Simulation et optimisation de la commande d'un Alterno-Démarreur Intégré asynchrone

Agnès Konieczka, Jean-Paul Vilain, Jean-Marie Biedinger, Cédric Plasse, Sokha Ly

Collaboration entre la société VALEO et le Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne

***Résumé*--L'article porte sur la commande d'un Alterno-Démarreur Intégré de type asynchrone. Une simulation fine de l'ensemble "machine-convertisseur" est présentée. Différentes commandes sont modélisées afin d'optimiser le fonctionnement du système. Les perturbations induites par le convertisseur, sa commande et le capteur mécanique sont chiffrées en comparant les performances de l'ensemble "machine-convertisseur" à celles attendues par une alimentation idéale. Cette étude peut alors être mise à profit pour définir un mode de pilotage précis tout en minimisant le rapport coût / performances.**

***Mots clés*–alterno-démarreur**, **commande scalaire, machine asynchrone.**

I. INTRODUCTION

Le travail présenté s'inscrit dans un vaste programme d'étude d'un "Alterno-Démarreur Intégré" (A.D.I.) mené en collaboration entre la société VALEO et le Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne (L.E.C.) au sein de l'Université de Technologie de Compiègne (U.T.C.). Il contribue plus particulièrement, dans le cadre d'une solution de type asynchrone, à l'optimisation du système, par le biais d'une simulation fine de la machine, du convertisseur et de sa commande.

L'idée de l'A.D.I. consiste à remplacer par une seule machine électrique réversible l'alternateur et le démarreur d'un véhicule automobile et à intégrer cette machine unique au bloc moteur. L'objectif est de réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz polluants grâce à deux fonctions fondamentales :

- une fonction démarreur performante pour délivrer un couple élevé (garantissant la mise en marche même sous température très basse) et répétitif (dans les fonctionnements du type "Stop and Go", qui supposent un démarrage silencieux et rapide du moteur à combustion). Le courant d'appel étant très fort et la machine saturée, la difficulté majeure est de fournir le couple requis compte tenu des contraintes d'encombrement, des limitations en tension et en courant imposées par la batterie et des chutes de tension en ligne et dans le convertisseur ;
- un mode alternateur avec une fonction "génération d'énergie électrique" pour à la fois recharger la batterie et fournir l'énergie électrique nécessaire aux équipements du véhicule. Dans ce cas, la performance exigée se traduit en terme de précision et de rendement, car ce fonctionnement est de très longue durée. L'entraînement de l'alternateur par le moteur thermique génère une fluctuation de la vitesse instantanée (acyclismes) qui doit être prise en compte dans la commande.

A ces fonctions minimales s'ajoutent le freinage électrique du véhicule (avec récupération de l'énergie de freinage "gratuite") et la fonction "décollage" (aide au démarrage et aux accélérations).

Notre étude concerne une solution de type asynchrone. Le convertisseur de puissance qui l'alimente est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.) qui permet d'asservir les courants ou les tensions de phase. La commande actuellement étudiée est de type scalaire. L'un des premiers objectifs est de vérifier si une telle commande suffit pour faire face aux régimes transitoires générés notamment par les acyclismes.

II. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La conception optimale de la machine et la vérification expérimentale de ses paramètres ont été effectuées par des chercheurs du L.E.C[1]. Leurs travaux nous ont conduits à modéliser le comportement de la machine [1] [2] par une approche vectorielle classique en y ajoutant une évolution des valeurs des paramètres en fonction du niveau de saturation : durant la simulation, à chaque pas de calcul, l'état de saturation de la machine est estimé par le module du vecteur de magnétisation du rotor et la valeur des paramètres est corrigée avant de passer au pas suivant. Les figures 1 et 2 représentent l'évolution de ces paramètres :

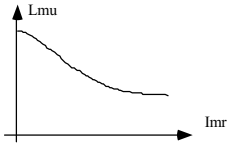

Fig. 1

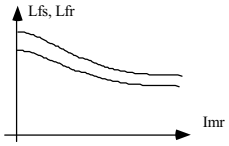

Fig. 2

[1] Jean-Marie Biedinger (UTC) pour la conception, Sokha Ly (VALEO) pour les essais

