CV d'une MAS

1971 ⇒ theorie → Blaschke }
1980 ⇒ Pratique → Leonhard } allmands

haute performances / Trop rapide

→ hypotheses quasi-statiques n'est plus valable

Car on excite fortement les mode neglige

modele non lineaire et difficilement commandable

Modele lineaire

aisement commandable et dynamiques courant et flux maitrisable

solution CV

chapitre III

Commande vectorielle d'une machine asynchrone

- Concepts et implantations -

III.1] Interets :

La commande scalaire à flux constant offre en principe un réseau de caractéristique parallèles du couple en fonction de la vitesse, ainsi dire comme celui de la machine à courant continu. Mais le principal inconvénient c'est la maîtrise des transitoires, car le contrôle scalaire s'effectue uniquement par les valeurs efficaces des tensions, courants et flux. Donc, pour les applications de hautes performances dynamiques, la commande scalaire ne peut être utilisée. Cependant, il est à souligner que cette technique de commande est suffisamment utilisée dans les applications à très fortes inerties (pompes, compresseurs, ventilateurs, ...), comme elle est utilisée dans la plus part des applications industrielles, anciennement.
La commande dite vectorielle est une commande d'abord linéaire, ce qui permet une meilleure maîtrise des transitoires comme celle de la commande d'une Mcc.
Réalisant de très hautes performances dynamiques, elle touche actuellement toutes les applications exigeant un cahier de charge délicat en matière des performances dynamiques.

III.2 - Modèle vectoriel de la MAS :

III.3] Commande vectorielle par orientation du flux

Soit le modèle en régime dynamique de la MAS écrit dans une repère ~~quelconque~~ (d,q) tournant à la vitesse ~~arbitraire~~ synchrone W_s par rapport au stator.

$$U_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_s \Psi_{sq}$$
$$U_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_s \Psi_{sd} \quad \text{--(I)}$$
$$0 = R_r I_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_m)\Psi_{rq}$$
$$0 = R_r I_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_m)\Psi_{rd}$$

avec : ω_m = vitesse de rotation de l'arbre

ω_s = vitesse du repere (d, q) par rapport au stator

La conception de la commande vectorielle par orientation du flux necessite le choix d'un referentiel adequat parmi 3 possibilites :

1) Referentiel Lie au flux statorique -
2) ″ ″ ″ rotorique.
3) ″ ″ ″ d'entrefer.

1) Réferentiel Lie au flux statorique Ψ_s :

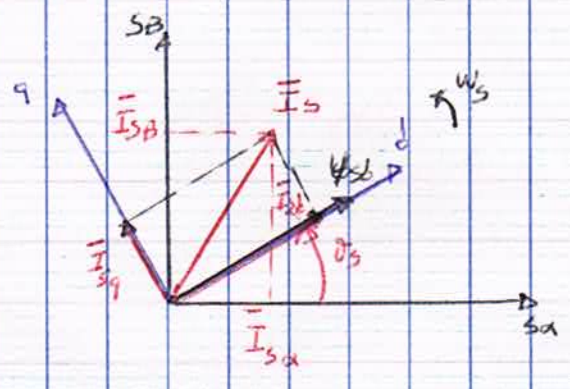


Figure I.

- on oriente d selon $\Psi_{sd} \Rightarrow \Psi_{sd} = \Psi_s$; $\Psi_{sq} = 0$

Or :

$$C_e = p(\Psi_{sd} I_{sq} - \Psi_{sq} I_{sd}) = p \cdot \Psi_{sd} I_{sq} = p \Psi_s I_{sq}$$

Le couple est le produit du flux par le courant statorique en quadrature.

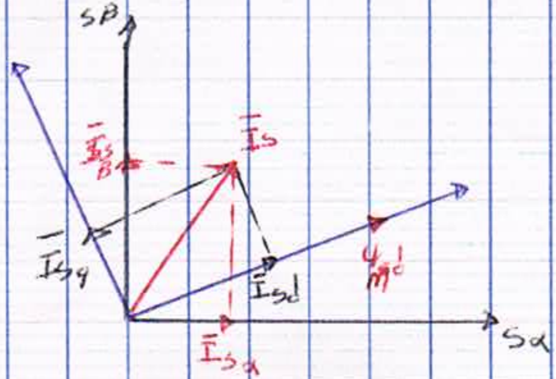
- En utilisant La premiere équation rotorique du modele (I) en regime transitoire, on obtient :

$$\frac{1}{L_s}\left(1 + T_r \frac{d}{dt}\right)\Psi_{sd} = \left(1 + \sigma T_r \frac{d}{dt}\right) i_{sd} - (\omega_s - \omega)\sigma T_r I_{sq}$$

on peut dire que le flux ne depent pas seulement de la composante du courant statorique dans L'axe d, mais Ψ_s depend de I_{sd} et I_{sq}

donc ce choix ne permet pas un decouplage entre le flux et le couple.

