

TP1 : Machine Synchrones en régime permanent sinusoïdal

Yann LABBÉ
Olivier LÉVÊQUE

27 novembre 2015

Résumé

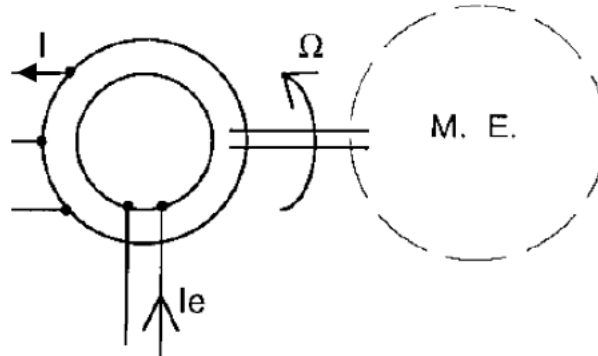
L'objectif de cette séance de travaux pratiques est d'étudier le premier modèle de la machine synchrone établi pour le régime permanent sinusoïdal afin d'appréhender les transferts de puissances dans le cas où cette machine est couplée au réseau électrique.

Table des matières

1	Présentation	2
1.1	Hypothèses et établissement du modèle de Behn-Eschenburg	2
1.2	Transferts de puissances de la machine synchrone connectée à un réseau . .	4
2	Modèle de Behn-Eschenburg	6
2.1	Essai à vide	6
2.1.1	Théorie	6
2.1.2	Expérimentation	6
2.2	Essai en court-circuit	9
2.2.1	Théorie	9
2.2.2	Expérimentation	10
3	Couplage sur le réseau	12
3.1	Théorie	12
3.2	Expérimentation	14
4	Conclusion	15

1 Présentation

On se limitera lors de ce TP au cas de la machine synchrone triphasée à excitation réglable, entraînée par un moteur à courant continu, dont le schéma de fonctionnement est donné ci-dessous.



Celle-ci est constituée par :

- un stator, à pôles lisses, comportant trois bobinages parcourus par des courants alternatifs. Nous noterons I l'un de ces courants.
- un rotor, qui peut être soit à pôles lisses, soit à pôles saillants, comportant un seul bobinage parcouru par un courant continu I_e .

1.1 Hypothèses et établissement du modèle de Behn-Eschenburg

Afin d'établir le modèle de Behn-Eschenburg, **nous ne tiendrons pas compte de la saturation magnétique des constituants de la machine synchrone (principalement le fer) et nous ferons l'hypothèse que la machine synchrone étudiée est à pôles lisses.**

Le circuit magnétique du système devient alors linéaire et nous pouvons exprimer les flux totaux (lorsque la machine synchrone est en charge), Φ_j (avec $j = \{1, 2, 3\}$), perçus par les trois bobinages de l'induit.

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2 + M_{13} i_3 + \Phi_{f1}$$

$$\Phi_2 = M_{21} i_1 + L_2 i_2 + M_{23} i_3 + \Phi_{f2}$$

$$\Phi_3 = M_{31} i_1 + M_{32} i_2 + L_3 i_3 + \Phi_{f3}$$

où Φ_{fj} (avec $j = \{1, 2, 3\}$) est le flux total perçu par le bobinage j lorsque la machine synchrone est à vide ($i_1 = i_2 = i_3 = 0$ et $I_e \neq 0$).

Comme nous considérons que la machine synchrone étudiée est à pôles lisses, nous pouvons poser :

$$L_s = L_1 = L_2 = L_3 = cste$$

$$M_s = M_{12} = M_{13} = M_{21} = M_{23} = M_{31} = M_{32} = cste$$

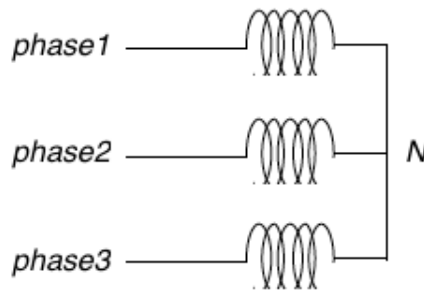
L'expression des flux devient alors :

$$\Phi_1 = L_s i_1 + M_s (i_2 + i_3) + \Phi_{f1}$$

$$\Phi_2 = L_s i_2 + M_s (i_1 + i_3) + \Phi_{f2}$$

$$\Phi_3 = L_s i_3 + M_s (i_1 + i_2) + \Phi_{f3}$$

Il est important de noter que les bobinages statoriques sont couplés en étoile, comme l'illustre de le schéma ci-dessous. Ainsi la somme des courants i_j avec $j = \{1, 2, 3\}$ est nulle.



