

- MODELISATION ET SIMULATION D'UNE COMMANDE DIRECTE DU COUPLE APPLIQUEE A LA MACHINE ASYNCHRONE (DTC)

H.YANTOUR, J.SAADI

Laboratoire d'automatique et de productique
E.N.S.E.M BP : 8118 oasis Casablanca
h_yantour@hotmail.com, janah1@iam.net.ma

A.KHOUMSI

Département de génie électrique
et de génie informatique
Université de Sherbrooke, Canada
Ahmed.khoumsi@USherbrooke.ca

RESUME : La commande directe du couple (en anglais, Direct Torque Control (DTC)) est une technique de plus en plus utilisée pour la commande de l'association onduleur de tension-machine asynchrone. Ce système peut être considéré comme un système dynamique hybride dont la composante continue est la machine asynchrone et la composante discrète, l'onduleur de tension. Dans cet article, nous proposons une modélisation de cet ensemble par un système à événements discrets pur décrit par un automate à états finis. Ce modèle est ensuite simulé sur Matlab/Simulink.

MOTS-CLES : commande directe de couple (DTC), machine asynchrone, modèle événementiel, système à événements discrets (SED), automate à états fini (AEF), commande supervisée de SED.

1. INTRODUCTION

Grâce à son faible coût et sa simplicité de construction, conjugués aux techniques de variation de vitesse, la machine asynchrone s'impose de plus en plus dans les domaines de l'entraînement à vitesse variable.

La technique de commande directe du couple (Direct Torque Control ou DTC) introduite en 1985 par TAKAHASHI [1, 2] utilise une approche séduisante de part son efficacité et sa simplicité de mise en œuvre. Plusieurs travaux ont permis une modélisation rigoureuse de cette approche [2, 12]. Cette technique permet de calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures de courants statoriques sans utilisation de capteurs mécaniques. Dans la structure DTC, la machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension est un système dynamique hybride, dont la partie continue est la machine asynchrone et la partie discrète, l'onduleur de tension.

Pour modéliser ce type de système, trois approches sont utilisées :

- *Approche événementielle [13]
- *Approche continue [14]
- *Approche mixte [14]

Approche événementielle : l'espace d'état de la partie continue est partitionné en régions séparées par des seuils, ce qui revient à approximer la partie continue par un système à événements discrets (SED) dont les événements correspondent aux franchissements des frontières des régions. Comme la partie discrète (c-à-d.-l'onduleur de tension) constitue en elle-même un SED, le système hybride dans son ensemble est approché par un SED. Le modèle couramment utilisé est l'automate à états finis (AEF).

Approche continue : le système hybride est approché par un modèle continu contenant des sauts qui correspondent aux discontinuités.

Approche mixte : les deux composantes, continues et discrète, sont prises en compte sans approche. Le modèle le plus utilisé est l'automate hybride.

Dans cet article, on adopte l'approche événementielle pour modéliser la commande DTC de la machine asynchrone. Les dynamiques continues sont approximées par un SED. L'ensemble *onduleur de tension -machine asynchrone* peut alors être approximé par un SED et modélisé par un automate à état fini (AEF). On peut alors lui appliquer la théorie de la commande supervisée des SED [3], dont l'objectif de base est de concevoir un contrôleur tel que le procédé couplé au contrôleur respecte un ensemble de spécifications logiques décrivant le fonctionnement du système global.

La commande supervisée des SEDs a subi un grand essor ces dernières années et a donné lieu à diverses extensions de la théorie de base [6].

Dans cette approche les grandeurs flux statorique et couple électromagnétique sont calculées uniquement à partir des seules grandeurs liées au stator sans l'intervention de capteur mécanique. De plus cette commande ne nécessite pas l'application d'une commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) sur l'onduleur, ce qui améliore nettement les performances dynamiques des grandeurs contrôlées. De même, il n'est pas nécessaire de connaître la position angulaire du rotor car seule la position du flux statorique est utilisée (zones) pour changer le vecteur tension à appliquer à la machine. La non nécessité du découplage des courants par rapport aux grandeurs de commande offre un avantage par rapport à la commande vectorielle classique.

Dans cet article, nous commençons par exposer dans la section 2 un rappel du principe de la DTC. La section 3 est consacrée à la modélisation événementielle de la machine asynchrone commandée par DTC. Dans la section 4, nous présentons une méthode de commande en boucle fermée fondée sur la théorie de la commande supervisée des SED. Les modèles obtenus ont été simulés à l'aide de Matlab/Simulink, et les résultats de cette simulation sont présentés dans la section 5, avant de conclure en section 6.

2. RAPPELS SUR LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE

2.1. Schéma de commande

Le contrôle dynamique du couple de la machine asynchrone peut être mis en évidence par le modèle vectoriel de la machine asynchrone.

Dans le référentiel (d,q) lié au stator, on peut écrire:

$$\text{Côté stator : } V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d}{dt} \phi_s \quad (2-a)$$

$$\text{Côté rotor : } V_r = 0 = R_r \cdot I_r + \frac{d}{dt} \phi_r - j\omega_r \cdot \phi_r \quad (2-b)$$

Avec:

d : axe direct dans le repère dq

q : axe en quadrature dans le repère dq

V_s : tension statorique

V_r : tension rotorique

R_s : résistance statorique

I_s : courant statorique

ϕ_s : flux statorique

dq : système diphasé produisant le même champ magnétique dans l'entrefer que le système triphasé.

