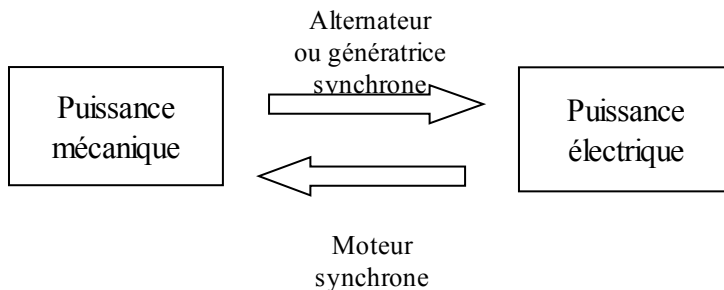


LA MACHINE SYNCHRONE

I. GÉNÉRALITÉS SUR LA MACHINE SYNCHRONE.



La machine synchrone est une machine réversible. Elle peut transformer de l'énergie mécanique, fournie par une turbine (centrale électrique) ou un moteur thermique, en énergie électrique. Elle fonctionne alors en génératrice synchrone. Elle peut aussi convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique. Elle fonctionne alors en moteur synchrone (exemple : TGV atlantique).

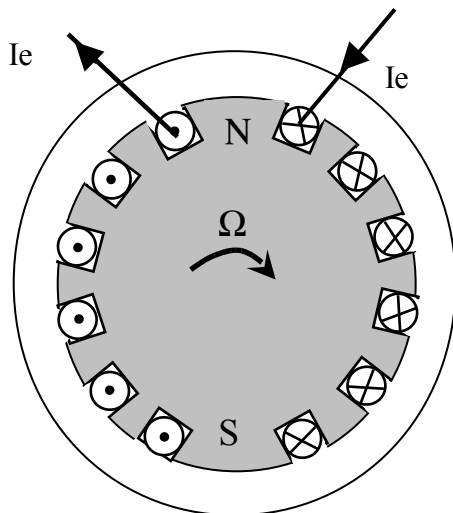
1. Constitution d'une machine synchrone triphasée

La machine synchrone possède deux parties principales : un inducteur et un induit.

- **Induit** : Il est constitué d'électroaimants alimentés en courant continu ou d'aimants permanents. Le plus souvent, l'inducteur est porté par le rotor (appelé roue polaire).

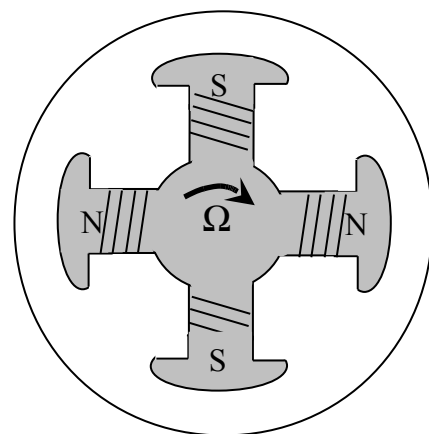
Les rotors d'alternateur peuvent être de deux types :

Rotor à pôles lisses.



Rotor à pôles lisses. C'est le rotor des alternateurs de centrales nucléaires ou thermiques. Il peut tourner à des vitesses importantes (3000tr/min). Il est généralement bipolaire ($p=1$) ou tétrapolaire ($p=2$).

