

# MACHINE SYNCHRONE

## I. Alternateur

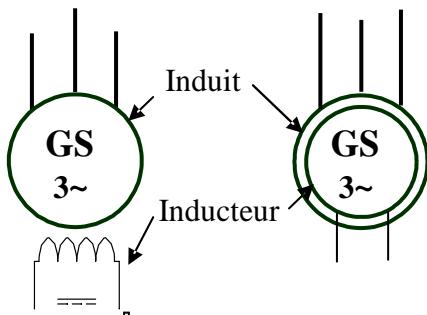
La machine synchrone est un convertisseur réversible. Elle peut fonctionner soit en génératrice soit en moteur. Lorsqu'elle fonctionne en génératrice, la machine synchrone prend le nom d'alternateur.

### I.1. Organisation simplifiée de l'alternateur

L'alternateur comprend deux parties principales :

- **L'inducteur**, constitué d'électroaimants parcourus par un courant continu, ou parfois simplement constitué d'aimants permanents (porté par le rotor).
- **L'induit**, constitué d'enroulements monophasés ou triphasés (porté par le stator)

**Symbol normalisé**



#### PRINCIPE:

Une génératrice synchrone transforme de l'énergie mécanique ( $T, \Omega$ ) en énergie électrique ( $V, I$  de fréquence  $f$ ). Un aimant tourne à la fréquence  $n$ , les spires sont traversées par un flux variable  $\phi(t)$  d'où la création d'une f.e.m induite  $e(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$ . La fréquence de cette f.e.m est telle que :  $f = pn$ ; soit  $\omega = p\Omega$  avec  $\Omega$  vitesse de rotation du rotor (aimant) et  $\omega$ , la pulsation de la f.e.m sinusoïdale induite, en rad / s.

#### I.1.1. Inducteur (porté par le rotor)

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 :

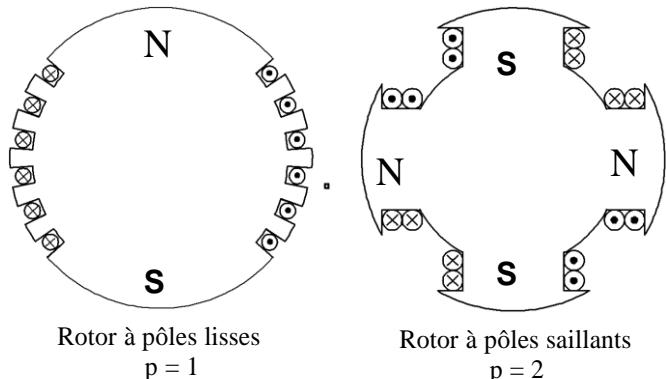
##### - Rotor à pôles lisses

Très robuste, il permet d'obtenir des fréquences de rotation élevées ( $> 3000$  tr/min).

Il est utilisé dans les centrales thermiques et les centrales nucléaires.

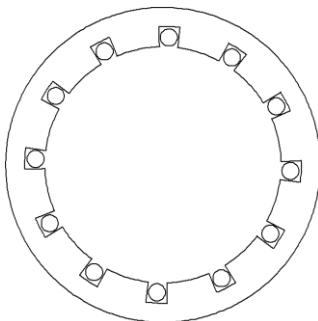
##### - Rotor à pôles saillants

Tournant moins vite, et de ce fait fournissant moins de puissance, il est utilisé dans les centrales hydrauliques et les groupes électrogènes.



#### I.1.2. Induit (porté par le stator)

Constitué de trois groupes de conducteurs logés dans des encoches formant trois circuits (un pour chaque phase) décalés les uns des autres d'un angle convenable ( $120^\circ$ ) et fournissant de ce fait des courants triphasés.



## I.2. Caractéristiques de l'alternateur

### I.2.1. 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 rotor (champ tournant) (tr/s).

$f$  : fréquence des f.e.m. induites (Hz).

## I.2.2. Valeur efficace de la f.é.m. induite par un enroulement

Chaque enroulement génère une f.é.m. induite  $e = -N_S d\Phi/dt$ , dont la valeur efficace s'exprime :

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

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 en Weber (Wb).

f : Fréquence des f.é.m. induites (Hz).

p : Nombre de paires de pôles.

