Machines synchrones

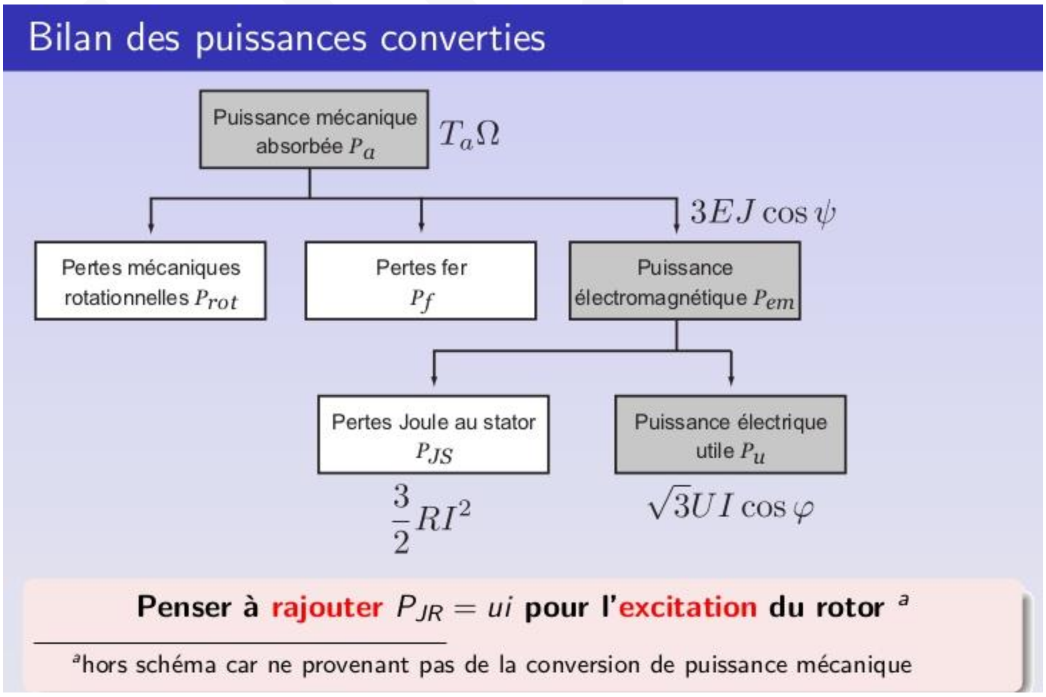
Machine synchrone triphasée à pôles lisses en régime linéaire

Principe de fonctionnement

- Le rotor muni d'un bobinage à 2p pôles tourne à une vitesse Ω. Le bobinage alimenté en courant continu grâce à 2 bagues sur lesquels frottent 2 balais entraine avec lui le champ qu'ils créent.
- Les enroulements du stator sont aussi à 2p pôles, ils apparaissent dans les enroulements 3 forces électromotrices (F.é.m.) triphasées de pulsation $\omega_s = p\Omega$.
- Lorsqu'en charge le stator sur une charge triphasée, il débite 3 courants triphasés ; on obtient un alternateur triphasé.
- Inversement lorsque on applique au stator des tensions triphasées de pulsationω_s, on aura des courants de même pulsation créant un champ tournant à la vitesse$\Omega = \frac{\omega_s}{p}$.
- L'existence simultanée du courant continu dans le rotor tournant à $\Omega = \frac{\omega_s}{p}$ et des courants triphasés de pulsation ω_s correspond à 2 champs tournants à la même vitesse et à un couple électromagnétique.
- Suivant le signe du couple pour une vitesse donnée on aura un générateur ou un moteur synchrone.

Considération énergétique

Fonctionnement en alternateur



Remarque : T_a correspond au couple mécanique sur l'arbre du moteur

A vide le flux dans la machine est fourni par le rotor. En charge la puissance réactive est fournie en partie par le réseau (si la machine est couplée au réseau) et une partie par son inducteur.

On règle ainsi l'échange de puissance réactive Q entre le réseau et la machine en réglant l'excitation.

Le rendement de la machine est :

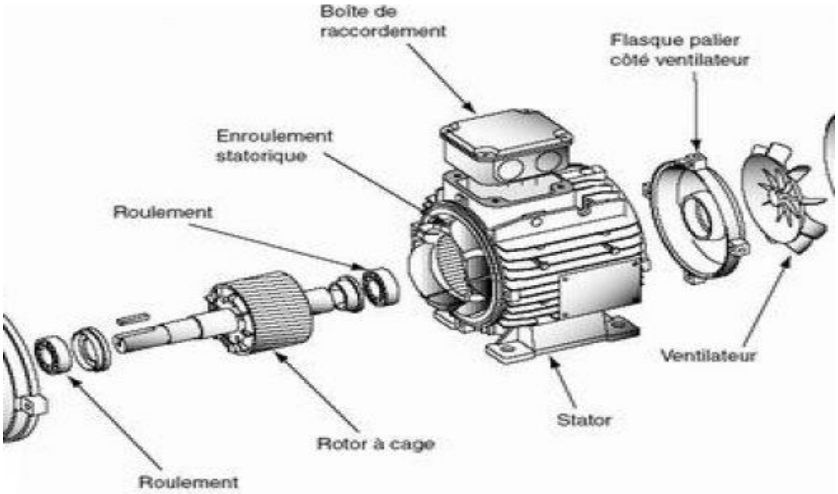
$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \sum pertes}$$

