

**Exercice1 :**

Les équations de stator dans la répare (abc) donné par :  $[V_{abc}] = [R_s] \cdot [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]$

Trouver les équations statorique de la MAS dans les axes d-q :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix}$$

**Exercice 2 :**

l-écrit sous la forme d'une équation d'état le modèle mathématique de la MAS, dans le repère (d-q)

$$\dot{X} = AX + BU \quad \text{avec : } X = [i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}]^T : \text{ Vecteur d'état}$$

**Exercice 3 :** Compléter le vide dans la table suivant

les expressions	Schéma de simulation
Transformation de PARK (modifier) $\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}$ la transformée de PARK modifier conserve la puissance et l'amplitude )	
Transformation de PARK ( <b>modifier</b> ) inverse	
Transformation de <b>Concordia</b> (PARK <b>modifier</b> $w_{\text{coor}}=0$ ) $\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$ Transformation de <b>Clarke</b> (PARK $w_{\text{coor}}=0$ )	
Matrice de rotation dq...alph beta $\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$ alph beta .... dq $\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$	
Modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux $\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$	
Commande de l'onduleur par modulation sinus – triangle(MLI)	
Commande de l'onduleur par hystérésis	

## Solution de TD 1

### Exercice 1 :

$$[V_{abc}] = [R_s] \cdot [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]$$

$$[V_{dq}] = [p]^{-1} ([R_s] \cdot [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]) = [p]^{-1} [R_s] [p] [I_{dq}] + [p]^{-1} \frac{d}{dt} ([p] [\phi_{dq}]) = [R_s] [I_{dq}] + [p]^{-1} \frac{d}{dt} [p] [\phi_{dq}] + [I_{dq}] \frac{d}{dt} [\phi_{dq}]$$

$$[V_{dq}] = [R_s] [I_{dq}] + [I_{dq}] \frac{d}{dt} [\phi_{dq}] + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} [\phi_{dq}]$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix}$$

### Exercice 2 :

Les équations électriques :

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = i_{s\alpha} \cdot r_s + \frac{d\Phi_{s\alpha}}{dt} \\ U_{s\beta} = i_{s\beta} \cdot r_s + \frac{d\Phi_{s\beta}}{dt} \\ 0 = i_{s\alpha} \cdot r_r + \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} + \Phi_{r\beta} \cdot \omega_r \\ 0 = i_{s\beta} \cdot r_r + \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} - \Phi_{r\alpha} \cdot \omega_r \end{cases} \quad 1$$

$V_{dr} = v_{qr} = 0$  : Le rotor étant en court-circuit,

Les équations des flux

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + M i_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + M i_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + M i_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + M i_{\beta s} \end{cases} \quad 2$$

L'équation de couple électromagnétique:

$$C_e = \frac{3}{2} PM (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{s\alpha} i_{r\beta})$$

les équations (2) dans (2) nous aurons :

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = i_{s\alpha} \cdot r_s + \frac{d}{dt} (L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha}) \\ U_{s\beta} = i_{s\beta} \cdot r_s + \frac{d}{dt} (L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta}) \\ 0 = i_{s\alpha} \cdot r_r + \frac{d(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha})}{dt} + (L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta}) \cdot \omega_r \\ 0 = i_{s\beta} \cdot r_r + \frac{d(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta})}{dt} - (L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha}) \cdot \omega_r \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ L_s & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r M & -r_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & -r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donc l'équation d'état du système donne par :

$$[L] \frac{d}{dt} [I] = [A][I] + [V]$$

$$\frac{d}{dt} [I] = [L^{-1}] ([A][I] + [V])$$

### Exercice3 :

#### Transformation de PARK (modifier)

$$V_{ds} = (u[1] \cdot \cos(u[4]) + u[2] \cdot \cos(u[4] + 2 \cdot \pi/3) + u[3] \cdot \cos(u[4] + 4 \cdot \pi/3)) \cdot \sqrt{2/3}$$

$$V_{qs} = -(u[1] \cdot \sin(u[4]) + u[2] \cdot \sin(u[4] + 2 \cdot \pi/3) + u[3] \cdot \sin(u[4] + 4 \cdot \pi/3)) \cdot \sqrt{2/3}$$

