HAL
open science

Onduleur à tolérance de pannes dédié à l'alimentation d'un actionneur électrohydrostatique pour réseau avion

Jérôme Mavier, Frédéric Richardeau, Hubert Piquet

To cite this version:

Jérôme Mavier, Frédéric Richardeau, Hubert Piquet. Onduleur à tolérance de pannes dédié à l'alimentation d'un actionneur électrohydrostatique pour réseau avion. Electronique de Puissance du Futur, 11ème édition, Jul 2006, Grenoble, France. hal-02516802

HAL Id: hal-02516802

https://hal.science/hal-02516802v1

Submitted on 24 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Onduleur à tolérance de pannes dédié à l'alimentation d'un actionneur électrohydrostatique pour réseau avion

J.Mavier (*), F.Richardeau (**), H.Piquet (**)
(*) AIRBUS, EYAE M0131/5, 316, route de Bayonne, 31060 Toulouse Cedex 3
(**) LEEI, UMR INPT-ENSEEIHT/CNRS, 2 rue Camichel, 31071, Toulouse Cedex 7

Résumé : Dans les réseaux de bord d'avions plus électriques, de nombreux convertisseurs statiques sont dédiés à l'alimentation d'actionneurs. Certains systèmes ont des objectifs de fiabilité élevés, qui sont traditionnellement satisfaits à l'aide de coefficients de sécurité élevés et de redondances passives. Le concept de tolérance aux pannes, moins pénalisant en termes de masse, de volume et de coût, consiste à introduire une ou plusieurs redondances actives internes au convertisseur pour en augmenter la disponibilité opérationnelle. Une topologie d'onduleur capable de préserver sa fonctionnalité initiale en présence d'une défaillance est développée ici ; des procédures de mise en sécurité et de reconfiguration adaptées sont établies et les performances de cet onduleur 4 bras en mode secours sont décrites.

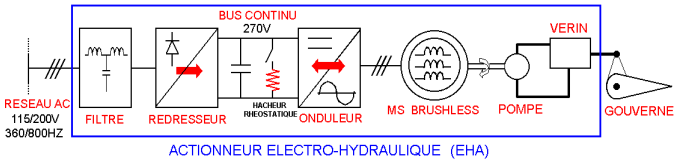
I. INTRODUCTION.

L'évolution du concept d'avion plus électrique a occasionné le développement des systèmes d'électronique de puissance au sein des réseaux de bord. En considérant de futures architectures envisageables, le recensement des équipements électriques montre que l'application la plus répandue est la variation de vitesse. En effet, dans les domaines militaires, aéronautiques et automobiles, les solutions traditionnelles (actionneurs hydrauliques, moteurs asynchrones alimentés à fréquence fixe) cèdent progressivement le pas à des variateurs permettant d'améliorer l'efficacité et la performance des systèmes. Ainsi, depuis le développement de l'A380, dont le réseau de bord est à fréquence libre (360-800 Hz), de nombreuses machines asynchrones ont dû être remplacées par des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) qui possèdent des propriétés attractives : couple massique et couple volumique élevés, large plage de vitesse à puissance constante et excellents rendements. L'autopilotage de ces machines requiert un convertisseur statique.

Certaines applications ont des exigences de fiabilité élevées (actionneurs de gouvernes, direction des roues et freinage, pompes, ventilateurs) et la disponibilité de ces équipements embarqués est essentielle. Pour satisfaire ces objectifs sans introduire de redondances passives ni de marges de dimensionnement excessives, il est proposé de mettre en œuvre une topologie d'onduleur 4 bras tolérante aux pannes.

II. ACTIONNEUR ELECTROHYDROSTATIQUE

L'application présentée ici est un actionneur électrohydrostatique (EHA) de surface de vol. C'est en effet une charge qui impose des contraintes particulièrement élevées au niveau de l'électronique de puissance : fonctionnement impulsionnel, performances dynamiques élevées, réversibilité en puissance et disponibilité élevée. Un EHA permet de commander le déplacement d'un vérin par un circuit hydraulique local à partir d'une puissance électrique. Classiquement, le réseau de bord triphasé alimente un bus continu à travers un pont de diodes double alternance. Ensuite, un onduleur de tension MLI autopilote une machine synchrone à aimants permanents qui entraîne une pompe hydraulique actionnant le vérin (figure 1). Les machines considérées par la suite sont à forces électromotrices (fem) sinusoïdales et couplées en étoile.



