

Modélisation et commande d'un système Multi machines alimentées par un seul convertisseur

T. Bessaad ^{1*}, R. Taleb ¹, B. Bachir ² et A. Mellakhi ¹

¹ Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables, LGEER
Université Hassiba Benbouali
Hay Salem, Route Nationale N°19, Chlef, Algérie

² Laboratoire de développement des entraînements électrique, LDEE
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf, USTO-MB
El Mnaouer, BP 1505, Bir El Djir 31000, Oran, Algérie

(reçu le 10 Janvier 2016 – accepté le 29 Mars 2016)

Résumé – Dans ce contexte, le travail présenté porte sur la commande d'un système d'entraînement multi machines mono convertisseur (S3MC). La commande découplée du système d'entraînement multi machines mono convertisseur (S3MC), est possible suivant le modèle mathématique. Ce modèle montre que la commande indépendante de deux machines hexaphasées connectée en série avec triphasé est possible, grâce au contrôle des courants statoriques à la sortie de l'onduleur de tension. Parmi les techniques de commande basées sur le contrôle du courant, on trouve la commande vectorielle qui est largement développée et testée sur des processus industriels de différentes puissances. Ainsi, la commande que nous avons choisie et appliquée au S3MC est basée sur le principe de la commande vectorielle développée pour les machines à courant alternatif.

Abstract - In this context, the present work focuses on the command of a multi machine mono converter driving system (S3MC). The decoupled command of the multi machine mono converter driving system (S3MC) is possible according to the mathematical model. This model shows that the independent command of two six-phase machines that are connected in series with a three-phase is possible by controlling stator currents at the output of the voltage inverter. Among the control techniques based on the control of the current, we find the vectorial control which is widely developed and tested on industrial processes of different powers. Thus, the command that we chose and applied on the S3MC is based on the principle of vectorial command developed for alternative current machines.

Mots clés: System multi machines - Commande découplée – Monoconvertisseur.

1. INTRODUCTION

Les machines asynchrone à courant alternatif dominant assez largement le domaine des machines électriques, par contre depuis longtemps on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées 'machines à grand nombre de phases' ou 'machines multiphasées'. Il est possible de connecter en série plusieurs machines alimentées par un seul convertisseur statique et que chaque machine du groupe avoir un contrôle de vitesse indépendant. Cependant, l'emploi des convertisseurs polyphasés associés aux machines polyphasées, génère des degrés de libertés additionnels. Grâce à ces derniers, plusieurs machines polyphasées peuvent être connectées en série selon une transposition des phases appropriées [1-4].

La mise en série des machines asynchrones polyphasées peut être une solution très intéressante pour certaines applications, telle que la traction électrique. Le système global est alors défini par la dénomination système multi machines mono convertisseur connectées en série (S3MC). Il est composé de plusieurs machines connectées en série

* t.bessaad@univ-chlef.dz

selon une transposition des phases appropriée, ensemble est alimenté par un seul convertisseur via la première machine. La commande de chaque machine du groupe multi machines doit être indépendante des autres [5-8].

2. MODELISATION DU SYSTEME MULTIMACHINES

Le système d'entraînement électrique est composé d'un moteur asynchrone hexaphasé symétrique dont les enroulements sont montés en série avec ceux d'un moteur asynchrone triphasé. Les deux moteurs sont alimentés par un seul onduleur de tension hexaphasé. La figure 1 présente le diagramme de connexion et d'alimentation des deux moteurs [9-11]. Le stator de la machine hexaphasé est constitué de six enroulements identiques et décalés d'un angle électrique ($\alpha = 2\pi/6$).

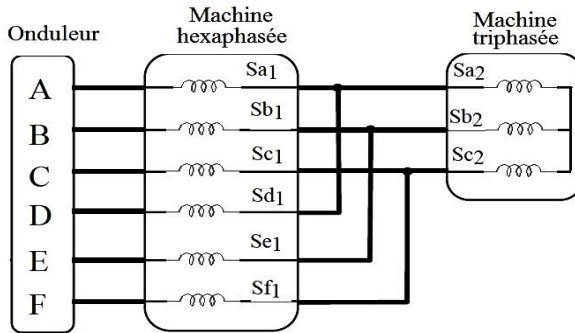


Fig. 1: Schéma de connexion en série d'une machine hexaphasée avec une machine triphasée

Notons qu'une simple connexion en série des enroulements statoriques n'aboutit pas au résultat désiré. Une transposition adéquate des phases statoriques est une solution à cette contrainte [12, 13]. En effet, les sorties de chaque des deux enroulements, appartenant à la machine hexaphasée et décalés d'un angle égal à π , sont connectés au même point et ensuite mises en série avec un enroulement de la machine triphasée [14, 15]. De cette façon, les courants traversant les enroulements de la machine hexaphasée vont se neutraliser aux points de connexions.

