



# MACHINE SYNCHRONE

## Table des matières

<b>1. Les champs tournants et fem induite.....</b>	<b>2</b>
1. Fonctionnement génératrice (ou alternateur) :.....	2
2. Fonctionnement moteur.....	2
<b>2. fonctionnement en alternateur.....</b>	<b>2</b>
1. Modèle :Diagramme de Behn Eschenburg:.....	2
a) Réactance synchrone:.....	2
b) Détermination des éléments du schéma équivalent par phase:.....	2
2. Construction de Fresnel des grandeurs d'une phase.....	4
3. Caractéristiques en charge d'un alternateur isolé :.....	4
4. Caractéristiques en charge d'un alternateur relié à un réseau puissant :.....	5
a) Conditions de couplage d'un alternateur au réseau (fonction du synchronocoupleur) :.....	5
b) Réglage des puissances :.....	5
5. Lecture des puissances sur le diagramme des puissances.....	6
<b>3. Moteur synchrone( Brushless ).....</b>	<b>7</b>
1. Caractéristique mécanique et Démarrage.....	7
2. Contrôle du couple.....	7
3. Moteur synchrone autopiloté : moteur brushless.....	8
4. Structure de l'autopilotage.....	9
5. Fonctionnement de l'autopilotage :.....	9
6. Avantages du moteur brushless.....	10
7. Fonctionnement aux limites.....	10
<b>4. Bilan des pertes et rendement.....</b>	<b>11</b>
1. La puissance reçue :.....	11
2. Les pertes collectives :.....	11
3. Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :.....	11
4. Les pertes par effet Joule dans l'induit :.....	11
5. Rendement :.....	11

# 1. LES CHAMPS TOURNANTS ET FEM INDUITE.

## 1. FONCTIONNEMENT GÉNÉRATRICE (OU ALTERNATEUR) :

Le rotor (aimant permanent ou électro-aimant) est entraîné à la vitesse  $n = n_s = \frac{f}{p}$  (tr/s), il crée le flux magnétique  $\Phi$ . Chaque bobine (du stator) est soumise à un flux magnétique variable. Une **tension alternative sinusoïdale  $e(t)$  (fem induite) est créée** aux bornes de chaque enroulement de N spires du stator, c'est la loi de Lenz :  $e(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} = -E \sqrt{2} \sin(2\pi f t)$  avec  $E = kNf\Phi$ .

## 2. FONCTIONNEMENT MOTEUR

Les bobinages triphasés du stator sont alimentés par un système triphasé de courants de fréquence  $f$ ; celui-ci crée un champ magnétique  $B_s$  tournant à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s = 2\pi n_s$ . Le rotor (aimant permanent ou électro-aimant) tourne à la vitesse  $n = n_s = \frac{f}{p}$  du champ magnétique.

# 2. FONCTIONNEMENT EN ALTERNATEUR

## 1. MODÈLE : DIAGRAMME DE BEHN ESCHENBURG:

Ce diagramme convient pour modéliser le fonctionnement de la **génératrice synchrone** non saturée.

### A) RÉACTANCE SYNCHRONE:

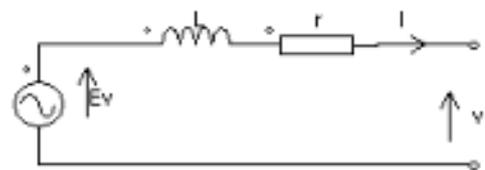
Le schéma équivalent par phase ci après dit de Behn Eschenburg est la façon la plus simple de rendre compte du fonctionnement en charge d'un générateur alternatif.

La rotation crée une fem  $E_v$  dans les bobinages. L'inductance L représente le flux du bobinage statorique. La résistance r (souvent on prend :  $r=0$ ) représente la résistance des bobinages.

Le schéma équivalent par phase devient :

Réactance synchrone :  $X_s = L\omega$ .

$\underline{V}$  est la tension simple disponible.