Couplage en étoile des bobines statoriques de la machine synchrone

L'expression des flux se simplifie alors.

$$\Phi_1 = (L_s - M_s) i_1 + \Phi_{f1}$$

$$\Phi_2 = (L_s - M_s) i_2 + \Phi_{f2}$$

$$\Phi_3 = (L_s - M_s) i_3 + \Phi_{f3}$$

En posant $L_c = L_s - M_s$, nous pouvons écrire pour $j = \{1, 2, 3\}$:

$$\Phi_j = L_c i_j + \Phi_{fj}$$

De plus, chaque bobinage statorique j a un comportement résistif lorsqu'il est parcouru par un courant i_j . Nous modéliserons ce comportement par une résistance R . L'expression de la tension v_j au borne du bobinage j est alors (en convention générateur) :

$$v_j = -R i_j - \frac{d\Phi_j}{dt}$$

$$v_j = -R i_j - L_c \frac{di_j}{dt} - \frac{d\Phi_{fj}}{dt}$$

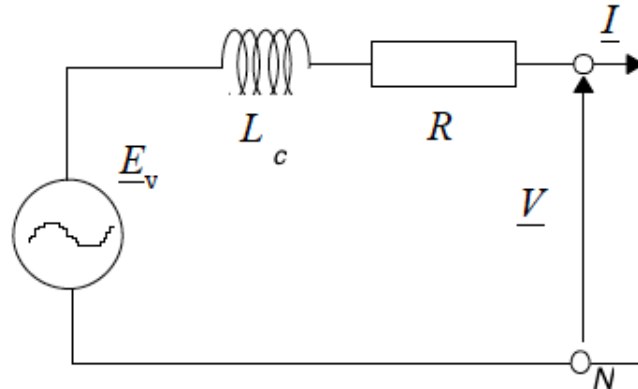
En notant \underline{V} la tension complexe v_j , \underline{I} le courant complexe i_j et \underline{E}_v la fem complexe $-\frac{d\Phi_{fj}}{dt}$. Nous obtenons l'expression :

$$\underline{V} = -R \underline{I} - j L_c \omega \underline{I} + \underline{E}_v$$

avec ω la pulsation électrique.

Les éléments caractérisant le modèle de Behn-Eschenburg sont alors **la fem E_v , la résistance équivalente R et l'inductance statorique L_c , nous poserons $X_s = \omega L_c$.**

Nous obtenons donc, à partir de l'expression précédemment établie, le schéma électrique équivalent monophasé suivant.



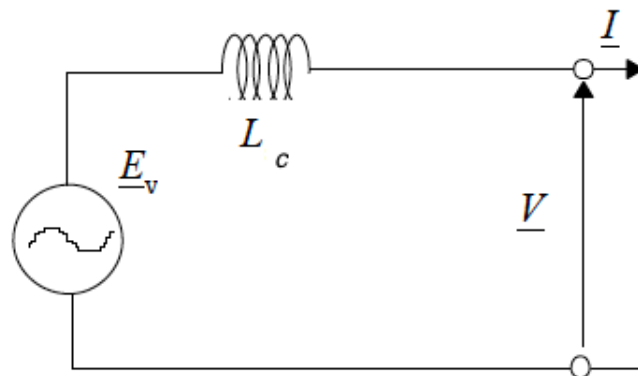
Remarque : Le potentiel de référence V_N (du point N) est ici le neutre artificiel, obtenu en couplant les trois bobinages statoriques de la machine synchrone en étoile.

1.2 Transferts de puissances de la machine synchrone connectée à un réseau

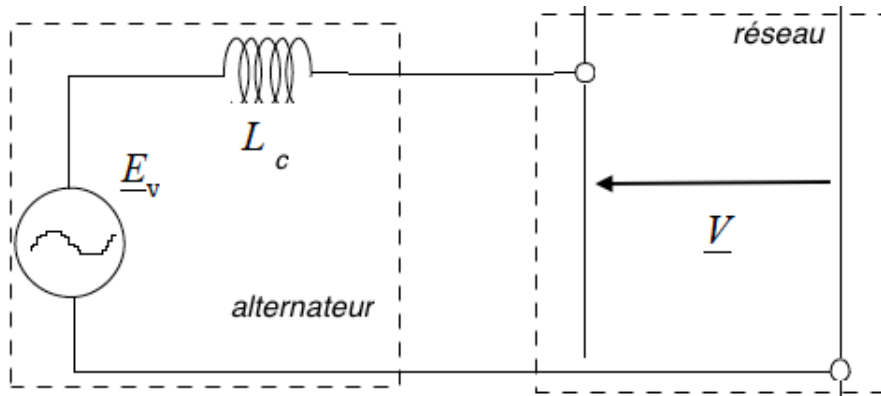
Supposons, à présent que cette machine synchrone dont nous venons d'établir le modèle monophasé équivalent, est connecté à un réseau EDF de fréquence fixe $f_0 = 50Hz$ et de tension sinusoïdale connue ($V_{eff} = 230V$).

Nous ferons l'hypothèse que la puissance apparente de court-circuit du réseau est infinie et que les pertes cuivre dans les bobinages la machine sont négligeables devant les autres grandeurs caractéristiques du système (ce qui revient à négliger le terme $R\vec{I}$ établi précédemment).

Ainsi nous pouvons établir le nouveau schéma équivalent monophasé de la machine synchrone :

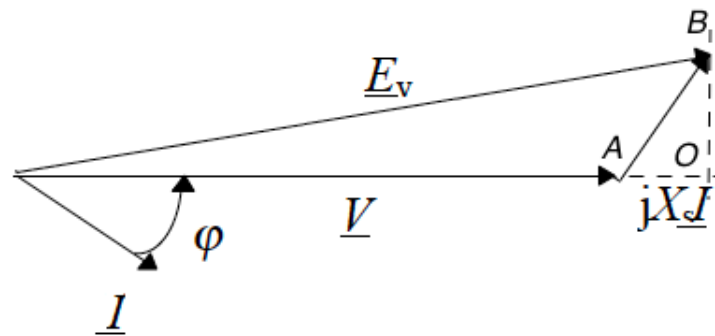


Une fois branché au réseau, ce schéma devient :



$$\underline{E}_v = jX_s \underline{I} + \underline{V}$$

Nous pouvons alors tracer dans le plan complexe l'expression du modèle précédemment établie. Nous posons φ le déphasage entre le courant \underline{I} et la tension \underline{V} .