2) Referentiel Lie au flux



- Figure II -

Expressions du flux d'entrefer :

on a :

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + M I_{rd}$$
$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + M I_{rq}$$

donc :

$$\psi_{sd} = L_s \bar{I}_{sd} + M \bar{I}_{rd} + M \bar{I}_{sd} - M \bar{I}_{sd}.$$
$$\psi_{sq} = L_s \bar{I}_{sq} + M I_{rq} + M I_{sq} - M I_{sq}$$

alors :

$$\psi_{sd} = (L_s - M) I_{sd} + \underbrace{M \overbrace{(I_{rd} + I_{sd})}^{I_{md}}}_{\psi_{md}}$$
$$\psi_{sq} = (L_s - M) I_{sq} + M (I_{rq} + I_{sq})$$

posant :

$$L_s - M = L_{\sigma s} \,,\quad I_{rd} + I_{sd} = I_{md} \,,\quad I_{rq} + I_{sq} = I_{mq}$$

et : $\psi_{md} = M I_{md}$

$$\psi_{mq} = M I_{mq}$$

alors : $\psi_{sd} = L_{\sigma s} I_{sd} + \psi_{md}$

$$\psi_{sq} = L_{\sigma s} I_{sq} + \psi_{mq}$$

Le couple electromagnetique est donné par :

$$C_e = P(\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd})$$

remplaçons ψ_{sd} et ψ_{sq} par leurs expressions on obtient :

$$C_e = P(\psi_{md} I_{sq} - \psi_{mq} I_{sd})$$

Comme le flux d'entrefer est orienté sur l'axe d, alors =

$$\Psi_{md} = \Psi_m \quad ; \quad \Psi_{mq} = 0$$

alors : $C_e = p\,\Psi_{md} \cdot I_{sq} = p\,\Psi_m I_{sq}$

Le couple est le produit du flux et le courant de l'axe q (I_{sq})

- à partir de la première équation rotorique, on définit la relation entre le flux et les courant statoriques :

$$\frac{1}{M}\left(1 + p\,T_r \frac{d}{dt}\right)\Psi_{md} = \left(1 + p\,T_r \frac{d}{dt}\right) i_{sd} - (\omega_s - \omega_r)\,T_r\, i_{sq}$$

Le flux Ψ_m dépend de I_{sd} et I_{sq}, Alors il n'y a pas de découplage entre le flux et le couple.

3) Referentiel lié au flux rotorique :

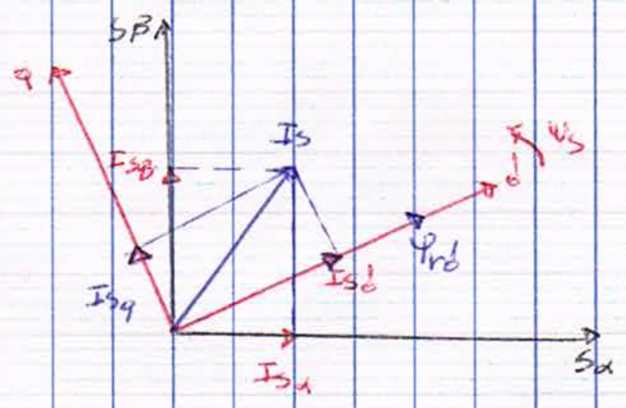


Figure III :

on oriente l'axe d sur le flux rotorique, Alors :

$$\Psi_{rd} = \Psi_r \quad ; \quad \Psi_{rq} = 0$$

donc : $C_e = \frac{PM}{L_r}\left(\Psi_{rd} \cdot I_{sq} - \Psi_{rq} I_{sd}\right) = \frac{PM}{L_r}\,\Psi_r\, I_{sq}$

Le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

- avec la première équation du rotor, on obtient :

$$\left(1 + T_r \frac{d}{dt}\right)\Psi_{rd} = M \cdot i_{sd}$$

ainsi, le flux ne dépend que de la composante du courant statorique dans L'axe d, d'où un decouplage naturel entre le flux et les granbeurs selon L'axe q.

Conclusion =

Dans les trois réferentiels, le couple est proportionné au produit du flux par La composante statorique en quadrature avec le flux. Ainsi dans un fonctionnement à flux constant, cette composante est L'image du couple.

