

## Conception de connexion du système multi machines alimenté par un seul convertisseur

T. Bessaad <sup>1\*</sup>, R. Taleb <sup>1</sup> et G. Bachir <sup>2†</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire LGEER, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie

<sup>2</sup> Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf  
USTO-MB, Oran, Algérie

(reçu le 10 Mars 2018 - accepté le 30 Mars 2018)

**Résumé** - Ce travail est consacré à la conception de connexion et la modélisation de système multi machines connectées en série, 'SMMCS'. Le premier objectif de ce travail est de présenter une analyse des différents cas possibles de mise en série des machines polyphasées à nombre de phases  $q$ . Le second objectif est de présenter la modélisation d'un système multi machines, 'SMMCS' constitué de deux machines asynchrones à cage d'écoreuil: une machine hexaphasée symétrique et une machine triphasée alimentée par un seul convertisseur statique.

**Abstract** - This work's objective is the conception of connections and modelling of serial multi machine connected systems, 'SMMCS'. The first objective is to present an analysis of the different possible cases that can be encountered when polyphasic machines, with  $q$  phases, are serially connected. The second objective is to model a multi machine system, 'SMMCS' made of two asynchronous squirrel cage machines: A hexaphased symmetrical machine and a triphasic machine powered by a single static converter.

**Mots Clés:** Système multi machines - Machine hexaphasée - Convertisseur hexaphasé.

### 1. INTRODUCTION

Un système multi-machines mono-convertisseur SMMCS est un système formé de plusieurs machines polyphasées, dont les enroulements statoriques sont connectés en série selon une transposition de phase appropriée et alimentés par un seul convertisseur statique et commandées indépendamment [1].

Nous avons opté dans notre étude pour un système constitué de deux machines asynchrones à cage d'écoreuil: une machine hexaphasée symétrique et une machine triphasée. Les entrées des enroulements statoriques de la machine hexaphasée sont reliées directement à un onduleur de tension hexaphasée et les sorties sont connectées aux enroulements statoriques de la machine triphasée qui sont montés en étoile.

Ce système est recommandé pour des entraînements électriques de forte puissance, dont la machine hexaphasée sera la machine principale, tandis que la machine triphasée peut être une machine secondaire (ventilation, refroidissement, positionnement, orientation, ...)

### 2. PARTICULARITES CONNEXIONS EN SERIE DES ENROULEMENTS STATORIQUES

Pour que chaque machine du système multi-machines mono-convertisseur SMMCS, dont les enroulements statoriques sont connectés en série subit une commande indépendante. Il est nécessaire que les courants producteurs du couple et flux d'une machine ne doivent pas y contribuent pour les autres machines du groupe. Notons

---

\* t.bessaad@univ-chlef.dz , rac.taleb@gmail.com

† ghalem.bachir@yahoo.fr

qu'une simple connexion en série des enroulements statoriques n'aboutit pas au résultat désiré.

Une transposition des enroulements statoriques déduite par la matrice de Clarke généralisée est une solution à cette requête (matrice de découplage) [1]. Le premier objectif de ce travail est de présenter une analyse des différents cas possibles de mise en série des machines polyphasées à nombre de phases  $q$ . Notre second objectif est de présenter la modélisation de ce système (SMMCS).

La matrice de découplage pour des machines polyphasées à nombre de phase  $q$  impaire est donnée par [1]

$$[T_q] = \sqrt{\frac{2}{q}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \cos 3\alpha & \dots & \cos (q-1)\alpha \\ 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \sin 3\alpha & \dots & \sin (q-1)\alpha \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 6\alpha & \dots & \cos 2(q-1)\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & \sin 6\alpha & \dots & \sin 2(q-1)\alpha \\ 1 & \cos 3\alpha & \cos 6\alpha & \cos 9\alpha & \dots & \cos 3(q-1)\alpha \\ 0 & \sin 3\alpha & \sin 6\alpha & \sin 9\alpha & \dots & \sin 3(q-1)\alpha \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \cos 2\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \cos 3\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \dots & \cos (q-1)\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \sin 2\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \sin 3\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \dots & \sin (q-1)\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matrice de découplage pour des machines polyphasées à nombre de phase  $q$  pair est donnée par [1] :

