

Impact de la dissymétrie sur la répartition des courants pour les onduleurs entrelacés couplés

Rita Mattar^{1,3}, Stéphane Lefebvre¹, Christelle Saber³, Eric Monmasson², Mickael Petit¹, Cyrille Gautier³, Marwan Ali³

¹SATIE, Conservatoire National des Arts et Métiers, 75003 Paris, France

²SATIE, Université de Cergy-Pontoise, 95000 Cergy, France

³Safran Tech, 78772 Magny-les-Hameaux, France

RESUME – L’impact de cas réalistes de dissymétrie de fabrication sur la répartition des courants des bras est présenté pour les onduleurs entrelacés magnétiquement couplés. L’étude des variations paramétriques des éléments passifs constituant le circuit électrique équivalent est réalisée en boucle ouverte. Cette variation paramétrique est faite en deux étapes. La première porte sur des cas simples de dissymétrie qui n’impactent qu’un seul ICT. La deuxième étape est basée sur la statistique des pires cas, formée par des cas multiples de dissymétrie sur plusieurs ICTs. Cette étude permet la compréhension du comportement des courants dans les cas de dissymétrie pour assurer leur contrôle et leur équilibrage. Ensuite, ces dissymétries sont simulées en boucle fermée afin de tester leurs impacts sur les rapports cycliques.

Mots-clés—Onduleurs entrelacés, Dissymétrie des coupleurs, Répartition des courants, Transformateurs InterCellules (ICT).

1. INTRODUCTION

Les architectures de réseau électrique envisagées dans le cadre de « l’avion plus électrique » (MEA) se basent sur une tension HVDC de 540V [1]. Les topologies d’onduleurs multiniveaux parallèles sont intéressantes pour accompagner la montée en puissance des convertisseurs sans augmenter drastiquement le niveau de tension. Ces topologies permettent une réduction des ondulations de courant de sortie et une augmentation de la fréquence apparente en utilisant les solutions d’entrelacement, c’est à dire une modulation déphasée (PS) [2], [3]. Elles peuvent également utiliser le couplage magnétique entre les inductances de chaque bras à l’aide de transformateurs InterCellules (ICT), qui permettent d’atténuer les ondulations des courants traversant chaque cellule de commutation et de réduire les pertes dans les coupleurs magnétiques ainsi que dans les composants actifs à semi-conducteurs [4]. Ceci permet aussi une réduction du volume et du poids des composants de filtrage de sortie.

D’après [3], la dissymétrie sur la répartition des courants entre les niveaux d’une même phase engendre une saturation des circuits magnétiques. Lorsque cette dissymétrie est importante, elle peut également provoquer des saturations de rapports cycliques lors de l’asservissement. Bien que plusieurs publications se concentrent sur l’impact d’une dissymétrie sur les courants de bras pour les onduleurs entrelacés séparés [3], il y a

peu de publications sur cet impact dans les onduleurs entrelacés couplés.

Par conséquent, une analyse de la répartition des courants des bras dans des cas probables de dissymétrie des coupleurs dans un onduleur entrelacé couplé sera présentée. Cela permettra la compréhension du comportement de ces courants en cas de dissymétrie pour assurer un meilleur équilibrage. Ensuite, une simulation en boucle fermée de ces cas de dissymétries est réalisée afin de tester leurs impacts sur les rapports cycliques.

2. ONDULEUR MULTINIVEAU ENTRELAÇÉ COUPLÉ

2.1. Topologie et Modélisation

L’onduleur étudié est un onduleur monophasé à 4 niveaux. Les bras sont magnétiquement couplés à l’aide des ICTs disposés en cascade cyclique [5]–[6] tel qu’illustré dans la Figure 1 où R_1, R_2, R_3 et R_4 sont les résistances séries équivalentes des enroulements; $L_{1a}, L_{2a}, L_{2b}, L_{3b}, L_{3c}, L_{4c}, L_{4d}$ et L_{1d} sont les inductances propres des enroulements; $M_{12a}, M_{23b}, M_{34c}$ et M_{14d} sont les inductances mutuelles des enroulements couplés.