<u>Fonctionnement en compensateur synchrone</u>

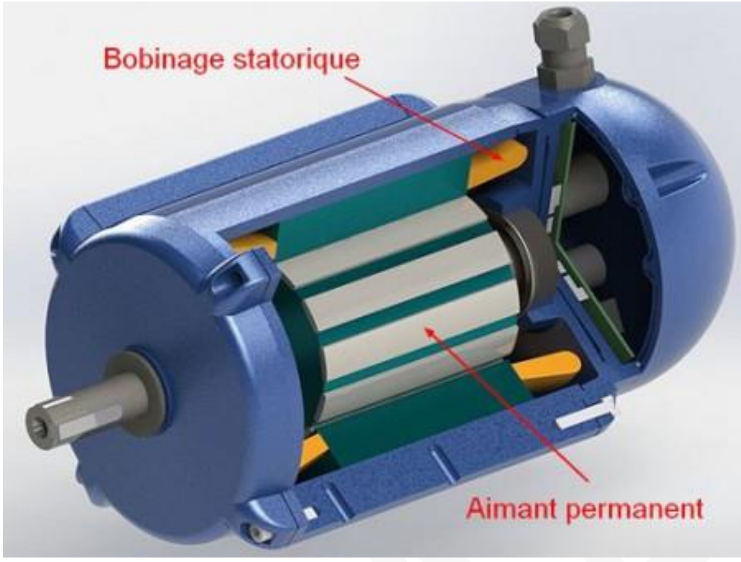
La machine fonctionne en moteur synchrone à vide surexcitée et fournit de l'énergie réactive au réseau (c'est un compensateur tournant).

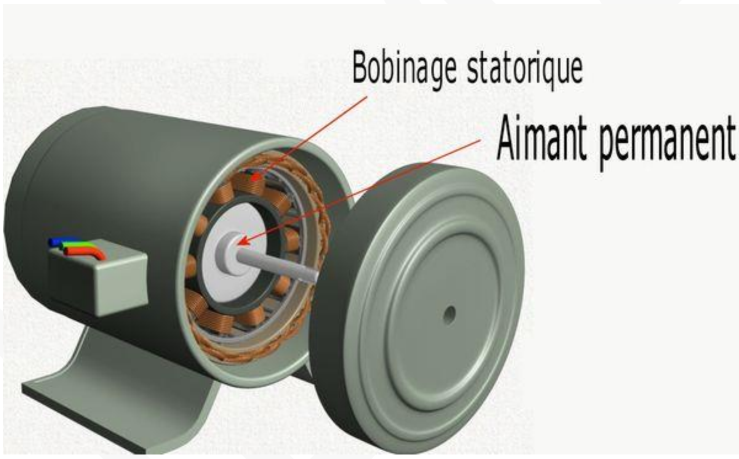
La puissance active absorbée au réseau à vide est très faible.

<u>Fonctionnement en moteur synchrone</u>



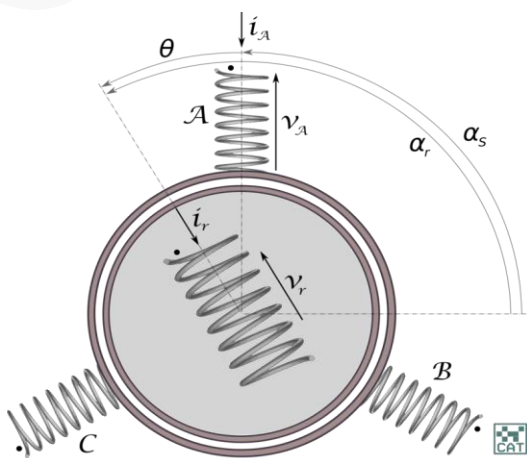
En fonctionnement moteur, l'échange de puissance réactive entre le réseau et la machine se fait de la même façon que pour l'alternateur.





Au lieu d'une bobine au rotor, un aimant permanent joue le même rôle (excitation de la machine).

<u>Equation de la machine synchrone</u>



Matrice inductance

$$L = \begin{vmatrix} L_s & M_s & M_s & M_{AR} \\ M_s & L_s & M_s & M_{BR} \\ M_s & M_s & L_s & M_{CR} \\ M_{RA} & M_{RB} & M_{RC} & L_R \end{vmatrix}$$

$M_{s:}$ Mutuelle inductance entre les phases statorique.
$L_{s:}$ inductance propre des phases statoriques.