$$[T_q] = \sqrt{\frac{2}{q}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \cos 3\alpha & \dots & \cos (q-1)\alpha \\ 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \sin 3\alpha & \dots & \sin (q-1)\alpha \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 6\alpha & \dots & \cos 2(q-1)\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & \sin 6\alpha & \dots & \sin 2(q-1)\alpha \\ 1 & \cos 3\alpha & \cos 6\alpha & \cos 9\alpha & \dots & \cos 3(q-1)\alpha \\ 0 & \sin 3\alpha & \sin 6\alpha & \sin 9\alpha & \dots & \sin 3(q-1)\alpha \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \cos 2\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \cos 3\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \dots & \cos (q-1)\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \sin 2\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \sin 3\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) & \dots & \sin (q-1)\left(\frac{q-2}{2}\alpha\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

En appliquant les matrices de transformation précédentes, le système d'équations réel de dimension  $q$  sera décomposé en trois sous-systèmes découplés: les systèmes  $(\alpha, \beta)$ ,  $(x, y)$  et homopolaire  $(o)$ . Le sous-système  $(\alpha, \beta)$  est exactement similaire à celui d'une MAS triphasée dont les variables sont responsables de la conversion électromécanique de l'énergie dans la machine polyphasée.

Par contre, les variables du sous-système  $(x, y)$  ne participent pas à la conversion électromécanique de l'énergie et seront utilisées pour le contrôle indépendant des autres machines appartenant un système SMMCS. Enfin, le sous-système homopolaire (o) qui contient les composantes homopolaires classiques.

Les composantes du sous-système  $(x, y)$  sont dénombrées par [2, 3]:

$$(x, y)_q = \frac{q-1}{2} - 1, \quad q : \text{nombre impair } (q=5, 7, \dots)$$

$$(x, y)_q = \frac{q-2}{2} - 1, \quad q : \text{nombre pair } (q=6, \dots)$$

Nous pouvons utiliser ces composantes comme grandeurs de contrôle du couple et du flux des autres machines connectées en série avec la première machine et alimentées avec un seul convertisseur statique.

En effet, si les machines dont les stators sont connectés en série et contrôlés d'une façon indépendante, il est nécessaire que les courants qui produisent le couple et le flux de la première machine  $(\alpha, \beta)$  ne contribuent pas à la production du couple et du flux des autres machines du groupe [4].

Par conséquent, il est possible de contrôler la vitesse (couple, flux, position) de  $k = (q - 2)/2$  machines du système de façon indépendante (pour un nombre de phase pair) et de  $k = (q - 1)/2$  machines du système, pour un nombre de phase impair. Ainsi, les composantes  $(\alpha, \beta)$  contrôlent la première machine et les composantes  $(x, y)$  contrôlent les autres machines connectées en série.

La procédure de connexion des enroulements statoriques est déduite au **Tableau 1**. Selon ce tableau, la première phase de chaque machine est directement connectée en série (première colonne de la matrice) avec un angle de déplacement nul et un pas égal à zéro.

La deuxième phase de la première machine est connectée avec la troisième phase de la deuxième machine, qui doit être connectée à la quatrième phase de la troisième machine et ainsi de suite. L'angle de déplacement pour cette transposition est égal à  $\alpha$  avec un pas égal à un.

Ceci est déduit directement de la deuxième colonne de la matrice de transformation, qui contient des termes en cosinus et en sinus avec un angle de déplacement égal à  $\alpha$ ,  $2\alpha$ ,  $3\alpha$  jusqu'à  $((q-1)/2)\alpha$ , pour un nombre de phases  $q$  impair et jusqu'à  $((q-1)/2)\alpha$ , pour un nombre de phases  $q$  pair.

De la même manière, la troisième phase de la première machine est connectée à la cinquième phase de la deuxième machine avec un angle de déplacement égal à  $2\alpha$  et un pas égal à deux.

Cette cinquième phase sera connectée à la septième phase de la troisième machine et ainsi de suite. Ce résultat est déduit de la troisième colonne de la matrice de transformation, avec un angle de déplacement égal à  $2\alpha$ ,  $4\alpha$ ,  $6\alpha$ , jusqu'à  $((q-1)/2)\alpha$ , pour un nombre de phases  $q$ .