Seul le choix du flux rotorique permet un decouplage naturel caracterisé par une indépendance du flux par rapport à la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

Le référentiel lie au flux rotorique est choisi pour obtenir des fonctionnement de la MAS comparables à ceux de la MCC.

Dans La majorité des cas, le référentiel est choisi selon le flux rotorique.

III.3] Commande vectorielle par orientation du flux rotorique -CV-OFR-

La CV-OFR exige l'imposition de $\psi_{rq} = 0$, ainsi le modèle dynamique (I) de la MAS est donné comme suit (après transformation de Laplace) :

$$U_{sd} = (R_s + s\sigma L_s) I_{sd} + s\frac{L_m}{L_r}\psi_r - \omega_s \sigma L_s I_{sq} \quad \text{---(1)}$$

$$U_{sq} = (R_s + s\sigma L_s) I_{sq} + \omega_s \frac{L_m}{L_r}\psi_r + \omega_s \sigma L_s I_{sd} \quad \text{---(2)}$$

$$\psi_r = \frac{L_m}{1 + sT_r} I_{sd} \quad \text{------(3)}$$

$$\omega_r = \frac{L_m}{T_r \cdot \psi_r} I_{sq} \quad \text{---(4)}$$

$$C_e = \frac{3pL_m}{2L_r}\psi_r \cdot I_{sq} \quad \text{---(5)}$$

- L'équation (3) signifie que le modèle de la MAS est dans le repère synchrone à flux rotorique orienté. Le module de ce flux est contrôlé linéairement par la composante du courant directe I_{sd} selon une dynamique d'un 1er ordre avec la constante de temps T_r.
- L'équation (4) signifie que si le flux est établi à sa valeur de référence, alors la pulsation de glissement ou rotorique devient proportionnelle à la composante I_{sq}, qui est naturellement une image du couple développé C_e donné par l'équation (5)
- L'équation (5) donnant C_e est : $C_e = \frac{3pL_m}{2L_r} \cdot \psi_r I_{sq}$

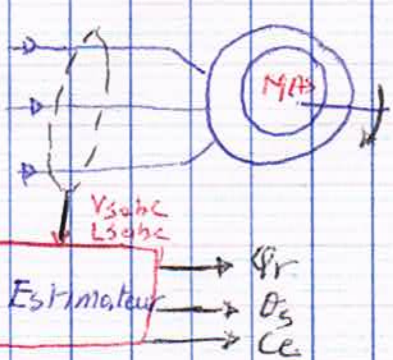
en posant : $K = \frac{3pL_m}{2L_r}$; (5) devient : $C_e = K\psi_r I_{sq}$
qui est une équation similaire à celle d'un MCC, d'autant plus que $\psi_r = cste$, alors C_e devient directement contrôlable linéairement par I_{sq}.

III-1] Classification de la commande vectorielle :
La commande vectorielle par orientation du flux peut être classée suivant :

*] type d'alimentation de la machine : on distingue :
- commande vectorielle en courant (MAS alimentée en courant)
- " " en tension (" " en tension)

*] technique d'obtention de l'angle d'orientation θ_s : on distingue :
- commande vectorielle directe : θ_s est calculée directement à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.
- commande vectorielle indirecte : θ_s est calculée à partir de la "pulsation statorique", elle même reconstitue à l'aide de la vitesse de la machine ω_m et de la pulsation rotorique ω_r.

A] Commande vectorielle directe : (CV-OFR-Directe)
cette methode est basée sur la mesure ou l'estimation des composantes des flux dans le repère (α,β) pour la détermination de la position du flux.
Le concept de base est donné par le schema suivant :



dans les axes (α,β), on a les relation suivantes :

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \Rightarrow \psi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha})\,dt$$

avec : $\psi_s = \psi_{s\alpha} + j\,\psi_{s\beta}$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \Rightarrow \psi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta})\,dt$$

on a aussi :

$$\psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m}(\psi_{s\alpha} - \sigma L_s\, i_{s\alpha})$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m}(\psi_{r\beta} - \sigma L_s\, i_{s\beta})$$

avec : $\psi_r = \psi_{r\alpha} + j\,\psi_{r\beta}$

les composantes du flux rotorique sont estimées par les relations suivantes.

