



Contrôle Direct de Couple (DTC) de La Machine à Induction

Zekkour Abdelhamid⁽¹⁾, Abdessemed Djallal⁽²⁾, and Naceri Farid⁽³⁾

⁽¹⁾Université de Batna
 ⁽²⁾Université de Ouargla
 ⁽³⁾Université de Batna
 Zekkour_abdelhamid@outlook.com, abdessemed_djallal@yahoo.fr

Résumé— Le contrôle direct de couple (DTC) présente des avantages bien connus par rapport aux techniques conventionnelles, notamment la réduction du temps de réponse de couple [3], [4] et sa robustesse par rapport aux variations paramétriques.

Dans cette étude, nous présenterons les concepts de bases du contrôle direct de couple et l'application de cette méthode à la machine à induction.

Des résultats de simulation de la machine à induction soumis à des différents tests en guise d'évaluer les performances de cette technique de contrôle.

Key-Words-Machine à induction, Modélisation, DTC.

I. INTRODUCTION

Les méthodes de contrôle direct du couple (*DTC*) des machines asynchrones sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980, introduite par *I. TAKAHASHI* et *M. DEPENBROCK*, comme concurrentielles des méthodes classiques [1]. Ensuite plusieurs travaux sont multipliés sur ce sujet faisant développer diverses stratégies de commandes.

Cette technique permet de calculer les grandeurs de contrôle, le flux stator et le couple électromagnétique à partir des grandeurs accessibles à la mesure sans recours aux capteurs dédiés, et d'imposer directement l'amplitude des ondulations de ces grandeurs. Les méthodes de contrôle direct du couple (*DTC*) consistent à commander directement la fermeture et l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur selon l'évolution des valeurs du flux stator et du couple électromagnétique de la machine. L'application de la commande aux interrupteurs a pour but d'orienter le vecteur flux électromagnétique selon une direction déterminée.

II. MODELESATION DU MOTEUR A INDUCTION

Le moteur est modelé par ses équations des tensions dans le repère (Γ, S) lié au stator [1], [2]:

$$v_{s} = R_{s}i_{s} + \frac{dW_{s}}{dt}$$
(1)

$$v_r = 0 = R_r i_r + \frac{dW_r}{dt} - j\breve{S}W_r$$
(2)

Avec:

 $v_{s} = [v_{sr}, v_{ss}]^{T}$ Est le vecteur tension statorique $W_{s} = [W_{sr}, W_{ss}]^{T}$ Est le vecteur flux statorique $i_{s} = [i_{sr}, i_{ss}]^{T}$ Est le vecteur courant statorique $W_{r} = [W_{rr}, W_{rs}]^{T}$ Est le vecteur flux rotorique $i_{r} = [i_{rr}, i_{rs}]^{T}$ Est le vecteur courant rotorique S : Est la vitesse électrique du rotor.

 R_{a} : Est la résistance d'un enroulement statorique

 R_r : Est la résistance d'un enroulement rotorique Les flux statorique et rotorique sont exprimés par:

$$W_{s} = L_{s}i_{s} + Mi_{r} \tag{3}$$

$$W_r = L_r i_r + M i_s \tag{4}$$

 L_{s} : Est l'inductance cyclique propre du stator

 L_{x} : Est l'inductance cyclique propre du rotor

M: Est l'inductance cyclique mutuelle stator-rotor

III. PRINCIPE DE CONTROLE DIRECT DU COUPLE

Le contrôle direct de couple (*DTC*) d'une machine à induction, est basé sur la détermination de la séquence de commande à appliquer aux interrupteurs de l'onduleur de tension à chaque instant de commutation [1]. Pour chacune des grandeurs contrôlées, flux stator et couple électromagnétique, on définit une ou plusieurs bandes ; La valeur estimée de chaque grandeur est comparée avec une valeur de référence à l'aide d'un régulateur à hystérésis. La séquence de commande est choisie selon le signal de sortie du régulateur à hystérésis du couple électromagnétique, le signal de sortie du régulateur à hystérésis du flux stator et Le signal informant sur la position du vecteur flux stator.