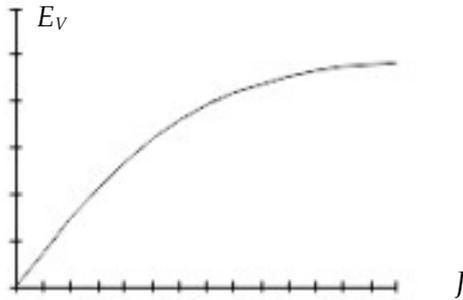
L'équation de la maille est:  $V = E_v - jL\omega I - rI$ .

### B) DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DU SCHÉMA ÉQUIVALENT PAR PHASE:

#### 1. Caractéristique à vide:

Le flux produit par le rotor dépend :

- de la vitesse (n) du rotor,
- du champ magnétique crée par le courant continu d'excitation J au rotor.

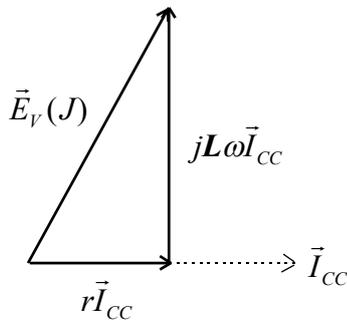


- Manipulation : Mesure de la tension entre phases à vide  $E_U$  en fonction du **courant d'excitation J**.
- Tracé de la tension simple:  $E_v = \frac{E_U}{\sqrt{3}} = f(J)$
- Il y a saturation magnétique. Le modèle choisi (Behn Eschenburg) n'en tient pas compte. On devra travailler dans la zone J faible pour laquelle E(J) est une droite

2. Résistance par phase:

- On mesure la résistance à chaud entre deux phases.

3. Mesure de Xs : Essai en court circuit:



Cas du neutre accessible :

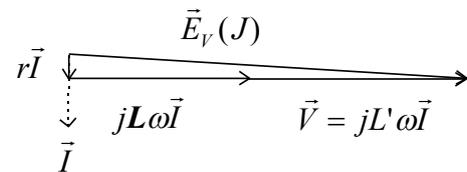
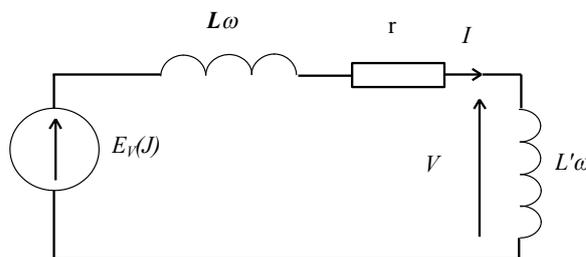
ATTENTION : le stator est en court-circuit

- La machine est entraînée à vitesse nominale, on règle le courant J pour obtenir le courant statorique  $I = I_{CC}$  nominal.

• On calcule  $L\omega = \sqrt{\left(\frac{E_v}{I_{CC}}\right)^2 - r^2} \approx \frac{E_v}{I_{CC}}$  car, en général,  $r \ll L\omega$ .

4. Mesure de Xs : Essai en débit réactif (dit essai en "dewatté"): pour les fortes valeurs de J

- On fait débiter la machine à courant nominal sur une inductance pure. On relève J, V et I. On est dans le cas :



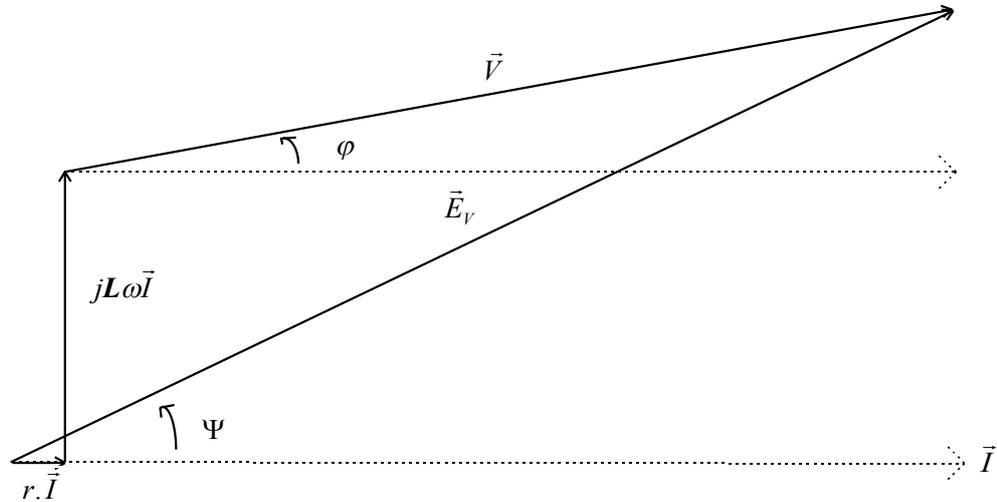
• On a  $r \ll L\omega + L'\omega \Rightarrow L\omega = \frac{E_v(J) - V}{I}$ .