Rappelons les équations vectorielles ramenées au stator et basées sur la transformation de Clarke [3] [4] :

$$\begin{aligned}\overline{U_S} &= R_S\bar{I}_S + L_S\frac{d\bar{I}_S}{dt} + L_\mu\frac{d\bar{I}'_r}{dt}\\ 0 &= R'_r\bar{I}'_r + L_\mu\frac{d\bar{I}_S}{dt} + L'_r\frac{d\bar{I}'_r}{dt} - jp\Omega\left(L_\mu\bar{I}_S + L'_r\bar{I}'_r\right)\\ C_{em} &= \frac{3}{2}pL_\mu\Im\left(\bar{I}_S.\bar{I}'^{\,o}_r\right)\end{aligned}$$

Le rôle prépondérant du flux rotorique est mis en évidence en faisant apparaître la quantité :

$\bar{I}_{mr} = \frac{\bar{\phi}'_r}{L_\mu} = \bar{I}_S + \frac{L'_r}{L_\mu}\bar{I}'_r = \bar{I}_S + \bar{I}'_r + \frac{L'_{fr}}{L_\mu}\bar{I}'_r$ que l'on désigne classiquement par « vecteur courant de magnétisation du rotor ». Le module de ce vecteur est un indicateur de l'état de saturation de la machine.

En définissant le paramètre $\lambda = \frac{3}{2}p\frac{L_\mu^2}{L'_r}$ et la constante de temps rotorique $\tau_r = \frac{L'_r}{R'_r}$, nous obtenons le système d'équations définitif :

$$\begin{aligned}\overline{U_S} &= R_S\bar{I}_S + \sigma L_S\frac{d\bar{I}_S}{dt} + \frac{L_\mu^2}{L'_r}\frac{d\bar{I}_{mr}}{dt}\\ \bar{I}_S &= \left(1 - jp\Omega\tau_r\right)\bar{I}_{mr} + \tau_r\frac{d\bar{I}_{mr}}{dt}\\ C_{em} &= \lambda\Im\left(\bar{I}_S.\bar{I}^{\,o}_{mr}\right)\end{aligned}$$

Ces équations différentielles vectorielles sont intégrables par des méthodes de type Euler ou Runge-Kutta.

III. MODELISATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La machine est alimentée « en tension » ou « en courant ». La commande est de type scalaire : elle repose sur les équations du régime statique traduisant le comportement en régime établi. Les lois de commande définissent donc la consigne d'amplitude des grandeurs d'entrée (tensions ou courants) et la pulsation de glissement ω_r, pour un objectif de couple (en mode moteur) ou de puissance (en mode alternateur) fixé, ceci en fonction de la vitesse, de manière à obtenir les performances souhaitées en respectant les contraintes d'alimentation. La pulsation statorique ω_S est fixée par l'autopilotage fréquentiel : $\omega_S = \omega_r + p\Omega$, Ω étant la vitesse de rotation.

Comme la vitesse ne reste pas constante, c'est en terme de position angulaire qu'il faut raisonner :

$$\theta_S = \int\omega_S dt = \int\omega_r dt + \int p\Omega dt = \int\omega_r dt + p\theta_{mec}$$

L'arbre de la machine est muni d'un capteur incrémental à « N=pNm » points par tour, p étant le nombre de paires de pôles. C'est cette information qui est utilisée pour l'autopilotage. La figure 3 représente le synoptique de cette commande pour une alimentation en tension.

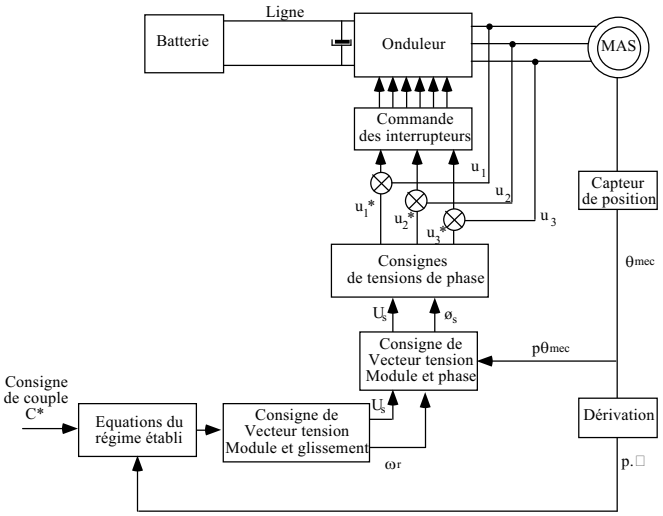

Fig. 3 : Synoptique d'une alimentation en tension

IV. ARCHITECTURE DE LA SIMULATION

A. Simulation de l'ensemble "commande-convertisseur-machine" :

Le programme s'articule autour de différents blocs qui prennent en compte toutes les composantes du dispositif expérimental :