1. Structure classique de chaîne de conversion d'un EHA sur réseau avion

Le dimensionnement électrique et thermique de l'onduleur est lié à la charge d'arrêt de l'actionneur : à basses vitesses, le vérin doit pouvoir exercer en permanence une force qui détermine le couple maximal de la machine et donc les courants de phase maximaux :

$$C_{em} = 3p\Phi_f I_{ph} \cos(\psi) \qquad (1)$$

où p est le nombre de paire de pôles, I_{ph} l'intensité efficace du courant de phase, Φ_f la valeur efficace du flux à vide de la machine et Ψ le déphasage entre les courants et les fem.

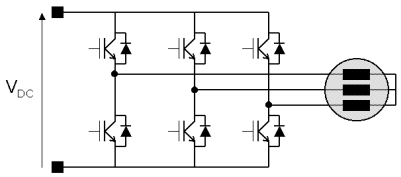
Pour les besoins de simulation, il a été réalisé sous SABER™ un modèle comportemental multi-physique de la chaîne de conversion d'énergie d'un EHA d'aileron. En offrant une caractérisation électrique, électromécanique et thermique, ce modèle de simulation a permis d'étudier les régimes transitoires en cas de défaillances, le fonctionnement permanent en marche dégradée de l'actionneur, les performances post-reconfiguration du convertisseur et la comparaison de la topologie proposée avec la solution de référence en terme de dimensionnement.

III. ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE

Les retours d'expériences issus de l'industrie sur les variateurs moyenne puissance montrent que l'essentiel des défauts hors vieillissement d'un système convertisseur-moteur survient au niveau du convertisseur et se répartissent entre la défaillance des interrupteurs de puissance et les défauts de commande (CEM, connectique) [1-2]. Dans les applications considérées, le redresseur passif a une fiabilité certainement plus élevée que celle de l'onduleur (figure 2). Ce dernier constitue donc le sous-système le plus critique du point de vue de la fiabilité ; il est celui auquel la tolérance aux pannes est la plus profitable.

Les conséquences de défauts doivent être connues pour envisager une continuité de fonctionnement sécurisée. En dehors des aspects liés à la connectique, ceux-ci ont

essentiellement lieu dans les transistors associés à leurs drivers. Le défaut d'un transistor est causé soit par un défaut de commande (propagé par la commande elle-même ou émanant du couplage circuit – commande), soit par une défaillance physique de celui-ci (avalanche puis claquage, emballement thermique, claquage de l'oxyde de grille par ESD – EOS ou vieillissement, …). Par la suite, les conséquences d'un défaut de transistor menant à un état définitif de court-circuit ou de circuit ouvert sont examinées.

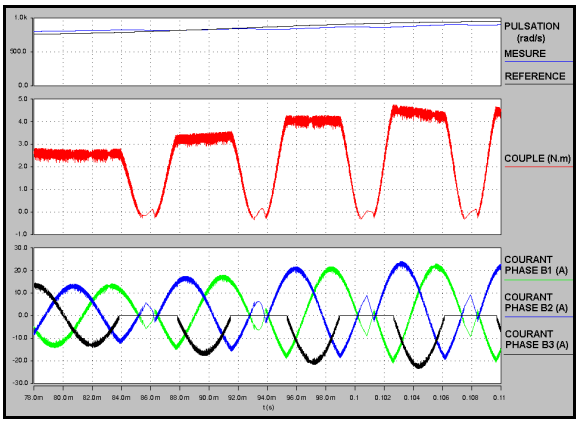


2. Onduleur triphasé alimentant une MSAP

A. Défaut de transistor de type "circuit ouvert".

Le maintien à l'état ouvert d'un transistor entraîne une perte de réversibilité en courant de la cellule : en mode onduleur, le courant de phase est alors unipolaire et non sinusoïdal. En effet, la conduction spontanée de la diode en anti-parallèle du transistor en défaut est conditionnée par le signe du courant dans la phase.

Par exemple, si le transistor supérieur d'une cellule reste ouvert, la phase correspondante de la machine reste connectée au potentiel négatif du bus par la diode du bas. Le courant dans la phase concernée (phase B3 sur la figure 3) s'annule pendant la moitié de la période de modulation. Comme le neutre de la machine est isolé, les courants dans les deux autres phases sont également déformés. La distorsion des courants est donc importante ce qui implique une puissance fluctuante significative. Le maintien du régime nominal nécessite alors une augmentation du courant efficace. Le régime dégradé se caractérise également par une importante pulsation du couple électromagnétique de la machine à la fréquence électrique statorique.