- son module est donné comme suit = $\boxed{\Psi_r = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}}$
- la position (phase) peut être déterminée par = $\boxed{\theta_s = \operatorname{arctg} \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}}}$
- le couple électromagnétique donné par des grandeur mesure et estimées est :

$$C_e = \frac{3pL_m}{2L_r}\left(\hat{\Psi}_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}\right)$$

Il est clair donc que des boucles optionnelles de régulation du flux ou du couple peuvent être ajoutées.

R_m^{rq} =

Pour la détermination du flux Ψ_r, on peut utiliser la mesure du flux d'entrefer car = la relation entre Ψ_r et Ψ_m est donné par =

on sait que :

$$\Psi_r = L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s = L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_r - L_m \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s$$
$$= (L_r - L_m)\bar{I}_r + L_m(\bar{I}_r + \bar{I}_s)$$

alors = $\Psi_r = L_{\sigma r} \bar{I}_r + L_m \bar{I}_m = L_{\sigma r} I_r + \bar{\Psi}_m$

Ψ_m = flux d'entrefer.

le seul défaut, c'est l'utilisation des sondes à effet Hall. ces capteur sont très fragiles et très sensible aux fluctuation du flux à cause de l'encochage du stator.

B) Commande vectorielle indirecte (CV-OFR-indirecte)

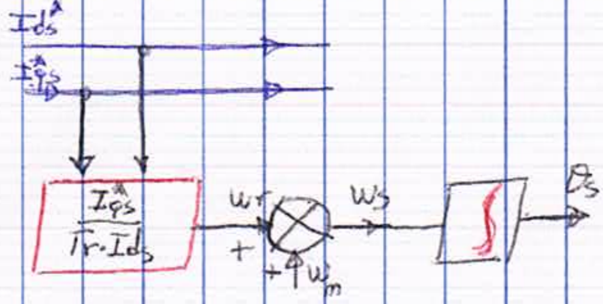
L'angle d'orientation θ_s est obtenue à partir de la loi d'autopi lotage comme :

$$\omega_r = \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{I_{qs}}{\Psi_r} = \frac{I_{qs}}{T_r \cdot I_{ds}} \quad ; \text{ posant : } \Psi_r = L_m I_{ds}.$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \omega_m + \omega_r \Rightarrow \theta_s = \int \omega_s \, dt = \int (\omega_m + \omega_r)\, dt = \int \left(\omega_m + \frac{I_{qs}}{T_r \cdot I_{ds}}\right) dt$$

θ_s définit la position du flux par rapport au stator.

Le concept de base est donné par le schéma suivant:



Cette méthode est très sensible aux variations des paramètres: si T_r varie $\Rightarrow$ W_r varie $\Rightarrow$ θ_s (dans le moteur varie) varie et θ_{sc} (de la commande reste constante puisque T_r dans la commande reste constant) reste constante $\Rightarrow$ on aura un angle θ_{sc} qui ne représente pas en exactitude la position du flux $\Rightarrow$ le découplage est affecté et les performances de régulation peuvent être dégradées.

III.3.2] Commande vectorielle en Courant (Alim en courant):

1) Modèle d'une MAS alimentée en courant:

Dans ce modèle les variables de contrôle sont les courant statorique i_{ds}, i_{qs}.

Considérons les flux rotoriques $\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$ comme variable d'état ($x = [\varphi_{dr}, \varphi_{qr}]$) et i_{ds} et i_{qs} comme grandeurs de commande $u = [i_{ds}, i_{qs}]$ alors, le modèle d'état de la machine est donné par: $\dot{X} = AX + BU$

avec:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & w_r \\ -w_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} \end{bmatrix}$$

L'équation du couple est: $C_e = \frac{3pL_m}{2L_r}(\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds})$

Pour obtenir les lois de la CV-OFR, il faut imposer $\psi_{rq} = 0$ dans le modèle d'état précédent, et on obtient les équations :