- remarque: les deux essais peuvent donner des valeurs de  $L\omega$  différentes.
- Essai en court circuit: valeur à utiliser pour les faibles valeurs de J.
- Essais en "dewatté": valeurs à utiliser pour les fortes valeurs de J.

2. CONSTRUCTION DE FRESNEL DES GRANDEURS D'UNE PHASE.

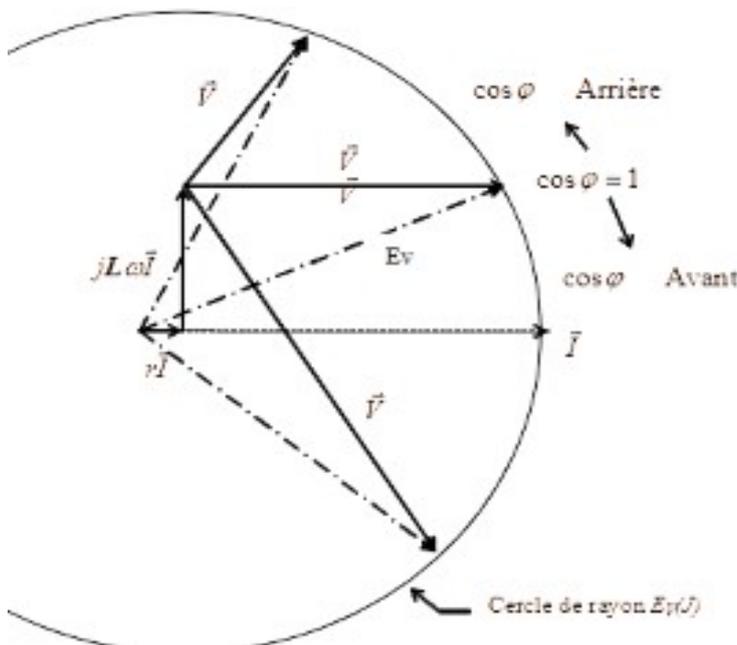
On obtient le diagramme de Behn Eschenburg par construction de Fresnel :

Dans la construction ci-dessous, on a pris  $I$  comme origine des phases, dans le cas du couplage au réseau, on prendra  $V$  comme origine des phases.

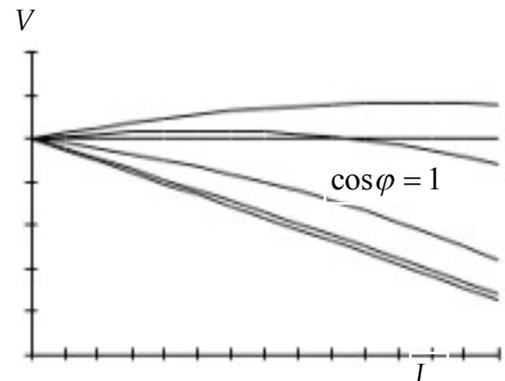


**3. CARACTÉRISTIQUES EN CHARGE D'UN ALTERNATEUR ISOLÉ :**

La tension  $V$  peut varier en fonction de la charge, l'excitation (donc la fem  $E_v$ ) restant constante.



On obtient un réseau de caractéristiques  $V=f(I)$ ; avec  $E_v(J)=cste$  pour plusieurs valeurs de  $\cos \varphi=cste$ .



Si  $I=Cte$ , en fonction du déphasage, la tension  $V$  ne sera pas la même.