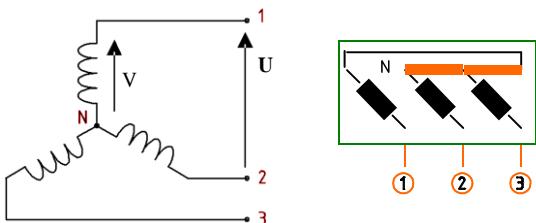
n : Fréquence de rotation du rotor (tr/s).

## I.2.3. Couplage des alternateurs triphasés

La f.é.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.

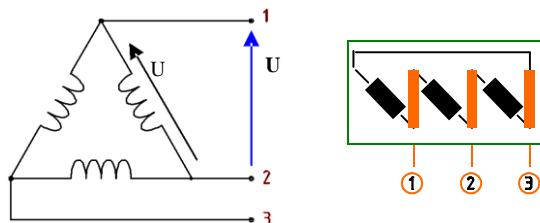
*Exemple* : A vide, si  $E = 230$  V

Couplage en étoile



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

Couplage en triangle



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

## I.2.4. 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 :

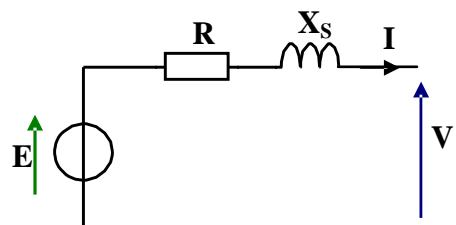
- une source extérieure reliée au rotor par un système de bagues et de balais.
- l'induit lui-même : une partie des courants triphasés fournis par l'induit sont redressés à l'aide d'un pont de diodes afin de pouvoir alimenter directement l'inducteur : l'alternateur est alors dit **auto excité**

## I.3. Fonctionnement en charge

### I.3.1. 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  $X_S$

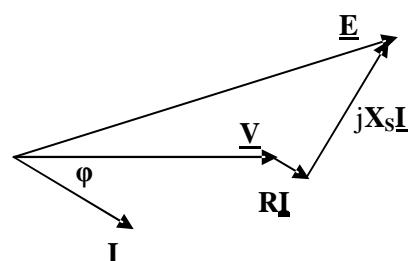
$$V = E - RI - j X_S I$$



### I.3.2. Diagramme vectoriel de BEHN - ESCHENBOURG :

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

$jX_S I$  : Chute inductive due à la réactance  $X_S$  de l'alternateur.



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

### I.3.3. Détermination de la réactance synchrone $X_s$ :

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),

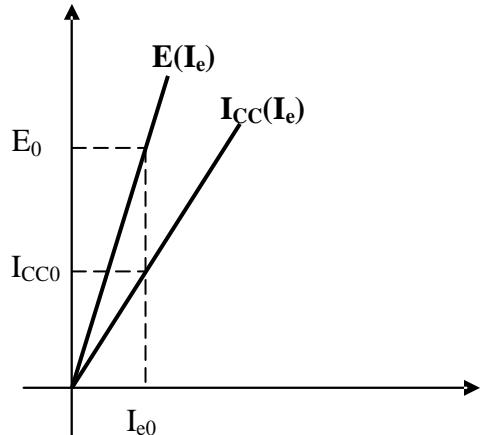
on connaît donc  $I_{CC0}$  et  $E_0$ , on en déduit  $X_s$ .

Lorsque l'on est en court circuit, en appliquant la loi d'ohm sur le modèle équivalent, on obtient :  $0 = E_0 - RI_{CC0} - j X_s I_{CC0}$

soit en module:  $E_0 = \sqrt{R^2 + X_s^2} I_{CC0} = Z \cdot I_{CC0}$ .

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

$$Z = E_0 / I_{CC0} \approx X_s$$



## I.4. Bilan des puissances. Rendement.

### I.4.1. Puissance reçue. Puissance restituée

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

$$P_M = C_M \Omega$$

Il restitue une partie de cette puissance sous la forme de puissance électrique  $P$  qui est reçue par la charge :

$$P = \sqrt{3} U I \cos \phi$$

### I.4.2. Bilan des pertes de puissance

a) *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.

#### b) *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

### I.4.3. 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 :

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

## II. Moteur synchrone. Réversibilité de l'alternateur :

### II.1. Expérience

Couplons un alternateur triphasé sur le réseau, puis supprimons l'alimentation du moteur.

