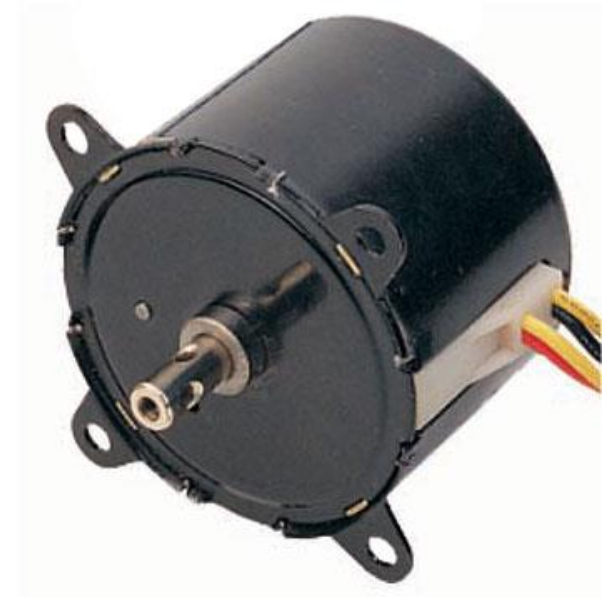
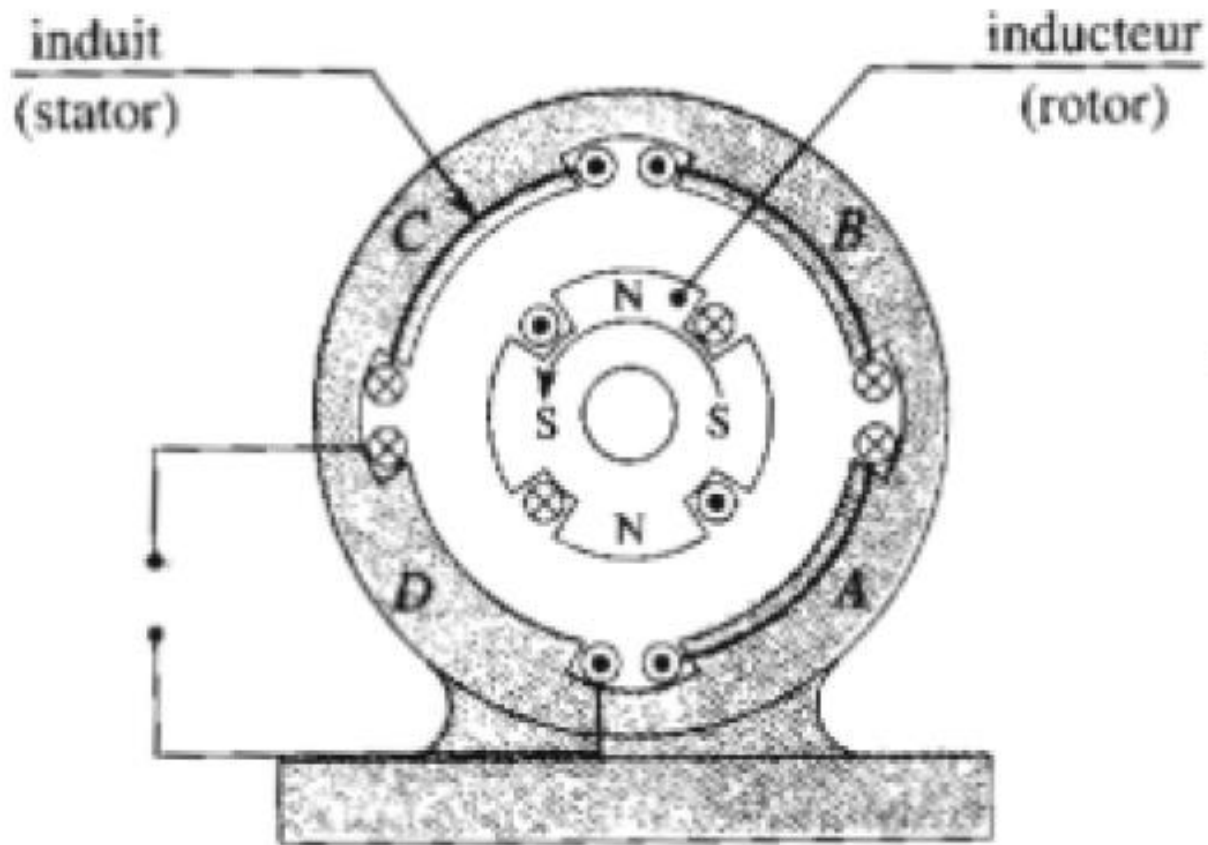


MACHINE SYNCHRONE

2022 / 2023



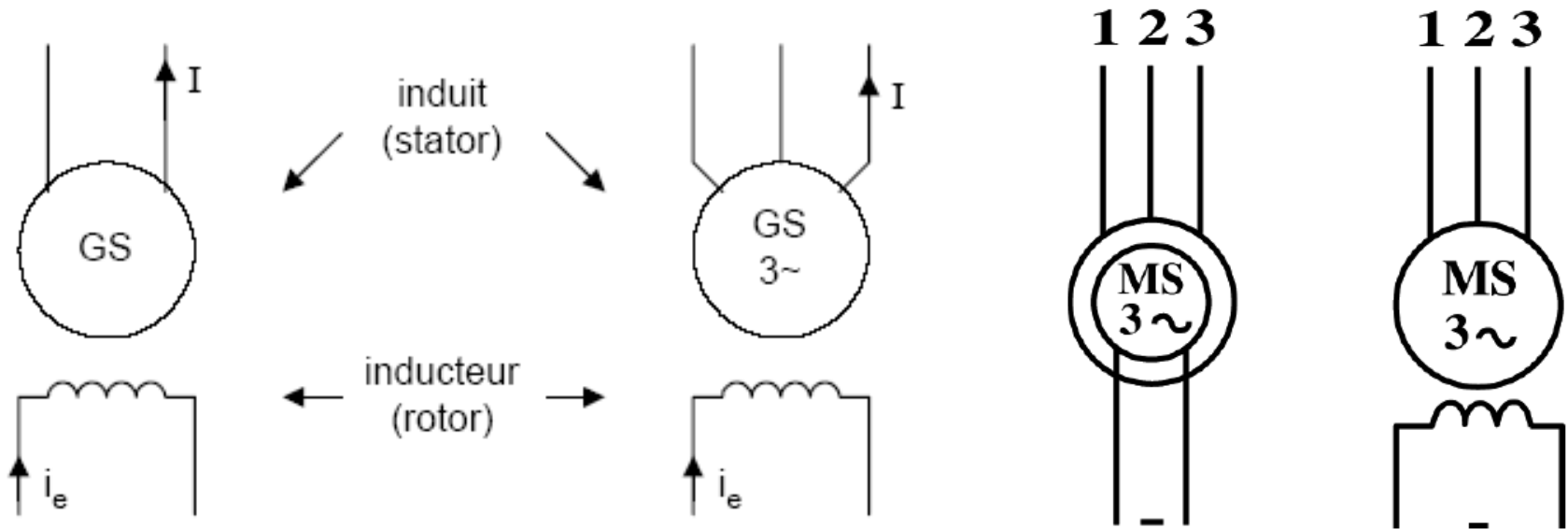
Constitution de la machine synchrone



- L'inducteur (ici le rotor parcouru par un courant continu, ou parfois constitué d'aimants permanents pour les faibles puissances).

- L'induit (ici le stator) parcouru par des courants alternatifs. 3

Symboles



Rotor = inducteur

Il est constitué d'un enroulement parcouru par un **courant d'excitation continu** I_e créant un champ magnétique $2p$ polaire dans l'entrefer. 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 réalisé avec des aimants permanents.

Stator = induit

Il est constitué d'enroulements disposés à 120° dans le cas d'un alternateur triphasé. Chaque enroulement sera le siège d'une FEM induite puisqu'il est soumis au flux magnétique variable de l'inducteur.

Les enroulements du stator sont le siège de **courants alternatifs monophasés ou triphasés**.

Il possède le même nombre de paires **p** de pôles.

Champ tournant

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

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

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en rad.s^{-1} ;
 ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} .

$$\omega = 2.\pi.f ;$$

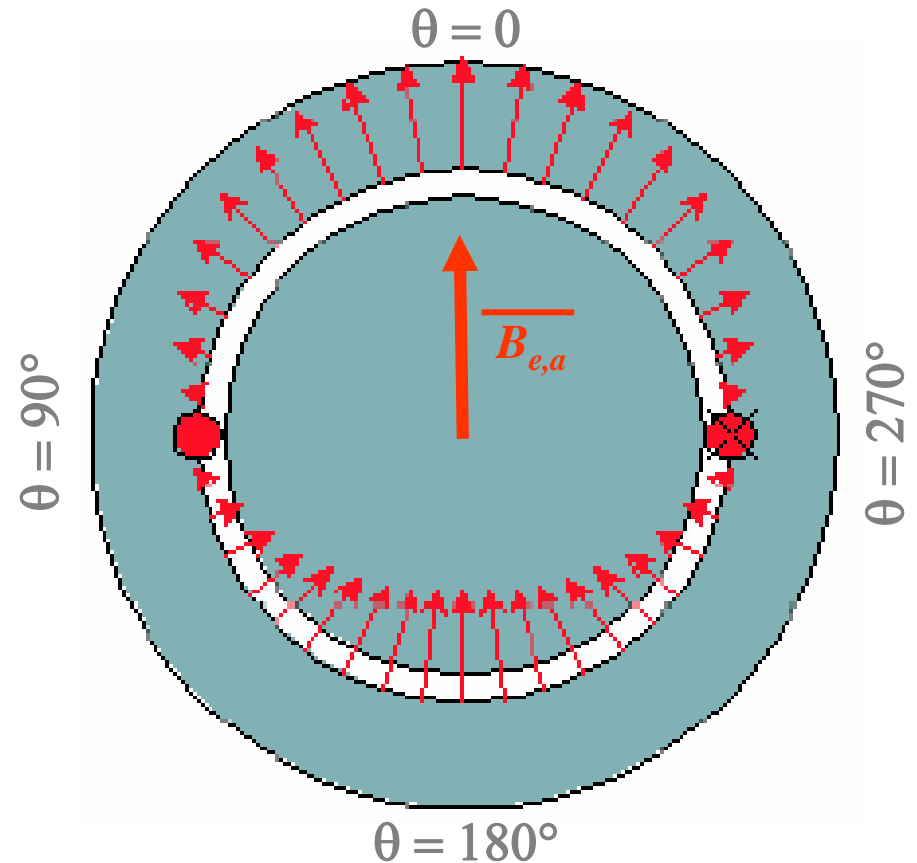
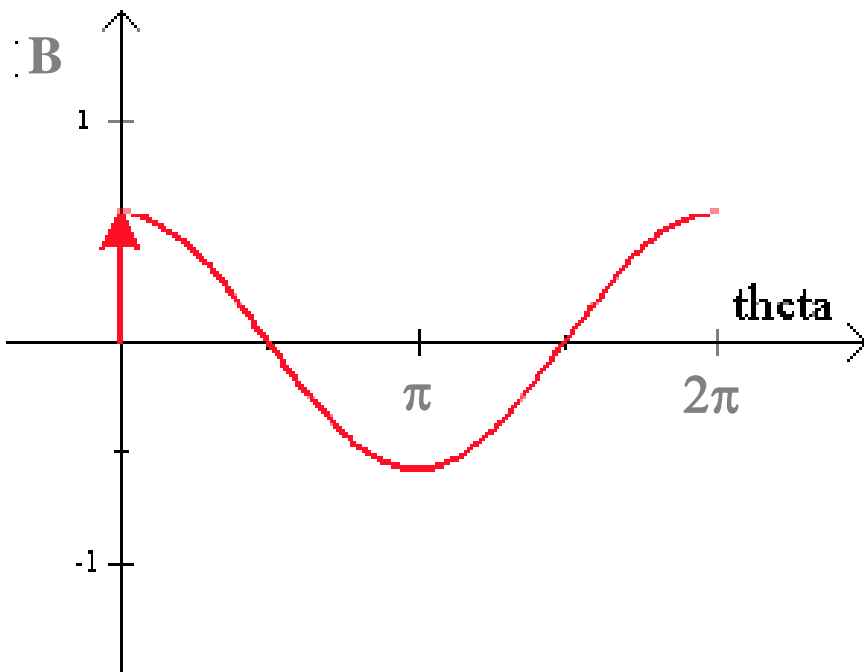
$$n_s = \frac{f}{p}$$

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.

