

PARTIE III. COMMANDE DES MOTEURS SYNCHRONES

1. Machine synchrone

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible qui peut fonctionner soit en génératrice (alternateur), soit en moteur ;

- En génératrice : elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine.
- En moteur : elle absorbe un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation de la machine.

2. Constitution

Ces machines comportent un induit et un inducteur ;

Induit : c'est le stator dans lequel est logé un enroulement à $2p$ pôles réuni à la source fournissant les tensions et les courants de fréquence (f). Inducteur : c'est le rotor. Il sert à créer le champ magnétique qui va balayer les conducteurs de l'induit.

Ce champ peut être élaboré de différentes manières ;

- A partir d'aimants permanents dans le cas de machines dont la puissance peut aller jusqu'à quelques dizaines de kilowatts.
- A partir de courants continus circulant dans l'enroulement inducteur réparti de façon à créer des pôles alternativement nord et sud. Ce sont les rotors bobinés qui peuvent être classés en deux catégories;
 - Rotor à pôles saillants : ce rotor est utilisé dans les machines à faibles vitesses périphériques du rotor ($p > 2$). L'enroulement dans ce cas est identique à celui d'une machine à courant continu (électroaimant alimenté en continu).
 - Rotor à pôles lisses : ce rotor concerne les machines à grandes vitesses périphériques du rotor ($p = 1, 2$). Dans ce cas ; le bobinage à courant continu est logé dans des encoches fraisées dans la masse cylindrique du rotor.

3. Principe du moteur synchrone

Les courants de fréquence (f) fournis par la source triphasée créent dans l'entrefer une force magnétomotrice tournant à la fréquence synchrone n_s , définie par :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{en (tr/s)} \quad \text{(III.1)}$$

Les pôles de cette f.m.m. tirent les pôles du rotor et font entraîner celui-ci à la vitesse synchrone. D'où le nom du moteur synchrone donné à cette machine.

4. Bilan des puissances

Le bilan des puissances du moteur synchrone est illustré par le schéma de la figure III.1 qui montre l'écoulement de puissance de l'entrée (puissance électrique prise au réseau) vers la sortie (puissance mécanique transmise à la charge)

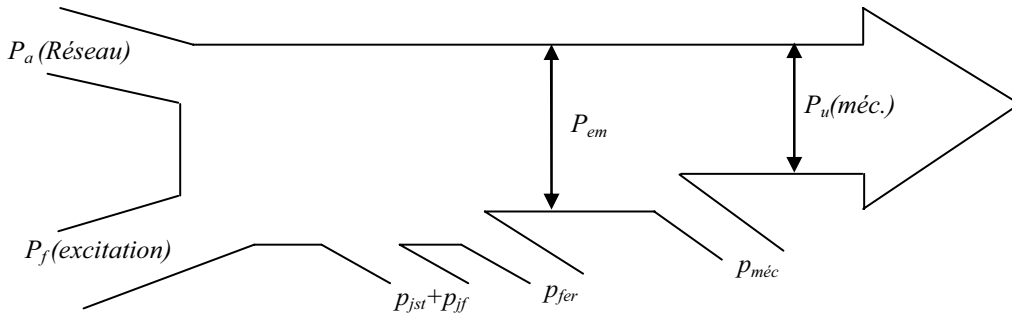


Fig. III.1 Bilan des puissances d'un moteur synchrone

5. Modèle de la machines synchrone à pôles lisses ou à aimants permanents

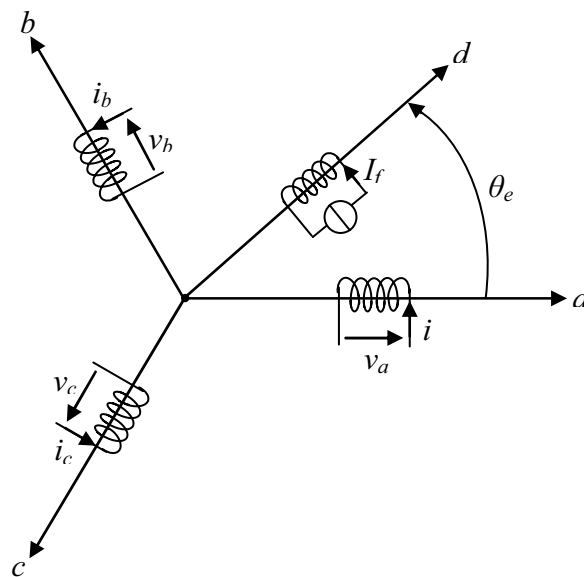


Fig. III.2 Représentation de la machine synchrone dans le repère triphasé

Equations en tensions :

