

Machine synchrone - fonctionnement en génératrice

I - Généralités

La machine synchrone est une machine à champ tournant, elle est réversible comme la machine à courant continu ou la machine asynchrone, c'est à dire qu'elle peut être motrice ou génératrice. Notre étude se bornera ici à considérer l'aspect génératrice, on l'appelle plus particulièrement : alternateur. L'énergie mécanique nécessaire sera fournie par une machine asynchrone.

1.1- Structure de la machine synchrone

1.1.1 - L'inducteur ou rotor

Il réalise une succession de pôles nord et de pôles sud, soit $2p$ pôles au total. Ils sont régulièrement disposés sur l'axe de rotation de la machine et constituent le rotor. Les pôles peuvent être saillants ou lisses. Le rotor est homogène du point de vue magnétique uniquement lorsque les pôles sont lisses. Le flux créé par l'inducteur est réglable grâce à un courant continu dit d'excitation, noté I_e dans le texte.

1.1.2 - L'induit ou stator

Pour une machine triphasée, il est constitué de trois ensembles d'enroulements logés dans les encoches du stator. Ces enroulements sont régulièrement décalés les uns par rapport aux autres. Le cours précisera davantage ce point. Lors d'un fonctionnement équilibré, ces enroulements sont parcourus par trois courants triphasés équilibrés créant un champ (ou flux) tournant à $2p$ pôles synchrone du champ (ou flux) tournant rotorique.

1.1.3 - Couple électromagnétique

Les champs rotorique et statorique entrent en interaction générant ainsi le couple électromagnétique. Ce dernier est résistant en alternateur et moteur en moteur synchrone. Sur les machines standard les courants étant sinusoïdaux le constructeur fait en sorte que la répartition spatiale des champs statorique et rotorique soit sinusoïdale. Ceci permet d'avoir un couple constant pour une amplitude de courant donnée dans le cas idéal.

1.2 - Objectifs poursuivis

Il s'agit de construire un modèle de comportement en régime permanent de la machine synchrone. Ce modèle doit être en mesure de prédéterminer le fonctionnement en charge. La détermination pratique du modèle est réalisée à l'aide d'essais exigeant peu de puissance. Ces essais sont adaptables à une gamme d'alternateurs relativement puissants. De même, la modélisation du transformateur ou de la machine asynchrone est faite à l'aide d'essais basse énergie.

On s'intéresse au régime équilibré. La machine possède par construction une structure symétrique, le modèle de type dipôle est le même pour chacune des phases.

II - Dispositif expérimental

Pour réaliser les expériences et mesures qui vont suivre, on dispose :

- d'un alternateur triphasé accouplé à une machine asynchrone. L'ensemble devant tourner à vitesse très proche de 1500t/mn. Il est rappelé que les valeurs nominales sont indiquées sur la plaque signalétique. On pourra cependant dépasser la vitesse nominale ou le courant nominal (1,2 fois I_N).
- d'un tachymètre pour la mesure de la vitesse.
- d'une alimentation continu fixe et d'un rhéostat de 3300 Ω pour alimenter l'inducteur (courant I_e).
- d'un ensemble de voltmètres et ampèremètres électrodynamiques ou électroniques (respecter les calibres).
- de plans de charge résistif et inductif.
- de la machine asynchrone d'entraînement
- d'un wattmètre et de son commutateur.

III - Modélisations

1 - Modèle de Behn-Eschenburg

1.1 - Principe

- Si l'alternateur fonctionne à vide la f.é.m. induite dépend du courant d'excitation I_e et de la vitesse N : $E_v = f(I_e, N)$.
- Dès que l'alternateur est chargé, les courants triphasés d'induit engendrent un champ tournant qui s'associe au champ tournant rotorique. Dans l'entrefer, on trouve donc un flux dépendant non seulement de I_e mais aussi de l'intensité débitée I . C'est ce qu'on appelle la réaction magnétique d'induit, notée généralement R.M.I.

1.2 - Bilan des flux dans une phase

Le flux en charge ou flux résultant est composé :

- Du flux inducteur $F_r(I_e)$ balayant la phase au cours de la rotation.
- Du flux de R.M.I. que l'on pose proportionnel au courant d'induit : $f_s(I) = L_s I$ avec L_s un coefficient de proportionnalité homogène à une inductance. Sa valeur n'est constante que dans la mesure où le rotor est magnétiquement homogène, c'est à dire à pôles lisses.