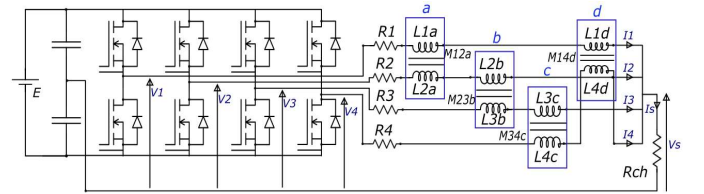


Figure 1: Schéma de l'onduleur monophasé entrelacé couplé à 4 niveaux

Les couplages magnétiques des différents ICT représentés dans la Figure 1 seront décrits par l’équation matricielle établie dans (1), où s est l’opérateur de Laplace.

2.2. Cahier des Charges

Afin d’évaluer l’impact de la variation des paramètres des ICTs sur la répartition des courants dans chacune des phases, une étude en boucle ouverte est considérée. Les simulations envisagées sur Matlab/Simulink, se reposent sur des paramètres physiques qui correspondent à un prototype existant dans le laboratoire de puissance 1kW ; $E = 100V$, $V_s = 14.14 V$.

$$\begin{pmatrix} V_1 - V_s \\ V_2 - V_s \\ V_3 - V_s \\ V_4 - V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + s.(L_{1a} + L_{1d}) & M_{12a}.s & 0 & M_{14d}.s \\ M_{12a}.s & R_2 + s.(L_{2a} + L_{2b}) & M_{23b}.s & 0 \\ 0 & M_{23b}.s & R_3 + s.(L_{3b} + L_{3c}) & M_{34c}.s \\ M_{14d}.s & 0 & M_{34c}.s & R_4 + s.(L_{4c} + L_{4d}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

3. DISSYMETRIES DES BRAS

Les cas considérés dans cette étude représentent des dissymétries de fabrication possibles. Le matériau magnétique sera supposé linéaire.

Le pourcentage d'erreur relative pour chaque courant de bras 'x' pour les cas de dissymétrie présentés dans la suite sera obtenu par simulation. Il est défini par l'équation (2) où $|I_x(j\omega_f)|_{a,d}$ et $|I_x(j\omega_f)|_{s,d}$ sont les amplitudes du courant x avec et sans dissymétrie respectivement à ω_f la pulsation de la fréquence fondamentale. C'est la seule fréquence mise en jeu car les inductances propres et mutuelles du prototype utilisé sont de l'ordre du mH, limitant ainsi les harmoniques correspondants aux hautes fréquences. De plus, les grandeurs à équilibrer en boucle fermée sont à la fréquence fondamentale.

$$\Delta|I_x(j\omega_f)| = \frac{|I_x(j\omega_f)|_{a,d} - |I_x(j\omega_f)|_{s,d}}{|I_x(j\omega_f)|_{s,d}} \cdot 100 \quad (2)$$

3.1. Dissymétrie résistive

Ce type de dissymétrie peut avoir comme origine la résistance à l'état passant $R_{ds}(ON)$ et/ou les pertes dans les coupleurs magnétiques. Les simulations ont montré que l'impact de ces types de dissymétrie résistive est négligeable avec $\pm 30\%$ de « ΔR_x ». Cela est conforme avec la théorie, puisque nous n'avons pas de composante DC dans les courants des bras d'onduleur, et que la composante inductive de l'impédance de ligne est fortement dominante à la fréquence fondamentale. Par conséquent, cette étude sera uniquement focalisée sur la dissymétrie inductive.

3.2. Dissymétrie inductive

3.2.1. Dissymétrie inductive sur un seul ICT

D'après les spécifications des constructeurs des noyaux magnétiques, nous supposons que les géométries sont maîtrisées. Les inductances propres et mutuelles dans un ICT sont données par les équations (3) et (4), où k est le coefficient de couplage, N le nombre de spires, S la surface de la section, l la longueur du circuit magnétique et i et j sont deux bras couplés:

$$L_i = \frac{S\mu_0\mu_{r_{ij}}}{l} \cdot N_i^2 \quad (3)$$

$$M_{ij} = k \cdot \frac{S\mu_0\mu_{r_{ij}}}{l} \cdot N_i N_j \quad (4)$$

3.2.1.1 Premier cas de dissymétrie inductive sur un seul ICT

Le premier cas de dissymétrie inductive étudié provient de la différence de répartition des spires (espacement) entre les deux enroulements du premier ICT. Cette différence induit une variation des inductances de fuite ce qui engendre une différence entre les inductances propres d'un même ICT [7]. Ceci correspond à une variation de l'inductance propre L_{1a} de « ΔL » = $\pm 5\%$. Les résultats de ce cas de dissymétrie inductive sont présentés dans la Figure 2. Le courant I_1 est le plus impacté, puisque cette dissymétrie est causée sur l'enroulement du premier ICT (L_{1a}) par rapport aux autres.