### II.2. Constatation

Le groupe continue toujours à tourner, l'alternateur est converti en moteur.

### II.3. Déduction

Puisque le moteur tourne à la vitesse de synchronisme  $n = f/p$ , on l'appelle *moteur synchrone*.

### II.4. Fonctionnement

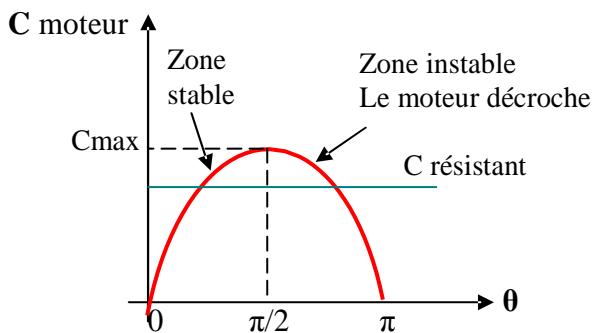
#### II.4.1. Couple moteur

La rotation du système est assurée par le couple:

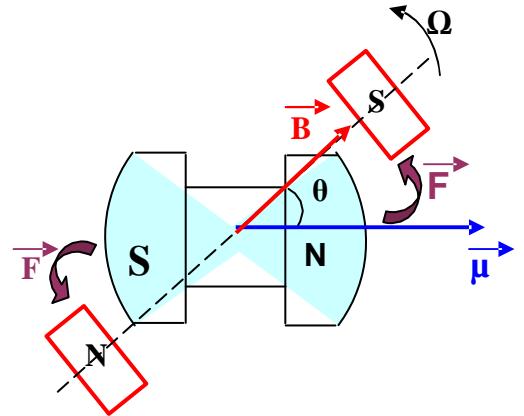
Soit en module :

$$C_{em} = C_{max} \cdot \sin \theta$$

L'évolution du  $C$  en fonction de  $\theta$  est la suivante :



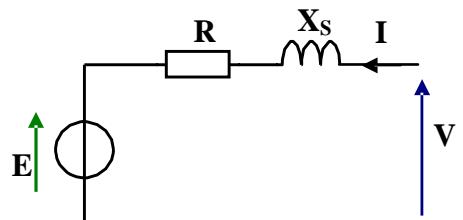
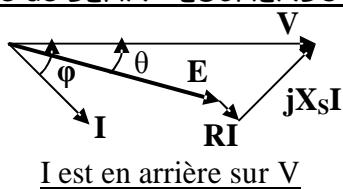
Si $\theta = 0$	$C = 0$	moteur est en arrêt
Si $0 < \theta < \pi/2$	$C$ est croissant	moteur en marche (fonctionnement statique stable).
Si $\pi/2 < \theta < \pi$	$C$ est décroissant	moteur décroche.



#### II.4.2. Schéma équivalent. Equation .Diagramme

Equations :  $\underline{E} = \underline{V} - R \cdot \underline{I} - j X_s \cdot \underline{I}$  soit  $\underline{V} = \underline{E} + R \cdot \underline{I} + j X_s \cdot \underline{I}$

Diagramme de BEHN - ESCHENBOURG :



### II.5.1 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  $I_e$ .

### II.5.2 Inconvénients

Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.

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

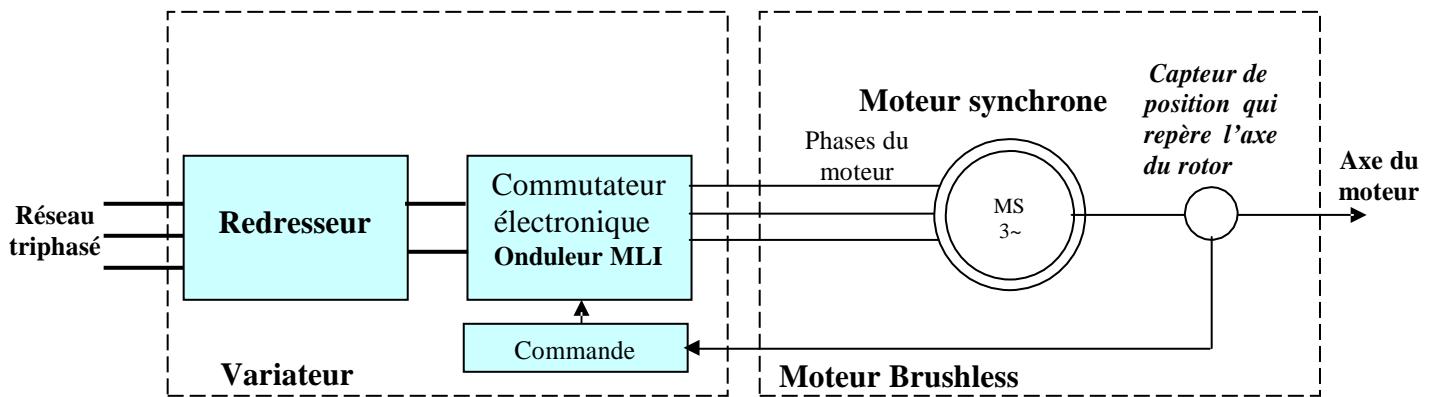
Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

