

COMMANDE SCALAIRE DE LA  
MACHINE ASYNCHRONE

**II-1-Introduction :**

L'utilité de la vitesse variable est incontestable dans l'industrie, le transport ainsi que dans les consommations ménagères courantes.

Au moment où la machine à courant continu présente des inconvénients tel que présence de système balais collecteur, maintenance périodique et etc..., la machine asynchrone est simple de construction, robuste, peu coûteuse et ne nécessite pratiquement pas d'entretien, à une masse réduite et une grande résistance à la pollution ambiante. Pour cela, elle est de plus en plus utilisée dans les entraînements à vitesse variable bien qu'elle ne soit pas aisée à contrôler en couple et en vitesse. [11],[13]

Il existe deux types de commande de la machine asynchrone :

- ✚ La commande scalaire où l'on s'intéresse au contrôle des grandeurs physique de la *MAS* en module uniquement (exemple : flux, courant.....).

- ✚ Et la commande vectorielle où le contrôle est plutôt porté sur le module et la phase de ces grandeurs. A ce titre, la voie de la commande vectorielle, offre les meilleures performances dynamiques et statiques des variateurs de vitesse.

Le choix de telle ou telle méthode de contrôle est fait en fonction de l'application envisagée selon les critères économiques qui se résument globalement dans le rapport coût-rendement du groupe à vitesse variable. En effet, bien que la commande vectorielle attire l'attention comme étant une méthode qui réalise des hautes performances pour les machines à courant alternatif, la commande scalaire  $V/f$  reste encore utilisée dans l'industrie grâce à sa configuration simple et leur simplicité de mise en œuvre.

## II-2-Commande scalaire d'une MAS :

La commande scalaire, la plus ancienne et la plus rustique, correspond à des applications n'exigeant que des performances statiques et dynamiques moyennes. De nombreux variateurs équipés de ce mode de contrôle sont utilisés, en particulier pour des applications industrielles de pompage, climatisation, ventilation. Les puissances installées correspondantes sont importantes.[11]

### II-2-1-Principe de la commande scalaire:

Le contrôle scalaire de la machine asynchrone consiste à imposer aux bornes de son induit, le module de la tension ou du courant ainsi que la pulsation. Ce mode de contrôle s'avère le plus simple quant à sa réalisation, mais également le moins performant, surtout pour les basses vitesses de fonctionnement. Cependant, au niveau des puissances installées, la plupart des variateurs ne justifient pas un contrôle très performant. Pour des variateurs dans la plage de vitesse ne dépasse pas un rapport de 3 ou 4 entre les vitesses extrêmes (ventilation, climatisation, centrifugeuse.....) et pour lesquels il n'y a pas de fonctionnement à vitesse très faible et à fort couple de charge, le contrôle scalaire donne des performances satisfaisantes. Il est donc important de donner certain nombre d'informations sur les variateurs asynchrones avec contrôle scalaire.

Son principe donc est de maintenir  $V/f$  Constant ce qui signifie garder le flux constant. Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement.

### II-2-2- Loi de contrôle du flux magnétique :

La grandeur la plus importante pour le contrôle de la machine asynchrone est le flux magnétique. En conséquence, ce flux magnétique, statorique, rotorique ou d'entrefer, doit être contrôlé d'une part pour imposé un état magnétique trop élevée qui provoquerait un appel de courant important. Cet appel de courant entrainerait un surplus d'échauffement de la machine et des contraintes dangereuses sur le couple électromagnétique pour un fonctionnement donné. [7]

#### II-2-2-1- Alimentation En Tension :

Considérons, dans un premier temps, que la machine est alimentée en tension, c'est-

à-dire que pour chaque point de fonctionnement, l'amplitude de la tension statorique est imposée.

En régime permanent sinusoïdale, on choisit un repère de référence qui tourne à la vitesse de synchronisme de manière que les variables soient de type continu. Parmi l'infinité de ces repères, on peut choisir le repère particulier  $d q$ , fixé au vecteur tension statorique. Dans ces conditions, les équations statoriques et rotoriques de la machine sont :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} - \omega_s \varphi_{sq}$$

$$V_{sq} = 0 = R_s I_{sq} - \omega_s \varphi_{sd}$$

$$0 = R_r I_{rq} - \omega_s \varphi_{rd}$$

$$0 = R_r I_{rd} - \omega_s \varphi_{rq}$$

Il existe deux transformation *triphase/ diphasé*, l'une qui conserve les amplitudes de courant et l'autre qui assure une conservation de la puissance. Nous avons choisi la seconde, car elle nous paraît plus adaptée à l'étude des commandes des variateurs de vitesse ou de position.