3.2.1.2 Deuxième cas de dissymétrie inductive sur un seul ICT

Le deuxième cas de dissymétrie inductive est relié à l'erreur sur la perméabilité du matériau magnétique entre le premier ICT et les autres ICTs. $\mu_{r_{12a}}$ est alors remplacé par $\delta \cdot \mu_r$, où δ est l'erreur sur la perméabilité et μ_r est la perméabilité de référence. La valeur de « δ » étudiée varie entre -30% et 30%. En réalité, c'est très fréquent d'avoir jusqu'à 30% d'erreur sur la

perméabilité du matériau magnétique comme mentionné dans la datasheet du matériau magnétique [8].

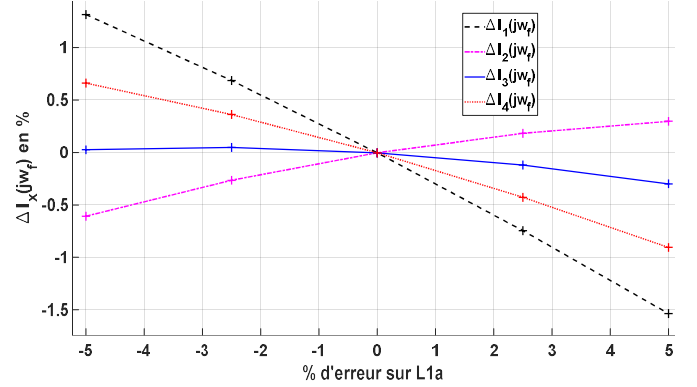


Figure 2: Erreur relative sur l'amplitude des courants des 4 bras en fonction de la dissymétrie sur L_{1a} ; $f_{mod} = 400\text{Hz}$; $f_{dec} = 10\text{kHz}$

Les résultats de ce cas de dissymétrie inductive sont présentés dans la Figure 3. Pour une valeur de dissymétrie donnée, les simulations montrent que $\Delta|I_x(j\omega_f)|$ est approximativement la même pour tous les courants de bras.

En effet, lorsque $\mu_{r_{12a}}$ augmente avec un coefficient de couplage constant, l'inductance de fuite augmente. Cela force i_1 et i_2 à diminuer de manière égale puisque les bras 1 et 2 sont couplés. Les courants i_3 et i_4 suivent la variation de i_1 et i_2 en raison du couplage magnétique des bras 3 et 4 avec les bras 2 et 1 respectivement. Le modèle analytique obtenu en remplaçant les équations (3) et (4) dans (1) tout en substituant $\mu_{r_{12a}}$ par $\delta \cdot \mu_r$ montre que la variation des courants des bras est proportionnelle à $\delta \cdot \mu_r$ expliquant ainsi la variation quasi-linéaire de $\Delta|I_x(j\omega_f)|$ dans la Figure 3.

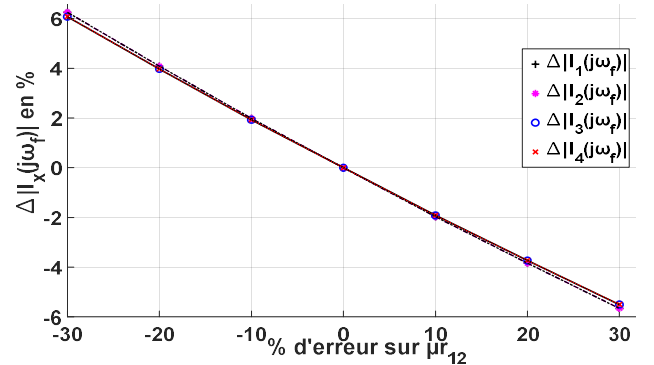


Figure 3: Erreur relative sur l'amplitude des courants des 4 bras en fonction de la dissymétrie sur $\mu_{r_{12}}$; $f_{mod} = 400\text{Hz}$; $f_{dec} = 10\text{kHz}$

3.2.2. Statistiques des pires cas

Dans la suite, une étude sur des cas combinant plusieurs dissymétries sur les ICTs est menée. Après l'identification des cas intéressants à étudier, leurs impacts sur les erreurs relatives sur l'amplitude des courants des bras en boucle ouverte ainsi que sur les rapports cycliques en boucle fermée sont présentés.