- la machine asynchrone est modélisée par ses équations vectorielles ramenées au stator exposées précédemment. Les grandeurs d'entrée sont les tensions instantanées issues de l'onduleur. Les grandeurs de sortie sont les courants, les tensions, les flux, le couple, etc…
- le capteur mécanique est simulé avec une résolution de "pNm" points par tour que l'on choisit à volonté, afin de mettre en évidence l'effet sur le comportement dynamique de l'ensemble. La vitesse mécanique est une grandeur intermédiaire calculée que nous réinjectons dans la commande ;
- la source continue qui alimente l'onduleur est une batterie complétée par une ligne et un condensateur de découplage à proximité immédiate du convertisseur. Le modèle de la batterie diffère selon qu'elle débite ou qu'elle reçoit de l'énergie ;

- l'onduleur de tension triphasé est une structure classique à trois bras de pont [5] : chaque bras de pont est constitué de MOSFETs et de diodes de roue libre. Les grandeurs d'entrée de ce module sont les signaux de commande des transistors. Les tensions de sortie sont calculées en liaison avec la réaction de la charge. Tant qu'un MOSFET est commandé, il est conducteur quelque soit le sens du courant. Quand il ne l'est plus, le sens du courant dans la charge détermine la diode de roue libre en service. Nous pouvons alors estimer la valeur instantanée de la tension de sortie du bras de pont en prenant en compte les chutes de tension dans les composants en conduction. Nous calculons également les pertes dans chaque bras de pont et le courant instantané absorbé en entrée de l'onduleur, ainsi qu'en amont de la capacité de découplage.

B. Options de la simulation :

En mode moteur, nous fixons un objectif de couple, en mode alternateur un objectif de puissance électrique. Dans chacun des cas, les lois de commande sont élaborées de façon à viser un fonctionnement optimal calculé dans l'hypothèse où les formes d'onde seraient parfaitement sinusoïdales. Les grandeurs associées à ce point sont dites "théoriques". D'autre part, l'effet de l'échantillonnage est mis en évidence lorsque les angles de position angulaires statorique, rotorique et mécanique sont discrétisés à Ns, Nr et Nm échantillons par période (ech/T). La machine peut être alimentée en tension ou en courant, soit sous alimentation idéale "utopique", soit sous alimentation concrète via un onduleur.

Quatre stratégies d'alimentation en tension sont élaborées :

- par des tensions parfaitement sinusoïdales. Ce type d'alimentation est destiné à valider le modèle en régime établi et vérifier que nous retrouvons bien les valeurs dites théoriques ;
- par un onduleur de tension pleine onde à deux niveaux de tension (TPO2) ;
- par un onduleur de tension à M.L.I. avec deux stratégies possibles :
  - modulation du vecteur d'espace de type barycentrique (TMLIb) [6] ;
  - modulation bras par bras en boucle fermée avec comparaison à une dent de scie (TMLI) linéaire (TMLIl) ou exponentielle (TMLIe).

Pour une alimentation en courant, deux types d'alimentation sont simulables :

- formes d'onde sinusoïdales ;
- onduleur de tension à M.L.I. régulé en courant par hystérésis sur les trois bras de pont (Ih).

Les simulations vont permettre d'analyser le comportement du système compte tenu du mode d'alimentation choisi et de le comparer au fonctionnement théorique. Comme elles s'appuient sur les équations du régime dynamique, elles permettent de visualiser un régime transitoire ou un régime établi.

V. COMPARAISON DES PERFORMANCES "MACHINE-CONVERTISSEUR" SUIVANT LE TYPE DE COMMANDE

Pour chacune des différentes stratégies de commande modélisées, nous observons l'évolution des grandeurs en fonction du temps. Il s'agit des courants et tensions statoriques, du couple électromagnétique, de la vitesse mécanique, des différents angles de position angulaires, de la tension et du courant en entrée de l'onduleur. Différentes grandeurs vectorielles (courant et tension statoriques, courant rotorique, courant magnétisant du rotor, tension de consigne, tension statorique filtrée) sont aussi représentées, soit dans le repère statorique, soit dans celui du courant magnétisant du rotor. La figure 4 est un exemple de simulation pour une alimentation en courant (Ih), en mode alternateur avec les conditions du régime établi et à fréquence statorique constante:

