

Généralités

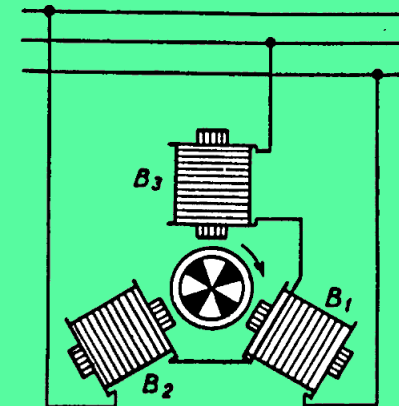
Les machines à courants alternatifs ont en commun un stator comportant un circuit magnétique recevant un ensemble de trois bobines alimentées par des courants triphasés. Leurs axes étant disposés radialement avec un écart angulaire de 120° , elles génèrent un champ tournant, c'est-à-dire un champ présentant une induction d'amplitude constante et de direction tournante à vitesse uniforme dite « de synchronisme » :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \text{ d'où la fréquence : } f = pN \text{ avec } N \text{ en tr/s,}$$

ω est la pulsation des courants triphasés et p le nombre de paires de pôles de chaque bobine.

Exemple de valeurs :

nbre. de pôles $2p$	2	4	6	8	10	12	14
vitesse en tr/mn - 50 Hz	3000	1500	1000	750	600	500	428,6
vitesse en tr/mn - 60 Hz	3600	1800	1200	900	720	600	514,3



Les machines asynchrones présentent une vitesse nominale légèrement inférieure au synchronisme. Par exemple, un moteur de vitesse nominale 1455 tr/mn est prévu pour une alimentation à 50 Hz et possède 4 pôles.

Généralités

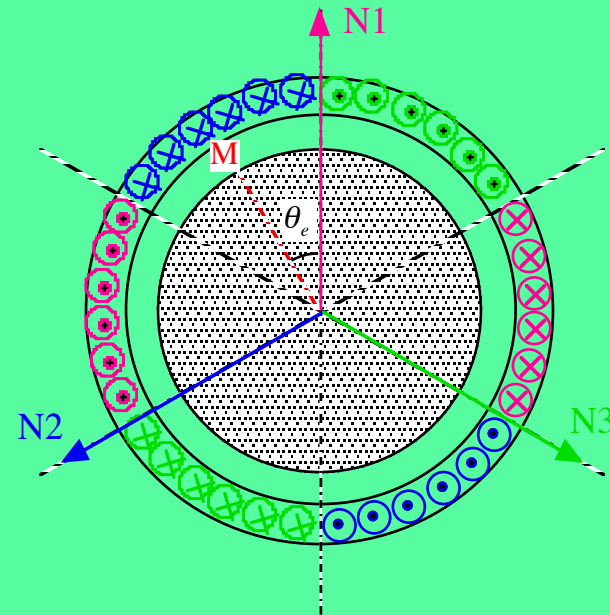
Champ tournant créé par 3 bobines alimentées en triphasé et d'axes espacés de 120°

On montre que le champ résultant est un champ tournant de vitesse :