De la même manière, chaque courant traversant un enroulement de la machine triphasée se divise par deux en traversant les deux enroulements, de la machine hexaphasée, connectés au même point. Ceci produira des ondes de forces magnétomotrices égales et en opposition de phases, alors la résultante sera nulle au niveau de l'entrefer de la machine hexaphasée. Par conséquent, un découplage naturel des deux moteurs sera possible en adoptant le diagramme de connexion présenté par la figure 1. D'après la figure 1, les tensions statoriques et rotoriques des deux machines peuvent s'écrire comme suit [1-4]:

La relation entre les courants de sources et les courants statoriques de chaque machines sont donnés comme suit:

$$[v_s] = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{as1} + v_{as2} \\ v_{bs1} + v_{bs2} \\ v_{cs1} + v_{cs2} \\ v_{ds1} + v_{ds2} \\ v_{es1} + v_{es2} \\ v_{fs1} + v_{fs2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [i_s] &= [I_A \quad I_B \quad I_C \quad I_D \quad I_E \quad I_F] \\ &= [i_{as1} \quad i_{bs1} \quad i_{cs1} \quad i_{ds1} \quad i_{es1} \quad i_{fs1}] \\ &= [i_{s1}] \end{aligned} \quad (2)$$

$$[i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A + I_D \\ I_B + I_E \\ I_C + I_E \end{bmatrix} \quad (3)$$

Equations électriques

$$\begin{cases} [V_{sk}] = [R_{sk}] [i_{sk}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sk}] \\ [0] = [R_{rk}] [i_{rk}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rk}] \end{cases} \quad (4)$$

où

$$\begin{cases} [\varphi_{sk}] = [L_{ssk}] \times [i_{sk}] + [M_{srk}] \times [i_{rk}] \\ [\varphi_{rk}] = [L_{rrk}] \times [i_{rk}] + [M_{rsk}] \times [i_{sk}] \end{cases} \quad (5)$$

Sachant que $k = 1$ pour machine hexaphasée et $k = 2$ pour machine triphasée. avec:

$$[R_{seq}] = [R_{s1}] + \begin{bmatrix} [R_{s2}] & [R_{s2}] \\ [R_{s2}] & [R_{s2}] \end{bmatrix}; \quad [L_{seq}] = [L_{s1}] + \begin{bmatrix} [L_{s2}] & [L_{s2}] \\ [L_{s2}] & [L_{s2}] \end{bmatrix}$$

3. MODELE DU S3MC DANS LE REPERE (α, β) , (x, y) , $(o+, o-)$

Le S3MC peut être représenté par les sous systèmes (α, β) , (x, y) , $(o+, o-)$ à l'aide de la transformation suivante: $X_{\alpha\beta o} = [T_6(\theta)]^{-1} \cdot X_{abc}$ et $X_{dqo} = [T_6(\theta)]^{-1} \cdot X_{\alpha\beta o}$, où X peut représenter le courant, la tension ou le flux dans le S3MC.

$$[T_6] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(5\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(4\alpha) & \sin(5\alpha) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & \sin(6\alpha) & \sin(8\alpha) & \sin(10\alpha) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[T_3] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha \\ 0 & \sin \epsilon\alpha & \sin 4\alpha \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[\rho(\theta)] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_0) \end{bmatrix} & [0]_{2 \times 4} \\ [0]_{4 \times 2} & [I]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(8)$$