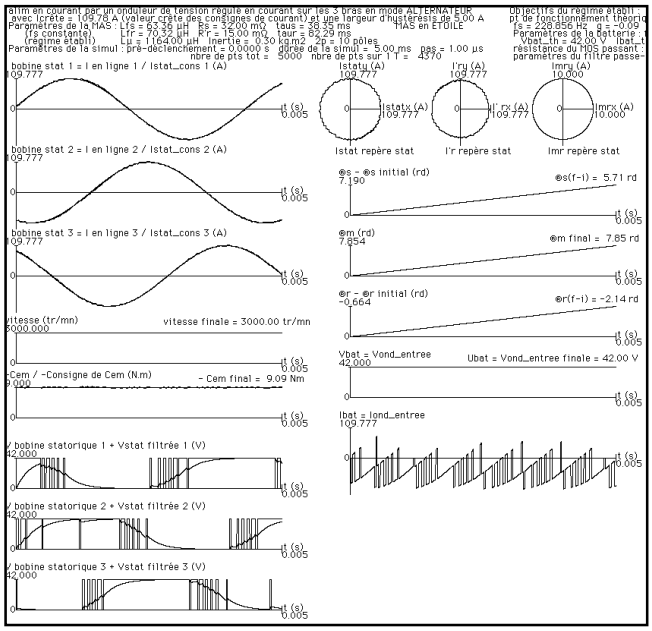

Fig. 4 : Extrait d'une simulation

La réponse dynamique du système est ainsi tracée en mode moteur ou en mode alternateur avec différents objectifs et avec autopilotage. Pour chaque point de fonctionnement, les valeurs moyennes des différentes grandeurs du dispositif (courants, tensions, ondulations de couple, puissances, pertes…) sont calculées sur la dernière période de la simulation. L'exemple d'un tableau de valeurs tel qu'il apparaît sur la simulation est donné ci-dessous ; il s'agit d'une alimentation en tension par un onduleur à M.L.I. (TMLIb) en mode alternateur et en régime établi pour un objectif de puissance de 3 kW avec Ns, Nr et Nm fixés à 48 ech/T :

GRANDEURS	THEORIQUES	SUR LA DERNIERE T
vitesse moy (tr/min)	3000.00	3000.09
Δvitesse moy relative (%)	0.00	0.00
Cem moy (N.m)	-9.00	-8.89
ΔCem moy (N.m)	0.00	0.11
ΔCem moy relative (%)	0.00	-1.22
ond Cem moy (N.m)	0.00	0.44
mod Istat_moy (A)	109.78	109.69
i1eff_moy (A)	77.62	77.64
i2eff_moy (A)	77.62	77.51
i3eff_moy (A)	77.62	77.54
mod Vstat_moy (V)	25.08	27.09
mod Irot_moy (A)	103.09	103.13
mod Imr_moy (A)	10.00	9.88
Pmeca_moy (W)	-2827.43	-2793.07
Pertes Jstat_moy (W)	578.45	577.55
Pertes Jrot_moy (W)	239.13	239.33
Pertes Jtot_moy (W)	817.58	816.88
Pelec_moy (W)	-2009.85	-1976.19
Pabs_tot_mot_moy (W)	-2009.85	-1991.26
Ibat_moy (A)	-47.85	-46.93
Vbat_moy (V)	42.00	42.00
Pbat_moy (W)	-2009.85	-1971.00
Pertes_bat_moy (W)	0.00	0.00
Pertes_bras1_ond_moy (W)		9.04
Pertes_bras2_ond_moy (W)		9.01
Pertes_bras3_ond_moy (W)		9.02
Pertes_ond_moy (W)		27.07
Pabs_ond_moy (W)		-1949.12

notation : Δ signifie "erreur" (val moy-val théorique)

En premier lieu, ces simulations nous ont permis de valider notre modèle en régime établi, les erreurs étant négligeables pour l'alimentation en tension par des formes d'onde parfaitement sinusoïdales, voire pratiquement nulles pour une alimentation par des courants parfaitement sinusoïdaux (puisque nous avons un degré en moins dans la résolution des équations différentielles).

En ce qui concerne l'alimentation en tension par un onduleur à M.L.I. (TMLI), l'utilisation d'une dent de scie linéaire ou exponentielle influe de manière infime.

