = (r_1 + j l_1 \omega) \dot{I}_1 + \dot{E}_1$ convention récepteur
- au secondaire : $\dot{E}_2 = (r_2 + j l_2 \omega) \dot{I}_2 + \dot{V}_2$ convention générateur
- dans le noyau de fer : $n_1 \dot{I}_1 + n_2 \dot{I}_2 = R \phi \approx n_1 \dot{I}_{10}$

La somme algébrique des forces magnétomotrices installe le flux Φ dans le circuit magnétique de réluctance R , pratiquement le même flux qu'à vide (même tension d'alimentation V_1).

Les essais en TP sont destinés à mesurer les paramètres du schéma de modélisation du transfo afin d'en prévoir les performances lors de ses utilisations en charge (c'est-à-dire lorsque $I_2 \neq 0$). En particulier on veut connaître son rendement et la chute de tension entre la tension à vide et en charge, en fonction du courant et du facteur de puissance secondaires.

2-3) Approximation de Kapp

Le courant I_{10} magnétisant, très proche du courant à vide (à vide $I_2=0$) est relativement faible devant I_1 en charge. En le négligeant (donc $R_\mu = X_\mu = \infty$ et $n_1 I_1 + n_2 I_2 = 0$), Kapp permet de simplifier le schéma équivalent et en le "ramenant" en entier au secondaire par exemple,

la loi d'Ohm, rappelant le théorème de Thévenin, peut s'écrire :

$$\vec{V}_2 = n_2/n_1 \vec{V}_1 - (R_2 + jL_2\omega) \vec{I}_2 \text{ avec :}$$

$n_2/n_1 V_1$: tension secondaire à vide V_{20}

$R_2 = r_1 (n_2/n_1)^2 + r_2$: résistance totale du transformateur "ramenée au secondaire"

$L_2 = l_1 (n_2/n_1)^2 + l_2$: inductance de fuites "ramenée au secondaire"

La chute de tension en charge :

$$\Delta V_2 = \left| n_2 / n_1 \vec{V}_1 - \vec{V}_2 \right| = \left| (R_2 + jL_2\omega) \vec{I}_2 \right|$$

$\left| (R_2 + jL_2\omega) \vec{I}_2 \right|$ est alors facilement calculable après mesures de R_2 et $L_2\omega$.

Les essais en charge devraient permettre de savoir si cette approximation est justifiée.

2-4) Essais d'un transformateur monophasé à puissance réduite

L'essai à vide permet de mesurer les pertes fer, c'est-à-dire la puissance consommée, mesurée au primaire, P_{10} qui se résume aux pertes fer (les pertes Joule sont négligeables). On en déduit R_μ .

La puissance réactive Q se calcule par $S^2 = P^2 + Q^2$ où $S = V I$ (puissance apparente mesurée en volt-ampère), $P = V I \cos\phi$ et $Q = V I \sin\phi$. On en déduit X_μ . On sait que $X_\mu = L\omega$ et $L = \mu_0 \mu_r n_1^2 s/l$ (le secondaire ouvert n'intervient pas sur le flux magnétique) où s est la section du fer et l la longueur du circuit magnétique. On en déduit la perméabilité relative du fer qui doit être élevée ($\mu_r > 1000$)

Dans l'essai en court-circuit, les pertes fer sont négligeables : dans toute machine en court-circuit (cf 2-6) le flux dans le fer est très faible et il y a proportionnalité entre I_2 et I_1 . L'approximation de Kapp est vérifiée.

La mesure de la puissance active P_{cc} (court-circuit) mène à la résistance R_1 : résistance totale du transfo vue du primaire, à comparer avec sa valeur théorique $R_1 = r_1 + (n_1/n_2)^2 r_2$. On en déduit aussitôt R_2 .

Le calcul de la puissance réactive Q_{cc} conduit à L_1 , inductance totale de fuites du transfo vue du primaire. La comparaison avec la valeur théorique sans fer $L_1 = 2l_1$ indiquée sur les bobines (pour un solénoïde $l_1 = \mu_0 n_1^2 s/l$) devrait mener à une valeur de μ_r proche de 1 puisque les fuites ont lieu dans l'air.

2-5) Essais du transfo en charge

En charge résistive ou inductive, la prévision des pertes fer $p_f = V_1^2 / R_\mu$ et Joule $P_J = R_2 I_2^2 = R_1 I_1^2$ doit mener à des valeurs du rendement $\eta = (P_1 - p_f - P_J) / P_1$ proches de celles mesurées $\eta = P_2 / P_1$.

Enfin, si l'hypothèse de Kapp est vérifiée (proportionnalité entre I_1 et I_2 : $I_1/I_2 = n_2/n_1$) et si les mesures de R_2 et $L_2\omega$ sont fiables, on devrait pouvoir prévoir la chute de tension au secondaire $\Delta V_2 = V_{20} - V_2$ (V_{20} tension secondaire à vide).

