

MP 21 – Production et conversion d'énergie électrique

31 mai 2021

Pascal Wang & Clément Gidel

Commentaires du jury

Bibliographie

⚡ *Electrotechnique PSI*, **Precis Bréal**
⚡ *Electronique II*, **Hprépa**

→ Transfo + CC

→ Deux chapitres sur le transformateur, avec un TP cours, et la CC.

Table des matières

1	MCC en génératrice : production d'énergie électrique.	2
1.1	Rappels	2
1.2	Étude électrique à vide	3
1.3	Étude électrique en charge	3
1.4	Rendement	4
2	Transformateur : conversion alternatif-alternatif.	4
2.1	Etude à vide : rapport de transformation	5
2.2	Rappel sur les pertes	5
2.3	Etude à vide et pertes fer	6
2.4	Pertes cuivre	6
2.5	Étude en charge et rendement.	7
2.6	Remarques sur le transformateur	7
3	Redressement : pont de Graetz	8

Préparation

Matériel. Demander 7 voltmètres.

Introduction

Plusieurs types d'énergie peuvent être converties en énergie électrique : l'énergie hydraulique, l'énergie thermique (charbon ou fuel) et l'énergie nucléaire. Les différentes étapes de la production sont caractérisés par des conversions mécanique-électrique ou électrique-électrique. Rappelons que la plupart des appareils électriques fonctionnent sur du 220V efficaces à 50Hz. Cependant, l'électricité est transportée du lieu de production (centrales) vers les lieux de consommation (usines, foyers) dans des lignes à haute tension afin de minimiser les pertes énergétiques. Elle est convertie par des transformateurs. Nous allons décrire dans ce montage les méthodes pour produire et convertir l'énergie électrique à travers l'étude de la génératrice à courant continu et celle du transformateur. Nous nous attacherons à caractériser les pertes et définir le fonctionnement nominal de chaque dispositif.

1 MCC en génératrice : production d'énergie électrique.

Nous allons commencer par étudier la production d'énergie électrique à partir d'énergie mécanique avec la machine à courant continu en fonctionnement génératrice.

1.1 Rappels

La machine à courant continu a été imaginé par Ampère et la première dynamo a été inventée en 1871 par Gramme. C'est une machine réversible, on peut l'utiliser soit comme moteur soit comme génératrice, ici on l'étudie uniquement en génératrice. Son fonctionnement est basé sur l'induction.

Composition :

1. Le stator (fixe) qui joue le rôle d'inducteur. Il est généralement composé d'un électroaimant alimenté par un courant I_e qui génère un champ magnétique B (mais parfois, il est constitué d'aimants permanents, il n'est alors pas nécessaire d'alimenter l'inducteur).
2. Le rotor (mobile) qui joue le rôle de l'induit. Il est composé d'enroulement de spires alimentées par un courant I .
3. Entre le rotor et le stator, il y a l'entrefer. Il est construit le plus étroit possible pour limiter les pertes .
4. Il y a aussi un système de communication balai (en graphie) + collecteur (lames de cuivre isolées et solidaires du rotor où les spires du rotor sont soudées) qui permet de changer le sens de la force électromotrice induite au passage des lignes neutres. Si il y a assez de spires (ie de lignes neutres), la tension en sortie du redresseur est quasi-constante. METTRE IMAGE 6 c'est clair je trouve.

Modélisation :

La machine est un quadripole (C , Ω , U et I) décrite par deux équations de fonctionnement, une mécanique et une électrique.

$$\begin{array}{c|c} \text{Moteur :} & \text{Génératrice :} \\ U_m = k\Phi_m\omega + r_m I_m & U_g = k\Phi_g\omega - r_g I_g \\ C = k\Phi_m I_m - C_r & C = k\Phi_g I_g + C_r \end{array}$$

Où on a fait les hypothèses suivantes : en régime permanent ie sans auto inductance, et sans moment d'inertie du moteur.

Plan : on va (i) réaliser des mesures pour vérifier si ces modèles sont acceptables. (ii) on va déterminer les paramètres physiques qui apparaissent dans ces équations : le couple résistif, le terme $K\phi$ et la résistance d'induit. (iii) on va étudier le rendement et, pour le point où le rendement est maximal, on va utiliser les paramètres déterminés précédemment pour faire un bilan détaillé du rendement et du régime nominal (motiver cette partie que en industrie, il est important de trouver le régime nominal et de connaître les sources de pertes afin de les minimiser, connaître le rendement est aussi intéressant).