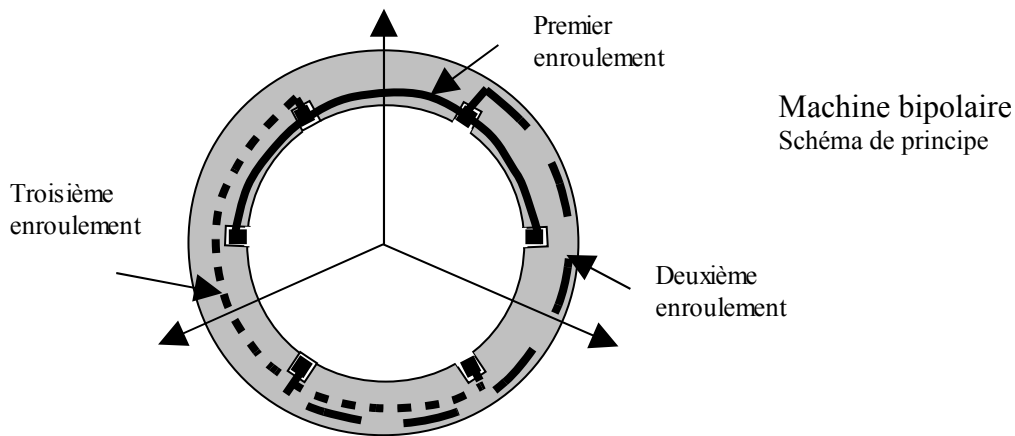
Rotor à pôles saillants



Rotor à pôles saillants : C'est le rotor des centrales hydrauliques. Il tourne plus lentement mais il comporte un grand nombre de pôles (exemple : 40 pôles ; $p=20$).

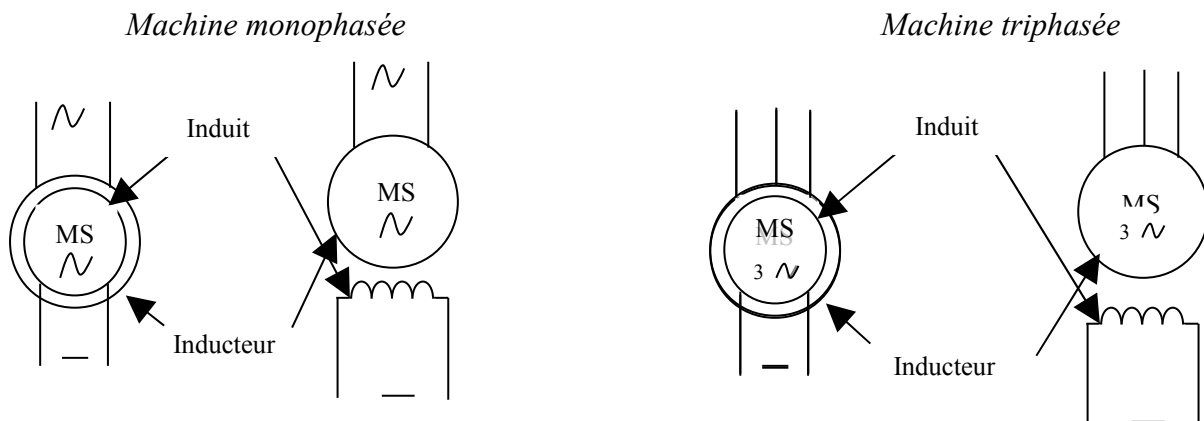
L'inducteur ainsi constitué va créer dans l'entrefer de la machine un champ tournant, présentant $2p$ pôles.

- **Inducteur** (stator) : Le stator d'une machine synchrone triphasée porte trois enroulements identiques décalés de $2\pi/3p$ radians les uns par rapport aux autres. Les conducteurs de ces enroulements sont logés dans des encoches à la périphérie du stator.



Rem : Le stator doit être feuilleté car il se trouve placé dans un champ variable.

2. Symboles normalisés



3. Excitation des machines synchrones

Le rotor doit être alimenté en courant continu, sauf s'il est à aimants permanents. Le courant d'excitation I_e est fourni :

- Par une alimentation continue extérieure. (système bague + balais).
- Par un alternateur auxiliaire à inducteur fixe et induit tournant + pont de diode. (p145)

L'alternateur est auto-excité.

4. Compléments sur le moteur synchrone

4.1. 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 $\cos\phi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

4.2. Inconvénients

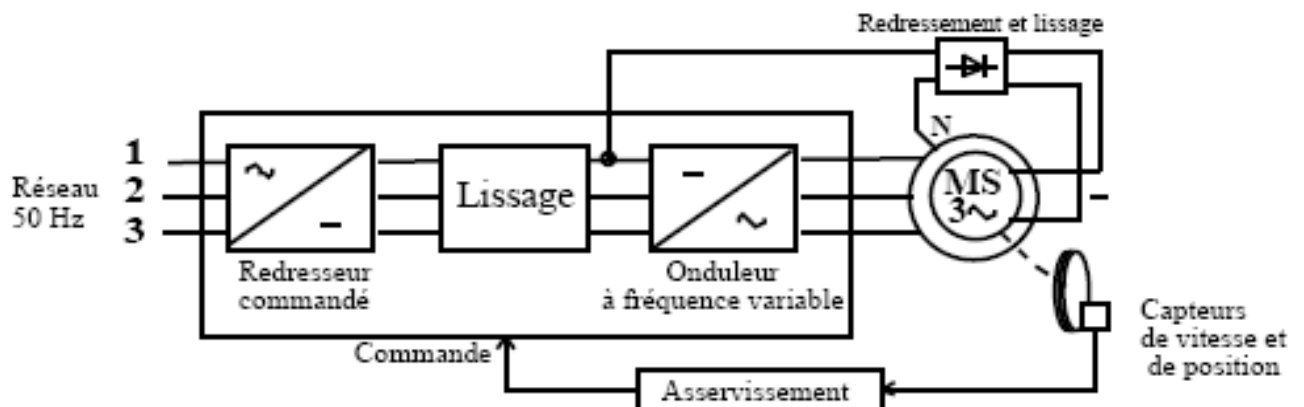
- Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