#### Transformation de PARK inverse (modifier)

$$V_{as} = \sqrt{2/3} \cdot (u(1) \cdot \cos(u(3)) - u(2) \cdot \sin(u(3)))$$

$$V_{bs} = \sqrt{2/3} \cdot (u(1) \cdot \cos(u(3) + 2 \cdot \pi/3) - u(2) \cdot \sin(u(3) + 2 \cdot \pi/3))$$

$$V_{cs} = \sqrt{2/3} \cdot (u(1) \cdot \cos(u(3) + 4 \cdot \pi/3) - u(2) \cdot \sin(u(3) + 4 \cdot \pi/3))$$

#### Transformation de Concordia

$$V_{ds} = (u[1] \cdot \cos(0) + u[2] \cdot \cos(2 \cdot \pi/3) + u[3] \cdot \cos(4 \cdot \pi/3)) \cdot \sqrt{2/3}$$

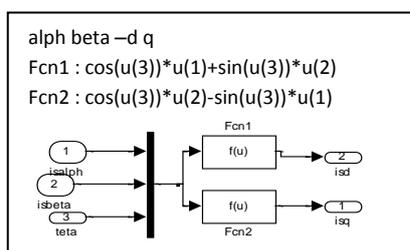
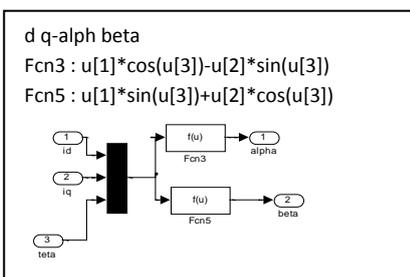
$$V_{qs} = -(u[1] \cdot \sin(0) + u[2] \cdot \sin(2 \cdot \pi/3) + u[3] \cdot \sin(4 \cdot \pi/3)) \cdot \sqrt{2/3}$$

#### Transformation de Clarke

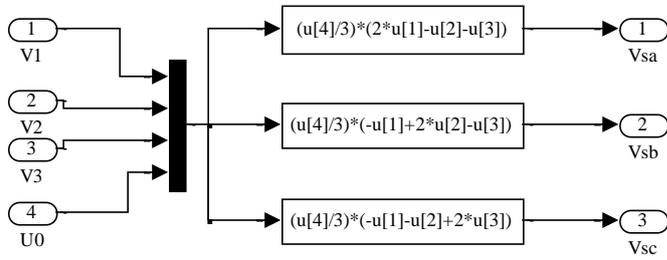
$$V_{ds} = (u[1] \cdot \cos(0) + u[2] \cdot \cos(2 \cdot \pi/3) + u[3] \cdot \cos(4 \cdot \pi/3)) \cdot (2/3)$$

$$V_{qs} = -(u[1] \cdot \sin(0) + u[2] \cdot \sin(2 \cdot \pi/3) + u[3] \cdot \sin(4 \cdot \pi/3)) \cdot (2/3)$$

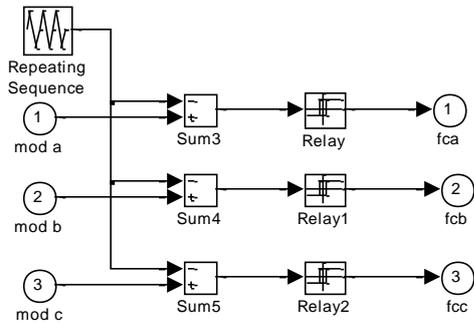
Matrice de rotation



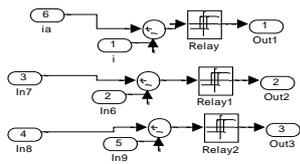
### Onduleur de tension triphasé à deux niveaux



### Commande de l'onduleur par modulation sinus – triangle(MLI)



### Commande de l'onduleur par hystérésis



### Exercice 1 :

1-écrit sous la forme d'une équation d'état  $\dot{X} = AX + BU$  .le modèle mathématique de la MAS, dans système lié au champ tournant.

