

18 novembre 2020

MP21 : Production et conversion d'énergie électrique

Dihya SADI Elio THELLIER

Table des matières

1	Introduction générale du montage	3
2	Transformateur	3
2.1	Présentation	3
2.2	Matériel	3
2.3	Essai en charge : rendement et pertes globales	3
2.4	Essai à vide : décomposition des pertes	5
2.4.1	Pertes par effet joule	6
2.4.2	Pertes fer	6
2.5	Courant magnétisant distordu	7
3	Alternateur synchrone	9
3.1	Matériel	9
3.2	Etude hors charge : caractérisation de l'AS	9
3.2.1	Schéma du montage	9
3.2.2	Principe de l'alternateur synchrone	10
3.2.3	Détermination du nombre de paires de pôles	10
3.2.4	Observation de la saturation magnétique du rotor	11
3.3	Etude en charge de l'AS : rendement	12
3.3.1	Schéma du montage	12
3.3.2	Caractérisation du rendement	12
3.4	Pertes	13
4	Remarques	13
5	Tableau	14
6	Autres manip possibles	14

7	Questions de Romain, Coco et JBD	14
8	Bibliographie pour construire le montage	16

1 Introduction générale du montage

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 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 !

2 Transformateur

Objectif : caractériser le rendement et les pertes d'un convertisseur d'énergie électrique-électrique.

2.1 Présentation

L'énergie électrique est transportée sous haute tension pour limiter les pertes dans les lignes, mais distribuée à faible tension. Pour effectuer cette distribution nécessité d'adapter le niveau de tension sans toucher à la fréquence. D'où transformateurs.

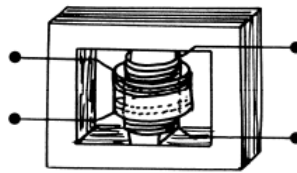


FIGURE 1

Constitué d'un circuit magnétique fermé sur lequel sont disposés des enroulements concentriques, l'un correspondant au circuit primaire l'autre au circuit secondaire. Sans rentrer dans les détails (ce sera pour les questions) en jouant sur le nombre de spires des enroulements on peut jouer sur les rapports des tensions et des courants.

2.2 Matériel

- Autotransformateur
- Transformateur
- 2 wattmètres
- 1 alimentation stabilisée
- 1 rhéostat (choix : il doit pouvoir aller jusqu'à 3.15A)

2.3 Essai en charge : rendement et pertes globales

Essai en charge : on commence par étudier sans s'intéresser à la description du transformateur (en mode boîte noire) au rendement et aux pertes globales.

Pour ça on utilise un auto-transformateur qui récupère le secteur et permet de régler le niveau de tension en sortie (un autre type de transfo!).

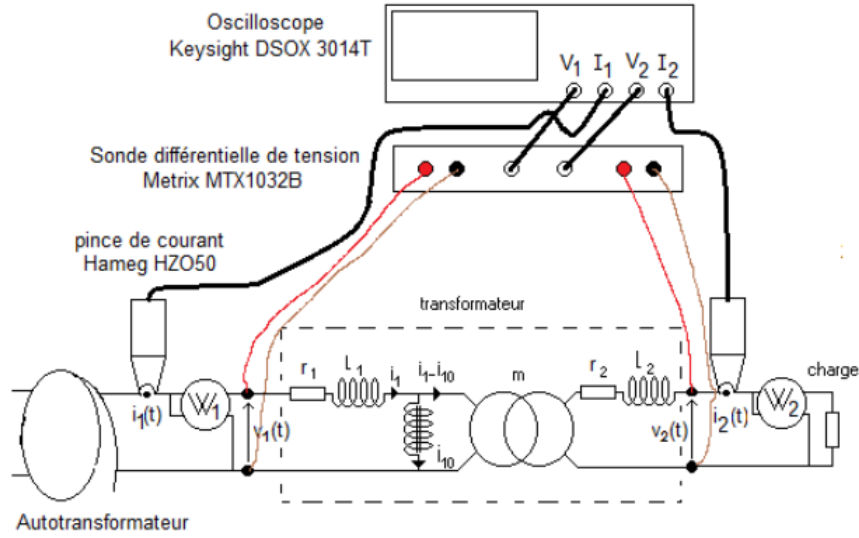


FIGURE 2: Montage pour l'essai en charge

Pour différentes charges on mesure la puissance absorbée au primaire et la puissance restituée au secondaire ainsi que les courants au primaire et au secondaire. On trace le rendement en fonction de la puissance dissipée dans la charge.

Incertitudes

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 wattmètre. Ici on travaille avec le secteur, donc 50Hz, et à environ 25 degrés. Dans ces conditions l'incertitude sur U et I est donnée par la formule suivante :

$$\Delta X = 0.006X_{calibre} + 0.001X_{lu}$$

Pour minimiser l'incertitude on prendra donc bien soin d'adapter à chaque mesure le calibre utilisé !

