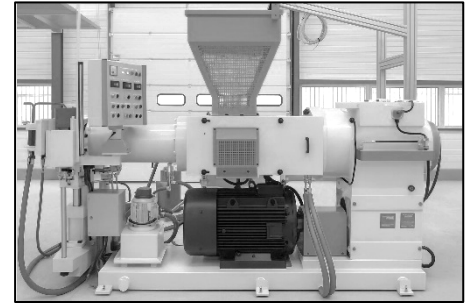


## Chapitre 11 : Machines synchrones triphasées

### I. Introduction

La machine synchrone est une machine réversible capable de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateur) ou l'inverse en fonctionnement moteur. L'essor de l'électronique de puissance a favorisé l'utilisation des moteurs synchrones à aimants permanents, plus compacts, efficaces et fiables grâce à l'absence de collecteur et de balais.

Leur vitesse de rotation reste strictement proportionnelle à la fréquence d'alimentation, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant une grande précision. Ces machines couvrent un vaste domaine de puissance, allant des servomoteurs de la robotique aux systèmes de production d'électricité et de traction ferroviaire.

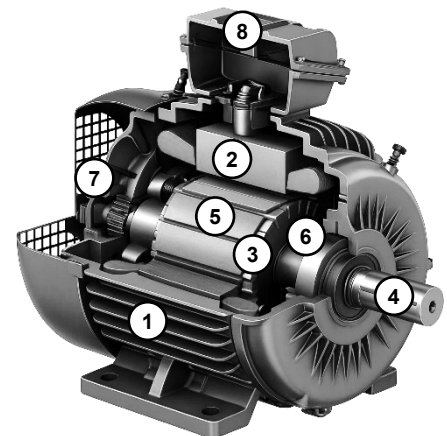


### II. Constitution de la machine synchrone

La machine synchrone se compose principalement de :

- **Stator (ou Induit) :** muni de **trois** enroulements pouvant être raccordés en étoile (Y) ou en triangle ( $\Delta$ ), selon le type de réseau d'alimentation.
- **Le rotor (Inducteur) :** Le rotor, de forme cylindrique, peut comporter soit un **enroulement monophasé d'excitation** (d'où son nom Inducteur) parcouru par un courant continu, soit des aimants permanents placés en surface ou intégrés dans le rotor.

Lorsqu'il s'agit d'un rotor bobiné, son alimentation en courant continu est assurée par un dispositif de contacts frottant composé de bagues et de balais.



|   |                   |   |                            |   |                         |   |                |
|---|-------------------|---|----------------------------|---|-------------------------|---|----------------|
| 1 | Carter à ailettes | 3 | Rotor (Aimants en surface) | 5 | Aimants permanents      | 7 | Ventilateur    |
| 2 | Stator            | 4 | Arbre moteur               | 6 | Roulements et graissage | 8 | Boîte à bornes |

Les machines synchrones se distinguent par deux types de rotors. Le **rotor à pôles lisses** possède un entrefer constant, garantissant une répartition magnétique homogène sans variation de réluctance. En revanche, le **rotor à pôles saillants** présente un entrefer variable selon la position angulaire, ce qui introduit une hétérogénéité magnétique et une variation de réluctance dans le circuit.

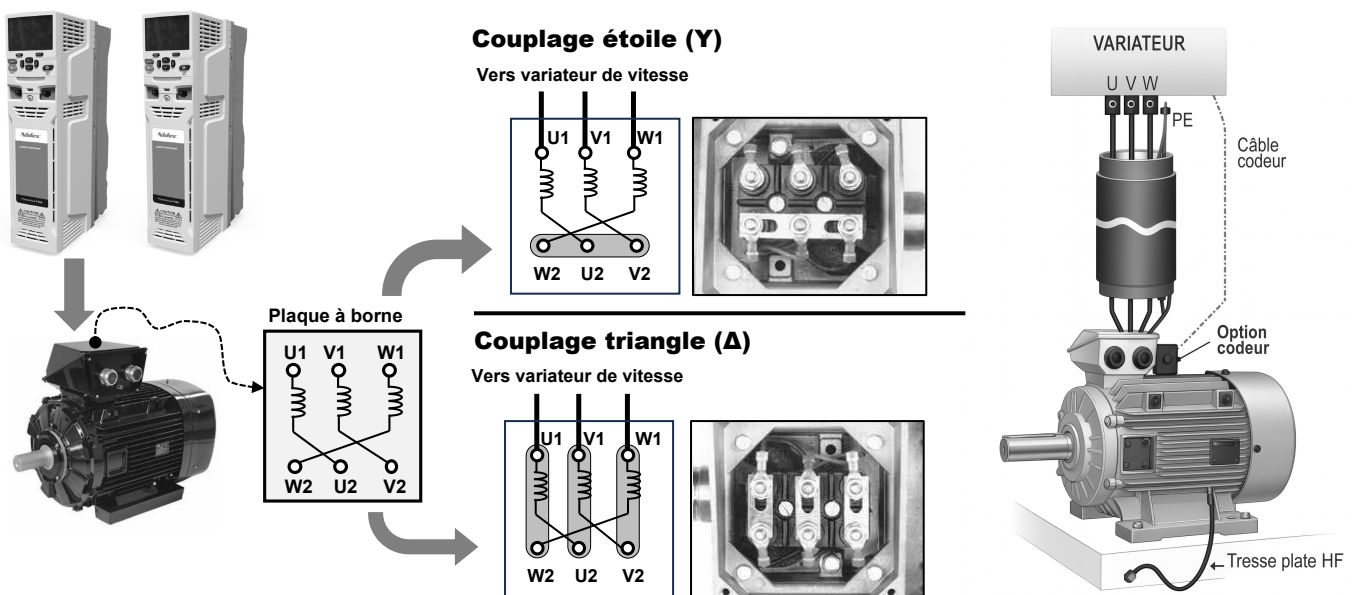
| Inducteur (rotor) à pôles lisses |                  |                    |                 | Inducteur à pôles saillants |
|----------------------------------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| Concentration de flux            | Aimants enterrés | Aimants en surface | Aimants insérés | Inducteur bobiné p = 4      |
|                                  |                  |                    |                 |                             |

Aujourd'hui, Les moteurs synchrones à aimants permanents (**MSAP**) sont largement utilisés grâce à leur vitesse proportionnelle à la fréquence, leur compacité et l'absence de collecteur mécanique. Cela élimine balais et pertes rotoriques, simplifie la construction, accroît la durée de vie et réduit l'entretien.



### III. Plaque à bornes, plaque signalétique et choix du couplage

Le stator d'une machine synchrone triphasée comporte trois enroulements identiques, pouvant être couplés en **étoile (Y)** ou en **triangle ( $\Delta$ )**. Le choix du couplage dépend à la fois des caractéristiques du **variateur de vitesse** (*la machine n'étant pas conçue pour être raccordée directement au réseau*) et les caractéristiques indiquées sur la plaque signalétique.