Remarques :

1. **Il faut toujours allumer en premier l'inducteur puis l'induit. Et éteindre induit puis inducteur.**
La tension de l'inducteur U_e est reliée à Φ_m . Si l'inducteur est éteint ($U_e = 0$) alors $\Phi_m = 0$ et si on impose une tension à l'induit ($U_m \neq 0$), alors $\omega = \infty$. Le moteur s'emballe.
2. Au démarrage $\omega = 0$. La tension fournie au circuit est alors $U_m = r_m I_m$. Or r_m est faible, et donc les intensités peuvent être élevées. Pour éviter une surintensité dans le moteur (qui peuvent endommager le moteur) **on place un rhéostat en série dans le circuit de l'induit au démarrage**. Après le démarrage, on peut ensuite baisser la résistance et court-circuiter le rhéostat, car $U_m = k\Phi_m\omega + r_m I_m$. Celui permet d'augmenter le rendement.
3. Ici on utilise le banc moteur-génératrice pour étudier la génératrice. Le moteur nous sert d'énergie mécanique, il faut donc l'alimenter (inducteur+induit). Le moteur représente par exemple un moteur thermique, une turbine en sortie de cascade, un générateur de vapeur, etc.
4. Il existe plusieurs types d'excitation : séparé (on alimente l'induit et l'inducteur avec deux alimentations différentes), parallèle, ou en série. Dans toute la suite, on va se placer en excitation séparé.

1.2 Étude électrique à vide

Pour commencer, on va réaliser une étude électrique de la génératrice à vide. Le but étant de déterminer le terme de couplage $k\Phi$ et de vérifier si les lois de fonctionnement sont vérifiées.

La génératrice est "à vide", on ne lui impose pas de charge (ce qui est équivalent à une impédance infinie), et donc $I_g = 0$. On obtient donc que $U_g = k\Phi_g\omega$, ce que l'on va vérifier.

Étude à vide

On utilise le banc moteur. On alimente l'inducteur du moteur et de la génératrice sous la tension nominale $U_e = 110V$. Avec un rhéostat de démarrage, on alimente l'induit du moteur. On fait varier U_m (tension de l'induit du moteur) et donc ω (que l'on mesure avec la génératrice tachymétrique) et on mesure U_g (la tension à vide de l'induit de la génératrice).

Branchements :

- A l'inducteur, on mesure à la fois I_e et U_e (comme ça on débranche jamais rien).
- A l'induit du moteur, on mesure U_m et ω avec la génératrice tachymétrique.
- A l'induit de la génératrice, on place un voltmètre pour mesure U_g

On trace U_g en fonction de ω . On trouve $k\Phi_g$.

Remarques :

- On doit trouver $k\Phi_g \approx 0.60Vs/rad$

1.3 Étude électrique en charge

On a étudié le fonctionnement à vide. Mais en pratique, on utilise la génératrice pour fournir de l'électricité à une charge. Ici on va utiliser un rhéostat, ie une charge résistive, qui modélise par exemple un grille-pain. Dans la réalité, les charges peuvent avoir une impédance complexe (moteur d'aspirateur).

Un courant peut maintenant traverser la charge, et l'équation de fonctionnement est donc $U_g = k\Phi\omega - r_g I_g$ et $C = k\Phi I + C_r$. On va maintenant déterminer la résistance de l'induit de la génératrice r_g et le couple résistif du moteur C_r . On décide de garder ω constant et de faire varier les autres grandeurs.

Étude en charge

On reprend le banc moteur.

Branchements :

- A l'inducteur on ne change rien
- A l'induit du moteur on ne change rien non plus
- On mesure maintenant C le couple du moteur avec ...

- On enlève le voltmètre de l'induit de la génératrice que l'on remplace avec un rhéostat de 100Ω . On place un ampèremètre pour mesurer I_g et un voltmètre pour mesure U_g la tension aux bornes de l'induit de la génératrice.

On fait varier la résistance du rhéostat et on ajuste U_m pour garder $\omega \approx 10Hz$ constant.

On mesure C , U_g , I_g (et I_e et U_e pour le rendement).

On trace $U_g = -r_g I_g + k\Phi\omega$ et $C = k\Phi I_g + C_r$. On trouve r_g , C_r et on peut vérifier deux fois $k\Phi$

Remarques :

- On a validé les lois de fonctionnement de la MCC.
- r_g de quelques ohm et C_r de l'ordre de $0.1N.m$.
- On peut aussi faire l'étude à C constant.

1.4 Rendement

Maintenant que l'on a trouvé les paramètres de fonctionnement, on étudier le rendement et trouver le fonctionnement nominal.

La puissance utilise est celle en sortie de l'induit de la génératrice $Pu = U_g I_g$ et la puissance consommée est celle de l'inducteur et aussi celle du moteur, donc le rendement est le suivant :

$$\eta = \frac{U_g I_g}{C\omega + U_e I_e}$$

Rendement

On ne prend pas de nouvelles mesures, à condition d'avoir relevé U_e et I_e à la manip d'avant.

On trace η en fonction de Pu , on doit obtenir une cloche. (il faut des valeurs de résistance assez faible pour bien voir la cloche).

On estime alors le couple nominal C , la tension nominale U_g et l'intensité nominale dans l'induit I_g pour $\omega = 10Hz$.

