

Commande vectorielle de deux MSAP pentaphasées connectées en série, application à la traction ferroviaire

S.MEGUENNI ; A.DJAHBAR ; K.TOUNSI

Université HASSIBA BENBOUALI- CHLEF

Laboratoire de génie électrique et énergie renouvelable LGEER –CHLEF

Email :meguenni_selimane@yahoo.fr

Résumé -Les systèmes Multi-machines /multi - convertisseurs (SMM) ont été récemment développé pour de nombreuses applications industriels qui certaines machines sont entraînées par des onduleurs. Cette classe de système offre une réduction du temps de conception, les coûts et l'optimisation du volume de systèmes embarqués.

L'objectif de ce travail est de commander, modéliser et de caractériser le comportement d'un système d'entraînement multimachines composé de deux MSAP pentaphasées connectées en série et alimentées par un onduleur pentaphasé appliqué à la traction ferroviaire (bogie d'une locomotive BB 36000) en vue de la conception de sa commande.

I. Introduction :

Grâce aux avancées technologiques et aux moyens de calcul puissants, il est possible d'envisager des applications à vitesse variable de manière efficace où l'association des machines électriques et des convertisseurs statiques trouvent de plus en plus d'applications dans les systèmes embarqués (navires, sous-marins, véhicules, avions...etc.), où le gain en espace et en poids nécessite une attention très particulière. Un exemple des systèmes d'entraînements, qui combinent les avantages offerts par l'utilisation des machines multiphasées, de l'électronique de puissance et des moyens de calcul, est le système monoconvertisseur multimachines qui permet de commander d'une manière complètement découplée plusieurs machines électriques dont les enroulements sont connectés en série.

Les systèmes de traction ferroviaires électrique sont complexes, ils ont des couplages électriques, magnétiques et mécaniques solides. Ces accouplements imposent plusieurs contraintes qui compliquent la modélisation et l'analyse de ces systèmes. Machine multi / Système multi-onduleur (MMS) ainsi utilisé afin de satisfaire les exigences industrielles telles que l'optimisation du volume du système et le poids. Plusieurs configurations sont développées et analysées afin de garantir la stabilité de fonctionnement lorsqu'une perturbation mécanique ou électrique apparaît.

Dans cette approche, nous intéresser en particulier sur la modélisation et la commande indépendante du deux MSAP pentaphasées connectée en série.

II. Présentation et modélisation du système :

L'utilisation d'une structure composée de deux moteurs alimentés par un seul convertisseur statique, permet d'une part, de réduire le nombre de composants de puissance et de contrôle, et d'autre part, d'établir une commande pour l'intégralité du bogie de traction. Dans cette étude le système global est constitué de deux MSAP pentaphasées connectées en série. Donc de nombreuses configurations sont possibles. La première consiste d'un étage continu qui alimente plusieurs onduleurs triphasés montés en parallèle, ou chaque onduleur alimente une moteur triphasée. la commande de chaque moteur est indépendante via son onduleur et son algorithme de commande. La deuxième configuration consiste d'un seul onduleur, qui par ailleurs alimente en parallèle plusieurs

moteurs. Pour cette structure, les moteurs doivent avoir la même vitesse de rotation et subissent le même couple de charge.

Une nouvelle structure de propulsion est proposée. Elle est constituée d'un onduleur à sept niveaux de tension à modulation de largeur d'impulsion, alimentant en série les deux machines MSAP.

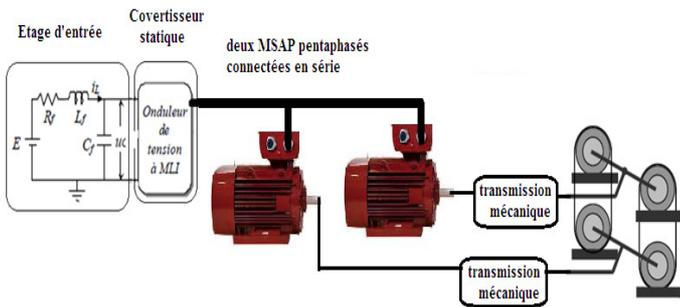
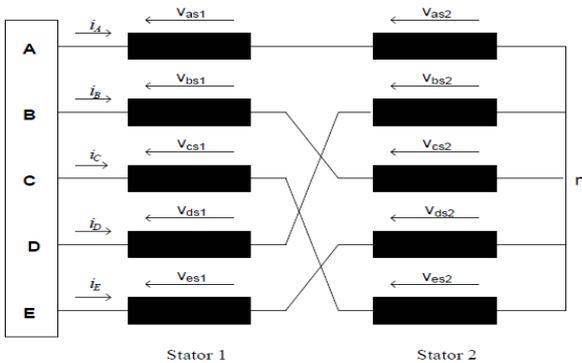


Figure (1) : Schéma-bloc avec une structure de commande proposée pour la chaîne de traction ferroviaire.