Pour cette transformation, il existe un rapport de  $\sqrt{3}$  entre la valeur maximale en diphasé et la valeur efficace en triphasé, dans la mesure où l'on raison sur les composantes fondamentales. On a donc :

$$\sqrt{3} V_s = V_{sd}$$

$$V_{sq} = 0$$

$$\sqrt{3} I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}$$

$$\sqrt{3} \varphi_s = \sqrt{\varphi_{sd}^2 + \varphi_{sq}^2}$$

$$\sqrt{3} \varphi_r = \sqrt{\varphi_{rd}^2 + \varphi_{rq}^2}$$

Dans la mesure où la machine est supposée linéaire au niveau magnétique, les relations entre courants et flux statoriques et rotoriques sont les suivantes, faisant intervenir les trois inductances cycliques de la machine  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M_{sr}$  :

$$\varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M_{sr} I_{rd}$$

$$\varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M_{sr} I_{rq}$$

$$\varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sd}$$

$$\varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M_{sr} I_{sq}$$

A partir des équations (II-1) à (II-13), l'élimination des courants et des flux rotoriques permet de définir la relation (II-14), liant  $V_s$ ,  $\varphi_s$ ,  $\omega_s$  et  $\omega_r$  :

$$V_s = \frac{R_s \varphi_s}{L_s} \sqrt{\left[ \frac{\left( \frac{L_s \omega_s + L_r \omega_r}{R_s} + \frac{L_r \omega_r}{R_r} \right)^2 + \left( 1 - \frac{\sigma L_s L_r \omega_s \omega_r}{R_s R_r} \right)^2}{1 + \left( \frac{\sigma L_r \omega_r}{R_r} \right)^2} \right]} \quad \text{[II-14]}$$

Avec  $\sigma$  le coefficient de dispersion :  $\sigma = 1 - M_{sr}^2 / (L_s L_r)$

Cette relation reste valable entre les valeurs efficace des tensions et flux statorique. elle constitue le principe des lois de commande à flux constante des machines alimentées en tension .

On peut de manière semblable définir une relation entre  $V_s$ ,  $\varphi_r$ ,  $\omega_s$  et  $\omega_r$ .

La relation *tension/fréquence* (II-14) montre que le maintien du flux statorique  $\varphi_s$  à une amplitude constante nécessite la prise en compte de pulsation rotorique  $\omega_r$ , c'est-à-dire de la charge de la machine. Cela montre que le maintien de :

$$\frac{V_s}{\omega_s} = cte \quad \text{[II-15]}$$

Sur toute la plage de fonctionnement est insuffisant, particulièrement quand la machine est en charge et surtout à basse vitesse de rotation. Dans les domaines des fréquences statoriques moyennes et élevées, quand il est possible de négliger la chute de tension dans la résistance du stator, la relation (2-14) se réduit à :

$$V_s = \varphi_s \omega_s \quad \text{(2-16)}$$

On retrouve bien la loi *tension/fréquence* classique qui est valable seulement quand la résistance  $R_s$  peut être négligée.

**II-2-2-2- Alimentation En Courant :**

Considérons maintenant une alimentation en courant, c'est-à-dire l'imposition de l'amplitude du courant statorique pour chaque point de fonctionnement. Cela nécessite en générale une régulation du courant qui va définir l'amplitude de la tension de référence qui sert à régler la commande de l'onduleur. Il est possible, de manière analogue à ce qui a été fait précédemment, de définir une relation liant  $I_s$ ,  $\varphi_s$  ou  $\varphi_r$  et  $\omega_r$ . Pour cela, on considère les équations rotoriques en régime permanent sinusoïdale dans un repère tournant au synchronisme et lié au courant statorique, tel que l'axe  $d$  soit selon le vecteur courant :

$$I_{sd} = \sqrt{3} I_s$$

$$I_{sq} = 0 \quad [\text{II-18}]$$

$$0 = R_r I_{rq} - \omega_s \varphi_{rd} \quad [\text{II-19}]$$

$$0 = R_r I_{rd} - \omega_s \varphi_{rq} \quad [\text{II-20}]$$

On obtient à partir de ces équations [2-12.13.15] et des relations flux/courants [II-9], les relations [II-16-17] suivantes :

$$\varphi_s = L_s I_s \sqrt{\frac{(R_r^2 + \sigma^2 L_r^2 \omega_r^2)}{(R_r^2 + L_r^2 \omega_r^2)}} \quad [\text{II-21}]$$

$$\varphi_r = \frac{R_r M_s I_s}{\sqrt{R_r^2 + L_r^2 \omega_r^2}} \quad [\text{II-22}]$$

$$I_s = \frac{\varphi_s}{L_s} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\omega_r L_r}{R_r}\right)^2}{1 + \left(\frac{\sigma \omega_r L_r}{R_r}\right)^2}} \quad [\text{II-23}]$$