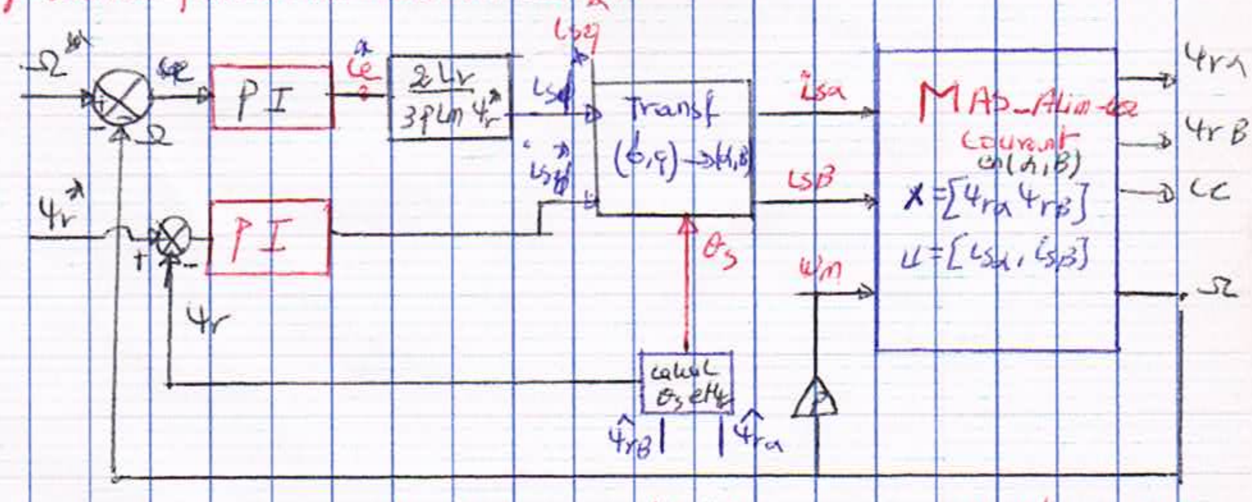
$$\left.\begin{aligned} \psi_r &= \frac{L_m}{1+sT_r} I_{sd} \\ \omega_r &= \frac{L_m}{T_r \psi_r} \cdot I_{sq} \\ C_e &= \frac{3pL_m}{2L_r} \psi_r \cdot I_{sq} \end{aligned}\right\}$$

(sont les même équation ①, ② et ③ du modèle I)

2) Commande vectorielle directe :

Dans ce type de commande l'angle d'orientation θ_s est obtenue par la relation $\theta_s = \operatorname{arctg} \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}}$, en effet, elle ~~dépend~~ a l'avantage de dépendre beaucoup moins des variations de paramètre de la machine. et comme le flux est mesuré ou estimée (pour calculer θ_s), on peut le réguler. La régulation du flux va augmenter les performances demandées.

2.1) schéma fonctionnel de simulation :

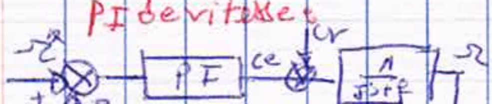


Commande vectorielle directe en courant d'une MAS

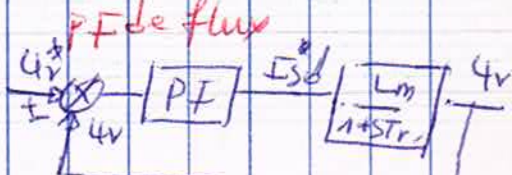
(contrôle de vitesse d'une MAS-Alim courant en CV-OFR avec contrôle de flux)

• calcul des régulateur :

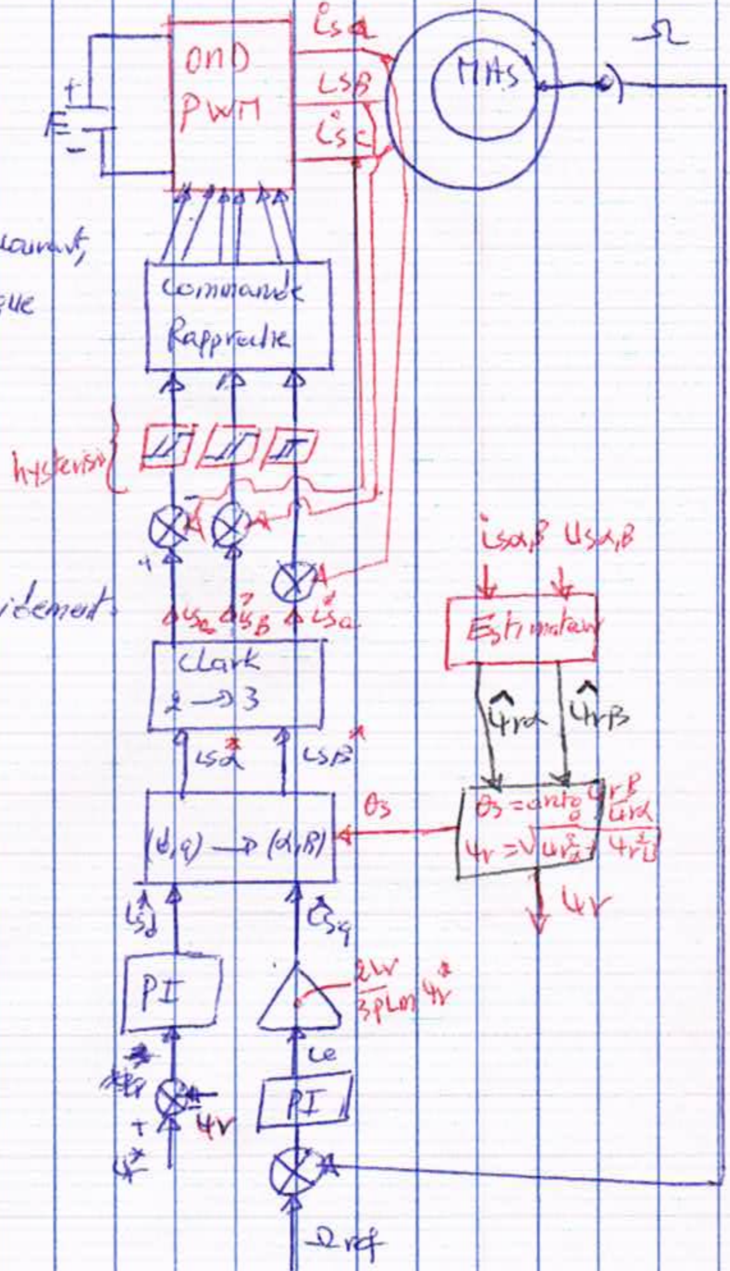
PI de vitesse :