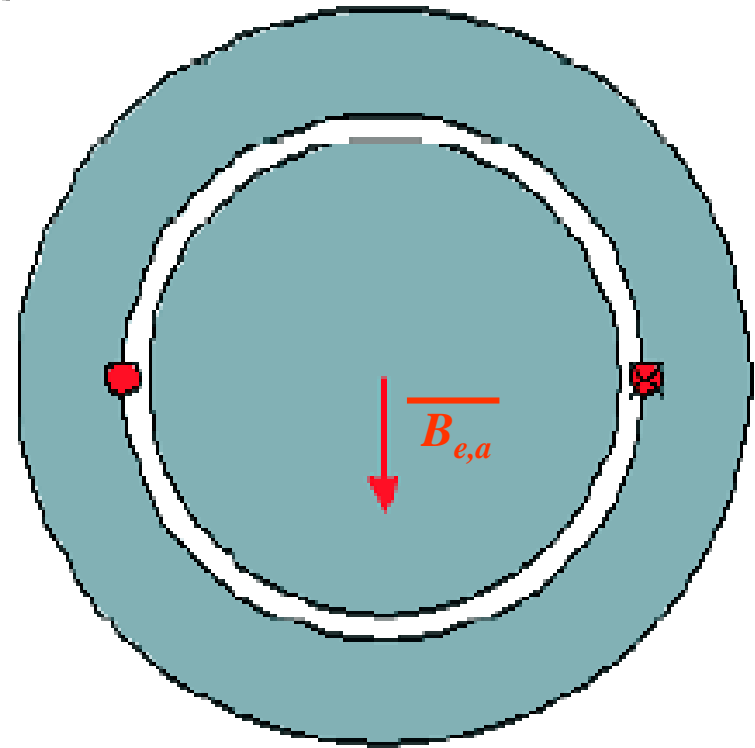
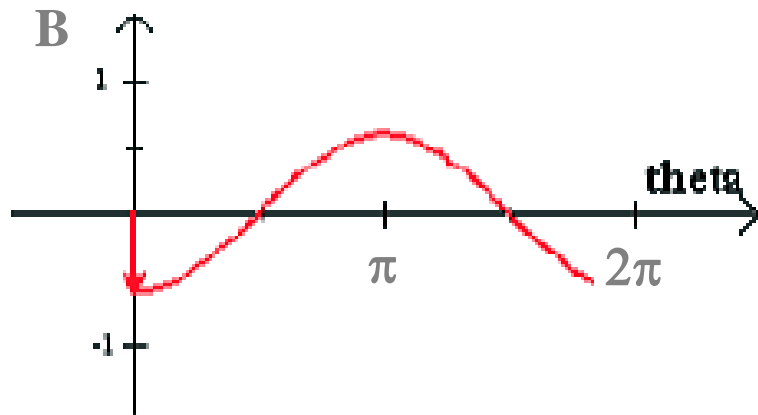
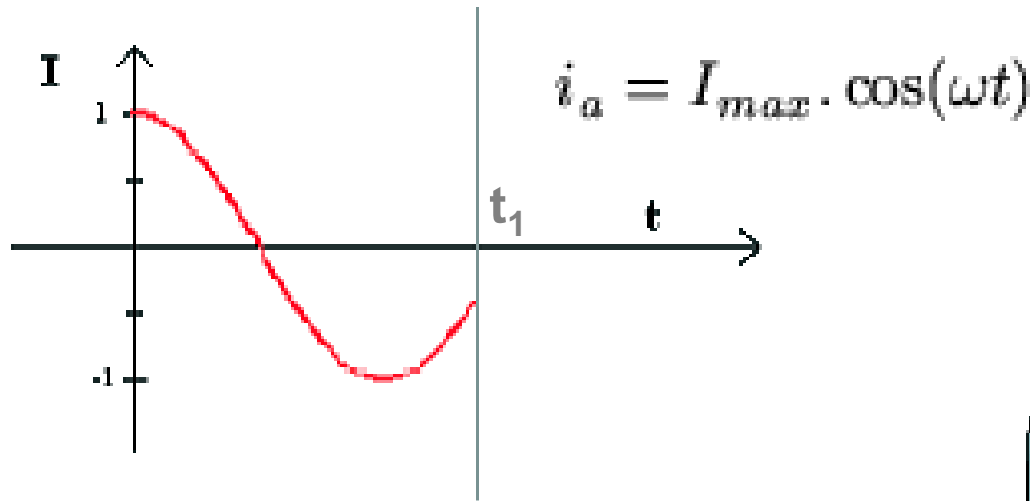
Champ d'entrefer créé par un courant circulant dans l'enroulement 'a'

On considère un enroulement assurant la répartition sinusoidale du champ dans l'entrefer.

$$B_{e,a} = K \cdot i_a \cdot \cos(\theta - \theta_a)$$



Champ d'entrefer créé par un courant circulant dans l'enroulement 'a'



$$B_{e,a} = K \cdot I_{max} \cdot \cos(\theta - \theta_a) \cdot \cos(\omega t)$$

Cas de trois enroulements, décalés spatialement de 120°

$$B_{e,a} = K.i_a \cdot \cos \theta$$

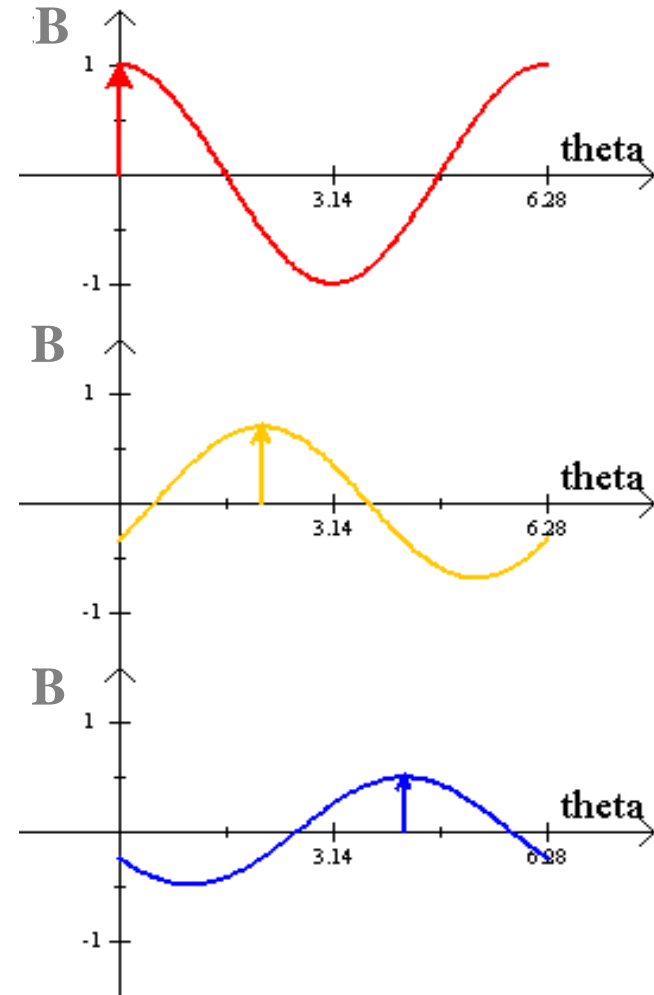
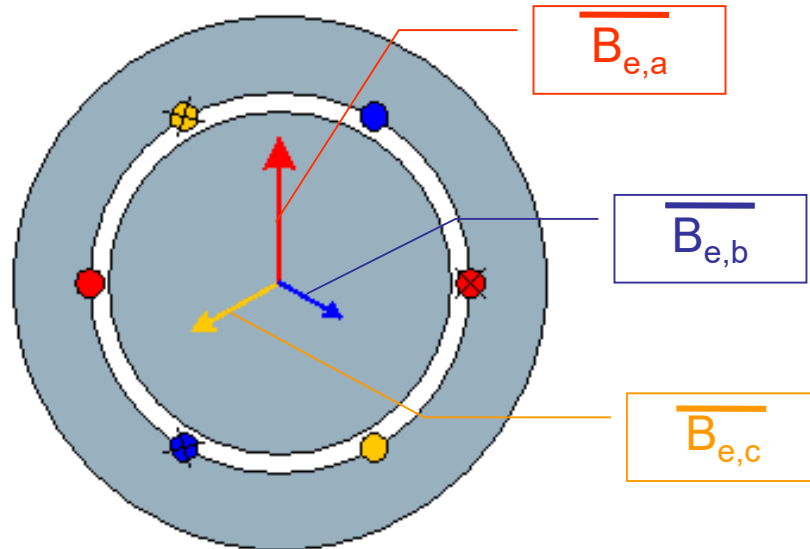
$$(\theta_a = 0)$$

$$B_{e,b} = K.i_b \cdot \cos(\theta - 2\pi/3)$$

$$(\theta_b = 2\pi/3)$$

$$B_{e,c} = K.i_c \cdot \cos(\theta - 4\pi/3)$$

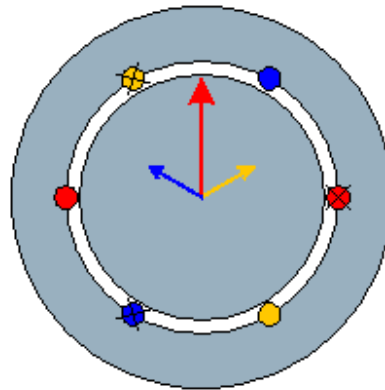
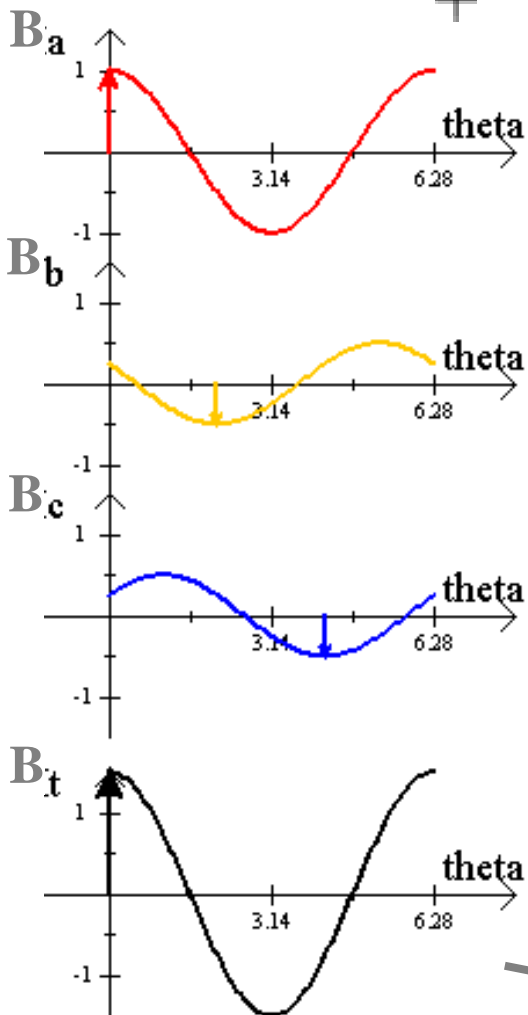
$$(\theta_c = 4\pi/3)$$