Cette relation est la base des lois de commande à flux constant des machines alimentées en courant

Nous constatons que la pulsation statorique  $\omega_s$  n'intervient pas explicitement. Le maintien du flux à une valeur donnée impose à l'amplitude du courant statorique de varier avec la pulsation rotorique  $\omega_r$ . Les courbes tracées à flux constant s'apparentent à des chainettes

### II-2-3. Commande scalaire en V/f :

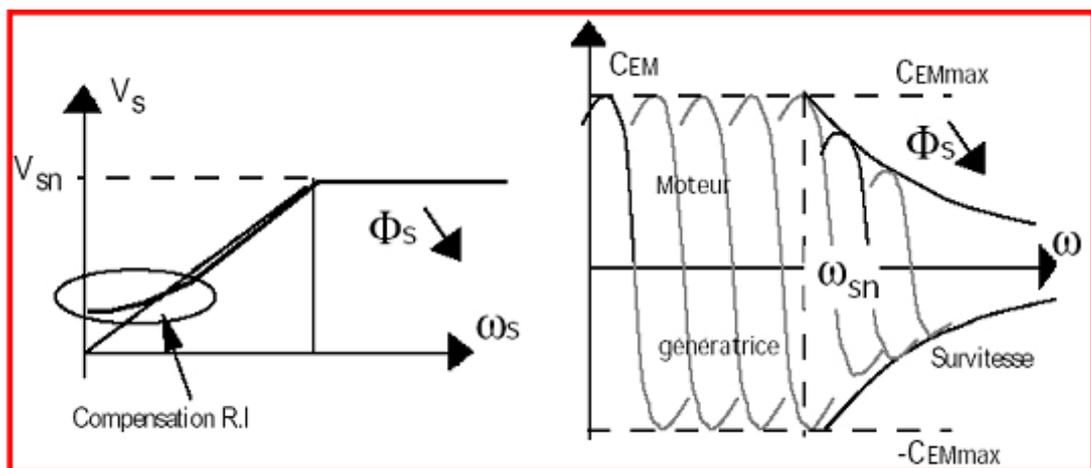
Son principe est de maintenir  $V/f = \text{constant}$  ce qui signifie garder le flux constant. Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement. En effet, d'après le modèle établi en régime permanent, le couple maximum s'écrit :

$$C_{\max} = \frac{3p}{2N_r'} \left( \frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \quad [\text{II-16}]$$

On voit bien que le couple est directement proportionnel au carré du rapport de la tension sur la fréquence statorique.

En maintenant ce rapport constant et en jouant sur la fréquence statorique, on déplace la courbe du couple électromagnétique (régime quasi-statique) de la machine asynchrone (Fig-II-1)

En fait, garder le rapport constant revient à garder le flux constant. Quand la tension atteint sa valeur maximale, on commence alors à décroître ce rapport ce qui provoque une diminution du couple que peut produire la machine. On a en régime de « défluxage ». Ce régime permet de dépasser la vitesse nominale de la machine on l'appelle donc aussi régime de survitesse (partie  $\Omega > \Omega_s$  de la figure-II-1).