PI de flux



2.2] shema technologique :



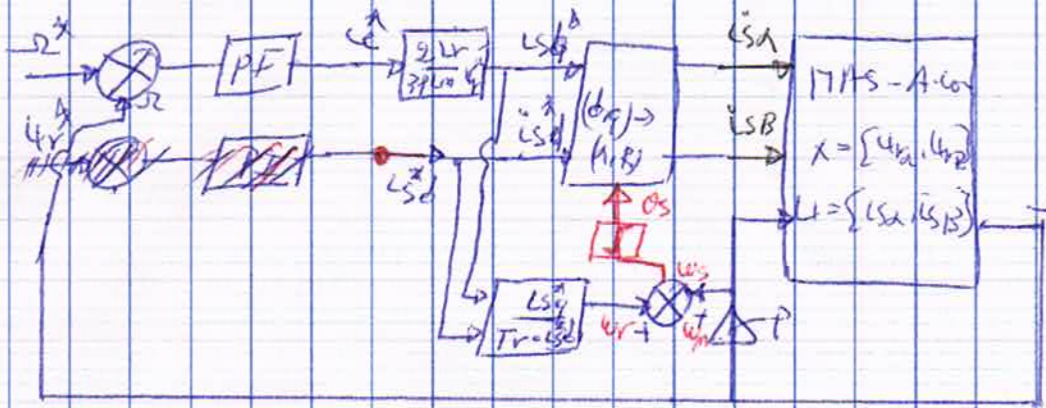
Remarque:

- il faut noter ici dans le cas de la MAS-Alim-courant, L'orientation du flux rotorique est parfaitement ~~pour~~ suffisante pour avoir une commande Linéaire decouplée si toutefois le flux s'établit rapidement.

3) Commante vectorielle indirecte :

Dans ce type de commande, L'angle d'orientation θ_s est obtenue par la formule : $\theta_s = \int (\omega_m + \frac{L_m}{T_r \psi_r} \cdot I_{sq}) dt$. cette commande est plus facile en implantation mais elle est tres sensible aux variations des parametre de la MAS (surtout T_r), donc les performance demandées ~~être~~ peuvent être degradées.

3.1) schèma fonctionnel de simulation :



commande vectorielle indirecte en courant d'une MAS

{ controle de vitesse d'une MAS - alim - courant - en CV-OFR } sans controle de flux

~~Remarque :~~

~~Dans le cadre de la CV-OFR~~ / Direct

B.3.3] Commande vectorielle en tension (Alim. - en tension)

Ici les commandes ou les inputs ne sont pas des courants mais, des tensions - entrées ordinaires d'une MAS - la CV est elaborée en exploitant les equations ①, ②, ③, ④ et ⑤.