$B_{e,a}$, $B_{e,b}$, $B_{e,c}$: orientation constante et norme variable

Représentation du champ total d'entrefer résultant

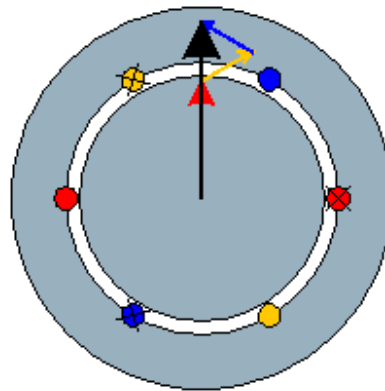
$$\begin{aligned}\bar{B}_e &= \bar{B}_{e,a} + \bar{B}_{e,b} + \bar{B}_{e,c} \\ &= K \cdot I_{max} [\cos \theta \cdot \cos \omega t + \cos(\theta - 2\pi/3) \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ &\quad + \cos(\theta - 4\pi/3) \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3)]\end{aligned}$$



θ - variable

t - constant ($t = t_c$)

Le vecteur du champ total d'entrefer est de norme constante mais d'orientation variable

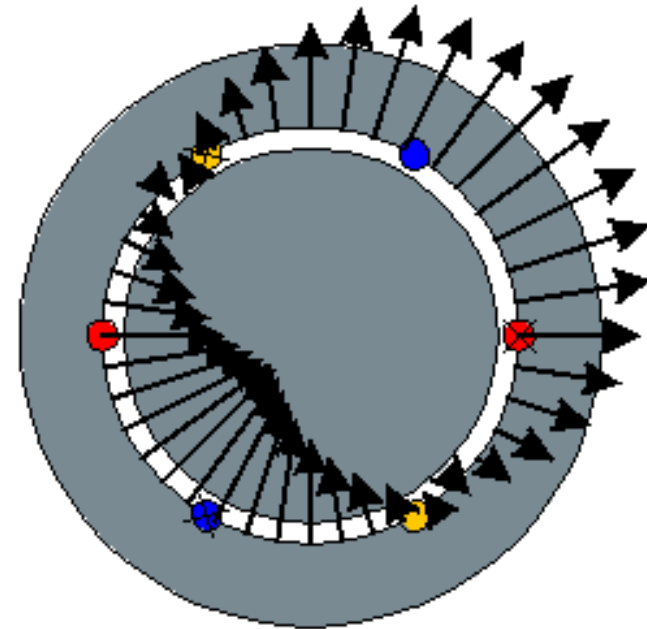
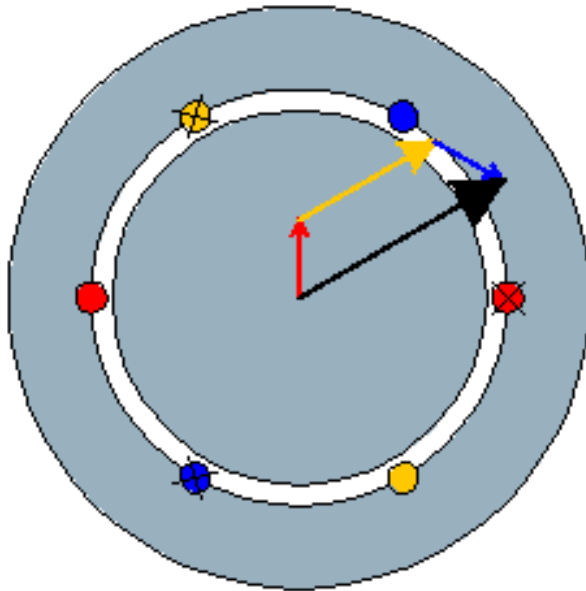


$$B_{max} = \frac{3K \cdot I_{max}}{2}$$

$$B_e = \frac{3K \cdot I_{max}}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

Représentation du champ total d'entrefer résultant

Le champ tournant est créé par trois enroulements décalés spatialement de 120° l'un par rapport à l'autre et alimentés par des courants sinusoïdaux de même pulsation, de même amplitude et déphasés temporellement de 120° les uns par rapport aux autres.





Principe de fonctionnement d'une machine synchrone 13



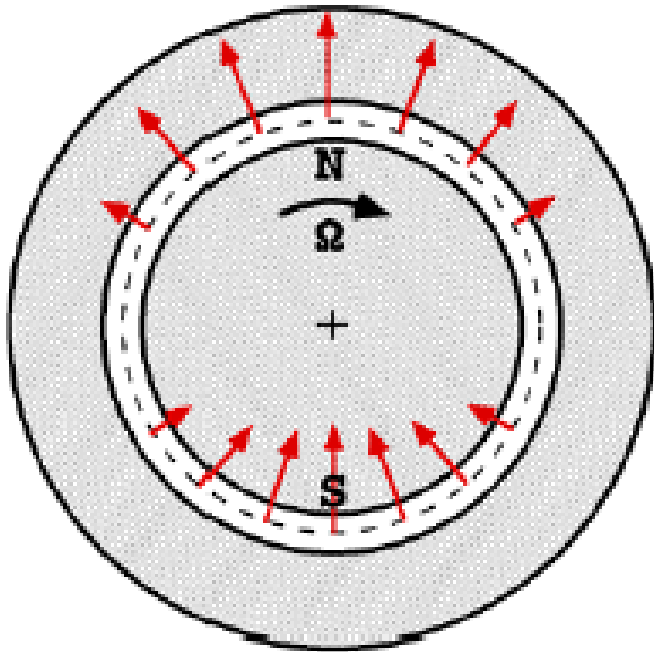
Principe de fonctionnement d'une machine synchrone 14

Synchronisme

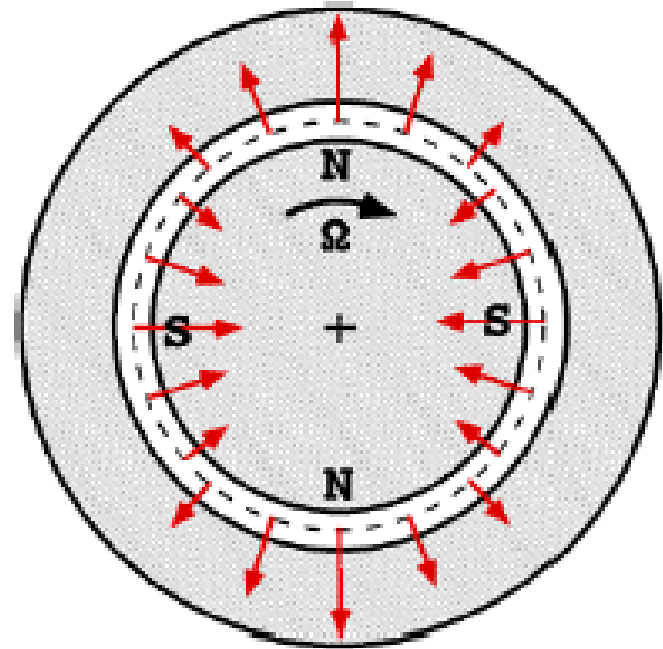
Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor.

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

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



bipolaire ($p = 1$)

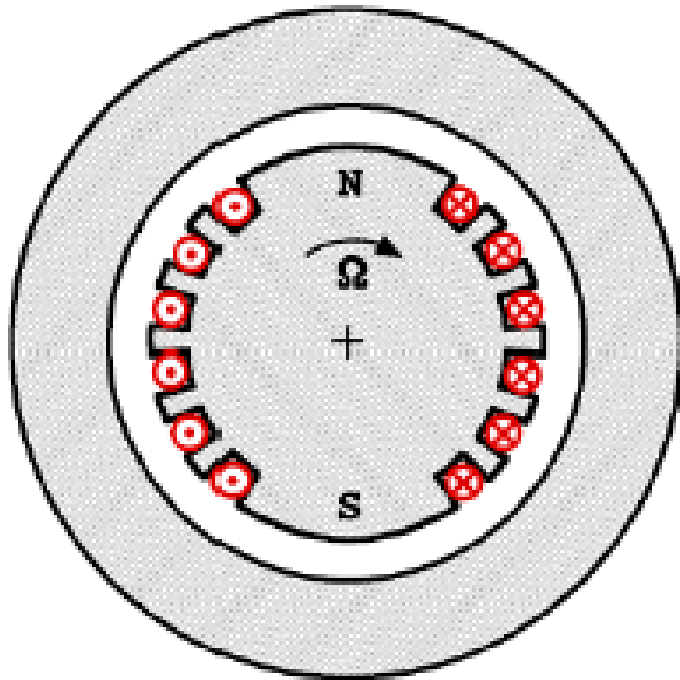


tétrapolaire ou quadripolaire ($p = 2$)

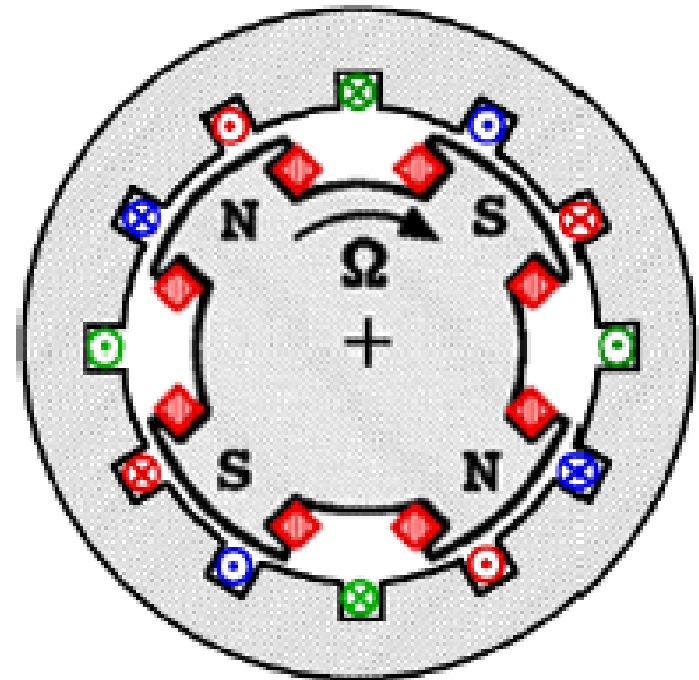
Remarque :

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

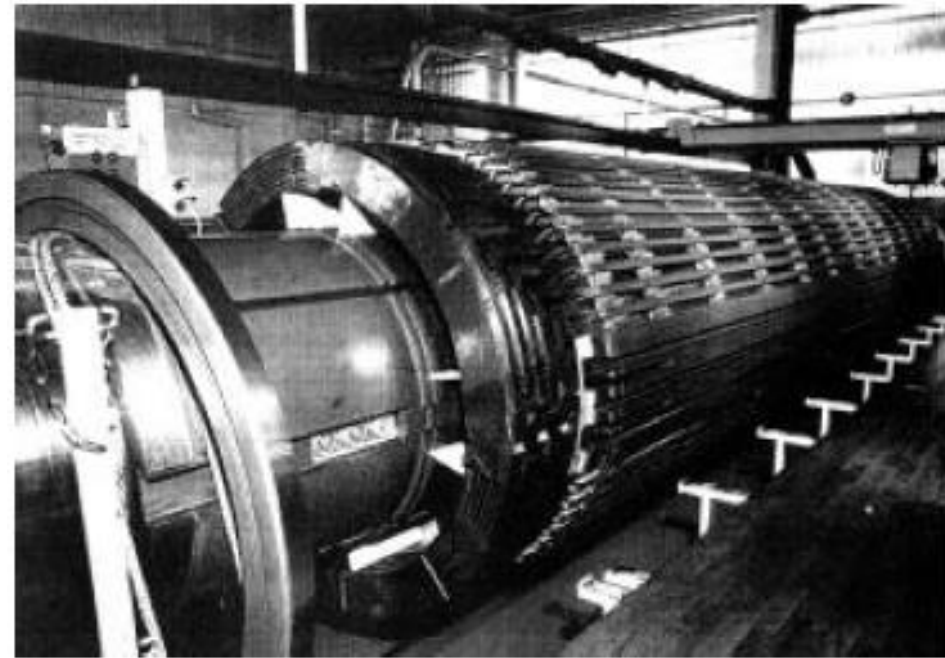
Types de machines synchrones en fonction du rotor



