

Analyse du comportement d'une machine asynchrone hexaphasée : Cas du changement de l'angle de déphasage

T. Bessaad ^{1*}, R. Taleb ¹, A. Namoune ², F. Chabni ¹ et A. Belboula ¹

¹ Département de Génie Electrique, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algeria
Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables, LGEER

² Département de Génie Electrique, Institute des Sciences et de la Technologie
Centre Universitaire Ahmed Zabana, Relizane, Algeria

(reçu le 25 Août 2018 - 25 Septembre 2018)

Résumé - Dans ce contexte, le travail présenté porte sur l'étude, la modélisation d'une machine hexaphasée alimentée par un onduleur hexaphasé. Cette machine asynchrone hexaphasée (MASHP) n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, l'effet de peau, etc..., [1]. L'objectif de ce travail est de présenter le modèle général de la MASHP dans le repère réel (abc). Ensuite, nous présenterons les différentes étapes permettant d'aboutir au modèle diphasé de la MASHP, obtenu à partir d'une matrice de transformation appropriée [2]. Afin de simplifier l'étude, la simulation numérique de la MASHP, le système de dimension six sera décomposé en trois sous-systèmes découplés. Après l'alimentation de la MASHP par un onduleur de tension hexaphasé sera présentée. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence du changement de l'angle de déphasage α sur le comportement de la MASHP et nous avons montré que les meilleures performances sont obtenues pour la configuration $\alpha = 30^\circ$.

Abstract - In this context, the work presented concerns the study, the modeling of a hexaphased machine powered by a hexaphased inverter. This hexaphase asynchronous machine (MASHP) is not a simple system, because many complicated phenomena occur in its operation, such as saturation, skin effect, etc..., [1]. The objective of this work is to present the general model of the MASHP in the real benchmark (abc). Then, we will present the different steps leading to the two-phase model of the MASHP, obtained from an appropriate transformation matrix [2]. In order to simplify the study, the numerical simulation of the MASHP, the dimension six system will be decomposed into three decoupled subsystems. After the MASHP is powered by a hexa-phase voltage inverter, it will be presented. In the following, we will study the influence of the change in the α phase shift angle on the behaviour of the MASHP and we have shown that the best performance is obtained for the $\alpha = 30^\circ$ configuration.

Mots clés: Onduleur hexaphasé - Machine asynchrone - angle de déphasage - Modélisation - Simulation numérique.

1. INTRODUCTION

Les machines triphasées 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'. La machine asynchrone hexaphasée (MAS-HP) n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, l'effet de peau, etc., [1].

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle générale de la MAS-HP dans le repère réel (abc). Ensuite, nous présenterons les différentes étapes permettant d'aboutir

* ta.bessaad@gmail.com

au modèle diphasé de la MAS-HP, obtenu à partir d'une matrice de transformation appropriée [2].

Afin de simplifier l'étude, la simulation numérique et la commande de la MAS-HP, le système de dimension six sera décomposé en trois sous-systèmes découplés. Après l'alimentation de la MAS-HP par un onduleur de tension hexaphasée sera présentée.

2. MISE EN EQUATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE HEXPHASEE

La MAS-HP se compose d'un stator et d'un rotor. Comme le montre la figure 1, le stator est constitué de six enroulements identiques et décalés d'un angle électrique " α ". Le rotor est identique à celui d'une machine asynchrone triphasée et peut être soit bobiné soit à cage d'écoreuil.

Pour simplifier, nous considérerons que le circuit électrique du rotor est équivalent à un enroulement triphasé en court-circuit [3-6]. La figure 1 donne la position des axes magnétiques des neuf enroulements formant les neuf phases.

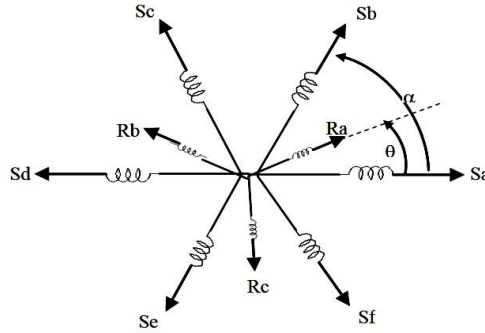


Fig. 1: Représentation des enroulements de la machine asynchrone hexaphasée

θ exprime la position du rotor (phase R_a) par rapport au stator (phase S_a)

$$\theta = \Omega_m t + \theta_0$$

Ω_m : Vitesse mécanique du rotor

3. HYPOTHESES DE TRAVAIL [7]

1. Saturation et hystérésis magnétiques négligés.
2. Courants de Foucault et effet de peau négligés.
3. Répartition sinusoïdale des forces magnétomotrices.
4. On admettra que les six phases sont identiques et équilibrés.