Dans le cas d'une commande en flux et en couple par orientation du flux où C_e^* et Ψ_r^* sont imposés au reference.

alors d'apres (3) et (4) on a:

$$I_{ds} = \frac{1}{L_m}(T_r \cdot s + 1)\Psi_r^*$$

$$I_{qs} = \frac{2L_r}{3pL_m} \cdot \frac{C_e^*}{\Psi_r^*}$$

et les equations d'attaque de la machine sont données par:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{L_m}{L_r}\frac{d\Psi_r^*}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{L_m}{L_r}\Psi_r^* + \omega_s \sigma L_s I_{ds}$$

la mise en oeuvre de la CV de cette maniere ne permet pas des performances tres elevées puisqu'on a:

1) presence des derivateurs ⇒ provocation des divergences quand il y a des signaux à variation rapide (Echellon)

2) presence des termes de couplage entre les axes d et q ⇒ alteration de la quantité d'orientation du flux et donc du decouplage flux - couple.

par consequent, il faut effectuer une CV-OFR decouplée, le decouplage est assuré par l'ajout des termes de decouplage ou de compensation.

* Decouplage statique:

on suppose que Ψ_r varie lentement par rapport a i_s.

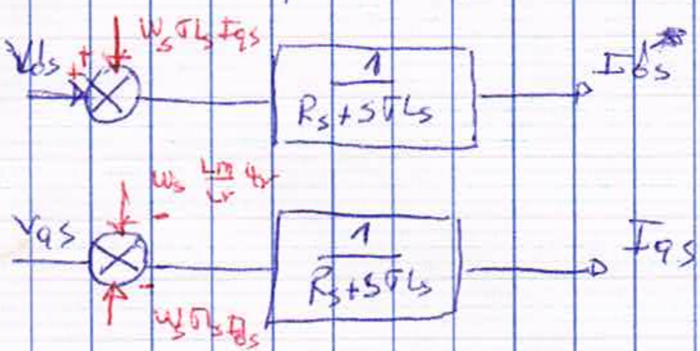
alors: $V_{ds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{qs}$ $\left(\frac{d\Psi_r}{dt} = 0\right)$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{L_m}{L_r}\Psi_r^* + \omega_s \sigma L_s I_{ds}$$

donc : $V_{ds}^{*} + \omega_s \sigma L_s I_{qs} = (R_s + s\sigma L_s)\, I_{ds} = U_{ds}^{*}$

$V_{qs} - (\omega_s \frac{L_m}{L_r}\psi_r + \omega_s \sigma L_s I_{ds}) = (R_s + s\sigma L_s)\, I_{qs} = U_{qs}^{*}$ (obtenue par la commande)

et notre machine sera représentée par le schema bloc suivant :

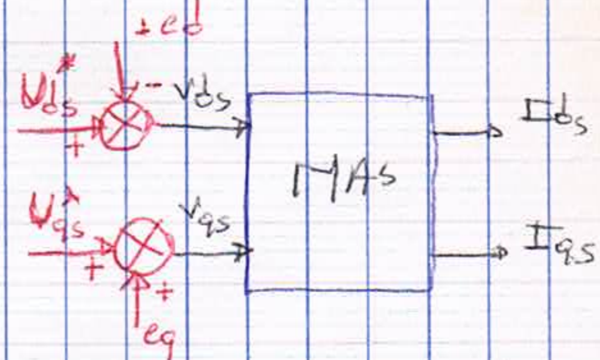


modele de la machine

$+\omega_s \sigma L_s I_{qs} = e_d$ terme a compenser sur l'axe d

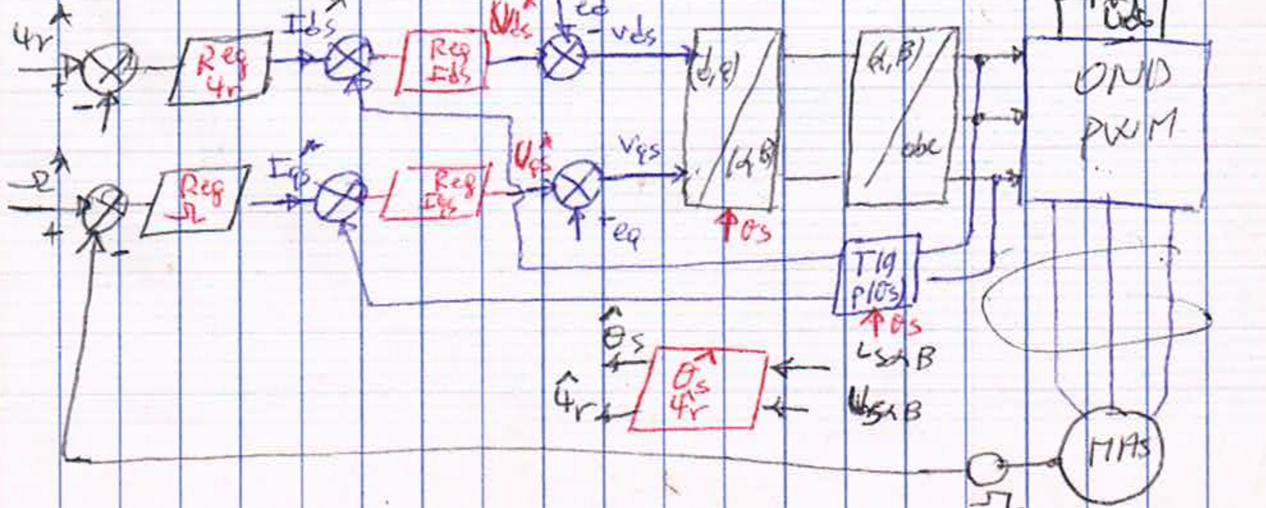
$-(\omega_s \frac{L_m}{L_r}\psi_r + \omega_s \sigma L_s I_{ds}) = e_q$ terme a compenser sur l'axe q.