$M_{AR} = M\cos(p\theta_m)$
$M_{BR} = M\cos(p\theta_m - \frac{2\pi}{3})$
$$M_{CR} = M\cos\left(p\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$p\theta_m = \theta,\ \ \theta_m$: angle mécanique ; θ : angle électrique

L'équation des tensions est :

$$v = R.i + \frac{d}{dt}(L.i) = R.i + L.i' + \frac{\partial\theta}{\partial t}.\frac{\partial L}{\partial\theta}(i)\,)$$

$$[v] = [R].[i] + [L].[i'] + \dot{\theta}\left[\frac{\partial L}{\partial\theta}\right].[i]$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial\theta}\right) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{vmatrix}$$

$(v) = (R).(i) + |L|(\frac{di}{dt}) + (\frac{dL}{dt}).(i)$

$= (R).(i) + (L).(\frac{di}{dt}) + (\frac{dL}{d\theta_m}).\frac{d\theta_m}{dt}.(i)$

$(v) = (R).(i) + |L|(\frac{di}{dt}) + \frac{d\theta}{dt}(\frac{dL}{d\theta}).(i)$

Les pertes fer ne sont pas prises en considération, dans notre cas, elles sont négligées.

Dans le cas d'un système équilibré en tensions et en courants :

$$\begin{cases} i_A = I\sqrt{2}\,\cos(\omega t - \varphi) \\ i_B = I\sqrt{2}\,\cos(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C = I\sqrt{2}\,\cos(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_A = V_s\sqrt{2}\cos(\omega t) \\ v_B = V_s\sqrt{2}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_C = V_s\sqrt{2}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$v_R = V_R = constante$$

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ p\theta_0' = \theta_0 \\ \theta_m = \Omega t + \theta_0 \\ \theta = p\Omega t + \theta_0 \\ \theta = \omega t + \theta_0 \end{cases}$$

$\theta_{0:}$ étant l'angle initial.

Vu que le système est sinusoïdal et équilibré, nous résonnons maintenant uniquement avec une seule phase.

Comme le système est sinusoïdal, on va utiliser une représentation complexe.

$$v_A = V_s\sqrt{2}\cos(\omega t)$$
$$= R_s I\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi) - (L_s - M_s)\omega I\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi) - M\omega I_R\sin(\omega t + \theta_0)$$

$$\overline{V_A} = V_s\sqrt{2}e^{j\omega t} = R_s I\sqrt{2}e^{j(\omega t-\varphi)} + j(L_s - M_s)\omega I\sqrt{2}e^{j(\omega t-\varphi)} + jM\omega I_R e^{j(\omega t+\theta_0)}$$

$$V_s = R_s I e^{-j\varphi} + j(L_s - M_s)\omega I e^{-j\varphi} + jM\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}e^{j\theta_0}$$

On définit la F.é.m. : E par

$$\boldsymbol{\overline{E} = jM\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}e^{j\theta_0} = Ee^{j\delta} = M\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}e^{j(\theta_{0+}{}^{\pi}/_{2})}}$$

δ : est l'angle interne de la machine ou l'angle de charge

Ce résultat montre bien l'importance de deux conditions pour produire de l'électricité ou pour produire du mouvement dans la machine : E et M différents de zéro.

- E est nul s'il n'y a pas d'excitation ;
- E est nul s'il n'y a pas de variation de mutuelle entre le stator et le rotor.

$(L_s - M_s) = L$: Inductance cyclique.

Soit :

$$\overline{I} = Ie^{-j\varphi}$$

$\overline{V_s} = R_s\overline{I} + jL\omega\overline{I} + \overline{E}$; Représente l'équation électrique d'une phase en convention moteur.

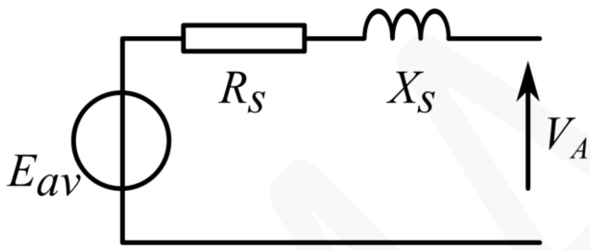
Posons : $\overline{Z} = R_s + jL\omega$; impédance synchrone

$jL\omega = X_s$: réactance synchrone

$$\overline{Z} = Ze^{j\xi} \quad \xi: est\ une\ constante\ de\ la\ machine$$

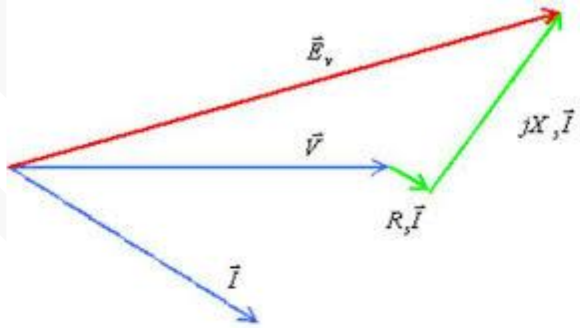
Pour les grandes machines la résistance R_s peut être négligée et $\xi = \frac{\pi}{2}$