Alors ces modèles sont:

$$\begin{cases} [T_6]^{-1} [\varphi_s, abcdef] = [\varphi_{s\alpha} & \varphi_{s\beta} & \varphi_{sx} & \varphi_{sy} & \varphi_{so+} & \varphi_{so-}]^t \\ [T_6]^{-1} [i_s, abcdef] = [i_{s\alpha} & i_{s\beta} & i_{sx} & i_{sy} & i_{so+} & i_{so-}]^t \\ [T_6]^{-1} [\varphi_r] = [0 & 0 & 0]^t \\ [T_6]^{-1} [i_r] = [i_{r\alpha} & i_{r\beta} & i_{ro+}]^t \end{cases} \quad (9)$$

En appliquant la matrice de transformation (6) et (7) aux équations des flux et des tensions, le système d'équations statoriques réel de dimension six sera décomposé en trois sous-systèmes découplés de dimension deux: les systèmes (α, β) , (x, y) et $(0+, 0-)$. Géométriquement parlant, nous allons 'projeté' les variables statoriques sur trois 'plans' orthogonaux. Le système globale dans le repère (α, β) , (x, y) et $(0+, 0-)$.

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_{s1} i_{s\alpha1} + L_{s1} \frac{di_{s\alpha1}}{dt} + M_1 \frac{di_{r\alpha1}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_{s1} i_{s\beta1} + L_{s1} \frac{di_{s\beta1}}{dt} + M_1 \frac{di_{r\beta1}}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} V_{sx} = R_{eq} i_{sx1} + (L_{s1} + 2L_{s2}) \frac{di_{sx1}}{dt} + \sqrt{2} M_2 \frac{di_{r\alpha2}}{dt} \\ V_{sy} = R_{eq} i_{sy1} + (L_{s1} + 2L_{s2}) \frac{di_{sy1}}{dt} + \sqrt{2} M_2 \frac{di_{r\beta2}}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} V_{so+} = R_{eq} i_{so+1} + (L_{s1} + 2L_{s2}) \frac{di_{so+1}}{dt} \\ V_{so-} = R_{eq} i_{so-1} + L_{s1} \frac{di_{so-1}}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

Equations rotoriques des tensions

$$\begin{cases} 0 = R_{r1} i_{r\alpha1} + L_{m1} \frac{di_{s\alpha1}}{dt} + L_{r1} \frac{di_{s\alpha1}}{dt} + \omega_{r1} (L_{m1} i_{s\beta1} + L_{r1} i_{r\beta1}) \\ 0 = R_{r1} i_{r\beta1} + L_{m1} \frac{di_{s\beta1}}{dt} + L_{r1} \frac{di_{s\beta1}}{dt} + \omega_{r1} (L_{m1} i_{s\alpha1} + L_{r1} i_{r\alpha1}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} 0 = R_{r2} i_{r\alpha2} + \sqrt{2} L_{m2} \frac{di_{sx1}}{dt} + L_{r2} \frac{di_{s\alpha2}}{dt} + \omega_{r2} (\sqrt{2} L_{m2} i_{sy1} + L_{r2} i_{r\beta2}) \\ 0 = R_{r2} i_{r\beta2} + \sqrt{2} L_{m2} \frac{di_{sy1}}{dt} + L_{r2} \frac{di_{s\beta2}}{dt} - \omega_{r2} (\sqrt{2} L_{m2} i_{sx1} + L_{r2} i_{r\alpha2}) \end{cases} \quad (14)$$

Avec,

$$\begin{cases} L_{s1} = l_{s1} + 3/2 L_{ms1} \\ M_1 = 3/\sqrt{2} L_{sr1} \\ L_{r1} = l_{r1} + 3/2 L_{mr1} \end{cases} \quad \begin{cases} L_{s2} = l_{s2} + 3/2 L_2 \\ M_2 = 3/\sqrt{2} L_{sr2} \\ L_{r2} = l_{r2} + 3/2 L_{mr2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{sx} \\ v_{sy} \\ v_{so^+} \\ v_{so^-} \end{bmatrix} = [T_6] \begin{bmatrix} v_{sa1} + v_{sa2} \\ v_{sb1} + v_{sb2} \\ v_{sc1} + v_{sc2} \\ v_{sd1} + v_{sa2} \\ v_{se1} + v_{sb2} \\ v_{sf1} + v_{sc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{sx1} + \sqrt{2} v_{se2} \\ v_{sy1} + \sqrt{2} v_{sf2} \\ v_{so^+} \\ v_{so^-} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_{s\alpha1} \\ i_{s\beta} = i_{s\beta1} \end{cases}, \quad \begin{cases} i_x = i_{sx1} = i_{s\alpha2} / \sqrt{2} \\ i_y = i_{sy1} = i_{s\beta2} / \sqrt{2} \end{cases}, \quad \begin{cases} i_{o^+} = i_{so^+1} \\ i_{o^-} = i_{so^-1} \end{cases} \quad (17)$$

