

MP21 – Production et conversion d'énergie électrique

May 7, 2019

- 2014 : Le principe de fonctionnement des dispositifs utilisés (moteurs, tachymètres, variateurs, ...) doivent être connus afin que la présentation illustre pleinement le sujet et ne se limite pas à des mesures de rendement. D'autre part, lors de l'étude de dispositifs de production et de conversion d'énergie électrique, la notion de point de fonctionnement nominal est importante ; en particulier, des mesures de puissance de l'ordre du mW ne sont pas réalistes. Enfin, les modèles utilisés pour décrire ces dispositifs ne doivent pas être trop simplifiés, au risque d'obtenir des écarts excessifs entre les modèles et les systèmes réels.
- 2013 : La production d'énergie, par divers moyens, a été ajoutée à ce montage. Jusqu'en 2013, le titre était : Conversion de puissance électrique-électrique.
- 2009 : Le jury souhaiterait voir de réelles mesures de puissance, pour des convertisseurs utilisés en régime nominal.

Pour arrêter la MCC, il faut toujours couper dans un premier temps la tension de l'induit U_m , puis dans un second temps celle de l'inducteur U_e . Si on annule U_e en gardant U_m constante, $\omega \rightarrow \infty$ et le moteur risque de s'emballer...

Références :

- *Électrotechnique*, Bréal
- *H Prépa Electronique II*
- *Cap-prépa PCSI*
- *Duffait Élec*

Contents

1	Conversion mécanique → électrique : la dynamo	3
1.1	Relation vitesse-tension	4
1.1.1	exploitation	4
1.2	Étude en charge	4
1.2.1	Recette	4
1.2.2	Pertes Joules et couple résistif	5
1.3	Puissance utile et rendement :	5

2	Transformateur	6
2.1	Principe	6
2.2	méthode des pertes séparées	7
3	Passage alternatif continu : redresseur et lisseur	8
3.1	Le redresseur	8
3.2	Lissage :	9
3.3	Rendement	10
4	Annexe	12
4.1	Le hacheur	12
4.2	Modèle du transformateur réel	12
4.2.1	Origine des pertes dans le transformateur	12
4.2.2	Pertes Fer	13
4.2.3	Pertes cuivres	14
4.3	Pont de Graetz	15
	Bon courage !	

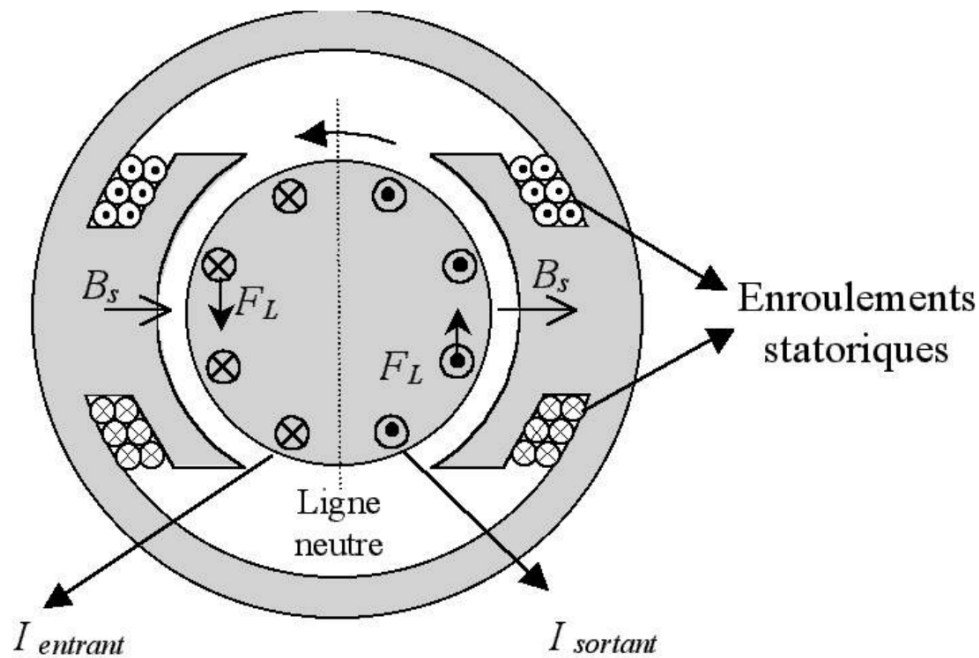


Figure 1: Schéma d'une machine CC (cf H-prépa)

Introduction

la plupart des appareils électriques fonctionnent sur du 220 V efficaces à 50 Hz . Cependant, l'électricité produite dans les centrales doit être transformée plusieurs fois avant d'arriver dans les maisons. Ici, on étudie quelques éléments clef permettant le changement de forme de cette énergie pour le transport ou l'utilisation.

