

## FONCTION CONVERTIR : MACHINES SYNCHRONES TRIPHASES

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible. Elle peut fonctionner soit en génératrice soit en moteur. Lorsqu'elle fonctionne en génératrice, la machine synchrone prend le nom d'alternateur

### Principe de l'alternateur

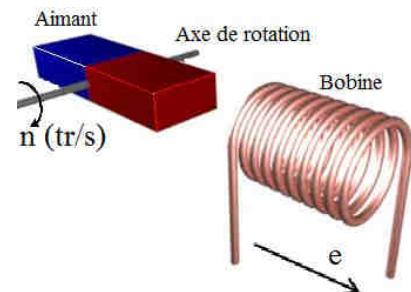
Un aimant (inducteur) tourne à la fréquence  $n$ , la bobine (induit) est traversée par un flux variable  $\Phi(t)$  d'où la création d'une f.é.m. induite :  $e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt}$ .

La fréquence de cette f.é.m. est telle que :  $f = n$ , soit  $\omega = \Omega$  avec  $\Omega$  vitesse de rotation du rotor (aimant) et  $\omega$ , la pulsation de la f.é.m. sinusoïdale induite, en rad/s.

Nous venons de construire notre premier alternateur

#### Remarque :

Si l'aimant possède 4 pôles (2 paires de pôles), la bobine sera le siège d'une f.é.m. de fréquence  $f = 2n$   
D'une façon générale :  $f = p n$



### Constitution :

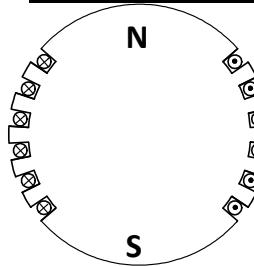
L'alternateur comprend deux parties principales : l'inducteur et l'induit

#### L'inducteur

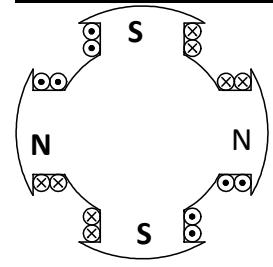
Il a pour rôle de créer un champ magnétique tournant à l'aide d'un rotor magnétisant mis en rotation. L'inducteur comporte  $2p$  pôles ( $p$  : paires de pôles).

Il existe 2 types d'inducteurs :

#### Rotor à pôles lisses



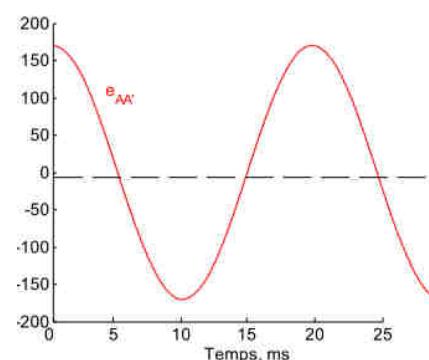
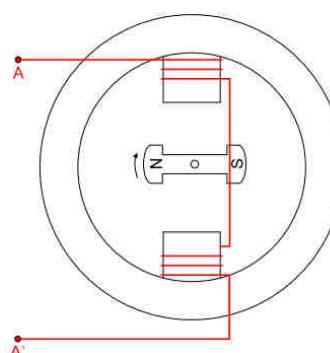
#### Rotor à pôles saillants



#### L'induit

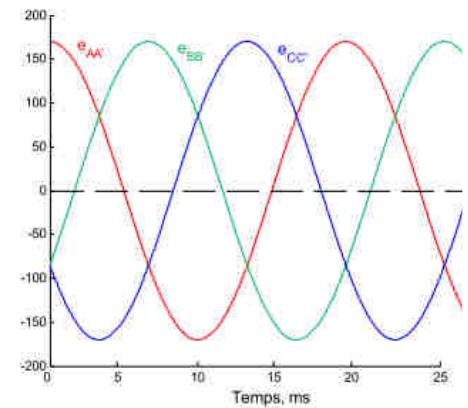
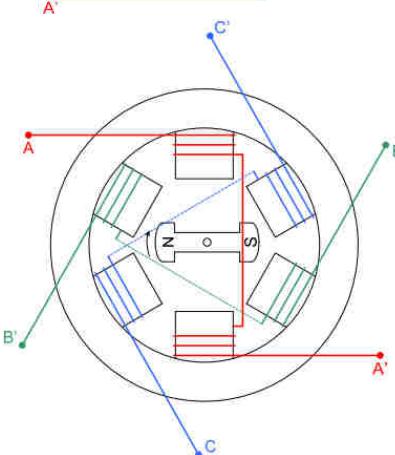
##### Alternateur monophasé

L'enroulement d'induit, fixe, est le siège d'une tension induite sinusoïdale, sa fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine d'entraînement (dans ce cas, 3000 tr/min, d'où  $f = 50$  Hz et  $\Omega = 377$  rad/s).