Le couple électromagnétique fourni par chacune de ces deux machines et donné par:

$$\begin{cases} C_{em1} = P_1 M_1 (i_{rd1} i_{sq1} + i_{sd} i_{rq1}) \\ C_{em2} = P_2 M_2 (i_{rd2} i_{sy1} - i_{sx} i_{rq2}) \end{cases} \quad (18)$$

Les équations différentielles 10, 11, 12, 13 montrent que les systèmes d'axes (α, β) et (x, y) sont complètement découplés l'un de l'autre, les courants d'onduleur $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$ sont couplés seulement aux courants rotoriques $i_{r\alpha1}$ et $i_{r\beta1}$ de la machine hexaphasée. A l'inverse, les courants d'onduleur $i_{s\alpha2}$ et $i_{s\beta2}$ sont couplés seulement aux courants rotoriques $i_{r\alpha2}$ et $i_{r\beta2}$ de la machine triphasée.

Le système différentiel 10 qui fait intervenir les tensions d'onduleur $v_{s\alpha}$ et $v_{s\beta}$ est donc représentatif des équations de la machine hexaphasée et que le système différentiel 11 qui fait intervenir les tensions d'onduleur v_{sx} et v_{sy} est représentatif des équations de Concordia de la machine triphasée.

4. COMMANDE VECTORIELLE DE DEUX MACHINES ELECTRIQUES

Seules les phases 1, 3 et 5 sont utilisées par la deuxième machine, elles sont espacées de $2\pi/3$. Cette machine possède alors trois phases. La figure 2, représente le diagramme de connexion de ce système multi machines.

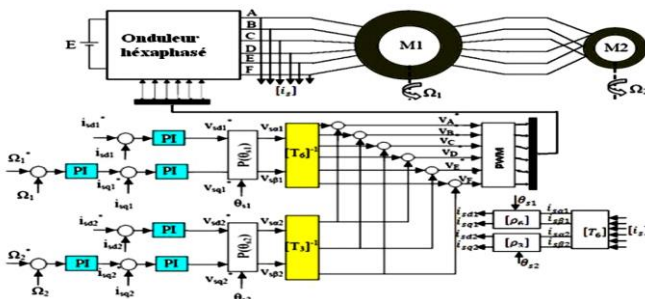


Fig. 2: Régulation de courants et de vitesses d'un S3MC commandé par la méthode du flux orienté

5. MODELE SIMPLIFIE DU S3MC

Si le repère (d,q) est parfaitement orienté, on peut supposer que la composante $\varphi_{rq,k}=0$. Ceci simplifie le modèle du S3MC comme suit:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha 1}}{dt} = \frac{M_1}{T_{r1}} i_{s\alpha 1} - \frac{1}{T_{r2}} \varphi_{r\alpha 1} \\ \frac{d\varphi_{r\beta 1}}{dt} = \frac{M_1}{T_{r1}} i_{s\beta 1} - (\omega_{s1} - p_1 \Omega_{m1}) \varphi_{r\alpha 1} \\ \frac{d\Omega_{m1}}{dt} = \frac{p_1 M_1}{J_1 L_{r1}} \varphi_{r\alpha 1} i_{s\alpha 1} - \frac{1}{J_1} C_{r1} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha 2}}{dt} = \sqrt{2} \frac{M_2}{T_{r2}} i_{sx} - \frac{1}{T_{r2}} \varphi_{r\alpha 2} \\ \frac{d\varphi_{r\beta 2}}{dt} = \sqrt{2} \frac{M_2}{T_{r2}} i_{sy} - (\omega_{s2} - p_2 \Omega_{m2}) \varphi_{r\alpha 2} \\ \frac{d\Omega_{m2}}{dt} = \sqrt{2} \frac{p_2 M_2}{J_2 L_{r2}} \varphi_{r\alpha 2} i_{s\alpha 2} - \frac{1}{J_2} C_{r2} \end{cases} \quad (20)$$