D'une façon générale, le tableau suivant donne la manière de connexion de plusieurs machines polyphasées. Dans ce tableau, les lettres en majuscule (A, B, C...) désignent les phases de la source d'alimentation, les lettres en minuscule (a, b, c,...) désignent les phases de la première machine polyphasée connectée à la source et les lettres (M1, M2, M3,...) désignent les machines connectées en série [2]:

**Tableau 1:** Procédure de connexion en série de plusieurs machines polyphasées

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
M1	<b>a</b>	b	c	d	e	f	<b>g</b>	H	i	j	k	...
M2	<b>a</b>	<b>b+1</b>	<b>c+2</b>	<b>d+3</b>	<b>e+4</b>	<b>f+5</b>	<b>g+6</b>	h+7	i+8	j+9	k+10	...
M3	a	b+2	c+4	d+6	e+8	f+10	g+12	h+14	i+16	j+18	k+20	...
M4	a	b+3	c+6	d+9	e+12	f+15	g+18	h+21	i+24	j+27	k+30	...
M5	a	b+4	c+8	d+12	e+16	f+20	g+24	h+28	i+32	j+36	k+40	...
M6	a	b+5	c+10	d+15	e+20	f+25	g+30	h+35	i+40	j+45	k+50	...
M7	a	b+6	c+12	d+18	e+24	f+30	g+36	h+42	i+48	j+54	k+60	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Les cellules en gras sur le tableau ci-dessus définissent la procédure de connexion d'un système multi-machines constitué d'une machine asynchrone hexaphasée connectée en série à une machine asynchrone triphasée.

**2.1 Connexion en série de machines à nombres de phase impair**

La procédure de connexion en sérié des enroulements statoriques et le diagramme correspondant de quelques machines polyphasées à nombre de phase impair sont données dans cette section [5].

Le premier exemple qui sera traité porte sur une machine penta phasée (q=5). Le **Tableau 2** et la figure 1 montrent la procédure de connexion en sérié de deux machines penta phasées.

**Tableau 2:** Procédure de connexion en série

	A	B	C	D	E
<b>M1</b>	1	2	3	4	5
<b>M2</b>	1	3	5	2	4

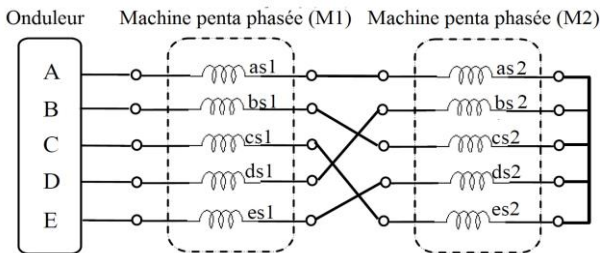


Fig. 1: Schéma de connexion en série de deux machines pentaphasées

**2.2 Connexion en série de machine à nombre de phase pair**

Le nombre minimum de phases à connecter en série pour ce cas est q=6. En effet, la procédure de connexion pour ce type de machine avec une machine triphasée est donnée par le **tableau 3** [8]:

**Tableau 3:** Procédure de connexion en série d'une machine hexaphasée avec une machine triphasée (q=6)

	A	B	C	D	E	F
<b>M1</b>	1	2	3	4	5	6
<b>M2</b>	1	3	5	2	4	5

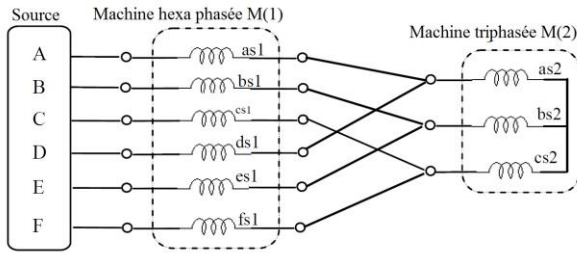


Fig. 2: Schéma de connexion en série (q=6)  
d'une machine hexaphasée avec une machine triphasée

### 3. NOMBRE DE MACHINE CONNECTEE EN SERIE

#### 3.1 Machines à nombre de phase impair

Les machines polyphasées à nombre de phases 'q' impair et qui sont connectées à une source d'alimentation doivent répondre à certaines conditions. En effet, le nombre de machines à connecter en série ainsi que leur nombre de phases dépendent du nombre q selon les trois cas suivant [1].