Le vecteur tension V_s délivré par un onduleur de tension triphasé [figure 1] est représenté en théorie par 3 grandeurs booléennes de commande S_j ($j = a, b, c$) telles que :

$S_{j(j=a, b, c)} = 1$: interrupteur Haut Fermé et interrupteur Bas Ouvert.

$S_{j(j=a, b, c)} = 0$: interrupteur Haut Ouvert et interrupteur Bas Fermé.

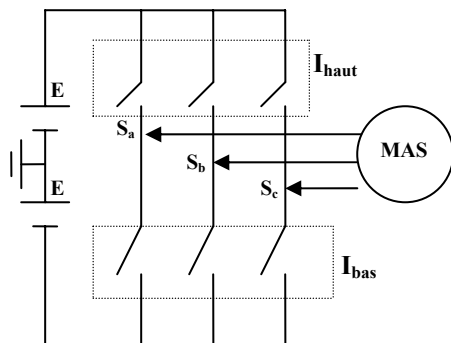


Figure 1 : Machine asynchrone commandée

par l'onduleur de tension

I_{haut} : Interrupteur haut I_{bas} : Interrupteur bas

Le vecteur tension V_s peut s'écrire sous la forme :

$$V_s = \sqrt{2/3} \cdot U_o [S_a + S_b \cdot e^{j2\pi/3} + S_c \cdot e^{j4\pi/3}] \quad (2.c)$$

Les combinaisons des 3 grandeurs ($S_a S_b S_c$) permettent de générer 8 positions du vecteur V_s dont 2 correspondent au vecteur nul : ($S_a S_b S_c$) = (000) ou (111) comme le montre la figure 2.

2.2 Contrôle du flux statorique et du couple électromagnétique

A partir de l'expression (2.a), on peut écrire :

$$\phi_s = \phi_{s0} + V_s \cdot t - R_s \int I_s dt$$

Avec l'hypothèse que R_s reste constante et que le terme ($R_s \cdot I_s$) est négligeable devant la tension V_s . Dans un intervalle de temps T_e , l'extrémité du vecteur ϕ_s se déplace sur une droite dont la direction est donnée par V_s [figure 2].

En choisissant une séquence correcte de vecteurs V_s sur des intervalles de temps successifs de durée T_e , on peut faire suivre à l'extrémité du vecteur ϕ_s la trajectoire désirée. Pour atteindre cet objectif, le correcteur utilisé pour la commande DTC est un correcteur à hystérésis à deux niveaux. Avec ce type de contrôleur, on peut facilement maintenir l'extrémité du vecteur flux ϕ_s dans une couronne quasi circulaire.

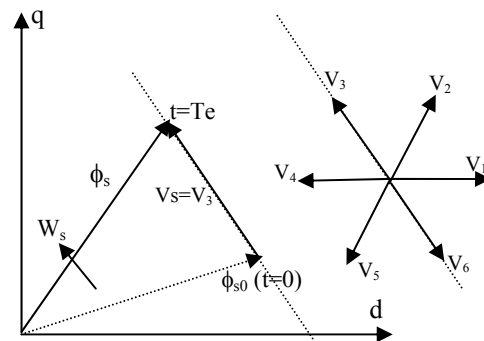


Figure 2 : Évolution de l'extrémité du vecteur ϕ_s

Les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur flux ϕ_s . Le tableau 1 montre l'évolution des deux grandeurs flux et couple pour chacun des quatre vecteurs V_{i+1} , V_{i+2} , V_{i-1} , V_{i-2} qu'on peut appliquer dans la zone Z_i . Les vecteurs tension à appliquer dépendent de la zone où se trouve le vecteur flux. Les paramètres Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 (figure 3) représentent les six zones possibles du fonctionnement.

pendent de la zone où se trouve le vecteur flux. Les paramètres Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 (figure 3) représentent les six zones possibles du fonctionnement.

Vecteur V_k	V_{i+1}	V_{i+2}	V_{i-1}	V_{i-2}
ϕ_s				
T_e				

Tableau 1 : Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur V_k appliqué dans la zone Z_i . $k=(i-1, i-2, i+1, i+2)$

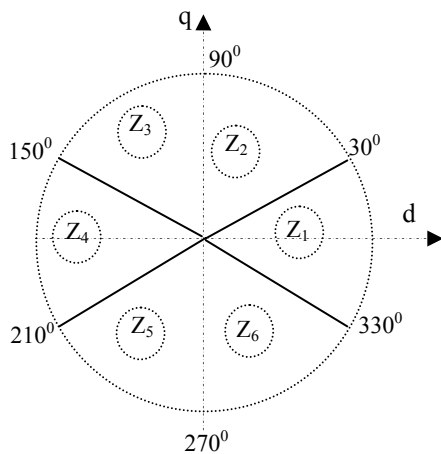


Figure 3 . Répartition des zones

3. MODELISATION EVENEMENTIELLE DE LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE

3.1. Approximation événementielle

Dans cette approche nous approximations l'évolution continue de la machine asynchrone par une évolution événementielle, grâce à une partition de l'espace d'état. Le système hybride dans son ensemble est alors approché par un SED et peut donc être modélisé par un automate à états finis (AEF).

L'avantage de cette approche événementielle est que l'on peut contrôler notre procédé en utilisant la commande supervisée des SED [3], dont le principe de base consiste à concevoir un contrôleur (appelé aussi superviseur) qui, en interagissant avec le procédé, force celui-ci à respecter une spécification décrivant le fonctionnement désiré du système global. La commande DTC correspond parfaitement à ce schéma.