En introduisant les vitesses angulaires de glissement, nous obtenons l'équation:

$$\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_{s1,k} = (\omega_{s,k} - p_k \Omega_{m,k}) = \frac{M_k}{T_{r,k}} \cdot \frac{i^s}{\varphi_{rd,k}} \quad (21)$$

Avec: $i^s = \begin{cases} i_{s\beta} & \text{pour } k = 1 \\ \sqrt{2} i_{sy} & \text{pour } k = 2 \end{cases}$

Selon cette condition, les flux et couples du S3MC sont alors:

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha 1} = \frac{M_1}{1 + T_{r1} p} i_{s\alpha 1} \\ C_{em1} = \frac{p_1 M_1}{L_{r1}} \varphi_{r\alpha 1} i_{s\beta 1} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_{r\alpha 2} = \sqrt{2} \frac{M_2}{1 + T_{r2} p} i_{sx} \\ C_{em2} = \sqrt{2} \frac{p_2 M_2}{L_{r2}} \varphi_{r\alpha 2} i_{sy} \end{cases}$$

On peut donc contrôler le flux et le couple de la MAHP à l'aide des composants du courant de la sources ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$) respectivement, et la même pour la MASTP avec les courants (i_{sx}, i_{sy}).

6. ALIMENTATION DU S3MC

Notre choix peut se porter sur un onduleur hexaphasé de tension, la figure 3 fournit une représentation schématique de cet onduleur. La commande de l'onduleur est par la technique modulation de largeur d'impulsion (MLI) [16-18].

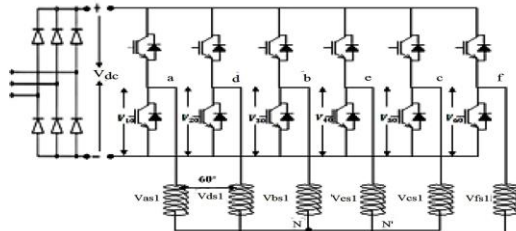


Fig. 3: Représentation d'un onduleur hexaphasé

7. SIMULATION NUMERIQUE

Les résultats de simulation sont dans le but de prouver le contrôle découplé de deux machines du S3MC. Nous avons tout d'abord simulé le démarrage de deux machines hexaphasé et triphasé, la figure 4 illustre les réponses en vitesses, couples et courants statoriques. Nous remarquons que le démarrage de MAHP n'a pas un impact, ni sur la vitesse de la MASTP, ni sur son couple électromagnétique.

Dans le deuxième test, il est réservé aux changements de sens de rotation de deux machines. En effet, la figure 5 et la figure 6 montrent les résultats obtenus dans le cas où la MAHP tourne à 50 rad/s, puis à $t = 1.5s$, elle est inversée de +50rad/s à -50rad/s. Nous constatons que le contrôle découplé est toujours conservé, aucune influence sur les caractéristiques des deux machines n'a pas été constatée. La même remarque est déduite lorsque la vitesse de la MASTP est inversé de +100rad/s à -100 rad/s sous une vitesse $N_1 = 50$ rad/s.