Ensuite pour déterminer les incertitudes sur P et sur η on utilise les formules de propagation des incertitudes :

$$P = UI$$

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

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

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

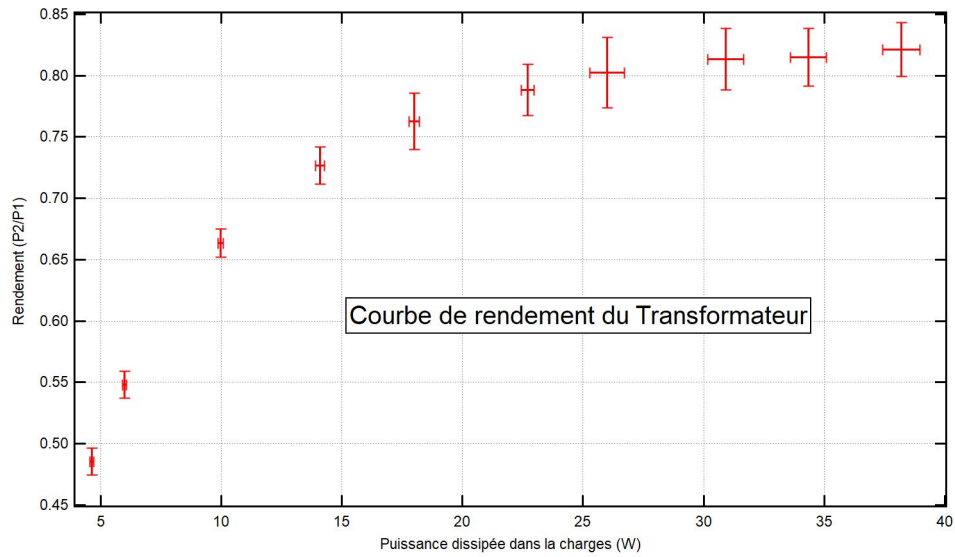


FIGURE 3: Rendement du transformateur

Le rendement est faible pour des faibles charges car à une tension donnée les pertes fer sont les mêmes quelles que soit la puissance transférée à la charge... Ce qu'on va voir plus tard

On voit que le rendement sature à 0.85 ce qui n'est à priori pas terrible mais on a une faible puissance à transférer donc ce n'est pas grave. Par contre pour de la très haute puissance on veut absolument un rendement à 1, parce que les 20 pourcents perdus, ils sont énormes, et vont chauffer le système au point de le faire crâmer. Risquent d'endommager le système. Dans l'industrie on veut donc absolument des rendements les plus proches possibles de 1.

2.4 Essai à vide : décomposition des pertes

On va donc essayer de caractériser les différentes pertes et les décomposer...

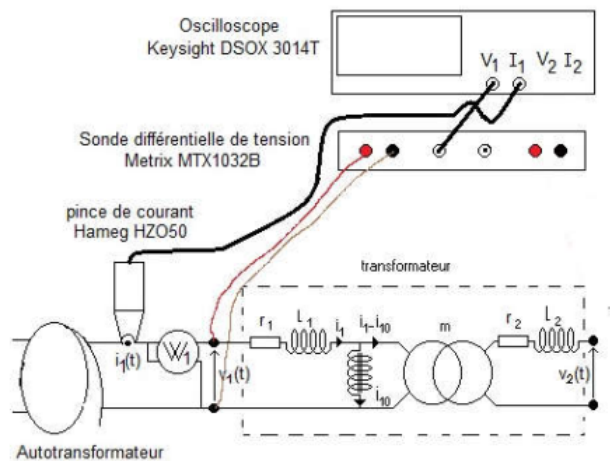


FIGURE 4: Montage pour l'essai à vide

2.4.1 Pertes par effet joule

Les bobinages de cuivre ont une résistance électrique \rightarrow pertes par effet joule dans les résistances du primaire et du secondaire.

On les mesure à vide comme suit en imposant au primaire puis au secondaire un courant continu via une alimentation stabilisée. (On choisit le courant nominal soit 3.15A pour le secondaire et 200mA pour le primaire).

En ce qui concerne les incertitudes on utilise idem la propagation des incertitudes... On obtient (je les mets pour les OG) :

$$r_1 = 37.9 \pm 0.6\Omega$$

$$r_2 = 0.72 \pm 0.03\Omega$$

Attention ne pas utiliser d'ohmmètre pour mesurer des résistances de cet ordre de grandeur là : l'ohmmètre injecte des courants très faibles car il est fait pour mesurer des tensions de l'ordre de la 100 de kOhms... Donc là avec nos ordres de grandeurs en dessous du Ohm, c'est carrément du même ordre de grandeur que l'erreur de l'ohmmètre donc NON. (De manière générale l'ohmmètre c'est souvent une mauvaise idée en fait.)

2.4.2 Pertes fer

Les pertes fer 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. Les seules pertes sont alors les pertes joules dans la résistance r_1 et pertes fer dans le circuit. En retranchant les pertes Joules on obtient les pertes Fer à la valeur nominale $U_1 = 220V$. Or en RSF pertes fer dépendent uniquement de la tension d'entrée selon la relation :

$$P_{fer} = K_{hyst} f B^2 + K_{foucault} f^2 B^2$$

Donc

$$P_{fer} \propto B^2$$

or

$$U_1 = \frac{d\phi_B}{dt} \propto B$$

d'où finalement

$$P_{fer} \propto U_1^2$$

C'est à dire que les pertes fer ne dépendent que de U_1 . Comme on a fait toute l'étude en charge à U_1 fixé à 220V, les pertes fer étaient constantes tout le long, égale à ce que je viens de mesurer !