4.3. Utilisations

4.3.1. Les 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 autosynchrones ou synchrones auto-pilotés (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.

4.3.2 Les alternateurs

Ils fournissent une partie de l'énergie du réseau EDF. On les trouve dans les barrages sur les fleuves ou les lacs.

Exemple 1 : centrale de Rhinau sur le Rhin.

Les groupes turbine-alternateurs sont implantés dans le barrage qui barre complètement le cours du fleuve.

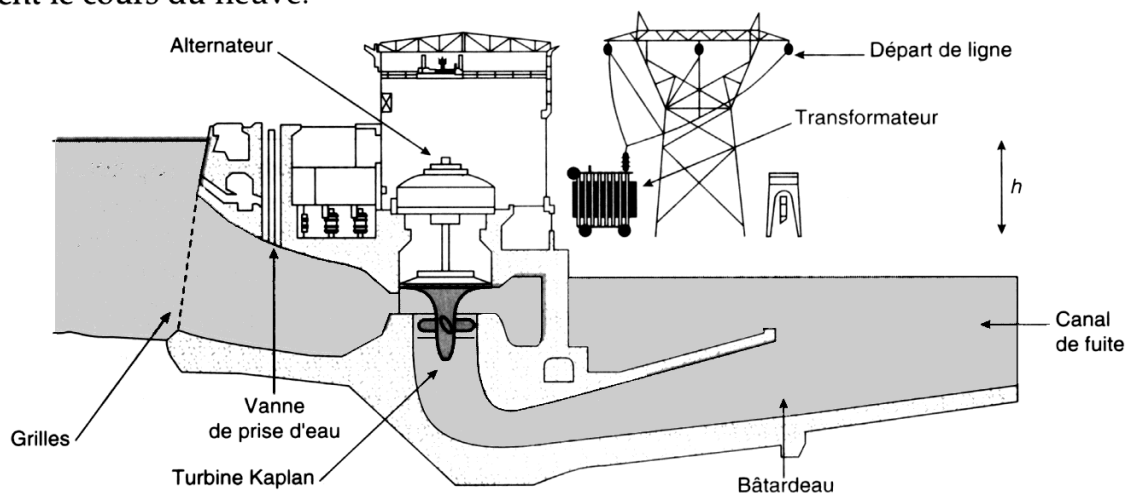


fig. 6. Disposition d'une centrale de basse chute (au fil de l'eau).

La centrale comporte quatre alternateurs de 42000 kVA chacun : vitesse, 75 tr.mn^{-1} avec turbines Kaplan à axe vertical, débit $350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

II. ALTERNATEUR TRIPHASÉ.

1. Force électromotrice induite.

La rotation de l'induit crée une variation de flux à travers les enroulements du stator. Ainsi d'après la loi de Faraday le stator d'un alternateur réel à vide est le siège d'un système de tensions induites, triphasé et équilibré:

$$e_1 = E\sqrt{2} \cos(2\pi ft) ; \quad e_2 = E\sqrt{2} \cos(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) ; \quad e_3 = E\sqrt{2} \cos(2\pi ft - \frac{4\pi}{3})$$

La fréquence de ces tensions est égale à : $f = p n_s$

f : fréquence (Hz)

p : nombre de paires de pôles

n_s : fréquence de rotation du rotor (tr/s)

fréquence de synchronisme

La valeur **efficace** de la f.é.m. induite dans chaque enroulement statorique est :

$$E = K \cdot N \cdot n_s \cdot p \cdot \Phi \text{ ou } E = K \cdot N \cdot f \cdot \Phi$$

E : fem(V)

Φ : flux maximal dans une spire du stator (Wb)

N : nombre de conducteurs d'une phase du stator

K : coefficient de Kapp

Application : Quel flux maximal est-il nécessaire d'obtenir dans une spire du stator d'un alternateur tétrapolaire tournant à 1500tr/min, sachant que son stator porte 96 conducteurs , que son coefficient de Kapp est $K=2.15$ et que la f.é.m. à vide aux bornes d'un enroulement statorique est $E=230V$.

