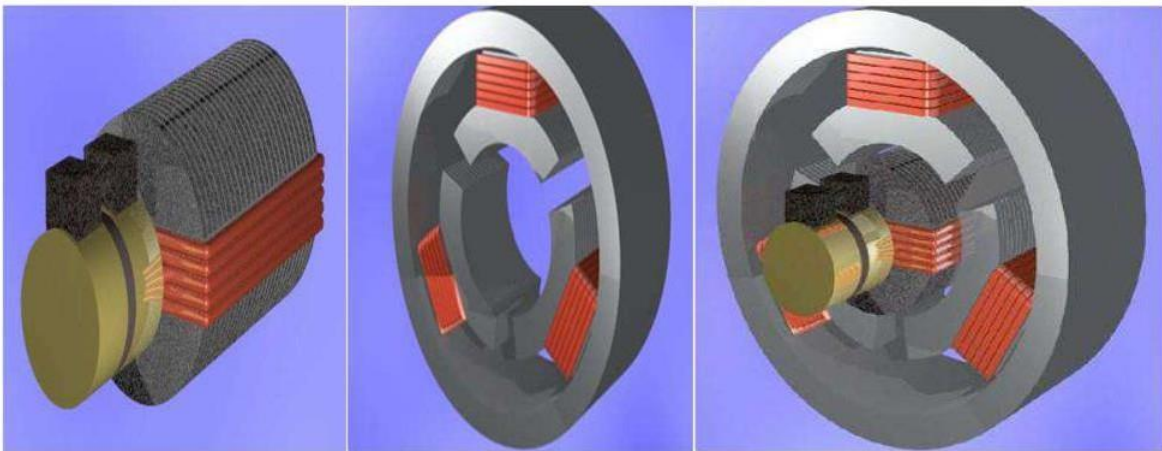


CHAPITRE 05 :

GENERALITES SUR LES MACHINES SYNCHRONES

1. Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique d'induit est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre les deux parties (l'inducteur et l'induit). Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas et à réluctance variable. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Il existe deux manières de construire une machine synchrone, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe. Mais la plupart des machine synchrone sont à induit fixe et inducteur tournant comme le montre la figure.



La structure des machines à induit fixe est inducteur tournant

La fréquence dépend de la vitesse de variation du flux au droit des enroulements statoriques. Cette vitesse est fonction d'une part de la vitesse de rotation du rotor et d'autre part du nombre de paire de pôle au stator et au rotor. Le réseau électrique de l'Algérie (où la fréquence est de 50Hz) engendre :

- pour une machine à 2 pôles $p = 1$, une fréquence de rotation de 50tr/s soit 3000tr/mn
- pour une machine à 4 pôles $p = 2$, une fréquence de rotation de 25tr/s soit 1500tr/mn

- pour une machine à 6 pôles $p = 3$, une fréquence de rotation de $17tr/s$ soit $1000tr/mn$
- pour une machine à 8 pôles $p = 4$, une fréquence de rotation de $12.5tr/s$ soit $750tr/mn$