Finalement les pertes totales dans le circuit s'écrivent :

$$P_{pertes} = P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$$

En comparant la somme des pertes fer et des pertes Joules aux pertes totales mesurées on observe que ça suit plutôt pas trop mal !

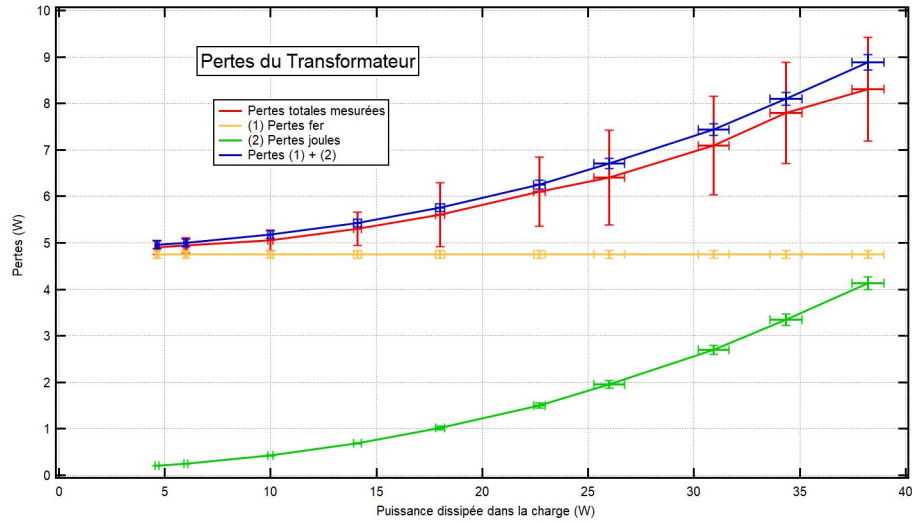


FIGURE 5: Pertes du transformateur

Remarque : normal d'avoir beaucoup d'incertitudes sur les pertes mesurées (courbe rouge) quand on augmente P_2 sur les pertes car on fait la différence de deux grandeurs qui deviennent de plus en plus proches... Mais on a probablement surestimé nos barres d'erreurs en vrai.

2.5 Courant magnétisant 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 hystérétique à une sollicitation sinusoïdale :

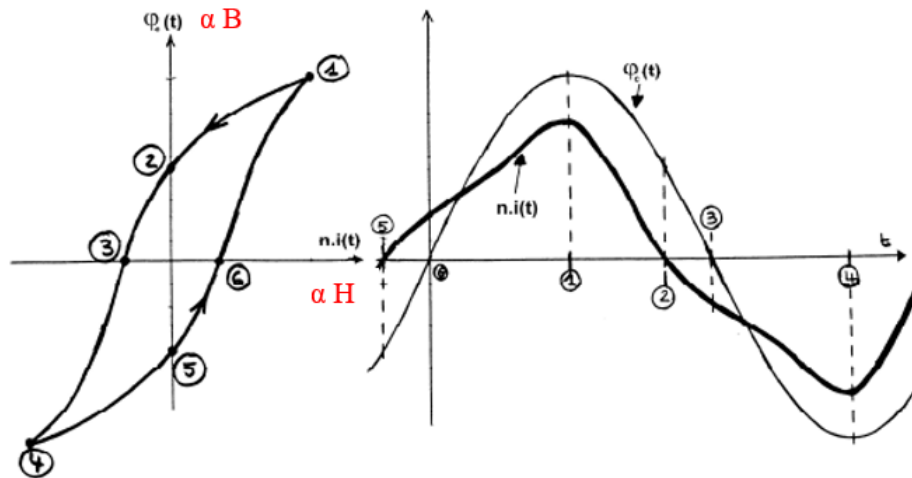


FIGURE 6: Montage pour l'essai à vide

On peut l'observer en étudiant le secondaire à vide :

$$n_1 \cdot (i_1 - i_{10}) + n_2 \cdot i_2 = 0$$

$$i_1 = i_{10}$$

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

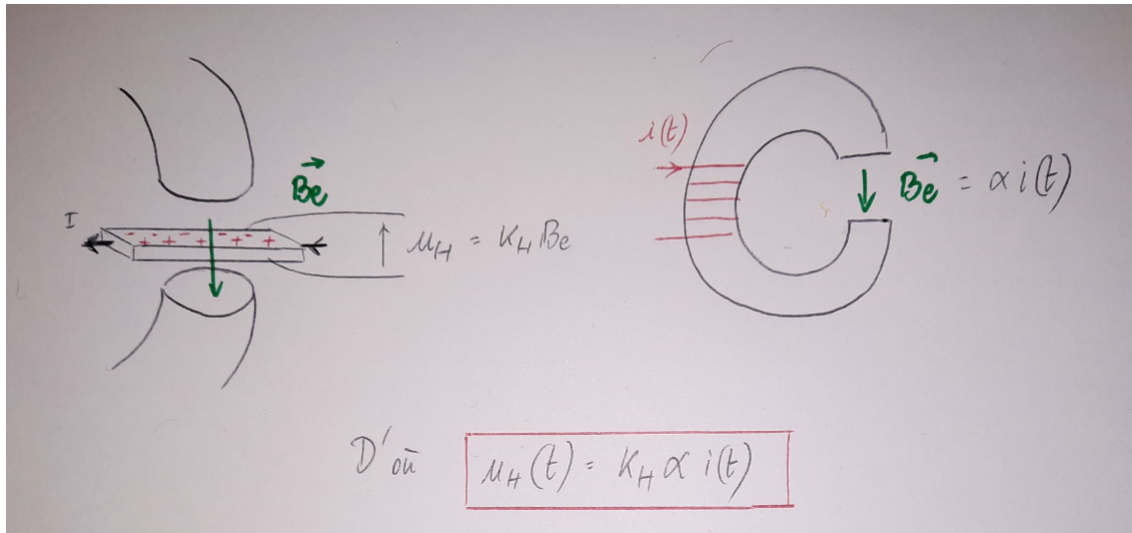


FIGURE 7: Première approche

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.