3.2.2.1 Identification des pires cas et leurs impacts sur la répartition des courants des bras en boucle ouverte

Afin de trouver les pires combinaisons de dissymétrie réalistes aboutissant à des erreurs relatives les plus élevées des courants des bras en boucle ouverte, un algorithme stochastique par essai de particules déjà implémenté par Matlab est utilisé. Ce dernier trouve les combinaisons de dissymétrie permettant de maximiser l'équation (2). Les résultats de l'algorithme présentent deux cas où les erreurs relatives sur les courants des

bras sont maximales. D'autres pires cas sont aussi identifiés et testés.

➤ Cas a :

Le premier cas de dissymétrie fournit par l'algorithme consiste à avoir une erreur de -30% par rapport au cas symétrique sur les perméabilités des matériaux magnétiques des quatre ICTs (voir Figure 4).

➤ Cas b :

Le deuxième cas de dissymétrie consiste à avoir une erreur de +30% par rapport au cas symétrique sur les perméabilités des matériaux magnétiques des quatre ICTs (voir Figure 4).

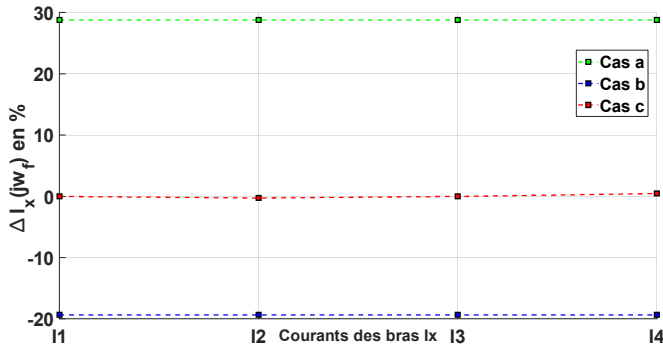


Figure 4: Erreur relative sur l'amplitude des courants des 4 bras pour les cas a, b et c

Ces deux cas engendrent des erreurs relatives remarquables supérieures à 19% en valeur absolue comme le montre la Figure 4. Ces cas de dissymétrie aboutissent à un équilibrage naturel des courants des bras comme vu dans le paragraphe précédent pour le même type de dissymétrie sur un seul ICT. Cet équilibrage est dû à la structure cyclique du couplage magnétique.

Une comparaison entre les résultats obtenus dans le cas où les quatre ICTs présentent une erreur sur les perméabilités du matériau magnétique variant entre -30% et +30% par rapport au cas symétrique (Figure 5) et ceux obtenus lorsqu'un seul ICT présente le même type de dissymétrie (Figure 3) montre que la variation de l'erreur relative sur les courants des bras en fonction du pourcentage de dissymétrie sur μ_r n'est plus linéaire lorsque cette dissymétrie est présente sur les quatre ICTs du système.

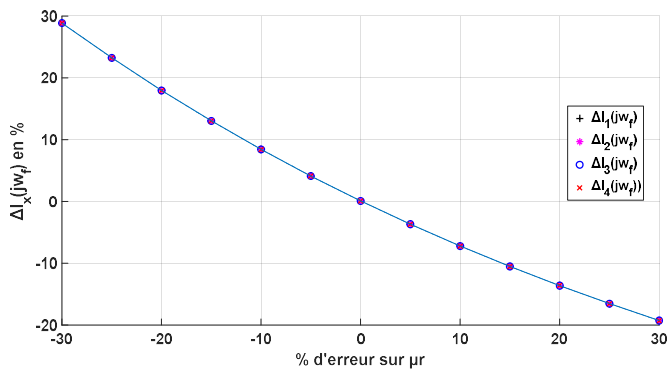


Figure 5: Erreur relative sur l'amplitude des courants des quatre bras en fonction de la dissymétrie sur μ_r des quatre ICTs

➤ Cas c :

Un troisième pire cas étudié consiste à avoir une erreur de +30% sur les perméabilités des matériaux magnétiques des ICTs a et c et une erreur de -30% sur les perméabilités des ICTs b et d par rapport au cas symétrique. Une compensation des dissymétries a lieu aboutissant à des erreurs relatives des courants des bras négligeables (voir Figure 4).