. On considérant comme variable d'état les courants statoriques et les flux rotoriques  
 $X=[isd, isq, phrd, phrq]^T$  : Vecteur d'état

On donne le coefficient de dispersion  $\sigma$  et la constante de temps rotorique

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

2-Donne la nouvelle expression du couple en fonction des variables d'état

### Exercice 2 :

1-donner les principes de la commande scalaire

2- écrivez le relation entre le flux rotorique et le module du courant statorique (la commande scalaire en courant ) .

3-Quel est l'intérêt d'utiliser l'autopilotage dans la commande d'une machine asynchrone

### Exercice3 :

-Les paramètres de la MAS sont :

$r_s=0.63$ ;  $r_r=0.4$ ;  $L_s=0.097$ ;  $L_r=0.091$ ;  $F=0.001$ ;  $J=0.22$ ;  $p=2$ ;  $M=0.091$ ;

Dans la commande vectorielle indirecte à orientation de flux rotorique- IRFO

1-Ce contrôle vectoriel implique  $\phi_{dr}=\phi_r$  et  $\phi_{qr}=0$ . Montrez que l'on obtient le système d'équations :

$$V_{ds} = R_s isd + \sigma L_s \frac{disd}{dt} - \omega_s \sigma L_s isq \quad V_{sq} = R_s isq + \sigma L_s \frac{disq}{dt} + \omega_s \sigma L_s isd + \omega_s \frac{M}{L_r} \phi_r$$

$$\phi_r = \frac{M isd}{1 + Tr.s} \quad C_e = \frac{P M \phi_r isd}{L_r} \quad \omega_{gl} = \frac{M isq}{Tr \phi_r}$$

2-Déterminé les paramètres de régulateur de courant ( $k_p, k_i$ ) avec  $\text{tropi}=0.01$

3-calculer les valeurs de régulateur de vitesse,  $T_{repw}=0.01$  ,  $\omega_n \text{trpw}=4.75$  ,  $\xi=1$

$$\text{Ex(1)} \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = Ax + Bu, \quad x = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} \\ \omega_s = \omega_r = \omega_s \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{array} \right. \quad \text{--- (1)} \quad \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\psi_{rd} - M i_{sd}) \\ i_{rq} = \frac{1}{L_r} (\psi_{rq} - M i_{sq}) \end{array} \right. \quad \text{--- (2)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} (\psi_{rd} - M i_{sd}) \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} (\psi_{rq} - M i_{sq}) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{sd} = \left( L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) i_{sd} + \frac{M}{L_r} \psi_{rd} \\ \psi_{sq} = \left( L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) i_{sq} + \frac{M}{L_r} \psi_{rq} \end{array} \right. \quad \text{--- (3)} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

(2) et (3) dans (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d i_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d \psi_{rd}}{dt} - \omega_s L_s \sigma i_{sq} - \omega_s \frac{M}{L_r} \psi_{rq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d i_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d \psi_{rq}}{dt} + \omega_s L_s \sigma i_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \psi_{rd} \\ 0 = \frac{R_r}{L_r} (\psi_{rd} - M i_{sd}) + \frac{d \psi_{rd}}{dt} - \omega_{gl} \psi_{rq} \\ 0 = \frac{R_r}{L_r} (\psi_{rq} - M i_{sq}) + \frac{d \psi_{rq}}{dt} + \omega_{gl} \psi_{rd} \end{array} \right. \quad \text{(3)}$$

$$0 L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\psi_{vd}}{dt} = -R_s i_{sd} + \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \omega_s \frac{M}{L_r} \psi_{rq} - V_{sd}$$

$$0 L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\psi_{rq}}{dt} = -R_s i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} - \omega_s \frac{M}{L_r} \psi_{vd} - V_{sq}$$

$$\frac{d\psi_{vd}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_{vd} + \frac{M}{2r} i_{sd} + \omega_g l \psi_{rq}$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_{rq} + \frac{M}{2r} i_{sq} - \omega_g l \psi_{vd} \quad \left( T_r = \frac{L_r}{R_r} \right)$$

$$\begin{bmatrix} 0 L_s & 0 & \frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{vd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s \sigma L_s & 0 & \omega_s \frac{M}{L_r} \\ -\omega_s \sigma L_s & -R_s & -\omega_s \frac{M}{L_r} & 0 \\ \frac{M}{2r} & 0 & \frac{1}{T_r} & \omega_g l \\ 0 & \frac{M}{2r} & -\omega_g l & \frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{vd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[L] \cdot \frac{d}{dt} [I] = [R] \cdot [I] + [U]$$