2. Organisation de la machine synchrone :

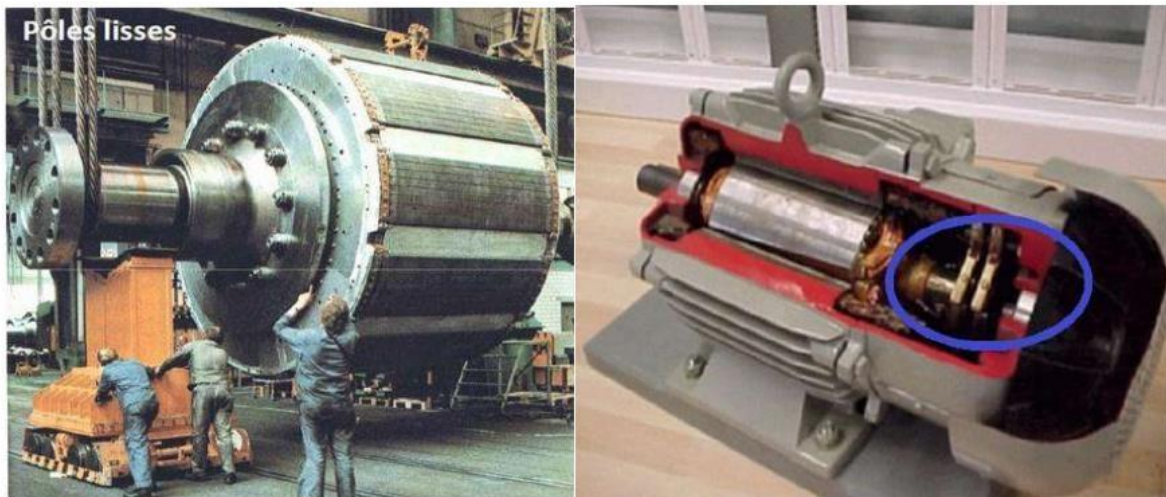
Une machine synchrone est une machine électrique tournante réversible. En fonctionnement moteur, elle est alimentée par une source de tension alternative le plus souvent triphasée pour entraîner une charge mécanique à une vitesse de rotation constante. En fonctionnement générateur, elle est entraînée par un dispositif mécanique pour produire de l'énergie électrique alternative dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. La machine synchrone a dans un premier temps essentiellement trouvé des applications dans la génération d'énergie électrique alternative, sous le nom d'**Alternateur**. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable.

• Stator

C'est la partie fixe de la machine. Il est formé par un empilage de disques de tôles ferromagnétique isolées entre elles pour minimiser les pertes par courants de FOUCAULT. L'intérieur du stator est encoché et porte généralement un enroulement triphasé de l'induit ou exceptionnellement monophasé à ' $2p$ ' pôles. Alimenté par une source électrique triphasée, l'enroulement du stator crée un champ tournant à une vitesse angulaire ' Ω ' égale au rapport de la pulsation d'alimentation ' ω ' et le nombre de paire de pôle $\Omega = \omega/p$.

• Rotor :

C'est la partie tournante de la machine (appelé aussi roue polaire) ayant pour rôle de générer le champ d'induction (inducteur). Il doit porter le même nombre de paire de pôle que le stator. Le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. A l'extérieur du rotor, on trouve des enroulements qui doit être alimentés par une source de tension continue dans le cas de machines de moyenne et grande puissance ou des aimants permanent dans le cas de machines de faible puissance pour créer le champ inducteur. On distingue donc trois grandes familles de machine synchrone : Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimant permanent. Dans le cas de machines à rotor bobiné à pôles lisses, le rotor est un cylindre plein (entrefer constant). Il possède le plus souvent deux pôles pour s'adapter aux grandes vitesses. Les enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais aux bagues de bout d'arbre.



Exemple de rotor bobiné à pôles lisses

Le rotor bobiné à pôles saillants est presque de même constitution que le rotor bobiné à pôles lisses dont les bobines sont enroulées sur les pôles laissant un vide entre un pôle et l'autre qui le succède (entrefer variable). Vue l'inertie importante de ce type de rotor, la machine à rotor bobiné à pôles saillants est souvent utilisée à basse vitesse ou à basse puissance.



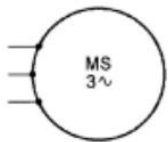
Exemple de rotor bobiné à pôles saillants.

Les aimants permanents sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les machines à aimant permanent sont disponibles depuis une vingtaine d'années, mais ce n'est que récemment que le faible prix des composants et une meilleure technologie les ont rendus accessibles à une large gamme d'applications.

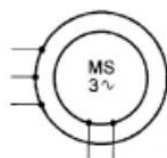


Exemple de rotor à aimants permanents

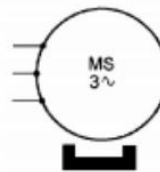
Symboles



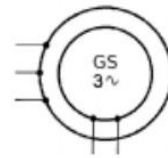
Symbole général
d'un moteur
synchrone.



Symbole d'un moteur
synchrone triphasé à
rotor bobiné.



Symbole d'un moteur
synchrone triphasé à
aimants.



Symbole d'un
alternateur
triphasé à rotor bobiné

3. Champ tournant

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

ou

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en rad.s^{-1} ;

ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} . $\omega = 2.\pi.f$;

n_s : vitesse de rotation du champs tournant en trs.s^{-1} ;

f : fréquence des courants alternatifs en Hz ;

p : nombre de paires de pôles.