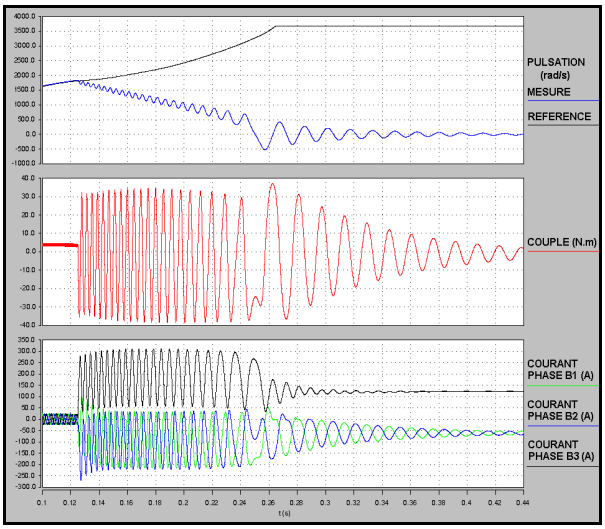
3. Défaut de type "circuit ouvert" d'un transistor

En conclusion, le fonctionnement de l'actionneur peut être maintenu en cas d'occurrence d'un défaut de type "circuit ouvert", mais au prix de performances dégradées. Ce mode d'alimentation occasionne des vibrations qui peuvent être préjudiciables et induire un vieillissement accéléré des éléments mécaniques pour un fonctionnement de longue durée.

B. Défaut de bras asymétrique.

Le défaut d'ouverture d'un transistor est à traiter beaucoup plus rapidement car la cellule de commutation se trouve court-circuitée. La commande rapprochée de la cellule doit alors réagir en quelques micro-secondes pour ouvrir le transistor en série sous peine de court-circuit définitif. Le courant dans la phase du bras en défaut devient alors incontrôlable car il existe des chemins de court-circuit avec les diodes antiparallèles. Cet état est entretenu par les aimants en rotation qui engendrent des forces électromotrices servant de sources d'excitation. Il va donc se créer des tensions positives aux bornes des diodes qui vont s'amorcer et autoriser la circulation des courants dans ces chemins. La simulation d'un défaut asymétrique de bras d'onduleur montre que le courant de court-circuit est de type courant redressé mono-alternance (figure 4). Son amplitude atteint ici le triple de la valeur nominale et elle peut être encore plus élevée suivant le régime de fonctionnement pendant lequel elle survient.

Le couple est fortement oscillatoire et il peut prendre des valeurs également très élevées. Le maintien de ce mode de fonctionnement n'est donc pas souhaitable ; l'onduleur doit alors être bloqué et la fonction assurée par le convertisseur est perdue.



4. Défaut asymétrique d'un bras d'onduleur

C. Isolement d'une cellule défaillante.

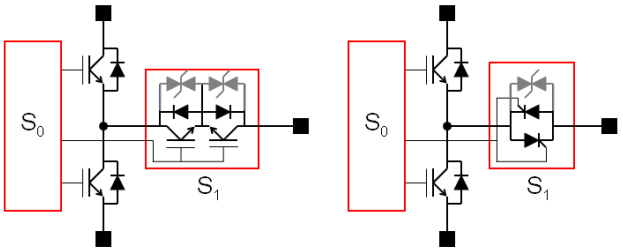
Dans le cas de la machine synchrone, le blocage de tous les transistors n'est pas suffisant pour isoler l'ensemble onduleur–moteur puisque la rotation entretient le court-circuit intermittent. Dans le cas d'un onduleur à tolérance de pannes, il est nécessaire d'insérer un dispositif d'isolement entre la cellule de commutation défaillante et la phase moteur pour maintenir un fonctionnement post-défaillance sécurisé sur le plan électrique et mécanique.

Différentes topologies d'onduleurs à tolérance de pannes ont été proposées dans la littérature [3-5]. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite l'utilisation de fusibles déclenchés par thyristors, ce qui présente divers inconvénients, en particulier dans le contexte aéronautique : dispersion des paramètres intrinsèques, masse et volume des condensateurs calibrés pour le stockage de l'énergie nécessaire à la fusion, maintenance et coût notamment.

Il est donc préférable de réaliser l'isolement électrique de la cellule de commutation par un interrupteur électronique adapté à cet usage. En particulier, il doit être réversible en courant et en tension et naturellement réarmable par sa commande électronique. De plus, comme il conduit le courant en permanence, il doit présenter des pertes par conduction aussi faibles que possible.