Notons ici avant de commencer que les machines que nous allons utiliser seront soumises à de fortes tensions et laisse passer des forts courant. Il est donc bien de relier les terre de leur carcasse à celle de l'alimentation qui est elle même relier au sol. Ainsi si un dysfonctionnement introduit un courant dans la carcasse de la machine, se dernier ira à la terre par le fil que nous avons rajouté et non pas par notre corps.

1 Conversion mécanique $\rightarrow$ électrique : la dynamo

On ne la présente plus¹ Elle fonctionne grâce à l'induction de Faraday (cas Lorenz²):

- **Inducteur** (aimant ou bobine alimentée en continue) souvent fixe (stator).
- **Induit** circuit mobile, le rotor qui bouge dans un champ fie. Il voit donc un flux variable (flux coupé) et y naissent des courants de Foucault. Ce sont eux que l'on va récupérer par la suite.

Le montage contient deux machines CC construites autours du même axe; On va supposer que la première est une source d'énergie mécanique (en particulier d'une vitesse rotation ω

¹Voir Bréal et HPrépa

²On peut aussi utiliser la machine CC en moteur. auquel cas, on alimente l'induit et on se débrouille avec des balais pour avoir le couple toujours dans le même sens.

autours de l'axe commun et on s'en désintéresse.
On veut voir comment la seconde réagit.

1.1 Relation vitesse-tension



Expérience :

Alimenter les inducteurs du moteur et de la génératrice en parallèle sous la tension nominale 110 V. Pour cela, utiliser les alimentations Langlois P0.44 réglée en DC.

Mesurer l'intensité I_e dans l'inducteur de la génératrice.

Démarrer le moteur en alimentant son induit (deuxième alimentation Langlois P0.44 réglée en DC, sur $U_e^{moteur} = 110 V$) et en utilisant un rhéostat de démarrage (qq Ω), que l'on court-circuite par la suite.

Laisser l'induit de la génératrice à vide (sans résistance) et mesurer sa tension U_g pour différentes valeurs de ω à l'aide du boîtier qui donne la fréquence de rotation^a. (la valeur de ω est contrôlée par la valeur de la tension dans l'induit du moteur).

^aLa génératrice tachymétrique qui permet de mesurer la vitesse de rotation du moteur ω , est une machine à courant continu !

1.1.1 exploitation

En fonctionnement générateur, la tension U_g s'exprime :

$$U_g = \underbrace{k\phi_g \times \omega}_{FEM} - r_g I_g \quad (1)$$

r_g désigne la résistance de l'induit de la génératrice.

Le couple mécanique exercé est alors la somme du couple électromoteur et du couple résistif :

$$C = k\phi_g I_g + C_r \quad (2)$$

où C_r est le couple résistif.³



Expérience : détermination de $k\phi_g$

Comme $I_g = 0$ lors d'une étude à vide, tracer U_g en fonction de ω et remonter à $k\phi_g$ par régression linéaire (on trouve environ 0,60 V.s/rad).

1.2 Étude en charge

L'étude en charge proposée ici est à vitesse de rotation ω constante.⁴

1.2.1 Recette

³Pour le cas moteur, les grandeurs électriques et mécaniques de l'induit sont liées en régime stationnaire par les systèmes d'équations :

$$\text{Moteur} \begin{cases} U_m = k\phi_m \omega + r_m I_m \\ C = k\phi_m I_m - C_r \end{cases}$$

⁴On pourrait faire de façon analogue une étude avec le couple C constant.



Expérience :

Brancher un rhéostat de $100\ \Omega$ P61.9 sur l'induit de la génératrice, et mesurer la tension U_g à ses bornes et l'intensité I_g dans ce circuit.

Pour plusieurs valeurs de résistance R , ajuster la tension U_m injectée dans l'induit du moteur de façon à retrouver une fréquence de rotation $f = 10\ Hz$ (en vérifiant que I_g ne devienne pas trop importante)

Mesurer alors le couple C^a , les tensions U_g et U_e et les intensités I_g et I_e .

^aLe couple est mesuré par une jauge de contrainte fixée sur une tige. Le couple tord la tige ortho-radialement ce qui déforme la jauge de contrainte en conséquences

1.2.2 Pertes Joules et couple résistif

Comme :

$$U_g = \underbrace{k\phi_g \times \omega}_{FEM} - r_g I_g$$



Expérience : Détermination de $k\phi_g$ par une autre méthode

Tracer l'évolution de U_g en fonction de ω , et réaliser la régression linéaire $U_g = k\phi_g \omega - r_g I_g$ pour retrouver $k\phi_g$ (identique au précédent) et obtenir r_g (quelques ohms).

