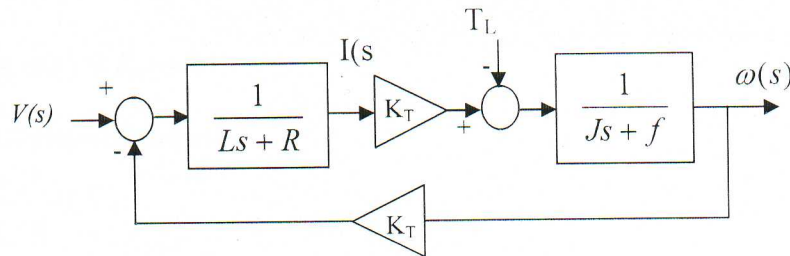


Corrigé type de l'examen « Commande des machines »Exercice #1**1- Schéma-bloc de la MCC en boucle ouverte :**

A partir du modèle de la MCC, l'entrée est la tension  $V(s)$  et la sortie est la vitesse angulaire  $\omega(s)$ .

**2-  $K_{ip}$  et  $K_{il}$  par la méthode des lieux des pôles :**

On a  $\xi = 0.3$  et  $t_r = 0.1 \text{ sec}$ .

$$G(s) = \frac{I(s)}{V(s)} = \frac{Js + f}{LJs^2 + (Lf + RJ)s + Rf + K_T^2}$$

$$= \frac{s + z_1}{(s + s_1)(s + s_2)} \quad z_1 = 1, \quad s_1 = 8.83 - j16.49 \text{ et } s_2 = 8.83 + j16.49$$

$$\sigma = -3/t_r = -30 \text{ et } \theta = \alpha \cos(\xi) = 1.26 \text{ rad.}$$

Le pôle dominant devient  $s_d = \sigma + j|\sigma|\tan(\theta) = -30 + j95.39$

$$\alpha = \pi - \arg(s_d + z_1) + \arg(s_d) + \arg(s_d + s_1) + \arg(s_d + s_2)$$

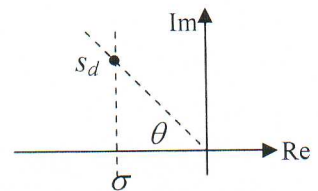
$$= 6.74 \text{ rad}$$

$$|z| = |\sigma| + \frac{I_m(s_d)}{\tan(\alpha)} = 223.20$$

$$K = \frac{|s_d||s_d + s_1||s_d + s_2|}{|s_d + z||s_d + z_1|} = 43.29$$

Les paramètres du correcteur PI sont alors:

$$\begin{cases} k_p = K = 43.29 \\ k_i = zk_p = 9664.7 \end{cases}$$

**3- Etape de calcul des gains  $K_{\omega P}$  et  $K_{\omega I}$  par la méthode de Bode :**

- On calcule la fonction de transfert globale à commander

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{I_r(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \frac{K_T}{Js + f} = \frac{10}{(0.1s + 1)(s + 1)} = \frac{100}{(10 + j\omega)(1 + j\omega)}$$

- On détermine le pôle le plus défavorable qui est :  $s_I = -1$

Alor, le zéro du correcteur devient :  $z = \frac{K_{\omega I}}{K_{\omega P}} = -p_1 = 1$

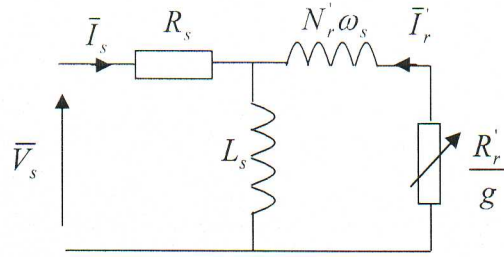
- Prenant le module et l'argument du système résultant,  $\frac{100K_{\omega P}}{j\omega(10 + j\omega)}$ , on calcule le gain  $K_{\omega P}$  par la translation vertical du module en dB en assurant une marge de phase désirée (en pratique  $\Delta\Phi \approx 45^\circ$ ).
- Finalement, le gain de l'action intégrale devient :  $K_{\omega I} = zK_{\omega P}$ .