Sous l'hypothèse que l'état magnétique de la machine n'est pas saturé il est possible de considérer que l'ajout des différentes forces magnétomotrices rotorique et statorique revient à additionner les flux. On obtient alors :

$$\underline{f}_t = \underline{f}_r(I_e) + \underline{f}_s(I).$$

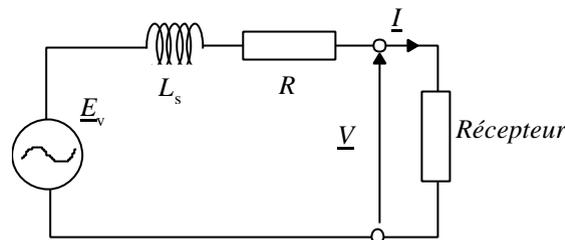
A ce flux résultant correspond la f.é.m. en charge appelée également f.é.m. résultante notée E_t :

$$E_t = -\frac{d\underline{f}_t}{dt} = -\frac{d\underline{f}_r(I_e)}{dt} - \frac{d\underline{f}_s(I)}{dt} = E_v - L_s \frac{dI}{dt}$$

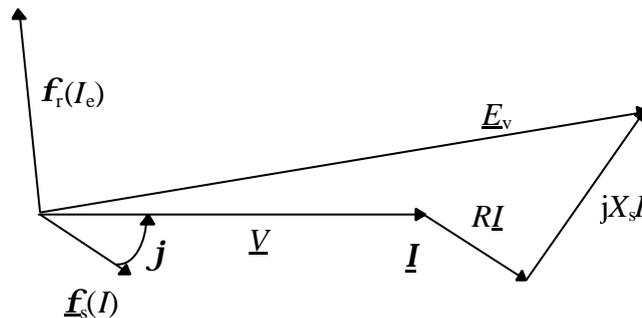
Si R est la résistance d'une phase, alors la tension aux bornes d'une phase est :

$$\underline{V} = \underline{E}_v - jL_s \omega \underline{I} - R \underline{I}$$

Cette relation permet de tracer le schéma équivalent d'une phase statorique selon Behn-Eschenburg. Il est constitué du générateur de Thévenin équivalent d'une phase, avec sa f.é.m. et son impédance interne. La quantité $L_s \omega$ notée X_s est appelée réactance cyclique synchrone. Tout se passe comme si la f.é.m. était inchangée car $E_v = f(I_e, N)$. La R.M.I. est introduite uniquement par la présence d'une réactance.



Le schéma dans le plan complexe est alors le suivant:



Suite aux mesures, on remarquera que $R \ll X_s$, ce qui explique que sur certains schémas vectoriels le terme RI disparaisse.

1.3 - Essais à vide

la caractéristique à vide $E_v = f(I_e, N)$ sera mesurée à l'aide d'un voltmètre branché aux bornes d'une des phases, $U_1 U_2$ par exemple, pour un courant d'excitation I_e variant de 0 à $1,2 I_{en}$ et une vitesse N proche de 1500t/mn. La série de mesure sera faite dans le sens croissant jusqu'à $1,2 I_{en}$ puis en décroissant jusqu'à la valeur I_e minimale.

1.4 - Essais en court-circuit

Le but est de mesurer la valeur de l'impédance (R, X_s) à partir d'un essai en court-circuit puis d'en extraire X_s connaissant R . Lorsque l'alternateur est court-circuité on obtient la relation suivante en appelant I_{cc} l'intensité de court-circuit:

$$0 = \underline{E}_v - jL_s \omega \underline{I}_{cc} - R \underline{I}_{cc}$$

Dans ces conditions on obtient:
$$\frac{E_v}{I_{cc}} = \sqrt{X_s^2 + R^2}$$

Court-circuiter les trois phases (court-circuit équilibré, c'est une nécessité) en insérant un ampèremètre dans l'une d'elles.

Tracer I_{cc} en fonction de I_e . On fera varier I_{cc} jusqu'à I_N . Attention on a $I_e \ll I_{en}$ dans ce cas.

La courbe sera portée sur la feuille de la caractéristique à vide.

Mesurer la résistance d'induit R à chaud à l'aide d'une méthode volt-ampèremétrique.

