

Chapitre 4 : Les machines électriques à courant alternatif

Alternateur synchrone triphasé

IV.1.1. Les machines électriques à courant alternatif

Une machine tournante à courant alternatif est constituée de deux armatures magnétiques concentriques pourvues d'encoches, séparées par un entrefer constant ou variable (Tab.1.1). Stator et rotor reçoivent des enroulements parcourus par des courants continus ou alternatifs selon le type de machine.

	Machine asynchrone	Machine synchrone
Stator	Courant alternatif	Courant alternatif
Rotor	Courant alternatif	Courant Continu (ou aimant)

Tab.VI.1 Type de courant dans les enroulements du stator et rotor des machines à courants alternatif

IV.2. Généralités sur les lois de l'électromagnétisme

Une machine électrique tournante fonctionne grâce aux phénomènes d'induction électromagnétiques selon les lois d'Ampère, de Laplace, de Faraday et de Lenz, que nous pouvons rappeler dans cette section.

IV.2.1. La loi d'Ampère

Un courant qui parcourt un conducteur crée en tout point de l'espace un champ d'induction magnétique : c'est la loi d'Ampère. Le courant et le champ auquel il donne naissance sont de même nature, c'est à dire que si le courant est continu alors le champ magnétique est continu et si le courant est alternatif alors le champ magnétique est alternatif.

IV.2.2. La loi de Laplace

Tout circuit parcouru par un courant et plongé dans un champ magnétique subit une force mécanique : la force de Laplace. S'il en a la liberté, le conducteur entre alors en mouvement dans les machines électriques, on contrôle le mouvement en fixant convenablement les conducteurs

IV.2.3 La loi de Faraday

La force électromotrice induite dans un circuit sous l'effet d'un champ magnétique est proportionnelle à la variation du flux magnétique. Remarquons que l'on parle de la variation du flux et que, par conséquent, si le champ magnétique est constant alors il n'y a pas de force électromotrice induite. Mathématiquement, la loi de Faraday relie la force électromotrice e au flux magnétique à travers la relation :

$$e = - \frac{d\varphi}{dt}$$

Où ' e ' est donnée en volts (V) et φ en webers (Wb).

Si le circuit où la force électromotrice est créée est un circuit fermé, alors un courant électrique s'établit et circule.

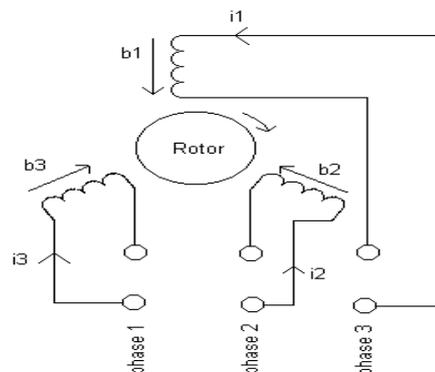
IV.2.4 La loi de Lenz

La loi de Lenz traduit la conservation de l'énergie dans un processus d'induction électromagnétique. Elle s'énonce ainsi : le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose toujours à la cause qui lui a donné naissance.

IV.3. Création d'un champ tournant avec stator fixe

Soit (On imagine) le dispositif suivant :

Soit trois bobines fixes, dont les axes sont décalés de $\frac{2\pi}{3}$.



On les alimente par un réseau triphasé équilibré. Placé au centre de ce système, une aiguille aimantée (petit aimant mobile) se met à tourner dès lors que le système est alimenté.

On remarque que suivant que l'on alimente les bobines par un système direct ou indirect de tensions, l'aiguille aimantée tourne dans un sens ou l'autre. De plus sa vitesse de rotation dépend de la fréquence d'alimentation des bobines. Ainsi on peut conclure par le théorème suivant :

IV.3.1. Théorème de Ferraris

Un système de bobines triphasées réparties régulièrement et alimentées par un système de courant triphasé de pulsation ω créent un système d'un champ magnétique glissant de pulsation $\frac{\omega}{3}$. La valeur du champ est maximale en un point de l'axe d'une bobine quand l'intensité du courant dans cette bobine est maximale.