3.2. Partition de l'espace d'état

3.2.1 Partition selon le flux et le couple

Pour maintenir l'extrémité du vecteur flux statorique dans une couronne circulaire, on utilise un comparateur à hystérésis à deux niveaux. Les deux seuils du comparateur sont choisis suivant l'ondulation tolérée sur

le flux statorique (largeur de l'hystérésis = $\Delta\phi_s=(\phi_{smax}-\phi_{smin})$). Le flux statorique peut être dans l'une des trois régions suivantes :

Région f1 : $\phi_s < \phi_{smin}$

Région f2 : $\phi_{smin} < \phi_s < \phi_{smax}$

Région f3 : $\phi_s > \phi_{smax}$

Pour le contrôle du couple, on utilise aussi un comparateur à deux niveaux (un seul sens de rotation de la machine asynchrone), la largeur de l'hystérésis correspond à l'ondulation sur le couple. On obtient trois régions pour le couple.

Région c1 : $T_e < T_{emin}$

Région c2 : $T_{emin} < T_e < T_{emax}$

Région c3 : $T_e > T_{emax}$

L'évolution des deux grandeurs flux et couple détermine donc 9 régions fi-cj (pour i, j = 1 à 3) que nous désignerons par R_0, R_1, \dots, R_8 (voir la figure 4). Le franchissement des seuils de l'hystérésis permet de générer des événements qu'on définit de la façon suivante :

σ_1^+, σ_2^+ : événements générés lorsque le flux statorique dépasse respectivement ϕ_{smin} et ϕ_{smax} .

σ_1^-, σ_2^- : événements générés lorsque le flux statorique devient inférieur à, respectivement ϕ_{smin} et ϕ_{smax} .

σ_3^+, σ_4^+ : événements générés lorsque le couple électromagnétique T_e dépasse respectivement T_{emin} et T_{emax} .

σ_3^-, σ_4^- : événements générés lorsque le couple électromagnétique T_e devient inférieur à, respectivement T_{emin} et T_{emax} .

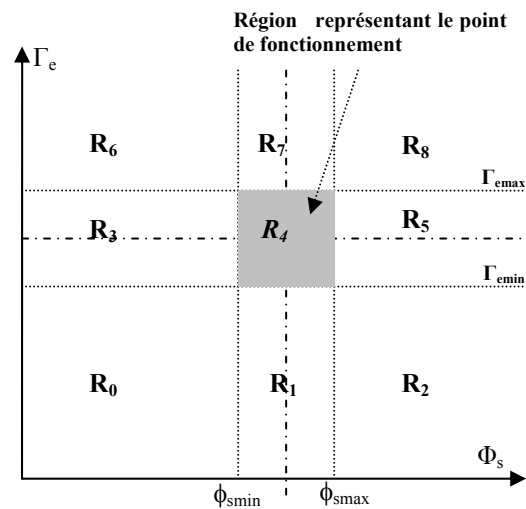


Figure 4. Découpage de l'espace d'état continu

3.2.2 Partition selon le vecteur de commande

D'après l'équation (2.c) la tension appliquée à la machine asynchrone est un signal constant par morceau à huit valeurs possibles (chaque valeur correspond à une combinaison des variables S_c, S_b, S_a). Le sens d'évolution du flux statorique est donné par la direction du vecteur V_s [figure 5]. Le choix de ce vecteur dépend de la position angulaire du flux statorique [figure 5], le vecteur OA représente le flux ϕ_s à un instant donné dans

la zone z_1 , l'application du vecteur V_2 permet l'évolution de l'extrémité du flux suivant la direction du vecteur V_2 [figure 5], ce qui donne le vecteur flux **OB**. L'application du vecteur V_6 permet un changement de sens de rotation de la machine asynchrone (sens 2).

Le vecteur appliqué et la position angulaire du flux détermine un état de la machine, on a alors pour un fonctionnement libre $6 \times 8 = 48$ états qui correspondent à 8 vecteurs de tension et 6 zones.

Les six vecteurs de tensions non nuls sont espacés de 60° . On définit la zone comme étant l'espace angulaire de 60° contenant en son centre chacun des vecteurs non nuls (30° avant et 30° après), le nombre de zone est alors donné par le nombre de vecteurs non nuls qui est de six

Le passage d'une zone à l'autre permet de générer un événement qu'on définit de la façon suivante: la transition de la zone i vers la zone $(i+1)$ génère l'événement δ_i , les six événements étant générés séquentiellement.

L'application d'une tension d'entrée V_j à la place d'une tension V_i est caractérisée par la génération d'un événement α_j . Donc huit événements α_j ($j=1$ à 8) peuvent être générés.