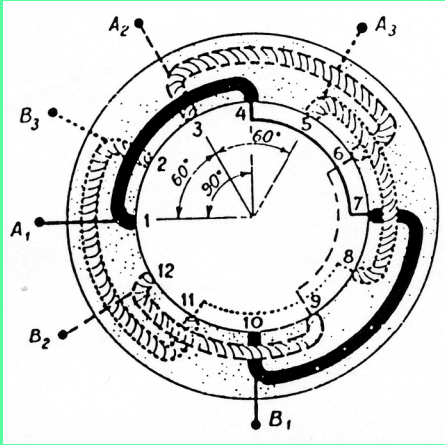
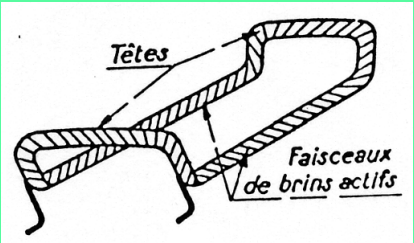
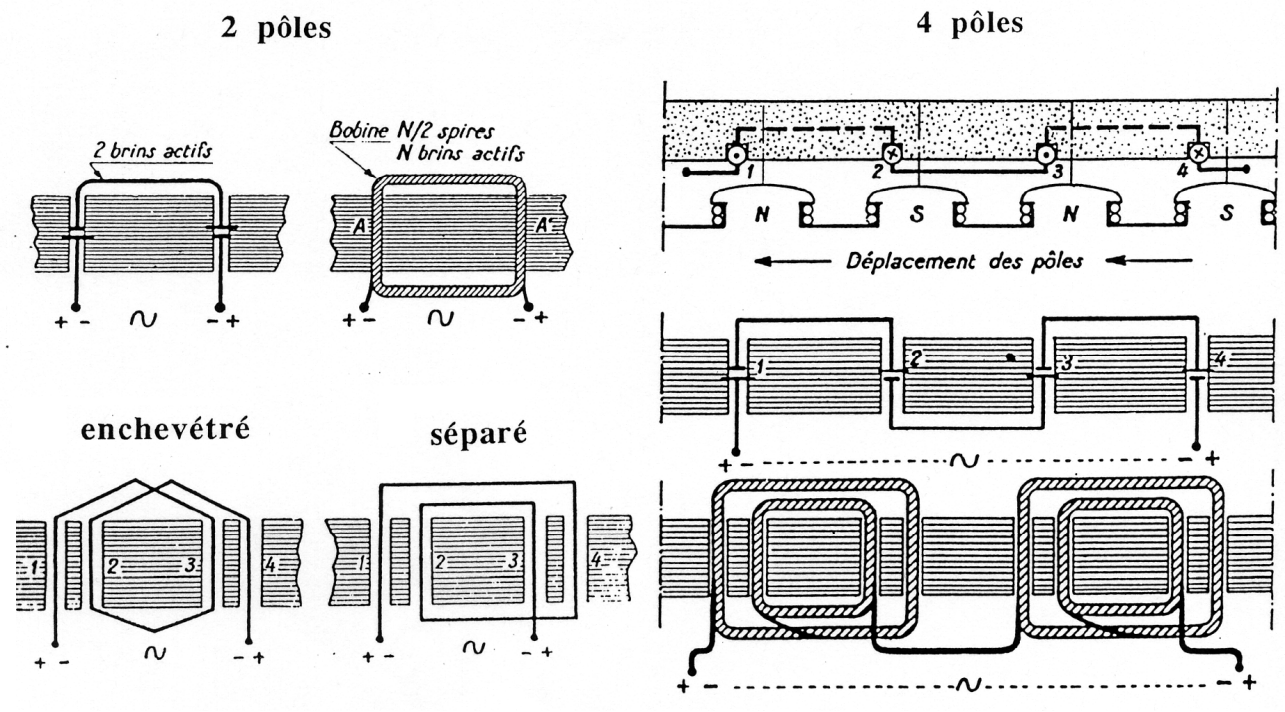
$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$B(\theta_e) = B_1 + B_2 + B_3 = \frac{3}{2} k \hat{I} \cos(\theta_e - \omega t)$$

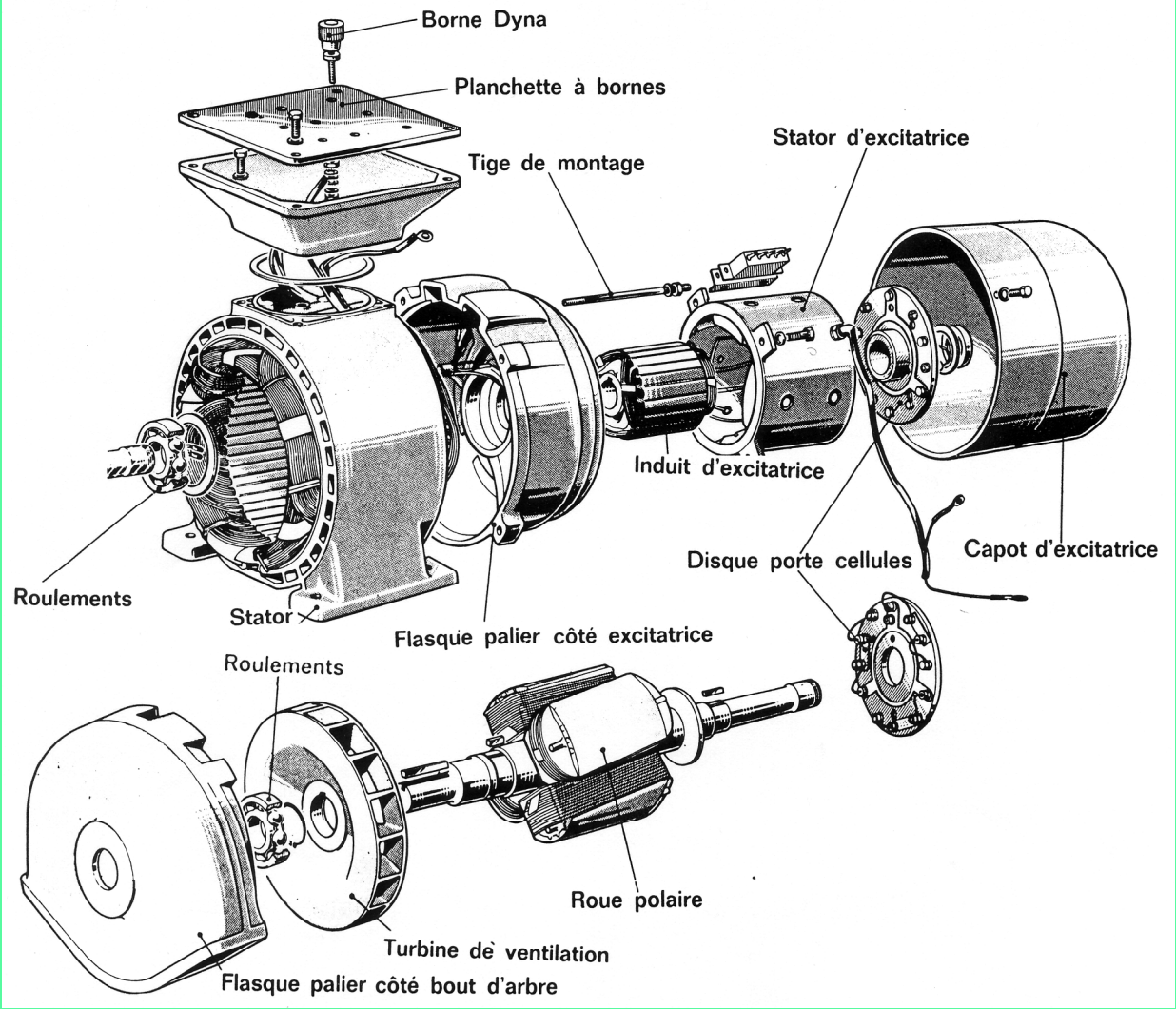
On remarque que l'amplitude n'est que de **1,5 fois** celle du champ créé par une seule bobine