$$v_a = Ri_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \quad (\text{III. 2})$$

$$v_b = Ri_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \quad (\text{III. 3})$$

$$v_c = Ri_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (\text{III. 4})$$

R : Résistance d'une phase statorique

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ flux totalisés à travers les phases a, b et c du stator.

Equations des flux :

Pour la phase a, on aura:

$$\varphi_a = \varphi_{aa} + \varphi_{ba} + \varphi_{ca} + \varphi_{fa} = Li_a + Mi_b + Mi_c + \varphi_{fa} = (L - M)i_a + \varphi_{fa} \quad (\text{III. 5})$$

Où :

L : inductance propre statorique

M : inductance mutuelle entre deux phases statoriques

φ_{fa} : flux total envoyé par l'inducteur dans la phase (a).

Posons : $L - M = L_s$

On aura donc :

$$\varphi_a = L_s i_a + \varphi_{fa} \quad (\text{III. 6})$$

L_s est l'inductance cyclique statorique ou l'inductance synchrone.

De même pour les deux autres phases ;

$$\varphi_b = L_s i_b + \varphi_{fb} \quad (\text{III. 7})$$

$$\varphi_c = L_s i_c + \varphi_{fc} \quad (\text{III. 8})$$

Reportons les équations des flux dans les équations des tensions :

$$v_a = Ri_a + \frac{d}{dt}(L_s i_a + \varphi_{fa}) = Ri_a + L_s \frac{di_a}{dt} + \frac{d\varphi_{fa}}{dt} \quad (\text{III. 9})$$

$$v_a(i_a = 0) = e_a = \frac{d\varphi_{fa}}{dt} = \frac{d\varphi_{fa}}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} = p\Omega_s \frac{d\varphi_{fa}}{d\theta_e} \quad (\text{III. 10})$$

Donc :

$$v_a = Ri_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (\text{III. 11})$$

De même pour les deux autres phases :

$$v_b = Ri_b + L_s \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (\text{III. 12})$$

$$v_c = Ri_c + L_s \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (\text{III. 13})$$

Avec :

$$e_b = p\Omega_s \frac{d\varphi_{fb}}{d\theta_e}, \text{ et } e_c = p\Omega_s \frac{d\varphi_{fc}}{d\theta_e} \quad (\text{III. 14})$$

5.1 Schéma équivalent

Les relations III.11, III.12 et III.13 exprimant la loi des mailles pour les phases statoriques de la machine, nous permettent de tracer le schéma équivalent monophasé de la figure III.3 relatif à une phase quelconque.

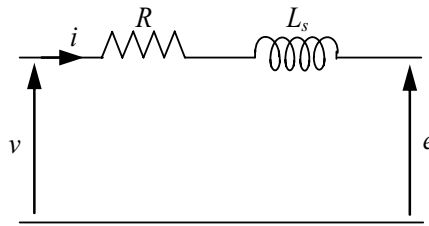


Fig. III.3 Schéma équivalent monophasé de la machine synchrone

Domaine de validité :

- absence de saturation
- Machines à pôles lisses

A vitesse constante et en régime sinusoïdal, on retrouve le diagramme de BEN-ESCHENBURG

5.2 Diagramme vectoriel

Le schéma équivalent de la figure III.3 peut être traduit par la relation suivante :

$$\bar{V} = R\bar{I} + jX_s\bar{I} + \bar{E} \quad (\text{III. 15})$$

Où : $X_s = L_s \cdot \omega$ est la réactance synchrone de la machine

Pour $R=0$, la relation devient :

$$\bar{V} = jX_s\bar{I} + \bar{E} \quad (\text{III. 16})$$

Cette relation peut être traduite par le diagramme vectoriel suivant :