**Conséquences :**

- Si  $n$  varie, il faudra régler la valeur de  $J$  pour garder la tension  $V$  constante.
- Pour les déphasages arrières forts, le maintien de la tension  $V$  pour  $0 < I < I_N$  nécessiterait un courant d'excitation  $J$  excessif (d'où le relèvement du facteur de puissance).

**4. CARACTÉRISTIQUES EN CHARGE D'UN ALTERNATEUR RELIÉ À UN RÉSEAU PUISSANT :**

A) CONDITIONS DE COUPLAGE D'UN ALTERNATEUR AU RÉSEAU (FONCTION DU SYNCHROCOUPLEUR) :

Essais de système 1<sup>o</sup> année :

les tensions réseau et aux bornes de l'alternateur doivent avoir :

- même valeur efficace
- même fréquence
- une différence de phase entre les 2 systèmes triphasés nulle.

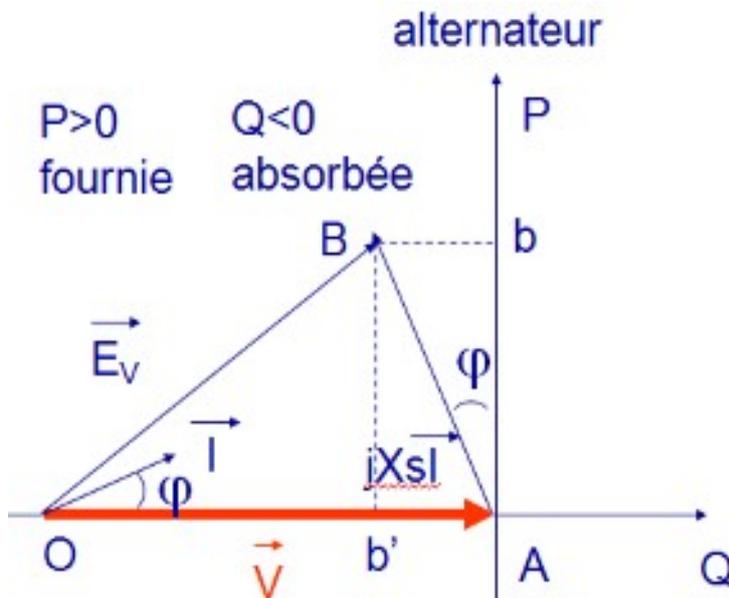
Sinon, un court circuit (du à un couple énorme) se produira et endommagera les systèmes de protection.

B) RÉGLAGE DES PUISSANCES :

**La puissance active** sera réglée par la quantité de puissance récupérée sur l'arbre. Cette puissance est de nature mécanique : hydraulique (hydroélectricité, marée motricité), vent (éolien), vapeur (nucléaire)...

Réglage de **la puissance réactive** :

La tension  $V$  est imposée par le réseau et ne pourra pas varier.



Lorsque l'alternateur fournit la même quantité de puissance active :

En jouant sur la valeur de l'excitation ( $J$ ) la valeur de  $E_v$  change . Le point B se déplace sur la droite horizontale passant par b. ( $E_v$  est petit dans l'exemple)

Le point b' peut être d'un côté ou de l'autre de l'axe vertical, le sens de l'échange de puissance réactive peut s'inverser.

À puissance active fournie constante, on règle le signe et la quantité de puissance réactive échangée par l'excitation  $J$ .

L'alternateur pourra absorber ou fournir de la puissance réactive.