enfin, le schema bloc suivant represente la regulation decouplée souhaitée :



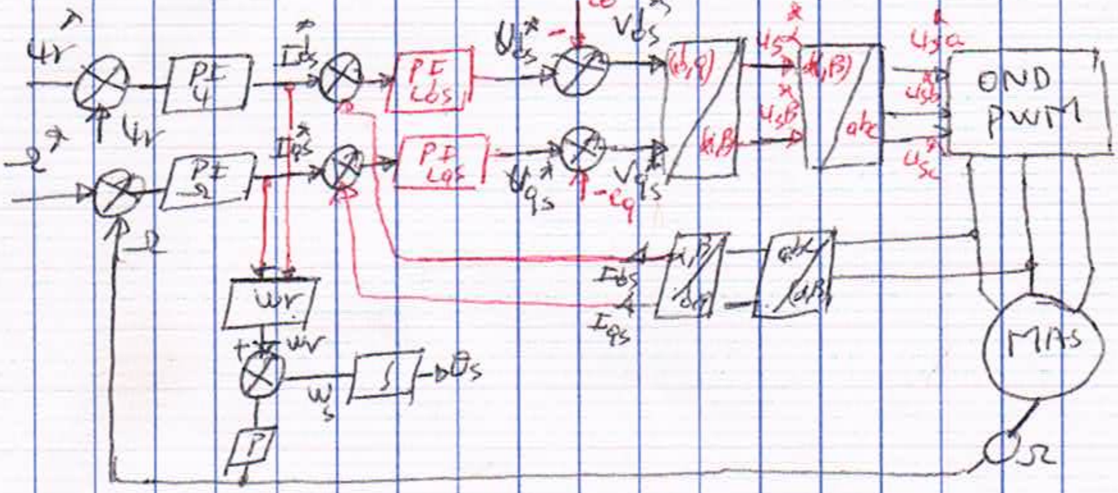
1) Commande vectorielle directe (CV-OFR-directe)

La structure de commande est donnée par le schema bloc suivant



2) Commande vectorielle indirecte (CV-OFR-indirecte)

La structure de commande est donnée par le schéma bloc suivant



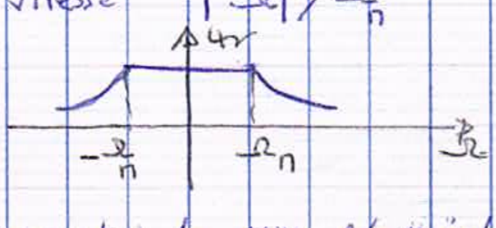
Cette structure de commande est caractérisée par la sensibilité au variation paramétrique dans le bloc d'autopilotage. Donc, les performances de régulation seront dégradées.

Remarque :

Dans les différents types de la CV-OFR (spécialement la CV-OFR indirecte), le flux Ψ_r est imposé selon la vitesse de rotation de la MAS par un bloc dit de défluxage définit par la fonction non-linéaire suivante :

Sous-vitesse $\quad -\Omega_n < \Omega < \Omega_n \quad \Psi_r = \Psi_{rn}$

Sur-vitesse $\quad |\Omega| > \Omega_n \quad \Psi_r = \dfrac{\Psi_{rn} \cdot \Omega_n}{|\Omega|}$



Le défluxage permet à la MAS d'atteindre des vitesses supérieures à la vitesse nominale. Dans ce cas, le couple maximal que l'on peut imposé devient faible (traction électrique : C_e fort au démarrage puis un C_e plus faible en marche normal) donc le défluxage permet l'exploitation optimale des capacités magnétique de la MAS en sous-vitesse et en sur-vitesse.