Comme :

$$C = k\phi_g I_g + C_r$$



Expérience : Détermination de C_r

Tracer l'évolution du couple C en fonction de I_g , et réaliser la régression linéaire $C = k\phi_g I_g + C_r$ pour retrouver $k\phi_g$ et obtenir C_r (de l'ordre de $0,1\ N.m$).

1.3 Puissance utile et rendement :

La puissance utile P_u^g est :

$$P_u^g = U_g \times I_g \quad (3)$$

La puissance fournie est $P_{tot} = C\omega + U_e I_e$ Le rendement total est donc

$$\eta = \frac{P_u}{P_{tot}} = \frac{U_g I_g}{C\omega + U_e I_e} \quad (4)$$



Expérience : Calcul du rendement de la génératrice

On trace alors $\eta(P_u)$. On a une courbe en cloche où le maximum correspond au fonctionnement nominal à $10\ Hz$: $(U_g^{nom\ 10\ Hz}, I_g^{nom\ 10\ Hz})$. On peut estimer les valeurs nominales en superposant $I_g(P_u)$ et $U_g(P_u)$ et en regardant où η est maximal.

La machine à courant continu 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.

Cependant, la fragilité des balais du collecteur nécessite un entretien régulier. Elles ont été largement utilisées par le passé, notamment pour la propulsion des locomotives électriques (premiers TGV, métro lyonnais). On les retrouve aujourd'hui plutôt dans les applications à faible puissance (ventilateurs, photocopieurs, essuie-glaces...) avec des stators composés d'aimants permanents. Les moteurs à fortes puissances sont maintenant constitués de machines à courant alternatif.

2 Transformateur

Pour diminuer la dissipation dans les fils électriques lors du transport sur de grandes distances, on utilise souvent des lignes à haute tension (tension de l'ordre de la centaine de kV voire du millier de kV) bien que le courant délivré pour les usages domestiques soit à une tension bien inférieure (220V !) : comment élève-t-on ou abaisse-t-on la tension ?

Ici, la tension étant alternative, on utilise un transformateur, système basé sur l'induction et la loi de Faraday, constitué d'enroulements de fils conducteurs et d'un support magnétique. On le caractérise par son rapport de transformation m .

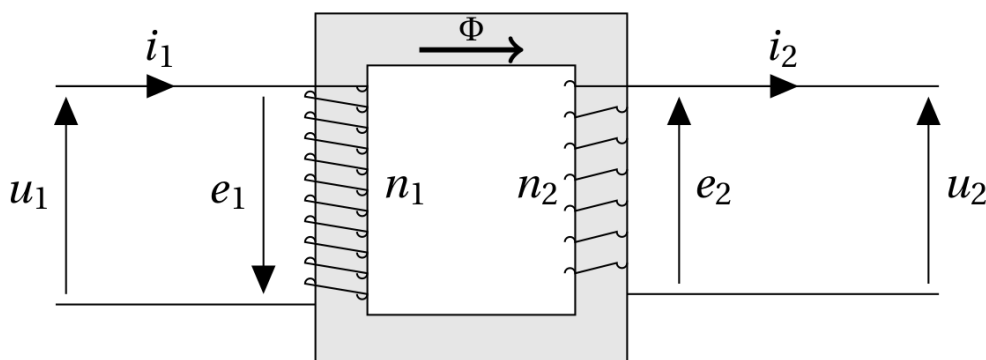


Figure 2: Notations pour le transformateur

2.1 Principe

Avant d'allumer l'alternostat P57.6, tourner la molette sur 5%, ne rien brancher à ses bornes puis le mettre en route. Mettre la molette au minimum et brancher le boîtier prise/cordons de sécurités P57.14. On peut maintenant utiliser l'alternostat Redescendre la molette à 0% avant d'intervenir sur un circuit alimenté par l'alternostat : les tensions sont importantes et la limite en courant est élevée !

On construit un transformateur avec une bobine de $n_2 = 500$ spires, une autre de $n_1 = 250$ spires et un noyau de fer doux (feuilleté). On l'alimente (tension (u_1) avec le cordon p57.14

relié à l'alternostat⁵ p57.6. Les mesures autres que pour la puissance se font au multimètres en mode *AC*. Attention à vérifier que le courant i_1 ne dépasse pas la limite fixée par la bobine.



Expérience : Vérification du rapport de transformation

Vérifier la loi des tensions et/ou des intensités en traçant $u_2 = f(u_1)$ en branchant un voltmètre au secondaire (circuit ouvert). Ou ne brancher qu'un Ampère-mètre au secondaire (court-circuit) et tracer $i_2 = f(i_1)$.