## III. Moteur synchrone autopiloté :

Les moteurs synchrones autopilotés sont aussi appelés moteurs Brushless ou moteurs auto-synchrones. Ils sont utilisés en commande d'axe de robots : on peut les commander en vitesse ou les commander en position.

### III.1. Schéma de principe

Le capteur de position (synchro-résolveur) règle l'instant d'amorçage et de blocage des interrupteurs de manière à avoir le  $\theta$  voulu. La vitesse de rotation fixe la fréquence d'alimentation de la machine et impose le synchronisme.



### III.2. Constitution :

- Un pont redresseur triphasé.
- Un onduleur triphasé (commutateur de courant).
- Un capteur de position solidaire au rotor.

Afin d'assurer le synchronisme des impulsions de commande de l'onduleur et de la tension d'alimentation du moteur, un capteur de position fixé sur l'arbre et délivre des impulsions rigoureusement synchrones de la rotation de la machine. La fréquence des courants alimentant le moteur est asservie à la vitesse de rotation.

## IV- Différents modes de démarrage du moteur synchrone :

### 1- Démarrage par moteur auxiliaire :

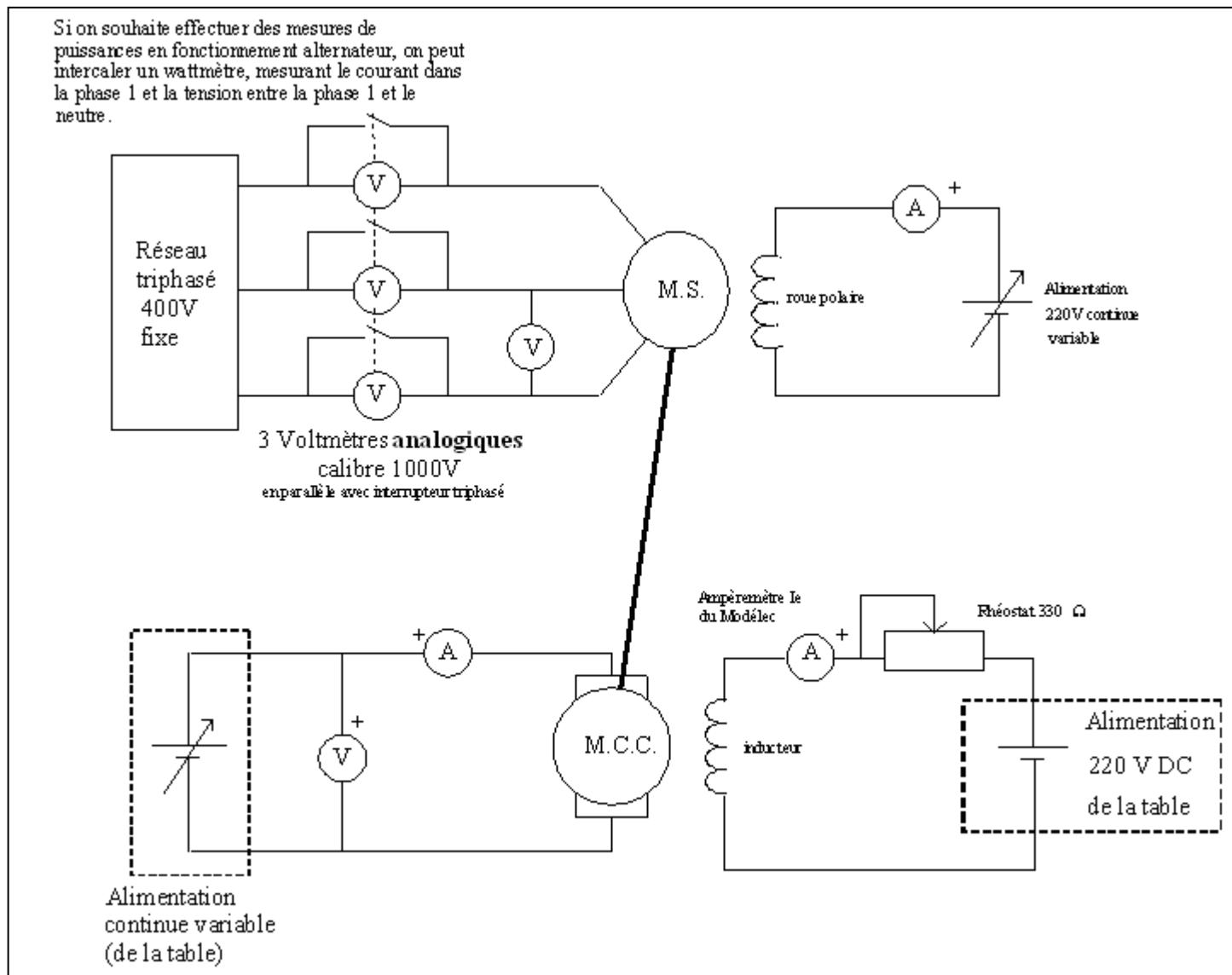
Un moteur asynchrone ou à courant continu entraîne le moteur synchrone à la vitesse proche de synchronisme, on excite le rotor, si les conditions de couplage sont vérifiées on couple le moteur au réseau et ce lui ci s'accroche.

