

Production et conversion de l'énergie électrique

Matériel

- autotransformateur
- 4 wattmètres
- transformateur
- rhéostat pouvant aller jusqu'à 3,15 A
- rhéostat DEREIX 1,3 V/640 Ω
- alimentation stabilisée
- banc alternateur synchrone
- oscilloscope
- multimètre
- pont à diodes (ENSC 265)
- machine à courant continu

Introduction

Dans ce montage on s'intéressera à la production d'énergie électrique à partir d'une source d'énergie mécanique et à la conversion d'énergie électrique pour la distribution chez l'utilisateur à travers le système alternateur synchrone - transformateur qui est celui qui est aujourd'hui utilisé dans l'industrie.

I Transformateur

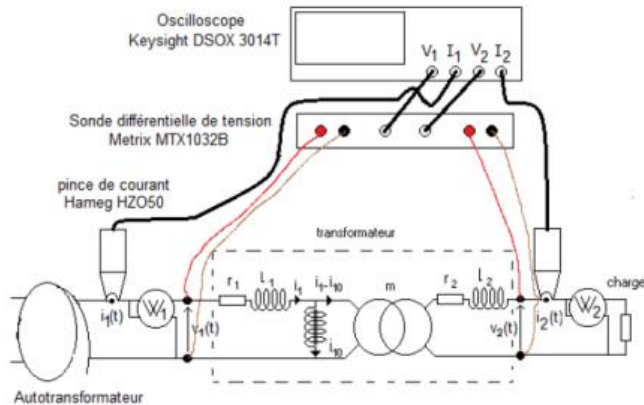
L'énergie électrique est transportée sous haute tension pour limiter les pertes dans les lignes, mais distribuée à faible tension. Pour effectuer cette distribution il faut adapter le niveau de tension sans toucher à la fréquence, on utilise alors des transformateurs. Un transformateur est constitué d'un circuit magnétique fermé sur lequel sont disposés des enroulements concentriques, correspondant au circuit primaire et au circuit secondaire. En jouant sur le nombre de spires, on peut jouer sur les rapports des tensions et des courants.

1) Rendement

On branche en série le primaire, un autotransformateur et un wattmètre (courant). On relie également le wattmètre et le primaire en dérivation (tension). On branche en série le secondaire, un rhéostat et

un 2^e wattmètre (courant). On relie également le wattmètre et le secondaire en dérivation (tension). On peut ainsi mesurer le courant et la tension de chaque circuit, ainsi que la puissance.

Le rendement s'écrit : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$



On fait varier le rhéostat et on mesure les courants, les tensions et les puissances et on trace le rendement en fonction de P_2 la puissance dissipée dans la charge.

L'incertitude majoritaire ici lors des mesures de U et I est celle du wattmètre : elle est donnée par le constructeur. Elle dépend de la plage de fréquence et de température sur laquelle on utilise les wattmètres. Ici on travaille avec le secteur, donc 50Hz, et à environ 25°C. Dans ces conditions l'incertitude sur U et I est donnée par la formule suivante : $\Delta X = 0,006X_{\text{calibre}} + 0,001X_{lu}$

$$P = UI$$

$$\Delta P = P \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Delta \eta = \eta \sqrt{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_2}{P_2}\right)^2}$$

On constate que le rendement est faible pour des faibles charges (car à une tension donnée les pertes fer sont les mêmes quelle que soit la puissance transférée à la charge), puis il sature à environ 0,8, ce qui n'est pas terrible, mais comme la puissance à transférer est faible, ce n'est pas trop grave. Par contre pour les puissances élevées, on veut absolument un rendement de 1, sinon la puissance perdue est énorme, ce qui ne manquera pas de chauffer le système et risquera de l'endommager. Dans l'industrie notamment, les rendements sont proches de 1.