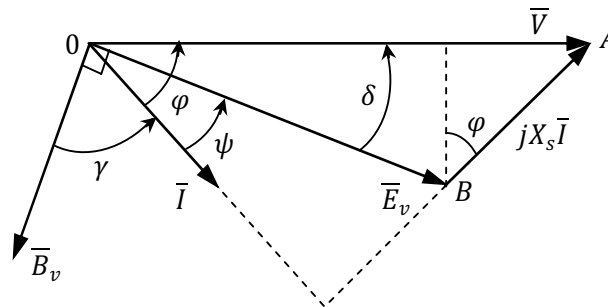


Fig. III.4 diagramme vectoriel

Sur le diagramme, on peut lire trois angles :

φ : déphasage de \bar{I} par rapport à \bar{V}

δ : déphasage entre \bar{E} et \bar{V} appelé angle de décalage interne

ψ : déphasage de \bar{I} par rapport à \bar{E} permettant de repérer la position des pôles du rotor par rapport au champ du stator.

6. Expressions du couple

6.1 En fonction de l'angle ψ

La puissance électrique absorbée par le moteur est donnée par:

$$P_{abs} = 3VI\cos\varphi \quad (III. 17)$$

Si nous négligeons R et les pertes fer, cette puissance est intégralement transmise au rotor :

$$P_{abs} = P_{em} = 3VI\cos\varphi \quad (III. 18)$$

De plus, si nous négligeons les pertes mécaniques, la puissance électromagnétique est entièrement transformée en puissance mécanique :

$$P_{em} = P_m = 3VI\cos\varphi = C_{em}\Omega_s = C_m\Omega_s \quad (III. 19)$$

Ce qui donne :

$$C_{em} = \frac{3VI\cos\varphi}{\Omega_s} = C_m \quad (III. 20)$$

Les projections des vecteurs \bar{V} et \bar{E} sur la direction du courant donnent :

$$V\cos\varphi = E\cos\psi \quad (III. 21)$$

Ce qui donne :

$$C = \frac{3EI\cos\psi}{\Omega_s} \quad (III. 22)$$

Avec : $E = p\Omega\phi_f$

On aboutit à la fin à l'expression suivante :

$$C = 3p.\phi_f.I.\cos\psi \quad (III. 23)$$

C'est l'expression du couple faisant intervenir le courant I et l'angle ψ . Cette expression est adaptée à l'étude de la machine associée à un onduleur de courant.

Cette expression fait apparaître trois grandeurs de réglage indépendantes du couple ;

- I ; valeur efficace du courant de phase statorique
- ϕ_f ; valeur efficace du flux à vide par phase réglable par I_f .
- ψ ; déphasage entre \bar{I} et \bar{E} réglable par autopilotage.

6.2 Expression du couple en fonction de l'angle interne δ

Du diagramme de la figure III.4, on peut déduire ;

$$XI\cos\varphi = E\sin\delta \quad (III. 24)$$

Donc :

$$C = \frac{3V E \sin\delta}{\Omega_s X_s} = \frac{3V p \Omega \phi_f}{\Omega_s L_s \omega_s} \sin\delta = \frac{3p}{L_s} \left(\frac{V}{\omega_s} \right) \phi_f \sin\delta \quad (III. 25)$$

L'expression III.25 fait apparaître un mode de contrôle à tension imposée ; on dispose de trois paramètres de réglage ;

- V/ω_s (commande de l'onduleur)
- ϕ_f réglable par le courant d'excitation I_f
- l'angle interne δ (réglable par autopilotage)

Si l'on travaille à V/ω_s constant et à courant d'excitation donné (ϕ_f constant), le couple est proportionnel à $\sin\delta$.