À partir de ce tracé, nous pouvons déterminer graphiquement :

- la longueur : $OA = X_s I \cos(\varphi)$;
- la longueur : $OB = X_s I \sin(\varphi)$

Comme les puissances s'écrivent :

- Puissance apparente : $S = 3VI$;
- Puissance active : $P = 3VI \cos(\varphi)$;
- Puissance réactive : $Q = 3VI \sin(\varphi)$

On en déduit que :

- Puissance apparente : $S = 3VI$;
- Puissance active : $P = \frac{3V \cdot OA}{X_s}$;
- Puissance réactive : $Q = \frac{3V \cdot OB}{X_s}$

2 Modèle de Behn-Eschenburg

Nous allons, à présent, chercher à déterminer les variables caractéristiques E_v et X_s de notre modèle.

Nous allons donc réaliser deux mesures :

- la première consistera à mesurer à vide la tension au borne d'une phase pour déterminer la caractéristique de la f.e.m E_v en fonction du courant d'excitation I_e .
- la seconde consistera à mesurer en court-circuit le courant traversant une phase I (nous noterons I_c ce courant en court-circuit) en fonction du courant d'excitation I_e pour déterminer la valeur de l'inductance statorique L_c .

2.1 Essai à vide

2.1.1 Théorie

Le premier essai à vide consiste à tracer la caractéristique $E_v = f(I_e)$.

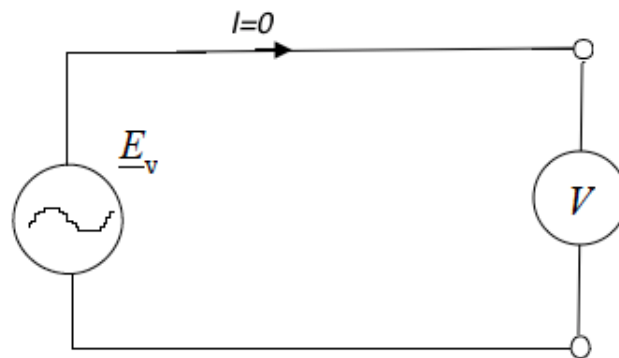


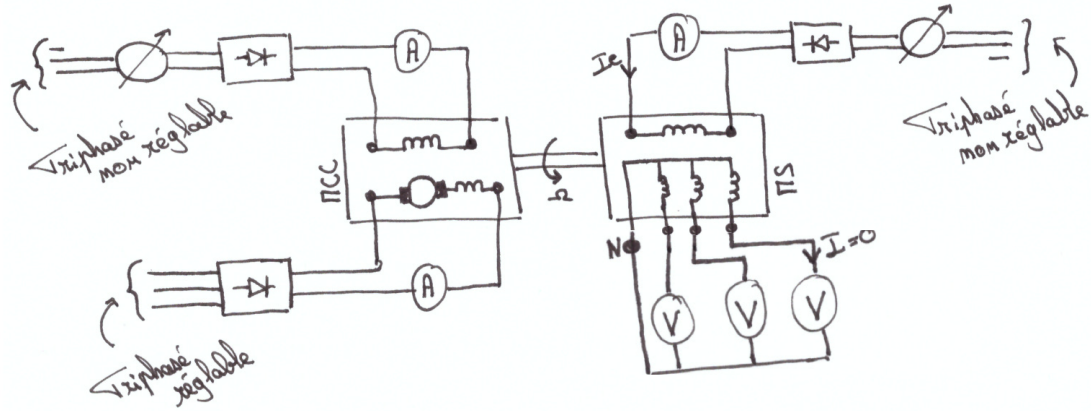
Schéma électrique de l'essai à vide

Comme nous supposons que la machine synchrone ne subit aucune saturation magnétique. La caractéristique $E_v = f(I_e)$ est une courbe linéaire, ainsi un seul point de mesure dans la partie rectiligne suffirait. Dans la pratique, on relève également des points dans la partie non rectiligne ne serait ce que pour voir les limites de validité de ce modèle.