##### 3.1.1 'q' est un nombre premier

Le nombre de machines à connecter en série selon la transposition de phases est donné par:

$$k = (q - 1)/2 \tag{3}$$

Le nombre des phases de k machines est identique à q. Les machines considérées pour ce cas sont:

$$q = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, \dots$$

##### 3.1.2 'q' n'est pas un nombre premier

Le cas où le nombre de phases q n'est pas un nombre premier, mais satisfait la condition

$$q = 3^m, \quad m = 2, 3, 4, \dots \tag{4}$$

Le nombre de machines à connecter en série est déterminé par la relation (2). Cependant, les k machines n'ont pas le même nombre de phases dans ce cas. Pour m > 1, le nombre  $\xi$  de phases des machines connectées en série est donné par:

$$\xi = q, \quad \frac{q}{3}, \frac{q}{3^2}, \dots, \frac{q}{3^{(m-1)}} \tag{5}$$

Ce cas peut être généralisé pour tout nombre de phases q égal à:

$$q = l^m, \quad m = 2, 3, 4, \dots \tag{6}$$

Exemple- q = 25 ; m = 2 ; 12 machines 10 de 25 et 2 de 5 phase. Les machines de cette catégorie sont- q = 9, 25, 27, 49, 81, 121, 125, .....

##### 3.1.3 'q' n'est pas un nombre premier et n'est pas divisible par lm

Le nombre de phase q est donc divisible par deux ou plus de nombres premiers (par exemple, pour q = 15, les deux machines premiers sont 3,5). Notons les nombres

premiers obtenus par cette propriétés  $q_1, q_2, q_3, \dots$ , le nombre de machines à connecter en série est donc [2]:

$$k = (q - 1)/2 \quad (7)$$

Le **Tableau 10**, résume les trois cas étudiés pour un nombre de phase  $q$  impair.

### 3.2 Machines à nombre de phase pair

Trois cas qui peuvent surgir, selon la nature du nombre de phase  $q$  [2]

#### 3.2.1 $q/2$ un nombre premier

Les machines qui peuvent se connecter en série sont dénombrées par:

$$k = (q - 2)/2 \quad (8)$$

On peut aussi définir le nombre de phase de chaque machine connectée en série:

$$\begin{aligned} - \xi &= k/2 && \text{machines de } q \text{ phase} \\ \xi &= k/2 && \text{machines de } q/2 \end{aligned}$$

Les machines de cette catégories sont:  $q = 6, 10, 14, \dots$

#### 3.2.2 $q/2$ n'est pas un nombre premier

Dans ce cas, il satisfait à la condition suivante:

$$q = 2^m, \quad m = 3, 4, 5, \dots \quad (9)$$

Alors, le nombre de machines connectées en série est défini par l'équation (8)

Le nombre de phase des machines connectées en série est:

$$\xi = q, \quad \frac{q}{2}, \frac{q}{2^2}, \dots, \frac{q}{2^{(m-2)}} \quad (10)$$

Les machines considérées sont:  $q = 8, 16, 32, \dots$

#### 3.2.3 $q$ est un nombre premier quelconque

Le nombre de machine qui peuvent se connecter série est:

$$k < (q - 2)/2 \quad (11)$$

et le nombre de phase correspondant est:

$$\xi = q, \quad \frac{q}{2}, \frac{q}{3}, \frac{q}{4}, \dots \quad (12)$$

Remarque- Le nombre de phase de chaque machines doit être un nombre entier. Ce groupe contient les machines suivantes:  $q = 12, 18, 20, \dots$

Le **Tableau 11** résume les différents cas étudiés pour un nombre de phase  $q$  pair [9].

## 4. MODELISATION DU SYSTEME MULTI - MACHINES

Le système d'entraînement électrique est composé de deux machines asynchrones. Un moteur asynchrone hexaphasé M(1) symétrique dont les enroulements sont montés

en série avec ceux d'un second moteur asynchrone triphasé M(2). Les deux moteurs sont alimentés par un seul onduleur de tension hexaphasé.