#### 1- Choix de couplage

Pour déterminer le couplage approprié d'une machine synchrone (**MS**), il est indispensable de connaître au préalable la **tension nominale du variateur de vitesse** ainsi que les **tensions nominales recommandées** par le **constructeur**, généralement indiquées sur la plaque signalétique de la machine (**MS**). On distingue :

| Variateur de vitesse 3~ (V.V) : 230 / 400V                                                                                                                         | Machine MS : 230 V / 400 V                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Tension simple <math>V_{VAR}</math> : <u>230 V</u></li> <li>Tension composée <math>U_{VAR}</math> : <u>400 V</u></li> </ul> | La tension supportée par un enroulement $V_{MS}$ :<br><u><math>V_{ns} = 230 V</math></u> |

#### Méthode de choix :

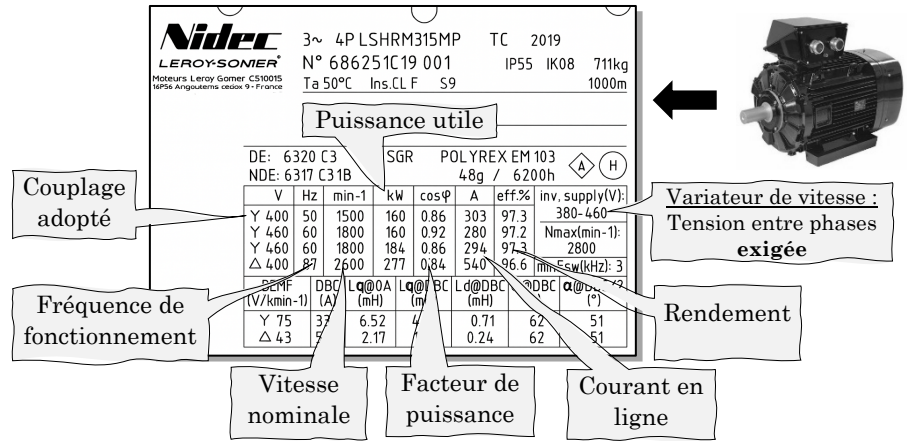
- Si la tension d'emploi (supportée)  $V_{MS}$  correspond à la tension simple du variateur  $V_{VAR}$  : **couplage étoile (Y)**
- Si la tension d'emploi  $V_{MS}$  correspond à la tension composée du variateur  $U_{VAR}$  : **couplage triangle ( $\Delta$ )**

#### 2- Plaque signalétique

La plaque signalétique d'une machine asynchrone fournit les données essentielles du constructeur : modèle, caractéristiques électriques et mécaniques, conditions nominales. Elle est indispensable pour déterminer le couplage, assurer un raccordement correct et garantir une exploitation sûre et optimale.

Si l'on opte pour le couplage Triangle ( $\Delta$ ) :

- Tension d'alimentation : **230/400 V**
- Fréquence d'emploi : **87 Hz**
- Vitesse nominale : **2600 tr/min**
- Puissance nominale : **277 kW**
- Facteur de puissance : **0.84 AR**
- Courant en ligne nominal : **540 A**
- Rendement : **96.6 %**
- Variateur de vitesse : **400V**

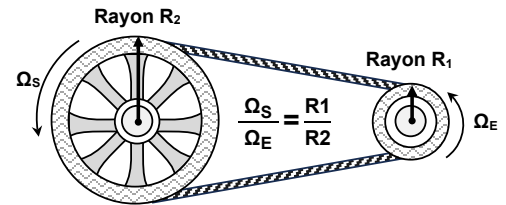


**Remarque :** Le choix du couplage peut aussi se faire en consultant le symbole (Y ou  $\Delta$ ) inscrit sur la plaque signalétique par le constructeur, afin d'adapter le raccordement à la tension nominale délivrée par le variateur de vitesse (V.V).

|                      |                                                                                                                          |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Y 460 (60Hz)</b>  | Si la tension <b>entre phases</b> (composée) du V.V est <b>460 V(60Hz)</b> , il faut choisir le couplage <b>étoile</b>   |
| <b>Δ 400 (87 Hz)</b> | Si la tension <b>entre phases</b> (composée) du V.V est <b>400 V(87Hz)</b> , il faut choisir le couplage <b>triangle</b> |

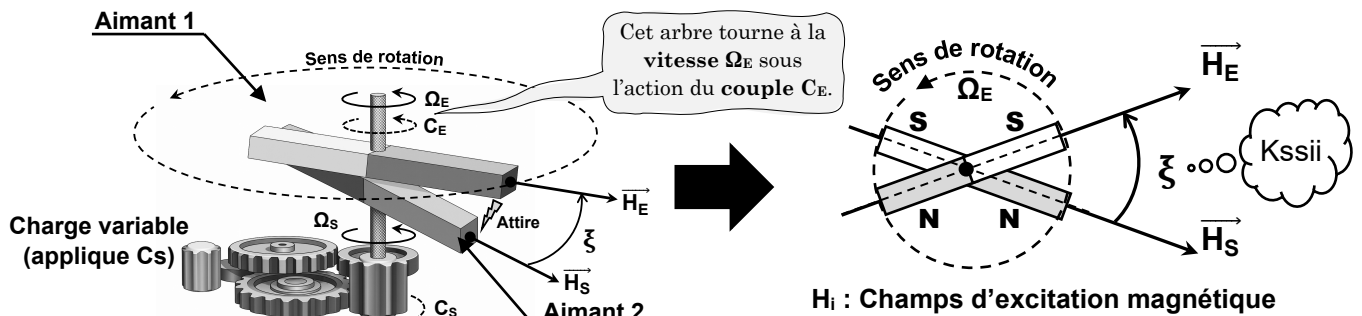
#### IV. Notion de synchronisme

Pour comprendre le fonctionnement des machines synchrones, il est essentiel de commencer par le principe de synchronisme. L'explication s'appuie d'abord sur une analogie avec une transmission mécanique par poulie-courroie, avant d'évoluer vers une comparaison fondée sur l'interaction d'aimants magnétiques.



Cette transmission mécanique peut fonctionner en **synchronisme**. En effet, lorsque les rayons des deux poulies sont égaux ( $R_1 = R_2$ ), leurs axes respectifs tournent à la même vitesse ( $\Omega_s = \Omega_E$ ) et conservent une parfaite synchronisation.

À présent, le même principe est transposé à une transmission magnétique, réalisée à l'aide de deux aimants permanents produisant respectivement les champs magnétiques  $H_1$  et  $H_2$ .