### 2- Démarrage en asynchrone :

Le stator est alimenté à tension réduite sur le réseau (par autotransformateur), le rotor est court-circuité, les courants induits dans les conducteurs rotoriques amènent la vitesse du rotor à une valeur voisine du synchronisme, à ce moment là on alimente l'inducteur (rotor) par une source de courant continu, le moteur est alors accroché au réseau.

## V- Couplage d'un alternateur sur le réseau

### 1- Schéma :



### 2- Mode opératoire :

Pour coupler une machine synchrone au réseau il faut vérifier les conditions suivantes après de l'entraîner à une vitesse proche de la vitesse de synchronisme :

- Avoir même ordre de phases (indicateur de phases).
- Avoir même fréquence (fréquencemètre).
- Avoir même tension (voltmètre).
- Avoir même phase (synchroscope).

- **Egalité des fréquences :** Mise en vitesse et réglage par action sur la tension  $U_M$  d'induit ou sur le courant d'excitation  $J_M$  du moteur d'entraînement tel que  $n_s = 60.f/p$ . Contrôle de  $n_M$  par tachymètre et  $f$  par fréquencemètre.
- **Egalité des tensions :** Action sur le courant d'excitation de l'alternateur  $J_A$  tel que  $U_{Alter} = U_{réseau}$ . Contrôle par voltmètres.
- **Concordance, ordre de succession des phases :** à l'aide des dispositifs de contrôle à lampes, électronique, synchronoscope, synchrocoupleur automatique, phasemètre....
- **Couplage :** à l'extinction des lampes à feux battants. Si on a feux tournants il faut permuter deux phases de l'alternateur et refaire le réglage.
- **Arrêt :** L'alternateur est ramené à vide par réduction de la puissance utile du moteur  $P_{UM}$  (Action sur  $U_M$  ou sur  $J_M$ ), quand  $I_{Alter} = 0$  alors découplage du réseau par ouverture de l'interrupteur triphasé.

**NB :** le sens de rotation du champ tournant de l'alternateur doit être celui du moteur d'entrainement, réglage à faire en court-circuitant le rotor de l'alternateur et on alimente le stator par tension réduite.