On peut établir que :

- Dans toutes les machines à courant alternatif triphasé, les flux statorique et rotorique tournent. Il est donc important de se rappeler que l'enroulement fixe du stator crée un flux tournant.
- Lorsque le rotor tourne à la vitesse du champ tournant créée par le stator alors on dit que la vitesse est synchrone : c'est le principe des machines synchrones.
- Inversement lorsque le rotor ne tourne pas à la vitesse du champ statorique, on dit que la vitesse est asynchrone : c'est le principe des machines asynchrones.

IV. Machine synchrone (L'alternateur)

La machine synchrone est le plus souvent utilisée en générateur, on l'appelle alors alternateur. Les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur synchrone. Dans une première partie l'alternateur sera présenté de façon très simple. Les particularités du fonctionnement en moteur seront vues à la fin du chapitre.

IV.2.Définition

Un alternateur synchrone est une machine électrique tournante fonctionnant en mode génératrice et produisant de l'énergie électrique alternative.

Dans ce cours, nous étudions l'alternateur synchrone triphasé. Dans ce cas, l'énergie électrique est produite sous forme triphasée : l'induit de l'alternateur peut alors être câblé en étoile ou en triangle.

L'alternateur convertit une puissance mécanique, qu'il absorbe sous la forme d'une rotation, en puissance électrique, qu'il délivre sous forme alternative avec des rendements extrêmement importants.

Pour toutes ces raisons, l'alternateur est à la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale.

IV.2. Principe de fonctionnement

IV.2.1 Production d'une force électromotrice sinusoïdale dans une bobine

Considérons une bobine plate de N spires placée dans un champ d'induction magnétique tournant à la vitesse angulaire ω , comme le montre la Fig.II 1. Ce champ tournant pourra, par exemple, être obtenu par la rotation d'un aimant ou d'un électro-aimant.

Soit B la valeur efficace du champ d'induction magnétique. À l'instant initial, le vecteur \vec{B} a la direction et le sens Ox , on pourra écrire à l'instant t :

$$(\text{ox}, \vec{B}) = \omega \cdot t \quad (1)$$

Le flux d'induction $\varphi(t)$ à travers la bobine a alors pour expression :

$$\varphi(t) = -\sqrt{2} BSN \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

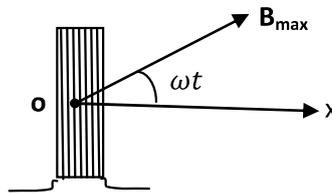


Fig IV.1 Bobine à N spire placée dans un champ magnétique

Où S représente la section de la bobine.

La bobine est donc le siège d'une force électromotrice (f.e.m) induite. Qui selon la loi de Faraday

$$e(t) = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (3)$$

$$e(t) = \sqrt{2} BSN\omega \cos(\omega \cdot t) \quad (4)$$

Qui est de la forme

$$e(t) = E \sqrt{2} \cos(\omega \cdot t) \quad (5)$$

On déduit

$$E = BSN\omega \quad (6)$$

On a donc obtenu une force électromotrice qui est une fonction sinusoïdale du temps et que l'on peut recueillir entre les bornes de la bobine. Notons qu'une période correspond à une rotation du champ magnétique de un tour.