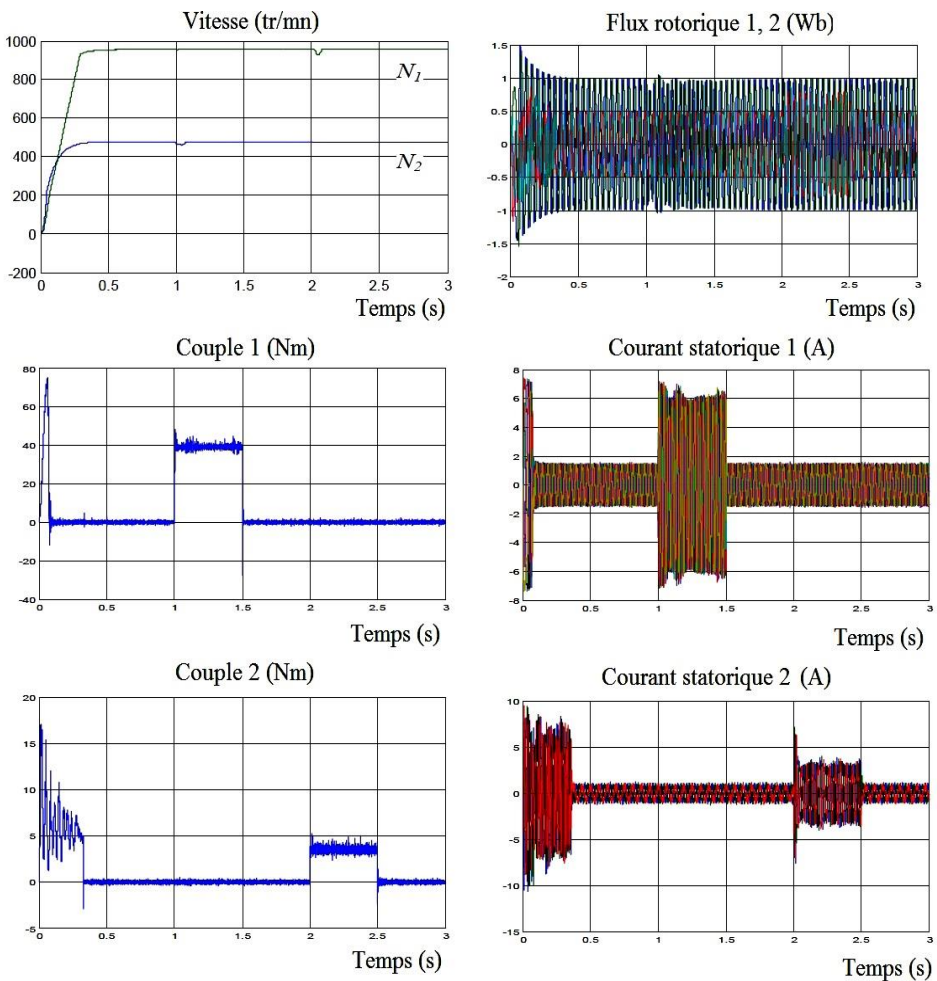


Fig. 4: Performance de la commande vectorielle indirecte du S3MC démarrage à vide et application une charge à M1 et M2

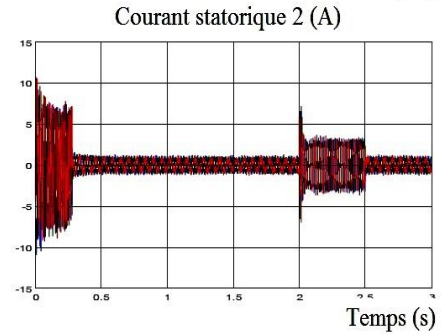
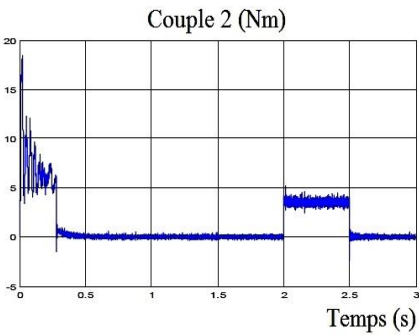
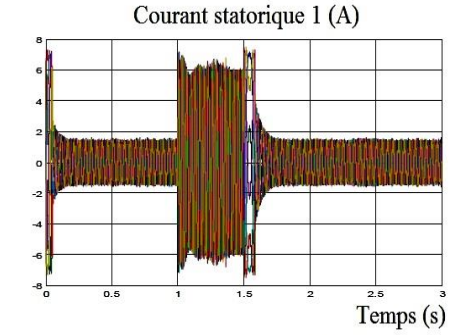
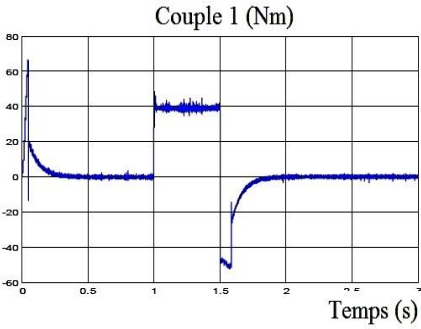
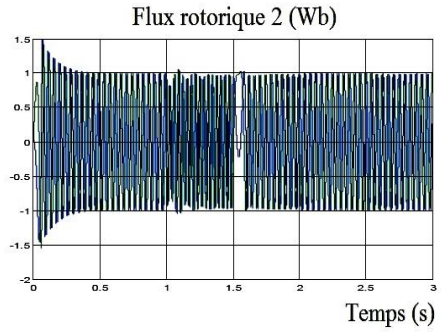
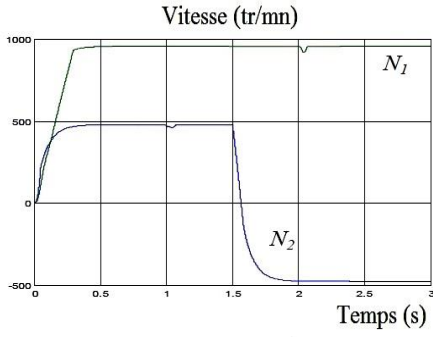
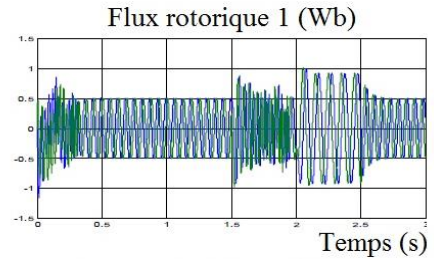
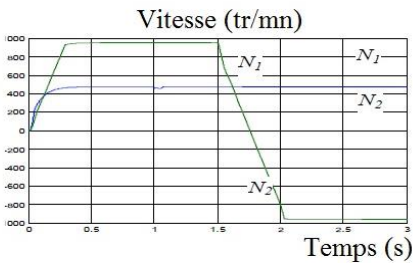