III. Modélisation du système de deux machines synchrones pentaphasées à aimant permanent:



Figure(2) : Représentation de deux MSAP pentaphasées connectées en série.

Selon le schéma de raccordement de la figure (2), où les tensions de phase des deux machines sont définies, tensions de l'onduleur phase-neutre (A, B, C, D, E à point neutre n) et la relation entre les courants de sortie de l'onduleur et les courants des phases de deux machines sont donnés avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ v_D \\ v_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{as1} + v_{as2} \\ v_{bs1} + v_{cs2} \\ v_{cs1} + v_{es2} \\ v_{ds1} + v_{bs2} \\ v_{es1} + v_{ds2} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} i_A = i_{as1} = i_{as2} \\ i_B = i_{bs1} = i_{cs2} \\ i_C = i_{cs1} = i_{es2} \\ i_D = i_{ds1} = i_{bs2} \\ i_E = i_{es1} = i_{ds2} \end{matrix}$$

Les deux machines de Fig (2) sont supposées être de mêmes paramètres, Le circuit électrique du modèle de la figure (2) Il peut être représenté sous une forme matricielle (quantités non linéaire) par :

$$[V_{ABCDE}] = [R_s][I_{ABCDE}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{ABCDE}]$$

II.1. Transformation de découplage de CLARK :

La relation entre les variables originales des phases et les nouvelles variables ($\alpha\beta\gamma\delta\epsilon$) est donnée par:

$$f(\alpha\beta) = [C]f(ABCDE)$$

Où [C] est la matrice de transformation à puissance invariante:

$$[C_s]^t = \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(4\alpha) \\ 1 & \cos(2\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(6\alpha) & \cos(8\alpha) \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & \sin(6\alpha) & \sin(8\alpha) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Les tensions de chaque machine dans ce repère:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}^{inv} \\ v_{\beta}^{inv} \\ v_x^{inv} \\ v_y^{inv} \\ v_o^{inv} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_{as1} + v_{as2} \\ v_{bs1} + v_{cs2} \\ v_{cs1} + v_{es2} \\ v_{ds1} + v_{bs2} \\ v_{es1} + v_{ds2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha s1} + v_{x s2} \\ v_{\beta s1} + v_{y s2} \\ v_{x s1} + v_{\alpha s2} \\ v_{y s1} + v_{\beta s2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La relation entre les courants de sortie de l'onduleur et les courants α - β , x-y des deux Machines est :

$$\begin{matrix} i_{\alpha}^{INV} & = & i_{\alpha 1} & = & i_{X 2} \\ i_{\beta}^{INV} & = & i_{\beta 1} & = & -i_{Y 2} \\ i_X^{INV} & = & i_{X 1} & = & i_{\alpha 2} \\ i_Y^{INV} & = & i_{Y 1} & = & i_{\beta 2} \end{matrix}$$

utilisée dans la Fig(2) permettra la commande vectorielle indépendante des deux machines.

$$[V_{ABCDE}] = [R_s][I_{ABCDE}] + \frac{d}{dt}([L_s][i_{ABCDE}] + [\Phi_{aimant}])$$

Comme le sous-espace α - β est orthogonal au sous-espace x - y , il s'ensuit que la méthode spécifique de la connexion série

La composante d'ordre Zéro pour l'onduleur peut être aussi bien négligée. La partie électromagnétique du système d'entraînement peut alors être représentée avec huit équations de premier ordre. Les quatre équations de l'onduleur sont comme suit :

$$\begin{aligned} v_{\alpha}^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_{\alpha}^{INV} + (l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})\frac{d}{dt}i_{\alpha}^{INV} + l_{s2}\frac{d}{dt}i_{\alpha}^{INV} - \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_1\phi_{f1}\sin(\theta_1) \\ v_{\beta}^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_{\beta}^{INV} + (l_{s1} + 2m_{s2})\frac{d}{dt}i_{\beta}^{INV} + l_{s2}\frac{d}{dt}i_{\beta}^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_1\phi_{f1}\cos(\theta_1) \\ v_x^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_x^{INV} + l_{s1}\frac{d}{dt}i_x^{INV} + (l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})\frac{d}{dt}i_x^{INV} - \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_2\phi_{f2}\sin(\theta_2) \\ v_y^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_y^{INV} + l_{s1}\frac{d}{dt}i_y^{INV} + (l_{s2} - \frac{5}{2}m_{s2})\frac{d}{dt}i_y^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_2\phi_{f2}\cos(\theta_2) \end{aligned}$$