## Exercice #2

### 1- Schéma électrique équivalent du modèle de la MAS en régime permanent :

A partir du modèle ci-dessous, on trace directement le schéma électrique correspondant

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jL_s \omega_s (\bar{I}_s + \bar{I}_r') \\ 0 = \frac{R_r'}{g} \bar{I}_r' + jN_r' \omega_s \bar{I}_r' + jL_s \omega_s (\bar{I}_s + \bar{I}_r') \end{cases}$$



### 2- $C_{e\max}$ dans le cas où $R_s \rightarrow 0$ :

Le couple électromagnétique est

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega_s} = 3 \frac{p}{\omega_s} \frac{R_r'}{g} I_r'^2$$

avec

$$\bar{I}_r' = \frac{V_s - R_s \bar{I}_s}{\frac{R_r'}{g} + jN_r' \omega_s} \quad \text{Pour } R_s \rightarrow 0, \text{ on obtient } I_r'^2 = \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 + (N_r' \omega_s)^2}$$

$$\text{Alors, } C_e = 3 \frac{p}{\omega_s} V_s^2 \frac{\frac{R_r'}{g}}{\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 + (N_r' \omega_s)^2}$$

$$\frac{dC_e}{dg} = 0 \Rightarrow R_r' (R_r'^2 + g^2 N_r'^2 \omega_s^2) - 2 R_r' g^2 N_r'^2 \omega_s^2 = 0 \Rightarrow g = g_m = \frac{R_r'}{N_r' \omega_s}$$

Enfin

$$C_{e\max} = C_e(g_m) = 3 \frac{p}{\omega_s} V_s^2 \frac{\frac{R_r'}{N_r' \omega_s}}{R_r'^2 + \frac{R_r'^2}{(N_r' \omega_s)^2} (N_r' \omega_s)^2} = 3 \frac{p}{2 N_r'} \left( \frac{V_s}{\omega_s} \right)^2$$

### 3- Commande vectorielle :

La commande vectorielle sert à la linéarisation du couple  $C_e$  comme le cas d'une MCC. Le contrôle de l'angle synchrone  $\theta_s$  permet d'obtenir:

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \Phi_r^* i_{qs} \Rightarrow \begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r^* = cst \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases}$$

Le courant de référence  $i_{qs}^*$  délivré par le correcteur de vitesse est obtenu par  $i_{qs}^* = \frac{2L_r C_{em}^*}{3pM\Phi_{dr}^*}$

Pour calculer le courant de référence  $i_{ds}^*$  et  $\omega_r^*$ , on utilise le modèle de la MAS. D'où

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} + d\Phi_{dr} / dt \\ \Phi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_{dr} = 0 \\ \Phi_{dr} = \Phi_r^* = M i_{ds}^* \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} + d\Phi_{qr} / dt \\ \Phi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_r i_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} = 0 \\ M i_{qs} + L_r i_{qr} = 0 \end{cases}$$