Aujourd'hui, les semi-conducteurs de puissance commandables et bidirectionnels en tension présentant le minimum de chute de tension sont le thyristor et ses variantes (MCT entre autres). Récemment, les IGBT à tenue en tension inverse (RB-IGBT, MBS, …) sont très attractifs car leur chute de tension n'est que de 20 à 30% supérieure à celle des thyristors de même calibre avec comme fonctionnalité supplémentaire la commande au blocage. Dans le cadre de cette étude, il n'est pas question de figer la structure de cet interrupteur ; nous employons simplement la symbolique IGBT.

Deux exemples très classiques sont rappelés en figure 5 : le dispositif S_1 représente l'interrupteur d'isolement et S_0 le dispositif de commande rapprochée et de surveillance de la cellule de commutation et de S_1. L'ensemble S_0–S_1 forme une fonction disjoncteur électronique. Un dispositif d'écrêtage doit être introduit pour éviter qu'une éventuelle énergie renvoyée par la machine soit dissipée dans les semi-conducteurs, ce qui risquerait de les dégrader fortement.



5. *Exemples d'interrupteurs d'isolement 4 quadrants insérés entre la cellule et la phase moteur*

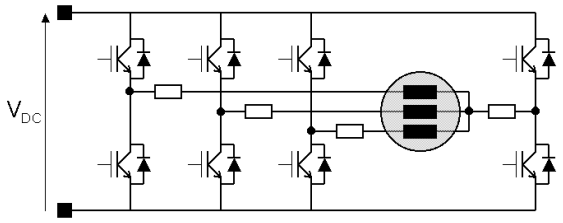
IV. Onduleur 4 bras

Une topologie classique d'onduleur triphasé intégrant des interrupteurs d'isolement peut tolérer une défaillance interne, mais les performances de l'actionneur en fonctionnement dégradé monophasé [6] ne sont pas satisfaisantes pour l'ensemble des applications envisagées (réduction de puissance importante, fortes ondulations de couple, démarrage incertain de la machine selon la position du rotor à l'arrêt).

L'adjonction à l'onduleur d'une redondance interne permet d'améliorer les performances du fonctionnement reconfiguré. Il est préférable que l'élément additionnel soit une cellule de commutation plutôt qu'un diviseur capacitif, pour des raisons d'intégration comme de performances : la plage de tension que l'onduleur peut appliquer à la machine après reconfiguration est ainsi plus importante.

Le bras secours peut être raccordé à chacune des 3 phases pour remplacer un bras défaillant. Ainsi après reconfiguration le fonctionnement reste celui d'un onduleur triphasé ; aucune modification de l'algorithme de commande n'est requise et l'intégralité de la puissance nominale peut être fournie. Cependant, cette topologie nécessite 3 dispositifs de connexion et 3 dispositifs d'isolement (un par phase), ce qui pénalise la compacité du convertisseur.

Il paraît alors opportun de raccorder le bras additionnel au neutre de la machine (figure 6) : le nombre de dispositifs de connexion est alors réduit à un par phase. Il peut toutefois sembler préférable d'adjoindre également un interrupteur d'isolement au bras secours pour ne le relier qu'en cas de défaut et éviter ainsi toute circulation de courant dans ce bras. A l'inverse, il est envisageable, en mode normal, de faire jouer au quatrième bras un rôle de filtrage actif du neutre par une modulation vectorielle 4 bras [7]. Il est alors nécessaire de pouvoir isoler ce bras s'il subit une défaillance pour permettre la reconfiguration de l'onduleur.

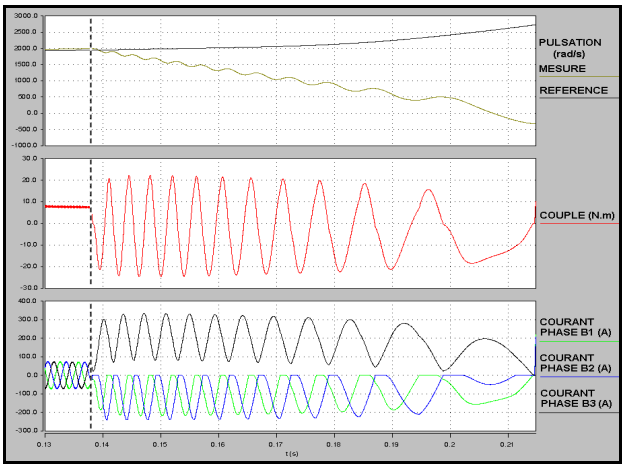


6. *Topologie d'onduleur à bras secours raccordé au neutre*

A. Procédure d'isolement d'un onduleur 4 bras.

Suite à la défaillance d'un semi-conducteur du convertisseur, la cellule de commutation correspondante est déconnectée de la phase de la machine. Pour que le dimensionnement des éléments de protection de l'interrupteur d'isolement ne soit pas excessif, il est nécessaire de minimiser l'énergie à dissiper et pour cela de réaliser le blocage à courant réduit.