IV.2.2 Principe de la production de forces électromotrices triphasées équilibrées

Considérons maintenant trois bobines identiques décalées entre elles de 120 degrés (ou de $\frac{2\pi}{3}$ rad) et soumises au même champ tournant, La force électromotrice induite dans la bobine 1 est donc choisie comme origine des phases. Il est clair que la force électromotrice induite dans la bobine 2 sera décalée par rapport à celle induite dans la bobine 1 de $\frac{1}{3}$ de tour. Celle induite dans la bobine 3 sera décalée de $\frac{2}{3}$ de tour par rapport à la bobine 1. À ces décalages correspondent des retards de phase de $\frac{2\pi}{3}$ et de $\frac{4\pi}{3}$ d'où l'expression des trois forces électromotrices induites :

$$\begin{cases} e_1(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega \cdot t) \\ e_2(t) = E\sqrt{2} \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3(t) = E\sqrt{2} \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

Ce qui donne la représentation vectorielle reportée sur la Fig. IV.2, en choisissant l'origine des phases horizontale et le sens direct dans le sens trigonométrique. On remarque que les trois forces électromotrices ainsi produites forment un système triphasé équilibré.

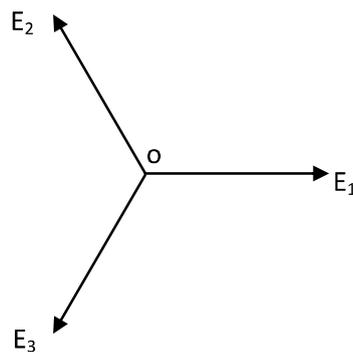


Fig IV.2 Diagramme de Fresnel des f.e.m induite

IV.3. Constitution d'un alternateur synchrone

IV.3.1. Caractéristiques pratiques

➤ **Stator.** De point de vue électrique Il est constitué de trois bobinages disposés à 120° les uns des autres. La vitesse du champ tournant et du rotor sont identiques, on note la relation entre cette vitesse et la fréquence électrique. Il se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé. L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre.

➤ **Rotor.** Il peut être constitué d'aimants permanents (appelé rotor à pôles saillants), mais dans le domaine des moyennes et fortes puissances il est plus souvent pourvu d'un bobinage inducteur parcouru par un courant continu : I_{ex} .(appelé rotor à pôles lisses).

Remarques :

- On notera que contrairement à la machine à courant continu, le rotor constitue l'inducteur et le stator l'induit de la machine.
- Le courant inducteur est aussi appelé courant d'excitation, et la création du champ d'induction magnétique est aussi appelée excitation de la machine. Enfin, de par son principe de fonctionnement, le rotor-inducteur est aussi appelé roue polaire.

IV.3.2. Nombre de pôles

Le nombre de pôle d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire.

Ils sont liés par la relation suivante :

$$n_s = \frac{60f}{P} \quad (8)$$

Où :

f est la fréquence de la tension induite [Hz]

P est le nombre de **paire de pôle**

n_s est la vitesse de rotation en **tours par seconde trs/min** (appelée vitesse de synchronisme notée n_s)

Exemple

Une turbine hydraulique tournant à une vitesse de 200 tr/min raccordé à un alternateur. Si la fréquence de la tension induite est de 60 Hz, combien de pôle le rotor comporte-t-il ?

Solution :

De l'équation (8) on déduit que : $p = 60 * \frac{f}{n} = \frac{60}{200} \times 60 = 18$

Nous avons **18 paires de pôles** qui est équivalent à **36 pôles portés par le rotor**.