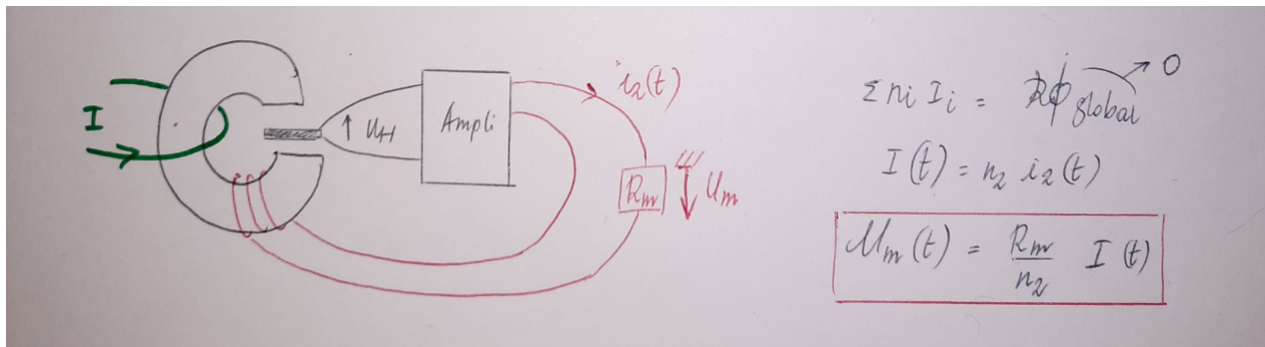


FIGURE 8: Deuxième approche

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.

3 Alternateur synchrone

Ok mais d'où provient cette énergie que l'on veut transporter et distribuer ? Qu'il s'agisse d'une pâle d'éolienne, d'une turbine, etc, à la base on a quelque chose qui tourne : une énergie mécanique.

On va essayer de modéliser le principe de production d'énergie électrique en utilisant comme source d'énergie mécanique un MCC fonctionnant en mode moteur.

3.1 Matériel

- Banc de l'alternateur synchrone
- Alimentation stabilisée
- Autotransformateur
- Oscilloscope
- 3 Wattmètres
- 1 multimètre
- 1 rhéostat (DEREIX 1,3 V/640 ohms)

3.2 Etude hors charge : caractérisation de l'AS

3.2.1 Schéma du montage

ATTENTION ! Courants nominaux, à ne pas dépasser :