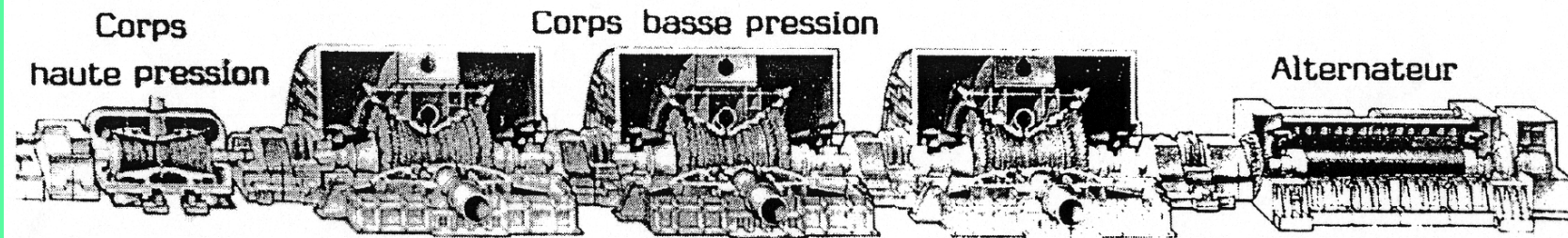
Principes du bobinage du stator



Machine synchrone

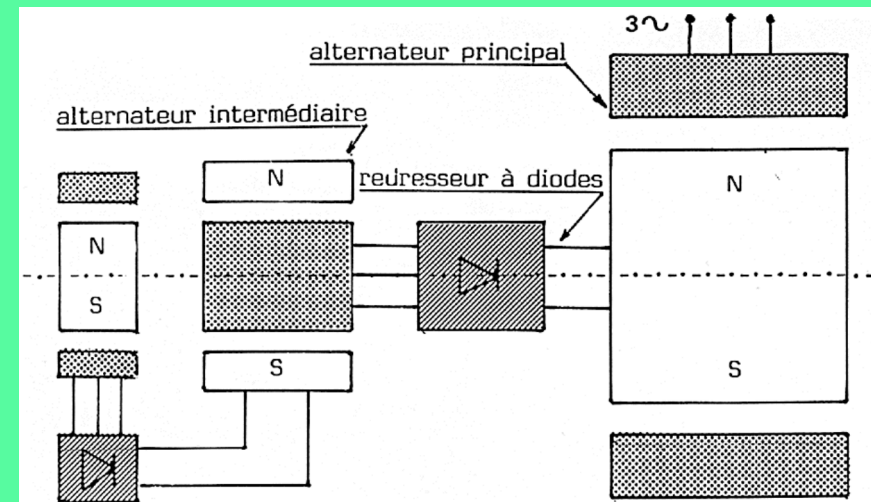


Machine synchrone



Vue d'ensemble d'un groupe turbo-alternateur de 1 300 MW

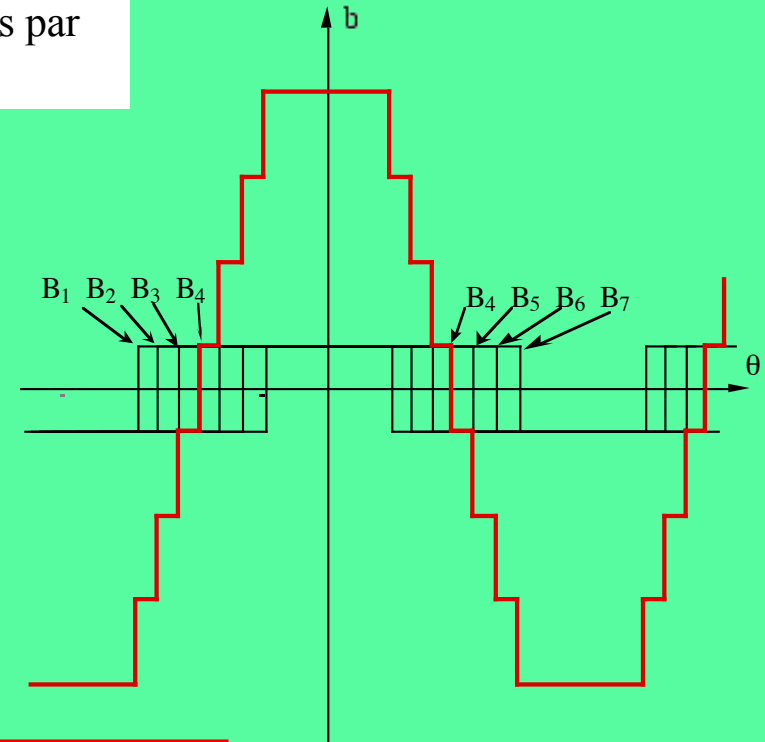
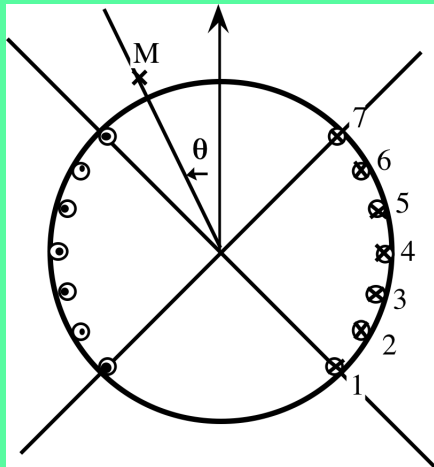
Puissance apparente : 1 650 MVA
20 kV - 48 000 A
Vitesse 1500 tr/mn - 4 pôles
Refroidissement à l'hydrogène sous pression
Excitation statique par 78 diodes tournantes
531 V - 6823 A



Généralités

Champ tournant créé au rotor d'une machine synchrone

On s'approche d'une forme d'onde sinusoïdale et on augmente le nombre de spires en multipliant le nombre d'encoches par pôle.



Cette répartition dans plusieurs encoches améliore la forme d'onde mais provoque une légère diminution de l'amplitude du fondamental de $B = f(\theta)$
Ce facteur d'atténuation est de la forme :

$$A = \frac{\sin\left(m \frac{\alpha_e}{2}\right)}{m \sin \frac{\alpha_e}{2}}$$

Où α_e est l'angle électrique entre deux encoches et m le nombre d'encoches par pôle.

Machine synchrone

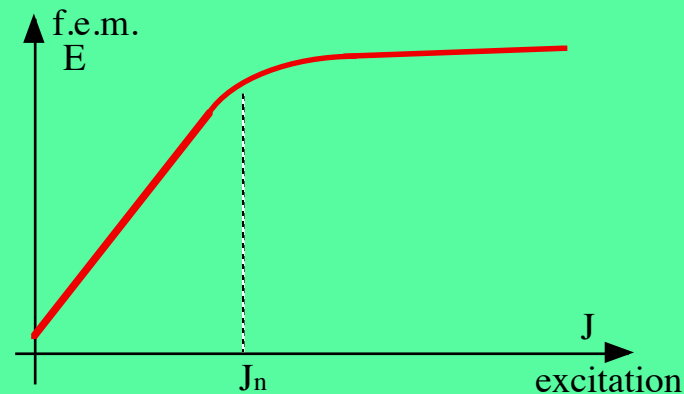
Force électromotrice (f.e.m.) théorique :

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} n f \hat{\Phi} \approx 2,22 n f \hat{\Phi}$$

