

GENERALITES SUR LES MACHINES SYNCHRONES

1. Constitution

1-1. Rotor = inducteur

Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I_e continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paires de pôles.

Remarques :

- ✓ il faut apporter le courant à l'inducteur par l'intermédiaire de bagues et de balais.
- ✓ le rotor peut être constitué par un aimant permanent.

1-2. Stator = induit

Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasés ou triphasés. Il possède le même nombre de paires p de pôles.

1-3. 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.

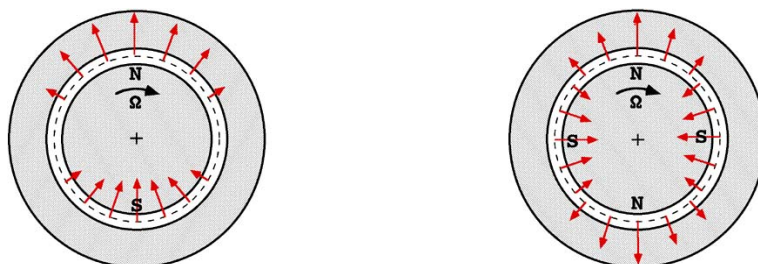
1-4. Synchronisme

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 .

1.5. Schémas

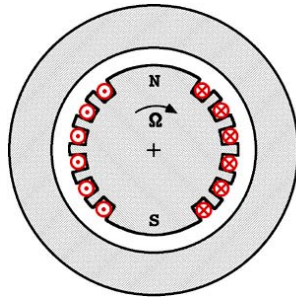
- Répartition du champ magnétique dans l'entrefer d'une machine synchrone.



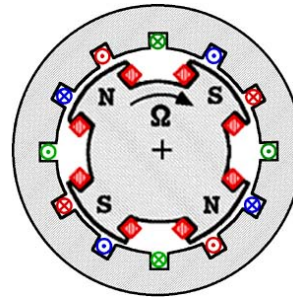
bipolaire ($p = 1$) tétrapolaire ou quadripolaire ($p = 2$)

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

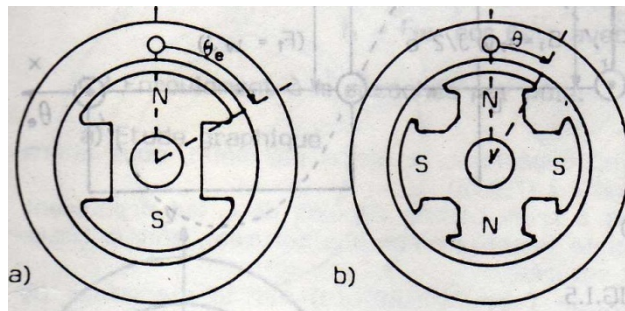


Machine à pôles saillants

1.6. Répartition du champ magnétique dans l'entrefer

La répartition du flux dans l'entrefer dépend de la forme des pôles inducteurs dans le cas des machines à pôles saillants ; et de l'écartement des encoches ainsi que le nombre de conducteurs par encoches dans le cas des machines à pôles lisses, donc pour rendre l'induction de forme sinusoïdale, on envisage les deux cas suivants :

a- Pôles saillants



On donne aux épanouissements polaires un rayon de courbure de telle façon à faire accroître ou décroître progressivement l'induction c'est-à-dire suivant une forme sinusoïdale ; cela revient à faire varier l'entrefer car :

$$\sum H \cdot dl = N J$$

$$H_s l_s + H_r l_r + 2H_0 e = N J$$

Puisque $H_s = H_r = 0$ (car la perméabilité du fer $\mu_r \rightarrow \infty$) ; on peut écrire :

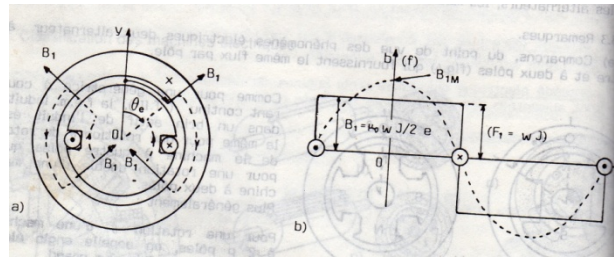
$$H_0 = \frac{N J}{2e} \quad \text{d'où : } B = \mu_a H = \frac{N \mu_0 J}{2e}$$

D'après la formule précédente, on peut faire varier l'entrefer de telle façon à faire varier l'induction de façon sinusoïdal (figure précédente).