En manipulant des deux équations ci-dessus, on trouve

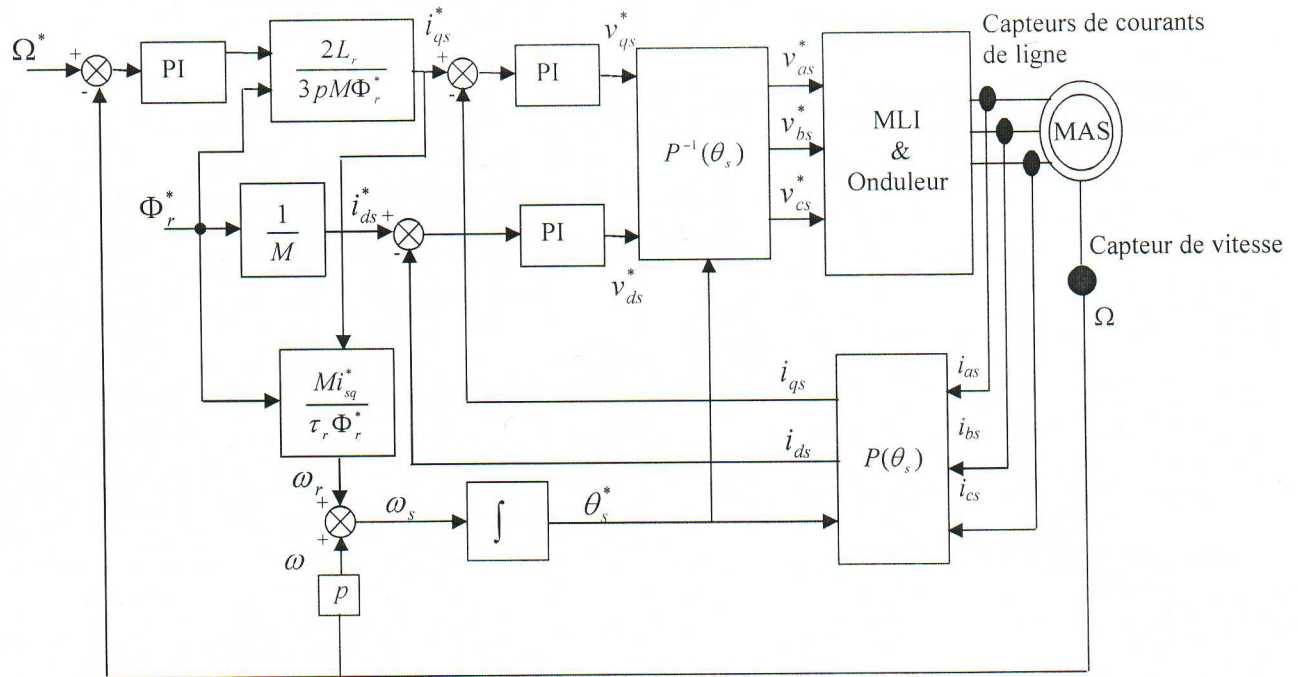
$$i_{ds}^* = \frac{\Phi_r^*}{M}$$

$$\omega_r^* = \frac{R_r M}{L_r \Phi_r^*} i_{qs}^*$$

Alors

$$\theta_s = \int_0^t (\omega_r^* + p\Omega) dt$$

Le schéma fonctionnel de la commande vectorielle directe de la MAS est montré ci-dessous:



#### 4- Impulsions de commande « MLI » pour l'onduleur de tension triphasé :

Les impulsions de la commande MLI sont obtenues par la comparaison des tensions de référence  $v_{as}^*$ ,  $v_{bs}^*$  et  $v_{cs}^*$  avec un signal triangulaire de fréquence élevée (environ de 20KHz).

Pour cela, le calcul de ces tensions est obtenu à partir de  $v_{ds}^*$  et  $v_{qs}^*$  utilisant la transformation de Park inverse. Le modèle de la MAS nous conduit à écrire :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M(\Phi_{dr} - M i_{ds}) / L_r = (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr}$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M(\Phi_{qr} - M i_{qs}) / L_r = (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr}$$

Pour  $\Phi_{qr} = 0$  et  $\Phi_{dr} = \Phi_r^*$ , on remplace les expressions de  $\phi_{ds}$  et  $\phi_{qs}$  dans les équations de tension :



$$\begin{cases} v_{qs} - \omega_s (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{ds} - \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_r^* = u_1 = R_s i_{qs} + (L_s - \frac{M^2}{L_r}) \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_r^* \\ v_{ds} + \omega_s (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{qs} = u_2 = R_s i_{ds} + (L_s - \frac{M^2}{L_r}) \frac{di_{ds}}{dt} \end{cases}$$

On élimine les parties non linéaires pour déterminer les gains du correcteur PI. Les sorties des correcteurs PI sont additionnées par les quantités non linéaires pour déterminer en temps réel les tensions  $v_{ds}^*$  et  $v_{qs}^*$  comme montré par le schéma ci-dessous.