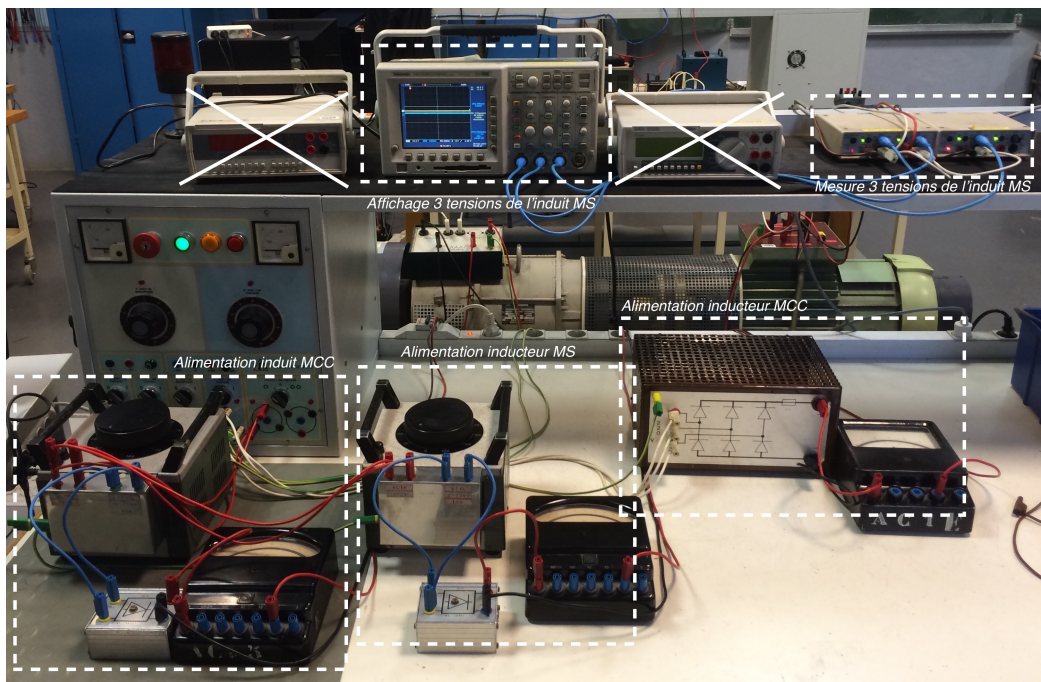
Ce première essai à vide permet donc de caractériser la variable E_v du notre modèle de Behn-Echenburg.

2.1.2 Expérimentation

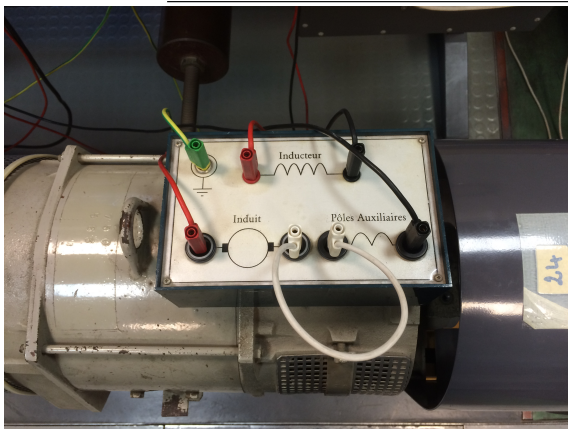
Afin de relever la caractéristique de la fem à vide, nous avons réaliser le montage de la manière suivante.



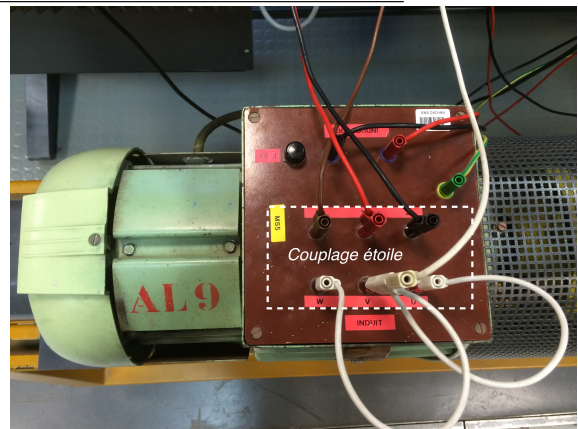
Voici en image le câblage réalisé.



Câblage de l'alimentation des machines et des voltmètres différentiels



Câblage de la machine à courant continu



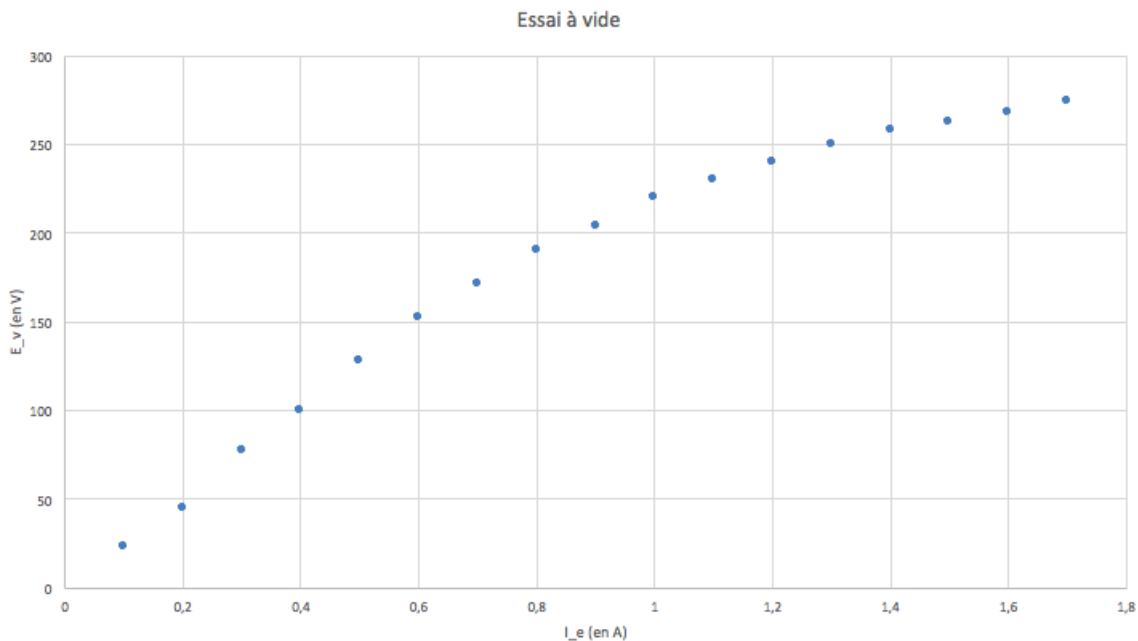
Câblage de la machine synchrone

Remarque : Plusieurs couplages des bobinages de l'induit de la machine synchrone sont possibles : couplage en étoile ou en triangle.