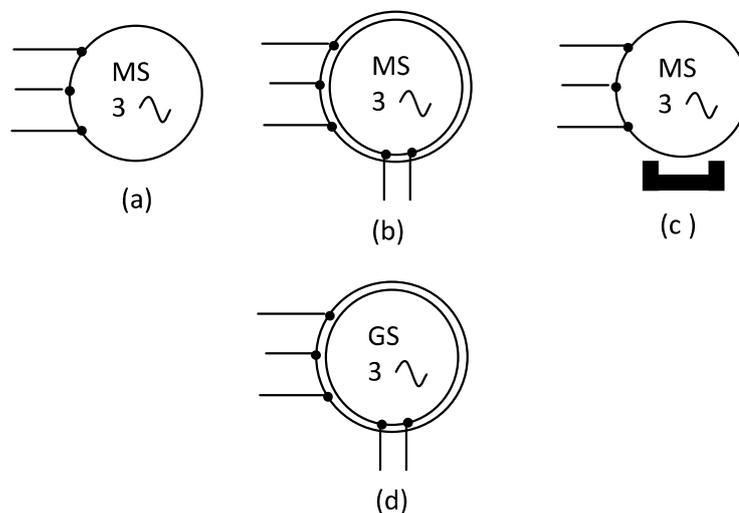
IV.3.3 Applications des alternateurs

Selon les applications, l'utilisateur ne contrôlera pas toujours la vitesse de rotation de l'alternateur, mais pourra toutefois vouloir imposer une fréquence à la tension et au courant fournis. En jouant sur le nombre de paires de pôles, il sera possible de s'adapter à toutes les situations. On peut citer comme exemple :

- ✓ Les centrales thermiques ou à vapeur, où l'on a besoin d'alternateurs tournant à des vitesses rapides de 1500 à 3000 tr/min.
- ✓ Les centrales hydroélectriques (barrages ou au fil de l'eau), où l'on a besoin d'alternateurs tournant à des vitesses lentes de quelques centaines de tr/min.

IV.4. Symboles électriques

Les symboles électriques utilisés pour représenter un alternateur synchrone triphasé à rotor bobiné sont présentés sur la Fig. IV.3 remarquons que l'inscription GS dans l'induit signifie génératrice synchrone, et que le symbole \sim dans l'inducteur signifie courant continu.



- (a) symbole général d'un moteur synchrone
 (b) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à rotor bobiné.
 (c) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à aimants.
 (d) Symbole d'un alternateur triphasé à rotor bobiné.

Fig IV.3 Symbole de la machine synchrone

IV.5. Fonctionnement de l'alternateur synchrone

IV.5.1. Schémas électriques équivalents

On peut représenter un alternateur synchrone par un circuit équivalent qui montre trois tensions induites E_0 correspondant à chacune des phases, de plus comme il s'agit d'une machine à courant alternatif il faut ajouter à la résistance R_s de chaque phase une réactance X_s appelé réactance synchrone de l'alternateur. La réactance synchrone est due à la self inductance des enroulements du stator, et comme leur résistance, elle constitue une impédance interne qu'on ne peut pas voir ni toucher. Mais on peut simplifier ce schéma en montrant qu'une seule phase.

En effet, les deux autres phases sont identiques sauf que les tensions et les courants respectifs sont déphasés de 120° et 240°

Le schéma électrique équivalent d'une phase de l'alternateur. Si l'on suppose la machine non-saturée, c'est à dire dans des conditions de fonctionnement raisonnables, alors le comportement électrique de la machine est donné par le modèle équivalent de Behn-Eschenburg reporté sur la Fig IV.4. Dans ce schéma, r_s est la résistance de l'enroulement : elle représente les pertes par échauffement dans la phase

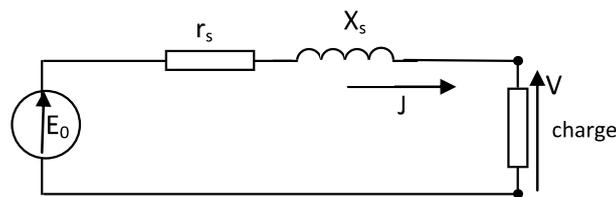


Fig.IV.4 : Modèle de Behn-Eschenburg : schéma électrique équivalent d'une phase de l'alternateur.

Remarque : Notons que la présence des notations V et J dans le schéma électrique de la Fig. II.4 permet de dresser le modèle dans le cas général mais est appelée à être modifiée dans un problème d'électrotechnique. En effet :

- si l'alternateur est monté en étoile alors chaque phase délivre V et I ;
- si l'alternateur est monté en triangle alors chaque phase délivre U et J .