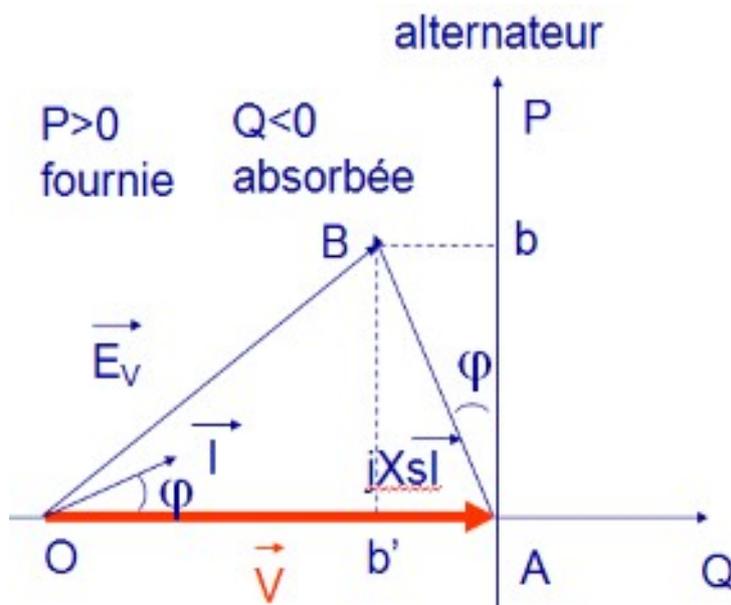
**5. LECTURE DES PUISSANCES SUR LE DIAGRAMME DES PUISSANCES.**

- On néglige la résistance  $r$ , on ne tient compte que de la réactance synchrone (simplification).
- Conventions de signe :
  - $P > 0$  ou  $Q > 0$  : l'alternateur fournit les puissances.
  - $Q < 0$  : l'alternateur absorbe la puissance réactive.

Lecture à partir de la construction de Fresnel lorsque la tension simple  $\vec{V}$  du réseau (elle reste constante) est à l'origine des phases.

**Tracé des axes des puissances**

Pour lire les puissances sur le diagramme de Fresnel, on trace l'axe  $Q$  des puissances réactives dans le prolongement de la tension  $\vec{V}$ . On trace l'axe  $P$  des puissances actives perpendiculairement à l'axe  $Q$ , et passant par le point A.



On a  $Ab = X_s I \cos \phi$

donc  $P = \frac{3V}{X_s} Ab$

P est proportionnel à Ab.

On a  $Ab' = X_s I \sin \phi$

donc  $Q = \frac{3V}{X_s} Ab'$

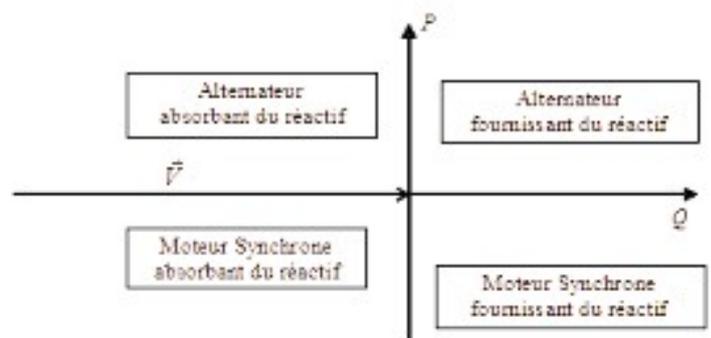
Q est proportionnel à Ab'

Ces deux axes divisent le plan en quatre quadrants qui définissent le comportement de la machine.

Si  $P > 0$  : moteur ; si  $P < 0$  : alternateur.

Si  $Q > 0$ ,  $Q$  est fournie ;

Si  $Q < 0$ ,  $Q$  est absorbée



### 3. MOTEUR SYNCHRONES ( BRUSHLESS )

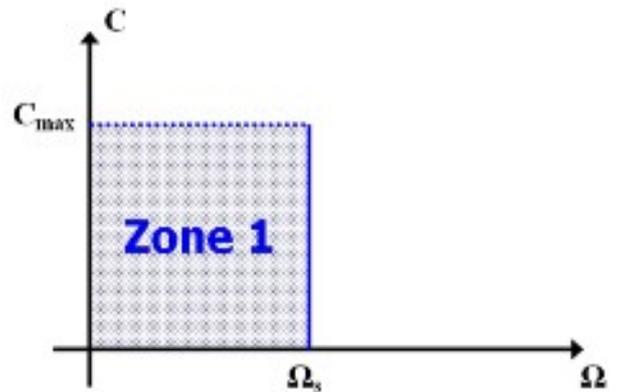
#### 1. CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE ET DÉMARRAGE

Quel que soit le couple, la vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation, la caractéristique se résume à un segment de droite vertical.

Compte tenu de l'inertie du rotor et de la trop grande vitesse du champ magnétique tournant, le moteur synchrone ne peut pas démarrer directement sur le réseau 50Hz, il faudra obligatoirement l'associer à un variateur de vitesse (la consigne de vitesse augmentant de 0 à la valeur désirée).