4. MODELISATION DE LA MAS-HP

a- Equations électriques

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [0] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (1)$$

où

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}] \cdot [i_s] \end{cases} \quad (2)$$

Sachant que

$$\begin{aligned} [V_s] &= [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc} \ V_{sd} \ V_{se} \ V_{sf}]^t \\ [i_s] &= [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{sd} \ i_{se} \ i_{sf}]^t \\ [i_r] &= [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t \end{aligned}$$

avec

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

R_s , R_c - Résistances statoriques et rotoriques

$[L_{sr}]$ - Inductance mutuelle stator rotor

b- Equation électrique

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i]^t \left[\frac{d}{d\theta} [L] \right] [i] \quad (3)$$

avec

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} ; [i] = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit

$$C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega_m = J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (4)$$

avec

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega_m$$

J : Moment d'inertie de la MASHP; C_r : Couple résultat.

Les équations (1), (2), (3) et (4) constituent un modèle électromécanique de MASHP.

5. MODELE DE LA MASHP DANS LE REPERE (α, β) , (x, y) , (o^+, o^-)

La MAHP peut être représenter par les sous systèmes (α, β) , (x, y) , (o^+, o^-) à l'aide de la transformation suivante-

$$X_{\alpha,\beta,o} = [T_s(\theta)]^{-1} \times X_{abc}$$

Puis

$$X_{d,q,o} = [T_s(\theta)]^{-1} \times X_{\alpha\beta o}$$

Où on peut représenter le courant, la tension ou le flux dans la MASHP-

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

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

Alors, ces modèles sont-

$$\begin{cases} [T_s]^{-1} [\varphi_{s,abcdef}] = [\varphi_{s\alpha} & \varphi_{s\beta} & \varphi_{sx} & \varphi_{sy} & \varphi_{so^+} & \varphi_{so^-}]^t \\ [T_s]^{-1} [i_{s,abcdef}] = [i_{s\alpha} & i_{s\beta} & i_{sx} & i_{sy} & i_{so^+} & i_{so^-}]^t \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} [T_s]^{-1} [\varphi_r] = [0 & 0 & 0]^t \\ [T_s]^{-1} [i_r] = [i_{r\alpha} & i_{r\beta} & i_{ro^+}]^t \end{cases}$$

Nous pouvons dire que la f.m.m. produite par six phases statoriques est équivalente à la f.m.m. produite par deux enroulements en quadrature, (α, β) parcourus les courants $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$. Ces courants sont définis par la transformation (6).

6. EQUATIONS DES TENSIONS DE LA MAS-PH

En appliquant la transformation au système d'équations (6) des tensions statoriques et rotoriques, nous obtenons le modèle exprimé dans un repère lié au stator par le système d'équations suivants-

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \\ v_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} + \omega_m \varphi_{r\beta} \\ v_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} - \omega_m \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

La conversion électromagnétique de l'énergie n'est liée qu'aux deux composantes $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, pour cela nous allons nous intéresser uniquement au repère (α, β) . Le modèle de la MAS-PH peut être mis sous forme d'équation d'état de la manière suivante-

$$\begin{cases} \dot{X} = A(\Omega)X + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (8)$$

$$X = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}]^t ; U = [v_{s\alpha}, v_{s\beta}]^t$$

7. EQUATION MECANIQUE

L'équation mécanique prend la forme-

$$C_{em} = p \times (\varphi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (9)$$

8. ALIMENTATION DE LA MAS-HP

Notre choix peut se porter sur un onduleur hexaphasé de tension, la figure 2 fournit une représentation schématique de cet onduleur [7].

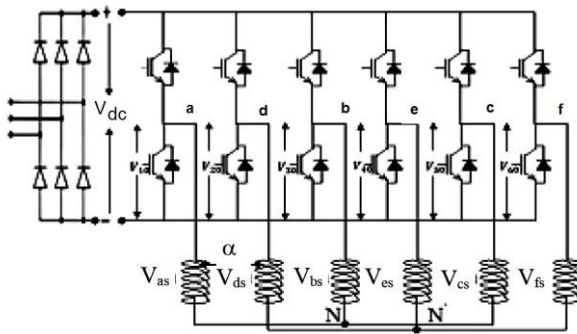


Fig. 2: Représentation d'un onduleur hexaphasé

La commande de l'onduleur se fait par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

9. SIMULATION NUMERIQUE

Nous avons simulé le modèle électromécanique de la MAS-HP sous l'environnement Matlab/Simulink. La machine est alimentée par un onduleur hexaphasé et commandé par la commande MLI. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence du changement de l'angle de déphasage α sur le comportement de la MAS-HP.