L'objectif de ce choix est de déterminer le vecteur de tension optimal pour le contrôle de l'amplitude du flux et du couple, et les maintenir dans leurs bandes d'hystérésis.



IV. CONTROLE DU FLUX ET DE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

A. Contrôle du flux stqtoriaue

Le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux statorique ; De l'équation (1) on déduit l'expression du flux statorique dans le référentiel (Γ , S) lié au stator de la machine, et est donnée par l'équation suivante[1], [5]:

$$\overline{W}_{s}(t) = \int_{0}^{t} (\overline{V}_{s} - R_{s}\overline{i}_{s})dt + \overline{W}_{s}(0)$$
(5)

Pendant une période d'échantillonnage T_e , soit un intervalle de temps $\left[0, T_e\right]$ durant lequel on applique un vecteur de tension non nul à la machine, en négligeant la chute de tension due à la résistance statorique ($R_s i_s << v_s$) par conséquent l'équation (5) devient :

$$U\overline{W}_{s} = \overline{W}_{s}(t) - \overline{W}_{s}(0) = \overline{v}_{s}T_{e}$$
(6)

L'équation (6) est illustrée à la Fig. 1, l'extrémité du vecteur flux statorique $\overline{\phi}_s(t)$ se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliqué \overline{v}_s .

Le choix de la séquence adéquate des vecteurs \overline{v}_s durant chaque période d'échantillonnage, permet de garder l'amplitude de $\overline{\varphi}_s$ autour d'une valeur constante, et l'extrémité du vecteur $\overline{\varphi}_s$ aura une trajectoire pseudo circulaire, à conditions que la période d'échantillonnage T_e soit très faible devant celle du flux statorique.



Fig. 1 Evolution du verteur flux stater

B. Contrôle du couple électromagnétique

Le modèle de la machine dans le référentiel (,) est donné par les équations (1), (2), (3) et (4), à partir des équations (3) et (4) on déduit l'expression du courant \dot{i}_r :

$$\overline{i}_r = \frac{1}{\dagger} \left(\frac{\overline{W}_r}{L_r} - \frac{M}{L_r L_s} \overline{W}_s \right)$$
(7)

Et à partir des équations (2) et (7) on déduit

$$\frac{d\overline{W}_{r}}{dt} + \left(\frac{1}{\dagger T_{r}} - j\breve{S}\right)\overline{W}_{r} = \frac{M}{L_{s}}\frac{1}{\dagger T_{r}}\overline{W}_{s}$$
(8)
Avec:

 $\dagger = I - \frac{M^2}{L_s L_r}$ Étant le coefficient de dispersion.

 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ Est la constante de temps rotorique de la machine. L'équation (1) montre qu'il est possible de contrôler le vecteur $\overline{\phi}_s$ à partir du vecteur $\overline{\nabla}_s$ à la chute de tension $R_s \overline{i}_s$ près ; et l'équation (8) montre que Le flux $\overline{\phi}_r$ suit les variations de $\overline{\phi}_s$ avec une constante de temps σT_r qui détermine aussi la rapidité de variation de l'angle sr entre les deux flux statorique et rotorique; Le rotor agit comme un filtre de constante de temps σT_r entre les flux $\overline{\phi}_s$ et $\overline{\phi}_r$.

En posant $\mathbf{W}_{sr} = (\mathbf{W}_{s}\mathbf{W}_{r})$ l'angle entres les vecteurs flux, le couple s'exprime par :

$$\boldsymbol{C}_{e} = p \, \frac{L_{m}}{\dagger \, L_{s} L_{r}} \boldsymbol{W}_{s} \boldsymbol{W}_{r} \, sin_{sr} \tag{9}$$

Les équations (1), (8), et (9) montrent que:

Le couple dépend des amplitudes des deux vecteurs ϕ_s et ϕ_r , et de leur position relative ; Si l'on parvient à contrôler le vecteur de flux $\overline{\phi}_s$ en module et en position, on peut donc contrôler $\overline{\phi}_r$ en module et en position, et donc le couple. Ceci est possible à condition que la période d'échantillonnage est telle que $T_e{<<\sigma}T_r$.