2) Pertes

Nous allons maintenant caractériser les pertes. Les bobinages de cuivre ont une résistance, ce qui induit des pertes par effet Joule au primaire et au secondaire. On les mesure à vide (on débranche la charge) en imposant une tension continue (remplacer autotransformateur par alimentation stabilisée) au primaire puis au secondaire. $R = \frac{U}{I}$

On en déduit la puissance perdue par effet Joule dans les deux résistances (ne pas utiliser d'ohmmètre).

On s'intéresse maintenant aux pertes fer. Elles sont dues au fait que le matériau ne confine pas parfaitement les lignes de champs magnétiques.

On étudie le transformateur à vide : seul le primaire est parcouru par un courant (on remet l'autotransformateur). Les seules pertes sont alors les pertes joules dans la résistance r_1 et pertes fer dans le circuit.

$$P_1 = P_{\text{fer}} + P_{J1} \text{ donc } P_{\text{fer}} = P_1 - P_{J1} = U_1 I_1 - P_{J1}$$

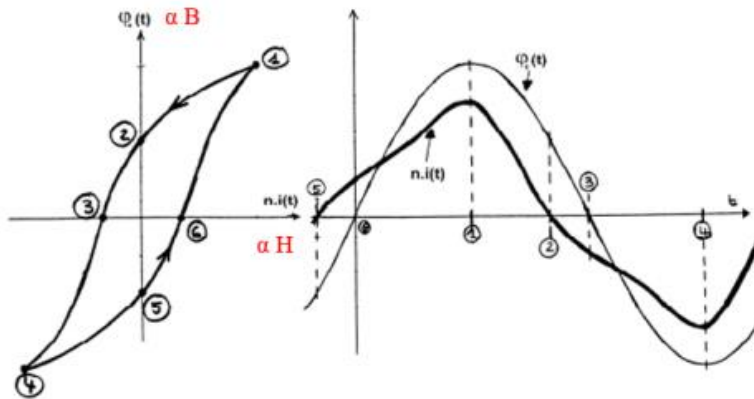
On fait varier le courant avec l'autotransformateur et on mesure le courant et la tension grâce au wattmètre, on en déduit P_{fer} . On trace alors P_{fer} en fonction de U_1^2 et on obtient une droite : $P_{\text{fer}} = K U_1^2$.

$$\text{Finalement, les pertes totales s'écrivent : } P_{\text{pertes}} = P_{\text{fer}} + P_{J1} + P_{J2}$$

$$\text{On compare ensuite aux pertes mesurées : } P_{\text{pertes}} = P_1 - P_2$$

3) Courant magnétique distordu

On travaille à flux forcé car on impose une tension d'entrée sinusoïdale. Or le matériau est non linéaire, d'où un courant distordu, correspondant à la réponse d'un système d'hystérésis à une sollicitation sinusoïdale :



On peut l'observer en étudiant le secondaire à vide : $N_1(i_1 - i_{10}) + N_2 i_2 = 0$

A vide, $i_1 = i_{10}$.

Mesure en utilisant une sonde de courant dont le fonctionnement est le suivant :

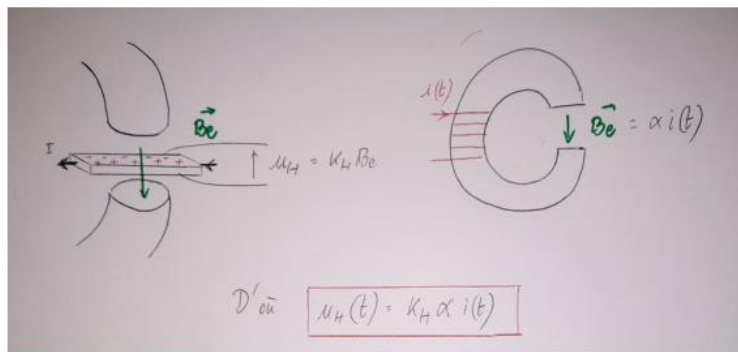


FIGURE 7: Première approche

On utilise l'effet hall pour récupérer une tension proportionnelle au champ dans l'entrefer lui-même proportionnel au courant qui entoure le circuit magnétique. Problème avec cette première approche : En faisant passer un courant on aimante le circuit magnétique donc même en revenant à 0 on aura toujours un tension de Hall.