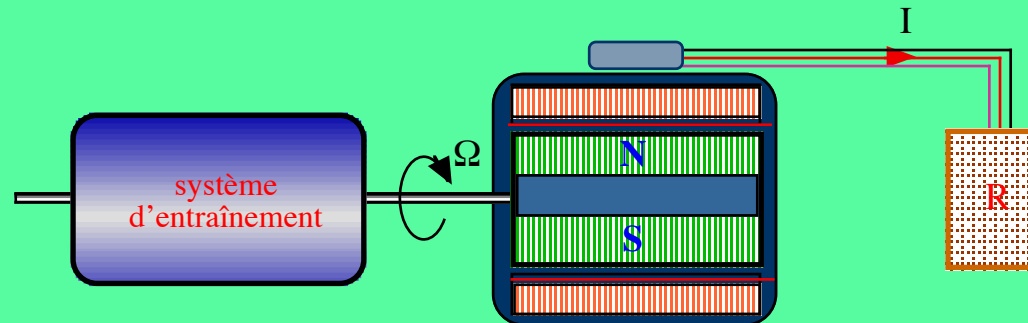
La prise en compte des conditions pratiques de bobinage ainsi que de la forme d'onde réelle de l'induction dans l'entrefer conduit à corriger cette expression. On introduit K , le coefficient de Kapp, qui varie peu autour de la valeur théorique : **$2,1 \leq K \leq 2,3$** .

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} (K_d K_r K_i K_f) n f \hat{\Phi} = K n f \hat{\Phi}$$

Caractéristique à vide :

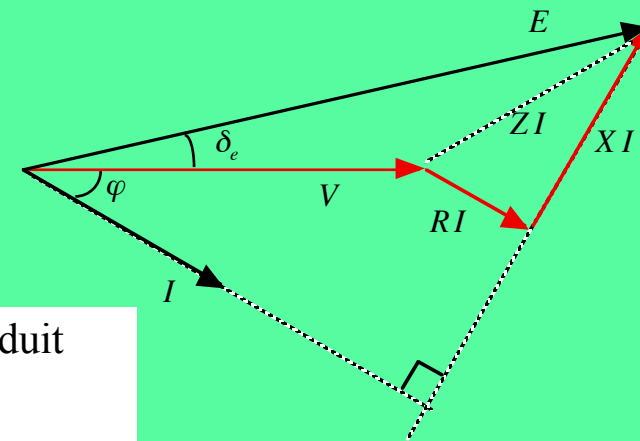
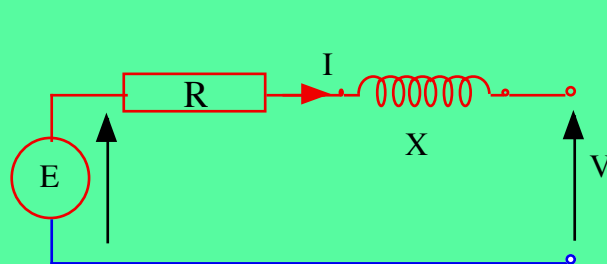


Machine synchrone : Fonctionnement en alternateur autonome



La « réactance synchrone » X , modélise la réaction magnétique d'induit ainsi que les fuites magnétiques. La résistance R est la résistance du bobinage d'une phase du stator.

Modèle et diagramme de Behn-Eschenburg



$\delta_e = p \delta$ est le décalage angulaire électrique qui se produit entre le champ résultant (induit + inducteur) et le champ inducteur, donc le rotor, si un couple est présent sur l'arbre.

Machine synchrone : Fonctionnement en alternateur autonome

Détermination de la réactance synchrone X

En zone non saturée, la caractéristique à vide peut s'écrire : $E = kJ$

De même la caractéristique en court-circuit : $I_{cc} = hJ$

$$E = Z I_{cc} \Rightarrow Z = \frac{E}{I_{cc}} = \frac{k}{h} \text{ puis } X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

R étant connue par une mesure classique en courant continu.

Machine synchrone : Fonctionnement en alternateur autonome

Lorsqu'un récepteur est connecté en sortie, la tension V dépend de l'excitation et des caractéristiques du récepteur (I et φ).