C. Le choix de la séquence de commande

Le choix de V_s dépend de la position du flux $\overline{\phi}_s$, de la variation souhaitée de son module, de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent pour le couple. L'espace d'évolution de $\overline{\phi}_s$ dans le référentiel (α,β) lié au stator est divisé en six secteurs angulaires de $(\pi/3)$, ce partage permet de déterminer pour chaque secteur, la séquence de contrôle adéquate pour les états des grandeurs







de contrôle. L'effet du vecteur tension pouvant être sélectionné est mentionné sur la Fig. 2.[6]



Fig. 2 Choix du vecteur tenzion.

Lorsque le vecteur flux se trouve dans la zone k (Fig. 2), les deux vecteurs \overline{v}_k et \overline{v}_{k+3} ont la composante de flux la plus importante (composante radiale sur la Fig. 1) et leur effet sur le couple dépend de la position du vecteur flux dans la zone considérée ; c'est la cause pour laquelle ils ne sont jamais appliqués.

La sélection des vecteurs tension nuls, permet de diminuer la fréquence de commutation moyenne du variateur [1], une séquence nulle est systématiquement appliquée lorsque on emploie des régulateur à trois niveaux pour le couple [1], [3];

D. Elaboration du vecteur de commande

Pour contrôler le vecteur flux φ_s , on utilise un contrôleur à hystérésis à deux niveaux pour maintenir le module du flux entre deux limites, en comparant sa valeur avec une valeur de référence, la sortie du contrôleur génère une valeur binaire Cflx indique si le module du flux doit augmenter ou doit diminuer comme est illustré à la Fig. 3. Le contrôle de couple a pour but de maintenir son module autour d'une valeur de référence entre deux limites admissibles, en utilisant des contrôleurs à hystérésis à deux niveaux ou à trois niveaux pour contrôler le moteur dans les deux sens de rotation et qui génèrent des valeurs binaires Ccpl .



Fig. 4 Contrôleur à hystérés s à trois rrizeaux

E. La table de commutation

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables (Ccpl) et (Cflx) et le secteur que l'on note N, déterminant la position de flux $\overline{\phi}_s$; Elle se présente donc sous la forme suivante [5] :

		1	2	3	102 4 05	5	- A	Corner #
1:1°×=1	C:r	Ψ.	Υ.	14	V.	Ve	V.	Imy:: N.weaux
	Cap (Ψ.	V.	1.	Vu	- W4	ν.	KC 948-571 2080-74-60000
	C:r	W2	Y.,	252	V_3	V.	12	T.x.:: Mivezon
(E::-)	(1, 1) = 1		¥4.	¥4	5.4	19986	12	D Maran
	2 p' = 0		1000	¥o.	3.7	- mr.	46	
	Cg	- 175	14	27	\mathbb{V}_2	¥2	14	T.x.:: Missann





Fig. 6 Structure générale du contrôle directidu couple.



V. RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

Le comportement de la structure du contrôle direct du couple, appliquée à une machine de 4 kW, dont les paramètres sont récapitulés dans l'annexe A, est simulé sous l'environnement *Matlab/Simulink* avec une bande d'hystérésis de ± 0.25 Nm pour le comparateur du couple, de ± 0.005 Wb pour le comparateur du flux et une valeur de référence du flux statorique $W_{sref} = 1$ wb.















Fig. .0.Les réconses de la vitesse ce rotation, le courant statorique, le couple électromagnétique et le flux statorique (test/).