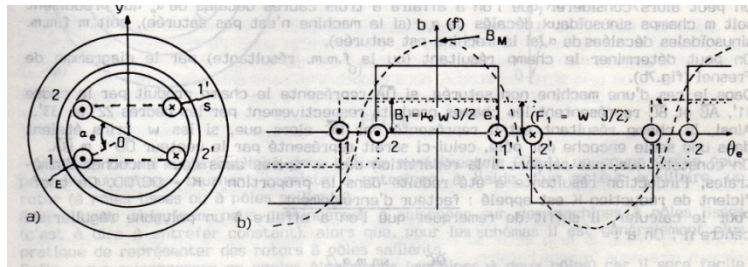
b- Pôles lisses

On agit sur l'écartement entre les encoches et le nombre de conducteurs par encoche ; étudions les cas suivants :

- 1 encoche /pôle.

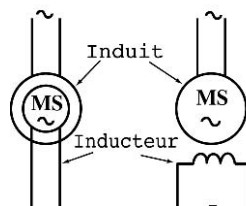


- 2 encoche /pôle.

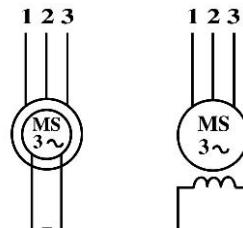


Si on multiplie d'avantage le nombre d'encoches par pôle, on obtient une courbe en forme d'escalier qui se rapproche de plus en plus d'une sinusoïde.

2. Symboles



Machine monophasée

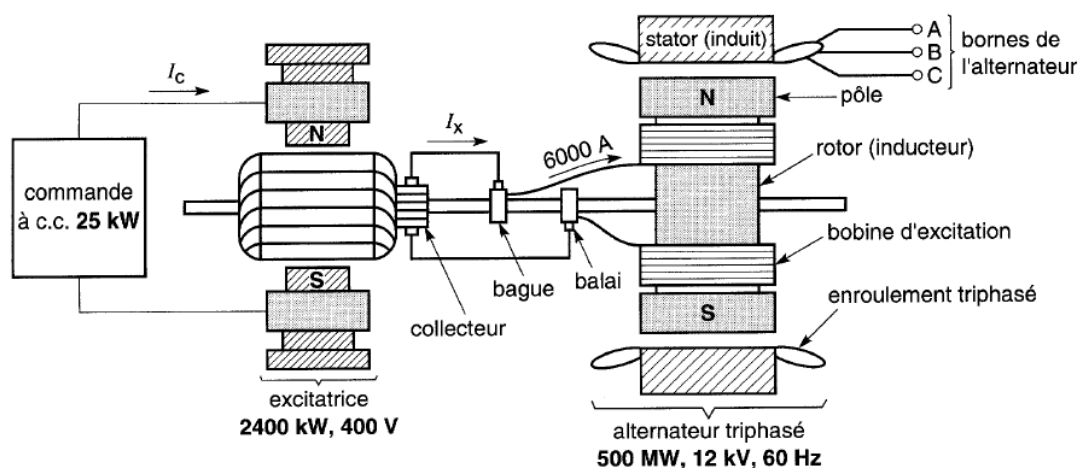


Machine triphasée

➤ Bobines de l'inducteur

Les bobines magnétisantes entraînées par le rotor doivent être alimentées en courant continu et ce, par l'un des procédés suivants :