$\delta > 0 \rightarrow C > 0$; fonctionnement moteur

$\delta < 0 \rightarrow C < 0$; fonctionnement générateur

Allure de $C(\delta)$:

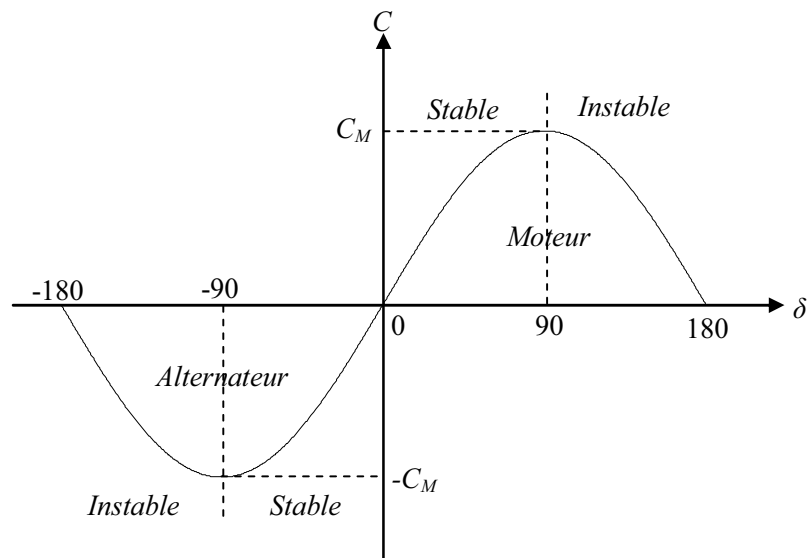


Fig. III.5 Allure du couple en fonction de l'angle interne

Domaine de stabilité :

Le domaine de stabilité est défini par la relation :

$$|\delta| \leq \frac{\pi}{2} \tag{III. 26}$$

En effet ;

Tant que $|\delta| \leq \pi/2$, si Ω_s diminue accidentellement le rotor réel s'éloigne, δ augmente, C augmente, le rotor accélère, δ diminue: le fonctionnement est stable.

De même, si Ω_s augmente, le rotor réel se rapproche, δ diminue, C diminue aussi, le rotor ralentit et δ augmente à nouveau : le fonctionnement est stable.

Le même raisonnement pour $|\delta| \geq \pi/2$ nous permet de conclure que le fonctionnement est instable ; la machine décroche.

7. Le moteur synchrone en vitesse variable

7.1 Principe de la variation de vitesse du moteur synchrone

Le moteur synchrone tourne à la vitesse $\Omega_s = \omega_s/p$. Pour assurer un fonctionnement à vitesse variable, il est nécessaire d'alimenter cette machine à fréquence variable. Pour éviter le « décrochage » de la machine, il faut à tout instant que la pulsation des grandeurs statoriques ω_s soit telle que $\omega_s = p\Omega_s$ (p étant le nombre de paires de pôles de la machine et Ω_s la vitesse de rotation du rotor).

L'alimentation à fréquence variable de la machine se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif (Fig. III.6). La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions statoriques (alimentation en tension) ou l'amplitude des courants statoriques (alimentation en courant) et la fréquence f_s .

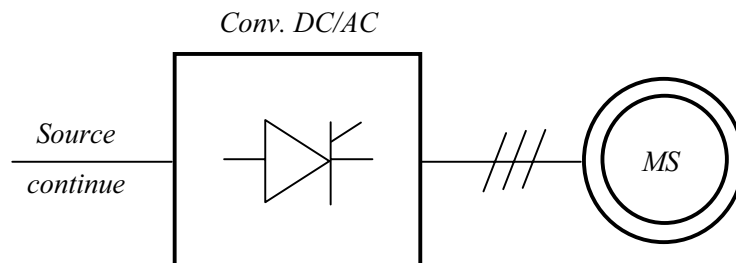


Fig. III.6 Machine synchrone alimentée par un convertisseur DC/AC

7.2 Nécessité de l'autopilotage

Le champ statorique tourne à la vitesse imposée par la fréquence d'alimentation, le champ rotorique (excitation ou aimants) dans le mode fonctionnement classique est « accroché » au champ du stator. Plus on demande de couple sur le rotor, plus les deux champs se décalent. Toutefois les dynamiques des deux champs sont très différentes ; celle du champ statorique, déterminée par les constantes de temps électriques de la source à fréquence variable, est plus rapide que la dynamique du champ rotorique liée aux performances des parties tournantes (constantes de temps mécanique).