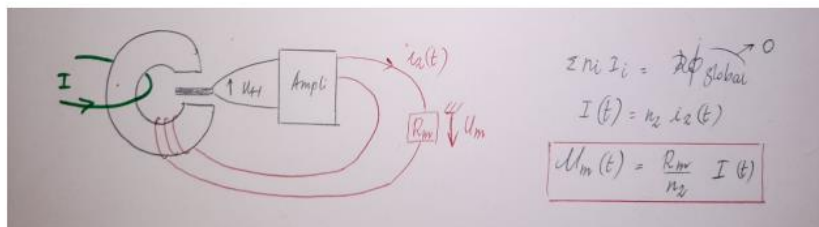


FIGURE 8: Deuxième approche

Deuxième approche : On rajoute un ampli et un second bobinage qui nous fabrique un courant i_2 qui crée un flux qui s'oppose au premier flux \rightarrow on impose un flux nul, le circuit ne s'aimante donc jamais. Puis on utilise une résistance de mesure pour obtenir le courant !

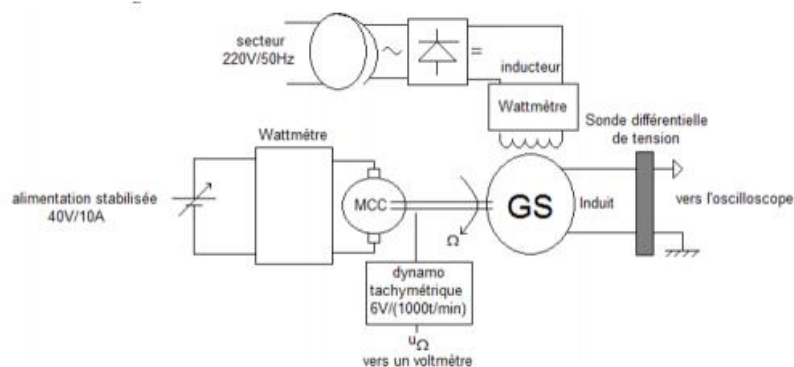
On observe le courant distordu à l'oscilloscope mais je n'ai pas pensé à prendre une photo... Pas trop mal même si ce n'est pas une mesure quantitative parce que c'est visuel et vraiment très rapide à montrer.

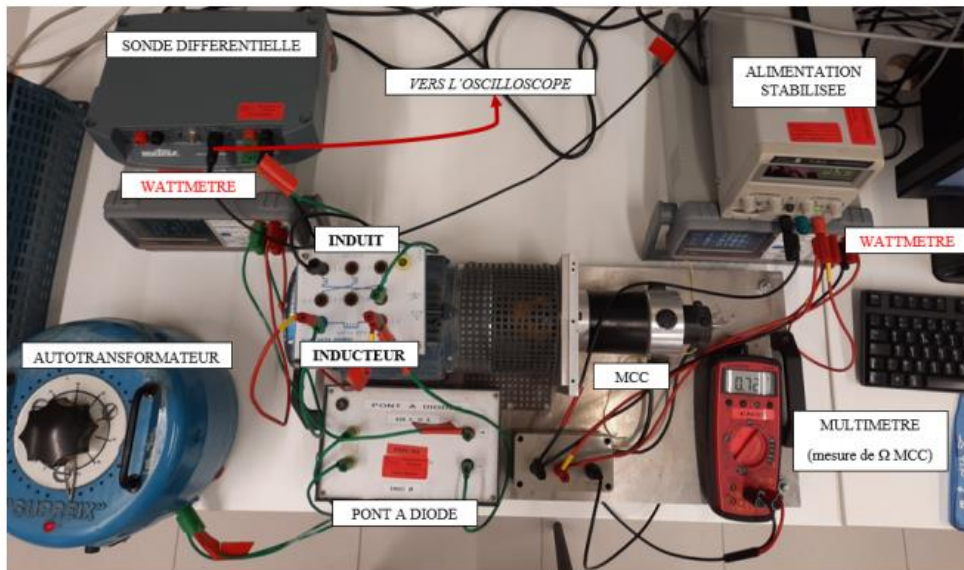
On sait comment changer le niveau de tension d'une ligne mais comment produire l'énergie électrique ?