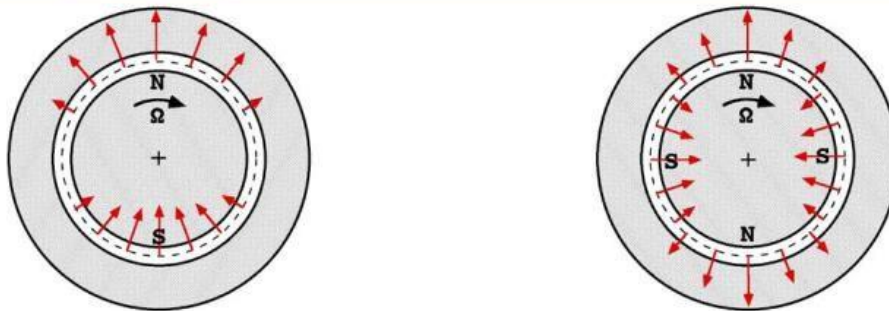
Synchronisme

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor.

Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme Ω_s .

- **Schémas**

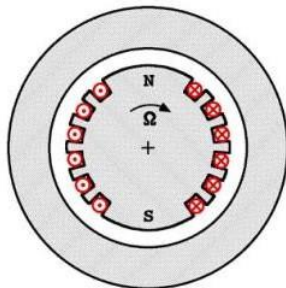
Répartition du champ magnétique dans l'entrefer d'une machine synchrone.



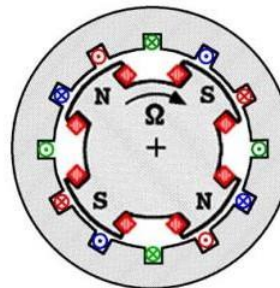
bipolaire ($p = 1$) tétrapolaire ou quadripolaire ($p = 2$)

Remarque : un champ magnétique à toujours deux pôles, un nord et un sud. C'est pourquoi on parle en terme de paire de pôles.

- Représentation de deux types de machines synchrones.

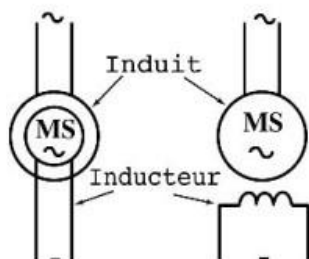


Machine à pôles lisses

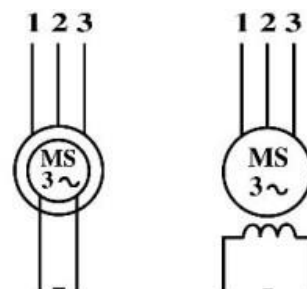


Machine à pôles saillants

Symboles :



Machine monophasée



Machine triphasée

4. Force électromotrice des enroulements à courant alternatif :

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E .

$$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_s = K' \Phi n_s \text{ finalement : } E = K' \Phi n_s$$

E : f.é.m. induite (V)

K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

f : fréquence du courant statorique ; p : nombre de paires de pôles

n_s : vitesse de rotation (trs.s⁻¹)

$K' = KNp$: constante globale (caractéristique du moteur)

Remarques :

- les enroulements sont disposés dans le stator de telle façon que la f.é.m. $e(t)$ soit le plus possible de forme sinusoïdale ;
- en triphasé le stator comporte trois enroulements ou phases. On obtient trois f.é.m. $e_1(t)$ $e_2(t)$ et $e_3(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.
- Le coefficient de KAPP est plus élevé dans le cas du triphasé que dans le cas du monophasé.

5. Modes de fonctionnement

La machine synchrone est réversible.

- Fonctionnement en moteur

Le champ tournant du stator « accroche » le champ lié au rotor à la vitesse $\Omega_s = \omega/p$.