Machine à pôles lisses



Machine à pôles saillants



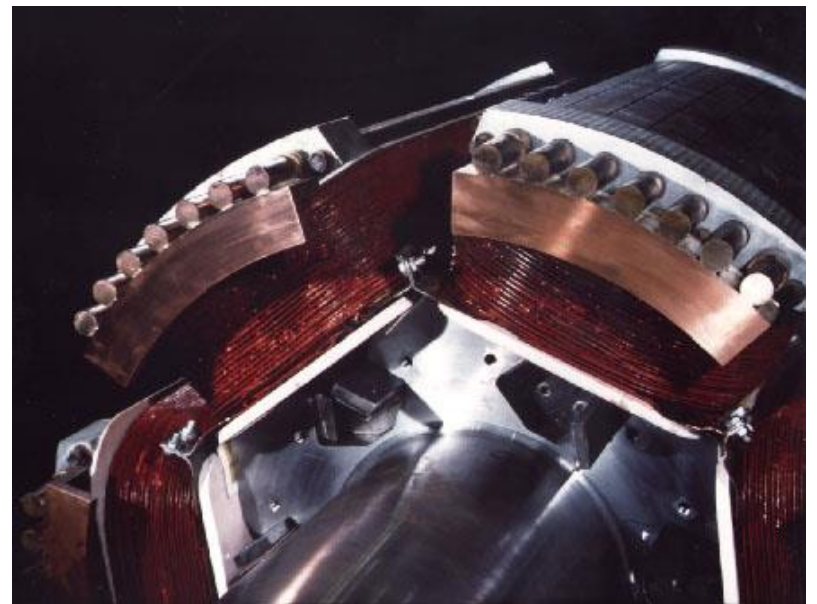
Rotor à pôles lisses



Rotor à pôles saillants



Rotor à aimants

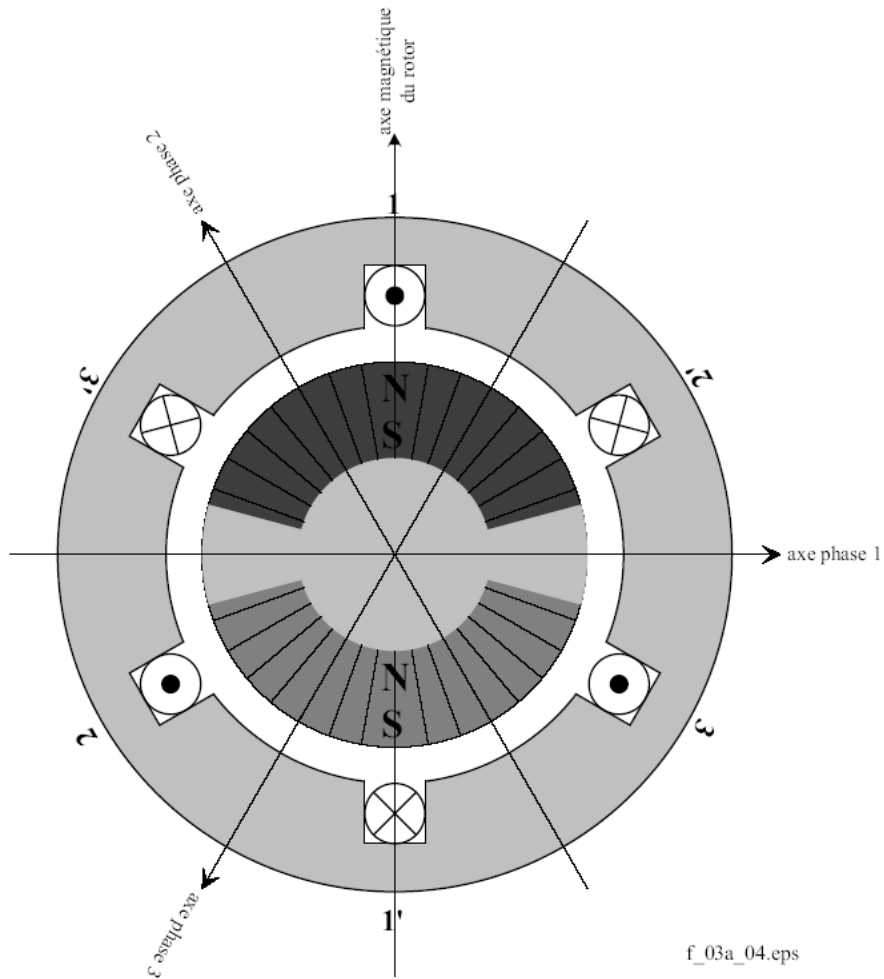


Les aimants permanents

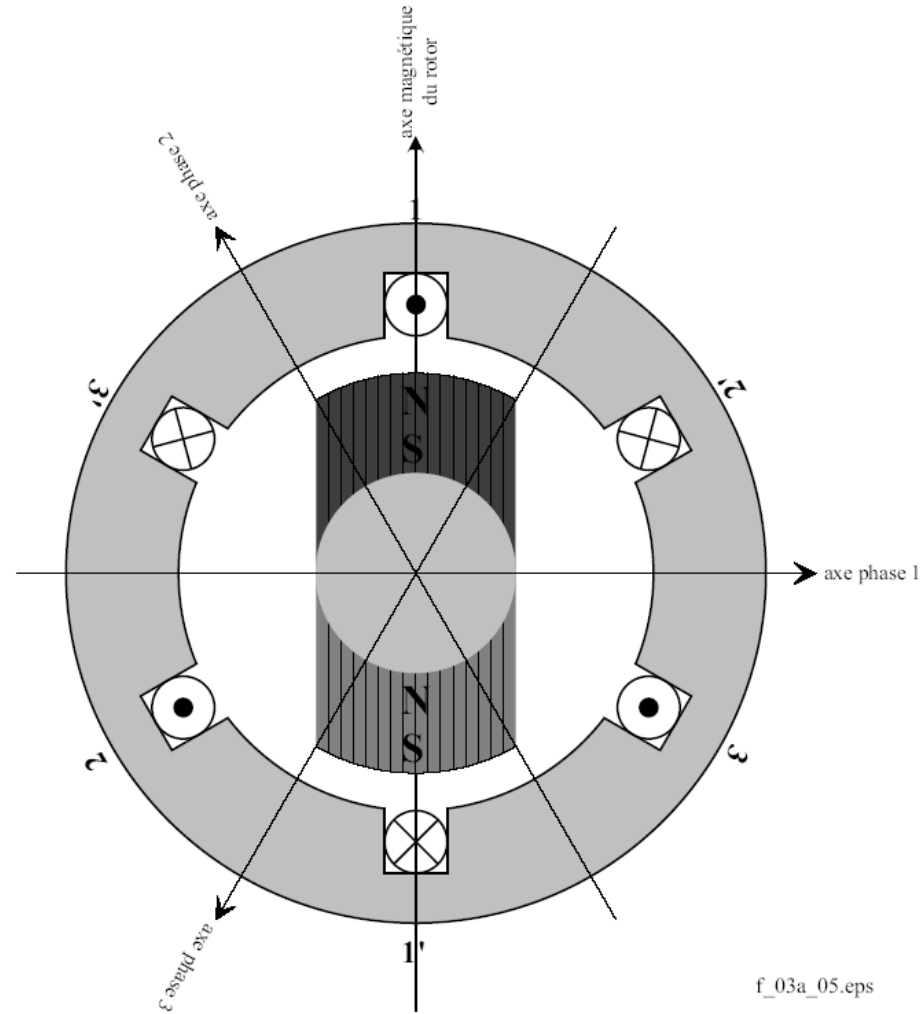
Les matériaux principaux pour les aimants permanents sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres).

- la ferrite, dont le champ rémanent B_r est de 0.25 à 0.4 [T]. Ce matériau est économique mais son usinage est difficile ;
- le Samarium Cobalt (SmCo), pour lequel B_r vaut de 0.9 à 1.15 [T]. Il s'agit d'un matériau stable thermiquement mais relativement coûteux ;
- le Neodyme Fer Bore (NdFeB), avec $B_r = 0.8 \dots 1.25$ [T], légèrement plus économique que le SmCo. Il est cependant sensible à la corrosion et relativement peu stable en fonction de la température.

Disposition des aimants



Magnétisation radiale



Magnétisation parallèle

Modes de fonctionnement

La machine synchrone est réversible.

1. Fonctionnement en moteur

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

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 $\omega = p.\Omega_s$.

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

Utilisations des machines synchrones

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 .

Inconvénients

Un moteur auxiliaire de démarrage est parfois 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.

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).

Moteurs

- 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, programmateur, 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.

Alternateurs

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

Exemple : centrale de Grand-Maison en Isère

Vitesse de synchronisme : 428,6 tr.mn-1 ($p=7$)

Puissance active nominale : 153 MW

Tension nominale : 15,5 kV

Intensité nominale : 6333 A

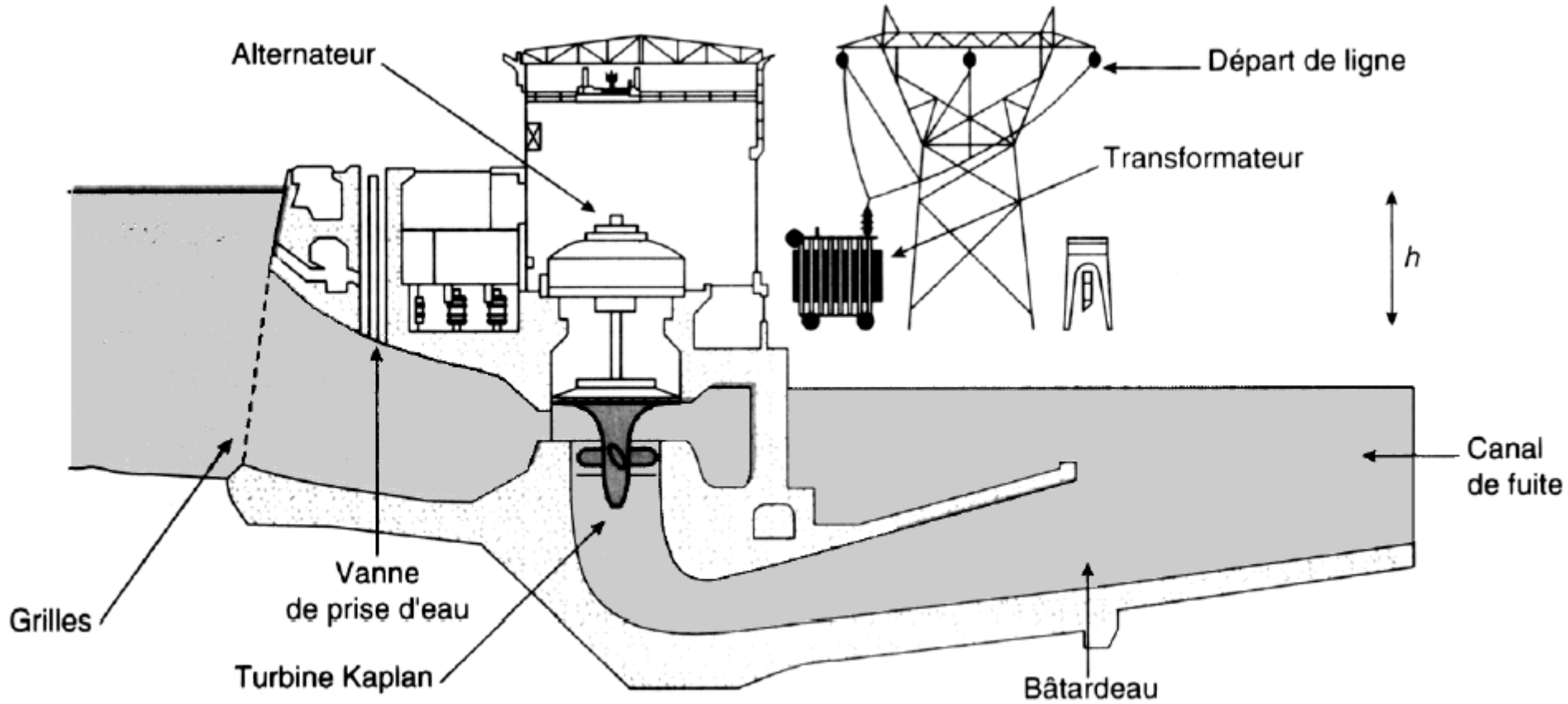
Masse du rotor : 235 t

Masse du stator : 166 t

Puissance d'excitation : 323 kW

Rendement en régime nominal : 98,5%

Centrale de Rhinau sur le Rhin



La centrale comporte quatre alternateurs de 42000 kVA chacun. Vitesse: 75 tr/min avec turbines Kaplan à axe vertical, Débit d'eau: 350 m³/s.