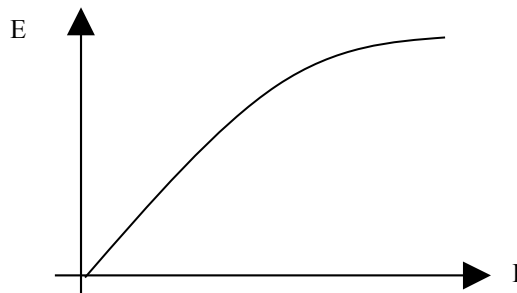
$$\Phi = \frac{E}{K N n_s p} = \frac{230}{2,15 \cdot 32 \cdot \frac{1500}{60} \cdot 2} = 66,9 mWb$$

2. Caractéristique à vide $E(I_e)$

Le rotor tourne à vitesse constante ($n=cte$), la valeur efficace E de la fem induite dans un enroulement peut s'écrire :

$$E = K \cdot N \cdot n_s \cdot p \cdot \Phi = K' \Phi \quad \text{avec } K'=cte$$

Ainsi la f.é.m. E ne dépend que du flux maximal Φ et donc du courant d'excitation I_e .

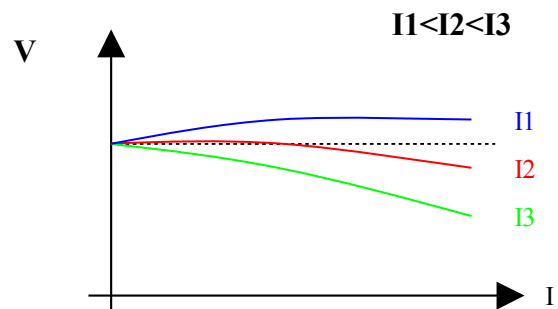
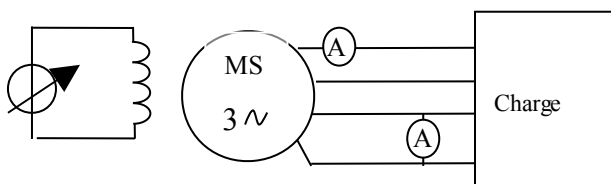


Rem : Parfois le neutre de l'induit n'est pas sorti, on mesure alors $U_0 = E_{pp}$ et on en déduit

$$E = \frac{E_{pp}}{\sqrt{3}} \text{ (en couplage étoile).}$$

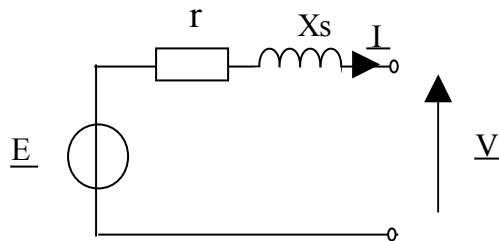
3. Modèle équivalent d'un enroulement de l'alternateur.

- Caractéristique $V(I)$ lors du fonctionnement en charge



On voit que plus le courant débité est important, plus la chute de tension est importante. Cette chute de tension est due à la réaction magnétique de l'induit. L'alternateur n'est pas un générateur de tension parfait.

- Modèle équivalent d'un enroulement de l'alternateur



E_s : f.é.m. à vide (dite synchrone) .

r : résistance d'un enroulement

L_s : inductance synchrone.

$X_s = L_s \cdot \omega$: réactance synchrone

V : tension simple

Les notations V et I supposent un alternateur couplé en étoile.