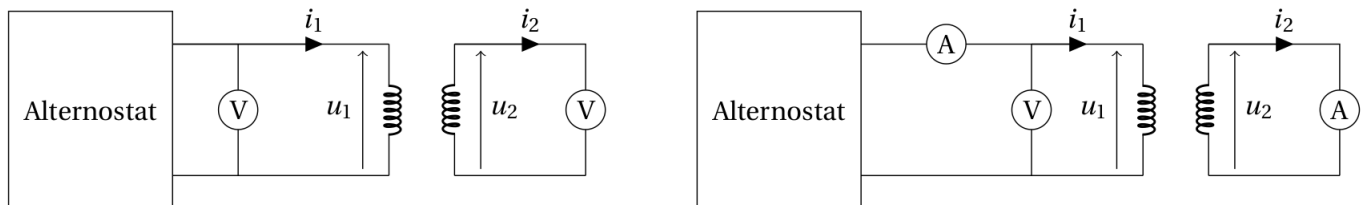


Figure 3: A gauche, mesure en circuit ouvert. A droite, mesure en circuit fermé.

Normalement :

$$m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{u_2}{u_1}; \quad \frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{m} \quad (5)$$

Donc

$$P_1 = u_1 i_1 = u_2 i_2 \frac{m}{m} = P_2 \quad (6)$$



Expérience : rendement en puissance du transformateur

Placer un rhéostat R (500Ω) de charge au secondaire. Il nous faut, en effet, nous placer sous les conditions nominales pour avoir un bon rendement. Regarder ce que vaut le rendement en puissance à l'aide de **Wattmètres**^a

Faire varier R et u_1 pour avoir un rendement maximal. Noter que le rendement est bon.

^aIls sont capable de trouver la puissance de courants/tension sinusoïdaux mais en tenant compte du déphasage ce qui est très important ici. (un voltmètre et ampèremètre ne donneraient que les amplitudes et pour un déphasage non nul, le résultat est faux)

2.2 méthode des pertes séparées

- **L'étude à vide** du transformateur permet de déterminer les **pertes fer** dues aux courants de Foucault dans le matériau ferromagnétique qui dépendent de la tension au primaire u_1
- **L'étude en court-circuit** permet de déterminer les **pertes cuivre** dues à l'effet Joule dans les bobinages qui dépendent de l'intensité au primaire i_1 .

Je mets le protocole en annexe mais je pense qu'il est plus avantageux de passer à la suite :

⁵Il délivre des tensions à fréquence 50 *Hz*

3 Passage alternatif continu : redresseur et lisseur

Quasiment tous les composants électroniques sont alimentés par des tensions continues. Or on a, pour le moment, obtenu une tension alternative d'amplitude que nous pouvons contrôler. On souhaite donc passer d'une tension alternative à une tension continue. (Cap-prépa PCSI p.389 ou Duffait Élec p.292) Cette transformation se fait via 2 étapes :

- Le redressement qui fournit, à partir de la tension alternative, une tension de signe constant. Le redressement est basé sur les propriétés dissymétriques de certains composants comme les diodes.
- Le lissage qui fournit une tension continue à partir de la tension redressée.

3.1 Le redresseur

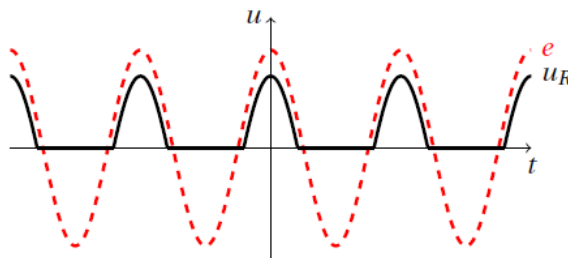


Figure 4: Schéma du redresseur monoalternance. Ce schéma est repris du poly de JérémY Ferrand.

Nous pouvons penser à un montage simple composé d'une diode. Il s'agit d'un montage redresseur monoalternance. Lorsque le courant est positif la diode est passante et lorsque i est négatif la diode est bloquée. Nous obtenons alors le résultat donné en figure 4.

Nous pouvons effectuer 2 remarques : la tension est nulle sur environ la moitié du cycle et il y a un léger décalage lorsque la diode est passante en raison de sa tension seuil. Pour palier au premier problème, nous pouvons effectuer un montage plus élaboré appelé pont de Graetz donnée en figure 5.