Fonctionnement en alternateur

Excitation

Pour que le rotor crée un champ magnétique tournant, on peut disposer des **aimants permanents** qui ne permettent pas un champ magnétique très important, ou bien disposer d'**électroaimants**.

Dans ce cas il faut fournir un courant continu au rotor (inducteur) soit par l'intermédiaire de balais (même principe que dans la MCC) soit en prélevant une partie de la tension d'induit, qui, après redressement alimente l'inducteur (on parle alors d'**alternateur auto excité**).

Fonctionnement à vide

On raisonne sur un enroulement.

Le courant statorique fourni est : $I = 0$

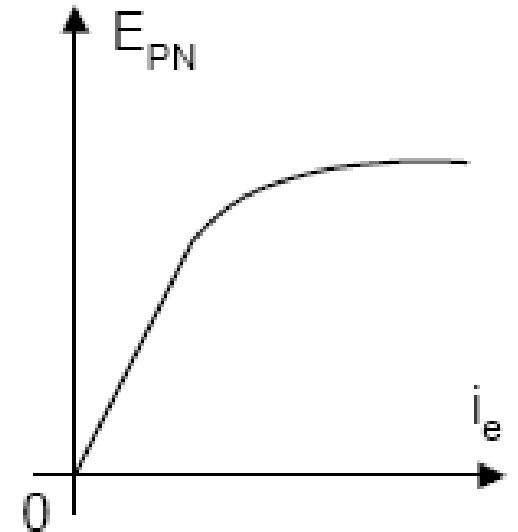
La tension aux bornes d'un enroulement est

$$V_0 = E_{PN} = E.$$

On peut relever la courbe E_{PN} en fonction du courant d'excitation i_e .

Dans la zone utile : E_{PN} est proportionnel à i_e .

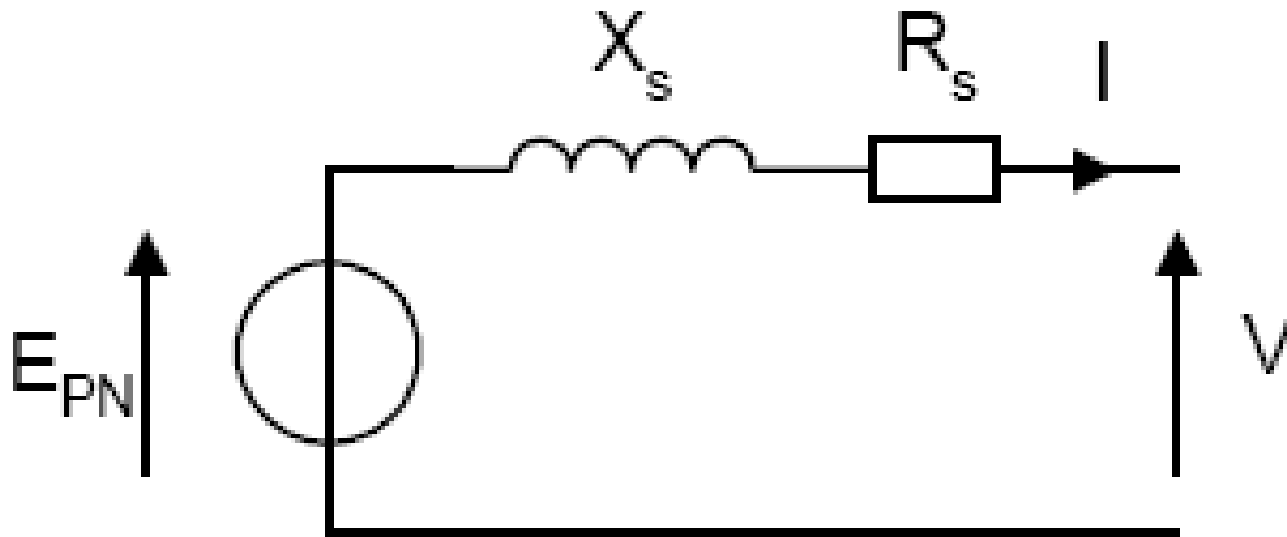
Le seul réglage possible de l'alternateur est d'agir sur i_e .



E_{PN} est la tension
entre phase et neutre
($E_{PP} = E_{PN} \cdot \sqrt{3}$)

Modèle équivalent d'une phase de l'induit (stator)

Ce modèle est celui de l'alternateur monophasé ou bien celui d'une phase de l'alternateur triphasé.



E_{PN} : fem à vide (fem synchrone)

$X_s = L_s \omega$: réactance synchrone (en Ω)

R_s : résistance d'un enroulement du stator

I : intensité efficace du courant dans un enroulement.

V : tension efficace (simple) aux bornes d'un enroulement.

Obtention des éléments du modèle

$E_{PN} = V_0$ (essai à vide pour la valeur $i_e = i_e^*$)

$Z_s = E_{PN} / I_{cc}$ (essai en court-circuit pour la valeur $i_e = i_e^*$)

R_s mesurée directement si la plaque à bornes est accessible
ou $R_s = R_a / 2$ en étoile et $R_s = 3R_a / 2$ en triangle.

R_a est la résistance apparente mesurée entre 2 bornes de phase de l'alternateur couplé.

$$X_s = \sqrt{(Z_s^2 - R_s^2)}$$

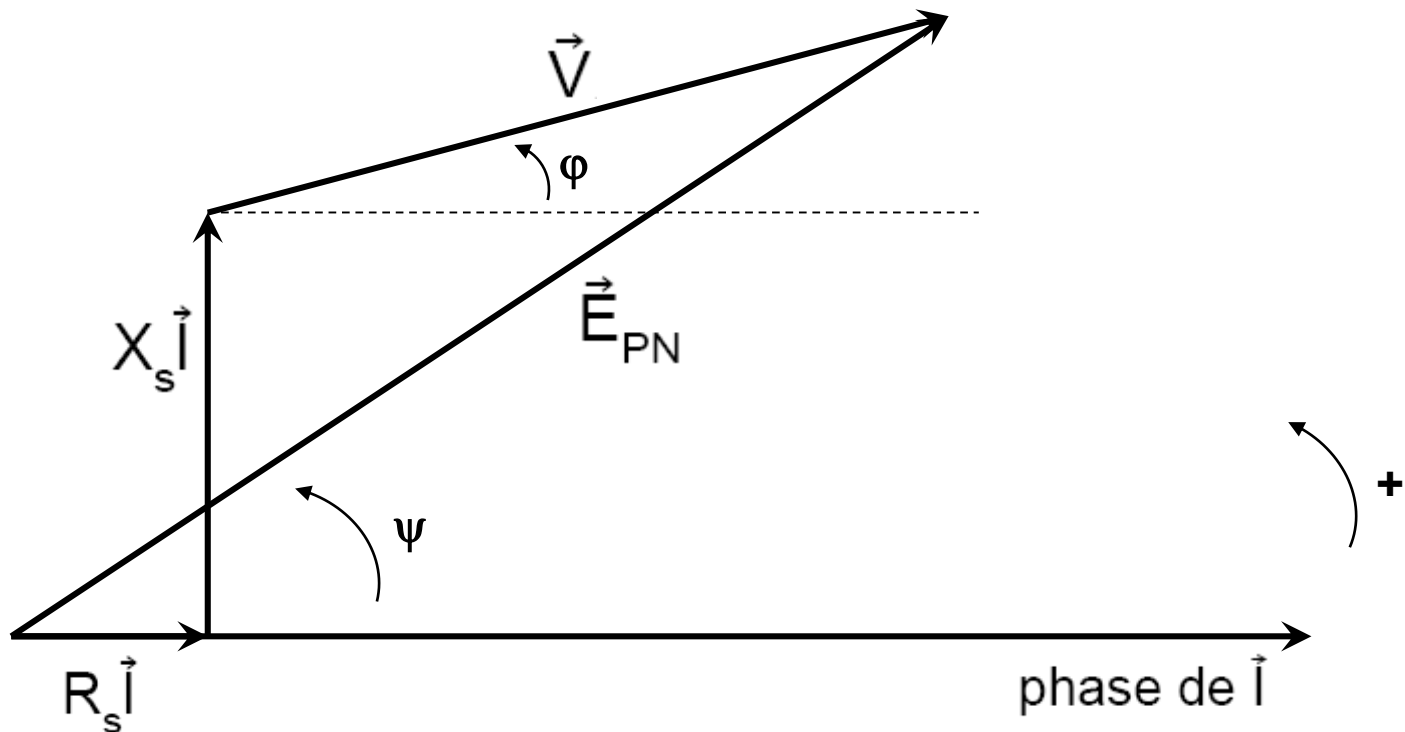
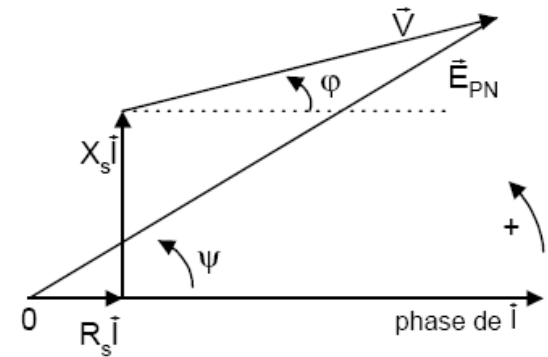
Diagramme synchrone d'une phase du stator

Le modèle précédent permet d'écrire la relation vectorielle :

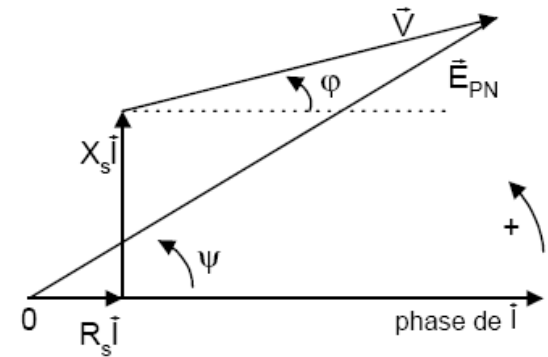
$$\vec{E}_{PN} = \vec{V} + R_s \cdot \vec{I} + X_s \cdot \vec{I}$$

On utilise un diagramme de Fresnel dit diagramme synchrone pour représenter ces vecteurs et rechercher celui qui est inconnu. On recherche V ou plus souvent E_{PN} pour déduire le courant d'excitation i_e à appliquer au rotor.

Etapes de construction du diagramme de Fresnel



Remarques

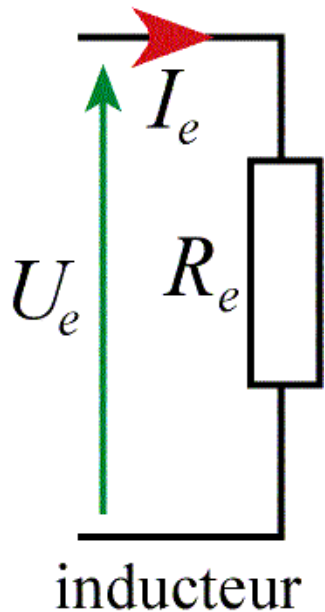


ϕ est le déphasage entre I et V , imposé par la charge (par son facteur de puissance $\cos\phi$).

ψ est le déphasage entre I et E_{PN} , il est appelé *angle de décalage interne* de l'alternateur.

R_s est souvent très faible devant X_s , dans ce cas on ne le dessinera pas sur le diagramme de Fresnel.

Modèle de l'enroulement de l'inducteur (rotor)



I_e : courant d'excitation (A)

U_e : tension d'excitation (V)

R_e : résistance de l'enroulement (Ω)

L'inducteur est équivalent à une résistance.

Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

$$P_e = U_e I_e = R_e I_e^2 = p_{je}$$

Bilan énergétique de l'alternateur

Puissance absorbée

L'alternateur est une machine entraînée (par une turbine par exemple).

Il absorbe donc une puissance P_a sous forme mécanique :

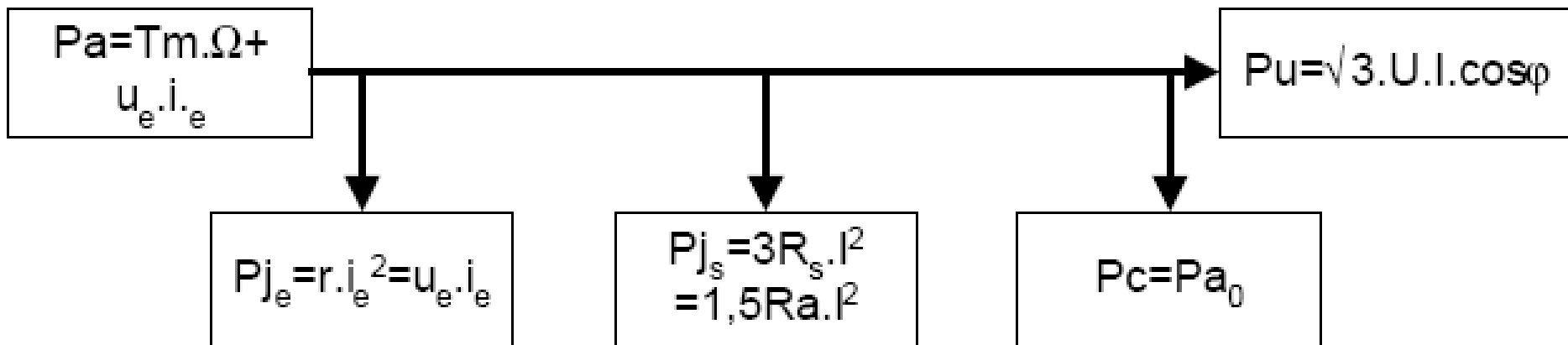
$$P_a = P_m = T_m \cdot \Omega$$

T_m est le moment du couple mécanique et Ω la fréquence de rotation en rad/s.

Puissance utile

L'alternateur fournit de la puissance utile électrique P_u qui dépend de la charge qui y est connectée (influence du $\cos\phi$).

Dans le cas de l'alternateur triphasé on a : $P_u = \sqrt{3}.U.I.\cos\phi$



Pertes

- pertes par effet joules (en watts !)
 - dans l'inducteur (rotor) : $P_{je} = r \cdot i_e^2 = u_e \cdot i_e$
 - dans l'induit (stator) : $P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_2^2 = 1,5 \cdot R_a \cdot I_2^2$
- pertes constantes

Ce sont les pertes magnétiques et mécaniques indépendantes de la charge. On peut les déterminer par un essai à vide.

Rendement

$$\eta = P_u / P_a$$

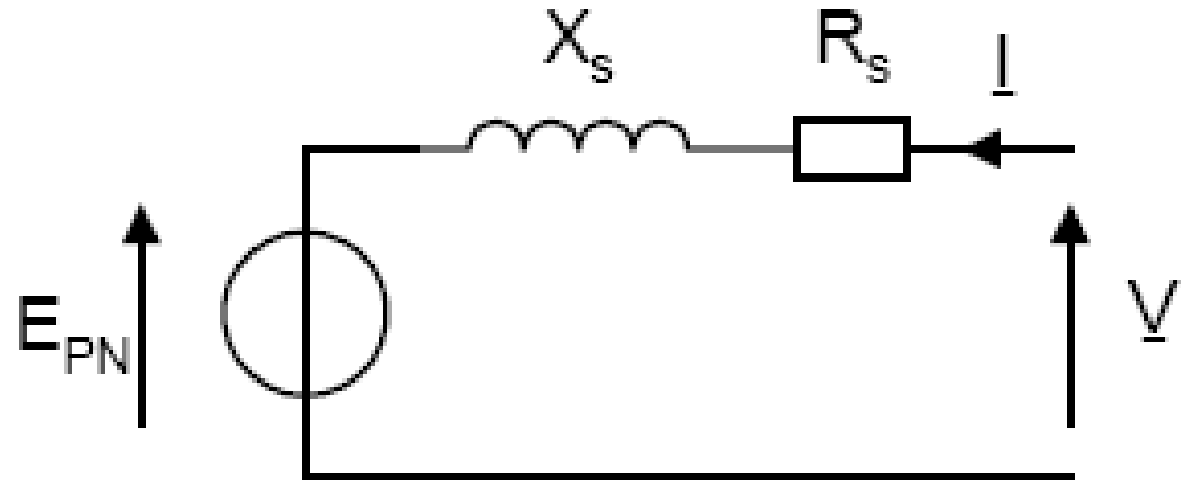
Réversibilité de l'alternateur

Il est possible de coupler une machine synchrone sur le réseau pour la faire fonctionner en moteur synchrone.

Il faut au préalable la faire fonctionner en alternateur de sorte que le système de tension produit soit adapté au réseau sur lequel on doit la coupler (fréquence et tension).

Dans le schéma équivalent d'une phase du moteur synchrone il n'y a que le sens de I qui change, c'est un moteur.

Schéma équivalent d'une phase du moteur synchrone



On a maintenant : $\vec{E}_{PN} = \vec{V} - R_s \cdot \vec{I} - X_s \cdot \vec{I}$

Les pertes restent identiques à celles de l'alternateur, mais on a :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi \quad \text{et} \quad P_u = T_m \cdot \Omega$$

Expression du couple

Il est possible d'établir une première expression du couple en réalisant un bilan des puissances au niveau de la machine. Si l'on néglige toutes les pertes, on peut écrire :

$$P_{\text{électrique}} = P_{\text{mécanique}} = T_m \cdot \Omega_S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos\psi$$

Il est possible d'en déduire que la f.e.m. E est de la forme :

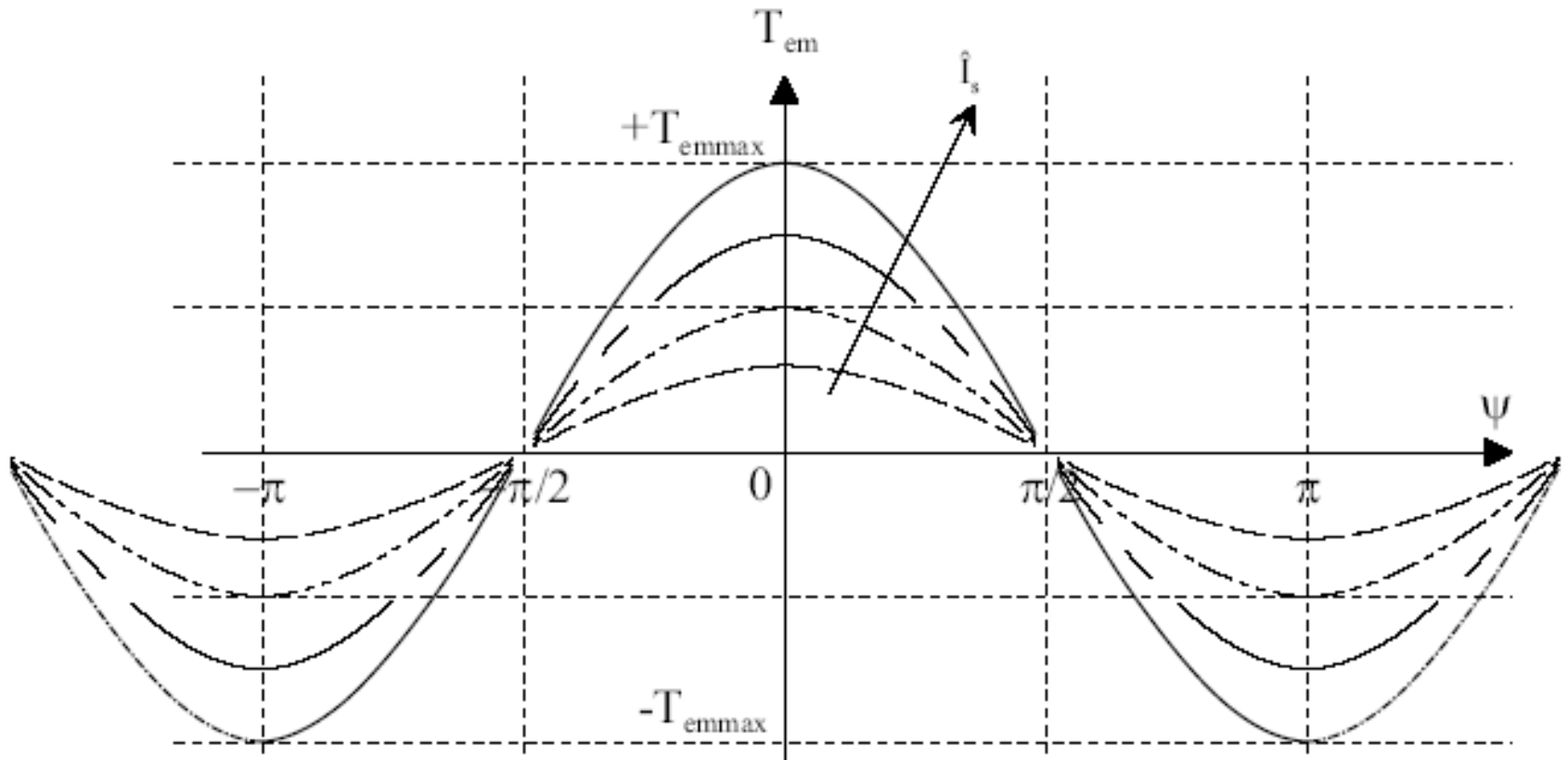
$$E = K_e \cdot \phi_r \cdot \Omega_S$$

Il apparaît alors que le couple est directement proportionnel au courant dans les phases de la machine ainsi qu'au cosinus de l'angle ψ :

$$T_m \cdot \Omega_S = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos\psi = 3 \cdot K_e \cdot \phi_r \cdot \Omega_S \cdot I \cdot \cos\psi$$

Un bon contrôle du couple lors de la commande d'une machine synchrone passera donc par un contrôle de l'angle ψ .

Lorsque le FEM et le courant sont en phase ou en opposition de phase le couple est maximum (en module)



Couple électromagnétique T_{em} en fonction du déphasage Ψ entre la FEM $e_{mi}(t)$ et le courant $i_{si}(t)$ d'une même phase.

Fonctionnement dans les quatre quadrants

Une des particularités de la machine synchrone est sa capacité à fonctionner dans les quatre quadrants électriques.

Il est en effet possible de rendre à volonté la machine inductive ou capacitive, que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur.

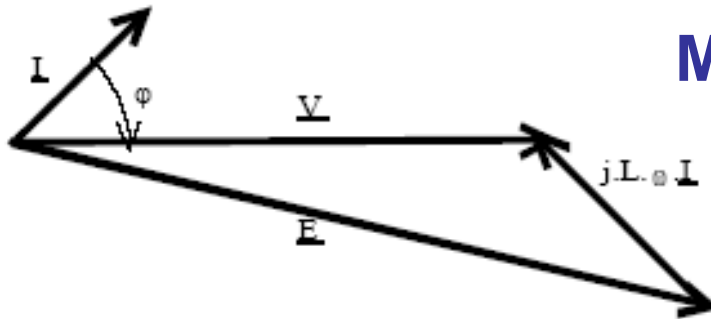
Il suffit pour cela de jouer sur l'amplitude de E , c'est à dire sur le courant d'excitation rotorique.