L'équation électrique permet de déduire le schéma électrique équivalent d'une phase de la machine synchrone.



$$\overline{V_s} = V_A \quad et \quad \overline{E} = E_{av}$$

Le modèle de Behn Echenburg correspond à une machine à pôles lisses non saturée est déduit à partir de cette équation :



δ : c'est l'angle interne de la machine entre la tension $\vec{V}$ et la F.é.m $\vec{E}$.

<u>**Calcul du couple électromagnétique de la machine synchrone**</u>

a) Cas général

$$C_e = \frac{1}{2}[i]_t \left[\frac{\partial L}{\partial \theta_m}\right][i]$$

$C_e = \frac{3}{\sqrt{2}} pMII_R \cos(\delta + \varphi)$

b) Par conversion d'énergie

$$C_e\Omega = 3\ Ree(\overline{E}\,\overline{I^*})$$

$\overline{E} = Ee^{j\delta}$ $\overline{V} = \overline{E} + \overline{Z}.\overline{I}$, on prenons V comme origine des phases :

$$\overline{I} = \frac{\overline{V}-\overline{E}}{\overline{Z}} = \frac{V-\overline{E}}{\overline{Z}}$$

$$\overline{Z} = Z.e^{j\xi}$$

$$\overline{I} = \frac{V}{Z}e^{-j\xi} - \frac{E}{Z}e^{j(\delta-\xi)}$$

$$\overline{I^*} = \frac{V}{Z}e^{+j\xi} - \frac{E}{Z}e^{-j(\delta-\xi)}$$

$$C_e.\Omega = 3\ Ree\left\{Ee^{j\delta}\frac{V}{Z}e^{j\xi} - Ee^{j\delta}\frac{E}{Z}e^{-j(\delta-\xi)}\right\}$$

$$C_e.\Omega = 3\ Ree\left\{\frac{EV}{Z}e^{j(\xi+\delta)} - \frac{E^2}{Z}e^{j\xi}\right\}$$

$$= \frac{3E}{Z}\{V\cos(\delta+\xi) - E\cos\xi\}$$

$$C_e.\Omega = C_e.\frac{\omega}{p}$$

$$\Rightarrow C_e = \frac{3pE}{Z\Omega}\{V\cos(\delta+\xi) - E\cos\xi\}$$

$\overline{E} = jM\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}e^{\theta_0}$ et $\overline{I} = Ie^{-j\varphi}$

$$\overline{E}.\overline{I^*} = jM\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}e^{j\theta_0}.Ie^{j\varphi} = M\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}\ Ie^{j(\theta_0+\frac{\pi}{2}+\varphi)}$$

$$Ree\left[\overline{E}.\overline{I^*}\right] = 3M\omega\frac{I_R}{\sqrt{2}}\ I\ \cos(\delta+\varphi) = \frac{C_e\omega}{p}$$

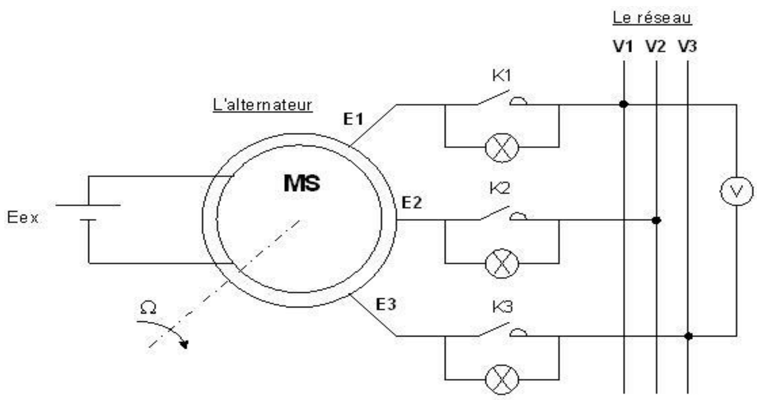
$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{C_e = \frac{3p}{\sqrt{2}}MII_R\cos(\delta+\varphi)}$$

Couplage d'un alternateur au réseau

a) Conditions de couplage

- les f. é. m. du **réseau** et de l'**alternateur** doivent être égales,
- l'ordre des phases et les fréquences doivent être les mêmes,
- lors du **couplage**, il doit y avoir parfaite concordance entre les phases de l'alternateur et du réseau.

b) Mode de couplage



Le couplage est l'opération qui consiste à connecter les bornes de l'alternateur à celles du réseau triphasé pour débiter de la puissance électrique.