Comme nous l'avons vu précédemment, le modèle de Behn-Eschenburg fait appel au neutre artificiel comme potentiel de référence. Il est donc essentiel de le faire apparaître sur notre montage pour effectuer les mesures de tension avec le même potentiel de référence que celui du modèle.

C'est pourquoi, nous adoptons un couplage en étoile pour les bobinages de l'induit de la machine synchrone.

À l'aide de plusieurs mesures de tension aux bornes d'une phase de la machine synchrone faisant varier le courant d'excitation I_e , nous obtenons la caractéristique suivante.

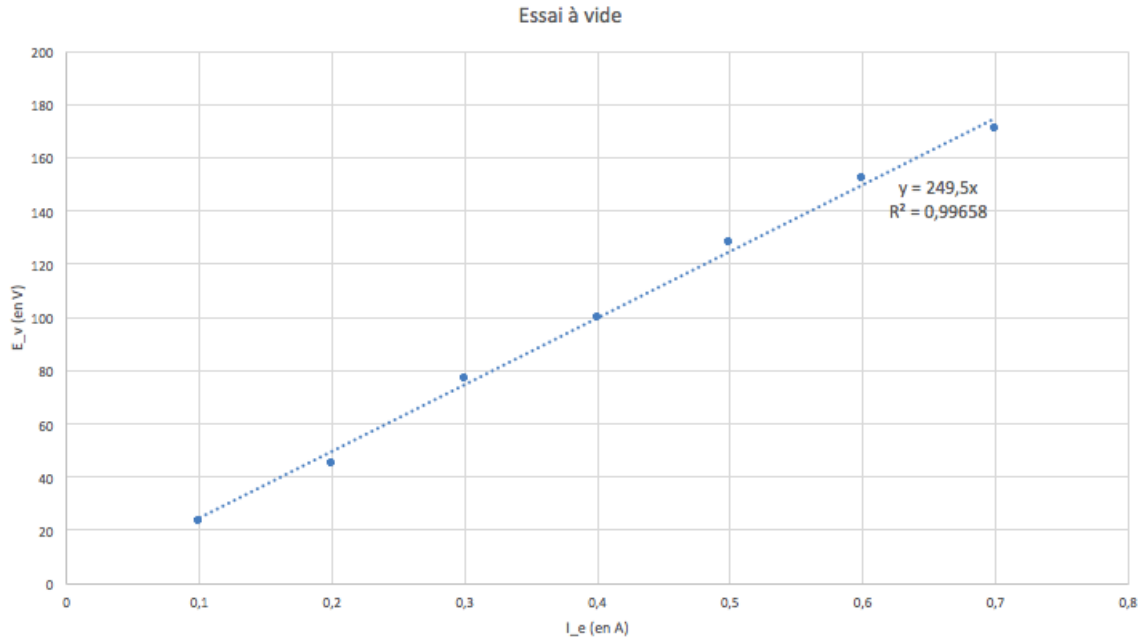


Nous remarquons deux régimes différents : l'un est linéaire ($I_e \in [0; 0,7]$ en A) tandis que l'autre est saturé ($I_e \in [0,7; 1,8]$ en A).

Comme nous l'avons expliqué lors de l'étude théorique, la saturation de E_v lorsque I_e augmente est dû à la saturation magnétique des matériaux de la machine synchrone.

Comme notre modèle de Behn-Eschenburg est établi en faisant abstraction de cette saturation, il faudra veiller, lors de la caractérisation des éléments du modèle, à ne pas dépasser le seuil $I_e = 0,7A$ pour rester dans le régime linéaire de l'alternateur.

Remarque : Lors de l'essai, il faut veiller à ce que le courant d'excitation ne soit pas trop important pour ne pas dégrader le matériel. Compte-tenu du courant nominal de la machine et des courants que peuvent supporter les fils à fiches bananes, nous nous sommes limités à 10A.



En ne gardant que les points de la zone linéaire nous obtenons la caractéristique de E_v en fonction de I_e suivante.

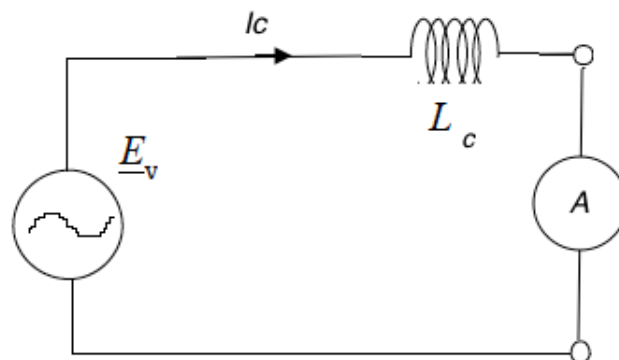
$$E_v = 249,5 I_e$$

2.2 Essai en court-circuit

2.2.1 Théorie

L'essai en court-circuit consiste à tracer la caractéristique $I_c = f(I_e)$ où I_c est le courant de court-circuit traversant les bobinages du stator.