**Figure (II-1) : Principe de la commande V/f**

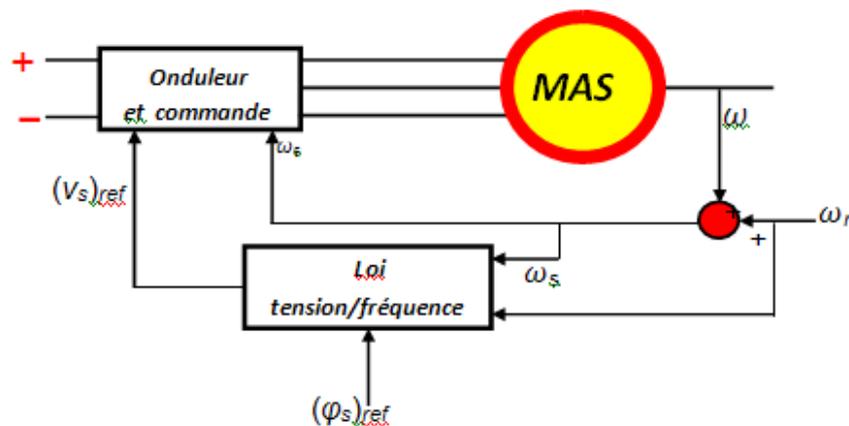
### II-2-4-Le contrôle indirect

Le contrôle indirect qui consiste à définir le flux indirectement à partir des relations *tension/fréquence* ou *courant/fréquence* définies en régime permanent sinusoïdale. Les amplitudes du courant ou de la tension statoriques sont définies de manière à imposer indirectement le flux magnétique pour chaque point de fonctionnement.

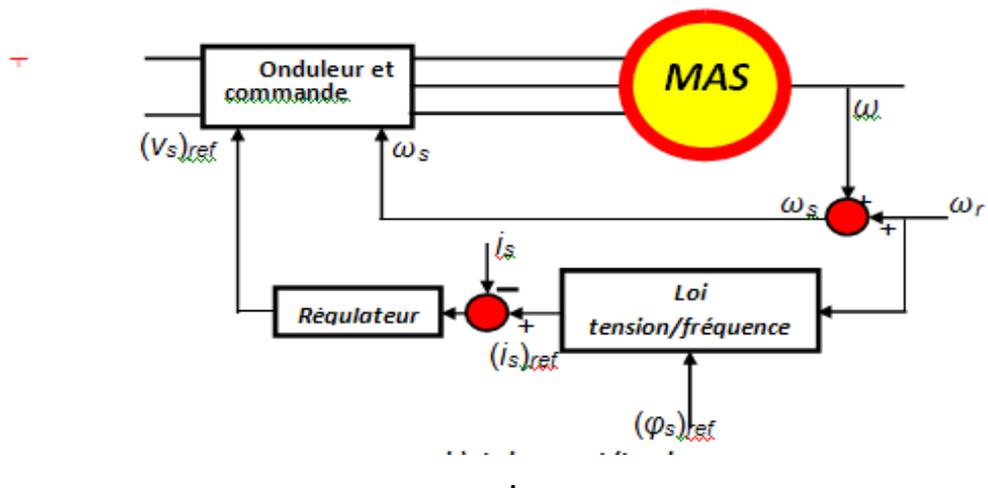
Sur la *figure (II-2)* sont donnés les schémas de commande indirecte. La pulsation statorique  $\omega_s$  est obtenue par composition de la vitesse de rotation  $\omega$ , mesurée par un capteur placé sur l'arbre de la machine, et de la pulsation des courant rotoriques  $\omega_r$  imposée pour définir le couple électromagnétique. Ce dernier est une fonction du flux statorique ou du flux rotorique et de cette pulsation rotorique selon les expressions :

$$C_{em} = \frac{3P\varphi_s^2 \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right)^2 R_r \omega_r}{(R_r^2 + \sigma^2 L_r^2 \omega_r^2)} \quad [\text{II-23}]$$

$$C_{em} = \frac{3P\varphi_r^2 \omega_r}{R_r} \quad [\text{II-24}]$$



A) Loi tension/ fréquence



### B) Loi courant/fréquence

Fig. (II- 2) Controles indirects

Dans ces commandes, l'amplitude de référence de la tension statorique est donnée soit directement par la loi *tension/fréquence* (2-14) soit par la loi *courant/fréquence* (2-21) et (2-22) avec une régulation du courant. Donc les deux cas, il n'y a pas de régulation du flux, donc pas de nécessité d'un estimateur ou d'un observateur de flux. Compte tenu des caractéristiques des onduleurs de tension utilisés avec des semi-conducteurs rapides et des fréquences de modulation élevées, on peut supposer que les tensions statoriques réelles sont pratiquement identiques aux tensions de référence imposées par les commandes. Cette hypothèse est moins bien vérifiée pour les variateurs de grande puissance ou la fréquence de modulation de l'onduleur est faible (quelques centaines de hertz seulement). Dans ces conditions, les périodes de commutation ne sont plus très faibles par rapport aux périodes fondamentales des signaux, ce qui entraîne des retards entre les références et les signaux réels.