La figure 2 présente le diagramme de connexion et d'alimentation des deux moteurs [6, 7]. Le stator de la machine hexaphasée est constitué de six enroulements identiques et décalés d'un angle électrique ( $\alpha = 2\pi/6$ ). Seules les phases 1, 3 et 5 sont utilisées par la deuxième machine, elles sont déphasées par un angle de  $2\pi/3$ . Cette machine possède alors trois phases.

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 [8, 9]. En effet, les sorties de chaque deux enroulements, appartenant à la machine hexaphasée, décalée d'un angle égal à  $\pi$ , sont connectés au même point et mises, par la suite, en série avec un enroulement de la machine triphasée [7-9].

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 2.

D'après la figure 2, les tensions statoriques et rotoriques des deux machines peuvent s'écrire comme suit [1-4]:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{as1} + v_{as2} \\ v_{bs1} + v_{bs2} \\ v_{cs1} + v_{cs2} \\ v_{ds1} + v_{as2} \\ v_{es1} + v_{bs2} \\ v_{fs1} + v_{cs2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

La relation entre les courants de source et les courants statoriques de chaque machine sont donnés comme suit:

$$\begin{aligned} [i_s] &= [I_A \quad I_B \quad I_C \quad I_D \quad I_E \quad I_F] \\ &= [i_{as1} \quad i_{bs1} \quad i_{cs1} \quad i_{ds1} \quad i_{es1} \quad i_{fs1}] \\ &= [i_{s1}] \end{aligned} \quad (14)$$

$$[i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A + I_D \\ I_B + I_E \\ I_C + I_F \end{bmatrix} \quad (15)$$

Equations électriques

$$\begin{cases} [V_{sk}] = [r_{sk}] \cdot [i_{sk}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sk}] \\ [0] = [r_{rk}] \cdot [i_{rk}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sk}] \end{cases} \quad (16)$$

$$[\mathbf{R}_{\text{seq}}] = [\mathbf{R}_{s1}] + \begin{bmatrix} [\mathbf{R}_{s2}] & [\mathbf{R}_{s2}] \\ [\mathbf{R}_{s2}] & [\mathbf{R}_{s2}] \end{bmatrix}, [\mathbf{L}_{\text{seq}}] = [\mathbf{L}_{s1}] + \begin{bmatrix} [\mathbf{L}_{s2}] & [\mathbf{L}_{s2}] \\ [\mathbf{L}_{s2}] & [\mathbf{L}_{s2}] \end{bmatrix} \quad (17)$$

### 5. MODELE DU SMMC DANS LE REPERE $(\alpha, \beta), (x, y), (o^+, o^-)$

Le SMMC peut être représenté par les sous-systèmes  $(\alpha, \beta), (x, y), (o^+, o^-)$  à l'aide de la transformation suivante:  $\mathbf{X}_{\alpha\beta o} = [\mathbf{T}_6(\theta)]^{-1} \mathbf{X}_{a,b,c}$  et  $\mathbf{X}_{dqo} = [\mathbf{T}_6(\theta)]^{-1} \mathbf{X}_{\alpha\beta o}$  où  $\mathbf{X}$  peut représenter le courant, la tension ou le flux dans le SMMC.

$$[\mathbf{T}_6] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \cos 3\alpha & \cos 4\alpha & \cos 5\alpha \\ 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \sin 3\alpha & \sin 4\alpha & \sin 5\alpha \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 6\alpha & \cos 8\alpha & \cos 10\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & \sin 6\alpha & \sin 8\alpha & \sin 10\alpha \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[\mathbf{T}_3] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[\rho(\theta)] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2 \times 4} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4} & \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (20)$$

En appliquant la matrice de transformation (6) et (7) aux équations des flux et des tensions, le système réel d'équations statoriques, de dimension six, sera décomposé en trois sous-systèmes découplés de dimension deux: les systèmes  $(\alpha, \beta), (x, y)$  et  $(o^+, o^-)$ .