Il s'ensuit qu'une variation brusque de la pulsation d'alimentation entraînera une variation tout aussi rapide de la vitesse du champ statorique. Le champ rotorique n'augmentera pas aussi vite à cause de l'inertie des parties tournantes.

Cela aura pour conséquence de générer un décalage trop important entre les deux champs et de faire décrocher la machine.

Pour résoudre ce problème, l'idée essentielle est d'asservir la position du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique. On impose, ainsi, le décalage angulaire entre les deux champs. Cela constitue le mode de fonctionnement dit autopiloté.

7.3 Moteur synchrone autopiloté : système à courant imposé

Dans ce cas la machine est alimentée par un onduleur de courant, la commande est conçue à partir de l'expression : $C = 3p. \phi_f. I. \cos\psi$

Ainsi pour contrôler le couple de la machine, il faut agir sur l'angle ψ et l'amplitude du courant I (le flux ϕ_f est généralement constant).

- ✓ Le convertisseur statique associé à la machine doit donc imposer le courant dans chaque phase.
- ✓ Pour contrôler l'angle ψ , il est nécessaire d'utiliser un capteur de position du rotor. Ce capteur de position permet aussi de générer les ordres de commande du convertisseur alimentant la machine de sorte que $\omega_s = p\Omega_s$.

Le système le plus fréquent est celui représenté à la figure III.7.

Il comprend ;

- Une source de courant continu constituée d'un pont de Graetz à thyristors (Pont 1) connecté au réseau alternatif et associé à une bobine (L) de lissage du courant.
- Un deuxième pont (Pont 2) à 6 composants (généralement des thyristors) fournissant les courants alternatifs i_1, i_2, i_3 du moteur.
- Un capteur de position solidaire du rotor assurant l'autopilotage en commandant la fermeture des composants de l'onduleur aux instants convenables.