II Alternateur synchrone

1) Étude hors-charge

Il faut veiller à ne pas dépasser 0,4 A pour l'inducteur, 1,4 A pour l'induit et 8 A pour le MCC.





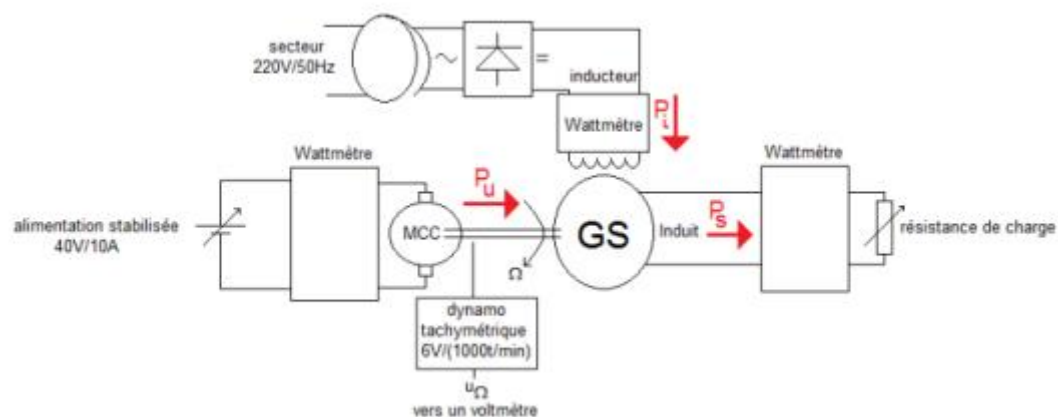
Autotransformateur relié au pont à diode ; pont à diode, wattmètre1 et inducteur en série (inducteur et wattmètre1 également en dérivation pour avoir la tension) ; alim MCC, alim stabilisée et wattmètre2 en série (alim MCC et wattmètre2 en dérivation pour avoir la tension) ; voltmètre relié à l'alim MCC pour récupérer une tension proportionnelle à la vitesse de la génératrice, $E = K\omega$, $K = 0,0573 \text{ V.s.rad}^{-1}$.

L'autotransformateur sert à régler la tension de sortie, et donc aussi le courant. Le pont à diode sert à redresser la tension alternative qui sort de l'autotransformateur pour appliquer un courant continu à l'inducteur. La sonde différentielle sert à atténuer les niveaux de tension envoyés à l'oscilloscope, les tensions dans l'induit étant de l'ordre de la centaine de Volts (peut-être pas nécessaire de l'utiliser).

Le MCC (source d'énergie mécanique ici) fait tourner le rotor à la vitesse ω . Le rotor, l'inducteur, est constitué d'un aimant permanent ou d'un bobinage qui génère un champ magnétique. Le bobinage du stator, l'induit, va donc voir un champ tournant à une fréquence multiple de la fréquence de rotation du rotor et délivrer une fem qui oscille à cette fréquence.

On mesure la tension de l'induit en fonction du courant imposé dans l'inducteur et on observe une saturation magnétique du rotor.