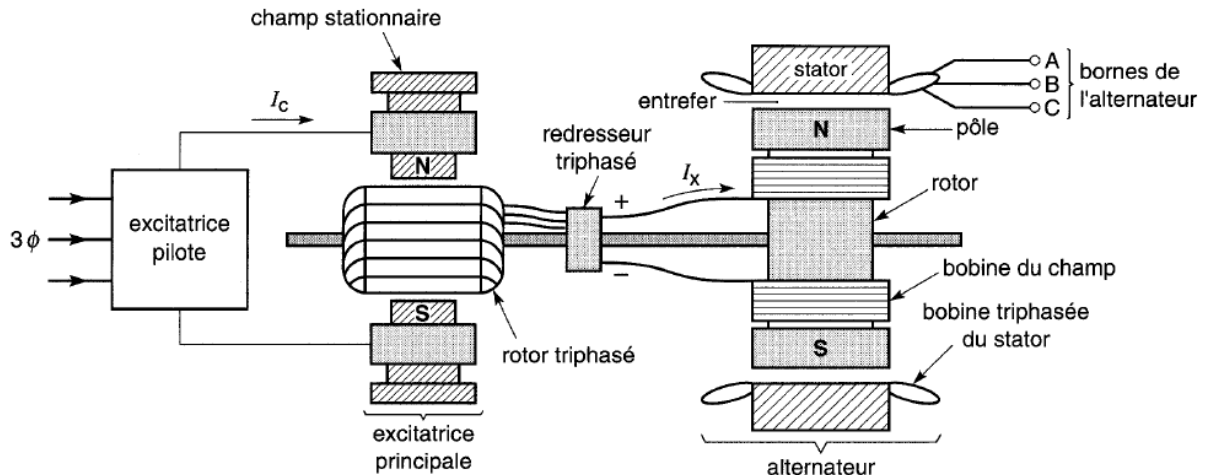
a- Utilisation d'une génératrice à courant continu (dynamo)



Cette génératrice appelée excitatrice est montée en bout de l'arbre, son rôle est de transmettre du courant continu au rotor par l'intermédiaire de 2 bagues en bronze.

Le réglage de l'intensité de ce courant d'excitation étant obtenu par le réglage du courant de l'inducteur de la génératrice excitatrice.

b- Utilisation d'une excitatrice statique

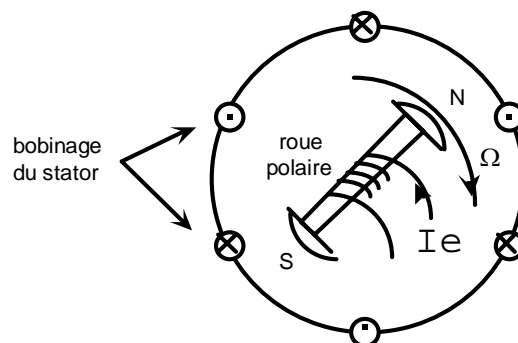


La dynamo est remplacée par un alternateur dit *auxiliaire* auquel on adjoint un redressement de courant qui fournit un courant continu au rotor de l'alternateur principal. Ce procédé est surtout utilisé pour l'excitation des turbo-alternateurs modernes. Il présente l'avantage de ne pas utiliser le collecteur, les bagues, ni les charbons, qui, à cause des étincelles et en présence de l'hydrogène présente un danger permanent.

Le réglage du courant d'excitation de l'alternateur principal est assuré par l'intermédiaire de l'inducteur fixe de *l'alternateur auxiliaire*.

II-4. Calcul de la f.e.m à vide

On prend une machine bipolaire, on suppose que les f.e.m sont en phase de tout les brins d'une même phase et de forme sinusoïdale.



Le sens de courant est arbitraire

Soit $2N$: le nombre de brins actifs/phase = N spires/phase

Si on suppose que l'inducteur tourne dans le sens horaire du point de vue électrique tout se passe comme si l'inducteur est immobile et le stator tourne dans le sens inverse (sens trigonométrique).