##### Alternateur triphasé:

Trois enroulements (phases) identiques et fixes sont décalés dans l'espace, l'un par rapport à l'autre, de  $120^\circ$ . Les tensions induites sont identiques mais déphasées dans le temps de  $120^\circ$ . Elles forment un système triphasé et équilibré de tensions.



## Caractéristiques de l'alternateur

### Fréquence des f.e.m. induites

Les enroulements de l'induit sont soumis à un champ magnétique tournant à la fréquence  $n$  dite fréquence de synchronisme. Il apparaît donc aux bornes des enroulements de l'induit des f.e.m. induites de fréquence  $f$  telles que :  $f = p \cdot n$  Avec :

- $p$  : nombre de paires de pôles
- $n$  : fréquence de rotation du champ tournant
- $f$  : fréquence des f.e.m. induites

### Valeur efficace de la f.e.m. induite par un enroulement

Chaque enroulement génère une f.e.m. induite  $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ , dont la valeur efficace s'exprime :

$$E = K \cdot p \cdot n \cdot N \cdot \Phi_{max} = K \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max} \text{ avec :}$$

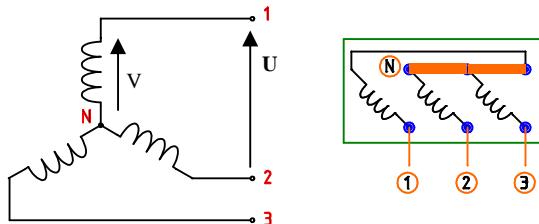
- $K$  : coefficient de Kapp qui ne dépend que des caractéristiques technologiques de l'alternateur.
- $N$  : nombre de conducteurs actifs par enroulement.
- $\Phi_{max}$  : flux utile maximal sous un pôle.

### Couplage des alternateurs triphasés

La f.e.m. induite définie précédemment est générée par chacun des enroulements. La formule précédente donne donc la valeur efficace d'une tension simple si les enroulements sont couplés en étoile, et la valeur d'une tension composée s'ils sont couplés en triangle.

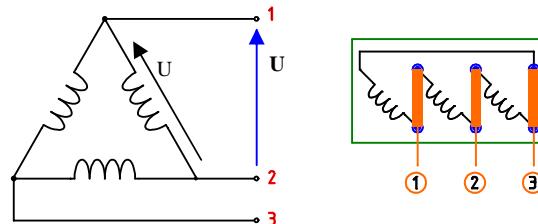
Exemple : A vide, si  $E = 230 \text{ V}$

#### Couplage en étoile



$$U = E \cdot \sqrt{3} = 400 \text{ V}$$

#### Couplage en triangle



$$U = E = 230 \text{ V}$$

### Excitation des alternateurs

Lorsque l'alternateur est à aimants permanents, il n'a pas besoin d'être excité. Lorsque l'inducteur est constitué d'électro-aimants, ils doivent être traversés par des courants continus fourni par :

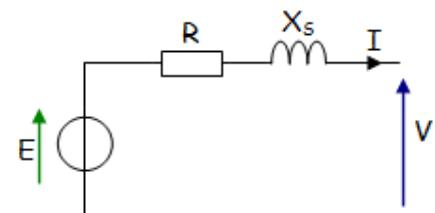
- une source extérieure reliée au rotor par un système de bagues et de balais.
- l'induit lui-même : une partie des courants triphasés fournis par l'induit sont redressés à l'aide d'un pont de diodes afin de pouvoir alimenter directement l'inducteur : l'alternateur est alors dit **auto excité**

## Fonctionnement en charge

### Modélisation d'une phase de l'alternateur

Pour étudier l'alternateur triphasé, on modélise une phase de l'alternateur par une f.e.m.  $E$  en série avec une résistance  $R$  et une réactance synchrone  $X_s$ .

$$V = E - RI - j X_s I$$

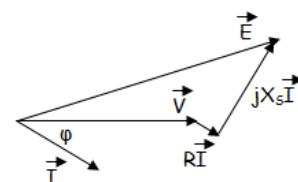


### Diagramme vectoriel

$RI$  : Chute ohmique au niveau de chaque enroulement induit

$jX_s I$  : Chute inductive due à la self de fuite et à la réaction d'induit.