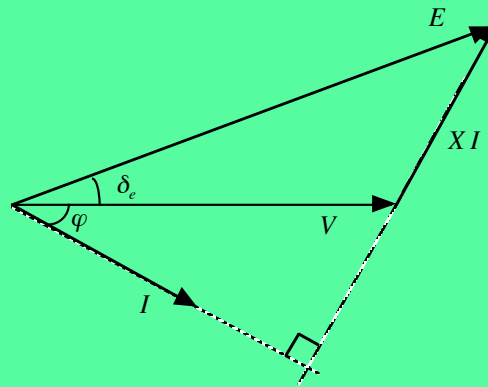
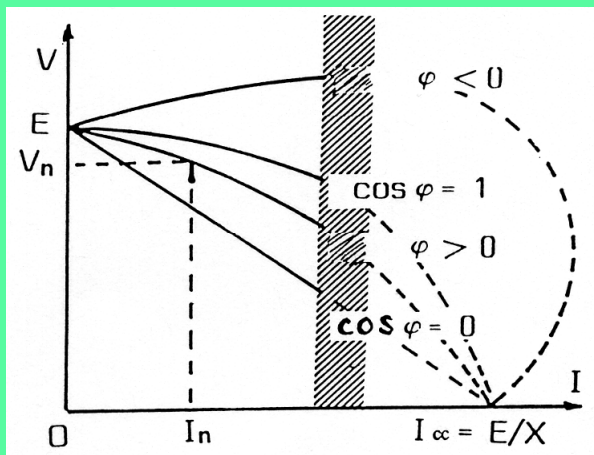
On étudie donc pour diverses valeurs de φ :

- les variations de $V = f(I)$ à excitation constante (« **caractéristiques externes** »);
- les valeurs nécessaires de l'excitation $J = f(I)$ pour obtenir une tension constante (« **courbes de réglages** »).

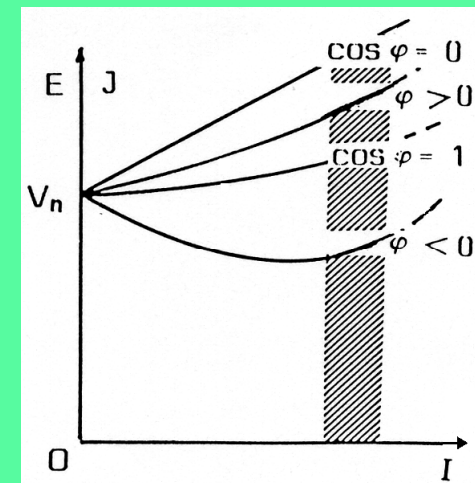
L'exploitation du diagramme simplifié ($R \approx 0$) permet de définir ces familles de courbes :
Ellipses si $E = \text{constante}$ et Hyperboles si $V = \text{constante}$.

$$\vec{E} = \vec{V} + \vec{XI} \Rightarrow E^2 = V^2 + (XI)^2 + 2VXI \sin\varphi$$

Caractéristiques externes



Courbes de réglages



Machine synchrone couplée sur un réseau triphasé

Le réseau triphasé, source de puissance infinie, impose la valeur de la tension et de la fréquence :

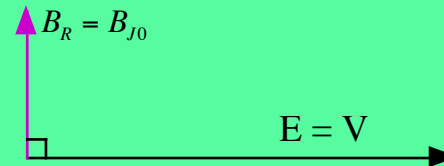
$V \approx K N f \hat{\Phi}_R$ où $\hat{\Phi}_R$ est le flux résultant de la composition des flux inducteur et induit. Si V et f sont fixées, il s'en suit que le fonctionnement sur réseau se fait à **flux résultant constant** :

$$\vec{B}_R = \vec{B}_J + \vec{B}_I = \vec{B}_{J0}$$

Pour coupler un alternateur sur un réseau sans stress excessif de la machine, il est nécessaire que soient vérifiées les conditions suivantes :

- Egalité des **tensions** par action sur l'excitation;
- égalité des **fréquences** par action sur la vitesse d'entraînement;
- même **ordre de succession** des phases (évolution simultanée sur les trois phases).

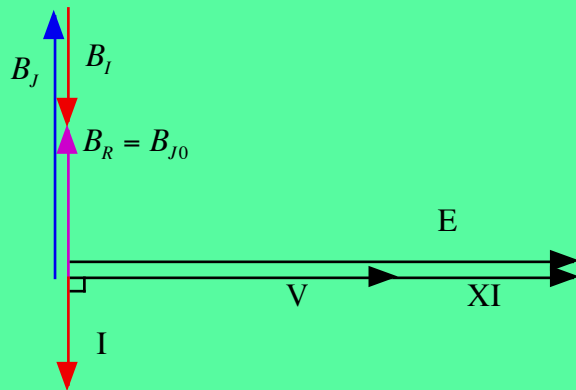
Juste après le couplage, $I = 0$ donc $E = V$; il n'y a aucun échange d'énergie entre le réseau et la machine.