Pour une position quelconque de la normale le flux est sinusoïdal :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos \omega t$$

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = N \omega \Phi_0 \cdot \sin \omega t, \text{ Avec } \omega = 2\pi f \text{ donc } e = 2\pi f N \Phi_0 \cdot \sin \omega t$$

La valeur efficace sera alors : $E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_0$; ce qui donne :

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi \text{ avec } N : \text{ le nombre de spires/phase}$$

On peut utiliser : $E = 2,22 \cdot N' \cdot f \cdot \Phi$ avec N' : le nombre de brins (conducteurs)/phase

3. f.é.m. induite réelle

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 $2\pi/3$.

4. Modes de fonctionnement

La machine synchrone est réversible.

4-1. Fonctionnement en moteur

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

4-2 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 $\omega = p \cdot \Omega_s$.

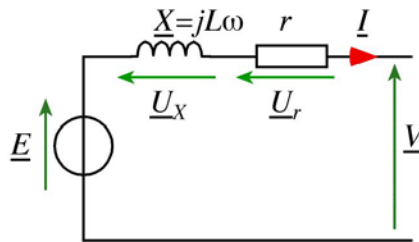
Rappel : toute variation de champs magnétique à travers une bobine crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite.

5. Réaction magnétique d'induit

En charge, le courant dans l'induit crée un champ magnétique qui modifie les caractéristiques de la machine. C'est ce que l'on nomme *la réaction magnétique d'induit*.

6. Modèle équivalent d'un enroulement

6-1. Schéma dans le cas de l'alternateur



\underline{E} : f.é.m. à vide (V)

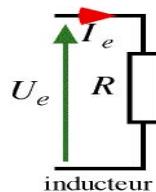
\underline{V} : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

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 :



6-2. Loi des mailles

Loi des mailles avec les grandeurs instantanées :

$$e = v + u_X + u_r$$

soit :

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

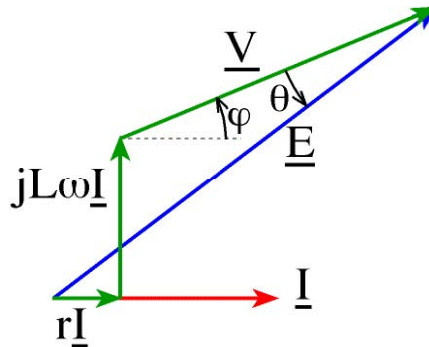
Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles :

$$\vec{E} = \vec{V} + \vec{U}_r + \vec{U}_x$$

Avec : $\vec{V} (V, \varphi)$; $\vec{U}_x (L\omega I, +\pi/2)$; $\vec{U}_r (rI, 0)$

Loi des mailles avec les grandeurs complexes : $\underline{E} = \underline{V} + jL\omega \underline{I} + R\underline{I}$

6-3. Diagrammes de Fresnel

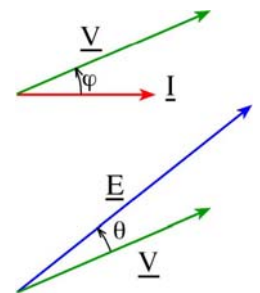


Remarques :

- ✓ 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 $\varphi = 0$.
- ✓ 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 :

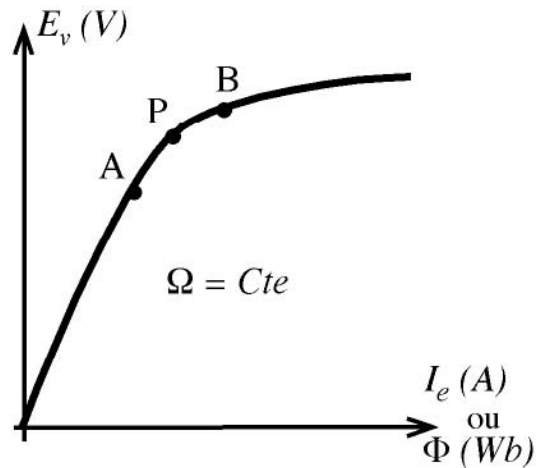
- ✓ le déphasage φ entre le courant et la tension. φ et I varient en fonction de la consommation ;
- ✓ le décalage interne θ entre \underline{V} et \underline{E} .