Remarque : Si  $R$  est négligeable, la représentation se simplifie.



## Détermination de la réactance synchrone

On peut facilement déterminer les éléments du modèle électrique équivalent, à l'aide de deux essais :

- essai à vide  $E = f(I_e)$
- essai en court-circuit  $I_{cc} = f(I_e)$

On a alors les deux caractéristiques  $I_{cc} = f(I_e)$  et  $E = f(I_e)$ .

Pour un courant d'excitation donné  $I_{e0}$  (zone linéaire), on connaît donc :

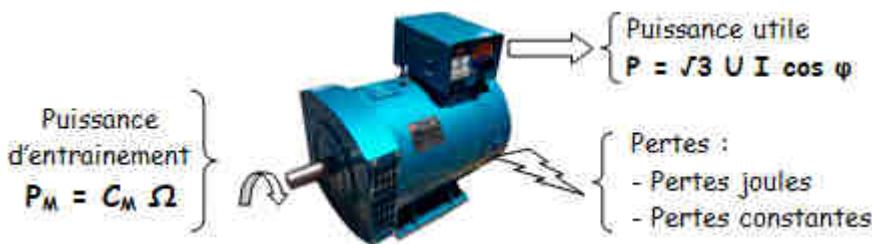
$I_{cc0}$  et  $E_0$ , on en déduit  $X_s$ .

$$Z = E_0 / I_{cc0} \quad \text{et} \quad X_s = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

La réactance est généralement très grande devant la résistance d'un enroulement, d'où :

$$Z = E_0 / I_{cc0} \approx X_s$$

## Bilan des puissances. Rendement.



### Puissance reçue

L'alternateur reçoit une puissance mécanique  $P_M$  qui lui est fournie par le moteur d'entraînement

$$P_M = C_M \Omega$$

### Puissance restituée

Il restitue une partie de cette puissance sous la forme de puissance électrique  $P$  qui est reçue par la charge :  $P = \sqrt{3} U I \cos \phi$

## Bilan des pertes de puissance :

Pertes ne dépendant pas de la charge appelées pertes « constantes » :

Les pertes mécaniques  $p_m$  dépendent de la fréquence de rotation ; les pertes  $p_f$  dans le fer dépendent de la fréquence et du flux dans la machine. Pour une machine synchrone utilisée à fréquence et tension constantes, elles varient peu entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge.

On les considère donc comme constantes.

### Pertes par effet Joule :

- Dans l'inducteur : la puissance perdue par effet Joule est égale à :  $p_{je} = U_e I_e$ .  
Avec  $U_e$  : la tension continue aux bornes de l'inducteur ;  
 $I_e$  : l'intensité du courant d'excitation.
- Dans l'induit : la puissance  $p_{js}$  perdue par effet Joule est égale à :  $p_{js} = \frac{3}{2} R I^2$   
Avec  $R$  la résistance mesurée entre deux bornes de phase de la machine

### Expression du rendement :

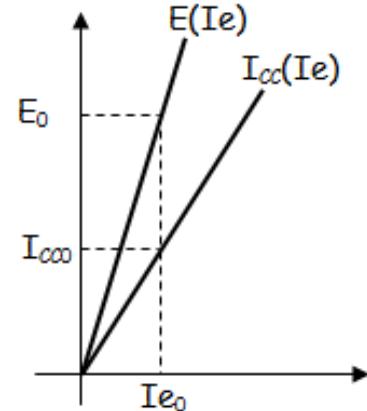
- Si l'alternateur est auto-excité, c'est-à-dire s'il ne reçoit de puissance que du moteur qui l'entraîne, le rendement est alors égal à :

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos \phi}{C_M \Omega}$$

- Si l'alternateur n'est pas auto-excité, il faut ajouter à la puissance mécanique reçue, la puissance  $p_{je}$  qui a été fournie au circuit d'excitation.