Les figures 1, 2 et 3 représentent les performances de la conduite de la machine asynchrone hexaphasée alimentée par un onduleur hexaphasé commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses bipolaires respectivement lors d'un démarrage à vide et lors de l'application d'un couple de charge ($C_r = 14 \text{ N.m}$) entre 1.5 sec et 2.5 sec avec un changement de l'angle de déphasage. D'après les résultats, nous remarquons que les meilleures performances sont obtenues pour la configuration 30° .

Le couple électromagnétique varie d'abord d'une façon brusque au démarrage de la machine dépassant les 80 N.m , ensuite se stabilise en régime établi après 0.7 sec.

Pour une perturbation de couple de 14 N.m, nous remarquons une diminution de la vitesse de rotation. Les flux rotorique en quadratique et directe sont directement affectés, ce qui montre qu'il y a un fort couplage entre le couple et la vitesse d'une part et avec les flux rotoriques d'autre part. La vitesse atteint sa valeur de référence 3.14 rd/s au bout de 0.6 sec.

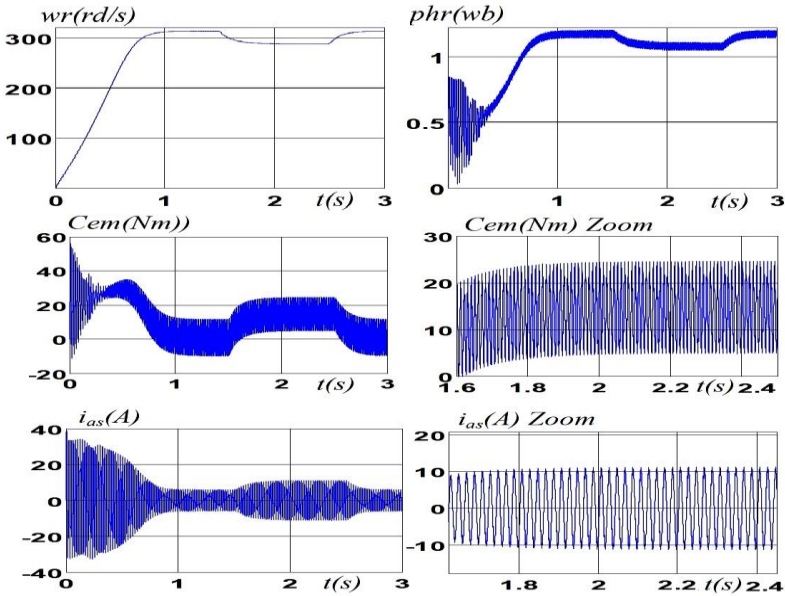


Fig. 3: Performances de la conduite de la MAS-HP alimentée par deux onduleurs hexaphasé - Application d'un couple résistant entre 1.5 et 2.5 sec ($C_r = 14$ N.m) avec $\alpha = 30^\circ$

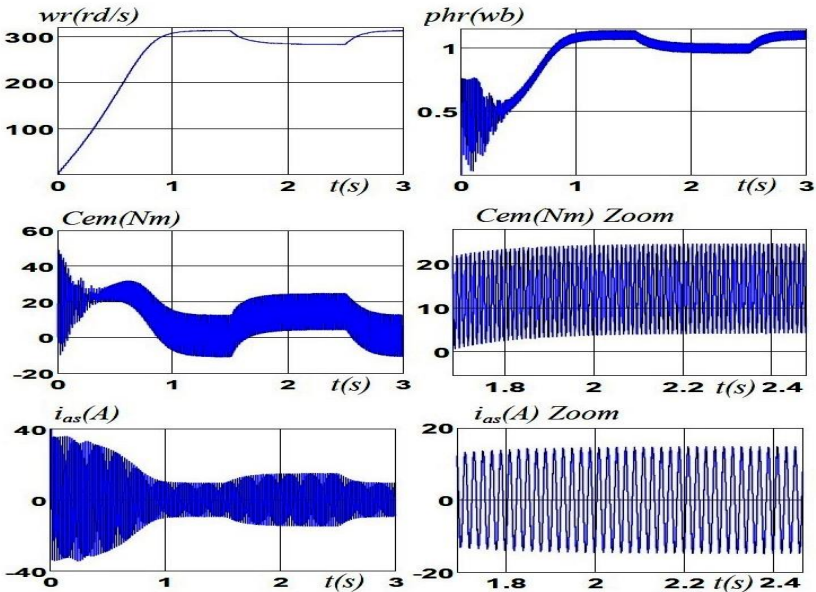


Fig. 4: Performances de la conduite de la MAS-HP alimentée par deux onduleurs hexaphasé - Application d'un couple résistant entre 1.5 et 2.5 sec ($C_r = 14$ N.m) avec $\alpha = 45^\circ$