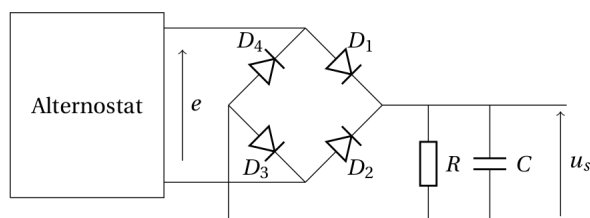


Figure 5: Schéma du redresseur : d'abord un pont de Graetz. À droite, un filtre passe-bas



Expérience : Mise en évidence du redressage

Prendre 4 diodes 1N4007 P29.4 et les tester au multimètre (multimètre en mode diode-mètre, on obtient 0,6 V dans un sens et overload dans l'autre). Câbler le montage et l'alimenter par l'alternostat (attention au démarrage !) sans mettre de condensateur pour le moment. On prend également le courant en sortie de l'alimentation à l'aide d'un ampèremètre pour veiller à ne pas trop dépasser les conditions nominales des différents appareils du circuit. Pour la résistance R , nous pouvons en prendre une de $10k\Omega$.

On choisira comme charge R un rhéostat de 1000Ω P61.1 pour commencer. Observer à l'aide des sondes différentielles P37.12 (sinon on court-circuite l'alternostat à cause d'un problème de masse commune) les tensions e et $u_s = u_R$ (aux bornes de R) à l'oscilloscope.

Nous obtenons alors :

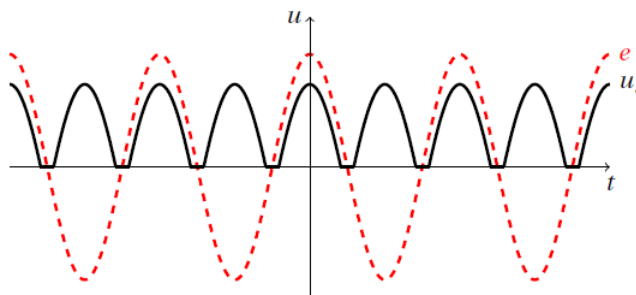


Figure 6: Courbe obtenue suite à l'utilisation du pont de Graetz. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

3.2 Lissage :

Maintenant que la tension est redressée il nous faut encore la transformer en tension continu.



Expérience : Mise en évidence du lissage

Nous utilisons pour cela une cellule RC pour effectuer un lissage. Cela revient ici à placer une boîte de capacité variable et obtenir ainsi le montage 5 complet.

Nous obtenons alors le graphique donné en figure 7.

On peut distinguer quatre phases :

- Dans un premier temps, D_1 et D_3 sont passantes, D_2 et D_4 sont bloquées, la tensions u_s suit l'évolution de e .
- La tension e décroît rapidement et le condensateur, freinant l'évolution de u_s , l'empêche de suivre la décroissance de e . La diode D_1 se bloque elle aussi et le circuit RC se retrouve isolé : la décroissance de la tension u_s est due à la décharge du condensateur C dans la résistance R .

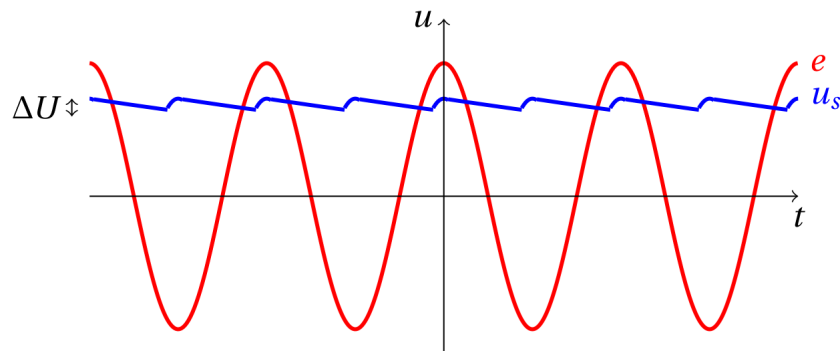


Figure 7: Ce qu'on doit voir à l'oscilo

- Au moment où $e < u$ avec $e > 0$, D_2 et D_4 deviennent passantes, D_1 et D_3 bloquées, u_s suit l'évolution de e .
- Lorsque e croît rapidement, le condensateur empêche de nouveau les variations brutales de tension. Si le produit RC est très grand, la décroissance de u_s est négligeable et la tension de sortie est continue et égale à l'amplitude de la tension sinusoïdale E .

Si le produit RC est très grand, la décroissance de u_s est négligeable et la tension de sortie est continue et égale à l'amplitude de la tension sinusoïdale E .