1.5 - Exploitation des essais

Les flux ayant été ajoutés (III-1-2) cela suppose que l'on considère la machine non saturée, la notion de réactance synchrone n'a de sens que dans la mesure où $E_v = f(I_e, N)$ reste une fonction linéaire de I_e . Calculer dans la zone de fonctionnement linéaire :

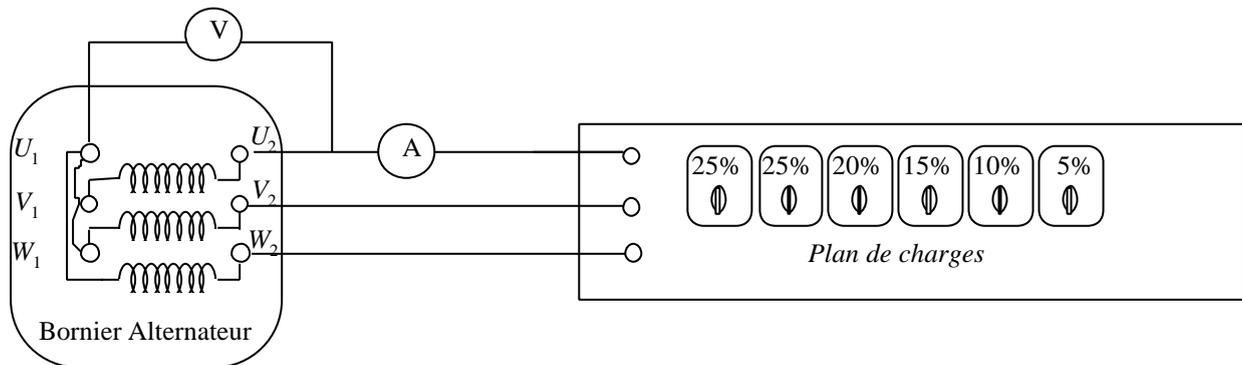
- la pente k de la partie rectiligne $E_v = f(I_e, N)$.
- la réactance synchrone X_s
- On notera la valeur de I_e de la caractéristique à vide à partir de laquelle débute la non linéarité.

1.6 - Comparaison entre le modèle et le système réel sur charge résistive

Supprimer le court-circuit tout en conservant $U_1V_1W_1$ reliées (neutre).

Connecter les sorties $U_2V_2W_2$ au plan de charges disponible sur la table de manipulation.

Effectuer le câblage suivant en choisissant correctement les calibres des appareils de mesures.



Régler le courant d'excitation à 0.25 A à l'aide du rhéostat de 3300 Ω . Pour N voisin de 1500t/mn, régler le plan de charge sur 30% pour obtenir un courant de ligne proche de la valeur nominale soit 0,19A. Mesurer alors:

I et $V = f(I_e)$ en gardant cette résistance de charge constante.

Calculer à partir de I et V la résistance de charge pour chaque valeur de I_e (mesure des variations faible de R_{ch}).

Connaissant X_s , en déduire la valeur de la f.é.m. à vide pour chaque valeur de I_e .

Comparer ces valeurs avec les valeurs données à partir du modèle de la f.é.m. : $E_v = kI_e$.

Construire deux schémas dans le plan complexe, relatifs à deux points de mesures, dans le cas saturé et non saturé.

1.7 - Conclusion sur Behn-Eschenburg

La RMI est prise en compte dans X_s , ce modèle est proche du comportement réel de la machine lorsque son circuit magnétique est non saturé, et a un rotor lisse. Si on veut prendre en compte la saturation magnétique, il faut utiliser la caractéristique $E = f(I_e, N)$. Cette caractéristique est déterminée à partir du flux commun entre l'induit et l'inducteur. Dans Behn-Eschenburg on suppose que toute la réaction d'induit participe à la modification de la f.é.m. pour donner la f.é.m. résultante E_t . En fait une partie du flux créé par l'induit n'arrive pas à l'inducteur. Il n'influence donc pas la f.é.m., il correspond à un flux de fuites. Si on désire travailler dans la zone saturée on ne peut pas additionner les flux. Il faut donc considérer les ampères tours communs à l'induit et à l'inducteur qui influencent la valeur de E_t et ceux qui participent au flux de fuites. Pour ce faire on utilise le modèle de Potier.