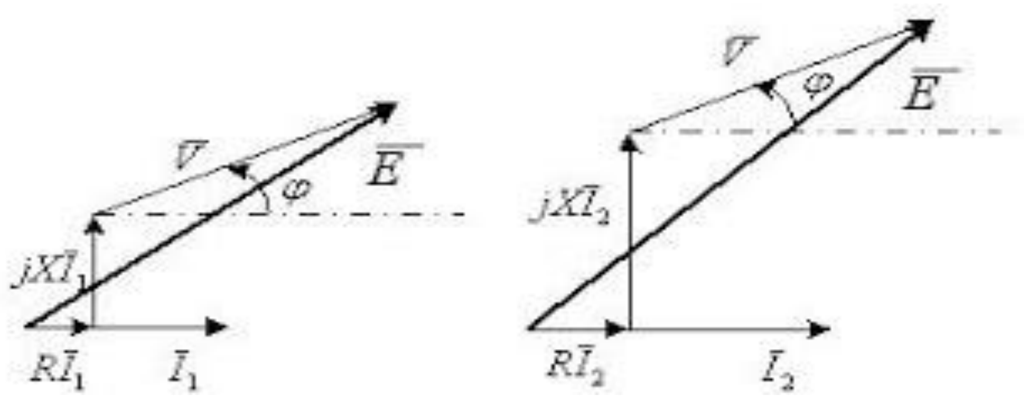
On n'effectue le couplage que lorsque les bornes homologues de l'alternateur et du réseau sont au même potentiel ; sinon la connexion s'accompagne de courants importants susceptibles de provoquer des chutes de tension, la disjonction des appareils de protection et un couple important qui pourront causer la rupture de l'accouplement rotor turbine. Pour éviter cela, il faut réaliser les conditions :

-Même ordre de succession des phases.
- Mêmes valeurs efficaces de tensions.
- Mêmes fréquences.
- Tensions homologues en phases.

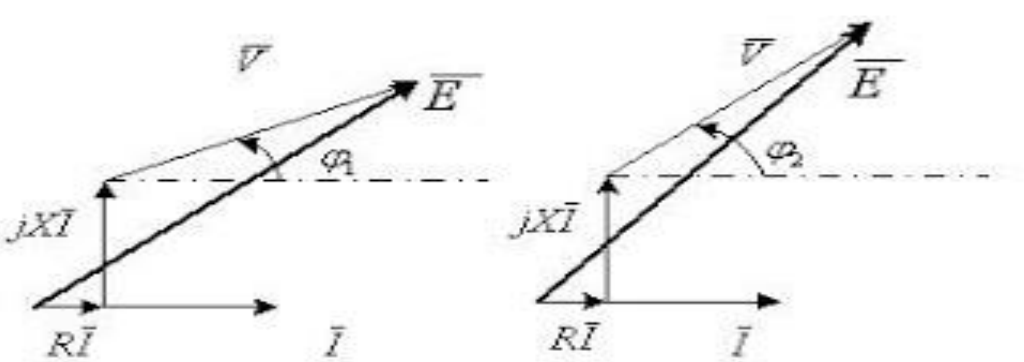
Le couplage est opéré en fermant simultanément les interrupteurs K1, K2 et K3 à l'extinction simultanée des lampes.

Pour un alternateur couplé au réseau, en basse tension V est imposé à 230 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 (Behn Echenburg) pour la variation de ces deux grandeurs :

- **Pour un facteur de puissance fixe et des courants variables :**



- **Pour un courant fixe et des facteurs de puissance variables :**



On constate que pour ces deux situations, la f.é.m. E doit varier. On constate que le flux est le seul terme pouvant être modifié par l'intermédiaire du courant d'excitation Ie.

Conséquence :

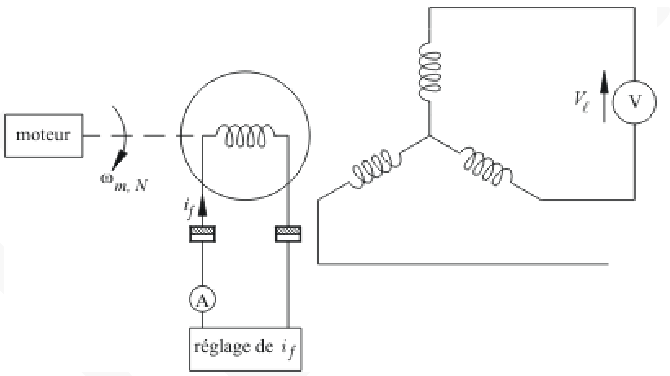
En utilisation normale, un groupe électrogène doit fournir une tension dont la valeur efficace est la plus constante possible. La charge pouvant varier dans des proportions importantes, un dispositif électronique de régulation (asservissement), agissant sur l'intensité du courant d'excitation, est donc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

Domaine d'utilisation :
On retrouve les alternateurs dans les groupes électrogènes, dans les véhicules automobiles et bien sur dans les centrales de production d'électricité (hydrauliques, thermiques…).