A l'aide d'un variateur de fréquence, on peut réaliser un fonctionnement dans la zone 1.

Le problème de la zone 1, est de pouvoir garder le contrôle du couple. Pour cela, on réalise un asservissement de la MS. On dit que la machine est **autopilotée**.



#### 2. CONTRÔLE DU COUPLE

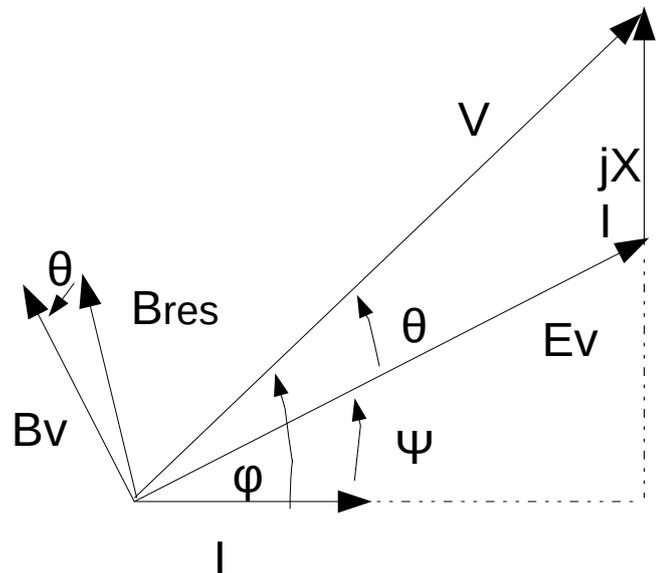
Le stator de la machine parcouru par un système de courants triphasés équilibrés engendre un champ magnétique tournant  $B_v$ .

Le champ magnétique du rotor est noté  $B_{res}$ .

Après le démarrage, le champ magnétique  $B_{res}$  porté par l'arbre du moteur tourne de manière synchrone (même vitesse) avec le champ tournant  $B_v$ .

$B_v$ .

Le couple est donné par :  $\vec{T}_{em} = k \vec{B}_v \wedge \vec{B}_{res}$  :



A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. (  $T_{em}$  faible )

En charge, le courant I augmente, les axes de Ev et V se décalent de l'angle  $\theta$  (angle interne) et montrent que le couple augmente. L'angle  $\theta$  augmente avec la charge



Plusieurs modes de réglage du couple en fonction des grandeurs sur lesquelles on peut agir :

$$P_{\text{électrique}} = P_{\text{mécanique}} = C \cdot \Omega_s = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\phi) = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos(\Psi) = \frac{3 V E_V}{X_s \Omega_s} \sin \theta$$

- $C_{em} = k \Phi_V I \cos \phi$  . On peut fixer  $\Phi_V$  à partir d'une loi à V/f constant. Dans ce cas, à  $\Phi_V$  fixé, le couple est proportionnel au courant de phase I (cas de la MCC)
- $C_{em} = k \Phi_{res} I \cos \psi$  Alimentation par courant imposé. Associé à un onduleur de courant, on dispose de 3 grandeurs de réglage indépendantes : I (valeur efficace du courant de phase),  $\Phi_{res}$  réglable par J et  $\Psi$  (angle I,  $E_V$ ) réglable par autopilotage.
- $C_{em} = k \Phi_{res} \Phi_V \cos \theta$  Alimentation par tension imposée. On dispose de 3 grandeurs de réglage indépendantes :  $\frac{V}{\omega} = N \Phi_V$ ,  $\Phi_{res}$  réglable par J et  $\theta$  (angle interne) réglable par autopilotage.

La charge ne doit pas dépasser l'effort maximal, sinon, le moteur décroche. Les **avantages et inconvénients** du moteur synchrone sont repris ci-dessous :

#### Avantages

- Il peut travailler avec un facteur de puissance proche de 1 ( $\cos \varphi \approx 1$ ). Il contribue donc à redresser le  $\cos \varphi$  global de l'installation électrique.
- la vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge.
- La puissance massique est grande.