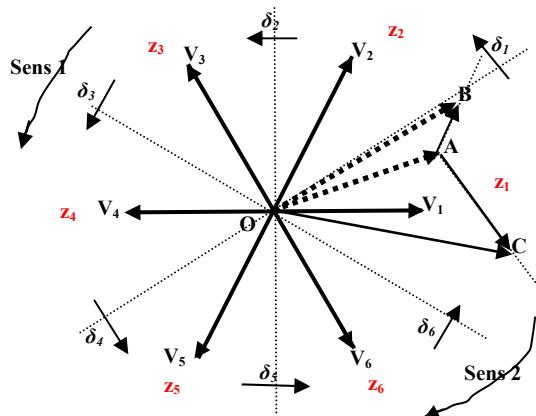


Figure 5. Evolution du flux dans la zone z_1 pour deux vecteurs différents

Sur la figure 5, **Sens 1** et **Sens 2** indiquent le sens de rotation de la machine asynchrone

3.3 MODELISATION DU PROCÉDÉ PAR UN AEF

L'ensemble {onduleur de tension, machine asynchrone, comparateur à hystérésis} peut être modélisé par un automate à état fini (AEF) où chaque état est défini par :

- une région parmi 9 (section 3.2.1),
- un vecteur d'entrée parmi 8 (section 3.2.2), et
- une zone parmi 6 (section 3.2.2).

Le nombre total d'états de l'AEF est donc égal à $9 \times 8 \times 6 = 432$. Cet AEF est formellement défini par $A = (E, \Sigma, e_o, \mathcal{L}, E_m)$ où :

E : Ensemble des états de l'AEF

E_m : ensemble d'états marqués

Σ : Ensemble des événements pouvant être générés

e_o : état initial

\mathcal{L} : fonction de transition $E \times \Sigma \rightarrow E$ avec :

$$E = (E_{ijk}) [i=0 \dots 8 ; j=1 \dots 6 ; k=0 \dots 7]$$

i : indique la région (9 régions)

j : indique la zone (6 zones)

k : indique le vecteur d'entrée (8 vecteurs)

$$\Sigma = \{ \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \sigma_1^+, \sigma_1^-, \sigma_2^+, \sigma_2^-, \sigma_3^+, \sigma_3^-, \sigma_4^+, \sigma_4^-, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7 \}$$

e_o : E_{010} (région E_0 , zone 1, vecteur v_0)

Initialement le flux et le couple se trouvent dans la région R_0 et la zone z_1 .

$E_m = \{E_{4jk}\}$ (région 4).

L'état marqué représente l'état objectif et correspond à la région R_4 . En effet, à partir de n'importe quel état de départ, le point de fonctionnement doit aboutir à cette région dans laquelle ($\phi_{smin} < \phi_s < \phi_{smax}$ et $T_{emin} < T_c < T_{emax}$). En régime permanent, si le point de fonctionnement tente de quitter cette région, le superviseur réagit (aux événements qui apparaissent en sortie du procédé) et applique une commande via l'onduleur de tension pour ramener le système à nouveau dans la région R_4 .

Le langage de l'AEF A , noté $L(A)$, est constitué par l'ensemble des séquences d'événements acceptées par A . Nous définissons aussi le langage marqué de A , noté $L_m(A)$, constitué des chaînes de $L(A)$ qui atteignent un état marqué.

Pour des raisons de clarté, nous ne représentons pas l'AEF de 432 états sur une seule figure. Au lieu de cela, nous le représentons d'une manière hiérarchique sur trois niveaux. La figure 6, qui correspond au premier niveau, représente un AEF à 9 états correspondant aux 9 régions définies dans la section 3.2.1. Chacun des 9 états est en fait un méta-état regroupant $48 = 8 \times 6$ états (définis dans la section 3.2.2).

Ensuite, la figure 7 correspond au second niveau qui représente la structure d'un méta-état constitué de 6 états correspondant aux 6 zones définies dans la section 3.2.2. Chacun des 6 états est en fait un super-état regroupant 8 états correspondant aux 8 vecteurs de tension (définis dans la section 3.2.2). Notons que c'est le méta-état E_{0ij} de la figure 6 (correspondant à la région 0) qui est représenté sur la figure 7, où les événements σ_1^+, σ_1^- permettent les transitions de la région R_0 vers R_1 et inversement.

Et enfin, la figure 8 correspond au troisième niveau et représente la structure d'un super-état constitué de 8 états correspondant aux 8 vecteurs de tension. Notons que c'est le super-état E_{01i} (correspondant à la région 0 et à la zone 1) de la figure 7 qui est représenté sur la figure 8. Notons que toutes les transitions menant à un même état correspondent à un même événement.

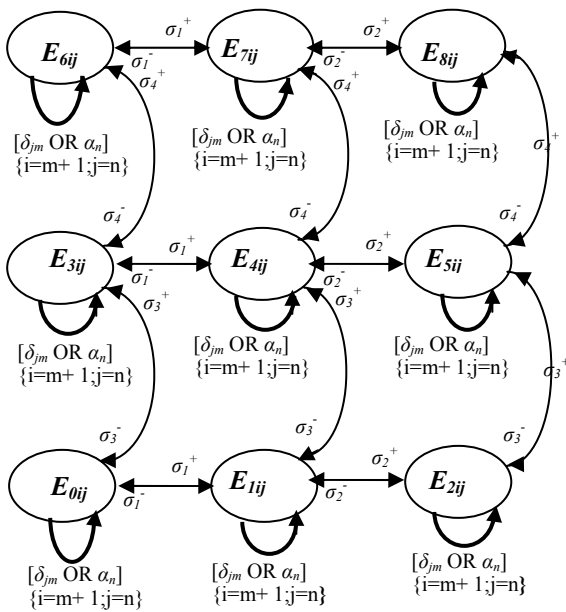


Figure 6. Premier niveau hiérarchique : AEF constitué de 9 méta-états.