Essai de la machine synchrone

1) Essai à vide

La machine étant entraînée à vitesse nominale, on mesure la tension de ligne à vide en fonction du courant d'excitation.

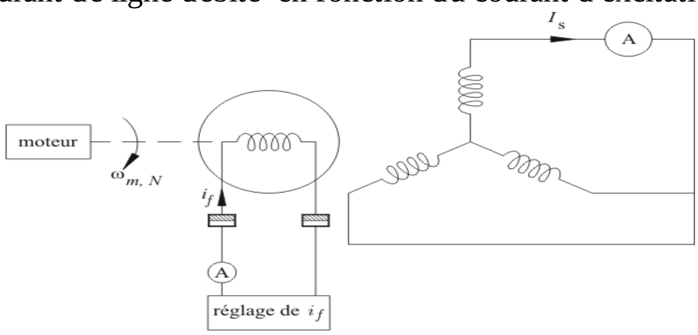


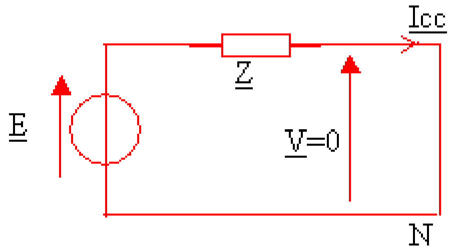
Cet essai permet de déterminer la caractéristique à vide de la machine E=f (I_e=i_f).

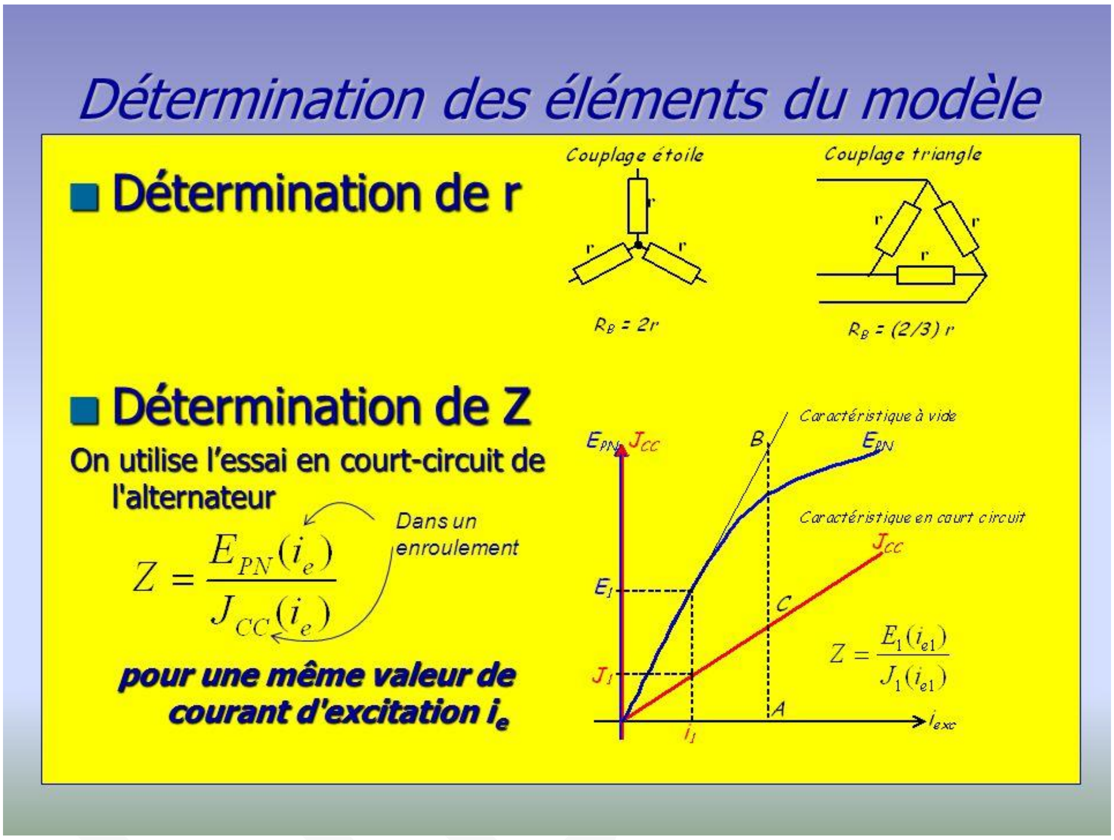
A vide, le courant est nul (I=0) $\Rightarrow$ $\overline{V} = \overline{E} + \overline{Z}.\overline{I} = \overline{E}$

2) Essai en court circuit

La machine étant entraînée à vitesse nominale et l'induit mis en court-circuit .on relève le courant de ligne débité en fonction du courant d'excitation.