Les résultats de simulation du système pour des consignes de charge variable de 25Nm à 0.4s ; 40Nm à 0.8s et 5Nm à 1.2s, sont donnés par Fig. 6 et Fig. 7. On constate que le couple suit parfaitement la valeur de la consigne, le courant répond à la variation de charge rapidement, la vitesse et le flux restent pratiquement constants et ne sont pas affectés par la variation de charge, et Le module de flux a une valeur pratiquement constante (1Wb).

Pour le test de l'inversion du sens de rotation donné par Fig. 8. On constate que la poursuite de vitesse s'effectue sans dépassement; le courant et le flux sont affectés aux instants de la variation de vitesse et reviennent rapidement pour se stabiliser au régime permanent ; l'influence de cette variation est plus claire sur la réponse de la tension et la trajectoire du module de flux.

Dans le test à faibles vitesses de rotation donné par Fig. 9. On constate que la poursuite de vitesse s'effectue sans dépassement et plus rapide ; le courant et la tension suivent la variation de vitesse. On remarque l'influence de la diminution de la vitesse sur la constance du module de flux.

Dans ce test de variation de la résistance statorique donné par Fig. 10 la résistance statorique de la machine est augmentée de Rs à 2Rs à faible vitesse. On a représenté les réponses de flux et de courant statoriques des deux cas comparées, on remarque que l'augmentation de la résistance statorique provoque des ondulations de flux.

VI. CONCLUSION

Nous avons présenté la structure du contrôle direct du couple (DTC) qui est un moyen simple pour la commande d'une machine asynchrone, et qui présente une solution aux problèmes de la robustesse par rapport aux contrôle vectoriel.

Le contrôle direct du couple (DTC) a été élaboré à partir des conditions de fonctionnements idéals dont l'effet de la variation de la résistance statorique est négligé, et la vitesse de rotation est considérée suffisamment élevée.

On a constaté d'après les tests de simulation que la variation de la résistance statorique et la présence des correcteurs à hystérésis produit des oscillations des grandeurs contrôlées (flux et couple).

Cette stratégie de commande est insensible aux variations des paramètres rotoriques de la machine, car l'estimation de flux ne dépend que de la résistance du stator. En outre, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis, ce point est l'un des inconvénients de la DTC.

La régulation de couple et du flux et la réduction des ondulations dépondent de la période d'échantillonnage T_e et la largeur de la bande d'hystérésis du couple et celle de flux.

APPENDIX

Table II: Les paramètres de la machine utilisée.

Description	Valeur	Lnité	
Prussance nominale	4	KW	
Vitesse nominale	150	Rad's	
Nombre de paire de pôles	2		
Couple electromagnétique	25	N.m	
Résistance statorique	1.2	0	
Résis tance rotorique	1.8	ຄ	
Inductance statorique	0.1551	H	
Inductonce ratorique	0.1568	H	
Inductance mutuelle	0.15	11	
Constante de temps rotorique	0.0871	5	
Flux retarique norminal	and the second	Wh.	
Moment d'inertie	0.07	$K.G.M^2$	
Coefficient de froitement	0.0001	N.m/Rad/s	

REFERENCES

- C. C. de Wit, "Modélisation contrôle vectoriel et DTC," Ed. Hermes, 2000, pp. 183–213.
- [2] J. P. Caon, J. P. Hautier, "Modélisation et commande de la machine asynchrone," Ed. Technip, 1995, pp. 37–42.
- [3] I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," Conf. Rec. IEEE-AS Annual Meeting, pp.496-502, Oct. 1985.
- [4] I. Takahashi and Y. Ohmori, "High-performance direct torque control of an induction motor," *IEEE Trans. Industry Applications, vol.25,* no.2, pp.257-264, Mar. /April 1989.
- [5] Y-A. Chapuis, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone par l'orientation de son flux statorique," Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, Janvier 1996.
- [6] M. E. Haque, M. F. Rahman "The effect of stator resistance variation on direct torque controlled of an induction motor," Australia, 2003.