➤ Cas d :

Le quatrième cas étudié consiste à avoir une erreur de 5% en valeur absolue sur les inductances propres due à une différence d'espacement entre les deux enroulements de chacun des quatre ICTs. Nous remarquons que les erreurs relatives sur les courants des bras ne dépassent pas 3% comme le montre la Figure 6.

➤ Cas e :

Dans le cinquième cas étudié, les quatre ICTs présentent une erreur sur la perméabilité du matériau magnétique de -30% par rapport au cas symétrique ainsi qu'une erreur de -5% sur les inductances propres due à la différence de répartition des spires entre les deux enroulements de chacun des ICTs (Cas a + Cas d). Ce cas de dissymétrie engendre des erreurs relatives très grandes arrivant jusqu'à 37% (Figure 6).

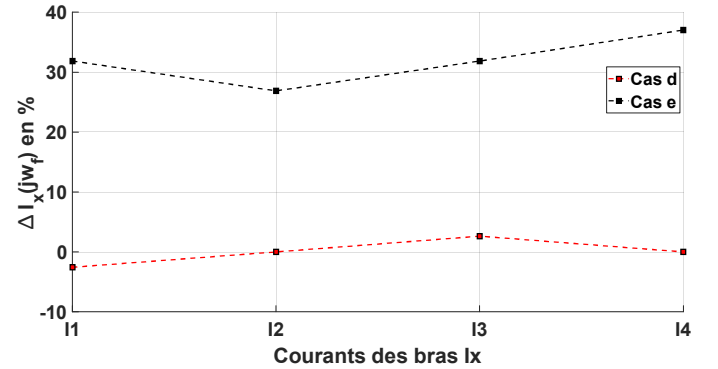


Figure 6: Erreur relative sur l'amplitude des courants des 4 bras pour les cas d et e

4. IMPACTS DE CES PIRES CAS SUR LES RAPPORTS CYCLIQUES

Dans la partie précédente, les cas intéressants à étudier ainsi que leurs impacts sur la répartition des courants des bras en boucle ouverte sont présentés. Certains cas présentent des erreurs relatives sur l'amplitude des courants des bras qui arrivent jusqu'à 37% par rapport au cas symétrique tandis que d'autres cas présentent des erreurs relatives négligeables.

Dans cette partie, une étude de ces pires cas en boucle fermée est menée afin d'analyser les influences de ces cas de dissymétries sur les rapports cycliques.

4.1. Stratégie de commande

La relation entre les tensions et les courants du coupleur magnétique est décrite à travers la matrice d'impédance de l'équation (1). Les termes non diagonaux de cette matrice représentent les effets de couplage magnétique. L'idée principale de cette stratégie consiste à utiliser un changement de base permettant de diagonaliser la matrice d'impédance et ainsi de découpler les commandes comme détaillé dans [9] et [10].

Les constantes de temps obtenues dans la diagonalisation représentent deux modes. Une des constantes de temps est liée au mode commun de l'onduleur et les autres constantes de temps sont liées au mode différentiel du flux magnétique à l'intérieur des ICTs comme expliqué dans [10].

La régulation de ces deux modes se fait en utilisant des régulateurs Proportionnel Intégral (PI). Ils sont réglés de manière conventionnelle, en utilisant la méthode de compensation des pôles dominants, afin d'obtenir un contrôle stable, rapide et assurant la bonne répartition des courants dans les bras pour le cas symétrique.

4.2. Impacts sur les rapports cycliques

Après la mise en place de cette stratégie de commande, chacun des cas de dissymétries multiples est testé pour les régulateurs calculés dans le cas symétrique. Les résultats des rapports cycliques obtenus sont présentés par la suite sachant que l'expression temporelle normalisée du rapport cyclique dans un onduleur est donnée par l'équation (5) où m_1 est la profondeur de modulation et φ est le déphasage par rapport à la référence de phase.

$$\alpha(t) = \frac{1}{2} + \frac{m_1}{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Bien que l'erreur relative sur les quatre courants des bras atteigne 28% en boucle ouverte pour le cas *a* de dissymétrie (Figure 4), les rapports cycliques des quatre bras ne saturent pas comme le montre la Figure 7. Cela est dû à l'équilibrage naturel créé par la structure cyclique du coupleur magnétique.