Lorsque l'**aimant (1)** est entraîné en rotation, il exerce une force d'attraction sur l'**aimant (2)**, entraînant à son tour sa rotation par l'interaction des champs magnétiques  $\vec{H}_E$  et  $\vec{H}_S$ . De ce fait, un **couple ( $C_E$ )** est appliqué à la charge qui est reliée à l'aimant (2). Cependant, en raison du couple **résistant  $C_s$**  exercé par la charge, l'axe de l'aimant (2) présente un décalage par rapport à celui de l'aimant (1), caractérisé par l'**angle  $\xi$** . Donc le couple  $C_E$  produit :  $C_E = k \cdot H_E \cdot H_S \cdot \sin(\xi)$

On distingue alors **trois cas** :

- ➔ **Fonctionnement à vide** :  $\xi = 0 \Rightarrow C_E = 0$ , donc la vitesse  $\Omega_E = \Omega_s$  la synchronisation est **garantie**.
- ➔ **Sous charge croissante** : une **augmentation** du couple  $C_s$  entraîne un décalage des axes, donc une augmentation de  $\xi$ , et par conséquent une élévation du couple  $C_E$ . Aussi à vitesse  $\Omega_E = \Omega_s$  la synchronisation est **garantie** ( $\xi = Cte$ ).
- ➔ **Au-delà de la limite de la stabilité** : si  $\xi > 90^\circ$  (soit  $C_s > C_{Emax}$ ), le couple  $C_E$  diminue malgré l'accroissement de  $C_s$ . La transmission devient alors instable : **On dit que le système décroche** :  $\Omega_E > 0$ , mais  $\Omega_s = 0$  !!!

**Remarque importante :** Le fonctionnement d'une machine synchrone repose sur le principe de la transmission magnétique synchrone, tout en présentant certaines limites propres à ce mode de transmission

## V. Principe de fonctionnement de la machine synchrone en moteur

☑ **Ferraris :** Les enroulements statoriques sont déplacés géométriquement de  $120^\circ$  et alimentés par des courants triphasés de pulsation  $\omega_s$  ( $\omega_s = 2\pi \cdot f$ ), ce qui crée un champ magnétique tournant ( $\vec{B}_s$ ), tourne à une vitesse synchronisme  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ , où  $p$  représente le nombre de paires de pôles au stator.

☑ Un courant d'excitation continu appliqué au bobinage du rotor, ou la présence d'aimants permanents (comme la montre la figure), crée un champ magnétique ( $\vec{B}_r$ ) solidaire du rotor et donc fixe par rapport à celui-ci.

☑ L'interaction entre le champ du rotor ( $\vec{B}_r$ ) et celui du stator ( $\vec{B}_s$ ) produit un couple électromagnétique  $C_{em}$  :

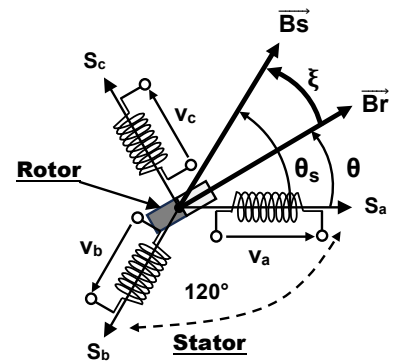
$$C_{em} = k \cdot \vec{B}_s \wedge \vec{B}_r \Rightarrow C_{em} = K \cdot B_s \cdot B_r \cdot \sin(\xi) \quad \text{avec : } \xi = \theta_s - \theta$$

☑ L'angle entre le champ tournant ( $\vec{B}_s$ ) et le champ rotorique ( $\vec{B}_r$ ) reste constant, ce qui garantit la synchronisation :

$$\text{On a : } \xi = \theta_s - \theta \Rightarrow \frac{d\xi}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt}, \text{ et puisque } \xi = C_{te} \Rightarrow \Omega_s - \Omega = 0 \Rightarrow \Omega = \Omega_s \text{ (synchronisation)}$$

Ainsi, la vitesse du rotor  $\Omega$  est égale à celle du champ tournant  $\Omega_s$ , assurant un couple moyen constant et non nul, permettant à la machine de tourner de façon régulière (C'est pour cette raison qu'on l'appelle machine synchrone).

☑ À vide ( $C_{em} = 0$ ), les champs sont alignés ( $\xi = 0$ ). Sous charge (ou en charge), un décalage apparaît entre les deux champs d'un angle  $\xi$ , mais le rotor conserve la vitesse du champ tournant  $\vec{B}_s$ . Le couple maximal  $C_{max}$  est atteint pour ( $\xi = 90^\circ$ ). Si le couple résistant de la charge dépasse cette valeur, le moteur décroche et s'arrête.



## VI. Modèle électrique monophasé d'une machine synchrone (moteur)

### 1. Force électromotrice induite dans un enroulement statorique.

Lorsqu'un enroulement statorique est soumis au champ magnétique tournant du rotor, il devient le siège d'une force électromotrice  $e(t)$ . La pulsation de cette f.é.m. est donnée par  $\omega = p \cdot \Omega$ , avec  $\Omega$  la vitesse de rotation et  $p$  le nombre de paires de pôles (soit une fréquence  $f = p \cdot N$ ). La valeur efficace de cette f.é.m. est :

$$E = 2,22 \cdot K \cdot N \cdot \Phi_M \cdot f$$

**N :** Nombre de conducteurs actifs par enroulement (ou phase)

**$\Phi_M$  :** flux maximal sous un pôle créé par le rotor,

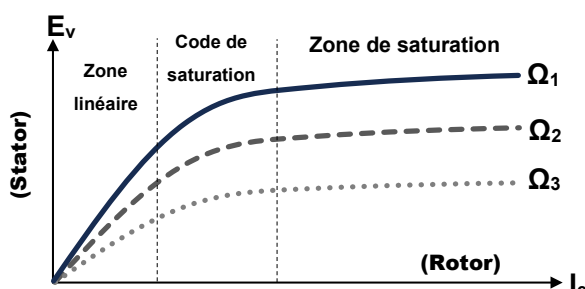
**f :** Fréquence des courants statoriques en Hz

**K :** Coefficient de bobinage (généralement très proche de 1).

Le produit  $2,22K$  est appelé **coefficient de Kapp**.

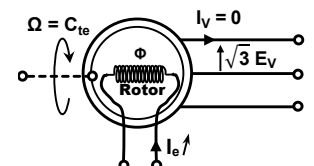
### ☑ Caractéristique à vide : $E_v = f(I_e)$ à $N = C_{te}$

Le schéma illustre l'évolution de la tension  $E_v$  aux bornes d'une phase du stator selon le courant d'excitation  $I_e$ . La vitesse étant constante, toute variation de  $I_e$  modifie directement la f.é.m. induite.



On y distingue une zone linéaire où la tension efficace est proportionnelle au courant d'excitation du rotor ( $E_v = K_{ev} \cdot I_e$ ), et une zone de saturation qui ne sera pas étudiée ici.