Géométriquement, les variables statoriques projetées sur trois "plans" orthogonaux. Le système global dans le repère  $(\alpha, \beta), (x, y)$  et  $(o^+, o^-)$  est écrit:

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_{s1} i_{s\alpha 1} + L_{s1} \frac{di_{s\alpha 1}}{dt} + M_1 \frac{di_{r\alpha 1}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_{s1} i_{s\beta 1} + L_{s1} \frac{di_{s\beta 1}}{dt} + M_1 \frac{di_{r\beta 1}}{dt} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} V_{sx} = R_{eq} i_{sx1} + (L_{s1} + 2L_{s2}) \frac{di_{sx1}}{dt} + \sqrt{2} M_2 \frac{di_{r\alpha 2}}{dt} \\ V_{sy} = R_{eq} i_{sy1} + (L_{s1} + 2L_{s2}) \frac{di_{sy1}}{dt} + \sqrt{2} M_2 \frac{di_{r\beta 2}}{dt} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} V_{so^+} = R_{eq} i_{so^+ 1} + (L_{s1} + 2L_{s2}) \frac{di_{so^+ 1}}{dt} \\ V_{so^-} = R_{eq} i_{so^- 1} + L_{s1} \frac{di_{so^- 1}}{dt} \end{cases} \quad (23)$$

Equations rotoriques des tensions



$$\begin{cases} 0 = R_{r1} i_{r\alpha1} + L_{m1} \frac{di_{s\alpha1}}{dt} + L_{r1} \frac{di_{r\alpha1}}{dt} + \omega_{r1} (L_{m1} i_{s\beta1} + L_{r1} i_{r\beta1}) \\ 0 = R_{r1} i_{r\beta1} + L_{m1} \frac{di_{s\beta1}}{dt} + L_{r1} \frac{di_{r\beta1}}{dt} + \omega_{r1} (L_{m1} i_{s\alpha1} + L_{r1} i_{r\alpha1}) \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} 0 = R_{r2} i_{r\alpha2} + \sqrt{2} L_{m2} \frac{di_{sx1}}{dt} + L_{r2} \frac{di_{r\alpha2}}{dt} + \omega_{r2} (\sqrt{2} L_{m2} i_{sy1} + L_{r2} i_{r\beta2}) \\ 0 = R_{r2} i_{r\beta2} + \sqrt{2} L_{m2} \frac{di_{sy1}}{dt} + L_{r2} \frac{di_{r\beta2}}{dt} + \omega_{r2} (\sqrt{2} L_{m2} i_{sx1} + L_{r2} i_{r\alpha2}) \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} L_{s1} = L_{s1} + 3/2 L_{ms1} \\ M_1 = 3/\sqrt{2} L_{sr1} \\ L_{r1} = L_{r1} + 3/2 L_{mr1} \end{cases} ; \begin{cases} L_{s2} = L_{s2} + 3/2 L_{ms2} \\ M_2 = 3/\sqrt{2} L_{sr2} \\ L_{r2} = L_{r2} + 3/2 L_{mr2} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{sx} \\ v_{sy} \\ v_{so^+} \\ v_{so^-} \end{bmatrix} = [T_6] \begin{bmatrix} v_{as1} + v_{as2} \\ v_{bs1} + v_{bs2} \\ v_{cs1} + v_{cs2} \\ v_{ds1} + v_{as2} \\ v_{es1} + v_{bs2} \\ v_{fs1} + v_{cs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{sx1} + \sqrt{2} v_{s\alpha2} \\ v_{sy1} + \sqrt{2} v_{s\beta2} \\ v_{so^+} \\ v_{so^-} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_{s\alpha1} \\ i_{s\beta} = i_{s\beta1} \end{cases} ; \begin{cases} i_x = i_{sx1} = i_{s\alpha2} / \sqrt{2} \\ i_y = i_{sy1} = i_{s\beta2} / \sqrt{2} \end{cases} ; \begin{cases} i_{o^+} = i_{so^+1} \\ i_{o^-} = i_{so^-1} \end{cases} \quad (28)$$

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

$$\begin{cases} C_{em1} = P_1 M_1 (i_{rd1} i_{sq1} - i_{sd} i_{rq1}) \\ C_{em2} = P_2 M_2 (i_{rd2} i_{sy1} - i_{sx} i_{rq2}) \end{cases} \quad (29)$$

Les équations différentielles (10-13) montrent que les systèmes d'axes  $(\alpha, \beta)$  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  $v_{s\beta}$ , décrit les équations de la machine hexaphasée, alors que le système différentiel 11, qui fait intervenir les tensions d'onduleur  $v_{sx}$  et  $v_{sy}$ , décrit les équations de Concordia de la machine triphasée.