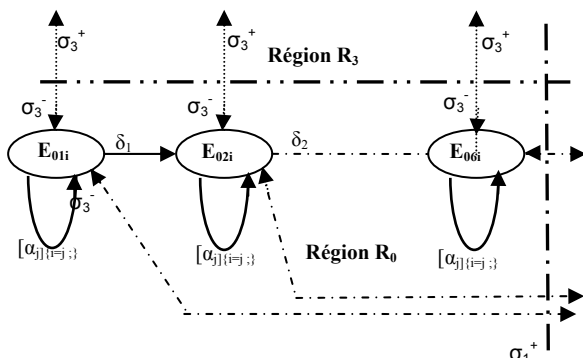


Figure 7. Second niveau hiérarchique : méta-état (E_{0ij}) constitué de 6 super-états.

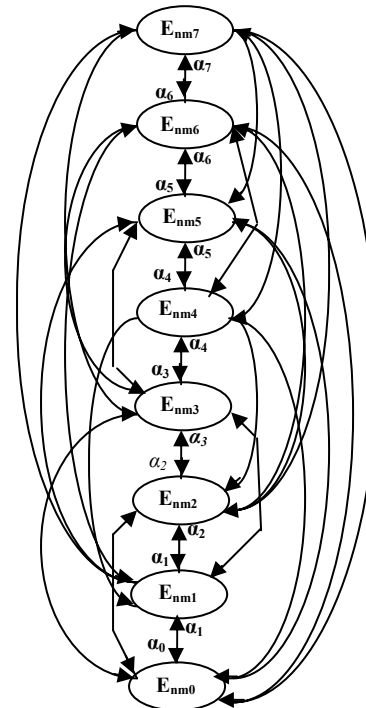


Figure 8. Troisième niveau hiérarchique : super-état (E_{0li}) constitué de 8 états .

La figure 8 est une représentation détaillée de super-état (E_{nmi}), pour une position du flux dans la région R_n et la zone z_m et pour un fonctionnement libre (huit vecteurs tensions sont possibles V_i).

Notons que toutes les transitions menant à un même état correspondent à un même événement.

3.4. ARCHITECTURE ASSOCIEE AU MODELE EVENEMENTIEL

La modélisation du procédé {ensemble machine asynchrone, actionneur et générateur} par un AEF nécessite l'utilisation de deux interfaces amont et aval de la machine asynchrone, comme le montre la figure 9 dans laquelle :

MAS : machine asynchrone.

A onduleur de tension : il fournit à la machine asynchrone la tension V_{sabc} , et reçoit les commandes des interrupteurs.

G génère les événements :

- σ_i ($i=1, \dots, 4$) [section 3.2.1]
- δ_i ($i=1, \dots, 6$) événement généré lors de changement de zone [section 3.2.2].

G reçoit aussi de MAS les grandeurs flux et couple instantanées.

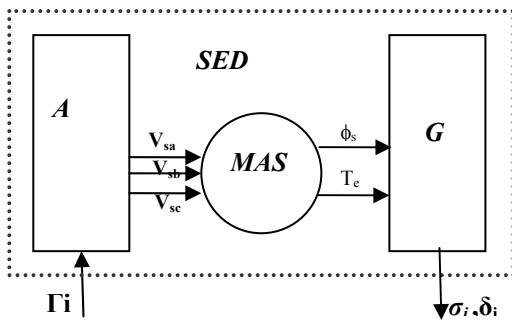


Figure 9. Architecture associée au modèle événementiel

4. COMMANDE SUPERVISEE

L'objectif de la commande supervisée est de concevoir un superviseur *Sup* qui interagit avec un SED (que nous appellerons *procédé*) décrit par un AEF *P* afin de le contraindre à respecter une spécification décrite par un AEF *S* [3]. Désignons par *Sup/P* le comportement du procédé sous supervision de *Sup*. Celui-ci observe l'évolution de *P* (c-à-d. en observant les événements exécutés par *P*), et n'autorise que les séquences d'événements acceptées par *S*. Comme *Sup* doit interdire des événements, on a introduit le concept d'événements *contrôlables*, ce qui signifie que *Sup* a la capacité de les interdire; autrement l'événement est qualifié d'incontrôlable [3]. Une méthode a été proposée afin de synthétiser automatiquement *Sup* à partir de *P* et *S* [3].

Dans notre cas, *P* est l'AEF à 432 états décrit dans la section 3.3 et modélise le SED de la figure 9. La commande supervisée de *P* (SED1) à l'aide d'un superviseur (SED2) est illustrée par la figure 10 : le superviseur observe les événements σ_i, δ_i et fournit au procédé une commande parmi les commandes autorisées de Γ_i .

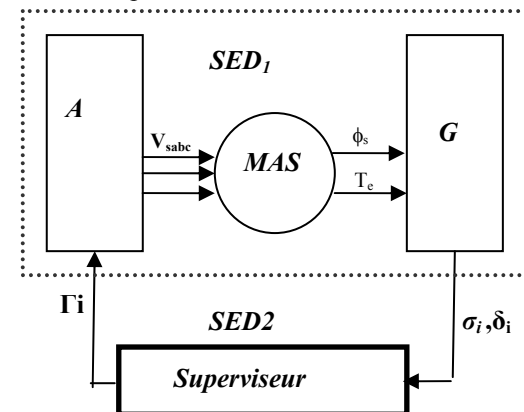


Figure 10. Commande supervisée fondée sur l'architecture de la figure 9

4.1 SPECIFICATION DU FONCTIONNEMENT DESIRE

A partir de l'état initial { Région R_0 , zone z_1 , vecteur V_2 }, le point de fonctionnement doit évoluer vers un état tel que :

$$\begin{aligned} \phi_{smin} < \phi_s < \phi_{smax} \\ T_{emin} < T_e < T_{emax} \end{aligned}$$

Dans une région R_i quelconque, le flux peut être dans l'une des six zones, et le vecteur à appliquer doit être choisi de telle sorte à amener le point de fonctionnement vers la région R_4 [figure 11].