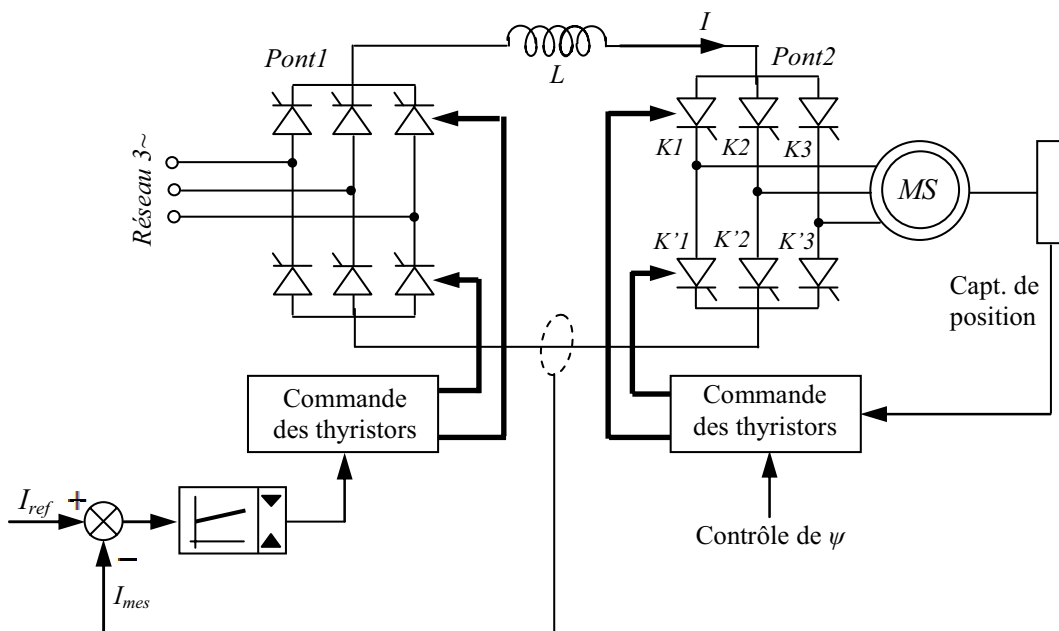


Fig. III.7 Moteur synchrone autopiloté associé à un onduleur de courant

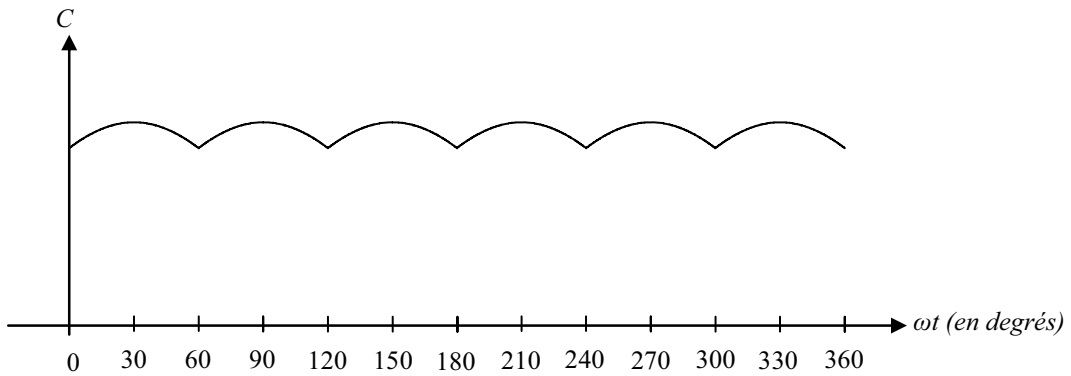


Fig. III.9 Couple de la machine synchrone en fonction de la position du rotor

Réalisation de l'asservissement de vitesse

Pour asservir la vitesse de rotation, on procédera comme pour la machine à courant continu en réalisant une régulation à deux boucles en cascade ; une boucle interne pour le contrôle du couple et une boucle externe pour le réglage de la vitesse. La sortie de cette dernière doit constituer la référence de couple de la boucle interne. Le schéma structurel du circuit de réglage global est montré sur la figure III.10.

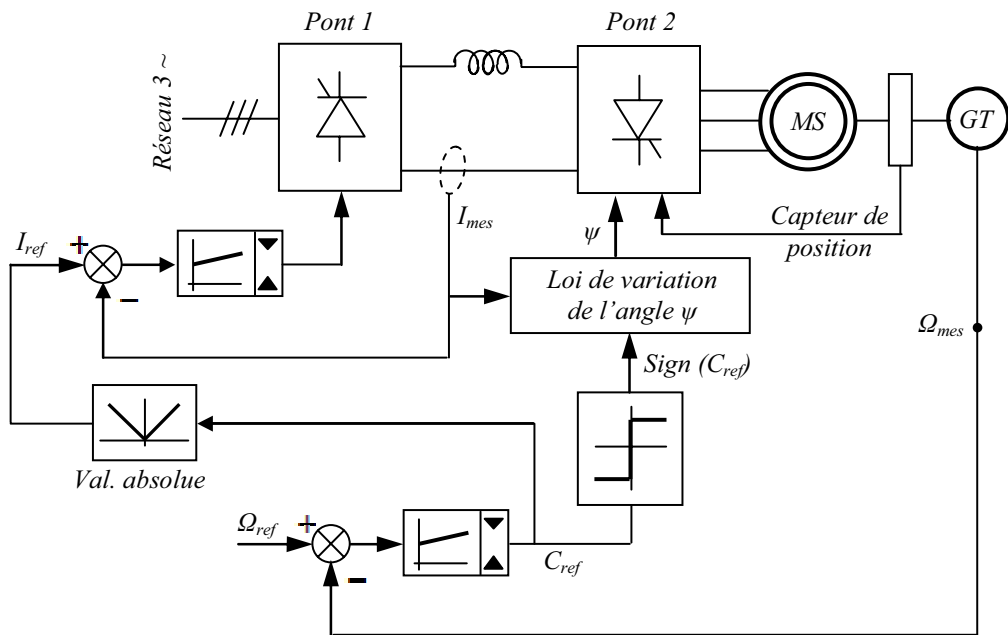


Fig. III.10 Asservissement de la vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de courant

7.4 Système à tension imposée

Le principe de contrôle du couple de la machine synchrone est toujours basé sur la relation (III.23) ;

$$C = 3p \cdot \phi_f \cdot I \cdot \cos\psi$$

Le schéma de principe de l'asservissement de vitesse est donné à la figure III.11.