#### Inconvénients

- S'il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer.
- il peut décrocher en cas de forte charge

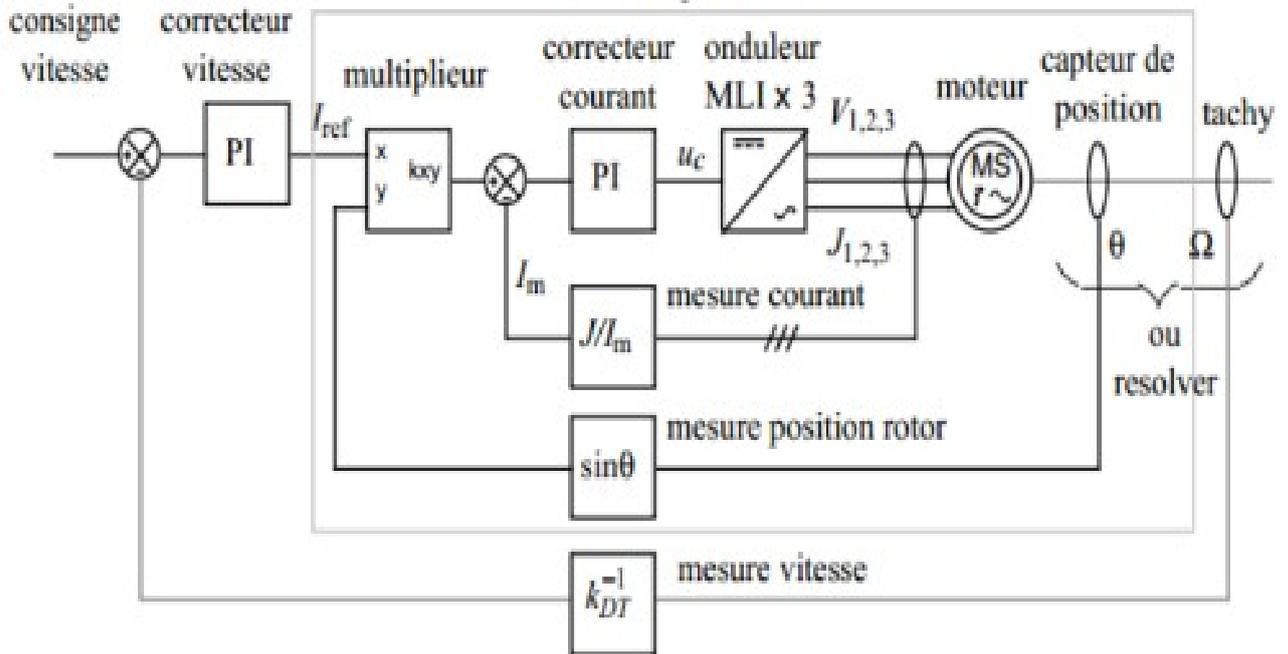
### 3. MOTEUR SYNCHRONNE AUTOPILOTÉ : MOTEUR BRUSHLESS

Dans une machine synchrone, l'**autopilotage** consiste, grâce à une boucle d'asservissement, à maintenir l'angle entre les champs statorique et rotorique **constant**.

Le rotor du **moteur Brushless** est composé d'aimants permanents. Le flux  $\Phi_V$  du champ magnétique créé par les aimants permanents du rotor est constant.

**4. STRUCTURE DE L'AUTOPILOTAGE**

Représentation succincte de la boucle de régulation de la vitesse



**5. FONCTIONNEMENT DE L'AUTOPILOTAGE :**

A l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs synchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse. Des **capteurs de position et de vitesse** permettent de connaître la position et la vitesse en temps réel, ces informations sont comparées à la consigne.