II.2. Le modèle dans un repère rotatif :

Afin d'exprimer toutes les grandeurs dans un même repère, les grandeurs statoriques sont projetées dans un repère tournant (d,q) décalé de φ par rapport au repère fixe (α, β), cette transformation se calcule à partir de la matrice de rotation D telle que :

$$D = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \cdot \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} [I]_{3 \times 3}$$

La transformation (24) est appliquée avec l'angle θ_1 pour les équations $\alpha - \beta$ statoriques pour la machine1, et avec l'angle θ_2 pour les équations $\alpha - \beta$ statoriques pour la machine2.

$$\begin{aligned}
 v_d^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_d^{INV} + (l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})\frac{d}{dt}i_d^{INV} + l_{s2}\frac{d}{dt}i_d^{INV} - \omega_1(l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})i_q^{INV} \\
 v_q^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_d^{INV} + (l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})\frac{d}{dt}i_q^{INV} + l_{s2}\frac{d}{dt}i_q^{INV} + \omega_1(l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})i_d^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_1\phi_{f1} \\
 v_x^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_x^{INV} + l_{s1}\frac{d}{dt}i_x^{INV} + (l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})\frac{d}{dt}i_x^{INV} - \omega_2(l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})i_y^{INV} \\
 v_y^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_y^{INV} + l_{s1}\frac{d}{dt}i_y^{INV} + (l_{s2} - \frac{5}{2}m_{s2})\frac{d}{dt}i_y^{INV} + \omega_2(l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})i_x^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_2\phi_{f2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{e1} &= p((L_d - L_q)i_d^{INV}i_q^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\phi_{f1}i_q^{INV}) \\
 C_{e2} &= p((L_x - L_y)i_x^{INV}i_y^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\phi_{f2}i_y^{INV})
 \end{aligned}$$

III. Commande vectorielle indépendante de deux MSAP pentaphasées en série:

Pour une alimentation en tension via un onduleur contrôlé en tension, les tensions de référence sont créées par l'addition des tensions de références de chaque machine sont :

Pour la machine 1:

$$\begin{aligned}
 v_d^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_d^{INV} + (l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})\frac{d}{dt}i_d^{INV} + l_{s2}\frac{d}{dt}i_d^{INV} - \omega_1(l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})i_q^{INV} \\
 v_q^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_d^{INV} + (l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})\frac{d}{dt}i_q^{INV} + l_{s2}\frac{d}{dt}i_q^{INV} + \omega_1(l_{s1} + \frac{5}{2}m_{s1})i_d^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_1\phi_{f1}
 \end{aligned}$$

Pour la machine 2:

$$\begin{aligned}
 v_x^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_x^{INV} + l_{s1}\frac{d}{dt}i_x^{INV} + (l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})\frac{d}{dt}i_x^{INV} - \omega_2(l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})i_y^{INV} \\
 v_y^{INV} &= (R_{s1} + R_{s2})i_y^{INV} + l_{s1}\frac{d}{dt}i_y^{INV} + (l_{s2} - \frac{5}{2}m_{s2})\frac{d}{dt}i_y^{INV} + \omega_2(l_{s2} + \frac{5}{2}m_{s2})i_x^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}}\omega_2\phi_{f2}
 \end{aligned}$$

En termes de différentes composantes des tensions d-q statoriques de deux machines.

$$\begin{aligned}
 v_d^{INV} &= v_{ds1} + v_{xs2} \\
 v_q^{INV} &= v_{qs1} + v_{ds2} \\
 v_x^{INV} &= v_{xs1} + v_{ys2} \\
 v_y^{INV} &= v_{ys1} + v_{qs2}
 \end{aligned}$$

Les relations de couple des deux machines connectées en série sont données en termes de composantes courants de l'onduleur :

Les relations de couple des deux machines connectées en série sont données en termes de composantes courants de l'onduleur par :

$$C_{e1} = p ((L_d - L_q) i_d^{INV} i_q^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}} \phi_{f1} i_q^{INV})$$

$$C_{e2} = p ((L_x - L_y) i_x^{INV} i_y^{INV} + \sqrt{\frac{5}{2}} \phi_{f2} i_y^{INV})$$

Les deux équations sont totalement indépendante, donc on peut commander chaque machine Avec deux commande vectorielle et utilisant un seul onduleur.