- 0,4 A pour l'inducteur
- 1,4 A pour l'induit
- 8 A pour le MCC

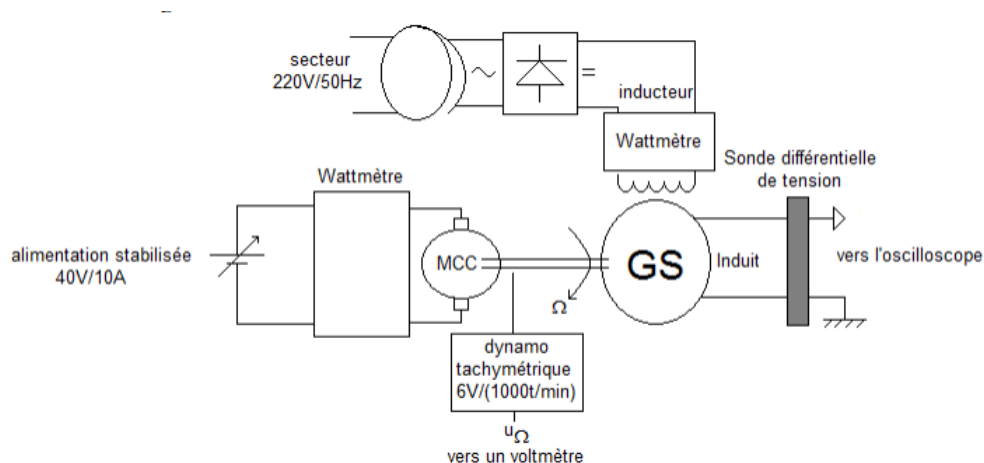


FIGURE 9: Schéma du montage pour l'essai à vide

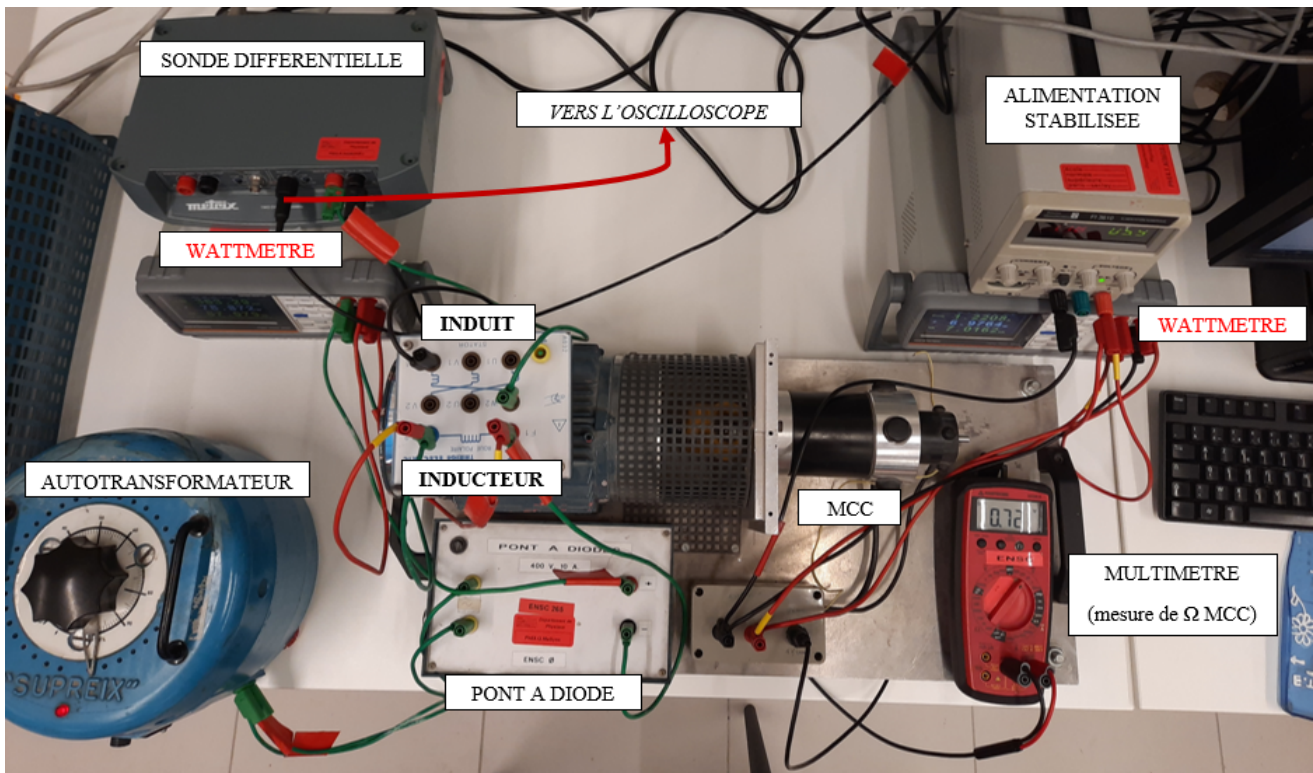


FIGURE 10: Montage pour l'essai à vide

Autotransformateur : sert à régler la tension de sortie... et donc aussi le courant.

Pont à diode : sert à redresser la tension alternative qui sort de l'autotransformateur pour appliquer un courant continu à l'inducteur.

Sondes différentielles Sert à atténuer les niveaux de tensions que j'envoie dans l'oscilloscope, car les tensions dans l'induit sont de l'ordre de la centaine de Volts.

3.2.2 Principe de l'alternateur synchrone

Principe général : Le MCC, qui représente la source d'énergie mécanique ici, fait tourner le rotor à une vitesse Ω . Le rotor, l'inducteur, est constitué d'un aimant permanent ou d'un bobinage qui génère un champ \vec{B} . Le bobinage du stator, l'induit, va donc voir un champ tournant à une fréquence ω multiple de la fréquence de rotation du rotor, et délivrer une fem qui oscille à la fréquence ω .

3.2.3 Détermination du nombre de paires de pôles

Pour déterminer le nombre de pôle on détermine le coefficient de proportionnalité entre la vitesse de rotation de l'arbre moteur et la fréquence de la tension d'induit.

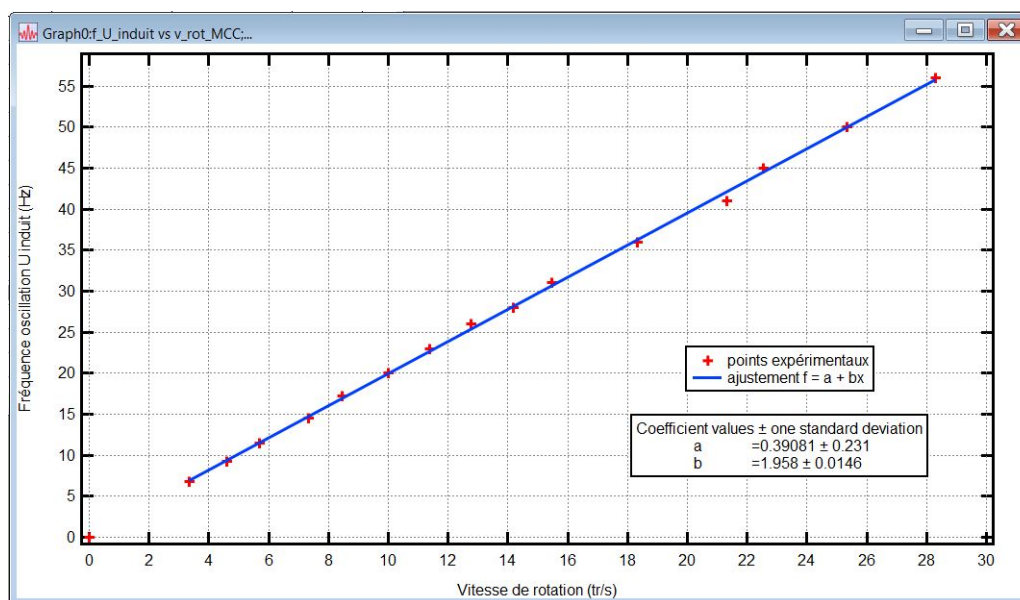


FIGURE 11: Evolution de la fréquence d'oscillation de la tension de l'induit en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre moteur du MCC