Relation avec les grandeurs complexes : $\underline{V} = \underline{E_s} - r \cdot \underline{I} - jX_s \underline{I}$

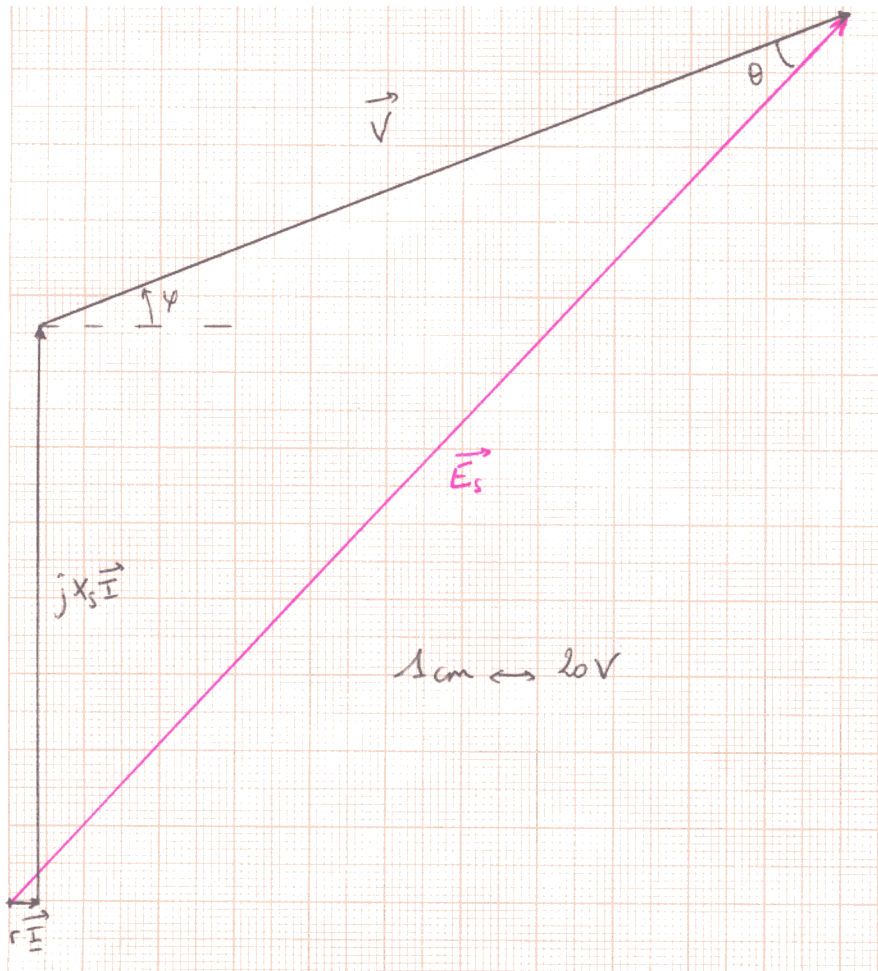
Relation entre les vecteurs de Fresnel : $\vec{V} = \vec{E_s} - r \cdot \vec{I} - jX_s \vec{I}$

- Diagramme synchrone. (Diagramme de Fresnel)

Les caractéristiques de l'alternateur sont les suivantes $E_s = 320 \text{ V}$; $r = 4,9 \Omega$ et $X_s = 84,5 \Omega$.

Calculer la tension V aux bornes d'un enroulement statorique lorsqu'il débite un courant d'une intensité de $1,8 \text{ A}$ dans une charge inductive de facteur de puissance $0,93$.

On a : $rI = 8,8 \text{ V}$ $X_s I = 152 \text{ V}$ $\varphi = 22^\circ$



On mesure :

$V = 230\text{ V}$

L'angle $\theta = (\vec{V}; \vec{E}_s)$ est appelé angle de décalage interne. (ici $\theta = 26^\circ$)

4. Détermination du modèle équivalent

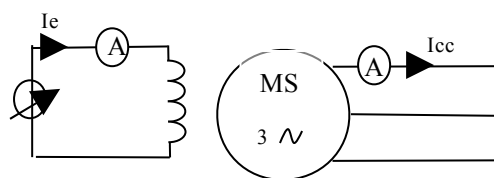
Alternateur non saturé

- $E_s = E$ (f.é.m. à vide). Il faut réaliser un essai à vide et tracer E en fonction de I_e
- Mesure de r par la méthode voltampèremétrique. (selon le cas de figure, on mesurera ou directement r ou la résistance R entre deux bornes du stator couplé)
- Réactance synchrone X_s . Il faut réaliser un essai en court-circuit. En effet :