Le nombre d'états de l'AEF modélisant la spécification est donné par $9 \times 6 = 54$ états, avec :

9 : nombre de région

6 : nombre de zone dans chaque région

Dans la région R_0 , on a six zones possibles, dans chacune des zones un seul vecteur est appliqué pour augmenter le flux et le couple, de même pour les régions R_1, R_3 et R_4 .

Dans les régions R_2 et R_5 , les vecteurs appliqués doivent diminuer le flux et augmenter le couple.

Pour les autres régions, c'est le vecteur nul qui est appliqué pour diminuer le couple.

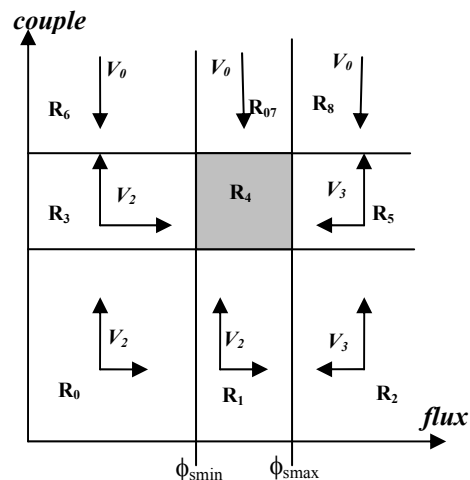


Figure 11. Les vecteurs qu'on doit appliquer et l'évolution des deux grandeurs flux et couple dans la zone 1.

Les automates des figures 12 et 13 décrivent la spécification.

4.2. CALCUL DU SUPERVISEUR

Rappelons que le superviseur *Sup* peut être synthétisé automatiquement à partir de *P* (SED à commander) et *S* (spécification à respecter) [3]. Nous pouvons donc synthétiser notre superviseur à partir des AEFs décrits dans la section 3.3 (pour *P*) et la section 4.1 (pour *S*).

L'algorithme de Kumar, utilisé pour la synthèse de superviseur permet d'obtenir l'AEF de la figure 14.

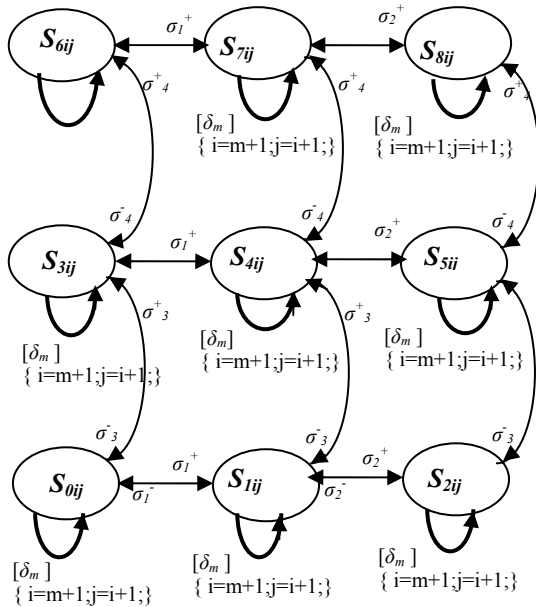


Figure 12. Spécification : AEF constitué de 9 méta-états.

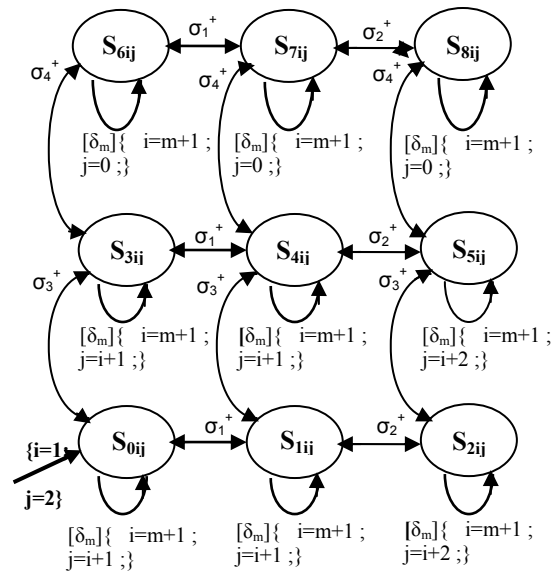


Figure 14. Automate (AEF) représentant le superviseur. Pour ne pas encombrer le schéma, les transitions entre les états sont étiquetées par les événements positifs seulement (σ_1^+ , σ_3^+ , σ_2^+ , σ_4^+)

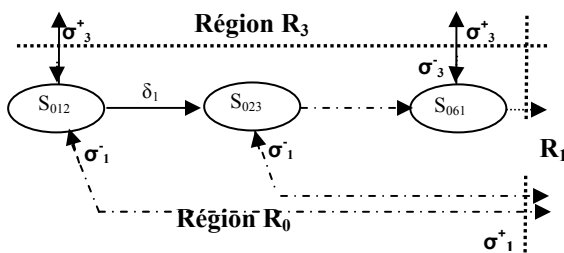


Figure 13. Spécification : méta-état S_{0ij} (correspondant à un fonctionnement dans la région R_0) constitué de 6 états. Les événements σ_1^+ et σ_3^+ permettent de sortir de la région R_0 .