Alimentation e	Diodes				Sortie u_R
	D_1	D_2	D_3	D_4	
$e > 0$	Passante	Bloquée	Passante	Bloquée	$e > 0$
$e < 0$	Bloquée	Passante	Bloquée	Passante	$-e > 0$

Figure 8: Fonctionnement du pont de Graetz

3.3 Rendement



Expérience : Rendement de la conversion

Nous plaçons maintenant un rhéostat en sortie (500Ω) afin de placer notre générateur en fonctionnement nominal. Nous mesurons au wattmètre la puissance en entrée et en sortie en fonction de cette résistance de charge R . Nous en déduisons le rendement de la conversion en comparant les puissances en amont et aval du redresseur :

$$\eta = \frac{P_{avant}}{P_{aprs}} \quad (7)$$

Conclusion

On peut parler en ouverture d'un hacheur dont le but est de réaliser un transfert de puissance d'une source électrique délivrant une grandeur continue vers une charge devant être alimentée par une grandeur également continue mais de valeur plus basse. Cela ne peut pas être fait à l'aide de transformateurs électriques car ceux-ci reposent sur l'induction et nécessitent donc des tensions variables dans le temps.

4 Annexe

4.1 Le hacheur

Convertir une tension continu en une autre de plus faible amplitude semble chose facile. En effet nous connaissons tous le pond diviseur de pension. Cependant une quantité non négligeable de la puissance est perdue sous forme de chaleur par effet Joule (nous perdons tout ce que nous n'utilisons pas). Plutôt que d'utiliser un résistance variable nous permettant de choisir notre tension de sortie, nous utilisons un hacheur modéliser par un interrupteur (en pratique un transistor MOFSET ou un thyristor) dont l'ouverture est contrôler électriquement. Nous obtenons alors un créneau qui peut être lisser à l'aide d'un condensateur (charge, décharge).

Définition wikipédia : le thyristor est un composant électronique semi-conducteur à trois bornes composé de quatre couches de silicium dopées alternativement par des accepteurs (P) et des donneurs (N). La structure en couches P-N-P-N du thyristor peut être modélisée par deux transistors PNP et NPN connectés selon le schéma ci-dessous :

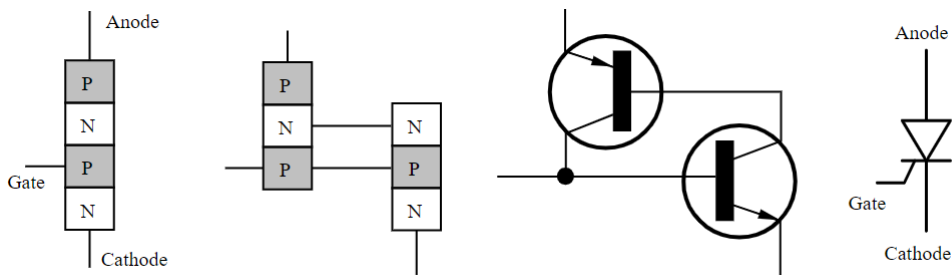


Figure 9: Modélisation physique et électronique d'un thyristor, ainsi que son symbole by wikipédia.

4.2 Modèle du transformateur réel

4.2.1 Origine des pertes dans le transformateur

Voici le modèle du transformateur réel :

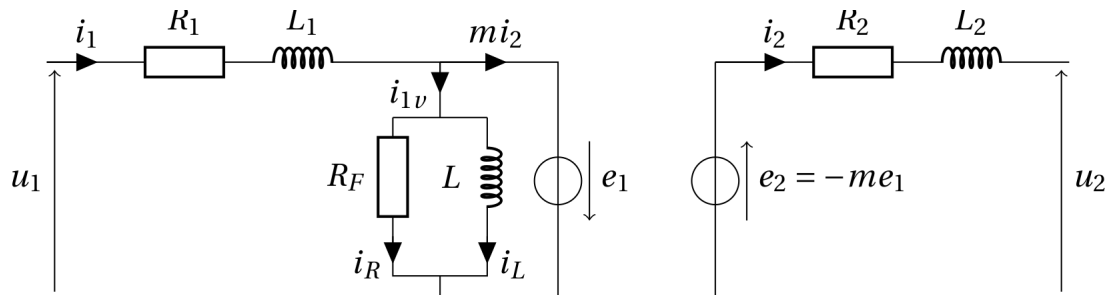


Figure 10: Résistances en séries pour les pertes cuivre ; le circuit inducto-résistif en parallèle pour les pertes fer.

le reste de ce paragraphe est repris du poly de Samuel Boury

Le rendement du transformateur n'est pas rigoureusement de 1, ce qui signifie qu'une partie de la puissance envoyée au primaire est dissipée dans le transformateur et n'est pas restituée au secondaire. On peut identifier deux sources principales de dissipation :

- Les pertes fer P_{fer} : dissipation énergétique dans la partie ferromagnétique du transformateur (soit par courants de Foucaults, soit par hystérésis) ;
- Les pertes cuivre P_j : dissipation par effet joule dans le bobinage du transformateur.
- La puissance EM due au champ B qui ne va pas dans l'entrefer (négligé ici)

La conservation de la puissance électrique permet de dire qu'en valeur moyenne la puissance au primaire P_1 est répartie entre le secondaire P_2 et les différentes pertes : $P_1 = P_2 + P_{fer} + P_j$. La mesure des pertes fer s'effectue à vide : on branche le secondaire directement sur le voltmètre, l'intensité délivrée au secondaire est alors nulle (résistance infinie) donc la puissance au secondaire est nulle. L'intensité dans le bobinage peut elle aussi est considérée nulle, donc il n'y a pas de pertes joule, et finalement : à vide, $P_1 = P_{fer}$.