Le schéma électrique du montage de cet essai est donné ci-dessous.



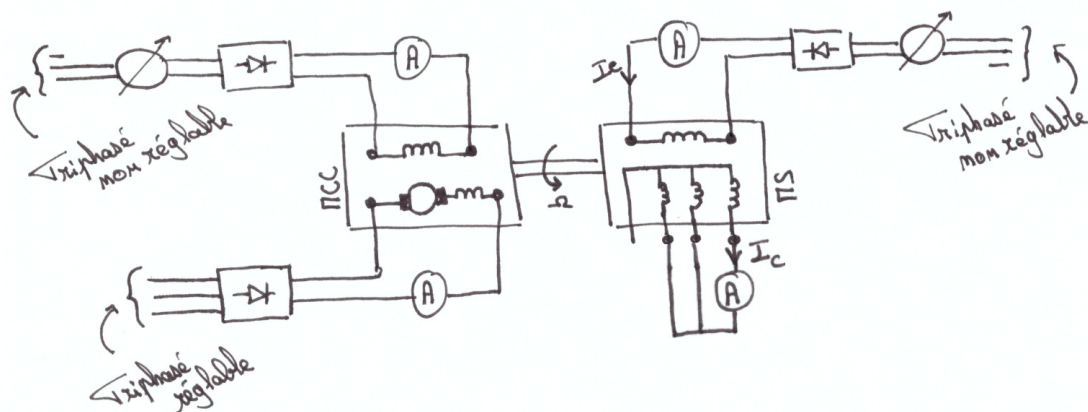
L'alternateur débite alors, dans ce cas, sur son impédance interne, essentiellement inductive. Comme la machine n'est, par hypothèse, toujours pas saturée, la caractéristique de court-circuit est linéaire. Il suffit de nouveau que d'un seul relevé pour déterminer la caractéristique (en général, celui-ci correspond au courant nominal).

La réactance synchrone X_s se détermine alors ainsi : pour un même courant I_{e1} , tel que les points de fonctionnement soient situés dans la partie rectiligne des caractéristiques, on relève une tension E_{v1} sur la caractéristique à vide et I_{c1} sur celle en circuit. V étant nul ici, on peut écrire $E_{v1} = X_s I_{c1}$ d'où

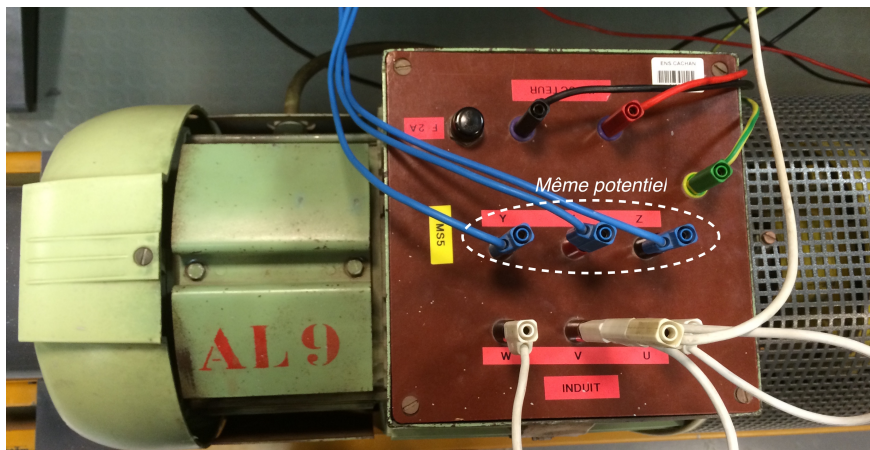
$$X_s = \frac{E_{v1}}{I_{c1}}$$

2.2.2 Expérimentation

Afin de relever la caractéristique $I_c = f(I_e)$, nous avons réalisé le montage suivant.