**Remarque :** Le flux maximal  $\Phi_M$  est commandé par le courant d'excitation  $I_e$ . Ainsi, dans la zone linéaire et pour une vitesse constante, on obtient :  $E = 2,22 \cdot K \cdot N \cdot \Phi_M \cdot f \Rightarrow E = K_{ev} \cdot I_e$



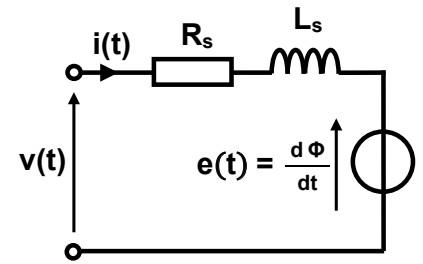
## 2. Modèle monophasé de la machine synchrone : modèle Behn Eschenburg

Ce modèle repose sur l'hypothèse de **linéarité** du circuit magnétique (relation  $\mathbf{E} = \mathbf{f}(\mathbf{I}_e)$ ), ce qui justifie l'emploi des inductances (propre et mutuelle) dans la modélisation. Il représente correctement les machines **synchrone à rotor lisse**, qu'il s'agisse d'un **rotor bobiné** ou d'un **rotor à aimants en surface**. Bien que ce modèle reste limité sur le plan quantitatif, il offre une description qualitative satisfaisante du comportement de la machine synchrone en régime sinusoïdal.

Dans ce modèle, chaque phase de la machine synchrone est représentée par un circuit équivalent série constitué d'une **résistance synchrone**  $R_s$ , d'une **inductance synchrone**  $L_s$ , et d'une **force électromotrice**  $e(t)$ .

D'après le schéma, l'équation de maille :

$$v(t) = R_s i(t) + L_s \frac{di(t)}{dt} + e(t)$$



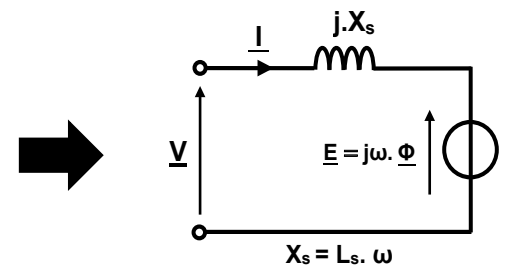
## 3. Diagramme synchrone de la machine synchrone

Le diagramme synchrone a pour objectif de représenter, sous forme vectorielle, les relations entre tensions, courant, f.é.m. et angles caractéristiques d'une machine synchrone en régime permanent.

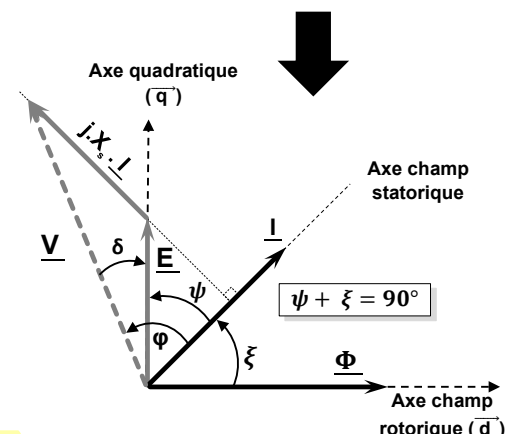
### Hypothèses :

- Les pertes magnétiques sont faibles, leur influence sur les formes d'onde étant négligeable.
- On suppose que toutes les grandeurs électriques sont sinusoïdales.
- Les pertes par effet Joule sont considérées négligeables.

On retrouve ci-dessus la représentation du diagramme synchrone.



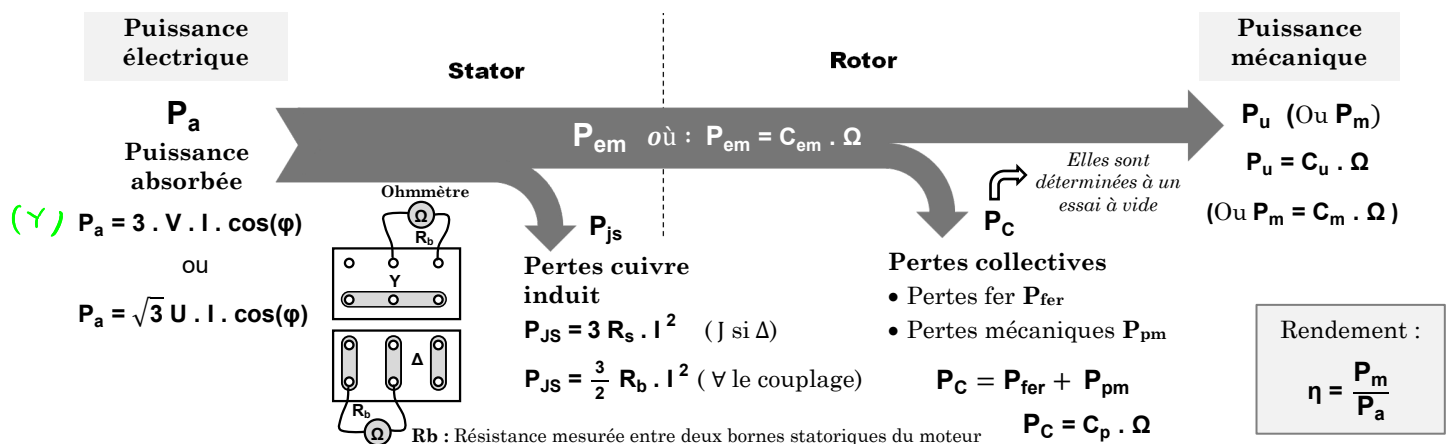
| Angle     | Désignation                                                                                                                                                                                                       |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\xi$     | Angle entre les champs rotorique $\mathbf{B}_r$ et statorique $\mathbf{B}_s$ .                                                                                                                                    |
| $\varphi$ | Déphasage entre le courant $\mathbf{I}$ et la tension simple $\mathbf{V}$                                                                                                                                         |
| $\delta$  | Angle mécanique interne de la machine                                                                                                                                                                             |
| $\psi$    | <b>Angle d'autopilotage</b> (entre $\mathbf{E}$ et $\mathbf{I}$ )<br><i>C'est un angle fondamental, déterminant à la fois l'expression du couple électromagnétique de la machine et les lois de son contrôle.</i> |



## VII. Machine synchrone en fonctionnement moteur (autopiloté)

### 1. Bilan de puissances

La puissance électrique fournie à une machine synchrone suit un parcours précis : elle entre au stator, se transforme en énergie électromagnétique, puis en puissance mécanique transmise au rotor, avant d'être restituée sur l'arbre de sortie. Chaque étape s'accompagne de pertes caractéristiques à la conversion et à la transmission.