Remarques :

- Pour les valeurs nominales, dire à l'oral à quoi ça sert, aussi dire que normalement elles sont indiquées par le constructeur.
- On peut également envisager d'enlever le terme $U_e I_e$ du dénominateur de η , car il sert uniquement à fournir un flux ϕ_g qui pourrait être produit par un aimant permanent. En effet, ce terme $U_e I_e$ qui est constant ici, tend à dominer le terme $C\omega$ si ω n'est pas trop grand, et fausse donc un peu l'étude.
- Avec tous ces paramètres, on peut aussi estimer les pertes(induit, inducteur, frottement, magnétiques), grosses incertitudes car provient de la mesure de six autres paramètres. Pertes dans l'inducteur : $P_e = r_e I_e^2$ (r_e que l'on doit mesure aux bornes de l'inducteur), pertes dans l'induit $P_g = r_g I_g$ et pertes par frottement mécanique $P_f = C_r \omega$. Il y a aussi des pertes fer que l'on ne détermine pas ici.
- Avantages et inconvénients de la MCC. La MCC présente plusieurs avantages : elle est facilement réversible (moteur-génératrice), la vitesse de rotation est contrôlée par la tension de l'induit, et elle s'adapte à différentes charges. Mais la fragilité des balais du collecteur nécessite un entretien régulier. Elles ont été largement utilisées par le passé, en particulier pour la propulsion des locomotives électriques (premiers TGV, métro lyonnais...). On les retrouve aujourd'hui plutôt dans des applications à faible puissance (ventilateur, photocopieuse, essuie glace...) avec des stators composés d'aimants permanents. Les moteurs à fortes puissances sont maintenant constitués de machines à courant alternatif.

2 Transformateur : conversion aternatif-alternatif.

Le transformateur est un convertisseur d'énergie électrique **alternative**. Il transfère de la puissance électrique d'une source placée dans le circuit **primaire** à une charge placée dans le circuit **secondaire**.

Il peut être utilisé pour de l'adaptation de la source par rapport à la charge. Par exemple, les usines créent du 600V. Mais pour transporter cette énergie avec peu de pertes, il faut des hautes tensions (cela permet de minimiser

les pertes Joules. En effet, la puissance produite est $P_f = UI$, la puissance perdue est $P_d = RI^2$, donc $P_d = RP_f^2/U^2$, on utilise donc un transformateur pour passer à des tensions de $300kV$ sur les lignes (élévateur de tension). Arrivé chez l'utilisateur, on utilise un autre transformateur pour abaisser la tension à $230V$ (abaisseur de tension). On trouve aussi des transformateurs dans les chargeurs de téléphone pour convertir le $230V$ en $12V$. En plus de cela, il peut aussi être utilisé pour isoler une source et la charge (dans les salles de bain par exemple, pour éviter l'électrocution). On utilise aussi des transformateurs pour chauffer par effet Joule (avec un circuit à 1 seule spire dans le secondaire, l'intensité devient très élevée).

Le circuit primaire (source) et le circuit secondaire (charge) sont reliés à des enroulements bobinés (N_1 spires au primaire et N_2 spires au secondaire) sur un noyau ferromagnétique.

On va commencer par considérer le transformateur comme idéal.

2.1 Etude à vide : rapport de transformation

Hypothèse du transformateur idéal :

1. circuit magnétique LHI, $\mu_r = \infty$
2. il n'y a aucune perte de flux ($B=0$ en dehors du circuit magnétique)
3. on néglige les résistances des enroulements
4. (ps, on considère aussi la plupart du temps que le noyau est un tore, ici on va prendre une base carré, il y a donc des pertes car B n'a plus les bonnes symétries mais tant pis).

Avec ces hypothèses, on obtient (on note $U, I, \dots$ les valeurs efficaces (moyenne du carré/rms)) :

1. On note $m = N_2/N_1$ le rapport de transformation.
2. $U_2 = mU_1$ qui provient de la conservation du flux. $e_1 = -\frac{d\phi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi_{1spire}}{dt} = -\frac{N_1}{N_2} e_2$. Donc $U_2 = mU_1$.
3. $I_1 = mI_2$ en appliquant le théorème d'ampère. $N_1 i_1 + N_2 i_2 = \int H dl = 0$ car $\mu_R = \infty$.
4. La puissance (instantanée) est intégralement transmise du primaire au secondaire.

Mesure du rapport de transformation.

On utilise un transformateur fait maison avec deux bobines, et on branche l'alternostat. On peut directement mettre un wattmètre sur la primaire. Et on mesure U_2 avec un voltmètre au secondaire. C'est une étude à vide car $i_2 = 0$. On mesure U_2 pour différentes valeurs de U_1 et on retrouve le rapport de transformation $m = N_2/N_1$.