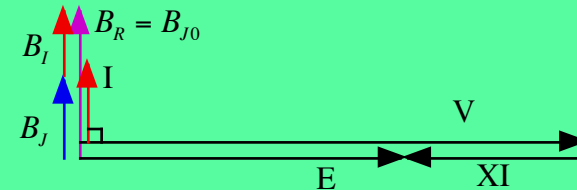
Machine synchrone couplée sur un réseau triphasé

Fonctionnement à vide dit « en compensateur synchrone » :

Juste après le couplage, si on modifie l'excitation, un courant I apparaît de telle sorte que soit maintenue la relation : $\vec{B}_R = \vec{B}_J + \vec{B}_I = \vec{B}_{J0}$. Par simple action sur la valeur de J , on peut donc gérer les échanges de puissance réactive entre le réseau et la machine.



Si on augmente l'excitation, la machine **fournit** du réactif au réseau

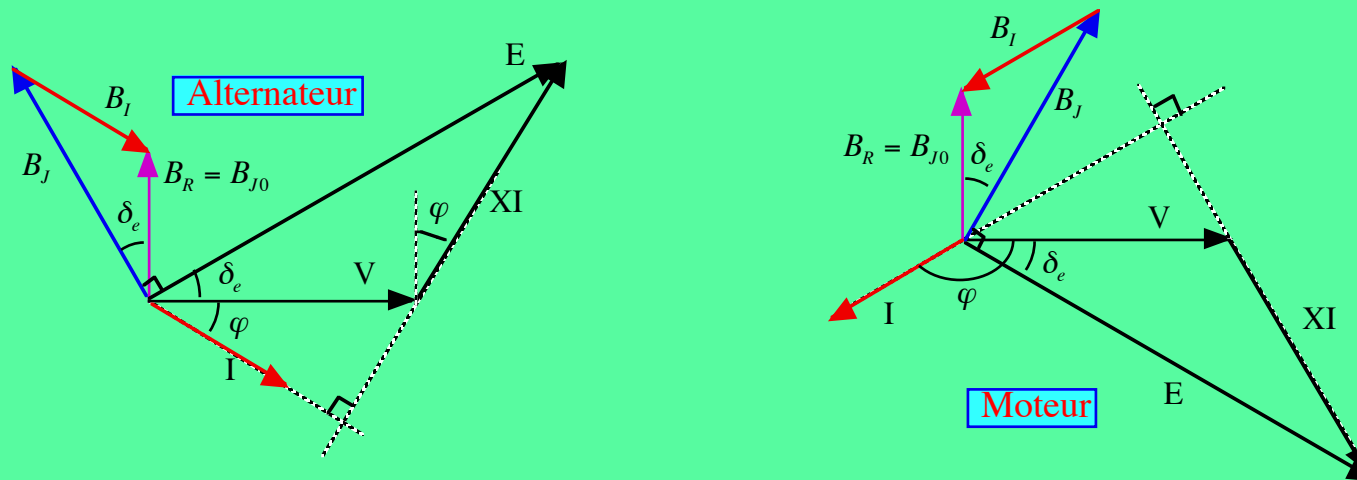


Si on diminue l'excitation; la machine **consomme** du réactif sur le réseau

Machine synchrone couplée sur un réseau triphasé

Fonctionnement en charge : Alternateur ou moteur synchrone

Dés qu'un couple apparaît sur l'arbre (résistant pour un fonctionnement en moteur ou entraînant pour un fonctionnement en alternateur), le courant I va s'ajuster en module et en phase de telle sorte que se vérifie la relation : $\vec{B}_R = \vec{B}_J + \vec{B}_I = \vec{B}_{J0}$. Cette fois la présence du couple provoque un décalage angulaire δ_e entre le rotor et le champ tournant résultant.