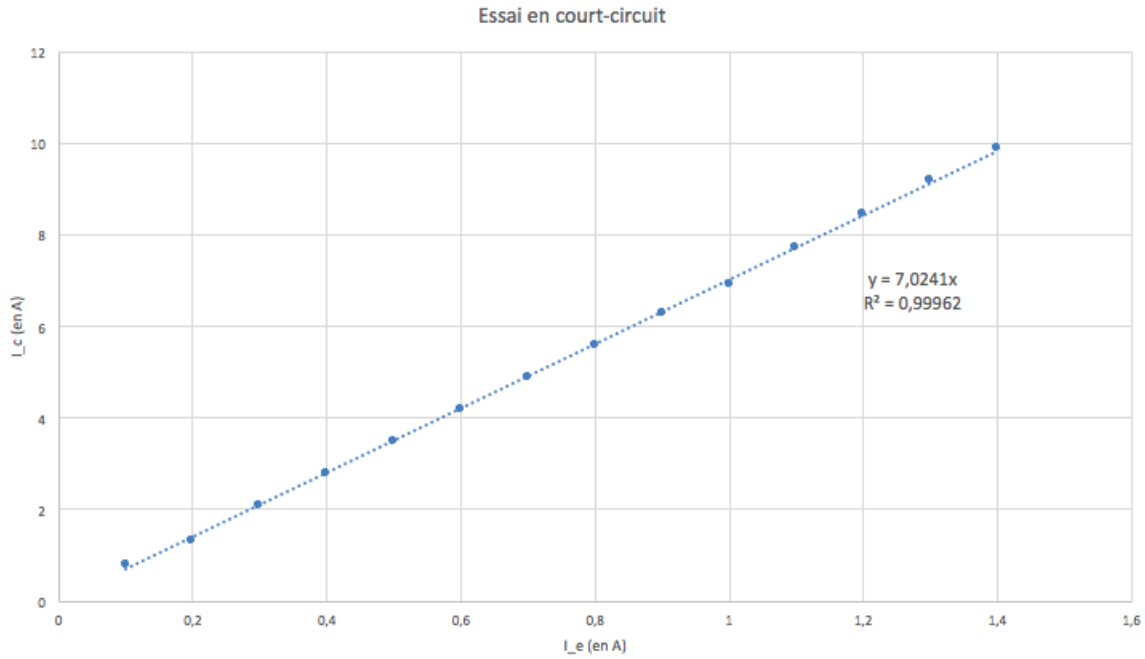


Le câblage d'alimentation des machines n'ayant pas changer, nous allons illustrer ici en image seulement le câblage permettant de court-circuiter les phases.



Câblage permettant de court-circuiter les bobinages de l'induit de la MS couplés en étoile

À l'aide de plusieurs mesures du courant I_c traversant le bobinage d'une phase de la machine synchrone en faisant varier le courant d'excitation I_e , nous obtenons la caractéristique suivante.



Il s'agit d'un essai à puissance réduite pour limiter la valeur de I_c et ne pas dégrader le matériel. Ici la caractéristique en court-circuit (I_c en fonction de I_e) est linéaire.

En appliquant la démarche décrite dans la partie théorie, nous pouvons déterminer X_s à partir des relevés expérimentaux que nous venons d'effectuer.

Choisissons $I_{e1} = 0,4A$, ainsi $E_{v1} = 100V$ et $I_{c1} = 3A$, d'où :

$$X_s = \frac{E_{v1}}{I_{c1}} = 33,33\Omega$$

Comme les signaux mesurés sont à la fréquence $f_0 = 50Hz$:

$$L_c = \frac{X_s}{2\pi f_0} = 10,5 \cdot 10^{-2} H$$

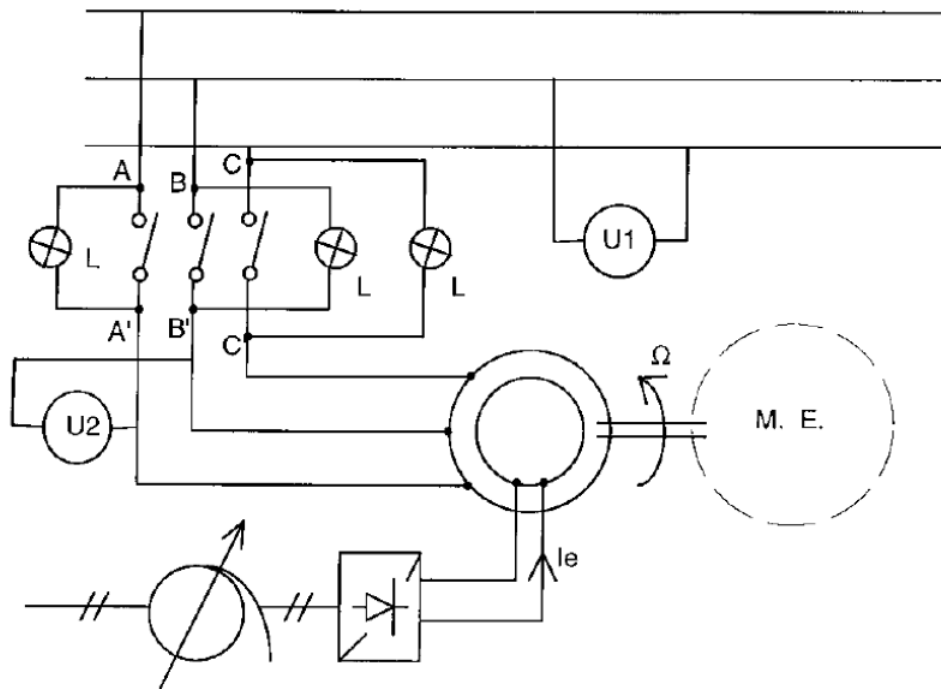
3 Couplage sur le réseau

3.1 Théorie

Lors du couplage de la machine synchrone au réseau, les conditions suivantes sont requises :

- l'amplitude de E_v et V doivent être identiques ;
- les fréquences de E_v et V doivent être identiques ;
- les signaux E_v et V doivent être en phase.

Le schéma de couplage est rappelé ci-dessous.