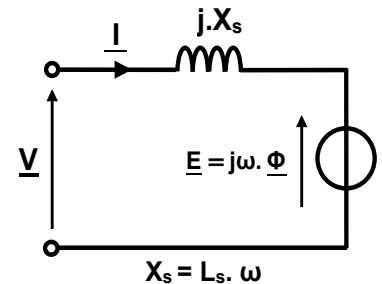
## 2. Couple mécanique $C_m$ (ou $C_u$ )

Le couple électromagnétique développé par une machine synchrone traduit l'interaction entre le champ tournant statorique et le champ rotorique. Sa connaissance est fondamentale pour comprendre le **démarrage**, le **fonctionnement en charge** et la **stabilité mécanique** du moteur.

### Hypothèses :

On aboutit au schéma équivalent ci-après, en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Les pertes magnétiques sont faibles, leur influence sur les formes d'onde étant négligeable.
- On suppose que toutes les grandeurs électriques sont sinusoïdales.
- Les pertes par effet Joule sont considérées négligeables.
- Les pertes mécaniques sont faibles :  $C_m \approx C_{em}$ .
- La synchronisation est garantie ( $\xi = Cte$ ) :  $\Omega = \Omega_s$  avec  $\Omega_s = \omega/p$



La puissance électrique absorbée  $P_a$  par le moteur s'exprime par :

$$P_a = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Puisque les pertes sont négligées, la puissance absorbée  $P_a$  est égale à la puissance électromagnétique  $P_{em}$ , c'est-à-dire la puissance transmise à travers l'entrefer. C'est cette puissance qui engendre le couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$P_{em} = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

On en déduit l'expression du couple électromagnétique  $C_{em}$  :  $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s}$

$$C_{em} = \frac{3 \cdot V \cdot I}{\Omega_s} \cdot \cos(\varphi)$$

D'après le diagramme de Fresnel ci-contre, en projetant les vecteurs  $V$  et  $E$  sur le vecteur du courant  $I$ , on obtient :

$$E \cdot \cos(\psi) = V \cdot \cos(\varphi)$$

En remplaçant dans l'expression du couple électromagnétique, on obtient :  $C_{em} = \frac{3EI}{\Omega_s} \cdot \cos(\psi)$

Comme  $E = j\omega \cdot \Phi$  et aussi  $\Omega = \Omega_s = \omega/p$ , ce qui donne :  $E = \omega \cdot \Phi \Rightarrow E = p \cdot \Phi \cdot \Omega$

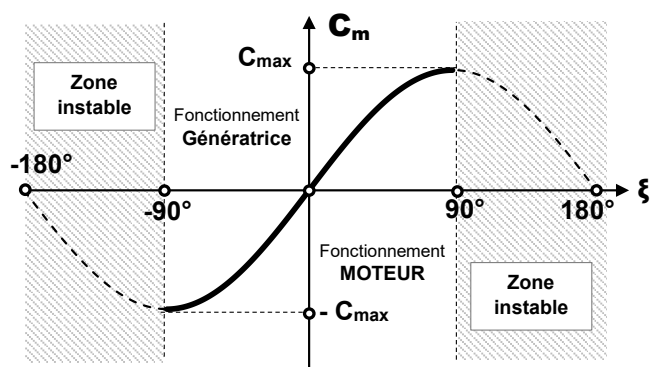
Étant donné que les pertes mécaniques sont négligeables ( $C_m \approx C_{em}$ ), le couple mécanique peut s'écrire :

$$C_m \approx C_{em} = \frac{3 \cdot p \cdot \Phi \cdot \Omega \cdot I}{\Omega_s} \cdot \cos(\psi) \Rightarrow C_m \approx 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I \cdot \cos(\psi)$$

**Remarque :** Cette expression est fondamentale pour la commande des machines synchrones, aussi bien en vitesse qu'en couple.

## 3. Caractéristique du couple mécanique $C_m = f(\xi)$

D'après le diagramme synchrone, on a la relation  $\xi + \psi = 90^\circ$ . Le couple électromagnétique s'exprime alors finalement sous la forme :  $C_m \approx 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I \cdot \sin(\xi)$



À partir de la caractéristique mécanique :

- Le fonctionnement de la machine est stable pour  $\xi \in [-90^\circ; 90^\circ]$
- Le couple atteint sa valeur maximale lorsque l'angle d'autopilotage  $\xi = 90^\circ$  (pour  $\psi = 0$ ) en cas moteur.

**Conclusion :** Le contrôle d'une machine synchrone repose sur la maîtrise du courant de phase I ainsi que de l'angle d'autopilotage  $\psi$ .

## VIII. Contrôle de la machine synchrone : machine synchrone autopiloté

### 1- Problématique

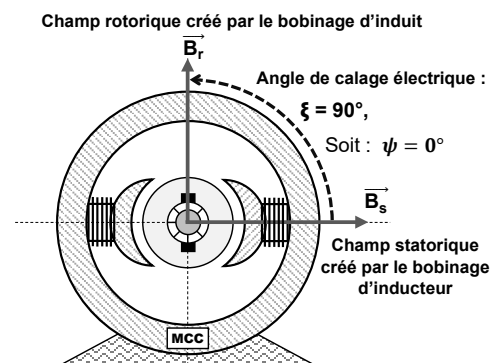
Lorsque la machine synchrone est **accrochée** ( $\xi \leq 90^\circ$ ), la synchronisation est garantie ( $\Omega = \Omega_s$ ), sa vitesse est imposée par la fréquence d'alimentation  $f$  ( $\Omega = \frac{2\pi f}{p}$ ) et le rotor reste accroché au champ statorique  $\vec{B}_s$ . Si le couple résistant augmente ou si l'alimentation subit des fluctuations brutales, le décalage entre les champs augmente. S'il dépasse  $\xi > 90^\circ$ , la machine **décroche** et s'arrête. Pour éviter ce phénomène, **on asservit** la position du **champ rotorique**  $\vec{B}_r$  à celle du **champ statorique**  $\vec{B}_s$ , en imposant leur décalage angulaire : c'est le **mode autopiloté**.

On distingue deux stratégies de commande permettant d'assurer le mode d'autopilotage de la machine synchrone, qui seront abordées dans ce cours :

- ☒ Contrôle scalaire en courant
- ☒ Contrôle vectorielle (appelée aussi commande à flux orienté)

### 2- Objectif de contrôle de la machine synchrone (MS)

L'objectif des deux commandes est de réaliser un **découplage** entre **vitesse** et **couple** similaire au fonctionnement de la **machine à courant continu (MCC)**. Dans cette dernière, le rotor produit un champ  $\vec{B}_r$  et le stator un champ  $\vec{B}_s$ , **naturellement perpendiculaires**. Le **calage** des balais impose alors automatiquement l'**angle d'autopilotage**  $\psi = 0$ .