6-4. Caractéristique à vide d'une machine synchrone

Le point de fonctionnement P se trouve généralement entre les points A et B. Sous le point A, la machine serait sous exploitée. Au-dessus du point B, une forte augmentation de I_c ne produit qu'une faible augmentation de E .

Pour les points de fonctionnement au dessous de P, la machine est non saturée, par contre au dessus de ce point la machine est saturée.



6-5. 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 : $E = KN\Phi f$

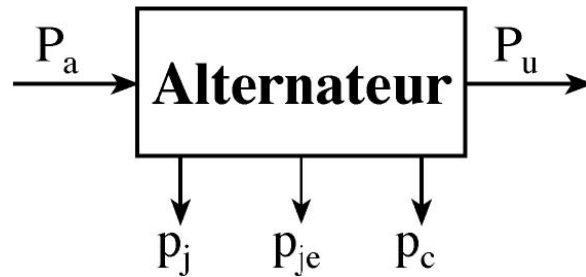
On constate que le flux Φ est le seul terme pouvant être modifié par l'intermédiaire du courant d'excitation I_e

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.

7. Bilan des puissances d'un alternateur

7-1 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) :

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

7-2. Puissance utile

En triphasé avec une charge équilibrée de facteur de puissance $\cos \varphi$: $P_U = \sqrt{3}UI \cos \varphi$

7-3. 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.

Remarque :

- comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension U, elles sont généralement constantes (50 Hz - 220V).

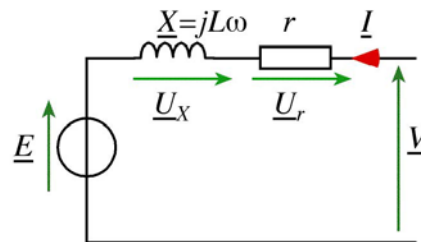
7-4. Rendement

➤ 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 :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + \frac{3}{2} RI + p_c}$$

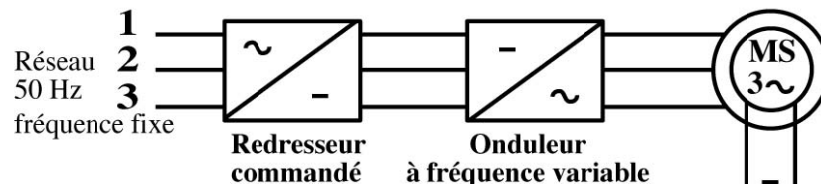
8. Moteur synchrone**Remarques :**

- ✓ loi des mailles : $\hat{V} = \hat{E} + \hat{U}_X + \hat{U}_r$
- ✓ 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 :

**9. Compléments sur le moteur synchrone****9-1. 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 $\cos \varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

9-2. 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.

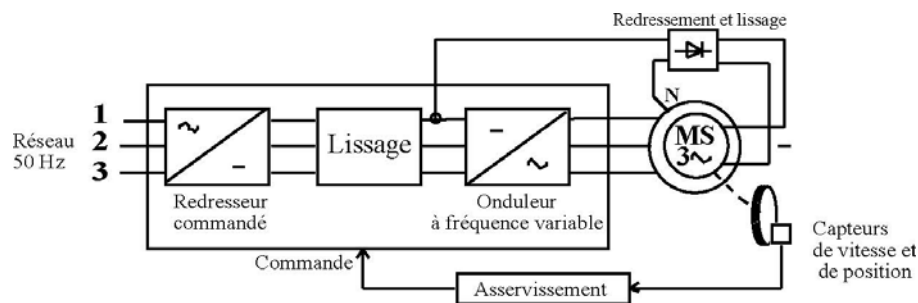
9-3. Utilisations

9-3-1. Alternateurs

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

9-3-2. 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 $\cos \varphi$ d'une installation électrique.