A partir de l'état S_{0ij} le superviseur impose à l'onduleur une commande telles que les grandeurs flux et couple augmentent. Le vecteur appliqué dépendra de la position angulaire du flux donc des zones.

Les séquences des événements générés par le superviseur permettent de mener le point de fonctionnement depuis l'origine jusqu'à la région R_4 , comme le montre la figure 17. (zones bleues)

Dans les états S_{6ij} , S_{7ij} et S_{8ij} le superviseur envoie à l'onduleur des commandes correspondant au vecteur nul pour diminuer le couple.

5. RESULTATS DE SIMULATION

5.1. Evolution de flux et du couple

Les figures 15 et 16 représentent respectivement une simulation de l'évolution du couple et du flux pour des consignes données. On retrouve les deux régimes transitoire et permanent.

Dans le régime transitoire, les variations du couple sont moins rapides que celles du flux, la tangente à l'origine est nulle pour le couple et elle est non nulle pour le flux .

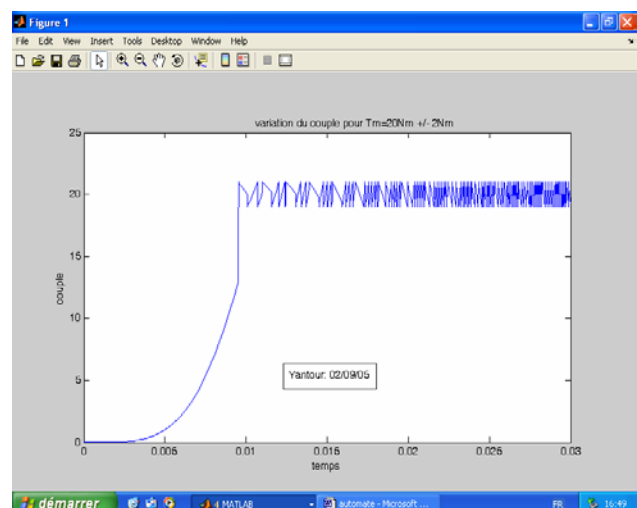


Figure 15 . Evolution du couple en fonction du temps pour une consigne : $T_m=20Nm$

Lorsque le régime permanent est atteint (Région 4), les variations du couple et de flux sont limitées par les com-

parateurs à hystérésis. Avec ces seuils fixes, l'ondulation sur le flux ou sur le couple ne dépend pas de la consigne, donc l'erreur relative sur le couple et sur le flux augmente lorsque les consignes diminuent.

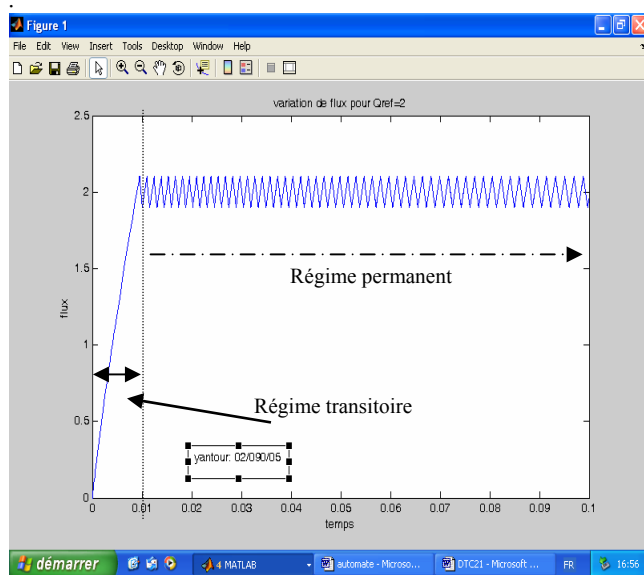


Figure 16 . Evolution de flux en fonction du temps pour une consigne : $\phi_{s0}=2\text{wb}$.

5.2. Evolution de flux et du couple.

Dans la figure 17, on retrouve la trajectoire empruntée par le point de fonctionnement en régimes transitoire et permanent. À cause des variations rapides de flux par rapport au couple, cette trajectoire passe par les régions R_0, R_1, R_2, R_5 et aboutit à la région R_4 (début du régime permanent).

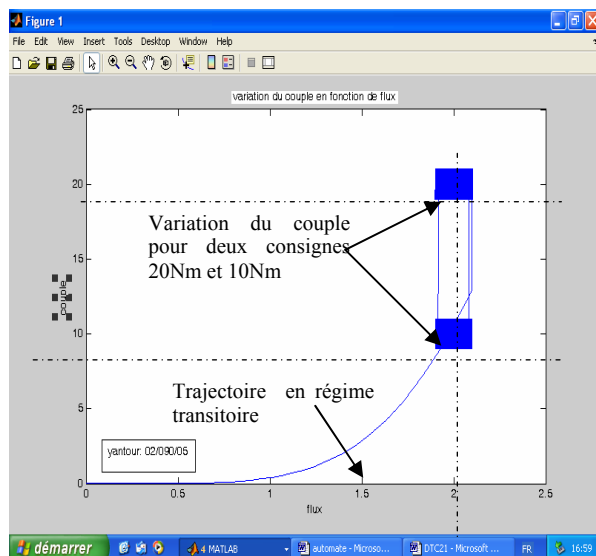


Figure 17. Evolution du couple en fonction du flux
 En régime permanent, le point de fonctionnement varie entre les régions R_3 et R_5 pour le flux et entre R_2 et R_7 pour le couple comme le montre la figure 17.