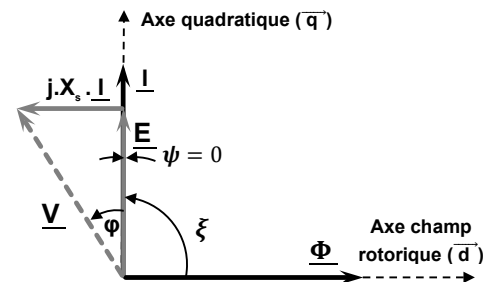
### 3- Contrôle scalaire en courant

La commande scalaire des machines synchrones vise à imposer par **asservissement le maintien** de l'angle d'autopilotage  $\psi = 0$ . Cela permet de **maximiser** le couple mécanique  $C_m$ , de contrôler séparément le couple par le courant  $I$ , tandis que la vitesse est fixée par la fréquence d'alimentation  $f$ , tel que :

Nous avons montré que  $C_m \approx 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I \cdot \cos(\psi)$

Si  $\psi = 0$

- Le couple mécanique :  $C_m \approx 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I$
  - La force électromotrice :  $E = p \cdot \Phi \cdot \Omega$
  - La synchronisation est garantie :  $\Omega = \Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$ ,
- le champs  $\vec{B}_s$  et  $\vec{B}_r$  sont perpendiculaires



#### 3.1. Elaboration des consignes de référence

La commande scalaire en courant consiste à imposer directement trois courants sinusoïdaux synchronisés avec la position du rotor. Le couple est réglé par l'amplitude du **courant**  $I_{ref}$  image de **couple** souhaité et l'**angle d'autopilotage**  $\psi_{ref}$  nulle. Les courants de référence sont définis par :

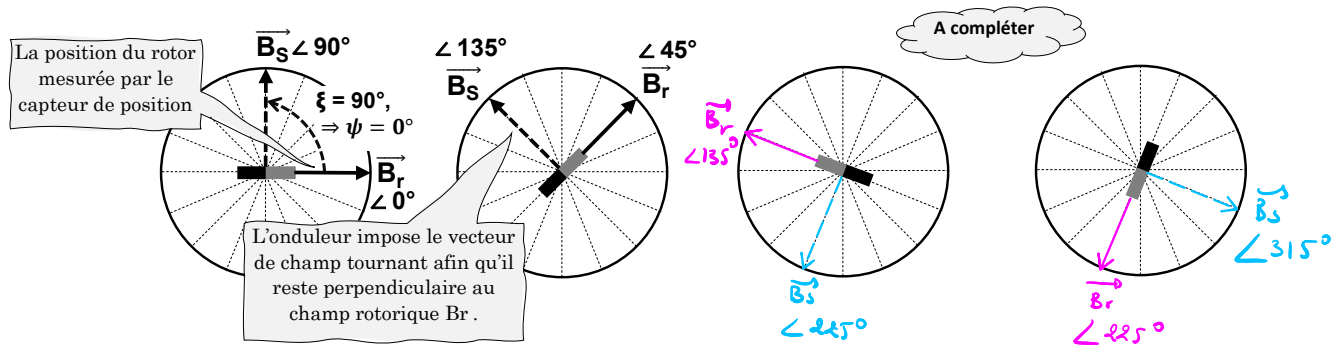
$$\begin{cases} i_{1ref}(t) = I_{ref} \sqrt{2} \cdot \sin(p \cdot \theta \cdot t + \frac{\pi}{2} - \psi_{ref}) \\ i_{2ref}(t) = I_{ref} \sqrt{2} \cdot \sin(p \cdot \theta \cdot t - \frac{\pi}{6} - \psi_{ref}) \\ i_{3ref}(t) = I_{ref} \sqrt{2} \cdot \sin(p \cdot \theta \cdot t - \frac{5\pi}{6} - \psi_{ref}) \end{cases}$$

Avec :

- $p$  : nombre de paires de pôles.
- $\theta$  : position angulaire du rotor.
- $p \cdot \theta$  : pulsation rotorique réelle  $\omega$  en (rad/s).

Comme mentionné précédemment, la commande scalaire repose sur un asservissement en courant, nécessitant donc des capteurs de courant afin de vérifier le suivi des consignes. De plus, la mesure de la position du rotor constitue un élément essentiel : elle permet de calculer correctement les références et de placer le vecteur de champ tournant dans la position adéquate.

Ces courants représentent la **consigne idéale** : si la machine suit ces courants, le champ statorique sera correctement synchronisé avec le champ rotorique.



### 3.2. Structure de contrôle scalaire

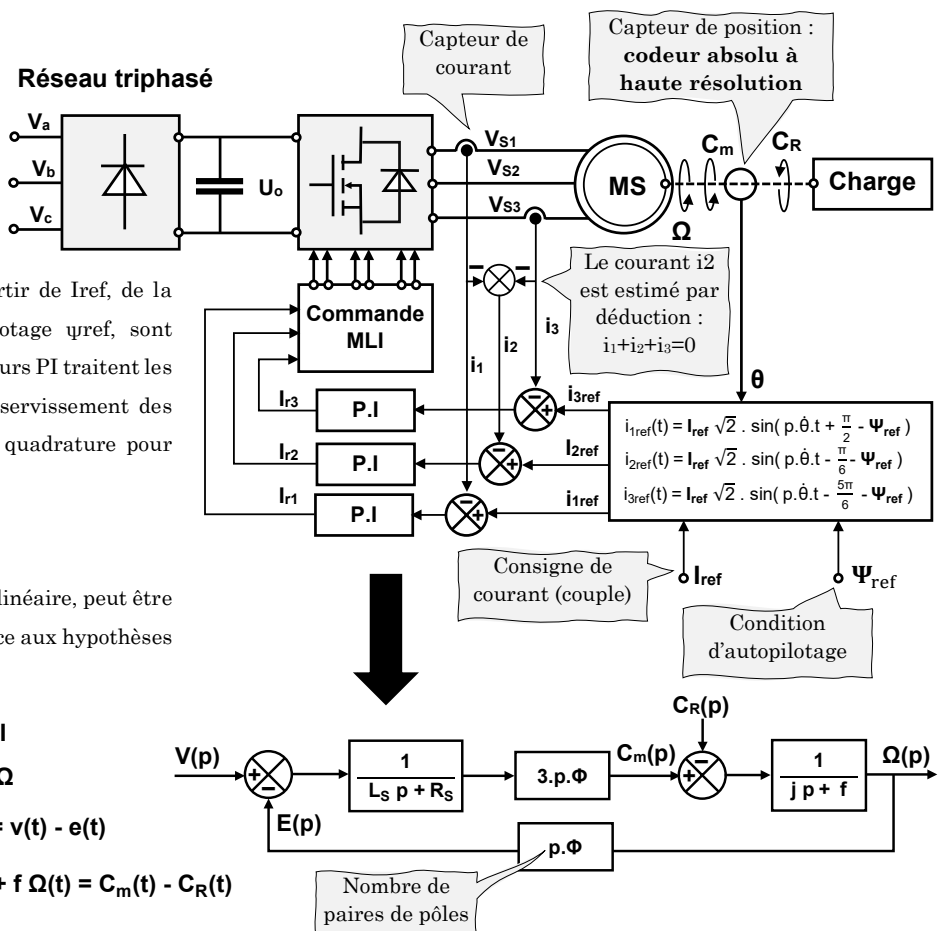
Pour mettre en œuvre la commande scalaire en courant, on procède par l'asservissement de l'angle d'autopilotage  $\psi$  et du courant de référence  $I_{ref}$ , ce qui permet de contrôler le couple moteur  $C_m$ . Les régulateurs intègrent un onduleur MLI et sa commande associée, comme l'illustre la figure suivante.