Afin de coupler la machine synchrone dans les conditions évoquées précédemment, il faut suivre la démarche suivante :

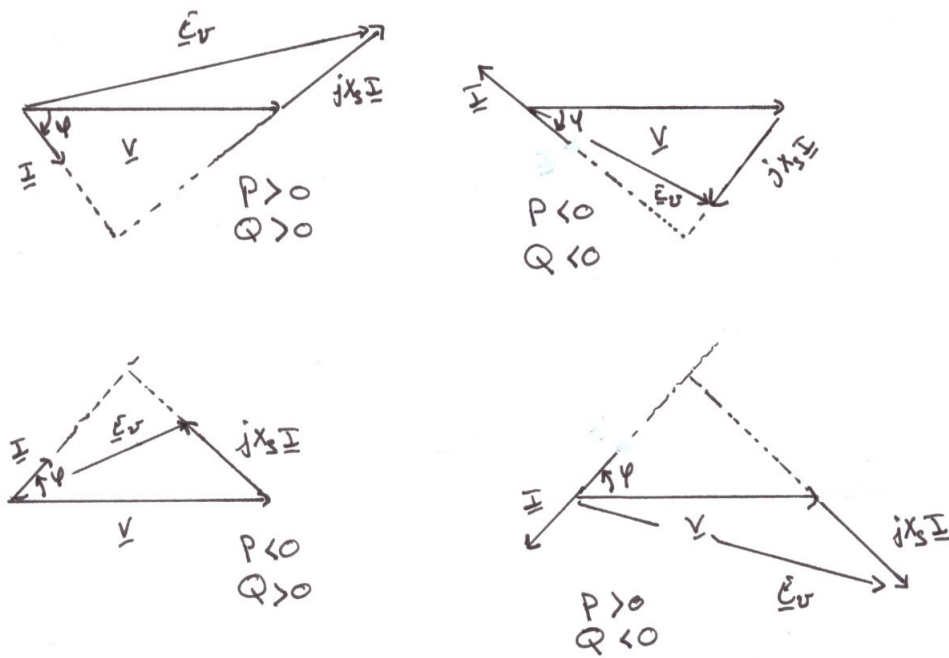
1. Interrupteur triphasé ouvert, on alimente l'induit de la machine synchrone avec un courant I_e .
2. On met en rotation l'arbre de l'alternateur, en alimentant le moteur électrique l'entraînant.
3. On augmente progressivement la vitesse de rotation de l'alternateur et on observe les voltmètres $U1$ et $U2$.

Il est nécessaire à ce stade de vérifier que l'ordre des phases est le même sens pour le réseau triphasé de la table et pour la machine synchrone. Pour cela, on utilise les trois lampes de l'interrupteur triphasé. Si les lampes s'éclairent et s'éteignent simultanément, lorsque la fréquence de la machine synchrone est presque égale à celle du réseau (il suffit de jouer sur Ω pour cela), alors le sens est bon. Sinon, il suffit de croiser deux phases pour que cela le devienne.

4. il faut s'assurer, à présent, de l'égalité des tensions et de l'égalité des fréquences. Pour cela on règle la vitesse de rotation de l'alternateur Ω en jouant sur l'alimentation du moteur électrique puis on excite l'alternateur avec le courant I_e pour qu'il fournisse une tension égale à celle du réseau.
5. Comme il subsiste une petite différence de fréquence entre la tension du réseau et celle fournie par la machine synchrone, les lampes s'allumeront périodiquement avec une fréquence qui augmentera et diminuera périodiquement. On cherchera à rendre cette période la plus grande possible en ajustant la vitesse Ω . Quand les lampes s'éteignent, la différence de potentielle entre l'alternateur et le réseau est nulle. On peut donc, à cet instant, fermer l'interrupteur triphasé. L'alternateur est alors couplé au réseau.

Une fois la machine couplée, nous pouvons régler les paramètres de la machine d'entraînement (Ω) et le courant d'excitation de la MS (I_e) afin d'observer chacun des 4 transferts de puissances possible.

Les quatres représentations dites de Fresnel afin d'illustrer les quatre transferts de puissances possibles sont :



Où :

- ($P > 0$ et $Q > 0$) correspond à un fonctionnement inductif alternateur ;
- ($P < 0$ et $Q < 0$) correspond à un fonctionnement capacitif moteur ;
- ($P < 0$ et $Q > 0$) correspond à un fonctionnement inductif moteur ;
- ($P > 0$ et $Q < 0$) correspond à un fonctionnement capacitif alternateur.

Remarque : Nous adoptons la convention générateur pour l'étude des transferts de puissance de cette machine synchrone.

3.2 Expérimentation

Nous avons couplé la machine synchrone au réseau en suivant la procédure décrite dans la partie théorique. Voici en image l'interrupteur triphasé juste avant couplage (lampes éteintes = les grandeurs électriques délivrées par la MS et celles du réseau sont identiques).



Interrupteur triphasé, juste avant couplage (lampes éteintes)

Une fois la machine couplé, nous avons chercher à mettre en évidence le fonctionnement dans les quatre quadrants de la MS.

En effet, l'une des particularités de la machine synchrone est sa capacité à fonctionner comme une machine inductive ($Q > 0$) ou capacitive ($Q < 0$) que ce soit en fonctionnement moteur ($P < 0$) ou générateur ($P > 0$).

Il suffit pour cela de jouer sur l'amplitude E_v , c'est-à-dire sur le courant d'excitation rotorique de la MS I_e pour faire varier la puissance Q . D'autre part, en jouant sur le couple de la MCC, c'est-à-dire sur son courant d'excitation, nous pouvons faire varier la puissance P .

Ainsi nous pouvons atteindre les quatre transferts de puissances décrits dans la partie théorie.

4 Conclusion

Cette séance de travaux pratiques nous a permis d'étudier le premier modèle de la machine synchrone établi pour le régime permanent sinusoïdal, celui de Behn-Eschenburg. Nous avons dans un premier temps pu déterminer les caractéristiques du modèle sur l'une des machines synchrones de la salle pour ensuite la brancher au réseau électrique et étudier les transferts de puissance.