On obtient alors les diagrammes de Behn-Eschenbourg suivants :

Diagrammes de Behn-Eschenbourg

II

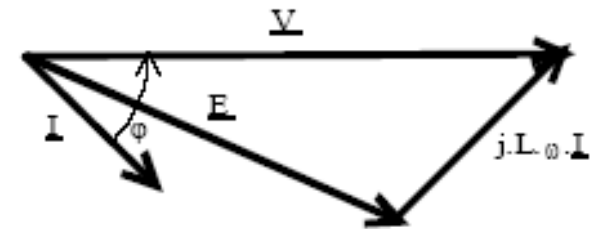
$$\begin{cases} P > 0 \\ Q < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi > 0 \\ \sin \varphi < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0 \right]$$



Moteur

I

$$\begin{cases} P > 0 \\ Q > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi > 0 \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right]$$



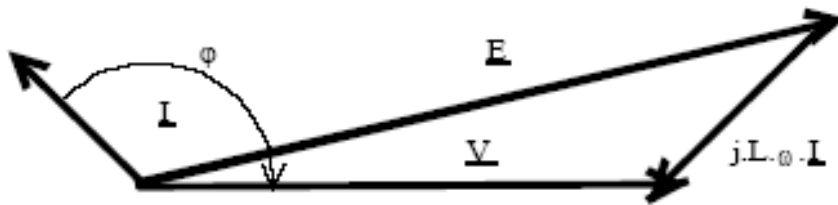
Q: Puissance réactive

Inductif

Capacitif

III

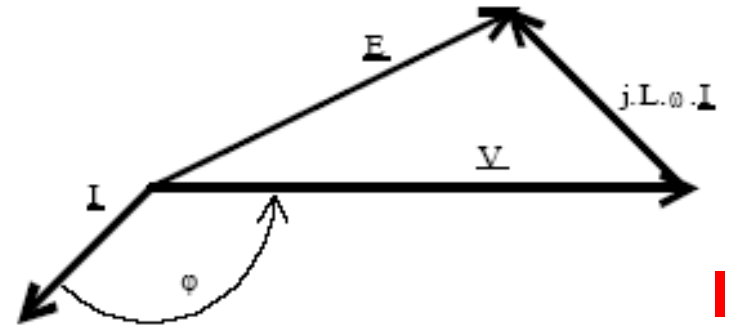
$$\begin{cases} P < 0 \\ Q < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi < 0 \\ \sin \varphi < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2} \right]$$



Alternateur

IV

$$\begin{cases} P < 0 \\ Q > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi < 0 \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right]$$



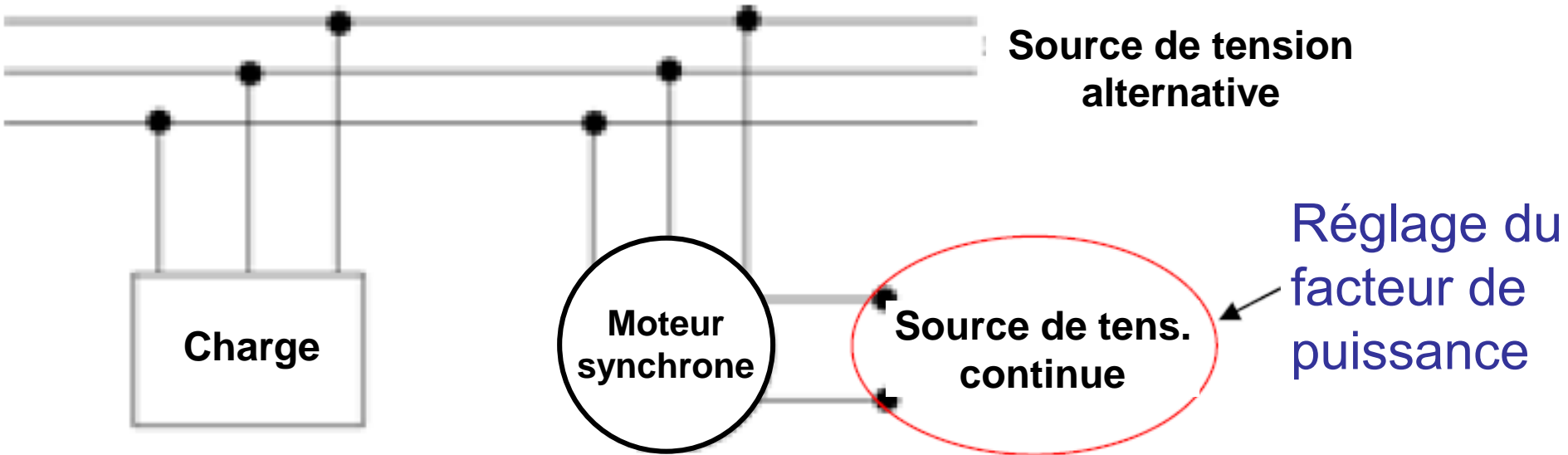
Utilisation d'une machine synchrone en compensateur synchrone

On appelle **compensateur synchrone** une machine synchrone tournant à vide dont la seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau.

C'est en ajustant le courant d'excitation qu'il est possible de fournir de l'énergie réactive (la machine est **surexcitée**) ou de consommer de l'énergie (si la machine est **sousexcitée**).

De telles machines sont utilisées notamment pour fournir de l'énergie réactive lorsque le réseau est chargé, et pour absorber l'énergie réactive générée par les lignes lorsque la consommation est faible.

Le compensateur synchrone peut corriger le facteur de puissance des installations => diminution de la facture d'électricité!



Il est aussi possible de régler (par l'alimentation du rotor) le facteur de puissance du moteur synchrone de façon à le rendre unitaire. Les moteurs synchrones possèdent donc un bon facteur de puissance.

Démarrage

Le démarrage de la machine synchrone est problématique si l'on ne dispose pas d'une alimentation à fréquence variable.

Si la fréquence de l'alimentation $f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$ fait un saut brusque de 0 à 50 [Hz], comme par exemple lors d'un enclenchement (exemple à ne pas suivre !) sur le réseau, le moteur ne parvient pas à démarrer et décroche.

Son inertie et celle de sa charge l'empêche d'atteindre assez rapidement la vitesse de synchronisme.

Il est donc nécessaire de prévoir des dispositifs particuliers pour le démarrage: **l'onduleur triphasé**, alimentation permettant de créer un système de tensions et courants triphasés d'amplitudes U_s , I_s et de fréquence f_s variables.

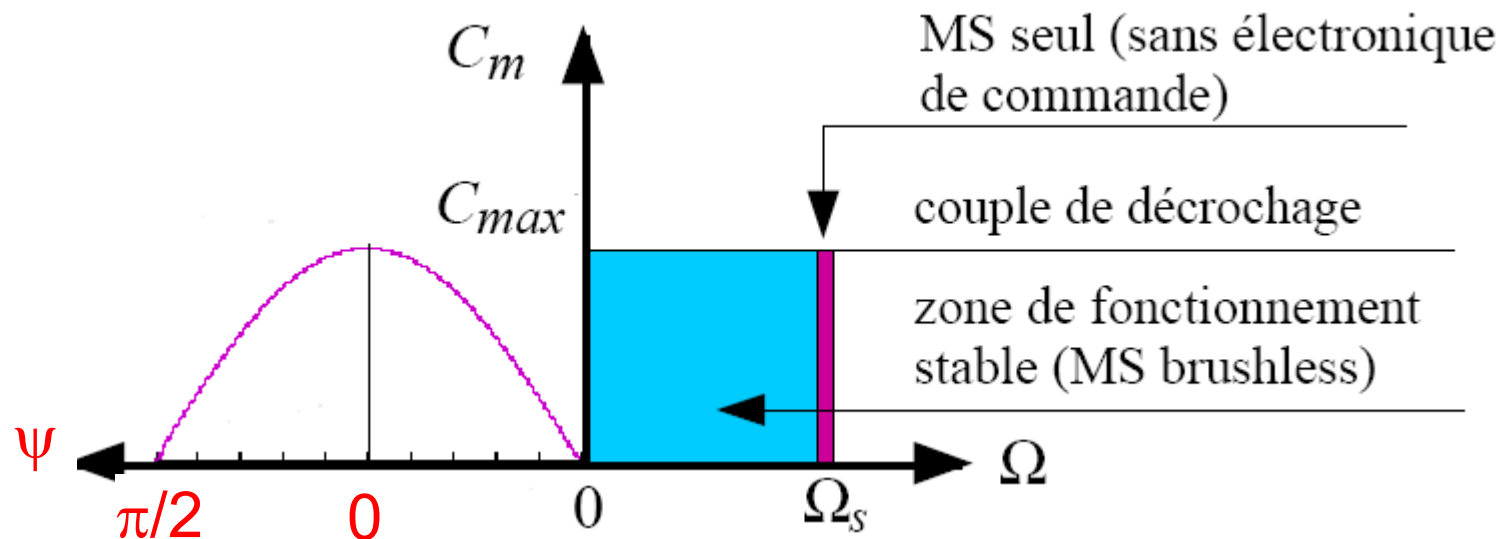
Fonctionnement statique

La caractéristique statique mécanique d'un MS (sans électronique de commande) se réduit à un segment de droite, pour

$$\Omega = \Omega_s = \text{cte.}$$

Si la fréquence du réseau est fixe, un moteur synchrone ne peut démarrer seul.

Avec un variateur électronique, démarrage possible à l'intérieur de la zone de fonctionnement.



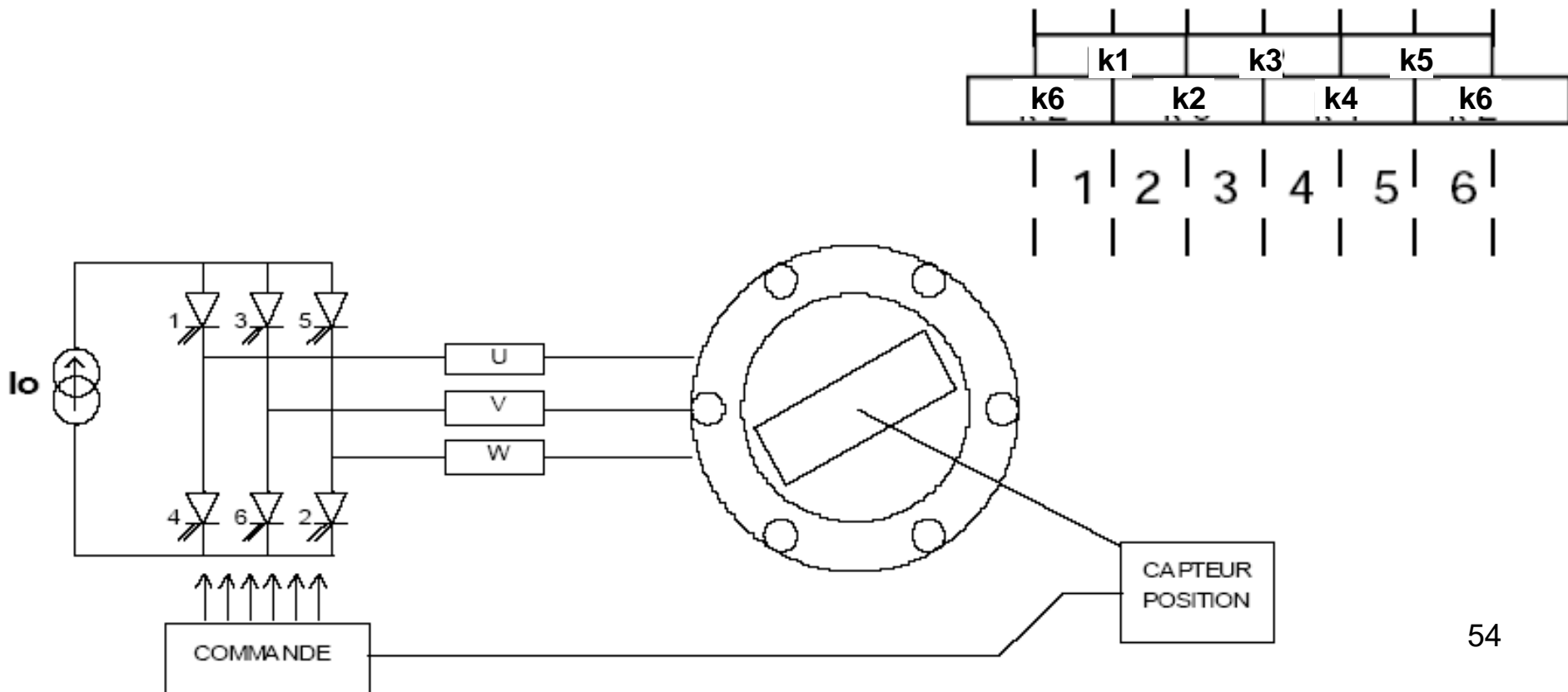
Exemples d'alimentations d'un moteur synchrone brushless

Machines brushless

Le terme machine **brushless** regroupe l'ensemble des machines synchrones autopilotées associées à leur commande. Le terme «brushless» (sans balais) vient du fait qu'une partie de ces machines ont un comportement identique à une machine à courant continu, le convertisseur de puissance jouant le rôle de collecteur électronique.