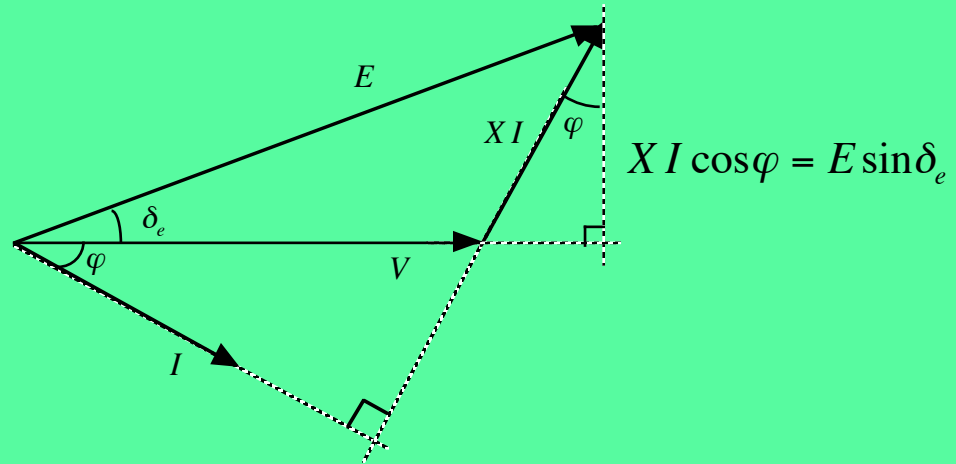


Machine synchrone couplée sur un réseau triphasé

Couple fourni ou absorbé par la machine

En admettant un rendement unitaire : $P = 3V I \cos \varphi = C \cdot \Omega$

$$C = \frac{3VE}{\Omega X} \sin \delta_e = C_{Max} \sin \delta_e$$



Le couple maximal, ou « couple de décrochage », est une limite absolue de fonctionnement. Au delà, il y a risque d'emballage en alternateur ou d'arrêt en moteur. En général, le couple nominal est très inférieur : $C_{Max} \approx 2 \text{ à } 2,5 C_n$

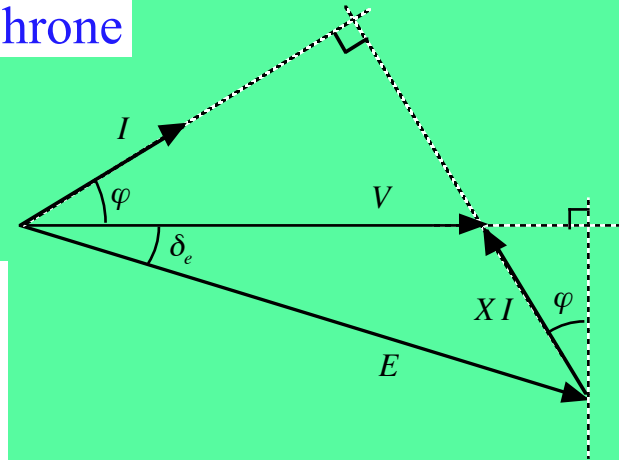
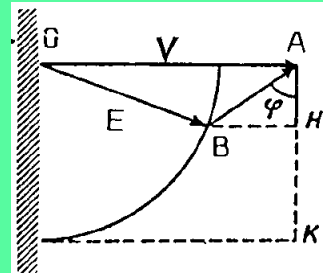
Machine synchrone couplée sur un réseau triphasé

Fonctionnement en moteur synchrone

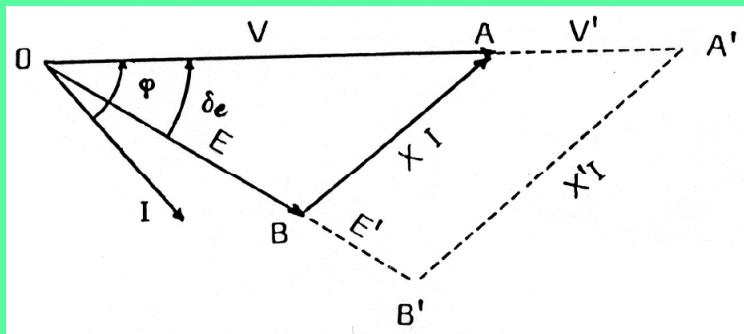
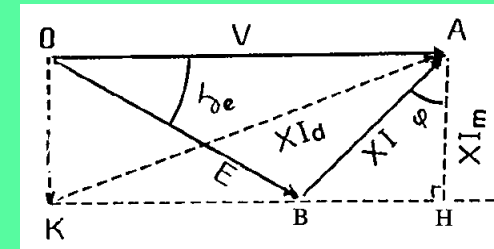
On passe en convention récepteur $\implies I / -I$

$$\vec{V} = \vec{E} + \overline{XI}$$

Fonctionnement à excitation constante :



Fonctionnement à puissance constante, donc à couple constant :



Les convertisseurs électroniques de fréquence permettent une alimentation en V/f constant; les 3 vecteurs \vec{V} , \vec{E} et \overline{XI} sont alors proportionnels à f alors que le couple maximal est inchangé.

Utilisation de la machine synchrone

Avantages :

- Bon rendement, le meilleur de tous les moteurs
- Vitesse constante quelle que soit la charge
- Alimentation directe à tension élevée
- souplesse au niveau de facteur de puissance.

Inconvénients :

- décrochage possible, sur une chute de tension par exemple;
- Source à courant continu nécessaire pour l'excitation;
- Démarrage délicat (en asynchrone ou avec moteur auxiliaire).

Lorsque la charge entraînée n'est pas utilisée, il est possible, moteur à vide, de mettre en oeuvre un fonctionnement en **compensateur synchrone**. La puissance réactive consommée par l'installation peut ainsi être réglée par action sur l'excitation.