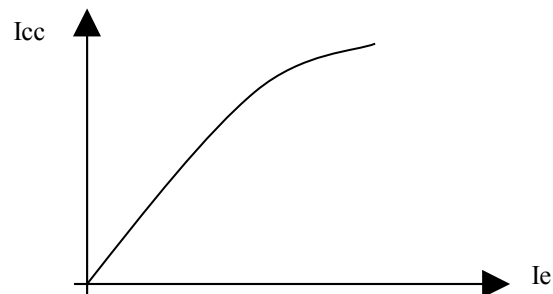
$$\underline{V} = 0 = \underline{E}_s - r \underline{I}_{cc} - jX_s \underline{I}_{cc} \quad \underline{E}_s = (r + jX_s) \underline{I}_{cc}$$

donc $X_s = \sqrt{\left(\frac{E_s}{I_{cc}}\right)^2 - r^2}$ mais souvent on négligera r on a alors : $X_s \approx \frac{E_s}{I_{cc}}$

Lors de l'essai en court-circuit on trace la courbe I_{cc} en fonction de I_e .



Essai en Court-circuit



Rem : Pour un alternateur peu ou pas saturé, les caractéristiques $E = f(I_e)$ et $I_{cc} = f(I_e)$ sont linéaires. Le modèle équivalent est linéaire et X_s reste constante quelles que soient les valeurs de I et I_e .

Pour un alternateur saturé, E et X_s dépendent de I et I_e , donc du point de fonctionnement de l'alternateur. Le modèle équivalent est encore utilisé mais avec des valeurs de E et X_s valables pour le seul point de fonctionnement considéré.

5. Bilan de puissance

- Puissance reçue : P_a

Puissance mécanique : $P_M = T_M \cdot \Omega$. T_M désigne le moment du couple d'entraînement.

Puissance électrique absorbée par la roue polaire : $P_e = U_e \cdot I_e$.

U_e est la tension d'alimentation de l'inducteur.

$$P_a = T_M \cdot \Omega + U_e I_e$$

Rem : Si l'alternateur est auto excité : $P_a = T_M \cdot \Omega$

- **Puissance utile** :

$$P_u = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$\cos \varphi$: facteur de puissance de la charge équilibrée

- **Pertes** :

- * Pertes dans le fer (hystérésis et courants de Foucault). Elles dépendent de la fréquence f et de la tension V .
- * Pertes mécaniques. Elles dépendent de la fréquence de rotation n .

Rem : Si l'alternateur fonctionne à fréquence et tension V constantes les pertes dans le fer et les pertes mécaniques constituent les pertes constantes p_c .

- * Pertes par effet Joule rotoriques ; $P_{je} = P_e = U_e I_e$

- * Pertes par effet Joule statoriques ;

- r est la résistance d'un enroulement statorique

$$P_{js} = 3rI^2 \text{ (couplage étoile)}$$

$$P_{js} = 3rJ^2 = rI^2 \text{ (couplage en triangle).}$$

- Soit R la résistance mesurée entre deux bornes du stator dont les enroulements sont couplés

$$P_{js} = \frac{3}{2} RI^2 \text{ (quelque soit le couplage).}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{T_M \cdot \Omega + U_e I_e} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi + \text{pertes}}$$

Application : La tension entre phases d'un alternateur triphasé auto-excité, stator couplé en étoile, est égale à 15kV. Il débite un courant d'intensité efficace 5,0kA dans une charge triphasée équilibrée dont le facteur de puissance est 0.85 inductif.

1°) Calculer les puissances active, réactive et apparente de la charge.

2°) Sachant que l'alternateur a un rendement de 98% déterminer les pertes de cet alternateur et la puissance qu'il reçoit. De quelle nature est-elle ?