Bien sûr en charge résistive $\cos\phi=1$ et $\Delta V_2 = R_2 I_2$, et en charge inductive on prendra $\cos\phi=0$ (à justifier) si bien que $\Delta V_2 = L_2 \omega I_2$.

Transformateur monophasé

PARTIE EXPERIMENTALE

Cette séance est consacrée à l'étude du fonctionnement d'un transformateur monophasé. Nous analyserons successivement les caractéristiques d'un tel équipement électrique.

Ce T.P. passe en revue les différents essais que font les industriels pour déterminer les performances d'un transformateur avant de le mettre sur le marché. A l'issue de cette séance, vous devez être capable de déterminer les caractéristiques à inscrire sur la fiche signalétique (aussi appelé plaque à bornes) d'un transformateur.

De même vous devez être capable de déchiffrer les caractéristiques inscrites sur un transformateur que vous venez d'acquérir.

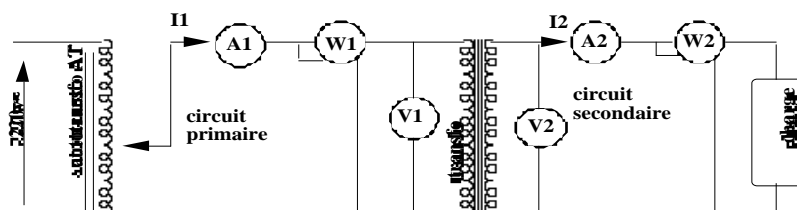
Au cours de ces mesures, vous devez avoir l'occasion de vérifier les lois fondamentales de l'électromagnétisme vues en lycée ou en DEUG : loi de Lentz, cycle d'hystérèsis, pertes magnétiques, pertes joules, puissances actives, puissances réactives...

Il est bon, au terme du TP, de retenir au minimum :

- les notions de tensions nominales, courants nominaux, pertes joules, pertes fer, puissances actives, puissances réactives...
- savoir utiliser un wattmètre en courant alternatif monophasé, un ampèremètre et un voltmètre aussi bien sûr
- savoir lire une fiche signalétique (plaque à bornes).

1 - Essais d'un transformateur monophasé

Les 3 types d'essais qui vont suivre vont être effectués sur un transformateur qui n'est pas un transformateur industriel : il a plus de pertes pour qu'on puisse plus facilement les mesurer. Ces essais seront menés selon le montage général suivant :



AT : auto transformateur 220V/V₁ . Cet appareil est dangereux : ne pas manipuler son circuit quand il est sous tension.

A1 et A2 : ampèremètres pour mesurer les courants I₁ primaire et I₂ secondaire

V1 et V2 : voltmètres pour mesurer les tensions V₁ primaire et V₂ secondaire

W1 et W2 : wattmètres pour mesurer les puissances actives P_1 consommée au primaire et P_2 délivrée au secondaire. On obtient la puissance réactive Q (exprimée en VAR) par : $Q = (S^2 - P^2)^{1/2}$ où la puissance apparente est donnée par $S = V I$ (ou encore par $P = S \cos \phi$ et $Q = S \sin \phi$)

Attention : un wattmètre coûte cher (6000F), on le branche comme indiqué au dos de l'appareil (mesure en monophasé) et **le calibre intensité du wattmètre (circuit gros fil) ne doit pas être inférieur à celui de l'ampèremètre**. Comme toujours en électricité on câble d'abord les appareils du circuit intensité (en série), puis les appareils en dérivation (voltmètre et fils fins du wattmètre). Penser à vérifier fréquemment les zéros des wattmètres (entre chaque série de mesures). Pour tous les essais qui suivront utiliser les circuits 1000 et 500 spires cotés primaire et secondaire respectivement.

2 - Essai du transfo à vide - Mesure des pertes fer

A vide $I_2 = 0$ et $I_1 = I_{10}$. On ne câble donc ni W2 ni A2, seulement V2.

Relever le courant I_{10} , la puissance active P_{10} et la tension secondaire V_{20} en fonction de V_1 ($0 < V_1 \leq 200$ volts, ≈ 10 points) et tracer $V_{20}(V_1)$. L'étude du rapport V_2/V_{10} en fonction de V_1 permet-il de retrouver la valeur attendue du rapport de transformation? Y a-t-il saturation du fer?

Evaluer les pertes Joule pour la valeur maximum du courant et comparer à la valeur P_{10} mesurée.

Conclusion ?