Fig. 5: Performance de la commande vectorielle indirecte du S3MC Inversion de vitesse de MAHP $N_2 = -50\text{rd/s}$



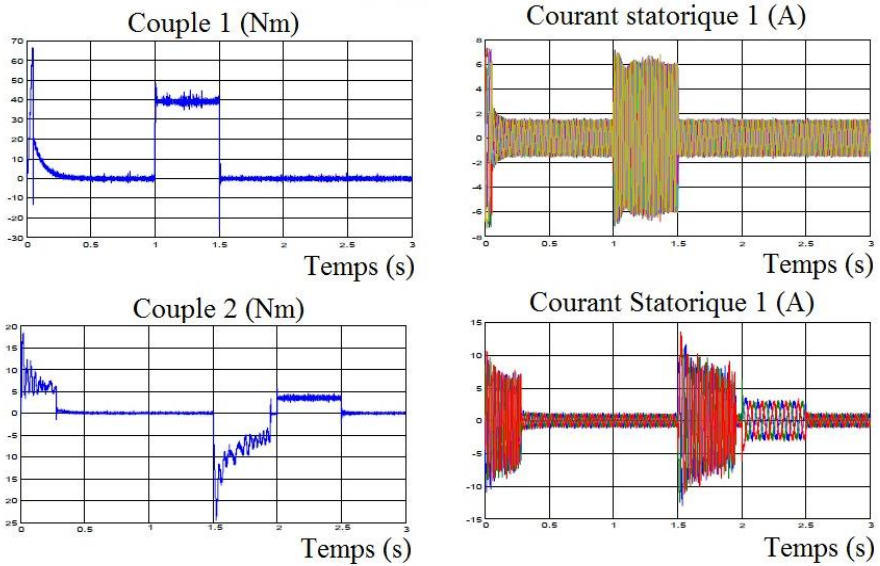


Fig. 6: Performance de la commande vectorielle indirecte du S3MC Inversion de vitesse de MATP $N1 = -100\text{rd/s}$

8. CONCLUSION

Dans ce contexte, nous avons étudié la modélisation du système multi machines en vue d'une alimentation par convertisseur statiques. Afin de simplifier ce modèle, nous l'avons représenté par les sous systèmes (α, β) , (x, y) et $(0+, 0-)$ à l'aide d'une transformation.

Enfin, nous avons élaboré la commande à flux orienté, en boucle fermée à ce système. Les résultats de simulation montrent clairement qu'on peut commander d'une façon indépendante les deux machines connectées en série.

Cependant, le calcul des paramètres de régulateurs, PI, est effectué en considérant des paramètres constants de la machine. Mais si, pour une quelconque erreur de mesure de certains paramètres, ou d'une variation de ces derniers, suite à une élévation de température par exemple, provoque une dégradation de la qualité de réglage.