3.2.4 Observation de la saturation magnétique du rotor

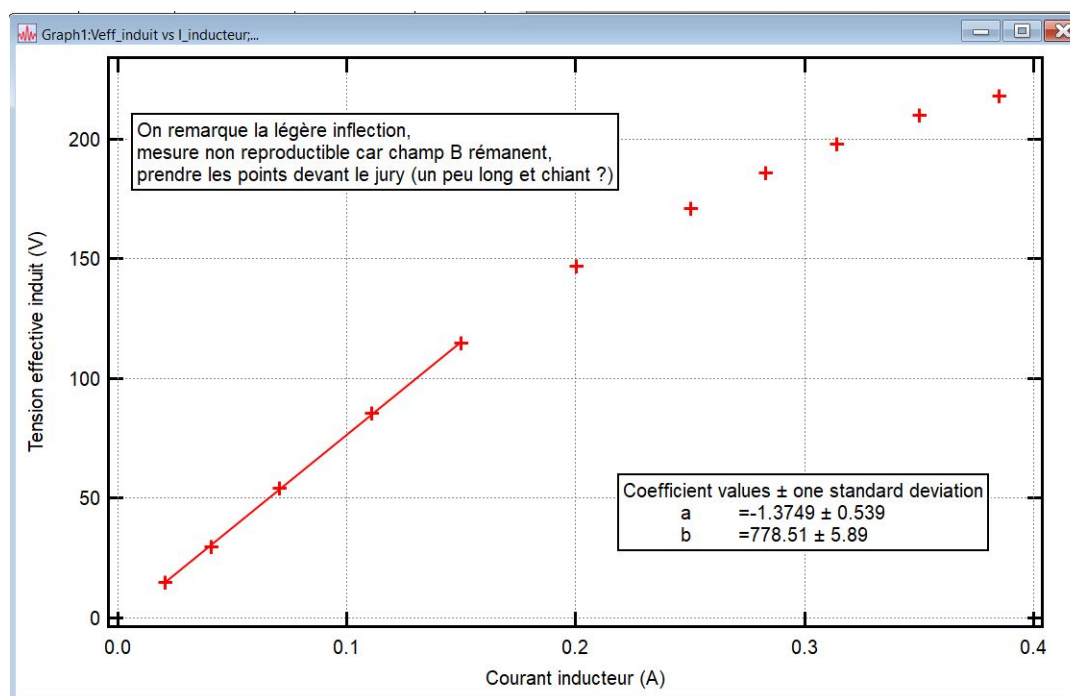


FIGURE 12: Evolution de la tension efficace de l'induit en fonction du courant imposé dans le circuit inducteur

3.3 Etude en charge de l'AS : rendement

3.3.1 Schéma du montage

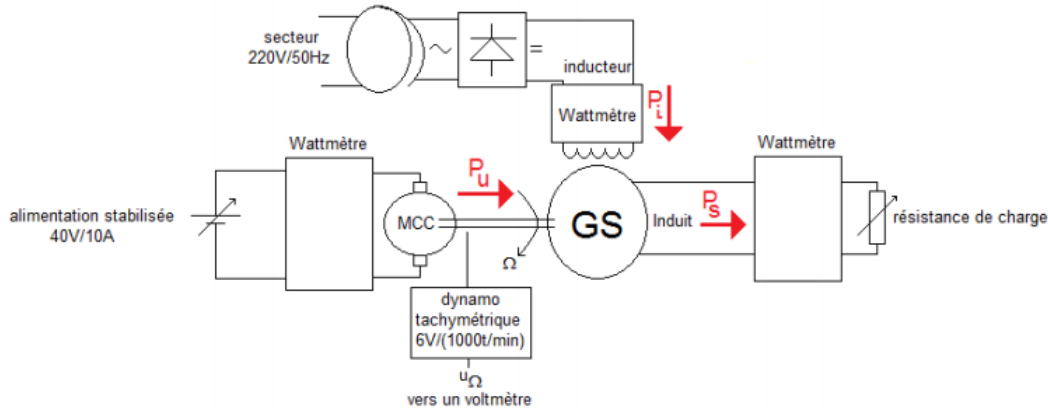


FIGURE 13: Montage pour l'essai à vide

3.3.2 Caractérisation du rendement

La puissance que je fournis à la génératrice synchrone est :

- P_i puissance fournie à l'inducteur via le secteur
- P_u la puissance utile fournie par le bras $P_u = P_{abs} - P_{pertes}^{MCC}$ (on lit P_{abs} sur le wattmètre relié à l'alim).

La puissance que je récupère est simplement P_s .