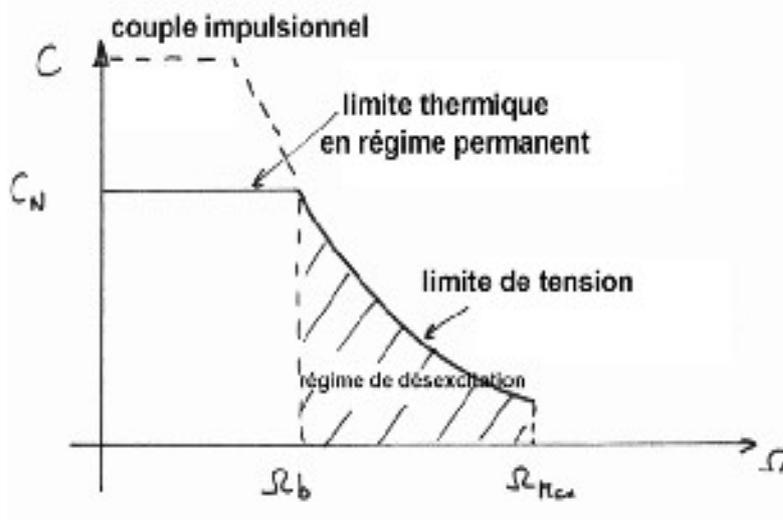
En fonction de la valeur mesurée, le système calcule la valeur du couple à fournir. Ce couple doit être obtenu pour certaines valeurs de courant (consigne de courant). La mesure des courants comparée à la consigne permet d'établir la commande de l'onduleur.

Le cycle de fonctionnement sera programmé ; les rampes de couple seront établies à partir des consignes de vitesse.

## 6. AVANTAGES DU MOTEUR BRUSHLESS

- possibilité d'accélération élevée sans limitation due à la commutation.
- temps de démarrage court (  $n_{max}$  atteinte en moins d'1 s).
- rendement élevé sur toute la gamme de vitesse ( $\eta = 0,94$ ).
- gamme de vitesse importante (1 750 à 7 000 tr.min<sup>-1</sup>)
- puissance massique élevée (bon rapport entre puissance et encombrement)

## 7. FONCTIONNEMENT AUX LIMITES



Variation de la vitesse à couple constant (moteur synchrone).

Commentaires sur le fonctionnement :

En régime de désexcitation (survitesse), le couple fourni par le moteur est limité par la puissance.

Pour une vitesse inférieure à la vitesse  $\Omega_b$ , le couple peut être supérieur au couple nominal de façon transitoire (couple impulsionnel). Le problème sera d'expulser la chaleur du moteur pour les faibles vitesses : nécessité d'une ventilation auxiliaire.

## 4. BILAN DES PERTES ET RENDEMENT

### 1. LA PUISSANCE REÇUE :

L'alternateur reçoit une puissance mécanique  $P_M$  sur l'arbre :  $P_M = T_M \cdot \Omega$

### 2. LES PERTES COLLECTIVES :

Ce sont des pertes mécaniques ( $P_m$ ), qui ne dépendent que de la fréquence de rotation et les pertes dans le fer ( $P_f$ ), qui ne dépendent que de la fréquence et de la valeur maximale du flux. Ces pertes seront mesurées au cours d'un essai à vide dans lequel la machine tourne à la fréquence de rotation nominale, sous une tension égale à la tension qu'elle aurait en charge. En effet, l'égalité des tensions efficaces entraîne celle des flux.

### 3. LES PERTES PAR EFFET JOULE DANS L'INDUCTEUR :

$U_e$  : Tension aux bornes de l'inducteur.

$$P_{je} = U_e \cdot I_e$$

$I_e$  : Intensité du courant d'excitation.

### 4. LES PERTES PAR EFFET JOULE DANS L'INDUIT :

En triphasé : $r$ : Résistance mesurée entre deux bornes de phase de la machine. $I$ : Intensité efficace du courant de ligne. $P_j = \frac{3}{2} r \cdot I^2$	En monophasé : $r$ : Résistance de l'enroulement induit. $I$ : Intensité efficace du courant débité par l'induit. $P_j = r \cdot I^2$
---	--

### 5. RENDEMENT :

En triphasé :

rendement de la machine

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{UI\sqrt{3}\cos\varphi + P_m - P_{je} + P_j}$$

rendement de l'induit

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{UI\sqrt{3}\cos\varphi + P_m - P_{je}}$$

En monophasé :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\cos\varphi}{UI\cos\varphi + P_m - P_{je} + P_j}$$

rendement de l'induit

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\cos\varphi}{UI\cos\varphi + P_m - P_{je}}$$