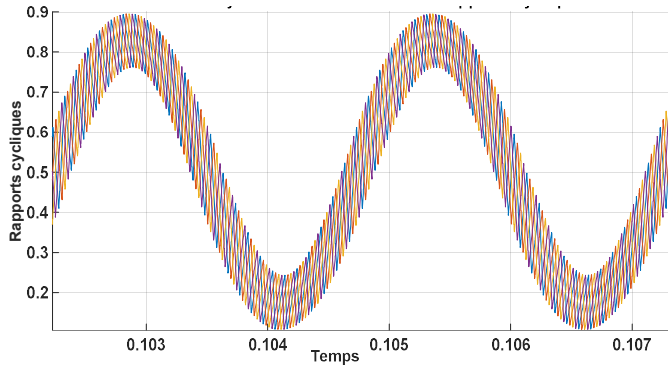


Figure 7: Effet de la dissymétrie du cas *a* sur les rapports cycliques

Pour la même raison que le cas précédent, les rapports cycliques des quatre bras ne saturent pas non plus pour le cas *b* de dissymétrie comme le montre la Figure 8, sachant que l'erreur relative sur les quatre bras en boucle ouverte atteint -19% (Figure 4).

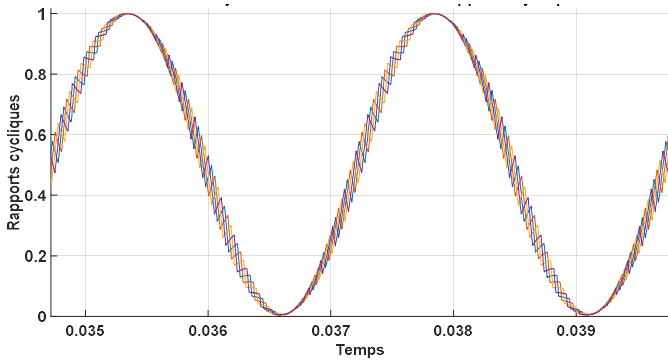


Figure 8: Effet de la dissymétrie du cas *b* sur les rapports cycliques

En comparant les Figure 7 et Figure 8, nous remarquons que les ondulations des rapports cycliques sont plus grandes dans le premier cas où l'erreur sur les perméabilités des matériaux magnétiques vaut -30% (cas *a*) que lorsque cette erreur vaut +30% (cas *b*). En effet, lorsque μ_r augmente avec un coefficient de couplage constant (géométries identiques), les inductances augmentent, ce qui conduit à une atténuation de l'ondulation plus importante.

Pour le cas *c* de dissymétrie où des erreurs de +30% sur les perméabilités des matériaux magnétiques des ICTs *a* et *c* et de -30% sur ceux de *b* et *d* sont appliquées, les rapports cycliques ne saturent pas comme cela est présenté dans la Figure 9.

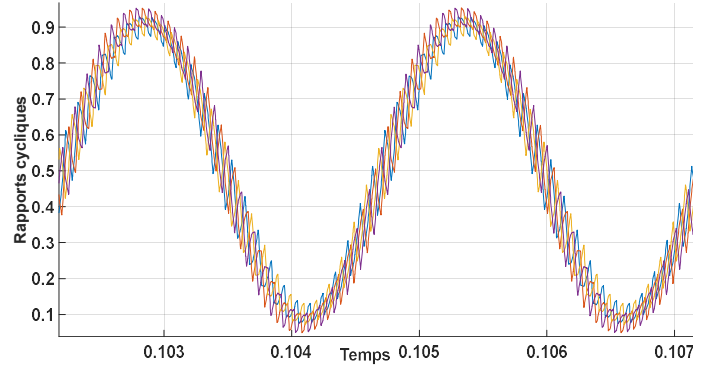


Figure 9: Effet de la dissymétrie du cas *c* sur les rapports cycliques

Dans le cas *d*, où les quatre ICTs présentent une différence de 5% en valeur absolue entre les inductances propres de chaque ICT, les erreurs relatives ne dépassent pas 3% en boucle ouverte. Malgré cela, on constate une saturation des rapports cycliques comme le montre la Figure 10.