- Fonctionnement en alternateur (génératrice)

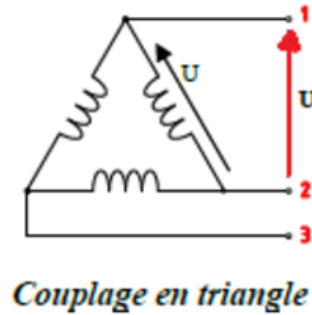
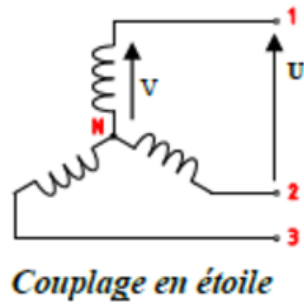
Le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de f.é.m. alternative de pulsation $\omega = p.\Omega_s$.

Rappel : toute variation de champs magnétique à travers une bobine crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite

Couplage des alternateurs triphasés

3 enroulements de l'alternateur triphasé sont reliés entre eux. pour constituer 2 types de couplage:

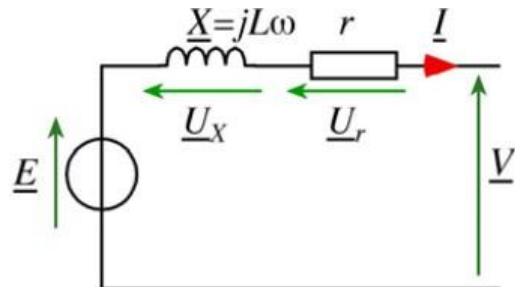
- **Etoile (Y):** qui impose une tension simple à chaque enroulement
- **Triangle (Δ):** qui impose une tension composée à chaque enroulement



6. Modèle équivalent d'un enroulement :

Schéma dans le cas de l'alternateur

- $\underline{E}$: f.é.m. à vide (V)
 $\underline{V}$: tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)
 R : résistance de l'enroulement (Ω)
 X : réactance synchrone (Ω)



Remarques :

- l'inductance L du schéma tient compte de l'inductance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit ;
- le courant est orienté en convention générateur.
- l'inducteur est équivalent à une résistance
- Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule

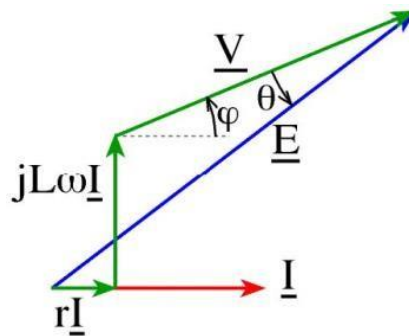
Loi des mailles

Loi des mailles avec les grandeurs instantanées : $e = v + u_x + u_r$

soit : $e = v + L \frac{di}{dt} + Ri$

Loi des mailles avec les grandeurs complexes : $E = V + jL\omega I + RI$

Diagrammes de Fresnel :

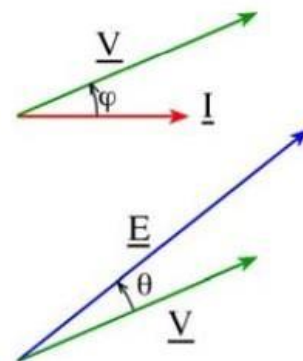


Remarques :

- très souvent $r.I$ est négligé ;
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs ;
- si la charge est résistive $\phi = 0$.
- Le diagramme précédent est en fait le plus simple pour une machine à pôle lisse et non saturée.