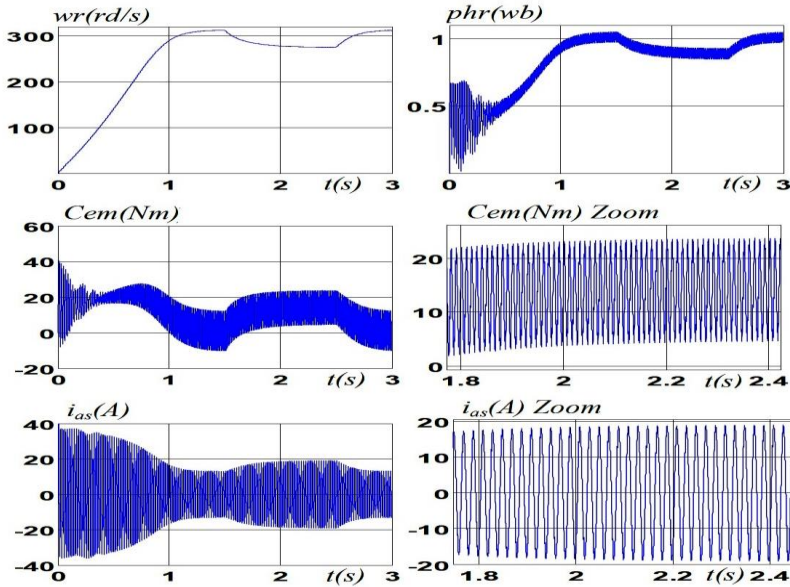


Fig. 5: Performances de la conduite de la MAS-HP alimentée par deux onduleurs hexaphasé - Application d'un couple résistant entre 1.5 et 2.5 sec ($C_r = 14 \text{ N.m}$) avec $\alpha = 60^\circ$

10. CONCLUSION

Dans ce contexte, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone hexaphasée en vue d'une alimentation par convertisseurs statiques. Afin de simplifier ce modèle, nous l'avons représenté par les sous systèmes (α, β) , (x, y) , (o^+, o^-) à l'aide d'une transformation.

Enfin, nous avons étudié l'influence du changement de l'angle de déphasage α sur le comportement de la machine asynchrone hexaphasée et nous avons montré que les meilleures performances sont obtenues pour la configuration $\delta = \alpha = 30^\circ$.

α : Déphasage entre les deux systèmes de tension d'alimentation et δ : Décalage physique entre les systèmes de bobines.

11. PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA MAS-HP

$$R_s = 3.72 \, \Omega ; R_r = 2.12 \, \Omega$$

$$L_s = L_r = 0.022 \, \text{H} ; L_m = 0.3672 \, \text{H}$$

$$f = 50 \, \text{Hz}$$

$$J = 0.0625 \, \text{kg/m}^2 , \text{ Moment d'inertie}$$

$$K_f = 0.001 \, \text{SI} ; \text{ Coefficient de frottement}$$

$$V_n = 220 \, \text{V} ; I_n = 6.5 \, \text{A} ; P = 1$$

REFERENCES

- [1] A. Bounadja, '*Commande vectorielle sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone double étoile*', Mémoire de Magister, Université Assiba Benboulaïd, Chlef, 2008.
- [2] K. Marouani, '*Contribution à La Commande d'un Entraînement Electrique à Base de Moteur Asynchrone Double Etoile*', Thèse de Doctorat, EMP, Alger 2010.
- [3] T.A. Lipo, '*A d-q Model for Six Phase Induction Machines*', Proceedings ICEM'80, Athens, Greece, pp. 860 - 867, 1980.
- [4] R. Kiani Nezhad, B. Nahid, L. Baghli et F. Betin '*Commande des machines asynchrones hexaphasées*', Paris, Nov. 2005, 2^{ème} Edition.
- [5] D. Hadiouche, '*Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoiles: modélisation, alimentation et structure*', Thèse de Doctorat, UHP Nancy-1, 2001.
- [6] S. Merdoun, '*Contribution à la commande des machines asynchrones hexaphasées*', Thèse de Doctorat, Université de Picardie, Jules Verne, mai 2008.
- [7] L. Bekrar, '*Etude de la commande découplée d'un système - Entraînement multimachine électriques - Mono convertisseur statique*', Thèse de Magister, 2012.