Les signaux de commande de l'onduleur sont obtenus par le dispositif de la figure II.15. Pour ce faire un capteur de position numérique fournit les grandeurs $\sin\theta$ et $\sin(\theta - 2\pi/3)$. Par multiplication par la grandeur I_{ref} fournie par la sortie du régulateur de vitesse, on obtient les deux consignes de courant i_{1ref} , i_{2ref} et par suite i_{3ref} puisque $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

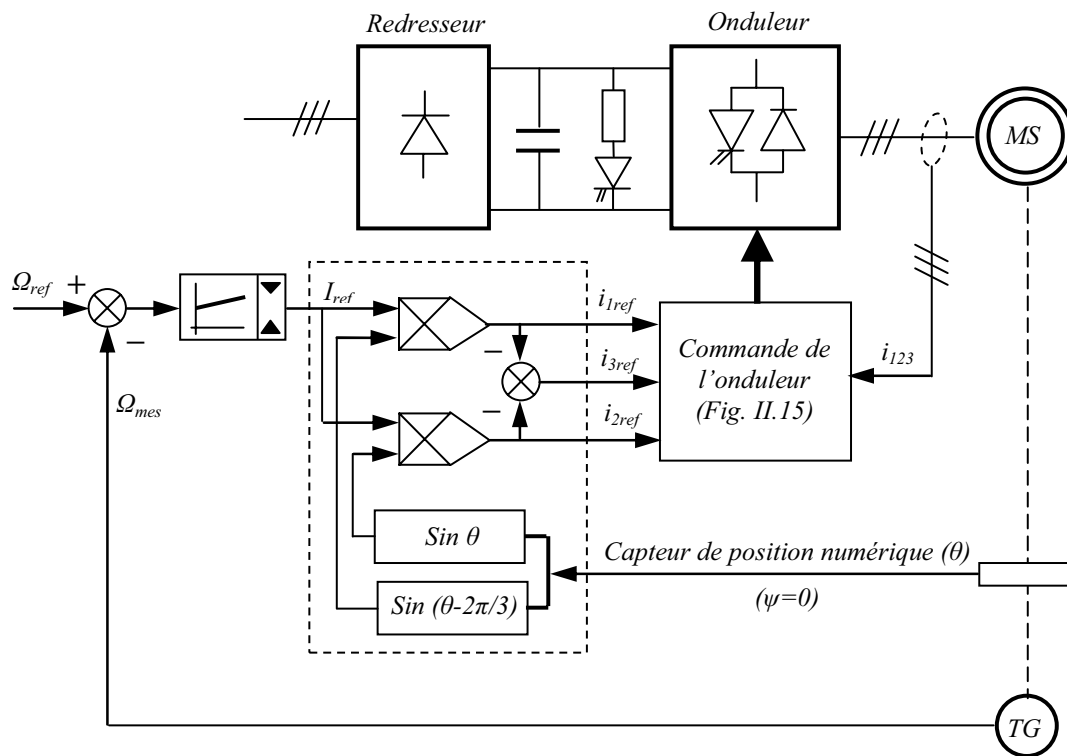


Fig. III.11 Schéma structurel de l'asservissement de vitesse d'un moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de tension

Les courants statoriques sont ici quasi-sinusoïdaux, les ondulations du couple sont de ce fait éliminées.

L'emploi de cette structure en forte puissance est limité par les performances des interrupteurs de l'onduleur MLI.

La complexité du circuit de commande demeure toutefois un inconvénient majeur de cette structure.