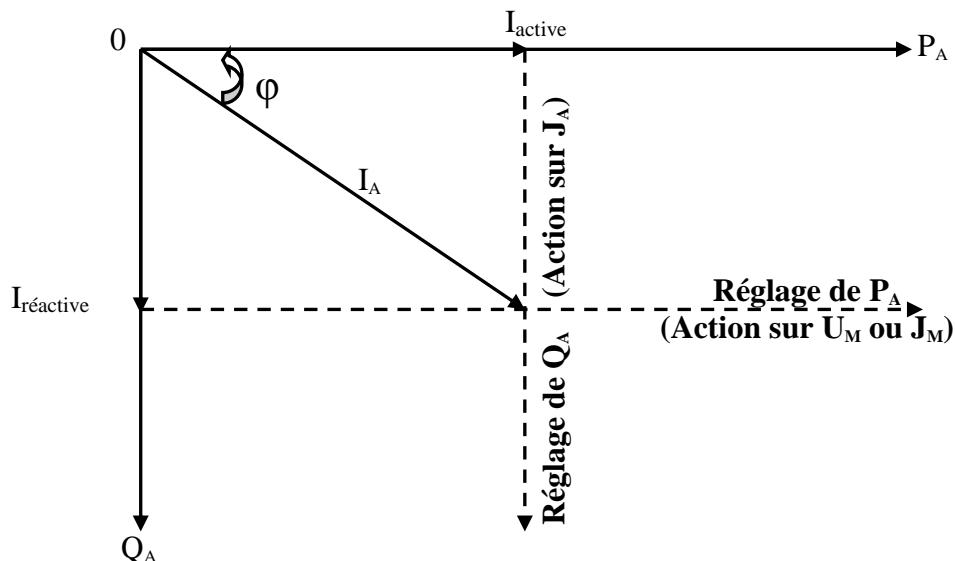
### 3- Fonctionnement après couplage :

La vitesse de synchronisme de la machine couplée au réseau reste rigoureusement constante car elle est imposée par la fréquence du réseau et cela même si l'on intervient sur le courant d'excitation du moteur  $J_M$ .

- **A vide :** Au synchronisme en marche à vide, après couplage sur le réseau. La machine synchrone ne reçoit ni ne fournit aucune puissance,  $I_{Alter}$  est presque nul et la puissance utile du moteur aussi nulle.
- **En charge :** Fonctionnement en génératrice synchrone, elle fournit de l'énergie au réseau :
  - **En charge active :** On règle la puissance utile  $P_{UM}$  du moteur par action sur  $U_M$  ou sur  $J_M$  ce qui donne le réglage de la puissance active  $P_A$  de l'alternateur mais la puissance réactive reste constante. On mesure  $P_A$ ,  $I_{Alter}$  et  $Q_A$ .

**Remarque :** Si le courant d'excitation  $J_M$  diminue (la vitesse du groupe reste constante puisqu'elle est imposée par le réseau) ;  $E_M$  diminue et  $I_M$  augmente alors  $P_{UM}$  augmente donc  $I_{Alter}$  augmente et  $P_A > 0$  fonctionnement en générateur, le transfert d'énergie se fait du moteur vers l'alternateur vers le réseau.

- **En charge réactive :** On règle le courant d'excitation  $J_A$  de l'alternateur donc réglage de la puissance réactive  $Q_A$  mais la puissance active  $P_A$  reste constante (la puissance réactive fournit par le réseau diminue, s'annule et devient  $< 0$  quand le courant d'excitation  $J_A$  augmente). Le fonctionnement est stable quand la machine est surexcitée, pour les faibles valeurs de  $J_A$  risque d'emballement du mcc.



### • Fonctionnement en moteur synchrone :

Si le courant d'excitation  $J_M$  augmente alors  $E_M$  augmente et  $I_M$  diminue s'annule et change de signe, donc changement de sens de transfert de l'énergie du réseau alternatif vers le réseau continu. Le moteur fonctionne en génératrice,  $P_A < 0$ , la MS fonctionne en moteur synchrone. On débranche le MCC de sa source d'alimentation continue, le MS tourne au synchronisme tel que  $n_s = 60.f/p$  ; à vide  $I_{A0}$  est faible. En charge en fermant l'induit du MCC devenu génératrice sur une charge résistive,  $I_A$  augmente et  $P_A < 0$ , le MS consomme de la puissance du réseau alternatif. Si la charge demandée au MS est trop élevée on risque le décrochage avec une surintensité dangereuse.

**Remarque :** Le moteur synchrone surexcité à vide fonctionne en compensateur d'énergie réactive.

fin