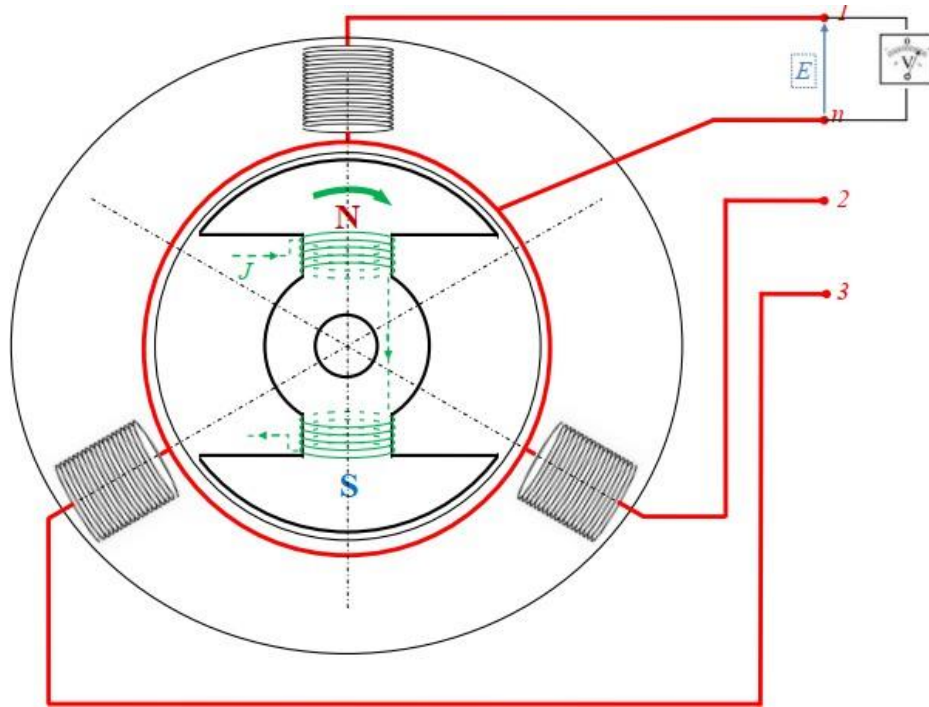
Il peut être utile de connaître deux angles :

- le déphasage ϕ entre le courant et la tension. ϕ et I varient en fonction de la consommation ;
- le décalage interne θ entre V et E



7. Marche à vide de la MS : Courbe de saturation

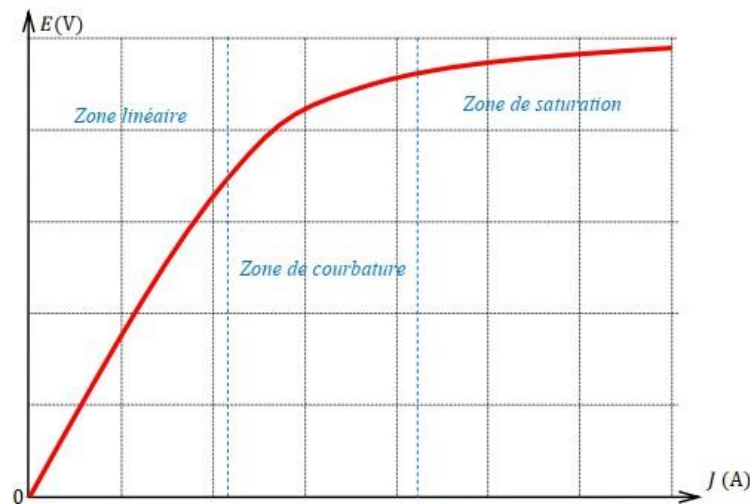
La figure suivante montre une MS bipolaire ($p=1$) tournant à vide à une vitesse constante (vitesse de synchronisme). L'enroulement inducteur est alimenté par une source de tension continue assurant un courant d'excitation ' J ' réglable.



Marche à vide de la machine synchrone.

On augmente progressivement le courant d'excitation tout en observant la tension entre une phase et le neutre qui vaut la f.é.m ' E ' (elle est liée au flux Φ_J crée par le courant d'excitation). On constate que la f.é.m augmente d'abord proportionnellement à l'excitation (zone linéaire). Cependant au fur à mesure que le flux augmente, le circuit magnétique commence à se saturer, et la tension croît de moins en moins pour une même augmentation de l'excitation (zone de saturation). Si on trace la courbe de variation de la f.é.m en fonction de l'excitation, on obtient la caractéristique à vide qui est dite aussi la courbe de saturation. Aucun courant ne circulant dans les enroulements statoriques, le flux Φ_J ne dépend que des ampère-tour créés par le courant circulant dans l'enroulement inducteur (noté J dans tout ce qui suit, la force magnétomotrice étant notée ϵ_j). A des constantes multiplicatives près, la courbe Φ_J (ϵ_j) est évidemment identique à la caractéristique à vide $E = f(J)$ de la machine

synchrone, mais il faut bien se rendre compte que cette caractéristique n'est en fait que la traduction de la caractéristique du circuit magnétique de la machine, et qu'elle reste utilisable quelque soit le fonctionnement de la machine (moteur ou alternateur et à vide ou en charge)