$$\frac{d}{dt} [I] = [L]^{-1} \cdot [R] \cdot [I] + [L]^{-1} \cdot [U]$$

$$A = [L]^{-1} \cdot [R] \quad \text{et} \quad B = [L]^{-1}$$

$$\dot{X} = AX + B \cdot U$$

$$\begin{aligned} e) : C_e &= PM(i_{sd} \ i_{rq} - i_{sq} \ i_{rq}) = PM \cdot (i_{sd} \cdot \frac{1}{L_r} (\psi_{rq} - M i_{sq}) \\ &- i_{sq} \cdot \frac{1}{L_r} (\psi_{vd} - M i_{sd})) = \frac{PM}{L_r} (i_{sd} \cdot \psi_{rq} - M i_{sd} i_{sq} \\ &- i_{sq} \psi_{vd} + M i_{sq} i_{sd}) = \frac{PM}{L_r} (i_{sd} \psi_{rq} - i_{sq} \psi_{vd}) \end{aligned}$$

1)  $E_X(2)$ ,

2<sup>o</sup> principe de la commande scalaire.

on utilisant le modèle de la MAS en régime permanent et son principe est maintenant

constant, ce qui signifie garde le flux ( $\frac{V}{F}$ ) constant, ce qui signifie garde le flux ( $\Phi_s$ ) constant

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Phi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\Phi}_s$$

$$\bar{V}_s = j\omega_s \bar{\Phi}_s, \quad |\bar{V}_s| \approx \left| \frac{V_s}{\omega_s} \right| = \frac{1}{\pi} \left| \frac{V_s}{f_s} \right|$$

si  $\left| \frac{V_s}{f_s} \right|$  constant  $\Rightarrow \Phi_s$  constant

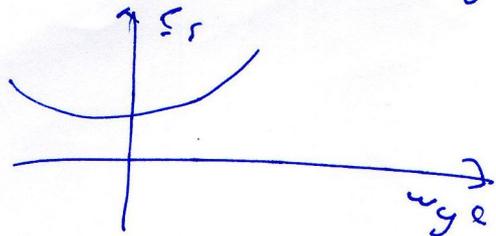
②  $I_s = f(\Phi_r, \omega_g)$

$$\begin{cases} 0 = R_v I_v + \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} + j\omega_g \bar{\Phi}_r & \text{(en régime permanent } \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} = 0) \\ \bar{\Phi}_r = L_v \bar{I}_v + M \bar{I}_s \end{cases} \Rightarrow \bar{I}_v = \frac{\bar{\Phi}_r}{L_v} - \frac{M}{L_v} \bar{I}_s$$

$$0 = R_v I_v + j\omega_g \bar{\Phi}_r = R_v \frac{\bar{\Phi}_r}{L_v} - \frac{R_v M}{L_v} \bar{I}_s + j\omega_g \bar{\Phi}_r$$

$$\bar{I}_s = \frac{L_v}{R_v M} \left( \frac{R_v}{L_v} + j\omega_g \right) \bar{\Phi}_r = \frac{\bar{\Phi}_r}{M} (1 + j Z_r \omega_g)$$

$$|\bar{I}_s| = \frac{\bar{\Phi}_r}{M} \sqrt{1 + (Z_r \omega_g)^2}$$



### Corrigé type du l'exercice3:

Nous allons démontrer les équations de ce type de contrôle vectoriel.

A partir de

Les équations électriques :

$$\begin{cases} U_{sd} = i_{sd} \cdot r_s + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ U_{sq} = i_{sq} \cdot r_s + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = i_{rd} \cdot r_r + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \Phi_{rq} \cdot \omega_{gl} \\ 0 = i_{rq} \cdot r_r + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \Phi_{rd} \cdot \omega_{gl} \end{cases}$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{dr} - M i_{ds}) \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} (\Phi_{qr} - M i_{qs}) \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \end{cases} \quad \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix}$$