## 6. SIMULATION NUMERIQUE ET INTERPRETATION DES RESULTATS DU SMMCS

La simulation numérique est le meilleur moyen pour vérifier la validité du modèle obtenu et visualiser clairement le comportement de deux machines de SMMCS,

constitué par une machine hexaphasée reliée à une machine triphasée et alimentée par un onduleur de tensions hexaphasé. Une fréquence de 50 Hz est attribuée à la MAS-HP et 50 Hz à la MAS-TP.

En appliquant un couple résistant de valeur 39 N.m à la machine hexasphasée 1s et 2s (figure 3), nous remarquerons une légère diminution de la vitesse de rotation et une augmentation des courants statoriques.

Le couple électromagnétique augmente pour compenser le couple de charge et les pertes de frottement.

Il y va de même pour le flux rotorique. On constate une diminution de  $\Phi$  à l'instant de l'application de la charge, ce qui explique le couplage naturel existant entre le flux et le couple de la machine.

La figure 4 montre le découplage entre les deux machines lors d'un démarrage à vide suivi d'une application d'un couple résistant 4 N.m à la machina triphasée entre 1s et 2s. Ce couple compense instantanément la perturbation.

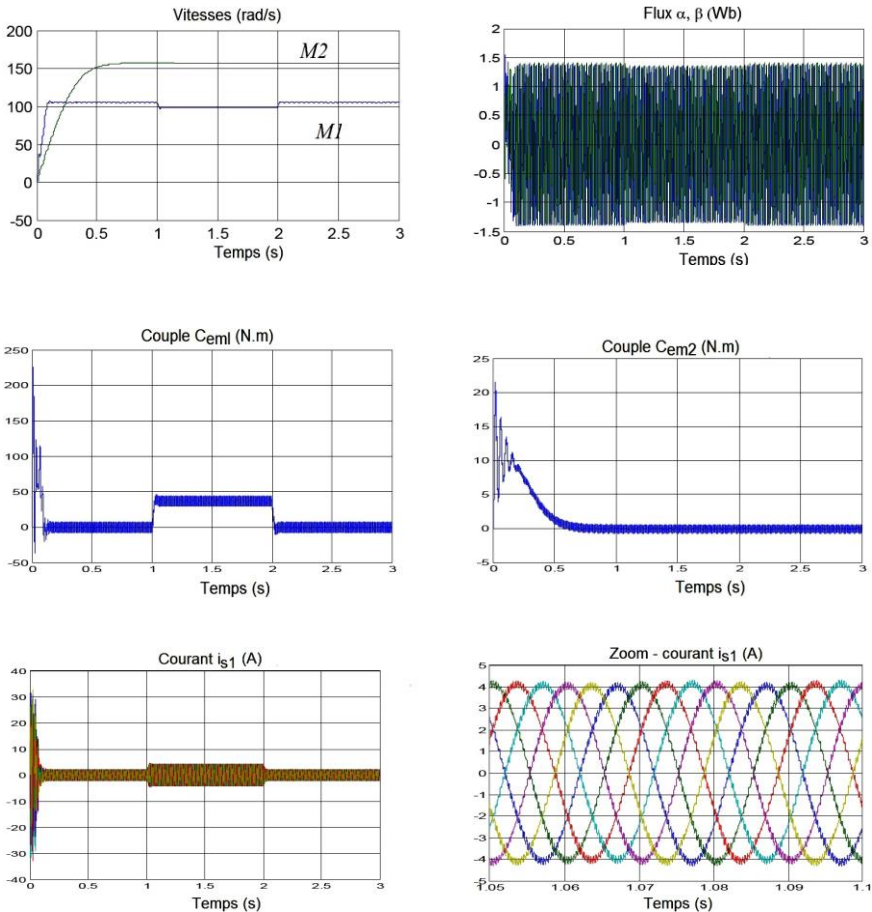


Fig. 3: Performances du SMMCS avec application d'un couple de charge sur la MAS-HP entre 1s et 2s