Remarque :

- Pour l'alternostat, ne pas le démarrer à 0, se mettre sur 5% au démarrage. Remettre à 0% quand on veut changer le câblage.
- Toujours vérifier que le courant dans les bobines ne dépasse pas le courant limite indiqué. Pour l'étude à vide ça ne pose pas de problème mais faire attention pour la suite.
- Pourquoi un wattmètre et pas un ampèremètre et un voltmètre ? Ici, on s'intéresse à la puissance moyenne $P = \langle ui^* \rangle$. En cas de déphasage, $\langle ui \rangle \neq \langle u \rangle \langle i \rangle$ et donc on n'a pas accès à la puissance. Le wattmètre multiplie les deux signaux + passe bas pour avoir la puissance moyenne.

2.2 Rappel sur les pertes

On a considéré le transformateur comme idéal, il aurait un rendement de 100%. Or dans l'industrie, les transformateurs peuvent atteindre des grands rendements (99%) mais il y a tout de même des pertes. Pour une distribution à grande échelle, il est important de connaître les pertes et le rendement et une bonne modélisation de l'appareil. Nous allons étudier tout ça avec la méthode des pertes séparées.

Tout d'abord, il existe plusieurs types de pertes :

1. Les pertes cuivre, qui sont les pertes dans les bobinages. On les modélise par une résistance en série du primaire (R_1) et du secondaire (R_2) (pertes dans les bobinages que l'on peut/doit mesurer à l'ohmmètre). Il y a aussi des pertes de flux de les bobines. Ces pertes sont modélisées par des inductances (L_1, L_2) en série.

- Les pertes fer qui sont lié a circuit magnétique. Elles sont de deux types : courants de Foucault et pertes lors du parcourt du cycle d'hystérésis. Les pertes par courants de Foucault sont en $P_F \propto f^2 B^2$. Et les pertes par hystérésis sont en $P_H \propto f \cdot \int_{\text{cycle}} H dB$. Les pertes fer ne dépendent que de f et de B . Or B dépend uniquement de U_1 (U_1 lié à Φ qui est lié à B) et non de I_1 . On obtient donc que $P_f \propto U_1^2$. Pour les pertes par hystérésis, c'est un peu (beaucoup) plus compliqué. En fait $P_H \propto U_1^\delta$ avec δ le coefficient de Steinmetz qui est entre 1.6 et 2. Une grosse approximation est donc de dire que $P_{fer} = 1/R_F U_1^2$. Quand on va plotter ça en log log on voit que c'est absurde, mais ça marche pour le bilan des pertes à la fin alors pourquoi pas. Mais toutefois attention, on a obtenu une relation sur la puissance avec une résistance, mais on ne peut pas appliquer la loi des mailles et $i \neq u/R_F$.
- La relation $I_1 = m I_2$ n'est pas strictement vérifiée. En effet si $\mu_r \neq \infty$, alors $i_1 + N_2/N_1 i_2 = i_m \mathcal{R} \Phi$ le courant magnétisant. Or $u_1 = -d\phi/dt$. On rajoute donc une inductance L en parallèle.

On va réaliser une étude des pertes séparées. En effet, les pertes cuivre dominant à fort courant, on va les estimer lorsque le secondaire est en court circuit. Les pertes cuivres dépendent de U_1 , et dominant aux hautes tensions, on va les estimer lorsque le secondaire est à vide.

2.3 Etude à vide et pertes fer

On commence par l'étude des pertes fer.

Pertes fer

On garde le même montage qu'avant. On fait varier U_1 et on mesure U_1 , I_1 , P_1 et U_2 .

On trace P_1 en fonction de U_1^2 . En linéaire on trouve le coefficient $1/R_F$. Si on veut le mentionner, on peut tracer en log log et dire seules les pertes par courant de Foucault sont en U_1^2 et que pour les pertes par hystérésis, c'est plus compliqué.

On peut aussi tracer I_1 en fonction de U_1 et montrer que le transformateur n'est pas un dipole linéaire (les non linéarités viennent du cycle d'hystérésis).

Remarques

- Pour limiter les pertes par courant de Foucault, on utilise des matériaux feuilleté. Pour limiter les pertes par hystérésis, on utilise des ferromagnétiques doux.
- On a seulement linéarité pour des valeurs inférieures à 110V, au dessus, le courant augmente rapidement ! **Voir pourquoi.** L'incertitude associée est pas aussi importante qu'avec Antoine Chauchat, bizarre. De plus, on trouve une valeur un peu plus faible OK. **Il peut être bien d'estimer des pertes par courant de foucaults comme suggéré par le correcteur (conductivité métal,**

2.4 Pertes cuivre

Pas vraiment le temps de les présenter si on fait le redressement. On peut cependant le faire en préparation pour voir l'évolution des différentes pertes Les pertes cuivre dominant à hauts courants et faibles tensions. On fait donc une étude en court circuit.

On va vérifier les deux relations : $P_1 = (R_1 + R_2/m^2)I_1^2$ et $U_1 = \sqrt{(R_1 + R_2/m^2)^2 + \omega^2(L_1 + L_2/m^2)^2} I_1$.