Les pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique maximum régnant dans le noyau de fer, donc au carré de la tension V_1 . Pour le vérifier tracer ces pertes P_{10} en fonction du carré de V_1 et déterminer graphiquement la résistance R_μ . De même tracer la puissance réactive Q_{10} en fonction du carré de V_1 et déterminer graphiquement la réactance X_μ . En déduire la perméabilité relative du fer sachant que $X_\mu = L\omega$ et $L = \mu_0 \mu_r n_1^2 S/l$. S est la section du fer : $4,4 \times 4,4 \text{ cm}^2$ et $l = 50 \text{ cm}$ sa longueur.

3 - Essai en court-circuit - Mesure des pertes Joule

En court circuit $V_2 = 0$: on ne câble ni V2 ni W2 seulement A2. En fonction de V_1 ($0 < V_1 \leq 200$ volts), relever I_{1cc} , I_{2cc} , et P_{1cc} (≈ 10 points).

En court-circuit la seule tâche du courant secondaire (à peine entravée par $r_2 + j l_2 \omega$) est de créer un champ magnétique dans le fer qui s'oppose à tout instant au champ imposé par le courant primaire. L'induction magnétique dans le fer est donc faible, les pertes fer négligeables et l'approximation de Kapp justifiée : $n_1 I_1 + n_2 I_2 = 0$

Déterminer graphiquement le rapport I_{1cc}/I_{2cc} et le comparer au rapport de transformation. L'hypothèse de Kapp est-elle justifiée? Cette proportionnalité est très utilisée dans les transformateurs d'intensité pour mesurer des courants alternatifs supérieurs à 5A (le shuntage de l'ampèremètre n'est alors plus fiable).

Les pertes mesurées dans cet essai sont donc uniquement les pertes Joule dans les bobinages primaire et secondaire. Tracer P_{1cc} en fonction du carré de I_{1cc} et déterminer graphiquement la résistance R_1 du transfo vue du primaire. Comparer à la valeur théorique.

Calculer la puissance réactive Q_{1cc} puis tracer Q_{1cc} en fonction du carré de I_{1cc} et déterminer graphiquement l'inductance de fuites totale L_1 du transfo vue du primaire. Calculer la perméabilité magnétique relative correspondant à ces fuites. Dans quel milieu ces fuites ont-elles lieu?

4 - Essais en charge

4-1) Point de fonctionnement nominal

Quand on construit un appareil électrique, on l'optimise (rendement maximum) pour certaines conditions de fonctionnement. Ces valeurs de paramètres (puissance, courant, tension, etc...) sont dites nominales et elles sont gravées sur la plaque signalétique de l'appareil. Le rendement η d'un transfo est donné par :

$$\eta = P_2/P_1 = (V_1 I_1 \cos\phi_1 - p_f - p_J) / V_1 I_1 \cos\phi$$

Démontrer qu'il est maximum lorsque les pertes fer $p_f = V_1^2/R_\mu$ sont égales aux pertes Joule $p_J = R_1 I_1^2$, c'est à dire lorsque la somme des pertes est minimum.

On choisit pour tension nominale $V_{1N} = 185V$. Quels sont le courant nominal I_{1N} et la puissance apparente nominale S_{1N} (exprimée en VA)?

4-2) Essais résistif et inductif

Sous tension nominale (185V) relever en fonction de la charge (résistive et inductive) V_1 , I_1 , P_1 , V_2 , I_2 , P_2 ($I_1 < 300$ mA, ne pas oublier le point de fonctionnement nominal, ≈ 10 points).

Calculer le rendement η du transformateur pour chacune des charges et tracer $\eta(I_1)$ (sur le même graphe). Peut-on dire qu'il est maximum pour la valeur nominale de I_1 ? A partir de V_1 et I_1 calculer les pertes du transformateur et en déduire les valeurs du rendement connaissant P_1 . Tracer $\eta(I_1)$ résistive et $\eta(I_1)$ inductive sur le même graphe que les courbes précédentes. Comparer les résultats. Que conclure sur l'utilité des essais à vide et en court-circuit ?

Que doit-on graver sur la plaque signalétique de ce transfo pour que son acheteur puisse l'utiliser sans surprise?

Facultatif : Relever la tension à vide V_{20} . Toujours à partir des mesures en charge, évaluer la chute de tension au secondaire $|\Delta V_2| = |V_{20} - V_2|$. Comparer avec ce qu'on peut théoriquement prévoir en faisant l'approximation de Kapp et en supposant que $\Delta V_2 \ll V_{20}$, i.e. que V_{20} et V_2 sont parallèles et $\Delta V_2 = R_2 I_2 \cos\phi_2 + L_2 \omega I_2 \sin\phi_2$ car $\Delta V_2 \approx OK = OH + HK$ (cf figure)

Pour quelle charge inductive ou résistive ce calcul prévisionnel est-il le plus satisfaisant? Pourquoi?