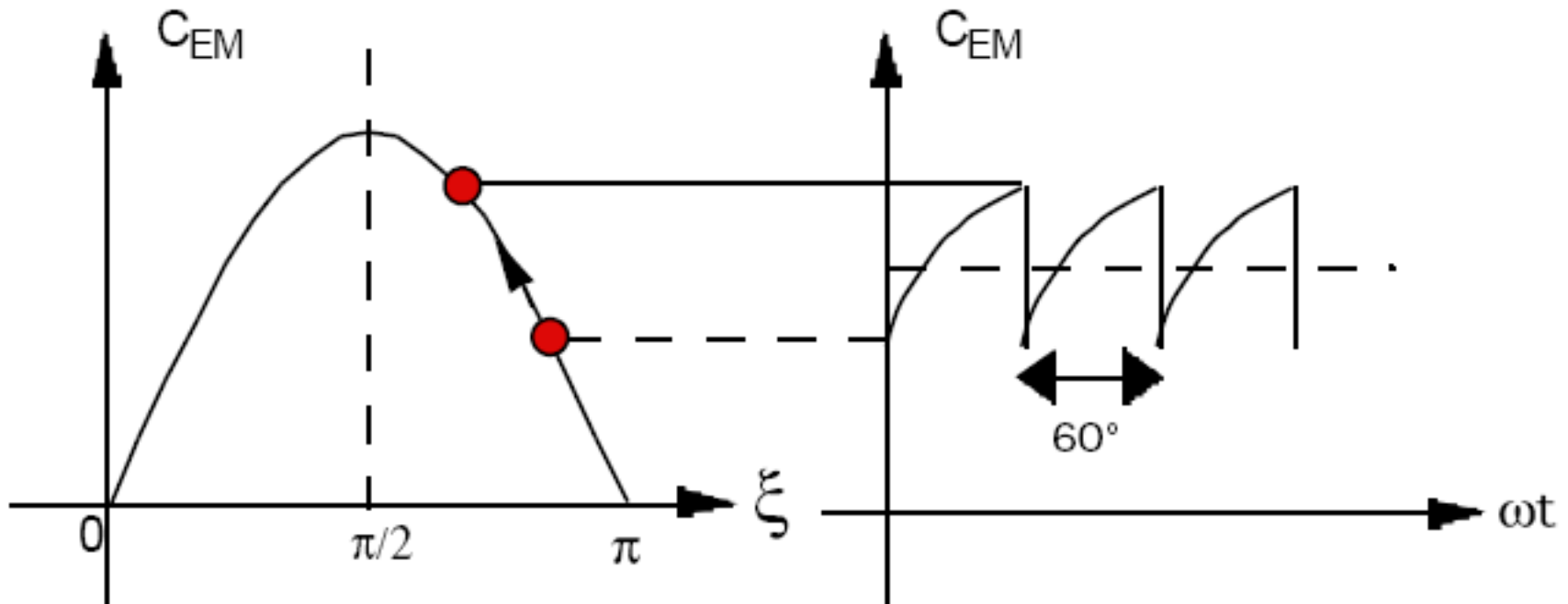
Alimentation par commutateur de courant

Surtout utilisée en forte puissance (jusqu'à plusieurs centaines de MW), la machine est alimentée par une source de courant, les interrupteurs statiques ayant pour rôle 'd'aiguiller' le courant vers les bonnes phases, et ceci en fonction de la position du rotor.



$$C_{EM} = k \cdot H_s \cdot H_r \sin \xi$$

=> Ondulation importante du couple électromagnétique



Pour passer de la séquence 1 à la séquence 2, il faut attendre que le rotor ait tourné de 60°

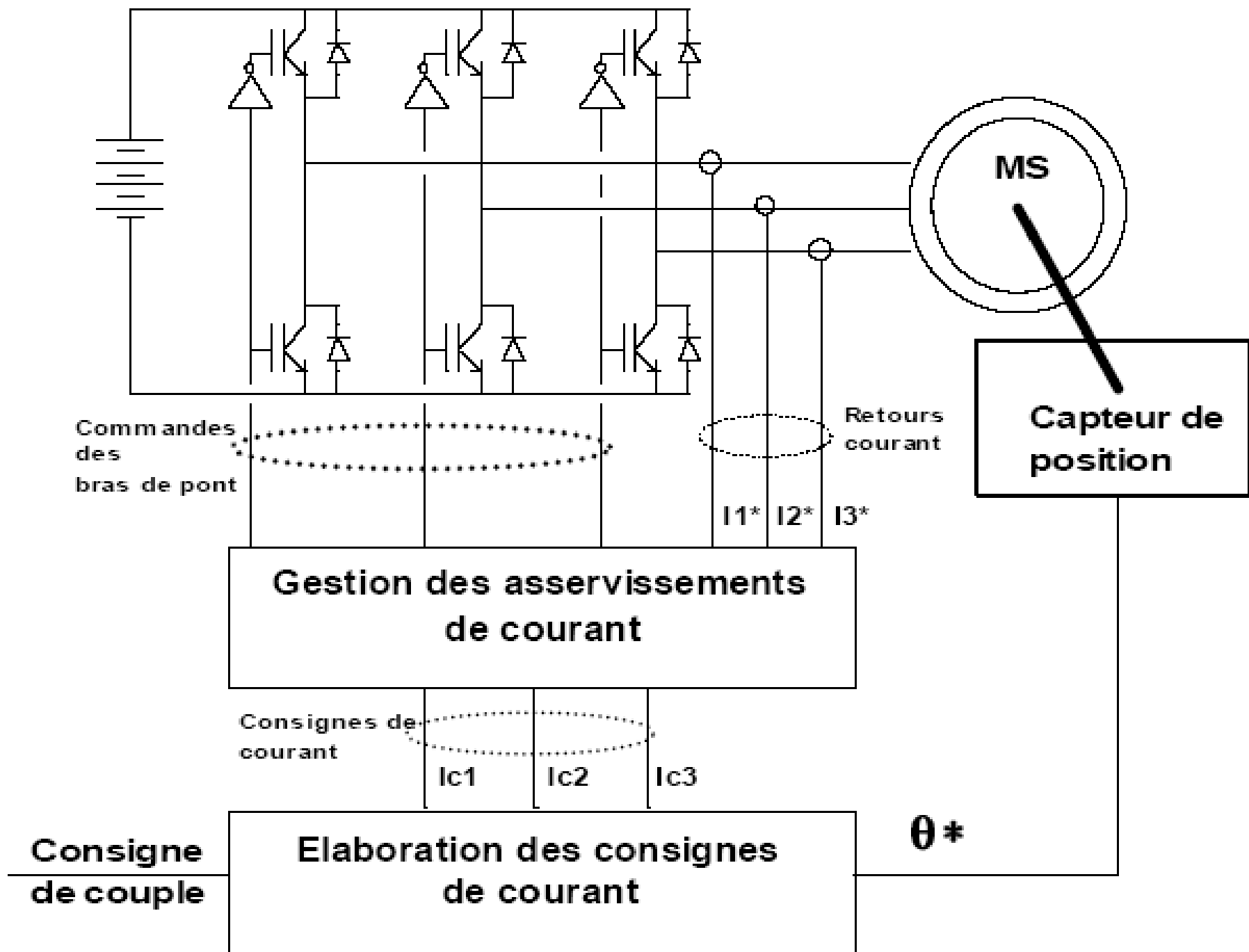
=> principe de l'autopilotage de la machine

Commande scalaire en courant

Le principe de la commande scalaire en courant est assez proche de celui de l'alimentation par commutateur de courant.

Au lieu d'utiliser une source de courant continu qui ne peut injecter dans les phases de la machine que des créneaux de courant, on utilise une source de tension alimentant un onduleur triphasé, le courant de sortie de chaque bras étant asservi à une consigne fournie par la commande.

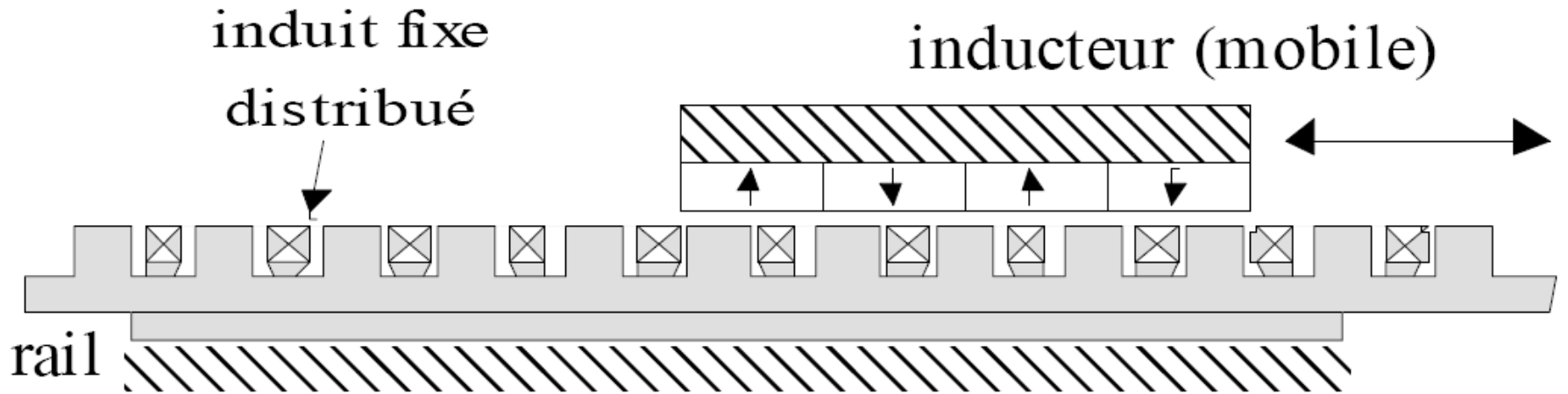
L'ensemble de la motorisation peut être représenté sous la forme suivante :



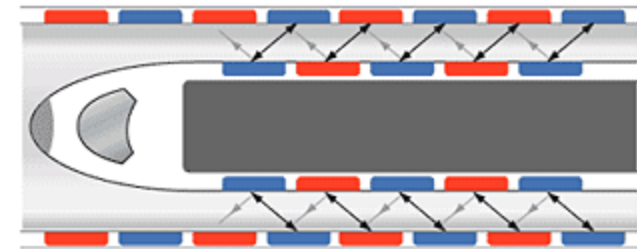
Commande vectorielle

- Utilisée afin d'améliorer les performances en régime dynamique.
- Les courants injectés dans la machine ne sont pas directement contrôlés comme dans la commande scalaire, mais la commande calcule des grandeurs intermédiaires images de la projection du champ statorique sur l'axe du champ rotorique et sur un axe perpendiculaire au champ rotorique.
- Le contrôle de ces grandeurs permet un contrôle fin de la position du champ magnétique statorique, notamment en régime transitoire.
- La structure d'une telle commande est particulièrement complexe,

Le moteur linéaire



MagLev – Magnetic Levitation



Bibliographie

J.M. ESCANÉ, P. BASTARD : Réseaux électriques linéaires - Systèmes triphasés

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : D80

Bases documentaires : Convertisseurs et machines électriques

Jacques SAINT-MICHEL : Bobinage des machines tournantes à courant alternatif

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : D3420

Bases documentaires : Convertisseurs et machines électriques

H. BEN AHMED, N. BERNARD,... : Machines synchrones - Principes généraux et structures

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : D3520

Bases documentaires : Convertisseurs et machines électriques