Pertes cuivre

On mesure les résistances des bobines à l'ohmètre.

On remplace le voltmètre par un ampèremètre. Attention, cette fois il faut faire attention à la limite en courant.

On fait varier U_1 et on mesure P_1 , I_1 et I_2 .

On trace $P_1 = f(I_1^2)$ et on trouve $R_1 + R_2/m^2$. On compare aux valeurs qu'on avait déjà trouvé.

On trace $U_1 = f(I_1)$. On vérifie que cette fois on a bien un dipôle. (c'est de la dissipation par effet joule, et pour un dipôle résistif, on a bien $u = ri$). On trouve alors la valeur de $\omega(L_1 + L_2/m^2)$. On peut comparer au R_F des pertes fer, et on trouve des impédances bien plus faibles.

Remarques :

- Dans un vrai transfo, ces pertes sont plus faibles car bobine plus proche du ferro et donc moins de pertes de flux.

2.5 Étude en charge et rendement.

On va s'intéresser ici qu'à l'évolution des différents pertes et du rendement. On peut alors évaluer les contributions de chaque perte et voir l'évolution du rendement. Un transformateur doit être adapté à la source et à la charge auxquelles il est relié. Pour cette raison, les constructeurs précisent les caractéristiques suivantes : la fréquence d'utilisation, la tension d'alimentation primaire, la tension de sortie à vide et la puissance apparente. On parle de grandeurs nominales, telles que le rendement soit maximal. On souhaite faire une mesure de rendement, directement car on s'intéresse au régime nominal. But de l'expérience : quelle est l'intensité d'utilisation (intensité dans le secondaire) qui offre le meilleur rendement ?

Bilan en charge

On place un rhéostat de 100Ω et on met un wattmètre sur le secondaire. On va faire une étude à $u_1 = 230V$ (**En pratique on peut pas atteindre un tel ampérage sans faire sauter les plombs. On va alors seulement mesurer les puissances P_1 et P_2 avec U_1 , I_2 . On peut mettre une charge réaliste de l'ordre de 50Ω qui correspond à ce qu'on peut avoir, comme un câble coax.**

On mesure I_1 , P_1 , U_2 , I_2 , P_2 pour différentes charges (faire attention à la limitation en courant).

On va alors tracer les caractéristiques en charge en fonction du courant au secondaire I_2 . On trace en premier I_1/I_2 , U_2/U_1 . Puis P_2/P_1 en fonction de I_2 .

On peut aussi faire un bilan des pertes. $P_f = e_1^2/R_F \approx U_1^2/R_F$, $P_c = (R_2 + m^2 R_1)I_2^2$ que l'on sait calculer. On trace P_2 , P_1 , P_f , P_c et $P = P_2 + P_f + P_c$ sur une échelle à gauche et le rendement à droite. On doit trouver que $P = P_1$ et on peut discuter des différentes contributions. On trouve aussi le point nominal pour une tension au primaire de $230V$ (qui est ce qu'envoie EDF).

Remarque : L'étude à $u = 1230V$ à rhéostat variable permet d'étudier le transformateur en supposant qu'on le branche sur une prise d'EDF. Si on utilise un transfo tout fait, le constructeur indique la tension nominale au primaire, donc il faut faire l'étude à cette tension. Pour le transfo fait maison, il n'y a pas d'obligation. On pourrait aussi faire à charge fixée (on sait ce que l'on met en sortie) et on se demande quelle tension, courant envoyer pour avoir le meilleur rendement pour notre charge.

Interprétations :

- I_1/I_2 en fonction de I_2 . On observe une décroissance vers le rapport m théorique. En effet, $I_1^{mesure} = I_1 + I_m^0$ avec I_m^0 le courant magnétisant. Et $I_1 = mI_2$ donc $I_1^{mesure}/I_2 = m + I_m^0/I_2$.
- U_2/U_1 en fonction de I_2 . Le rapport U_2/U_1 vaut m à faible courant, puis décroît très faiblement. On peut l'expliquer avec les pertes cuivre du secondaire et du primaire. $u_2 + R_2 i_2 + L \frac{di_2}{dt} = e_2$ et $e_2 = -me_1$. Donc $u_2 = mu_1 - (R_2 + m^2 R_1 + (L_2 + m^2 L_1) \frac{d}{dt})i_2$.
- Rendement P_2/P_1 en fonction de I_2 . On observe que le rendement augmente avec I_2 . Puis on observe parfois la décroissance à I_2 élevé.
- Les lois des courants et des tensions apparaissent comme deux lois limites. La loi des courants est valable à haut courant, lorsque l'on peut négliger le courant magnétisant. La loi des tensions est valable à bas courant, quand les pertes cuivres sont négligeables. On remarque que dans les conditions nominales d'utilisation, le rendement est plutôt bon. En plus ici on utilise un transfo fait maison, où ni les pertes cuivre ni les pertes fer sont optimisées donc on peut s'imaginer que dans l'industrie on obtient de très bons rendements.
- Je trouve un rendement max de environ 80% au voisinage de 85 V. La loi des tensions est bien vérifiée, alors que celle des courants bof, surtout qu'on a une forte diminution de I_2/I_1 avec U_1 (à cause de l'intensité résiduelle).