$$\phi_{dr} = \phi_r \quad \text{et} \quad \phi_{qr} = 0$$

$$V_{ds} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{sq}$$

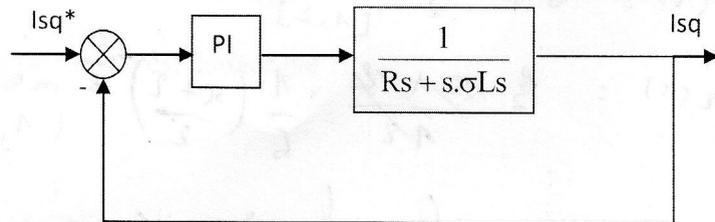
$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \phi_r$$

$$\begin{cases} 0 = \frac{r_r}{L_r} (\Phi_{dr} - M i_{ds}) + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ 0 = \frac{r_r}{L_r} (-M i_{qs}) + \Phi_{rd} \cdot \omega_{gl} \end{cases} \quad \begin{cases} 0 = \frac{1}{\tau_r} \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{M}{\tau_r} i_{ds} \\ 0 = -\frac{M}{\tau_r} i_{qs} + \Phi_{rd} \cdot \omega_{gl} \end{cases} \quad \text{donc} \quad \phi_r = \frac{M i_{sd}}{1 + Tr \cdot s} \quad \omega_{gl} = \frac{M i_{sq}}{Tr \phi_r}$$

$$-C_e = \frac{P M}{L_r} (\phi_{dr} i_{sd} - \phi_{qr} i_{sq}) \quad \text{donc} \quad C_e = \frac{P M \phi_r i_{sd}}{L_r}$$

-2 Régulation de courant statorique  $i_s$

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$



**schéma bloc de la régulation du courant statorique isq (même chose pour ids).**

En boucle ouverte :

FTBO : 
$$K_p \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{s} \frac{\sigma L_s}{R_s + s}$$

Par compensation :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_s}{\sigma L_s}$$

FTBO : 
$$\frac{K_p}{s} \frac{1}{\sigma L_s}$$

Donc en boucle fermé :

FTBF : 
$$\frac{\frac{K_p}{\sigma L_s} \frac{1}{s}}{1 + \frac{K_p}{s \cdot \sigma L_s}} = \frac{1}{s \frac{\sigma L_s}{K_p} + 1} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

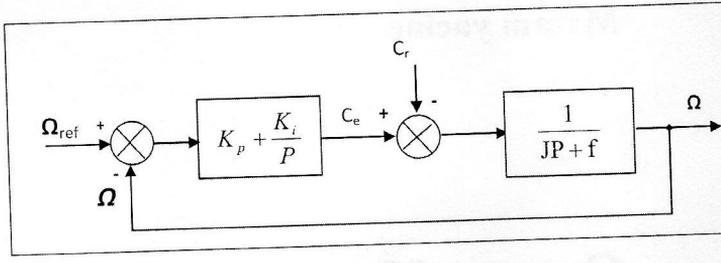
Avec :

$$\tau = \frac{\sigma L_s}{K_p}$$

on a choisi le temps de réponse ( $\tau$ )

On a trouvé :  $K_i = \frac{\sigma L_s}{\tau} \quad K_p = \frac{\sigma L_s}{R_s} \cdot K_i$

**-3régulateur régulateur de vitesse**



Boucle de régulation de vitesse

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$K_p + \frac{K_i}{P} = \frac{K_p}{P} \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right)$$

La fonction de transfert du système précédent en boucle ouverte pour  $C_r=0$  est donnée par:

FTBO  $\Omega = \frac{K_p}{P} \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{JP + f}$

la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p(P + \frac{K_i}{K_p})}{JP^2 + (f + K_p)P + K_i}$$

La  $FTBF_{\Omega}$  possède une dynamique de 2<sup>ème</sup> ordre, par identification à la forme canonique du

2<sup>ème</sup> ordre, l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_n^2} P^2 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_n}\right)P + 1$$

$$\text{Alors: } \frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_n^2}, \quad \frac{K_p + f_r}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_n}$$

Avec:

On choisit alors le coefficient d'amortissement  $\zeta$  et  $\omega_n$

$$K_i = J\omega_n^2, \quad K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} - f$$