Finalement :

$$\eta = \frac{P_s}{P_i + P_u}$$

On suppose ici qu'on a déjà fait l'étude du MCC et qu'on sait comment se décomposent les pertes :

$$P_{pertes}^{MCC} = (0,089 \pm 0,001)\Omega + (7,4 \cdot 10^{-5} \pm 0,5 \cdot 10^{-5})\Omega^2 + 0,98I_{abs}^2$$

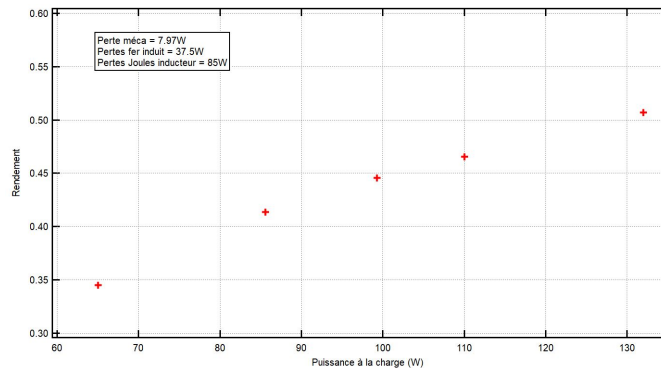


FIGURE 14: Rendement GS

3.4 Pertes

Pertes mécanique dans l'AS

Si on alimente le MCC, mais pas l'inducteur, et qu'on est à vide, toute la puissance que j'envoie avec l'alimentation stabilisée, P_{abs} , va se décomposer en pertes du MCC et pertes mécaniques dans l'AS.

Donc à Ω fixé :

$$P_U = P_{abs}^1 - P_{pertes}^{MCC} = P_{meca}$$

On suppose ici qu'on a déjà fait l'étude du MCC et qu'on sait comment se décomposent les pertes.

J'appelle cette mesure P_{abs}^1 .

Pertes fer dans l'induit

Si cette fois je me met à alimenter l'inducteur, tout ce que je rajoute c'est les pertes fer dans l'induit ! Donc, en appelant cette mesure P_{abs}^2 :

$$P_{abs}^2 = P_{abs}^1 + P_{fer}$$

En soustrayant les deux puissances mesurées je peux déterminer les pertes fer. Attention mesure qui dépend de la vitesse du MCC.

Pertes Joules dans l'inducteur Si hors charge et sans faire tourner le MCC on alimente l'inducteur à la valeur nominale alors P_I contient uniquement les pertes joules dans l'inducteur.

Pertes Joules dans l'induit

4 Remarques

Même si pédagogiquement ce serait mieux de parler d'abord du moteur PUIS du transformateur, il vaut mieux faire dans l'autre sens pour se rassurer : le transformateur est beaucoup plus facile ! On se met en confiance... De même, ça paraîtrait plus optimal de prendre 1 seul auto-transformateur pour les deux montages mais encore une fois on ne prends pas de risques... Sous le coup du stress on risque de faire des bêtises!!!

On aurait pu montrer la manip de saturation magnétique sur l'alternateur synchrone mais elle n'est pas reproductible donc il faudrait la refaire en direct et prendre 5 points... Mauvaise idée donc. Si il faut rajouter une manip sur l'alternateur synchrone ce serait plutôt le tracé de u_{induit}^{RMS} en fonction de Ω pour retrouver la loi de Faraday ! Au choix, pour la caractérisation de la GS, on peut prendre soit celle-ci soit le nombre de paire de pôles comme Elio et moi on l'a fait.