2.6 Remarques sur le transformateur

- On peut faire remarquer que l'alternostat est un transformateur avec un seul enroulement.

*

3 Redressement : pont de Graetz

On reprend ce qu'on fait dans le poly. Il est aussi à noter qu'on fait seulement qqch de qualitatif, montrer le redressement suivi du lissage c'est pas mal déjà !

Conclusion

Ouverture sur une autre méthode de production/transformation de l'énergie électrique : redresseur pour alternatif continu, ou le hacheur pour continu/continu.

Passage

Questions

- Comment marche une machine synchrone, asynchrone ? Machine synchrone : on crée un champ tournant avec des bobines triphasées, le rotor a un moment magnétique constant (aimant permanent ou électroaimant alimenté par un courant permanent) tourne à la même vitesse que le champ magnétique. Machine asynchrone ? Le rotor est une bobine en circuit fermé qui a un moment magnétique induit. Il ne tourne pas à la même vitesse que le champ magnétique.
- Est-ce que la MCC est encore utilisée de nos jours ? Dans les métros et les jouets mais le stator est un aimant permanent. Ce n'est plus trop utilisé dans les TGV, qui utilisent des moteurs asynchrones.
- Comment marche la génératrice tachymétrique ? C'est une MCC aussi. En a-t-on vraiment besoin ? On pourrait faire une mesure de vitesse de rotation optique.
- Comment démarrer une MCC ? Allumer inducteur puis induit. Utiliser un rhéostat de démarrage pour ne pas appeler trop de courant. Est-ce que c'est grave de démarrer l'induit avant l'inducteur ? Oui, sinon le moteur s'emballe. Peut-on inverser les branchement des alimentations de l'inducteur et l'induit ? Oui, cela n'a pas d'importance.
- Comment marche un couplemètre ? Avec des jauges de contrainte qui se déforment en fonction du couple exercé. Quel capteur fonctionne pareil ? Capteur de force.
- Rendement, définition alternative ? Est-ce que la puissance utile c'est toujours $U_g I_g$? Pas quand c'est un moteur, c'est la puissance mécanique qui devient la puissance utile.
- Le rendement, ça varie comment ? C'est maximum en la valeur nominale et autour ça décroît.
- Rappeler le théorème d'Ampère et la loi de Faraday appliquées au transformateur. NB : dans le transformateur parfait, l'intégrale de H est nulle.
- Expliquer les pertes par hystérésis. Le matériau ferromagnétique dissipe une énergie égale à l'aire du cycle (B, H) . Pourquoi a-t-on besoin d'un matériau ferromagnétique ? Il permet de canaliser le flux créé par une bobine vers l'autre.
- Schéma équivalent pour les pertes fer ? Bobine et résistance en parallèle.
- En quoi le ferromagnétique utilisé est particulier dans sa construction ? Il est feuilleté. Ça limite les courants de Foucault. Pourquoi ? Les boucles de courant circulent perpendiculairement au champ magnétique, il faut donc feuilletter dans un plan contenant le champ magnétique. Quel matériau utilise-t-on pour l'isolation ? L'oxydation ou un vernis isolant électrique.
- Caractériser le signal reçu au secteur. 230 V et 50 Hz. Pourquoi 230 V ? C'est un décret de 1980, pour harmoniser. Historiquement, Tesla a estimé que 60 Hz était la fréquence qui permettait d'obtenir le meilleur rendement pour les générateurs de courant alternatif. Dans les autres pays ? Aux Etats-Unis 100-127 V/60Hz. Le 240 V est adapté pour le transport des grandes distances. Inertie de l'histoire : au début 110V aux US car c'est ce qu'on savait faire. Puis en Europe 110V aussi. Après la guerre, on est passé au 220V car c'est plus fiable, mais les US sont restés à 110V car habitude.
- Est-ce que c'est rigoureusement du 50 Hz ou pas ? Y a une marge de manœuvre mais les centrales essaient de se synchroniser.
- C'est quoi un hacheur ? On hache un signal avec un interrupteur commandé : un transistor MOSFET.

- Manip surprise : convertir alternatif vers continu. Construire un pont de Graetz et un lisseur. Est-ce que ça marche bien comme montage ? Il faut bien régler le temps caractéristique du RC. Pour des grosses tensions OK, sinon on est sensible au seuil de la diode.

Commentaires

- On peut en faire plus : par exemple le hacheur, ne pas utiliser celui qui est tout fait dans la collection, ou bien le redressement avec le pont de Graetz.
- Motiver le moteur à courant continu : parler de la production d'électricité.
- Soigner les transitions.
- Souligner que les transformateurs ont de très bons rendements, et qu'on les utilise dans la vie de tous les jours (chargeurs de téléphone par exemple).