Pour un coefficient d'amortissement  $\xi = 1$  nous avons  $\omega_n \cdot \text{trepw} = 4.75$   $\text{Trepw} = 0.01$

$$\begin{cases} K_i = J\left(\frac{4.75}{\text{trepw}}\right)^2 = 451.25 \\ K_p = 2J\left(\frac{4.75}{\text{trepw}}\right) - f = 1.899 \end{cases}$$



**Corrigé type du l'exercice 1:**

1 les paramètres de régulateur de flux (kp,ki) avec trop=0.01

A partir de :  $\Phi_{rd} = \frac{M i_{sd}}{1 + \tau_r s_r}$  et de :  $i_{sd} = \frac{v_{sd} / R_s}{(1 + \sigma \tau_s s)}$  on tire :  $\Phi_{rd} = \frac{(M / R_s) v_{sd}}{(1 + \tau_r s)(1 + \sigma \tau_s s)}$

Le schéma de bloc de la régulation de flux rotorique est donné par la figure suivant

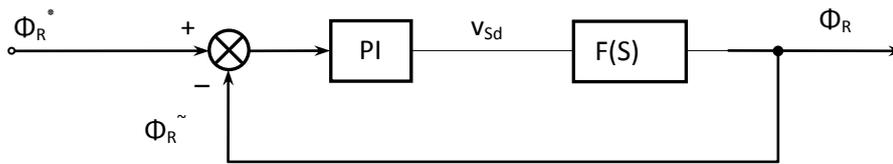


Schéma fonctionnel de régulation de flux rotorique

$$\Phi_{rd} = \frac{(M / R_s) * \frac{1}{\tau_r} * \frac{1}{\sigma \tau_s} v_{sd}}{\left(\frac{1}{\tau_r} + s\right) \left(\frac{1}{\sigma \tau_s} + s\right)} = \frac{k\phi * v_{sd}}{\left(\frac{1}{\tau_r} + s\right) \left(\frac{1}{\sigma \tau_s} + s\right)}$$

$$PI = \frac{k_p(s + \frac{k_i}{k_p})}{s} = \frac{k_p(s + \tau_\Phi)}{s}$$

En compensons le pôle le plus lent par le numérateur de la fonction de transfert du régulateur ( $\frac{k_i}{k_p} = \tau_\Phi = \frac{1}{\tau_r}$ )

Après compensation, la fonction de transfert en boucle ouverte s'écrira alors :

$$FTBO(S) = \frac{k\phi * k_p}{s \left(\frac{1}{\sigma \tau_s} + s\right)}$$

$$\text{Donc : } FTBf(S) = \frac{k\phi * k_p}{k\phi * k_p + \frac{s}{\sigma \tau_s} + s^2} = \frac{1}{1 + \frac{s}{k\phi * k_p \sigma \tau_s} + \frac{1}{k\phi * k_p} s^2}$$

par identification à la forme canonique du 2<sup>ème</sup> ordre ,  $\frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2}$

$$\frac{1}{k\phi * k_p \sigma \tau_s} = \frac{2\xi}{\omega_n}$$

$$k_p = \frac{\omega_n}{2\xi \sigma \tau_s k\phi}$$

$$k_i = \frac{kp}{\tau_r}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_s L_r}{M^2} = 0.09$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{r_r} = 0.2225$$

$$\tau_s = \frac{L_s}{r_s} = 0.1587$$

$$k\phi = (M / R_s) * \frac{1}{\tau_r} * \frac{1}{\sigma \tau_s} = 44.4444$$

$$kp = 374.0625$$

$$ki = 195.3602$$

2 -les équations de l'estimateur de flux rotorique .

$$\begin{cases} 0 = i_{s\alpha} \cdot r_r + \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} + \Phi_{r\beta} \cdot \omega_r \\ 0 = i_{s\beta} \cdot r_r + \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} - \Phi_{r\alpha} \cdot \omega_r \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \Phi_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + M i_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + M i_{\beta s} \end{cases}$$

Donc :

2

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{R\alpha}}{dt} = \frac{M}{\tau_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{\tau_r} \Phi_{R\alpha} - \omega_r \Phi_{R\beta} \\ \frac{d\Phi_{R\beta}}{dt} = \frac{M}{\tau_r} i_{s\beta} - \frac{1}{\tau_r} \Phi_{R\beta} - \omega_r \Phi_{R\alpha} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{L_r}{r_r}$$