Par un simple essai, on détermine la résistance d'une phase statorique (R_s), ce qui permet de déterminer facilement la réactance synchrone X_s :

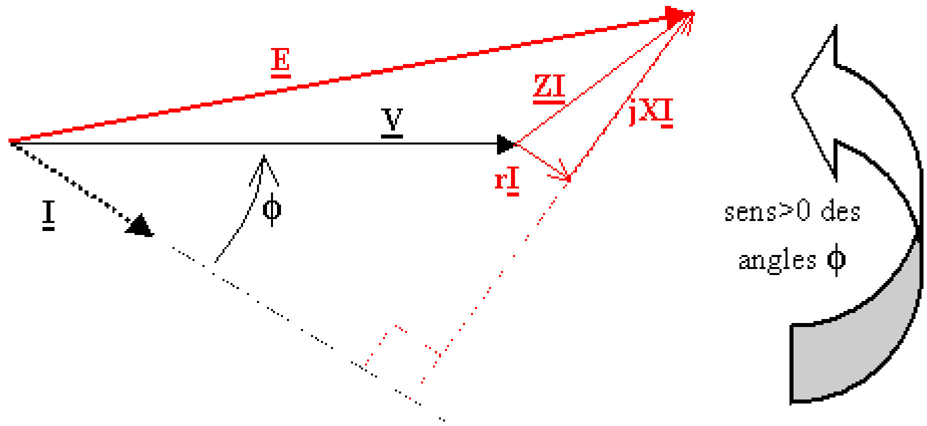
$$X_s = L_s.\omega = \sqrt{Z^2 - {R_s}^2}$$

Diagramme de Behan Eschenburg

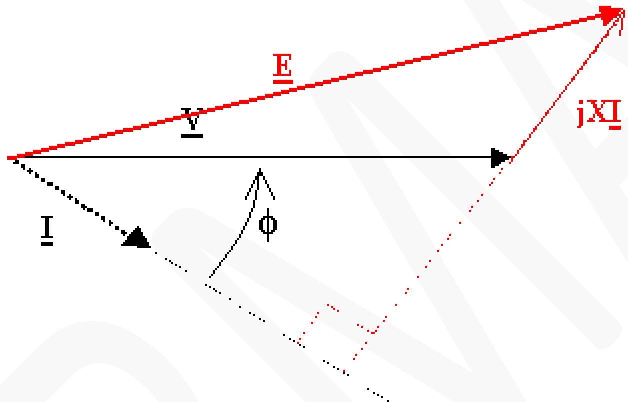
Paramètres connus :

- R_s à de l'essai à chaud.
- X_s à partir de l'essai à vide et de l'essai en court circuit.
  A : V, φ, I donnés, on détermine : E, δ à partir du diagramme de Behn Eschenburg et le courant d'excitation à partir de la caractéristique à vide.

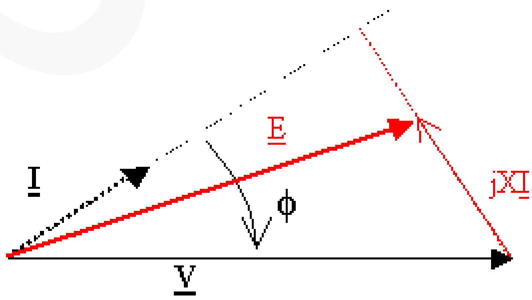
  δ : est l'angle de charge, il peut être déterminé graphiquement, c'est l'angle entre $\vec{V}$ et $\vec{E}$.



- **Cas où R_s est négligée :**



- **Cas où le courant I est en avance sur la tension V :**



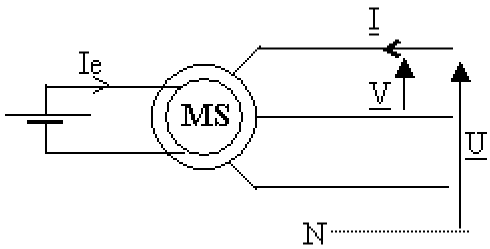
FONCTIONNEMENT EN MOTEUR

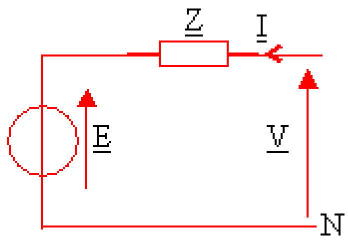
En fonctionnement moteur, on adoptera la convention *récepteur*.

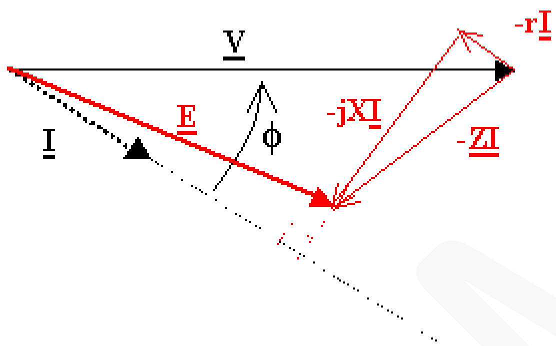
Diagramme synchrone

A partir du schéma équivalent on détermine $\overline{E}$.