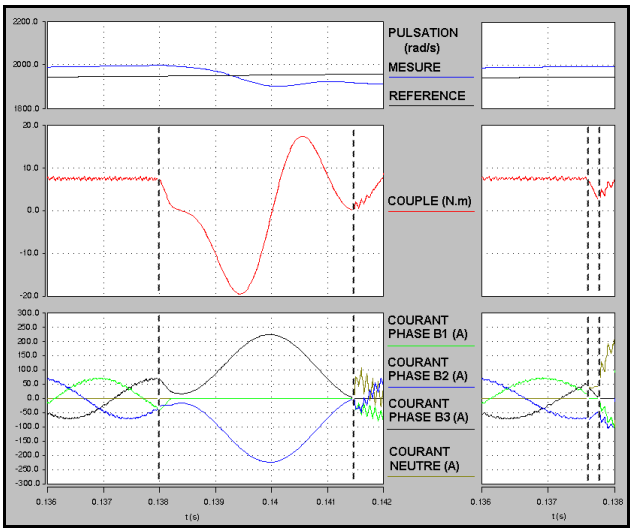
Or, pour une défaillance de type "court-circuit" d'un transistor, il n'est pas certain que le courant de phase s'annule rapidement. La stratégie proposée est d'ouvrir alors tous les autres transistors afin de provoquer une conduction intermittente de la phase moteur. Toutefois, comme la combinaison des fem impose la conduction des diodes et l'évolution du courant, il n'est pas certain d'obtenir l'annulation du courant avant de nombreuses périodes selon l'instant auquel se produit la défaillance et l'alternance du courant de phase. Les courants de phase et donc le couple peuvent subir des oscillations d'amplitudes élevées et la régulation de vitesse est nettement perturbée (figure 7).



7. *Après défaillance sur le bras B3 (pointillés), blocage de l'onduleur jusqu'à annulation du courant de phase*

Pour imposer une annulation plus rapide du courant et éviter des régimes transitoires de courant et de couple préjudiciables au convertisseur et à la machine, il est envisageable de profiter de l'annulation du courant dans l'une des phases restantes pour ouvrir celle-ci. Il ne subsiste alors qu'un seul chemin de court-circuit et le courant de phase peut s'exprimer comme la somme d'une sinusoïde et d'une exponentielle décroissante. Il s'annule donc plus rapidement (figure 8) mais le transitoire de couple reste conséquent.

Une autre alternative consiste à utiliser le bras secours pour forcer l'annulation du courant de phase. Lors du blocage de l'onduleur, l'interrupteur d'isolement relié au neutre est fermé ainsi que, dans le bras relié au neutre, le transistor de même niveau que le transistor défaillant. L'enroulement de la machine se trouve ainsi court-circuité et l'évolution du courant est conditionnée par la seule fem de la phase reliée au bras défaillant ; celle-ci peut imposer rapidement son annulation (figure 8). Si toutefois la décroissance de la valeur algébrique de ce courant ne dure pas jusqu'à son annulation, la reconfiguration des interrupteurs d'isolement et du bras secours en fonction des fem permet d'assurer un régime transitoire réduit.



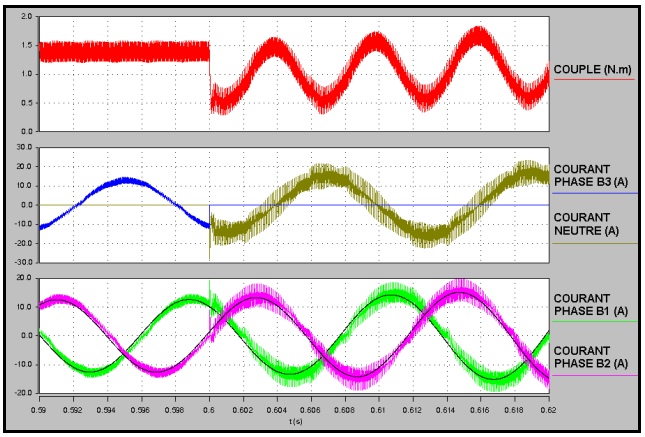
8. Fonctionnement normal, blocage de l'onduleur à l'apparition de la défaillance, isolement de la cellule défaillante et reconfiguration (à gauche : ouverture phase B, à droite : connexion bras secours)

B. Fonctionnement secours d'un onduleur 4 bras.

Une fois le bras défaillant isolé, l'organe superviseur connecte le bras secours au neutre de la machine. Celui-ci assure alors le retour des courants diphasés par le neutre et joue le rôle de diviseur de tension actif pour régler la tension du neutre.