Ce schéma illustre la commande scalaire en courant d'une machine synchrone. L'onduleur MLI, alimenté par un bus continu, génère les tensions triphasées.

Les références de courant, calculées à partir de  $I_{ref}$ , de la pulsation électrique et de l'angle d'autopilotage  $\psi_{ref}$ , sont comparées aux courants mesurés. Les correcteurs PI traitent les erreurs et pilotent la MLI, garantissant l'asservissement des courants et plaçant le champ statorique en quadrature pour maximiser le couple.

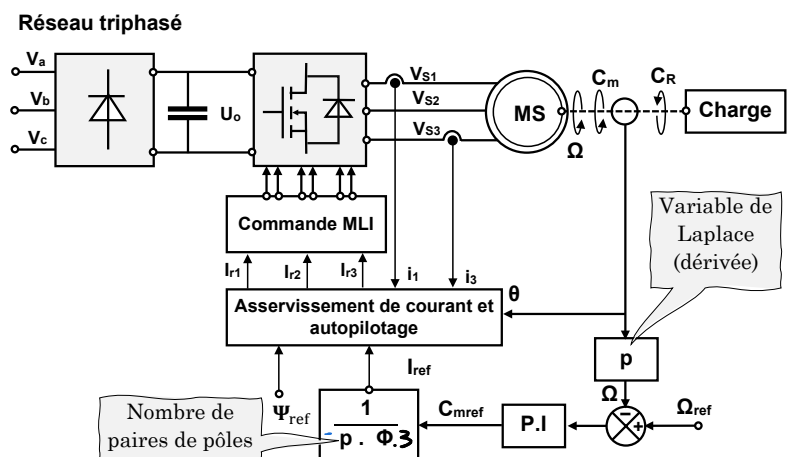
Le schéma d'asservissement, bien que non linéaire, peut être approximé par un modèle linéaire continu grâce aux hypothèses retenues. Les équations retenues :

- Le couple mécanique :  $C_m \approx 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I$
- La force électromotrice :  $E = p \cdot \Phi \cdot \Omega$
- Equation de maille :  $L_s \frac{di(t)}{dt} + R_s i(t) = v(t) - e(t)$
- Equation dynamique (PFD) :  $J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \Omega(t) = C_m(t) - C_R(t)$



### Boucle d'asservissement de vitesse :

Lorsque la machine synchrone est asservie en vitesse, il devient nécessaire d'intégrer le contrôle du couple dans la boucle de régulation de vitesse, comme l'illustre la figure suivante. On considère ici le cas où la machine délivre son couple électromagnétique maximal à vitesse maximale. La consigne d'angle d'autopilotage est alors  $\psi_{ref} = 0$ .





#### 4- Commande vectorielle ou commande à flux orienté

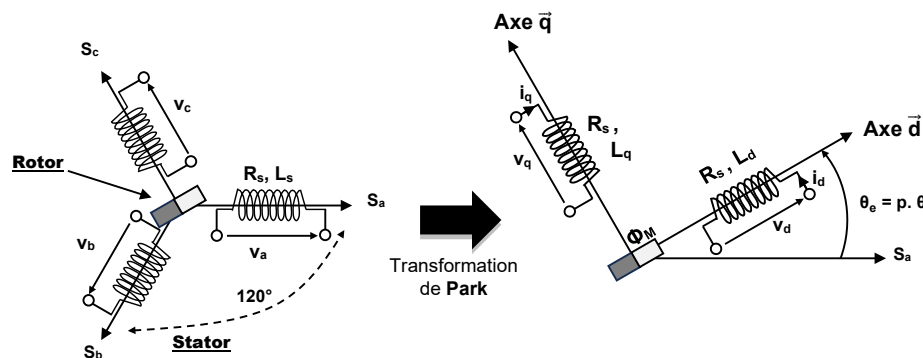
La commande scalaire en courant est efficace en régime permanent, mais elle atteint ses limites en régime dynamique. La commande vectorielle, en revanche, offre une meilleure précision lors des transitoires. Son principe repose sur le modèle dynamique de la machine synchrone, dont les paramètres sont identifiés afin de permettre un contrôle équivalent, sur le plan comportemental, à celui d'une machine à courant continu (MCC). Dans cette partie de cours nous abordons que la machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

##### 4.1. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en régime dynamique

Le modèle dynamique s'appuie sur la représentation de la machine dans un système diphasé fictif équivalent, obtenu grâce à la **transformation de Park**. Celle-ci permet de projeter les grandeurs triphasées dans le plan « dq » : l'axe direct (d) et l'axe en quadrature (q).

##### Hypothèses retenues :

- ☒ La machine synchrone étudiée comporte trois enroulements statoriques décalés de  $120^\circ$ , connectés en étoile (Y). Le rotor, à pôles lisses (entrefer constant), intègre un aimant permanent générant un flux rotorique  $\Phi = \Phi_M \cdot \cos(\theta_e)$ .
- ☒ La résistance d'un enroulement statorique est notée  $R_s$  et ne varie pas avec la température.
- ☒ Les inductances de fuite du stator sont négligées. On note  $\Phi_i$  le flux total embrassé par chaque bobine (a, b ou c).
- ☒ La position et la vitesse de rotation du rotor sont respectivement notées  $\theta$  et  $\Omega$ .



La transformée de Park permet de représenter la machine sous une forme diphasée équivalente dans le repère « dq », où l'axe o est virtuel et perpendiculaire au plan « dq ». Le passage des grandeurs du repère « abc » vers le repère « dq » s'effectue au moyen de la **matrice de Park**  $[P_e(\theta)]$ .