Dans la figure 18, on représente l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps en régime transitoire, en régime permanent et pour un changement de consigne. on constate que le couple rattrape rapidement la nouvelle consigne et avec la même ondulation.

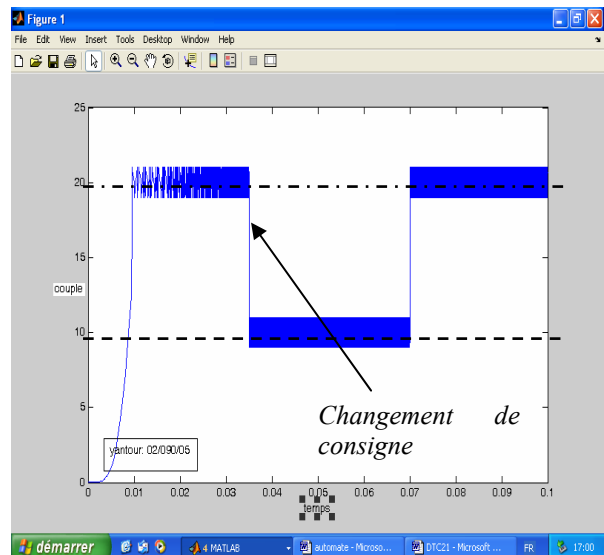


Figure 18. Changement de consigne et évolution du couple en fonction du temps

6. CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons proposé une approche événementielle de modélisation d'une machine asynchrone commandée par DTC. Nous avons aussi proposé une méthode de commande en boucle fermée fondée sur la théorie de la commande supervisée des SED. Une simulation sur Matlab/Simulink a permis d'illustrer nos résultats montrant ainsi le bien fondé de notre approche.

Dans cette approche, les grandeurs flux statorique et couple électromagnétique sont calculées uniquement à partir des seules grandeurs liées au stator sans l'intervention de capteur mécanique. De plus, cette commande ne nécessite pas l'application d'une commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) sur l'onduleur, ce qui améliore nettement les performances dynamiques des grandeurs contrôlées. De même, il n'est pas nécessaire de connaître la position angulaire du rotor car seule la position du flux statorique est utilisée (zones) pour changer le vecteur tension à appliquer à la machine. Le non découplage des courants par rapport aux grandeurs de commande offre un avantage par rapport à la commande vectorielle.

Avec une commande à seuils fixes, l'erreur relative sur le couple augmente lorsque la consigne diminue ce qui constitue un inconvénient de cette approche.

Dans un proche avenir, nous comptons améliorer la stratégie de commande en utilisant des seuils de commutation adaptatifs permettant d'améliorer la dynamique et la rejection de perturbation.

Références

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, “A new quick response and high efficiency control strategy of induction motor”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, IE-22, Sept./Oct. 1986.
- [2] I. Takahashi and S. Asakawa, “Ultra-wide speed control of induction motor covered 10A6 range”, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, IA-25: 227-232, 1987.
- [3] P. Ramadge and M. Wonham, “The control of discrete event systems”, *Proceedings of the IEEE*, 77(1), January 1989.
- [4] J.-L. Ferrier, “Commande par supervision: outils et synthèse”, http://www.istia.univ-angers.fr/~ferrier/Commande_par_supervision.pdf
- [5] S. Abdelwahed, “Interacting discrete event systems: Modelling, Verification, and Supervisory Control”, *PhD thesis*, University of Toronto, 2002.
- [6] B. Gaudin and Marchand, “Modular supervisory control of a class of concurrent discrete event systems”, *Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*, Reims, France, Sept. 2004.
- [6] R. Kumar, “Supervisory synthesis techniques for discrete event dynamical systems: transition model based approach”, *PhD thesis*, University of Texas at Austin, 1991.
- [7] Y. Li, “Control of vector discrete-event systems”, *PhD thesis*, University of Toronto, 1991
- [8] Marchand and B. Gaudin, “Supervisory control problems of hierarchical finite state machines”, *Conference on Decision and Control*, Las Vegas, USA, Dec. 2002.
- [9] F. Lin and M. Wonham “On observability of discrete-event systems”, *Inf. Sci.*, 44(3): 173-198, 1988.
- [10] R. j. Leduc, “Hierarchical interface-based supervisory control”, *PhD thesis*, University of Toronto, 2002.
- [11] Y. Brave and M. Heymann “Control of discrete event systems modelled as hierarchical state machines”, *Conference on Decision and Control*, Brighton, England, 1991.
- [12] T. G. Habetler and D. M. Divan, “Control strategies for direct torque control using discrete pulse modulation”, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, IA-27(5): 893-901, 1991.
- [13] P. J. Antsaklis, J. A. Stiver, and M. Lemmon, “Hybrid system modelling and autonomous control systems”, *Hybrid Systems LNCS 736*, 1993.
- [14] M. S. Braniky, “Studies in hybrid systems: modeling, analysis, an