En appliquant la loi des mailles dans le modèle de Behn-Eschenburg, on arrive à la relation :

$$\underline{E} = (r_s + j X_s) \underline{J} + \underline{V} \quad (9)$$

En pratique, dans un alternateur synchrone, les bobinages induits sont faits de façon à être très peu résistants, de sorte que $r_s \ll X_s$. On peut par conséquent écrire :

$$\underline{E} = (j X_s) \underline{J} + \underline{V} \quad (10)$$

IV.5.2 Détermination des grandeurs d'une phase

IV.5.2.1 Force électromotrice

La force électromotrice E dans une phase a pour valeur efficace E :

$$E = K N f \varphi = K N \varphi p n_s \quad (11)$$

Où K est une constante de la machine appelée coefficient de Kapp, N le nombre de conducteurs d'une phase et φ le flux magnétique.

La valeur efficace de la force électromotrice peut aussi être déterminée par la mesure, à travers **un essai à vide**.

II.5.2.2 La réactance synchrone X_s

La réactance synchrone se détermine elle-aussi par l'essai en court circuit. En effet, si l'on remplace la charge dans le modèle de Behn-Eschenburg de la Fig. 7 par un court-circuit, alors la tension de sortie est annulée et le courant prend une valeur élevée de court-circuit. En posant $V = 0$ et $J = J_{cc}$ dans la relation (10) on obtient toute en prenant les modules, on fait intervenir les valeurs efficaces de la force électromotrice et du courant de court-circuit :

$$X_s = \frac{E}{J_{cc}} \quad (12)$$

Étant donné que E est mesuré à vide on mesure J_{cc} à l'aide d'un ampèremètre, lorsque l'on court-circuite les deux bornes d'une phase, ainsi la valeur de X_s est déterminée.

La valeur de la réactance ainsi obtenue s'appelle **réactance synchrone non saturée**.

IV.6. Caractéristiques de l'alternateur synchrone

IV.6.1. Caractéristiques interne

La caractéristique interne d'un alternateur est la courbe de la force électromotrice E en fonction du courant inducteur I_e .

Comme nous l'avons vu dans précédemment, E s'obtient par une mesure à vide.

Il s'agit alors de la caractéristique $V(I_e)$ effectuée :

- à vitesse de rotation n_s constante ;
- à courant induit d'intensité nulle $J = 0$.

Nous donnons sur la Fig. II.5 un exemple de caractéristique interne d'alternateur.

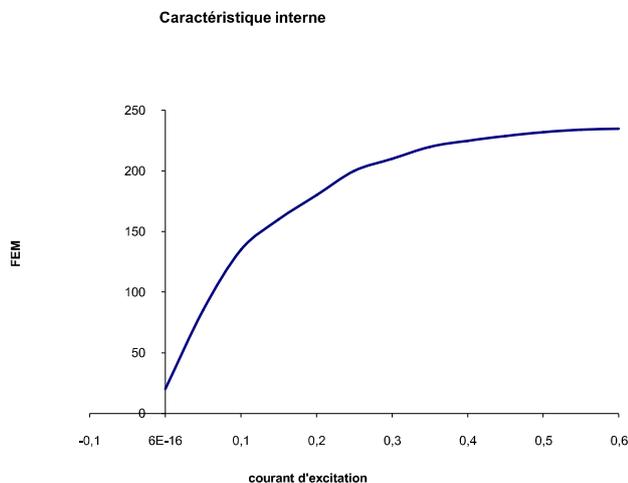


Fig. IV.5 Exemple de caractéristique interne d'un alternateur.

L'alternateur sera utilisé loin de la saturation, c'est à dire dans la région où la courbe $E(I_c)$ est linéaire.

- **Remarque :** il existe une force électromotrice non-nulle relevée pour $I_c = 0$: elle est due au champ rémanent des pôles.

IV.6.2. Caractéristique en court circuit

La caractéristique en court-circuit est la courbe $J_{cc}(I_c)$ des variations de l'intensité efficace du courant de court-circuit en fonction de l'intensité i du courant d'excitation tracée :

- à vitesse de rotation n_s constante ;
- à tension $V = 0$.