Questions des années précédentes

- Questions sur le redresseur et le hacheur.
- Origine physique des lois $U_2 = mU_1$ et $I_2 = I_1/m$. La première provient de la conservation du flux magnétique total dans le noyau magnétique et de l'application de la loi de Faraday sur l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire. La seconde provient de l'hypothèse d'une transmission intégrale de la puissance du primaire vers le secondaire, ce qui se traduit par $U_1 I_1 = U_2 I_2$. Elle est moins robuste que la première et est mise immédiatement en défaut en essai secondaire à vide.
- Pourquoi EDF préfère-t-il utiliser des hautes tensions pour le transport d'électricité ? Car on veut transporter une puissance fixée UI tout en minimisant les pertes joules en rI^2 sur les lignes.
- La relation $U_2 = mU_1$ prévoit que lors de l'étude avec secondaire court-circuité ($U_2 = 0$), on a $U_1 = 0$. Pourquoi n'est-ce pas le cas en pratique ? Car la relation utilise des hypothèses qui ne sont plus vérifiées. En particulier les résistances des bobinages ne sont plus négligeables, surtout si les courants sont importants, et engendrent des chutes de tension.
- La relation $I_2 = I_1/m$ prévoit que lors de l'étude avec secondaire ouvert ($I_2 = 0$), on a $I_1 = 0$. Pourquoi n'est-ce pas le cas en pratique ? Encore une fois, certaines hypothèses ne sont plus vérifiées. En particulier comme la tension U_1 n'est pas nulle, le cycle d'hystérésis est parcouru et il y a des pertes fer. La puissance dissipée dans ces pertes fer doit bien provenir de quelque part : c'est la puissance envoyée dans le primaire (ce qui nécessite donc $I_1 \neq 0$). De façon générale on montre que l'on a la relation $n_1 I_1 + n_2 I_2 = n_1 I_0$, avec I_0 le courant magnétisant. Lorsque I_1 et I_2 sont grands devant I_0 , on a bien la relation $I_2 = I_1/m$. Mais pas lorsqu'ils sont faibles. En particulier si $I_2 = 0$ on trouve $I_1 = I_0$. On note que $I_0 \propto 1/\mu_r$, et devient nul dans la limite d'un noyau de perméabilité magnétique μ_r infinie.
- Aurait-on pu relier la génératrice au transformateur ? Non, car le courant est continu.
- Y a-t-il une force qui s'exerce sur les bobinages du transformateur ? Oui, une force de Laplace radiale dirigée vers l'extérieur au double de la fréquence de travail.
- Fonctionnement de multimètre, tachymètre et couplemètre.
- Couplemètre : *Le couplemètre mécanique est un ressort de torsion qui est gradué et calibré pour donner une correspondance de mesure de couple. Le couplemètre électronique est de façon simplifiée un instrument portable qui contient un capteur de couple, une carte électronique, un logiciel et un afficheur. Le capteur de couple est un système électronique qui est utilisé pour convertir un couple en un signal électrique. De part sa conception mécanique, le couple appliqué déforme des jauges de contraintes. Ces jauges de contraintes convertissent la déformation (stress mécanique) en un signal électrique. Le logiciel et l'électronique du couplemètre se chargent alors de convertir la tension de sortie du capteur en une valeur de couple qui est affichée sur l'écran.* En simple, un corps accéléré angulairement i.e. soumis à un couple se déforme. On mesure la déformation avec des jauges de contrainte, et on relie le signal au couple.
- Génératrice tachymétrique : une machine à courant continu en génératrice. Tachymètre : roue avec surface réfléchissante, laser qui est réfléchi dessus avec un compteur.

- Quelles sont les différentes façons de faire fonctionner la MCC en génératrice ? en shunt (parallèle) ou à excitation séparée. Qu'est-ce que ça change si les bobinages du stator et du rotor du moteur à courant continu sont alimentés en série/parallèle ? En parallèle, le flux est proportionnel à U , le réglage de ω est indépendant de la charge (ω constant, utile pour les perceuses). En excitation en série, $\Phi \propto I$, $C = U^2/K'\Omega^2$. Cela assure un couple maximal à vitesse réduite, adapté pour les démarreurs automobiles, traction électrique.
- Comment distinguer à vue d'oeil si c'est un moteur asynchrone ou une MCC au vu du bobinage ?
- A quoi ressemble le champ magnétique dans le moteur ? Radial dans l'entrefer, après il y a déviation à cause de la différence de perméabilité magnétique.
- $K\phi$ sur un vrai moteur, on le maximise ? Oui, pour ça on diminue l'entrefer
- Sous quelle tension marche le métro de Lyon ? La SNCF ? 750 V pour le métro (MCC toujours utilisée) et 1500V pour la sncf (machines synchrones et asynchrones)
- Que faire pour limiter les pertes Joule ? Matériau supra : pas rentable. À quel point on peut dépasser les valeurs nominales ? Ça dépend du temps. Une "règle" : on peut dépasser de 20% une dizaine de minutes.