Sans reconfiguration de la commande, le fonctionnement en marche secours se traduit par une ondulation de couple basse fréquence, comme le montre la simulation de la figure 9. Même si les asservissements de position et de vitesse ne s'en trouvent pas pénalisés, ce fonctionnement pourrait être dommageable à long terme pour la chaîne cinématique. La reconfiguration se traduit par une réduction du couple de la machine à 67% de la valeur nominale.

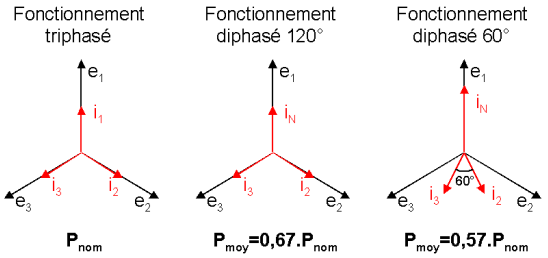
$$C_{em} = 2p\Phi_f I_{ph} \cos(\psi) \qquad (2)$$



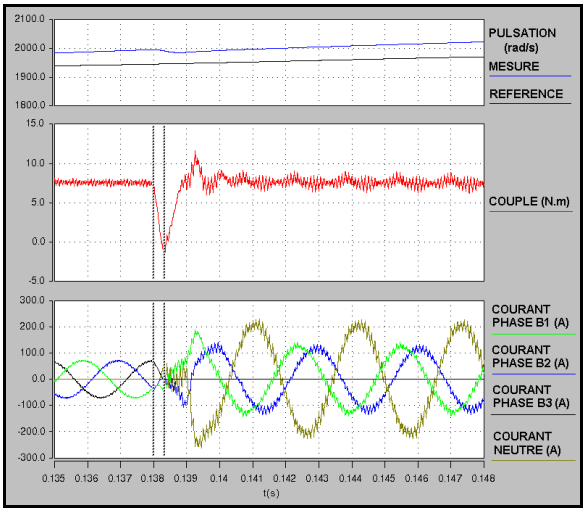
9. Fonctionnement normal puis reconfiguration sans modification de la commande (mode diphasé 120°)

Pour obtenir une répartition spatiale sinusoïdale du champ magnétique et ainsi minimiser l'ondulation de couple, les références de courant doivent être décalées de 60° comme indiqué en figure 10. Cette configuration, si elle est intéressante pour la qualité du couple, vient réduire un peu plus le couple moyen à 57% par rapport à une alimentation triphasée pour des courants de phase de même amplitude [8] :

$$C_{em} = \sqrt{3}p\Phi_f I_{ph} \cos(\psi) \qquad (3)$$



10. Modes de reconfiguration diphasée d'un onduleur à bras secours après isolement de la phase 1



11. Reconfiguration en mode diphasé 60° suite à la défaillance de type "court-circuit" d'un transistor

La simulation présentée à la figure 11 montre l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques pour une défaillance de type court-circuit d'un transistor suivie de la phase de blocage de l'onduleur, de l'auto-isolement et de la reconfiguration en

mode diphasé 60°. Pour limiter le transitoire de courant lors de la reconfiguration, les termes intégraux des régulateurs de courant sont remis à 0 lors de l'ouverture de l'interrupteur d'isolement du bras défaillant. Le bras de secours pilote la tension homopolaire ; il est commandé en tension avec un rapport cyclique α=1/2, assurant une tension entre le neutre et le point milieu du bus continu nulle en valeur moyenne.

Pour maintenir un fonctionnement à puissance nominale, les bras restants doivent donc accepter un courant majoré par un facteur 1,7 par rapport au courant nominal. Le courant dans le bras secours est la somme des courants de phase, il est alors 3 fois supérieur au courant nominal. La puissance silicium installée peut alors paraître importante par rapport à une topologie classique.