REFERENCES

- [1] A. Djahbar, 'Contribution de la Commande Multi Machine Connectée en Séries', Thèse de Doctorat en science, USTO, 2008.
- [2] L. Bekrar, 'Etude de la Commande Découplée d'un Système Entraînement Multimachine Electriques Mono Convertisseur Statique', Thèse de magister, 2012.
- [3] Y. Cui, R. Kavasseri, 'A Particle Filter for Dynamic State Estimation in Multi-Machine Systems With Detailed Models', IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, N°. 99, pp. 1-9, 2015.

- [4] S. Sachin, K. George, M. Mahesh and C. Vladimir, 'Comparison of Full and Reduced Scale Solar PV Plant Models in Multi-Machine Power Systems', IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 1-5, Chicago, USA, 14-17 April 2014.
- [5] Z. Hongshan and L. Xiaoming, 'Excitation Prediction Control of Multi-Machine Power Systems Using Balanced Reduced Model', IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), pp. 1 - 5, Vancouver, BC, 21-25 July 2013.
- [6] C.E. Ugalde-Loo, E. Acha and E. Licéaga-Castro, 'Multi-Machine Power System State-Space Modelling for Sall-Signal Stability Assessments', Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, N°24, pp. 10141-10161 15 December 2013.
- [7] I. Zubia, J.X. Ostolaza, A. Susperregui and J.J. Ugartemendia, 'Multi-Machine Transient Modelling of Wind Farms: An Essential Approach to the Study of Fault Conditions in the Distribution Network', Applied Energy, Vol. 89, N°1, pp. 421 - 429, January 2012.
- [8] R. Saluja, S. Ghosh and M.H. Ali, 'Transient Stability Enhancement of Multi-Machine Power System by Novel Braking Resistor Models', Proceedings of IEEE Southeastcon, pp. 1 - 6, Jacksonville, FL, 4-7 April 2013.
- [9] E. Levi, M. Jones and S.N. Vukosavic, 'Even-Phase multi-Motor Vector Controlled Drive with Single Inverter Supply and Series Connection of Stator Windings', IEEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 150, N°5, pp. 580 - 590, 2003.
- [10] D. Hadiouche, 'Contribution à l'Etude de la Machine Asynchrone Double Etoiles: Modélisation, Alimentation et Structure', Thèse de Doctorat, UHP Nancy-1, 2001.
- [11] J.P. Therattil and P.C. Panda, 'Modeling and Control of a Multi-Machine Power System With FACTS Controller', International Conference on Power and Energy Systems (ICPS), pp. 1 - 6, Chennai, 22-24 Dec. 2011.
- [12] S. Mahapatra and A.N. Jha, 'Modeling and Simulation of TCSC Based Controller In a Multi Machine Power System', Students Conference on Engineering and Systems (SCES), pp. 1-6, Allahabad, 28-30 May 2014.
- [14] H. Zhao, X. Lan, N. Xue and B. Wang, 'Excitation Prediction Control Of Multi-Machine Power Systems Using Balanced Reduced Model', IET Generation, Transmission & Distribution, pp. 1075 - 1081, June 2014.
- [15] Z. Ni, Y. Tang, H. He and J. Wen, 'Multi-Machine Power System Control Based on Dual Heuristic Dynamic Programming', IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG), pp. 1-7, Orlando, FL., 9 - 12 Dec. 2014.
- [16] C.B. Jacobina, V.F.M.B. Melo, N. Rocha and E.R.C. da Silva, 'Six-Phase Machine Conversion System with Three-Phase and Single-Phase Series Converters', IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3896 - 3903, Denver, CO, 15-19 Sept. 2013.
- [17] C.H. Seng, E. Levi, M. Jones and M.J. Duran, 'Operation of a Six-Phase Induction Machine Using Series-Connected Machine-Side Converters', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, N°1, pp. 164 - 176, 2013.
- [18] T. Abdelkrim, E.M. Berkouk, K. Aliouane, K. Benamrane and T. Benslimane, 'Etude et Réalisation d'un Onduleur à Trois Niveaux Commandé par MLI Vectorielle', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, N°2, pp. 211 - 217, 2011.