Le couple de première machine commandé par les deux courants (id,iq) et . pour la deuxième machine le couple commandé par les deux courant (ix,iy) .Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante i_d et i_x nulles. Nous contrôlons les couples uniquement par les courants i_q et i_y . On règle ainsi les vitesses par la composante i_y et i_y .

Les références de tension globale sont ensuite formées sur le schéma de raccordement de la Fig (2), alors que :

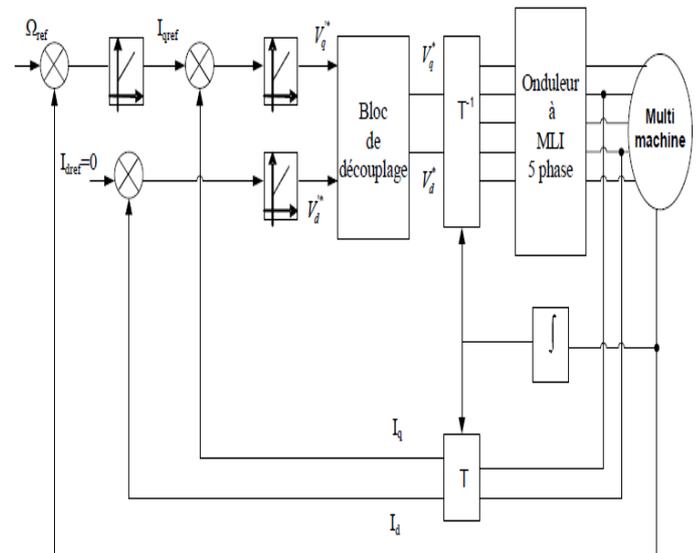


Figure (3) : Schéma bloc de la commande vectorielle de deux MSAP pentaphasées connectées en série.

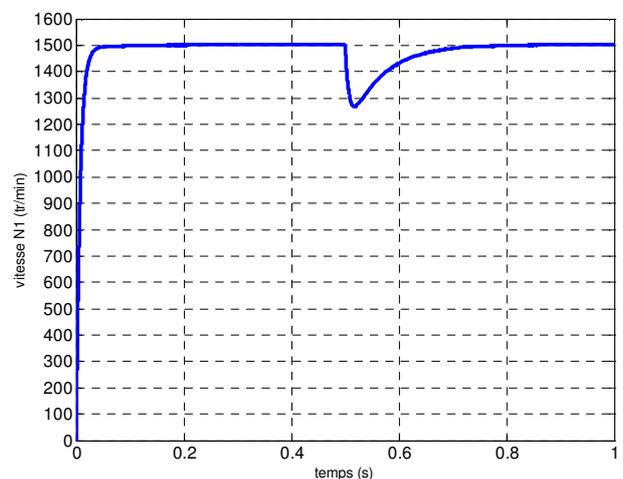
$$\begin{aligned} V_A^* &= V_{as1}^* + V_{as2}^* \\ V_B^* &= V_{bs1}^* + V_{cs2}^* \\ V_C^* &= V_{cs1}^* + V_{es2}^* \\ V_D^* &= V_{ds1}^* + V_{bs2}^* \\ V_E^* &= V_{es1}^* + V_{ds2}^* \end{aligned}$$