Passage : Antoine Chauchat

Plan :

1) Production pour une génératrice à CC. On a l'arbre qui est en rotation, et on veut se servir du mouvement pour avoir une puissance. Une première mesure à vide permet de déterminer à $k\Phi_g$, caractéristique du moteur. En charge, on travaille à ω constant, et on relève le couple, I_g , U_g . Ce qui est important de préciser, c'est quelles grandeurs varient et lesquelles sont fixes. À vide c'est ω qui varie alors qu'en charge c'est I_g qui varie (et on trace le couple C et U_g).

2) Conversion par un transformateur parfait. On est dans le cas simple où $m = u_2/u_1$ donc on trace simplement l'un en fonction de l'autre, sachant qu'on est à vide car $i_2 = 0$. On fait la même mesure pour i_1 et i_2 , et on compare les mesures de m . On étudie ensuite les pertes fer, modélisation cf poly de tp, courants de Foucault (hystérésis) et canalisation des lignes de champ non infinie. On trace $P_1 = f(U_1^2)$, on a une grande incertitude sur les mesures de puissance : $R_f = (970 \pm 220)\Omega$. De même, avec $I_1 = f(U_1)$ on retrouve $L\omega = 420 \pm 2\Omega$.

3) Conversion de l'alternatif au continu : redressement et lissage (cf poly de Tp). Pont de diodes sert à redresser et lissage c'est RC en parallèle. On montre déjà le redressement qui marche bien.

CCI : On a vu toutes les étapes de la production à la batterie d'un téléphone.

Remarques / questions

- Pourquoi augmenter la tension à la base ? Cf Pascal, à puissance fixée, on veut minimiser l'intensité car les pertes Joules sont en RI^2 .
- Pourquoi $k\Phi_g$ est le même dans C ou U_g ? D'où il vient ? Loi de Faraday ! Explique pourquoi le rendement peut s'approcher de 1 ! Comment changent les inégalités si on étudie un moteur ?
- Autres pertes dans la MCC ? Pertes fers (magnétiques) ! Pas évident qu'il y ait des courants de Foucault car il faut que le conducteur voit un B variable. Il y a des courants induits dans la carcasse du stator et rotor. (?)
- Définition de l'entrefer dans la MCC ? Ce qu'il y a entre le stator et le rotor, on parle de carcasse, de cuicuit magnétique.
- Tension nominale ? Pourquoi 110 V ? C'est en terme de rendement. C'est là où ça fonctionne avec le meilleur rendement.
-  **Comment marche une génératrice dans la vraie vie ?** Un aimant permanent est utilisé, comme pour la dynamo d'un vélo. Génératrice tachymétrique aussi marche comme ça, c'est à vide. Pour les grosses puissances, comment ça marche ? Rotor en série avec le stator qu'on alimente une première fois.
- D'où vient la résistance interne dans la MCC ? Les balais ! Ça peut être bien de réfléchir à un ODG de la résistance du cuivre du rotor, histoire de comparer à une valeur attendue. Idem pour $k\Phi$.
- A quoi correspond le couple résistant ? Résistance des balais,
- Comment on peut voir des éventuelles sur intensités au démarrage ? En fait la résistance du rotor suffit.
- Pour le transfo, pq on mesure systématiquement une tension et une intensité plus faible ? Car Perte, intensité créée pour créer du H qui existe et est non nulle. Et Tension part dans effet Joule.

- Pourquoi on fait pertes séparées ? Quand on met des wattmètre, trop difficile de voir vraiment le rendement car les fluctuations sont trop importantes car les rendements sont trop importants. Il faut séparer les composantes pour pouvoir étudier séparément.
- A quoi sont liée les pertes pas hystérésis ? Energie consommée pour aller dans un sens et dans l'autre.
- R_f dépend de la tension par pertes par courant de Foucault mais aussi de la fréquence (car nombre de fois qu'on parcourt le cycle). Moralité : On approxime vraiment que $P_1 = U_1^2/R_f$.
- Calculer ODG des pertes fer dans le transfo ??? On compte le nombre de petites boucles et la conductivité du métal. On estime la puissance volumique et on multiplie par le volume. Tricky. L'idée est c'est plus judicieux de remonter à une grandeur physique qu'on peut mesurer ou estimer.
- Origine du bruit ? Force à cause d'un matériau aimanté dans un champ magnétique non constant, on a un bruit à $100Hz$ car la force est en B^2 donc valeur moyenne à fréquence 2 fois plus élevée.
- TB idée de maintenir le redresseur, ça boucle le fil directeur.
- Sur le tableau, préciser avec des flèche le sens de la tension pour mettre en évidence le redressement.
- QU'est ce qu'on fait après redressement ? Comment faire varier une tension continue ? Hacheur !