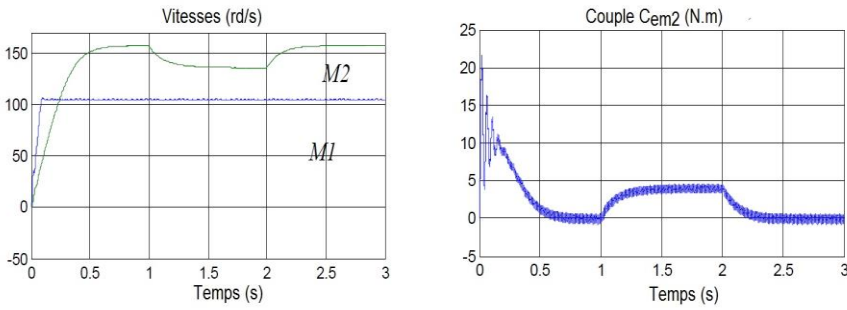


Fig. 4: Simulation du SMMCS avec application d'un couple de charge sur la MAS-TP entre 1s et 2s

## 7. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce travail, une étude détaillée des systèmes multi-machines connectés en série à nombre de phases pair et impair. Nous avons choisi parmi les systèmes multi-machines, un système constitué de deux machines asynchrones, la première est une machine hexaphasée de puissance et la seconde est une machine triphasée d'accessoires.

Le système multi machines choisi est modélisé tout en considérant que les stators de deux machines sont reliés en série selon une transposition de phases adéquate et qui est présentée en détail. Le traitement numérique de ce système multi-machines nous a conclu qu'il est possible pour certaine application industrielle de forte puissance de réaliser des actionneurs asynchrones formés par plusieurs moteurs connectés en série et alimentés par un seul convertisseur statique.

Les deux moteurs électriques entraînant deux charges mécaniques différentes. Cette configuration est très intéressante dans un système embarqué, en vu de la réduction du poids, de l'encombrement et de l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique.

Le principal avantage de ce type de système multi-machines réside dans sa commande. En disposant d'une seule carte de commande, on peut commander chaque moteur indépendamment des autres.

### PARAMETRES DES DEUX MACHINES

Machine hexaphasée-  $R_s = 2.3\Omega$  ;  $R_r = 3\Omega$  -  $L_s = L_r = 0.203H$  ;  $L_m = 0.2H$  -  
 $V_n = 220V$  ;  $I_n = 6A$  -  $J = 0.06kg.m^2$  ;  $P = 1$

Machine triphasée-  $R_{s2} = 4.67\Omega$  ;  $R_r = 8\Omega$  -  $L_{s2} = L_{r2} = 0.374H$  ; -  
 $L_{m2} = 0.2433H$   $V_{n2} = 220V$  ;  $I_{n2} = 3A$  -  $J_2 = 0.023kg.m^2$  ;  $P_2 = 3$

## REFERENCES

- [1] 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', IEE Proceedings- Electric Power Applications, Vol. 150, N°5, pp. 580 - 590, 2003.
- [2] E. Levi, M. Jones S.N. Vukosavic, and H.A. Toliyat, 'Operating principles of a novel multiphase multi-motor vector controlled drive', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, N°2, pp. 508 - 517, 2004.

- [3] E. Levi, M. Jones S.N. Vukosavic, and H.A. Toliyat, '*Operating principles of a novel multiphase multi-motor vector controlled drive*', IEEE. Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, N°2, pp. 508 - 517, 2004.
- [4] M. Jones S.N. Vukosavic, and E. Levi, '*Vector control schemes for series connected six-phase two-motor drive systems*', IEE Proceedings-Electric Application, Vol. 152, N°2, pp. 226 - 238, 2005.
- [5] M. Jones, S.N. Vukosavic, E. Levi and A. Iqbal, '*A six-phase series-connected two motor drive with decoupled dynamic control*', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, N°4, pp. 1056 - 1066, 2005.
- [6] M. Jones, S.N. Vukosavic, E. Levi and H.A. Toliyat, '*A five-phase two-machine vector controlled induction motor drive supplied from a single inverter*', European Power Electrics and Drives Journal, Vol. 14, N°3, pp. 38 - 48, 2004.
- [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] 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.
- [9] 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.