Toutefois, de par la conception de la fiabilité des systèmes, il est concevable de maintenir un fonctionnement post défaillance à puissance réduite. Alors seul le bras secours doit avoir un dimensionnement adapté à un courant 1,7 fois supérieur au courant nominal. Pour l'EHA, cela se traduit par une réduction de la charge d'arrêt à 57% de sa valeur nominale, la plage de vitesse restant inchangée [9].

D'autre part, la puissance dissipée par l'onduleur en mode secours est supérieure à celle du fonctionnement triphasé. Dans le cas du module EUPEC F4-150R06KL4, les pertes à puissance nominale sont majorées d'un facteur 1,27 (sans considérer la puissance dissipée dans les interrupteurs d'isolement), ce qui impose un dimensionnement adéquat du système de refroidissement.

Pour des actionneurs autres que l'EHA d'aileron, il est possible que le dimensionnement de l'onduleur soit lié à un point de fonctionnement dynamique. Dans ce cas, la reconfiguration du convertisseur n'impose pas nécessairement une réduction des performances statiques. En effet, de par le principe fondamental de la dynamique, la perte de puissance se traduirait alors par une réduction de l'accélération et donc des performances dynamiques.

$$C_{em} + C_{ch} = J\frac{d\Omega}{dt} \tag{4}$$

où J est l'inertie de la MSAP et C_{ch} le couple résistant de la charge. Le fonctionnement secours d'un tel actionneur ne se traduit que par l'augmentation de son temps de réponse.

C. Découplage des phases en mode diphasé.

Une légère ondulation basse fréquence du couple subsiste après la reconfiguration 60° des courants. Pour une alimentation triphasée de la machine avec neutre isolé, le flux total d'une phase est proportionnel au courant dans cette phase.

$$\begin{cases} \Phi_1 = (L-M)\cdot i_{ph1} \\ \Phi_2 = (L-M)\cdot i_{ph2} \\ \Phi_3 = (L-M)\cdot i_{ph3} \end{cases} \tag{5}$$

L est l'inductance propre statorique et M la mutuelle inductance entre phases (de valeur négative). Ainsi, la tension simple d'un enroulement n'est fonction que du courant circulant dans cette phase et de sa fem. En négligeant les chutes de tension dans les résistances statoriques :

$$v_i - v_N = e_i + (L-M)\cdot\frac{d(i_{ph_i})}{dt} \tag{6}$$

En mode diphasé, l'expression des flux fait apparaître un couplage entre les deux phases. En supposant la phase 3 isolée :

$$\begin{cases} \Phi_1 = L\cdot i_{ph1} + M\cdot i_{ph2} \\ \Phi_2 = L\cdot i_{ph2} + M\cdot i_{ph1} \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} v_1 - v_N = e_1 + L\cdot\dfrac{d(i_{ph1})}{dt} + M\cdot\dfrac{d(i_{ph2})}{dt} \\ v_2 - v_N = e_2 + L\cdot\dfrac{d(i_{ph2})}{dt} + M\cdot\dfrac{d(i_{ph1})}{dt} \end{cases} \tag{8}$$

Pour une commande performante, il est donc nécessaire de découpler ces grandeurs en utilisant un changement de base approprié :

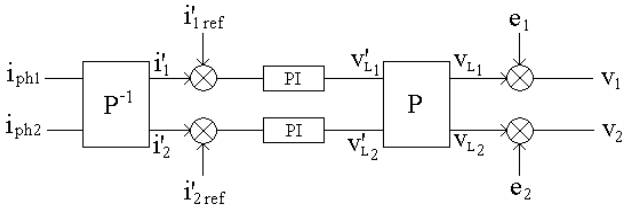
$$(\Phi) = \begin{vmatrix} L & M \\ M & L \end{vmatrix}\cdot(i_{ph}) \rightarrow (\Phi') = \begin{vmatrix} L+M & 0 \\ 0 & L-M \end{vmatrix}\cdot(i'_{ph}) \tag{9}$$

Selon le schéma de principe de la figure 12, le système découplé est caractérisé par la matrice de passage P et la matrice inverse P^{-1}.

$$P = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \qquad P^{-1} = \frac{1}{2}\cdot\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \tag{10}$$

Cela revient à réguler la somme et la différence des courants :

$$\begin{cases} i'_1 = \dfrac{i_1 + i_2}{2} \\ i'_2 = \dfrac{i_1 - i_2}{2} \end{cases} \tag{11}$$



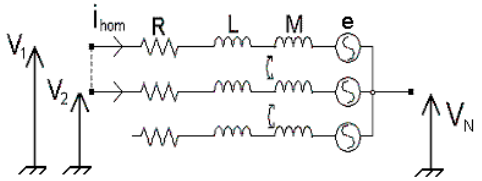
12. Commande avec découplage des courants

D. Courants homopolaires en mode diphasé.

Le mode diphasé se traduit également par l'apparition d'une tension homopolaire aux bornes de la machine :

$$\frac{v_1 + v_2}{2} - v_N = \frac{d\Phi_{hom}}{dt} \tag{12}$$

Φ_{hom} est le flux homopolaire et les autres notations proviennent du schéma électrique équivalent de la figure 13.