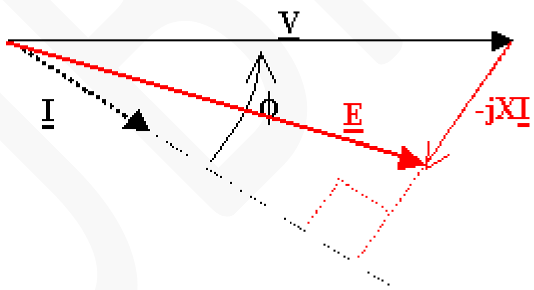
$$\overline{E} = \overline{V} - \overline{Z}.\overline{I}$$



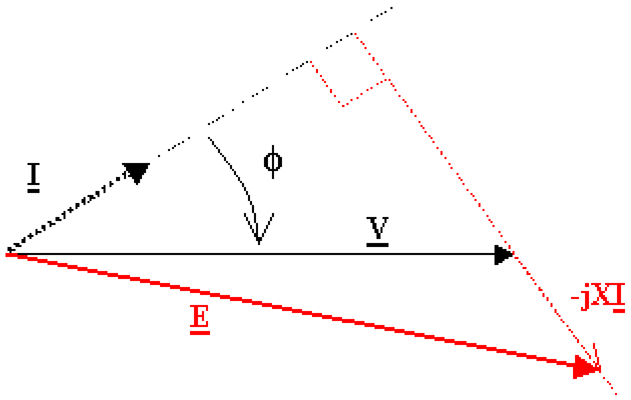




- **Cas où Rs est négligeable (courant I en retard par rapport à la tension V)**

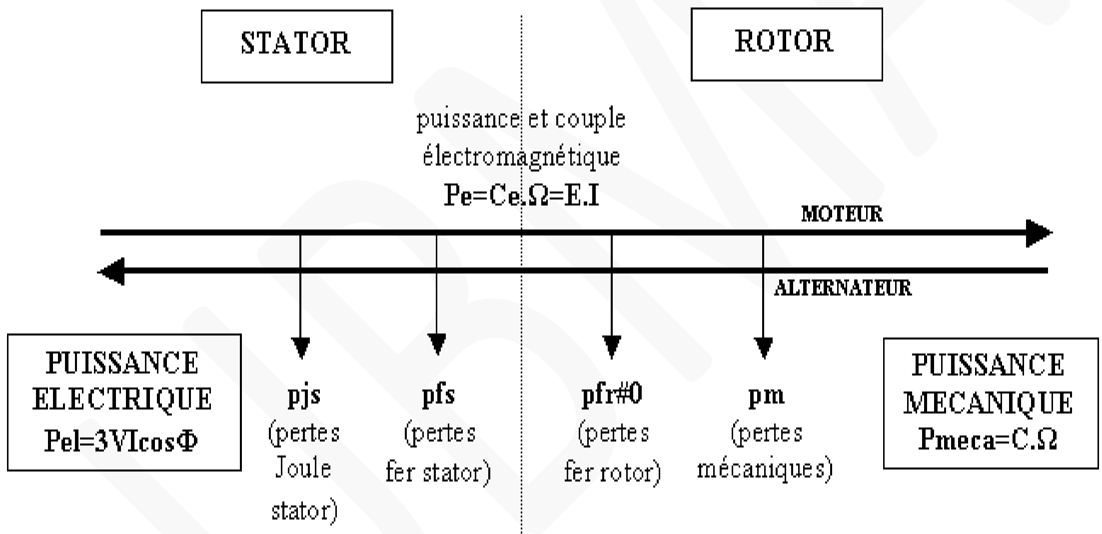


- **Cas où Rs est négligeable (courant I en avance par rapport à la tension V)**



PERTES ET RENDEMENT

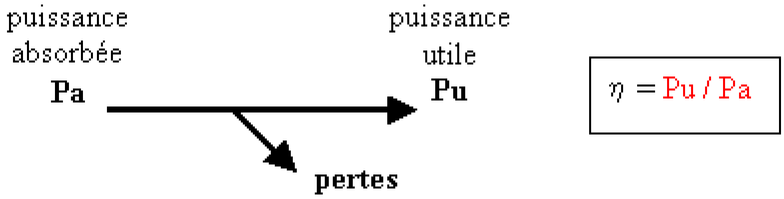
Synoptique des puissances de l'induit



Pour une machine parfaite : Pel=Pe=Pméca et C=Ce

Les pertes fer rotoriques *pfr* peuvent être négligées, car le rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique.

Rendement



Si l'on veut déterminer le rendement global de la machine, il faut aussi tenir compte des pertes dues à l'excitation.

Les machines synchrones ont un très bon rendement. Les gros alternateurs atteignent 98 à 99%.