D'autre part, discrétiser les différents angles de position angulaires perturbe davantage le fonctionnement du système quels que soient le type d'alimentation et le mode de fonctionnement. Cette observation s'avère flagrante avec l'alimentation en tension pleine onde TPO2. Elle est cependant moins visible avec les alimentations en tension via un onduleur à M.L.I. (TMLIb, TMLIl et TMLIe) en mode moteur.

Enfin, ces différentes simulations révèlent la supériorité de la modulation barycentrique (TMLIb).

VI. ROLE DU CAPTEUR DE POSITION MECANIQUE

Afin de prendre en compte l'effet du capteur de position mécanique, nous avons fait varier Nm régulièrement de 24 à 240 ech/T, alors que Ns et Nr sont fixés à 256.

La figure 5 représente les variations des ondulations de couple moyennes pour une alimentation en tension par des formes d'onde sinusoïdales :

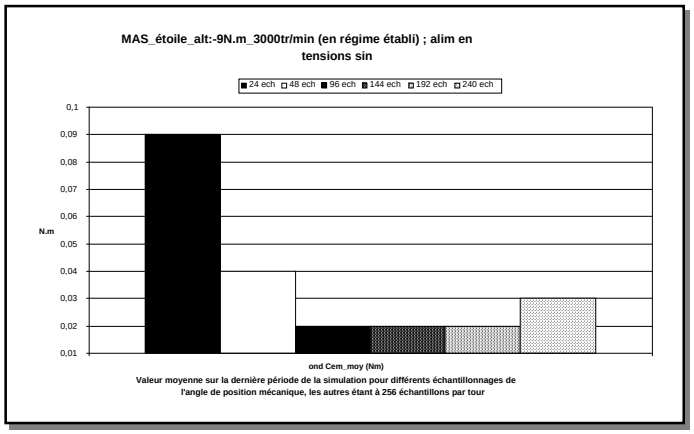

Fig. 5 : Ondulations de couple moyennes pour une alimentation en tension par des formes d'onde sinusoïdales

Il est intéressant de constater qu'augmenter Nm n'améliore pas systématiquement les performances du dispositif. Des effets de battement se produisent lorsque le nombre d'échantillons des différents angles de position angulaires deviennent proches et rendent ainsi le système asymétrique.

Afin d'étudier ce phénomène, nous avons à nouveau effectué ces simulations, dans les mêmes conditions, à la différence près de Ns et Nr fixés à présent à 4800 ech/T (Nm varie, lui, de 24 à 288 ech/T).

Cette étude montre que le capteur de position mécanique affecte le comportement du système, suivant le type de commande et le nombre d'échantillons par période. Ces perturbations ne varient pas de la même façon suivant le type d'alimentation.

VII. CONCLUSION

Tout d'abord, en comparant les performances de chaque stratégie de commande élaborée à celles attendues par une alimentation parfaitement idéale, nous pouvons mettre en évidence celle qui est la mieux adaptée au point de fonctionnement optimal. Jusqu'à présent, les simulations révèlent que l'alimentation par un onduleur de tension à M.L.I. avec la stratégie de modulation par vecteur d'espace de type barycentrique s'avère celle qui engendre le moins de perturbation sur le comportement du système. Il nous reste à prendre en compte l'effet des acyclismes pour conforter cette hypothèse. Nous disposerons alors d'un outil de simulation avec lequel nous pourrons exploiter les résultats sur une large gamme d'objectifs en mode moteur et en mode alternateur, tel le fonctionnement de l'A.D.I.

REFERENCES

[1] J.-M. Biedinger, "Entraînements électriques à vitesse variable, Tome 2 : Machines Asynchrones", polycopié du cours de MC 02, Université de Technologie de Compiègne, 1998.

[2] G. Séguier - F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Technique et Documentation, 1994.

[3] J.-P. Caron – J.-P. Hautier, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", Méthodes et Pratiques de l'Ingénieur, 1995.
[4] C.-T. Pan and J-J Shieh, "New Space Contol Stratégies for Three-Phase Step-Up/Down AC/DC Converter", Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, n° 1, pp. 25-34, February 2000.
[5] G. Séguier, "L'électronique de puissance - Les fonctions de base et leurs principales applications", Dunod 1990
[6] C. Lesbroussart, "Etude d'une stratégie de modulation de largeur d'impulsion pour un onduleur de tension triphasé à deux ou trois niveaux : la Modulation Delta Sigma Vectorielle", Laboratoire d'Electromécanique, Université de Technologie de Compiègne, 1997.