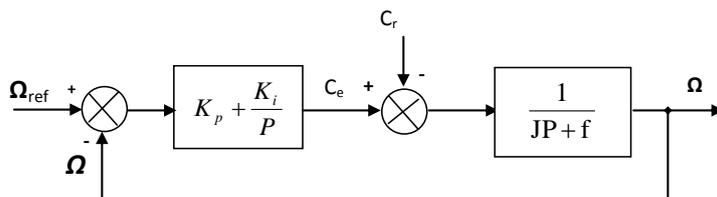
le modèle du flux est donné par:

$$\|\Phi_R\| = \sqrt{\Phi_{R\alpha}^2 + \Phi_{R\beta}^2}$$

et la position du flux donne par ;  $\theta_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{R\beta}}{\Phi_{R\alpha}}\right)$

### Corrigé type du l'exercice2:

#### 1- régulateur de vitesse de la MSAP



Boucle de régulation de vitesse

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$K_p + \frac{K_i}{P} = \frac{K_p}{P} \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right)$$

La fonction de transfert du système précédent en boucle ouverte pour  $C_r=0$  est donnée par:

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{P} \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{JP + f}$$

la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right)}{JP^2 + (f + K_p)P + K_i}$$

La  $FTBF_{\Omega}$  possède une dynamique de 2<sup>ème</sup> ordre, par identification à la forme canonique du 2<sup>ème</sup> ordre, l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_n^2} P^2 + \left( \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) P + 1$$

Alors:  $\frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_n^2}$  ,  $\frac{K_p + f_r}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_n}$

Avec:

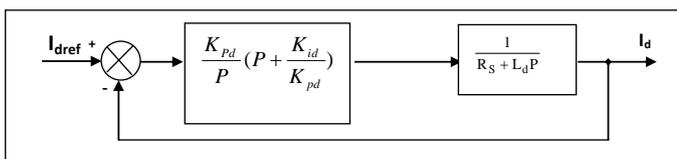
On choisit alors le coefficient d'amortissement  $\zeta$  et  $\omega_n$

$$K_i = J\omega_n^2 \quad , \quad K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} - f$$

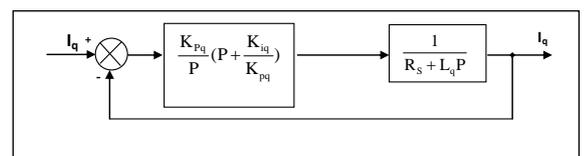
Pour un coefficient d'amortissement  $\xi = 1$  et  $\omega_n \cdot trepw = 4.75$  ,  $Trepw=0.01$

$$\begin{cases} K_i = J \left( \frac{4.75}{trepw} \right)^2 = 451.25 \\ K_p = 2J \left( \frac{4.75}{trepw} \right) - f = 1.899 \end{cases}$$

## 2-Régulateur des courants-Pour : $Trpi=0.02$



Boucle de régulation du courant Id



Boucle de régulation du courant Iq.

En boucle ouverte :

$$FTBO : \quad K_i \left(1 + \frac{K_p}{K_i} s\right) \frac{1}{s} \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{L_d}{R_s} s}$$

Par compensation :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_d}{R_s} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$FTBO : \quad \frac{K_i}{s} \frac{1}{R_s}$$

Donc en boucle fermé :

$$FTBF : \quad \frac{\frac{K_i}{R_s} \frac{1}{s}}{1 + \frac{K_i}{s R_s}} = \frac{1}{s \frac{R_s}{K_i} + 1} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

Avec :

$$\tau = \frac{R_s}{K_i} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Le temps de réponse du courant **t<sub>ropi</sub> = 0.02 = τ**

on considère le équation  $\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_d}{R_s} = T_d$

donc

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} = 0.0035$$

$$K_{iq} = \frac{R_s}{t_{rpi}} = \mathbf{100}$$

$$K_{\rho q} = K_{iq} \cdot T_q = \mathbf{0.3500}$$

$$T_q = \frac{L_q}{R_s} = 0.0025$$

$$K_{iq} = \frac{R_s}{t_{rpi}} = \mathbf{100}$$

$$K_{\rho q} = K_{iq} \cdot T_q = \mathbf{0.2500}$$