5 Tableau

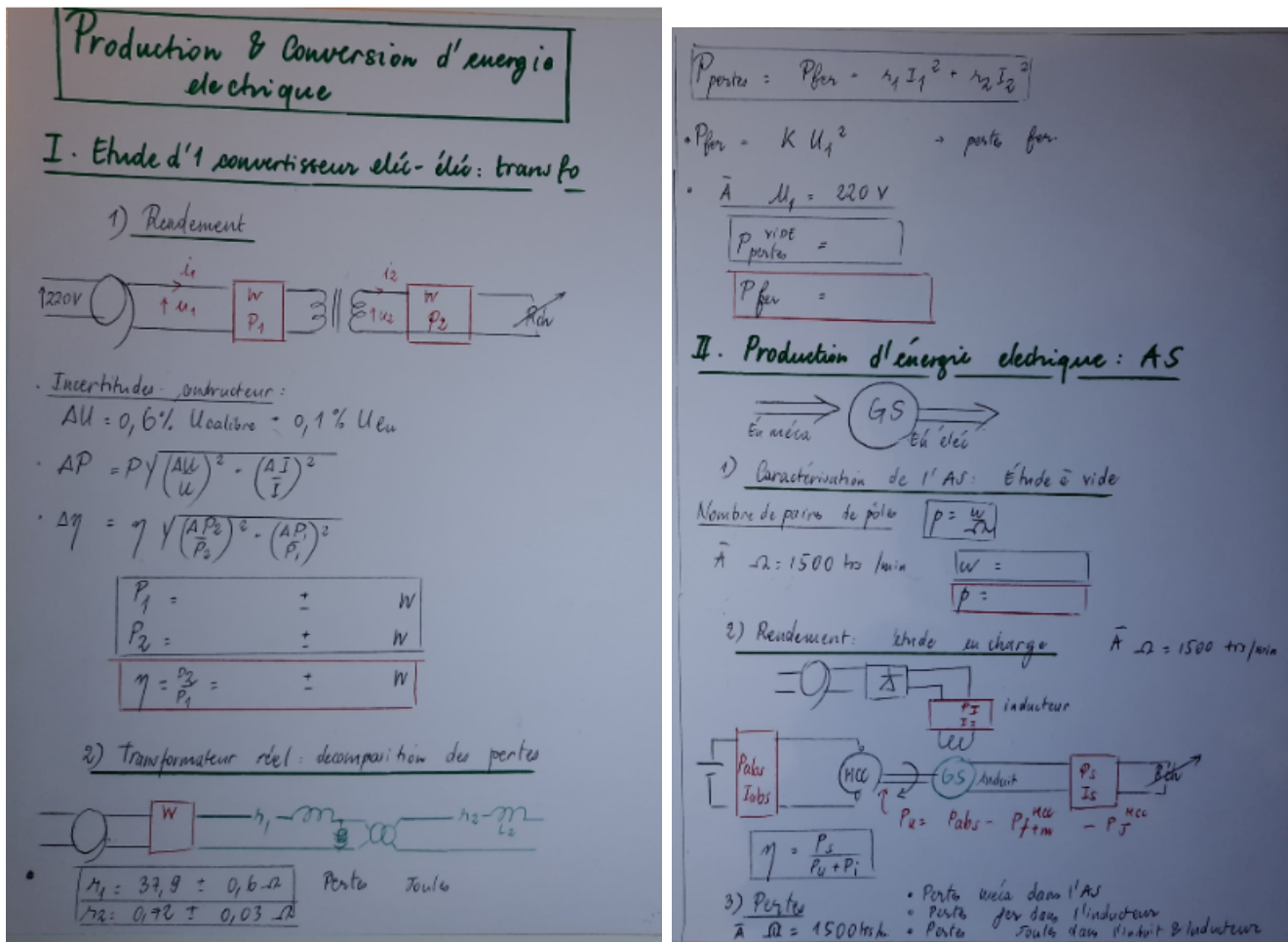


FIGURE 15: Tableau

6 Autres manips possibles

- MCC
- hacheur

7 Questions de Romain, Coco et JBD

Sur le transfo : 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 $r = \frac{l}{\gamma S}$ donc résistance petite.

Sur le transfo encore : pourquoi on peut modéliser les fuites dues au mauvais confinement du champ magnétique par des inductances ? Je sais pas vraiment je chercherais...

Sur le transfo : est-ce que le point de rendement nul existe ? Oui ! Effectivement quand on est à vide on n'a rien au secondaire pourtant on envoie de la puissance. Donc j'aurais pu ajouter ce point sur ma courbe !

Sur le transfo : d'où vient la dépendance en U_1^2 sur les pertes fer ? $P_{fer} = K_{hyst} f B^2 + K_{foucault} f^2 B^2$ donc $P_{fer} \propto B^2$ or $U_1 = \frac{d\phi_B}{dt} \propto B$ d'où finalement $P_{fer} \propto U_1^2$

Sur l'alternateur synchrone : Pourquoi est-ce que le courant que j'observe 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 morceau donc un flux continu par morceau puis la tension étant la dérivée du flux on a ces sortes de sauts dans le signal.

Sur le transfo : Pourquoi le courant distordu est de moins en moins distordu quand on augmente la charge ? A forte charge i_2 est très grand et est sinusoïdal donc i_1 est sinusoïdal et très grand aussi, de sorte qu'il devient très grand devant i_{10} et donc le courant sinusoïdal est non distordu.

Sur le transfo : Pourquoi sur la mesure des pertes globales $P_1 - P_2$ les barres d'erreurs deviennent de plus en plus grandes ? Car plus on augmente P_2 plus la différence avec P_1 devient faible donc on mesure une petite différence entre deux grandeurs très proches donc les incertitudes sont d'autant plus fortes.

Sur l'AS : 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 40V et 8A, pour ne pas laisser de plages inexplorées !

De même de manière générale comment choisir les rhéostats ? Pareil, pour le transformateur, je sais que le secondaire peut aller jusqu'à 3.15A donc je prends un rhéostat qui me permet d'attendre ces courants, idem pour la charge à l'induit, je peut aller jusqu'à 1.4A.

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 !

Pour l'AS : est-ce que les pertes méca et pertes fer dépendent de la vitesse de rotation du bras ? Oui ! Toujours faire ces études là à vitesse fixée.

Aujourd'hui on utilise plutôt alternateur synchrone que MCC ou même alternateur asynchrone ? : Parce que avec l'alternateur synchrone on a la condition de synchronisme qui permet de fixer très précisément ω fréquence de l'induit donc on peut bien fixer le 50 Hz !

Pourquoi utiliser un dispositif de sondes différentielles pour l'oscillo ? Parce que les tensions qui circulent à l'induit sont de l'ordre de la centaine de Volts donc on n'envoie pas ça directement à l'oscilloscope... Il faut atténuer le signal et bien faire attention à utiliser du coup la fonction "Probe" de l'oscillo.

8 Bibliographie pour construire le montage

- Poly de cours de JBD
- Mon cours de spé sur les convertisseurs de puissance... je pourrais le partager si besoin !