3°) Cet alternateur comporte 12 pôles et délivre des tensions et intensités de fréquence 60Hz. Quel couple résistant oppose-t-il à la turbine qui l'entraîne ?

$$1^\circ) \quad P = P_u = \sqrt{3}UI \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 5000 \cdot 0,85 = 110,4 \text{ MW}$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 5000 \cdot 0,53 = 68,4 \text{ MVar}$$

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 5000 = 129,9 \text{ MVA}$$

$$2^\circ) \quad P_a = \frac{P_u}{\eta} = 112,7 \text{ MW} \quad \text{d'où} \quad \text{pertes} = P_a - P_u = 2,3 \text{ MW}$$

P_a est une puissance mécanique.

$$3^\circ) \quad \text{Auto-excité} \Rightarrow \eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{T_M \cdot \Omega} \quad \text{avec} \quad \Omega = 2\pi n_s = 2\pi \frac{f}{p}$$

$$T_M = \frac{P_u \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot \eta} = 1,79 \text{ MNm}$$

III. Moteur synchrone triphasé.

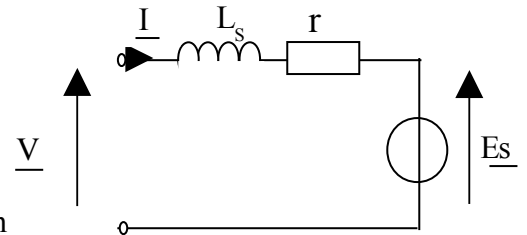
1. Principe

Le stator alimenté en triphasé, crée un champ tournant à la fréquence de synchronisme

$n_s = \frac{f}{p}$ et entraîne en rotation le rotor. Le champ tournant créé par le stator et celui créé par le rotor tournent au synchronisme. Le moteur synchrone reçoit de l'énergie électrique et restitue de l'énergie mécanique.

2. Diagramme synchrone

Le modèle d'une phase est utilisable pour l'alternateur et le moteur synchrone. La seule différence est que l'on utilise la convention récepteur.



Ce changement de convention conduit à une nouvelle relation entre V , E_s , r et X_s :

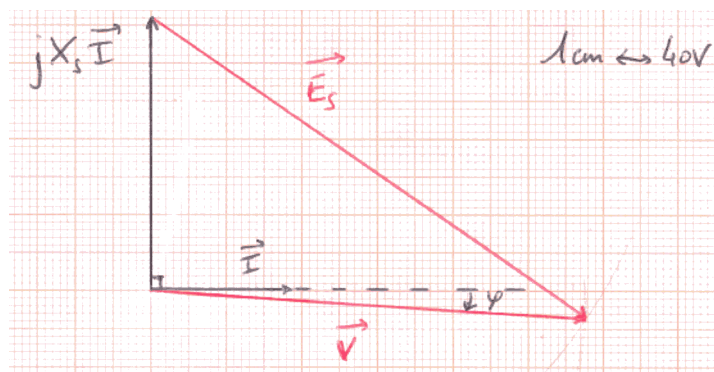
Relation avec les grandeurs complexes : $\underline{V} = \underline{E}_s + r \cdot \underline{I} + jX_s \cdot \underline{I}$

Relation entre les vecteurs de Fresnel : $\vec{V} = \vec{E}_s + r \cdot \vec{I} + jX_s \cdot \vec{I}$

Rem : La détermination des éléments du modèle est faite lors d'un essai à vide et d'un essai en court-circuit en fonctionnement en alternateur.

Application : Un moteur synchrone ,couplé en étoile, alimenté par un réseau 400 V appelle un courant en ligne d'intensité efficace 1,8 A. Sa réactance synchrone X_s est égale à 80Ω et sa f.é.m. synchrone est $E_s = 280 V$. Tracer le diagramme synchrone de ce moteur et déterminer le déphasage de v par rapport à i , ainsi que l'angle de décalage interne. On néglige la résistance des enroulements.

$$\vec{V} = \vec{E}_s + r \cdot \vec{I} + jX_s \cdot \vec{I} = \vec{E}_s + jX_s \cdot \vec{I} \quad \text{avec} \quad V = \frac{U}{\sqrt{3}} = 230 V \quad \text{et} \quad X_s \cdot I = 144 V$$



On mesure $\varphi = -4^\circ$ et $\theta = 31^\circ$

3. Moment du couple électromagnétique

Le moteur triphasé reçoit une puissance $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$. Dans l'hypothèse où l'on suppose la résistance de l'enroulement nulle ($r=0$), la puissance développée par le couple électromagnétique (T_{em}) est égale à la puissance totale absorbée par la machine.

$$\sqrt{3}UI \cos \varphi = T_{em} \cdot \Omega$$

d'où

$$T_{em} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\Omega}$$

4. Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_u \cdot \Omega}{\sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi + U_e I_e}.$$