Dans le cas général, nous pouvons aussi exprimer le rendement en fonction des différentes pertes de puissance :

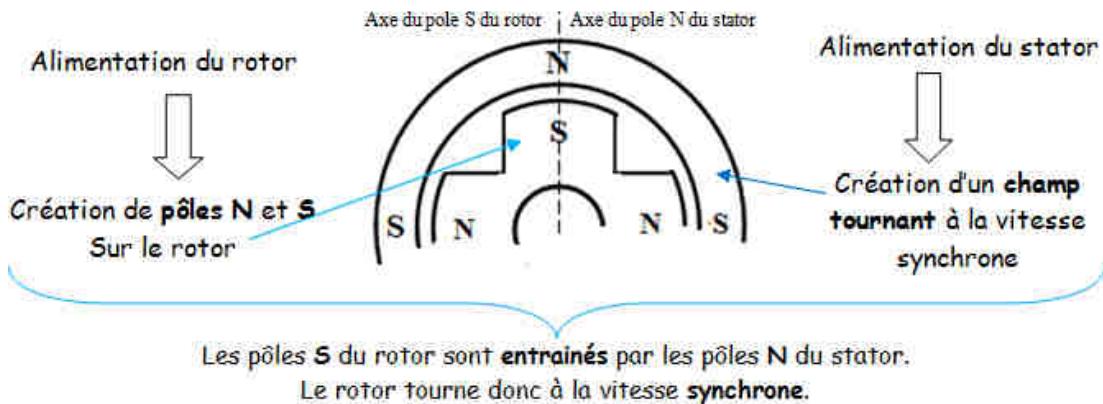
$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos \phi}{\sqrt{3} U I \cos \phi + p_m + p_f + p_{je} + p_{js}}$$



## Moteur synchrone. Réversibilité de l'alternateur

- Expérience: couplons un alternateur triphasé sur le réseau, puis supprimons l'alimentation du moteur.
- Constatation: le groupe continue toujours à tourner, l'alternateur est converti en moteur.
- Déduction: puisque le moteur tourne à la vitesse de synchronisme  $n = f/p$ , on l'appelle moteur synchrone.

### Fonctionnement



### Schéma équivalent. Equation. Diagramme



### 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 souvent nécessaire.

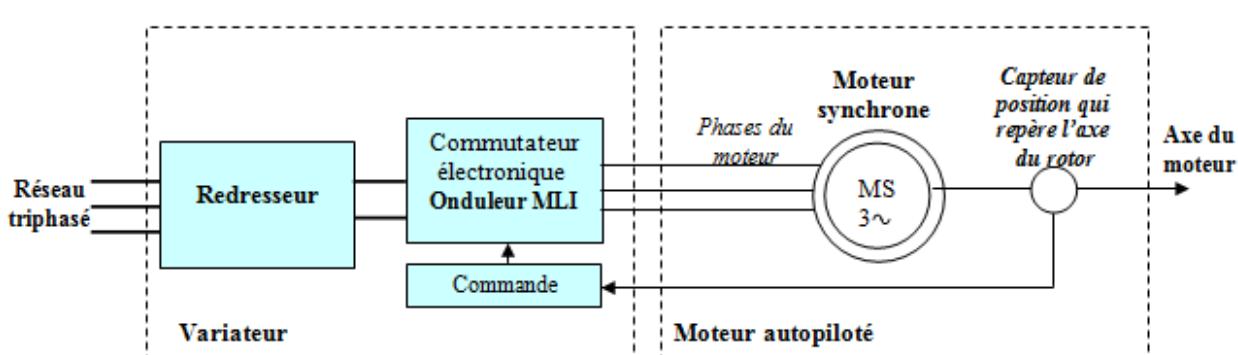
Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.

Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

## Moteur synchrone autopiloté

Les moteurs synchrones autopilotés sont aussi appelés moteurs **autosynchrones**.

### Schéma de principe



## Fonctionnement

Le capteur (codeur ou resolver) détecte la position exacte du rotor et permet à l'onduleur (convertisseur de fréquence), de maintenir un angle  $\theta$  de  $90^\circ$  entre le champ tournant statorique B et le champ rotorique  $\mu$ , de façon à ce que le couple moteur puisse toujours être maximal. Il n'y a plus possibilité de décrochage. Le capteur donne également l'information " vitesse ".