Un exemple de caractéristique en court-circuit est reporté sur la Fig. II.6. Nous pouvons observer que l'intensité de court-circuit J_{cc} est proportionnelle à I_c (L'intensité du courant de court-circuit est proportionnelle au courant d'excitation.) Ce sera toujours le cas dans un alternateur synchrone.

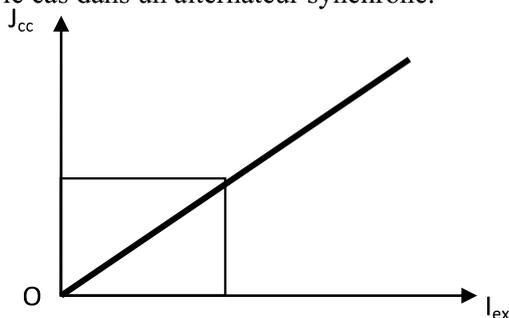


Fig. II.6 Exemple de caractéristique interne d'un alternateur

IV.6.3. Caractéristique externe (alternateur en charge)

Le comportement d'un alternateur dépend de la charge qu'il alimente, on distingue trois sortes de charge : Charge résistive, charge inductive, charge capacitive.

C'est le graphe montrant l'évolution de la tension « U » au borne de la charge en fonction du courant qui alimente cette dernière : $U=f(I)$. Elle est réalisée à l'aide d'une charge d'impédance variable et :

- à vitesse de rotation n_s constante ;
- à courant d'excitation d'intensité i constante ;
- avec une charge dont le facteur de puissance $\cos \varphi$ est constant.

Un exemple de caractéristiques externes est reporté sur la Fig. II.7.

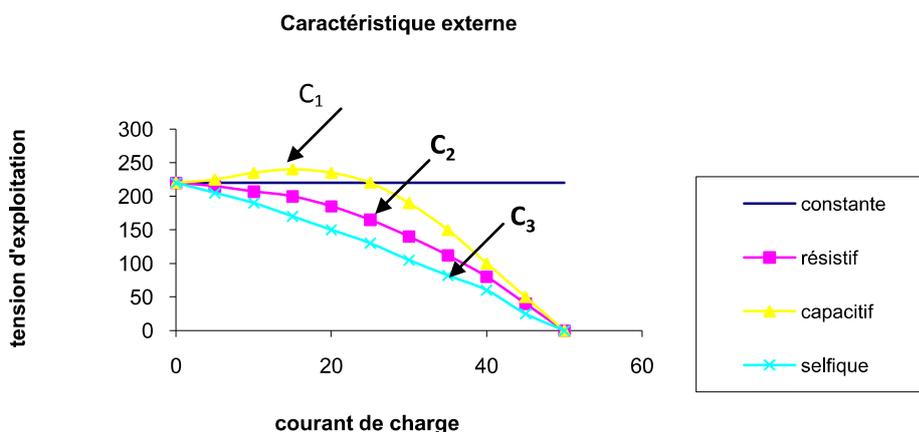


Fig. IV.7 : Exemple de caractéristiques externes d'un alternateur.

Observons la figure IV.7:

- La courbe C_1 correspond à une charge résistive et capacitive. Elle est entièrement située au-dessus de C_1 : pour un courant d'intensité déterminée J et avec la même excitation I_e , la chute de tension est d'autant plus petite que la charge est capacitive
- La courbe C_2 correspond à une charge purement résistive. On peut observer que la tension au stator décroît à mesure que le courant induit, et donc la charge de l'alternateur, augmente.

– La courbe C_3 correspond à une charge résistive et inductive. Elle est entièrement au-dessous de la courbe C_1 : pour un courant d'intensité déterminée J et avec la même excitation I_e , la chute de tension est d'autant plus grande que la charge est inductive.