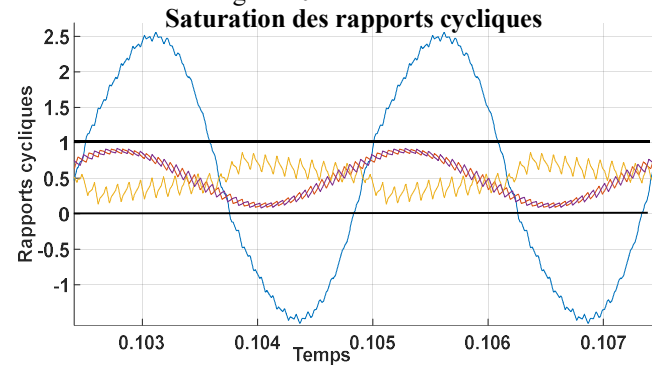


Figure 10: Effet de la dissymétrie du cas *d* sur les rapports cycliques

Dans le cas *e*, où les types d'erreurs des deux cas *a* et *d* sont appliqués simultanément, les erreurs relatives sur les courants atteignent une valeur de 37% (Figure 6). Ce cas de dissymétrie présente une saturation remarquable comme le montre la Figure 11.

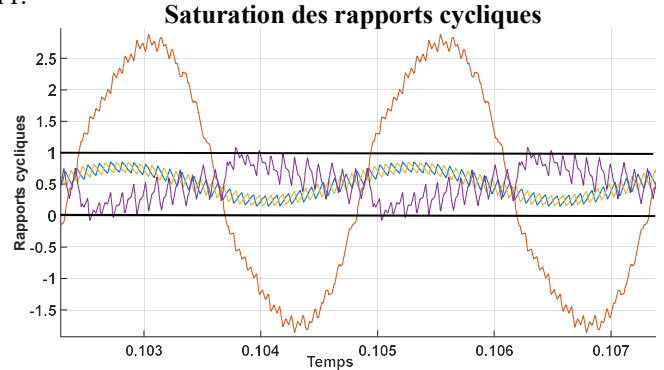


Figure 11: Effet de la dissymétrie du cas *e* sur les rapports cycliques

Après le test de ces pires cas en boucle fermée, nous pouvons déduire que la dissymétrie qui a le plus d'impact sur la saturation des rapports cycliques est celle qui provient de la différence entre les inductances propres. Cette dissymétrie peut être liée aux différences d'espacement des spires entre les deux enroulements de chacun des ICTs. Pour éviter ce risque, l'utilisation de composants magnétiques planaires intégrés où l'espacement entre les spires est bien maîtrisé est à favoriser.

5. CONCLUSIONS

Une étude en boucle ouverte a été menée sur la variation paramétrique du circuit équivalent d'un onduleur à quatre niveaux parallèles magnétiquement couplés. Des cas réalistes de dissymétrie de fabrication ont été identifiés, afin d'étudier leurs impacts sur la répartition des courants. Cette étude en boucle ouverte est divisée en deux parties. La première s'appuie sur des cas simples de dissymétrie qui n'impactent qu'un seul ICT. La seconde, basée sur la statistique des pires cas, est formée de cas plus dispersifs de dissymétrie sur plusieurs ICTs.

L'étude pour les cas simples de dissymétrie a montré que pour une dissymétrie due à la différence de valeurs sur les inductances propres d'un ICT, la variation de l'erreur relative pour un courant de bras est non linéaire et qu'elle varie d'un bras à un autre. Cependant, pour une dissymétrie due à la disparité des matériaux magnétiques du premier ICT (perméabilité relative), la variation de cette erreur est cette fois linéaire, et est identique pour tous les bras.

Pour les cas de dissymétries multiples, cinq cas ont été identifiés et testés en boucle ouverte. Ensuite, les effets de ces dissymétries ont été simulés en boucle fermée afin d'analyser leurs impacts sur les rapports cycliques.

