

# MP 21 – Production et conversion d'énergie électrique

30 mars 2020

Pascal Wang & Laura Guislain

## Commentaires du jury

### Bibliographie

↗ *Electrotechnique PSI, Précis Bréal*

→ Transfo + CC

↗ *Electronique II, Hprépa*

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

## Table des matières

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

## 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 graphite) + 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 ( $C$ ,  $\Omega$ ,  $U$  et  $I$ ) décrite par deux équations de fonctionnement, une mécanique et une électrique.

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

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  $\Phi_m$ . 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 fournit 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  $\omega$  (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  $\omega$  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  $\omega$ . 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  $\omega$  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  $100\Omega$ . 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  $\eta$  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  $\eta$ , car il sert uniquement à fournir un flux  $\phi_g$  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  $\omega$  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 (élevateur 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'ohmètre). Il y a aussi des pertes de flux de les bobines. Ces pertes sont modélisées par des inductances ( $L_1, L_2$ ) en série.

2. 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  $P_H \propto f \cdot \int_{\text{cycle}} HdB$ . Les pertes fer ne dépendent que de  $f$  et de  $B$ . Or  $B$  dépend uniquement de  $U_1$  ( $U_1$  lié à  $\Phi$  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  $\delta$  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  $i \neq u/R_F$ .
3. La relation  $I_1 = mI_2$  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.

### 2.4 Pertes cuivre

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 dipole 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.

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  $100\Omega$  et on met un wattmètre sur le secondaire. On va faire une étude à  $u_1 = 230V$ .

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.  $P_f = e_1^2/R_F \approx U_1^2/R_F, P_c = (R_2 + m^2R_1)I_2^2$  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.  $u_2 + R_2i_2 + L \frac{di_2}{dt} = e_2$  et  $e_2 = -me_1$ . Donc  $u_2 = mu_1 - (R_2 + m^2R_1 + (L_2 + m^2L_1) \frac{d}{dt})i_2$ .
- 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 tension 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.

**2.6 Remarques sur le transformateur**

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

**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'emballé. Peut-on inverser les branchements 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 États-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 le 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  $\mu_r$  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  $\omega$  est indépendant de la charge ( $\omega$  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.