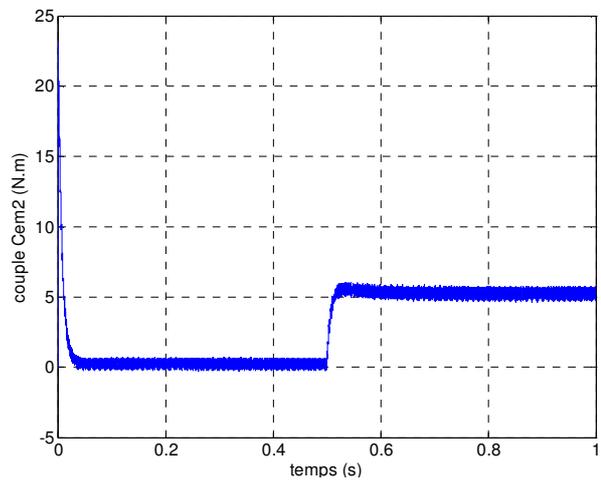
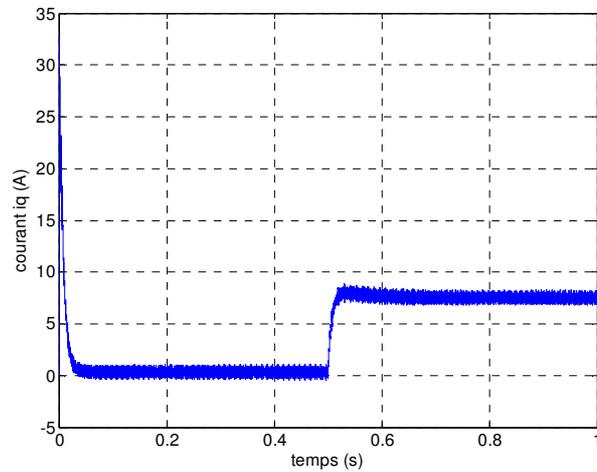
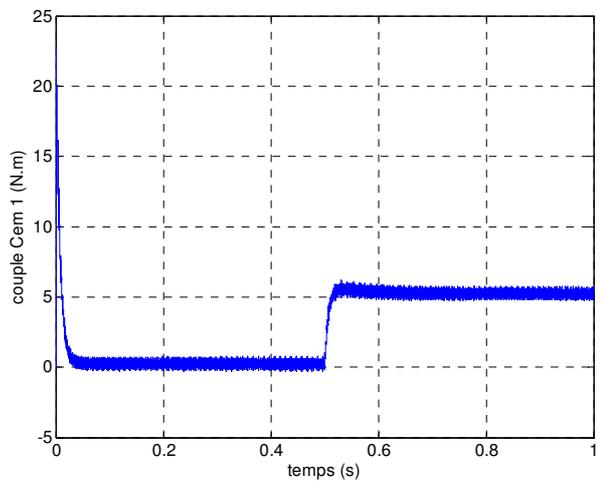
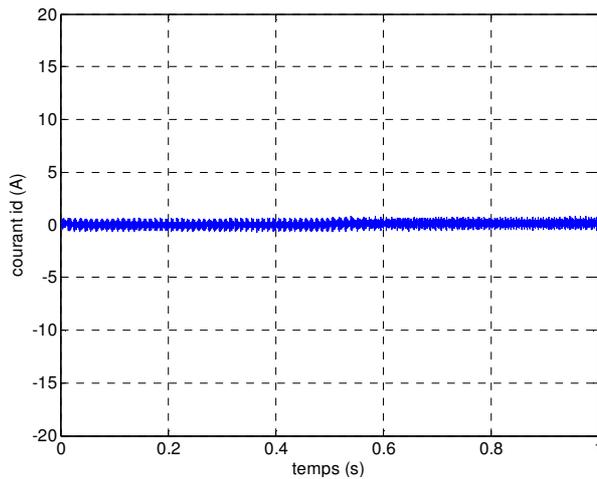
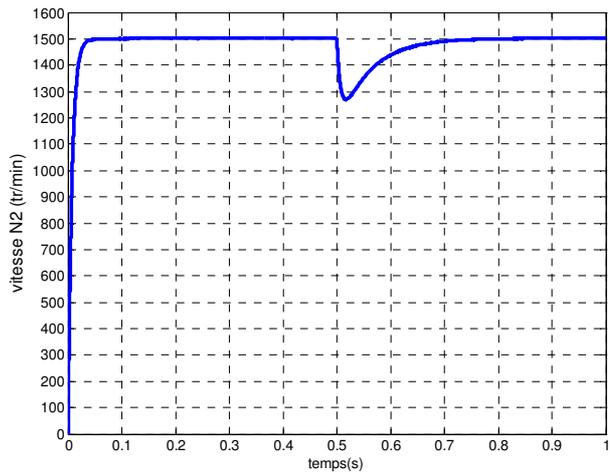
L'utilisation de la matrice avec l'équation donne :