IV.7. Diagramme de Behn-Eschenburg

Le diagramme de Behn-Eschenburg est le diagramme de Fresnel relatif au modèle de Behn-Eschenburg, c'est à dire à l'équation (10). Nous en avons reporté un exemple sur le tracé du diagramme (cette partie du cours est bien détaillée dans les séances de cours)

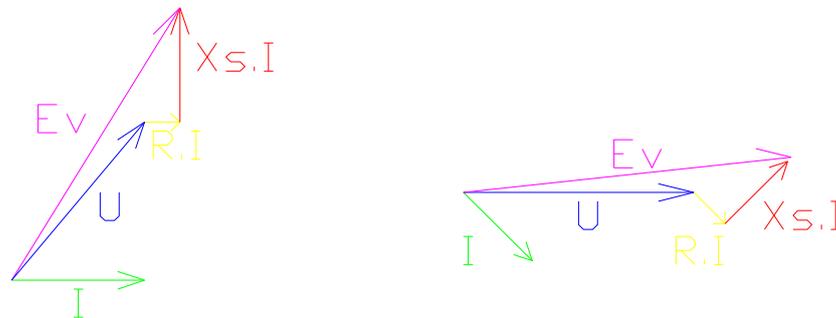


Fig. IV.8 : Diagramme de Behn-Eschenburg dans un alternateur

IV.8. Mise en parallèle d'alternateur

Coupler un alternateur sur un réseau signifie simplement que l'on couple deux alternateurs en parallèle. En effet, comme le réseau est lui même alimenté par un alternateur, dans une centrale, et que nous, nous envisageons également d'alimenter le réseau nous réalisons bien une mise en parallèle. Il va de soit que nous devons respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Il est illusoire de penser que vous parviendrez à modifier ces dernières. Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation.

IV.8.1. Conditions de couplage d'un alternateur

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même sur un autre alternateur, il faut vérifier les points suivants :

- La même fréquence
- La même tension
- La même succession des phases

IV.9. Bilan des puissances et des pertes dans un alternateur synchrone

IV.9.1. La puissance utile

La puissance utile est une puissance électrique vaut : :

en monophasé : $P=U.I.\cos\varphi$

en triphasé: $P=\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$ (13)

- U= tension composée
- I = courant composé
- $\cos\varphi$ = déphasage entre courant simple et tension simple

IV.9.2. Les pertes constantes

Lorsque l'on parle des pertes d'un alternateur, on mentionne souvent les pertes dites « constantes ». Elles sont constituées de pertes mécaniques et magnétiques.

En réalité, ces pertes varient en fonction de la vitesse et de l'induction. En pratique étant donné que l'on fonctionne à vitesse constante pour garantir une fréquence constante et à induction constante on pourra considérer ces pertes comme constante.

Ces pertes sont mesurées pendant un essai à vide. Lors de cet essai, la vitesse de la machine est égale à la vitesse nominale afin de débiter la tension d'exploitation qui sera dans ce cas égale à la f.e.m à vide. La puissance mesurée représentera les pertes fer.

IV.9.3. Les pertes par effet joule

Dans le rotor elles valent $pj_{ex} = u_{ex} . i_{ex} .$ (14)

Dans le stator elles valent pour un couplage étoile $pj_{st} = 3.R.I^2$ et pour un couplage triangle $pj_{st} = 3.R.\left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2$

.Noter que la plupart des machines ayant leur stator couplé en étoile, la valeur mesurée entre phase représente la résistance de deux enroulements en série. Nous devons donc diviser cette dernière pour obtenir la valeur d'un seul enroulement.

IV.9.4. Les pertes supplémentaires

Les pertes supplémentaires sont essentiellement constituées par les pertes par courant de FOUCAULT dans les parties métalliques de la machine. Les pertes supplémentaires ne sont pas calculables mais peuvent être mesurées au cours d'un essai en court-circuit.

II.10.5. Le rendement

Son expression est : $\eta = \frac{P_{ut}}{P_{ut} + pertes}$ (15)