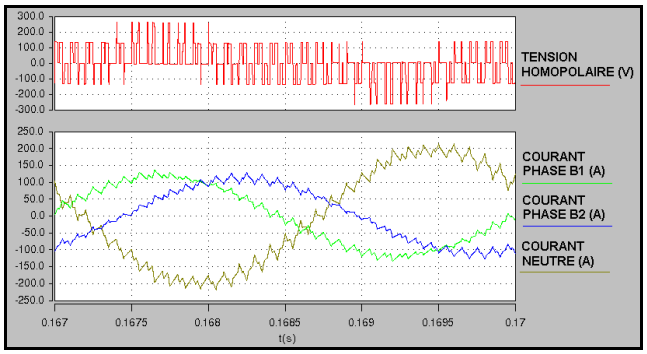


13. Schéma électrique équivalent de la machine

Il en résulte une ondulation de courant homopolaire à la fréquence de découpage (figure 14).

$$\frac{di_{\text{hom}}}{dt} = \frac{1}{L+M} \cdot \frac{d\Phi_{\text{hom}}}{dt} \qquad (13)$$

La mutuelle inductance a une valeur généralement de l'ordre la moitié de l'inductance propre. L'inductance qui limite l'ondulation de courant homopolaire ne vaut donc environ que le tiers de l'inductance cyclique (L-M) de la machine.



14. Ondulation de courant homopolaire

Cette composante homopolaire de courant ne crée pas de couple, elle génère seulement des pertes. Il est possible de filtrer cette composante par un dimensionnement approprié de la machine ou l'ajout d'une inductance en série entre le bras secours et le neutre de la machine ; ces solutions peuvent aussi réduire le transitoire de couple lors de la reconfiguration mais cela occasionne une augmentation de masse.

V. Conclusion

Il a été montré dans cet article l'intérêt d'une topologie d'onduleur 4 bras pour l'alimentation d'un EHA ou d'autres actionneurs d'un réseau de bord. La mise en sécurité d'une cellule défaillante et les différents modes de reconfiguration ont été décrits et simulés. La disponibilité de l'actionneur s'en trouve accrue au prix d'une légère augmentation de la puissance silicium installée et des pertes générées en mode secours. D'autre part, la surveillance et le diagnostic permanents de tels convertisseurs sont des facteurs d'amélioration de la continuité de service et de la maintenabilité des systèmes.

Ce travail se poursuit aujourd'hui dans le cadre d'une collaboration entre le LEEI et AIRBUS France.

VI. References

[1] O. V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of the reliability with an analysis of faults on variable frequency drives in industry", EPE'95.

[2] R.A. Hanna, S. Prabhu, "Medium-voltage ajustable speed drives – Users and manufacturers experiences, IEEE IAS, vol. 33, n°6, Nov. 1997.

[4] T.H. Liu, J.R. Fu, T.A. Lipo, "A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, pp. 910-918, Sept. 1993.

[5] J.R. Fu, T.A. Lipo, "A strategy to isolate the switching device fault of a current regulated motor drive", Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, vol. 2, pp. 1015-1020, 1993.

[6] T.Elch-Heb, J.P.Hautier, "Remedial strategy for inverter - induction machine system faults using two-phase operation", EPE, Brighton, 1993.

[7] A.L. Julian, G. Oriti, T.A. Lipo, "Elimination of common-mode voltage in three-phase sinusoidal power converters", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, issue 5, Sept. 1999, pp. 982-989.

[8] Y. Fan, "Commande optimisée d'un ensemble convertisseur-machine synchrone autopilotée fonctionnant en mode dégradé", thèse de doctorat, UST Lille, Mars 1993.

[9] B.A. Welchko, T.A. Lipo, T.M. Jahns & S.E. Schulz, "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies; a comparison of features, costs and limitations", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, pp. 1108-1116, July 2004.