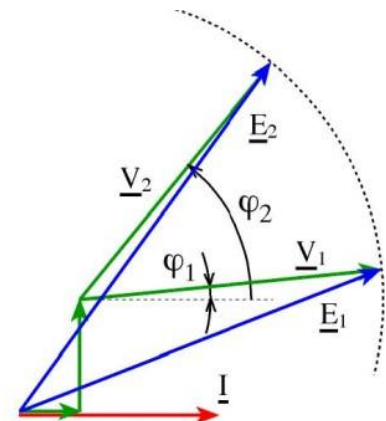
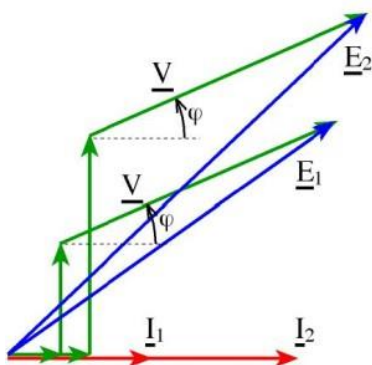


Caractéristique à vide d'une machine synchrone

8. Alternateur couplé au réseau

Pour un alternateur couplé au réseau, V est imposé à 220 V et f à 50 Hz. Les grandeurs variables du réseau sont le courant I et le déphasage ϕ .

Observons l'allure du diagramme de Fresnel pour la variation de ces deux grandeurs :



- Diagrammes superposés pour deux valeurs du courant (figure à gauche)
- Diagrammes superposés deux valeurs du déphasage (figure à droite)

On constate que pour ces deux situations la f.é.m. E doit varier.

E est donnée par la relation : $E = KN\Phi f$

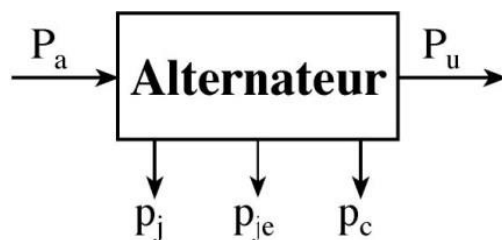
On constate que le flux Φ est le seul terme pouvant être modifié par l'intermédiaire du courant d'excitation I_e

Conséquence :

- En utilisation normale, un groupe électrogène doit fournir une tension dont la valeur efficace est la plus constante possible. La charge pouvant varier dans des proportions importantes, un dispositif électronique de régulation (asservissement), agissant sur l'intensité du courant d'excitation, est donc nécessaire.

✓ Bilan des puissances d'un alternateur

Puissance absorbée



La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur. La puissance absorbée est mécanique.

Ω_s : pulsation de rotation en rad.s^{-1}

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M = 2\pi n_s T_M$$

n_s : vitesse en trs.s^{-1}

T_M : couple utile sur l'arbre en N.m

Si l'alternateur n'est pas auto-excité il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor) :

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M + U_e I_e = 2\pi n_s T_M + U_e I_e$$

Puissance utile

En triphasé avec une charge équilibrée de facteur de puissance $\cos \phi$:

$$P_U = \sqrt{3} UI \cos \phi$$

Bilan des pertes

- Pertes par effet joule dans l'inducteur :

$$P_{je} = U_e I_e = r_e I_e^2$$

- Pertes par effet joule dans l'induit :

$$P_j = \frac{3}{2} R I^2$$

Où R est la résistance vue entre deux bornes de l'alternateur. Ces pertes dépendent de la charge.