La mesure des pertes joule s'effectue en court-circuit : on branche le secondaire en court-circuit (en série avec un ampèremètre pour mesurer l'intensité) donc la tension à ses bornes est nulle, et la puissance au secondaire également. La puissance distribuée au primaire est alors entièrement dissipée par effet joule et : en court-circuit, $P_1 = P_j$. Pour faire cette mesure on se place à faible tension au primaire (sinon on grille le transformateur).

On peut montrer que les pertes fer varient comme le carré de la tension au primaire, et que les pertes joule varient comme le carré de l'intensité au secondaire. Avec une série de mesures et une extrapolation, on est donc en mesure de déterminer les pertes fer et les pertes joule dans n'importe quelle situation.

La méthode des pertes séparées permet alors de connaître la puissance délivrée par le secondaire, par une mesure indirecte : au lieu de mesurer la puissance directement sur le secondaire, on la calcule en enlevant les pertes (fer et joule) de la puissance envoyée au primaire :

$$P_2 = P_1 - P_{fer} - P_j \quad (8)$$

4.2.2 Pertes Fer

On ouvre le circuit 2.

Les i sont tous nuls normalement. le transformateur d'étude P66.18. Relever avec le wattmètre u_1 , i_1 , P_1 pour différentes tensions d'entrée u_1 entre 0 et 220 V. D'une part :

$$P_1 = \frac{1}{R_F} u_1^2 \quad (9)$$

et puis :

$$i_1 = \sqrt{\frac{1}{R_F^2} + \frac{1}{L^2 \omega^2}} \times u_1 \quad (10)$$

Représenter P_1 en fonction de u_1^2 puis i_1 en fonction de U_1 . Réaliser un ajustement linéaire dans les deux cas, en déduire R_F puis $L\omega$.

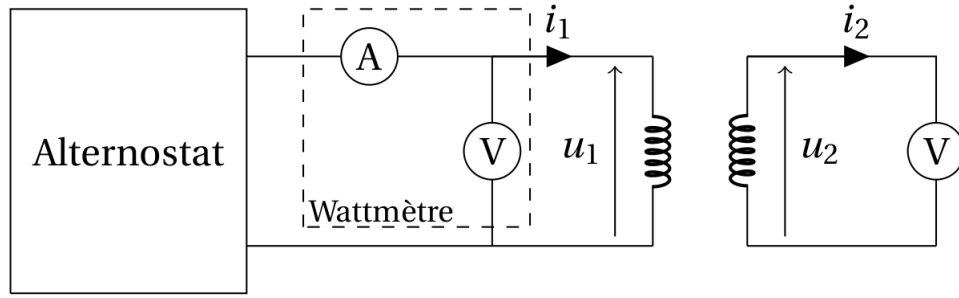


Figure 11: Montage pour les pertes fer.

4.2.3 Pertes cuivres

Cette fois-ci, on court-circuite à droite. Relever u_1 , i_1 , P_1 pour différents courants d'entrée i_1