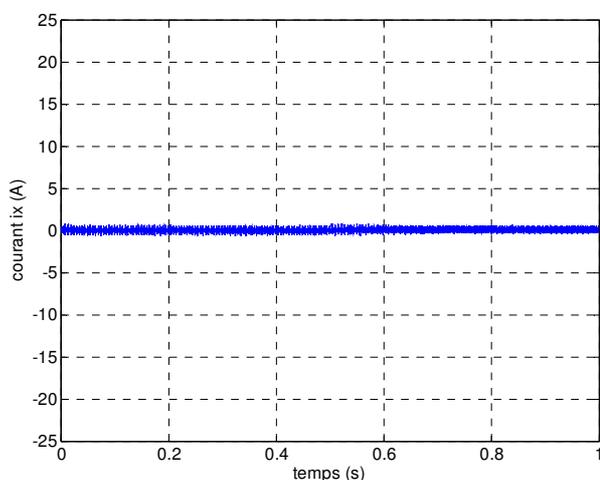
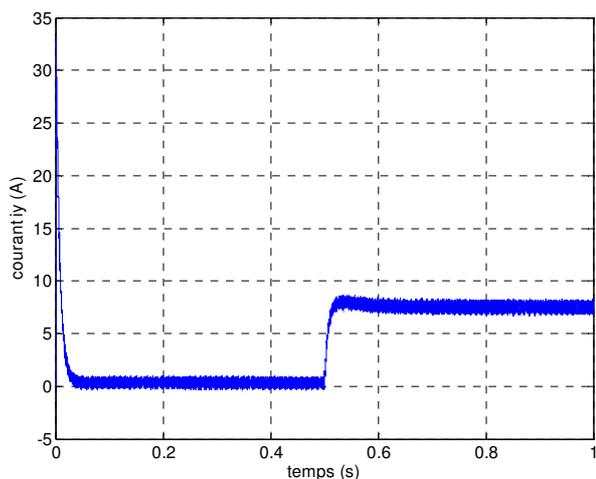
$$\begin{aligned} i_\alpha^{INV} &= i_{\alpha 1} = i_{x 2} \\ i_\beta^{INV} &= i_{\beta 1} = -i_{y 2} \\ i_x^{INV} &= i_{x 1} = i_\alpha 2 \\ i_y^{INV} &= i_{y 1} = i_\beta 2 \end{aligned}$$

Une illustration du système de la commande vectorielle de deux machines pentaphasées complète est donnée sur la Fig (3).

IV. Résultats de simulation :







Dans cette approche, nous avons testé en simulation la commande vectorielle appliquée aux deux machines synchrones pentaphasées à aimants permanent (MSAP) connectées en série alimentés par un onduleur de tension pentaphasé. La transposition des phases de deux machines nous a permis d'avoir plus de degré de liberté sur les axes des courants et ainsi de commander les deux machines indépendamment.

La commande vectorielle indépendante de deux machines a donné des bons résultats et a permis de découpler la commande de flux et du couple pour les deux machines. Ce qui a permis de commander plusieurs machines en série et avec différents types de machines polyphasées.

REFERENCES

- [1] : M. Jones, E. Levi and A. Iqbal, "A Five-Phase Series-Connected Two-Motor Drive with Current Control in the Rotating Reference Frame", *2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany*, 2004.
- [2] : E. Levi, A. Iqbal, S. N. Vukosavic and H. A. T'oliyat, "Modeling and Control of a Five-Phase Series-Connected Two-Motor Drive", *IEEE*, 2003.
- [3] : [Sem-04]: E. Semail, E. Levi, A. Bouscayrol, X. Kestelyn, «Multi-Machine Modelling of Two Series Connected 5-phase Synchronous Machines: Effect of Harmonics on Control », *IEEE-IAS'04, Seattle (Washington)*, October 2004,
- [4] : E. Levi, M. Jones, S. N. Vukosavic, A. Iqbal, and H. A. Toliyat, "Modeling, control, and experimental investigation of a five-phase series-connected two-motor drive with single inverter supply," *IEEE Trans. Ind. Electron.* Jun. 2007.

V. Conclusion:

Paramètres de la machine utilisée :

$$\begin{aligned}
 R_s &= 3.6 & \varphi_f &= 0.12 \text{ web} \\
 L_d &= 0.0021 \text{ H} & n &= 1500 \text{ tr/min} \\
 L_q &= 0.0021 \text{ H} \\
 j &= 0.0011 \text{ kg/m}^2 \\
 P &= 2
 \end{aligned}$$