- Pertes dites « collectives » p_c :

Pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

Rendement :

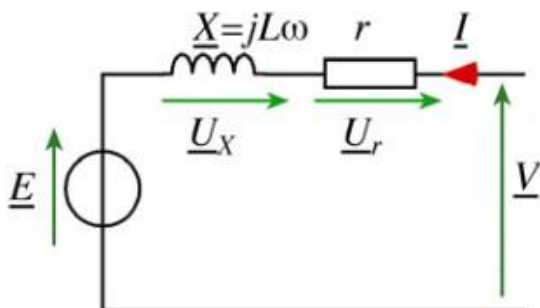
- Rendement exact :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{2\pi n_s T_M + U_e I_e}$$

- Rendement approché :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + \frac{3}{2} R I^2 + p_c}$$

Moteur synchrone



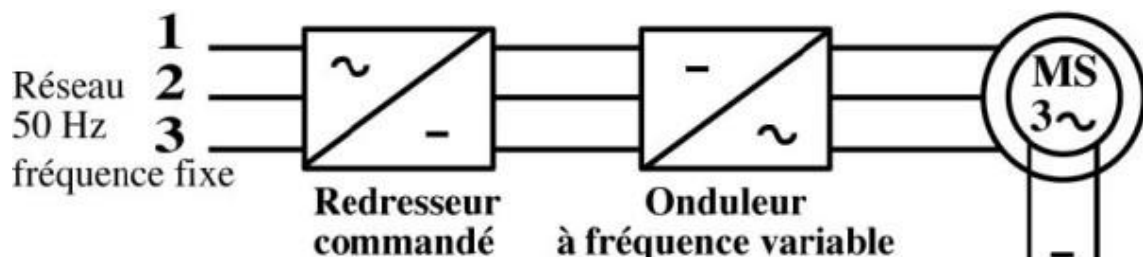
✓ **Remarques :**

- loi des mailles : $\vec{V} = \vec{E} + \vec{U}_X + \vec{U}_r$
- le courant est en convention récepteur ;
- il faut inverser le bilan des puissances de l'alternateur.

$$P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi + U_e I_e$$

et $P_u = \Omega_s T_u$

- Pour varier la vitesse d'un moteur synchrone, il faut varier la fréquence des courants statoriques :



Compléments sur le moteur synchrone

Avantages

- La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu.
- Son rendement est proche de 99%.
- On peut régler son facteur de puissance $\cos \phi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

Inconvénients

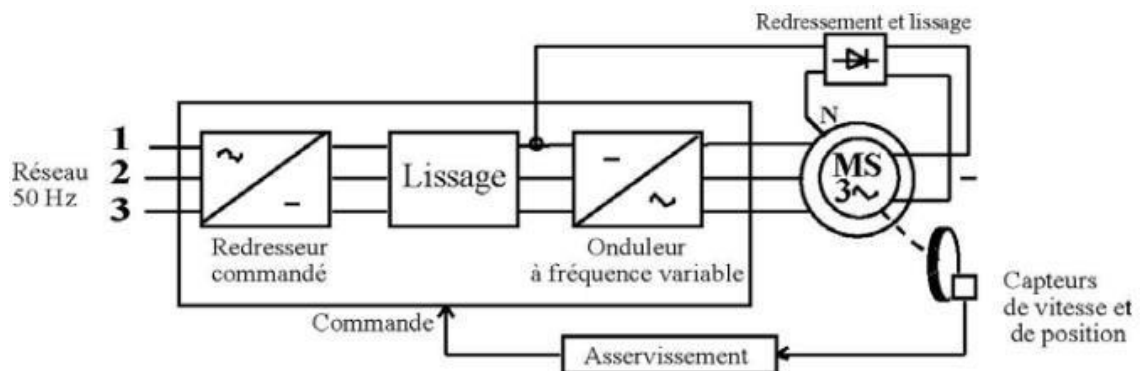
- Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

Utilisations

Moteurs

- Ils sont utilisés en forte puissance (1 à 10 MW -compresseur de pompe, concasseur); toutefois pour faire varier la vitesse, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques. Il a donc fallu attendre le développement de l'électronique de puissance pour

commander des moteurs auto synchrones ou synchrones autopilotés (T.G.V. Atlantique - 1981)



- Dans le domaine des faibles puissances, les rotors sont à aimants permanents. L'intérêt de ces moteurs réside dans la régularité de la vitesse de rotation (tourne-disque, appareil enregistreur, programmeur, servomoteur).
- Le moteur synchrone peut également être utilisé comme source de puissance réactive Q pour relever le facteur de puissance $\cos \phi$ d'une installation électrique.
- **Alternateurs**

Ils fournissent une partie de l'énergie du réseau SONELGAZ. On les trouve dans les centrales électriques productrices de l'électricité.