#### II-2-5-Le contrôle direct

Le *contrôle direct* qui consiste à réguler l'un des flux. Cela nécessite la mesure ou l'estimation du flux dans la machine. Il n'est que très rarement mesuré en raison du coût des capteurs et de la qualité des signaux obtenus. On trouve des machines asynchrones équipées de capteurs de flux seulement dans certains laboratoires de recherche universitaires ou industriels. On procède plutôt à une estimation ou une observation d'état, c'est-à-dire à une

reconstitution du flux à partir de tout ou partie du modèle mathématique de la machine. Sur la *figure (II-3)* sont présentés des schémas de commande directe avec régulation du flux soit statorique, soit rotorique.

Sur la figure (II-4), est montrée une variante du schéma de la figure (II-3-b) avec une régulation des courants statoriques réels alternatifs à l'aide par exemple de régulateur à hystérésis, au lieu d'une simple régulation de l'amplitude de ces courants. Pour ces différents variateurs, un estimateur ou un observateur de ce flux est nécessaire.

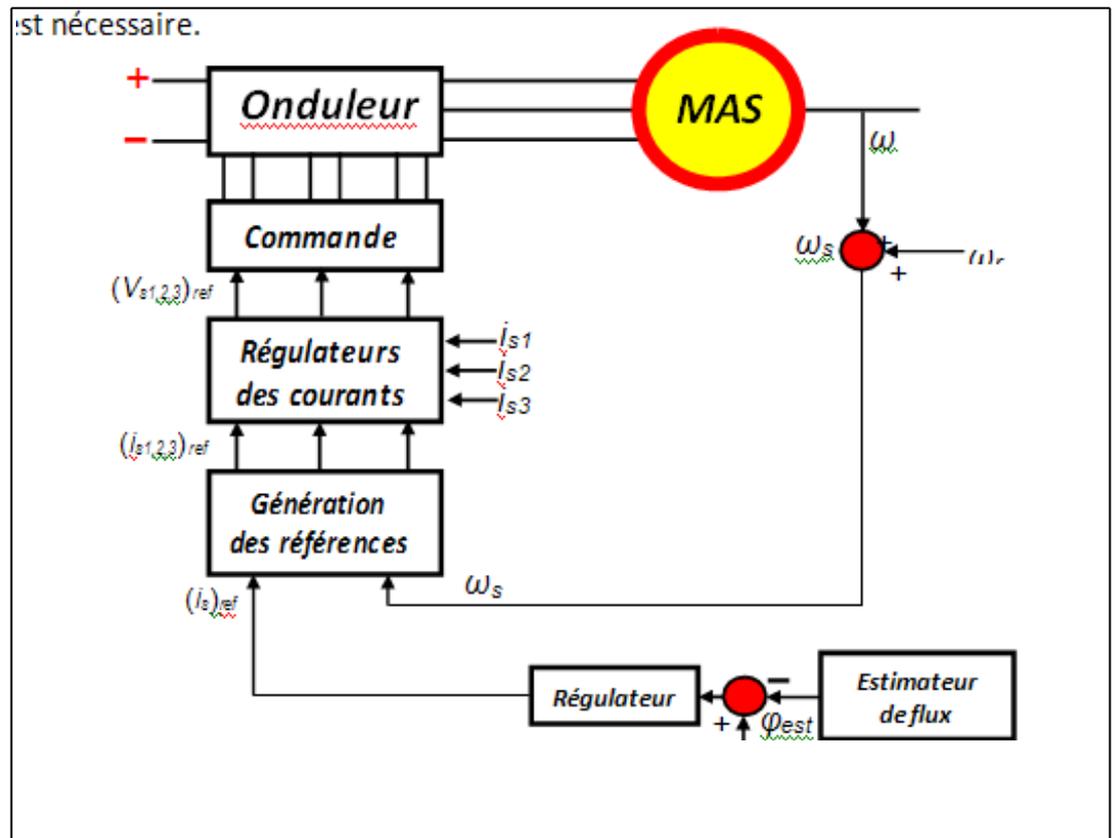


Figure (II-4) : Contrôle direct en courant avec une régulation des courants alternatifs

Un exemple d'estimateur de flux est montré sur la *figure (II-5)*, il correspond au modèle d'équations suivantes, dans un repère fixe  $\alpha, \beta$  :

$$V_{S\alpha} = R_S I_{S\alpha} + \frac{d\varphi_{S\alpha}}{dt} \quad [\text{II-25}]$$

$$V_{S\beta} = R_S I_{S\beta} + \frac{d\varphi_{S\beta}}{dt} \quad [\text{II-26}]$$

$$\varphi_{S\alpha} = \int (V_{S\alpha} - R_S I_{S\alpha}) dt \quad [\text{II-27}]$$

$$\varphi_{S\beta} = \int (V_{S\beta} - R_S I_{S\beta}) dt \quad [\text{II-28}]$$

$$\sqrt{3}\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad [\text{II-29}]$$