2) Étude en charge : rendement



Induit, rhéostat et wattmètre³ en série (induit et wattmètre³ en dérivation pour avoir la tension)

On impose une tension avec l'alim stabilisée, on fait varier le rhéostat et on relève les trois puissances, I_2 et ω

$P_i = P_1$ est la puissance fournie à la génératrice synchrone. $P_u = P_2 - P_{\text{pertes}} = P_2 - R_0 I_2^2 - P_{f+m}$

$P_s = P_3$

Le rendement s'écrit : $\eta = \frac{P_s}{P_i + P_u}$, on trace η en fonction de P_s

$P_{\text{pertes}} = 0,98 I^2 + (0,089 \pm 0,001)\omega + (7,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \omega^2$

3) Pertes

Si on alimente le MCC, mais pas l'inducteur, et qu'on est à vide, toute la puissance est envoyée dans l'alim stabilisée (on débranche le rhéostat et on coupe l'autotransformateur). A ω fixée :

$P_u = P_{\text{méca}} = P_2' - P_{\text{pertes}}$, on mesure P_2' , I_2' et ω

On remet l'alim (autotransformateur), ce qui ajoute les pertes fer (inducteur). Donc : $P_2'' = P_2' + P_{\text{fer}}$

On a donc $P_{\text{fer}} = P_2'' - P_2'$, on mesure P_2'' , I_2'' et ω

Si on est toujours hors-charge et sans faire tourner le MCC, on alimente l'inducteur à la valeur nominale et $P_i = R I_1^2$

Conclusion

Dans ce montage, nous avons évalué le rendement et les pertes pour un transformateur et un alternateur synchrone, autrement dit nous avons mesuré le rendement et les pertes entre la production d'énergie et la distribution chez l'utilisateur.

Questions

- Quel intérêt d'avoir une résistance au primaire plus élevée qu'au secondaire ?
 - ➔ On va faire passer dans le secondaire des courants très élevés donc pour éviter un trop gros échauffement on voudra des sections de câble plus grande or dans le modèle du conducteur de cuivre cylindrique $r = \frac{l}{\gamma S}$
- Pourquoi peut-on modéliser les fuites dues au mauvais confinement du champ magnétique par des inductances ?
- Est-ce que le point de rendement nul existe ?
 - ➔ Oui, à vide il n'y a pas de courant dans le secondaire
- D'où vient la dépendance en U_1^2 sur les pertes fer ?
 - ➔ $P_{\text{fer}} = K_{\text{hyst}} f B^2 + K_{\text{Foucault}} f^2 B^2$ donc P_{fer} proportionnel à B^2 et U_1 proportionnel à B (loi de Faraday) donc P_{fer} proportionnel à U_1^2
- Pourquoi le courant distordu l'est de moins en moins quand on augmente la charge ?

- ➔ A forte charge, le courant dans le secondaire est très grand et est sinusoïdal donc le courant dans le primaire aussi, de sorte qu'il devient très grand devant i_{10} et donc le courant sinusoïdal n'est plus distordu
- Pourquoi la mesure des pertes globales $P_1 - P_2$ les barres d'erreurs deviennent de plus en plus grandes ?
- ➔ Plus on augmente P_2 , plus la différence entre P_1 et P_2 est petite, on mesure une petite différence (les deux puissances sont très proches) donc les incertitudes sont d'autant plus fortes
- Pourquoi le courant observé à l'induit n'est pas sinusoïdal ?
- ➔ A cause des encoches sur le stator. En effet la machine réalise le champ avec des fils distribués dans des encoches qui donnent un champ continu par morceaux, donc un flux continu par morceaux, puis la tension étant la dérivée du flux on a ces sortes de sauts dans le signal.
- Comment choisir quelle alimentation utiliser pour l'inducteur ?
- ➔ On l'adapte au moteur : il faut que l'alimentation puisse aller au moins jusqu'aux valeurs nominales du moteur, ici 40 V et 8 A, pour ne pas laisser de plages inexplorées
- De même, de manière générale, comment choisir les rhéostats ?
- ➔ Le secondaire peut aller jusqu'à 3,15 A, donc on prend un rhéostat permettant d'atteindre un tel courant, de même pour la l'induit qui peut aller jusqu'à 1,4 A.
- Qu'est-ce qu'un autotransformateur ?
- ➔ Un certain type de transformateur qui permet de régler le niveau de tension en sortie tout en gardant la fréquence du signal alternatif inchangée.
- Est-ce que les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la vitesse de rotation du bras ?
- ➔ Oui, il faut toujours faire l'étude à vitesse fixée