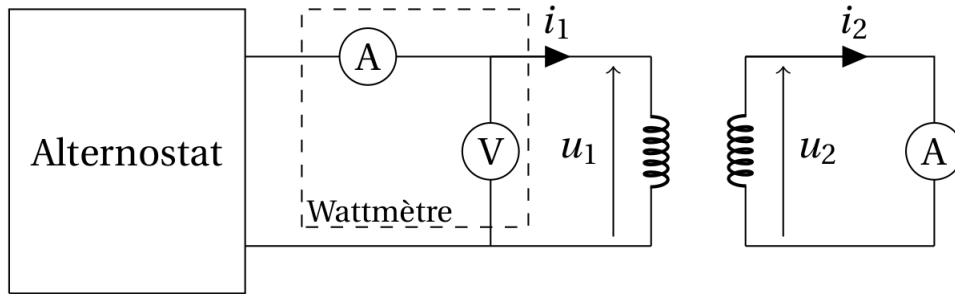


Figure 12: Montage pour les pertes cuivre

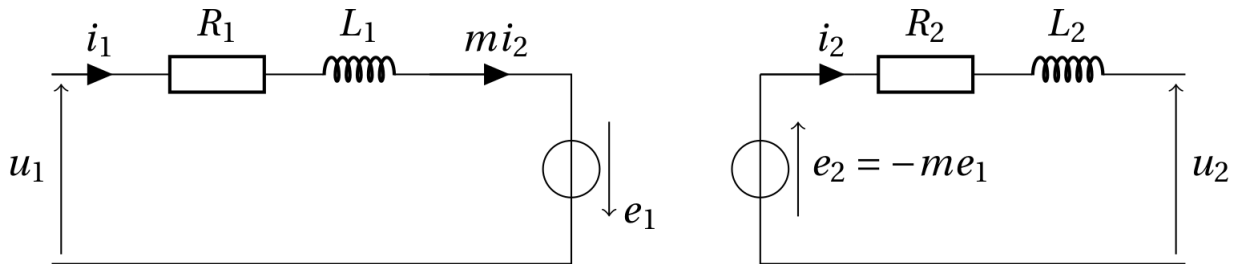


Figure 13: schéma équivalent pour les pertes cuivre

entre 0 et 2 A

On trouve :

$$P_1 = \left(R_1 + \frac{R_2}{m^2} \right) i_1^2 \quad (11)$$

Et :

$$u_1 = \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{m^2} \right) + \omega^2 \left(L_1 + \frac{L_2}{m^2} \right)} i_1 \quad (12)$$

On en déduit alors : $L_1 = \frac{L_2}{m^2}$ et $R_1 + \frac{R_2}{m^2}$

4.3 Pont de Graetz

C'est pas évident à comprendre : Voici ce qui arrive si on alimente une résistance R par un pont de Graetz :

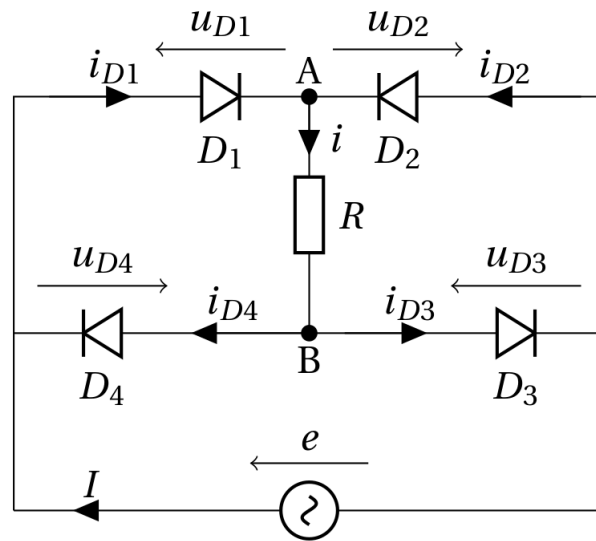


Figure 14: Pont de Graetz qui alimente une résistance. Dans le circuit redresseur, on remplace R par un filtre passe bas à grande constante de temps $\frac{1}{RC}$

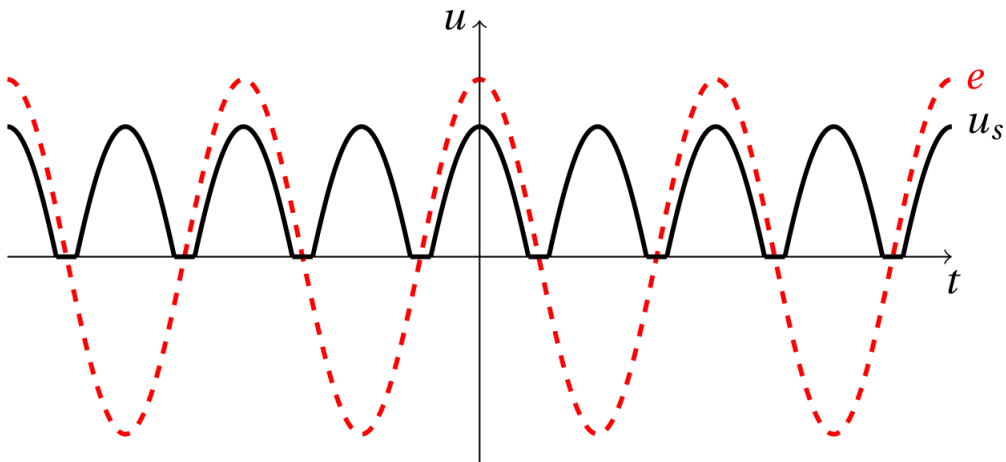


Figure 15: tension en sortie du pont de Graetz : $u_s = V(A) - V(B)$