Le tableau ci-dessous regroupe les équations finales du modèle, les étapes de calcul intermédiaires dépassant le cadre du programme de CPGE TSI.

| Grandeurs                                                                                                                                                                                            | Expressions                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tension $V_d$ et $V_q$                                                                                                                                                                               | $V_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot \omega \cdot i_q$                                    |
|                                                                                                                                                                                                      | $V_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + L_d \cdot \omega \cdot i_d + \Phi_M \cdot \omega$              |
| Couple électromagnétique                                                                                                                                                                             | $C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_M \cdot i_q$ |
| L'équation dynamique (PFD)                                                                                                                                                                           | $J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_{em} - C_r$                                                            |
| La relation entre la vitesse de rotation électrique $\omega$ et la vitesse de rotation mécanique du rotor $\Omega$ s'écrit : $\omega = p \cdot \Omega$<br>où p désigne le nombre de paires de pôles. |                                                                                                                   |

Puisque le rotor de la machine synchrone est à pôles lisses et que la f.é.m. est sinusoïdale, on a  $L_d = L_q$ . L'expression précédente du couple électromagnétique  $C_{em}$  se simplifie alors et devient :

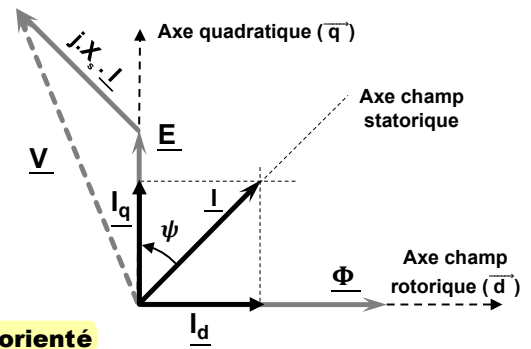
Comme :  $L_d = L_q \Rightarrow$

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_M \cdot i_q$$

 **Conclusion :** Le pilotage du courant  $i_q$  permet de contrôler directement le couple électromagnétique  $C_{em}$ .

## 4.2. La commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent

En 1971, les chercheurs allemands **Blaschke** et **Hasse** ont proposé une nouvelle stratégie de commande fondée sur l'orientation du champ. Le principe consiste à **décomposer le courant statorique** en deux composantes : l'une dédiée au **contrôle du flux**, l'autre à la **production du couple**. Cette approche rend le comportement dynamique de la machine comparable à celui d'une machine à courant continu (MCC). Elle est aujourd'hui connue sous le nom de **commande vectorielle**.



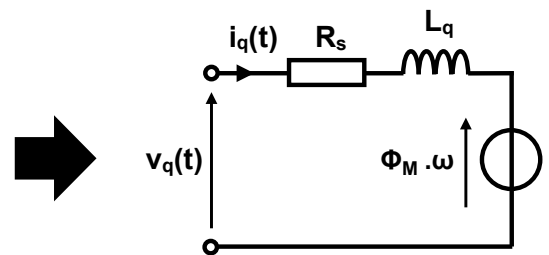
### Présentation de la commande vectorielle ou commande à flux orienté

Pour garantir la condition d'autopilotage ( $\psi = 0$ ), on impose  $i_d(t) = 0$ . Ainsi, le flux rotorique est entièrement **orienté selon l'axe d** :  $\Phi_d = \Phi_M$  et  $\Phi_q = 0$ . Dans cette configuration, le flux est associé à la composante  $i_d$ , tandis que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement contrôlé par le courant  $i_q(t)$ .

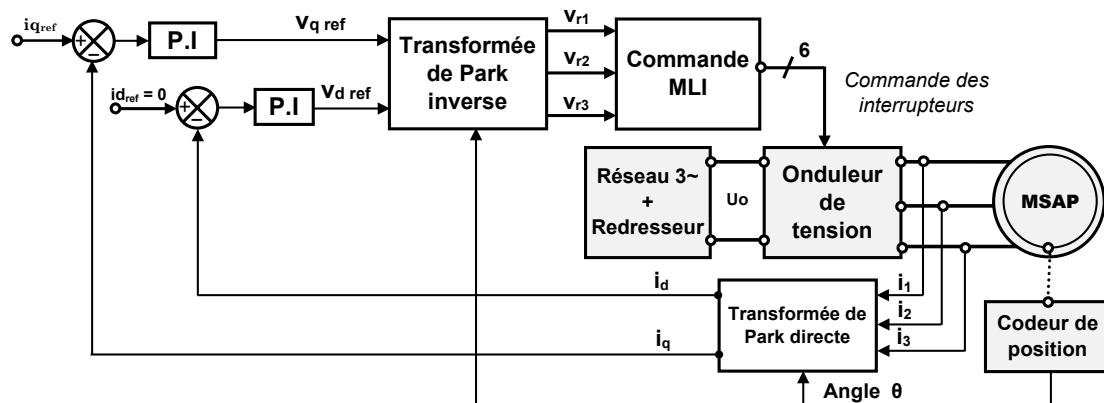
L'application de la commande vectorielle assure un **découplage entre flux et couple**, permettant un contrôle **indépendant de la vitesse et du couple**. Elle offre un **pilotage optimal du flux** sur toute la plage de vitesses, garantit la **stabilité thermique**, **minimisation des pertes Joule** et améliore ainsi le **rendement global** de la machine.

Les équations établies précédemment aboutissent à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

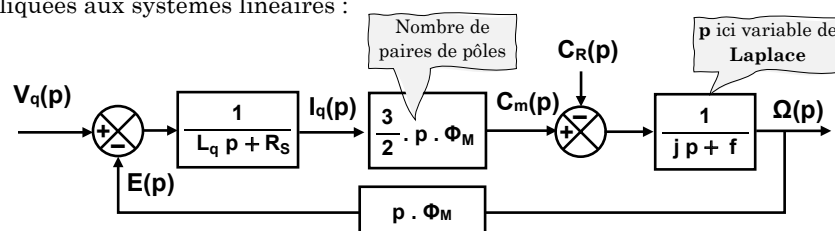
| Grandeurs                  | Expressions                                                             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Tension $V_d(t)$           | $v_d = -L_q \cdot \omega \cdot i_q$                                     |
| Tension $V_q(t)$           | $v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \Phi_M \cdot \omega$ |
| Couple électromagnétique   | $C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_M \cdot i_q$                   |
| L'équation dynamique (PFD) | $J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_{em} - C_r$                  |



Le schéma fondamental de la boucle de contrôle de courant à  $i_d(t) = 0$  est présenté ci-dessous :



Sous certaines hypothèses simplificatrices, les boucles d'asservissement peuvent être modélisées et étudiées à l'aide des méthodes classiques appliquées aux systèmes linéaires :



**Remarque :** On observe en effet une **analogie** entre ce schéma bloc et celui correspondant à la **machine à courant continu (MCC)**.

## Références bibliographiques :

✎ **Claude CHEVASSU**. Machines synchrones : cours et problèmes [PDF]. Version 5 février 2014. Licence Libre. Disponible sur : <http://mach.elec.free.fr>

📖 **Christophe FRANÇOIS**, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016.

📖 **Pierre Tréhin**, Sciences industrielles de l'ingénieur (SII) - spécial ATS, Ellipses 2019

✎ **A, ESSADKI**, cours de mon professeur d'électrotechnique en Master GE, ENSAM RABAT, Année universitaire 2015/2016

✎ **Bellahcene, L. & Djaouani, M.** Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur MRAS [Mémoire de Master, PDF]. Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique et Électronique, Algérie, 2017