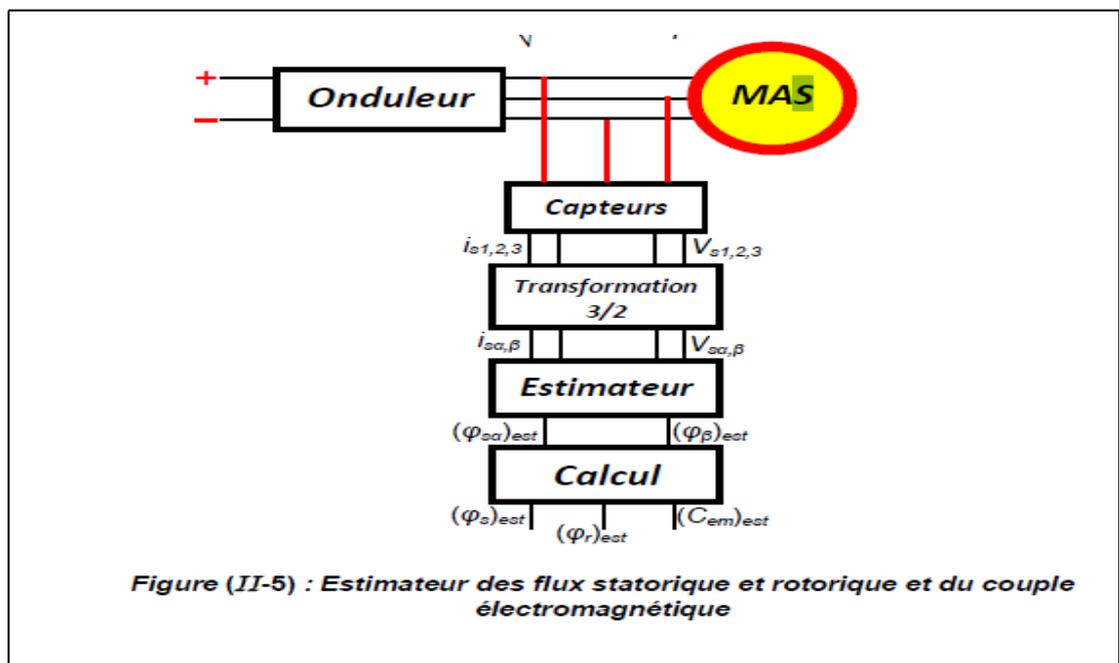
$$C_{em} = P(\varphi_{s\alpha}I_{s\beta} - \varphi_{s\beta}I_{s\alpha}) \quad [\text{II-30}]$$

Le flux rotorique dans ce même repère sont

$$\varphi_{r\alpha} = \frac{L_r}{M_{SR}}U_{s\alpha} - \sigma L_S I_{s\alpha} \quad [\text{II-31}]$$

$$\varphi_{r\beta} = \frac{L_r}{M_{SR}}U_{s\beta} - \sigma L_S I_{s\beta} \quad [\text{II-32}]$$

$$\sqrt{3}\varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \quad [\text{II-33}]$$



Cet estimateur qui correspond à un ensemble d'équations à résoudre ne nécessite pas un temps de calcul très long. Il permet également d'avoir une estimation non seulement du flux statorique, mais aussi du flux rotorique et du couple

Électromagnétique.

**Conclusion :**

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de Courant). L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne Puissance, c'est la commande en V/f qui est la plus utilisée.

Cette commande est basée sur le modèle de la machine asynchrone en régime permanent (modèle électromagnétique) pour avoir les meilleures réponses surtout ce qui concerne le couple et la vitesse.

. Le contrôle de couple et de la vitesse de la machine asynchrone nécessite le contrôle de son flux magnétique, selon deux méthodes :

1. Le contrôle indirect, en imposant de la tension ou du courant en fonction des fréquences (lois de régime permanent).
2. Le contrôle direct, en régulant le flux, ce qui nécessite sa mesure ou son estimation.

La deuxième méthode, plus compliquée à mettre en œuvre, permet de mieux imposer le flux au cours des régimes transitoires.

Une fois le flux imposé, le contrôle de couple dépend de la pulsation des courants rotoriques  $\omega_r$ .

Cette commande est basée sur le modèle de la machine asynchrone en régime permanent (modèle électromagnétique).