Pour les cas où la dissymétrie provient d'une même erreur sur les perméabilités des matériaux magnétiques des quatre ICTs (arrivant jusqu'à 30% en valeur absolue), les mêmes erreurs relatives sur les courants des bras de l'ordre de 19% en valeur absolue sont obtenues. Pour le cas où les ICTs a et c présentent une erreur de +30% sur les perméabilités des matériaux magnétiques et les ICTs b et d présentent une erreur de -30% sur les perméabilités, une compensation des dissymétries a lieu aboutissant à des erreurs relatives entre les courants des bras négligeables. Pour ces cas, aucune saturation des rapports cycliques en boucle fermée n'est observée. Cet équilibre naturel des courants des bras est dû à la structure cyclique du coupleur magnétique.

Pour le cas où la dissymétrie est due à la différence des inductances propres liées à une différence d'espacement des spires (de l'ordre de 5%), nous trouvons des erreurs relatives en boucle ouverte qui ne dépassent pas 3%. Par contre, une saturation des rapports cycliques est observée en boucle fermée.

Pour le cas où la dissymétrie provient d'une erreur sur les perméabilités des matériaux magnétiques des quatre ICTs ainsi que d'une erreur due à la différence d'espacement des spires, nous obtenons en boucle ouverte de très fortes erreurs relatives sur les courants des bras arrivant jusqu'à 37%. En boucle fermée, les rapports cycliquesaturent aussi.

La réalisation expérimentale en cours s'appuie sur des composants magnétiques planaires intégrés. Dans ces composants, les espacements entre les spires seront bien maîtrisés. Cela nous permettra d'éviter les saturations des rapports cycliques dues à ce type de dissymétrie sur le coupleur magnétique.

6. REFERENCES

- [1] X. Roboam, "New trends and challenges of electrical networks embedded in 'more electrical aircraft,'" *Proc. - ISIE 2011 2011 IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 26–31, 2011.
- [2] B. Cougo, T. Meynard, and G. Gateau, "Impact of PWM methods and load configuration in the design of intercell transformers used in parallel three-phase inverters," *Informal Proc. 11th Int. Work. Electron. Control. Meas. Signals Their Appl. to Mechatronics, ECMSM 2013*, 2013.
- [3] J. Burkard, M. Pfister, and J. Biela, "Control Concept for Parallel Interleaved Three-Phase Converters with Decoupled Balancing Control," *2018 20th Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE'18 ECCE Eur.)*, pp. 1–10, 2018.
- [4] D. Shin *et al.*, "1.5MVA grid-connected interleaved inverters using coupled inductors for wind power generation system," *2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2013*, no. March 2015, pp. 4689–4696, 2013.
- [5] I. G. Park and S. I. Kim, "Modeling and analysis of multi-interphase transformers for connecting power converters in parallel," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 2, pp. 1164–1170, 1997.
- [6] N. Bouhalli, E. Sarraute, T. Meynard, M. Cousineau, and E. Labouré, "Optimal multi-phase coupled buck converter architecture dedicated to strong power system integration," *IET Conf. Publ.*, no. 538 CP, pp. 352–356, 2008.
- [7] P. É. Lévy, F. Costa, C. Gautier, and B. Revol, "Analytical calculation of the magnetic field radiated by A CM coil using conformal mapping methods," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 246–251, 2014.
- [8] Epcos, "Ferrites and accessories SIFERRIT material T38," no. May 2017.
- [9] Eduard SOLANO S'AENZ, "Etude des convertisseurs multicellulaires série - parallèle et de leurs stratégies de commande, approches linéaire et prédictive," *PHD thesis*, 2014.
- [10] C. Gautier, F. Adam, E. Laboure, B. Revol, and D. Labrousse, "Control for the currents balancing of a multicell interleaved converter with ICT," *2013 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2013*, vol. 1, 2013.
- [11] E. Labouré, A. Cunière, T. A. Meynard, and F. Forest, "A Theoretical Approach to InterCell Transformers , Application to Interleaved Converters," vol. 23, no. 1, pp. 464–474, 2008.
- [12] G. J. Capella, J. Pou, S. Member, S. Ceballos, and J. Zaragoza, "Current Balancing Technique for Interleaved Voltage Source Inverters with Magnetically-Coupled Legs Connected in Parallel," vol. 0046, no. c, pp. 1–10, 2014.
- [13] O. García, P. Zumel, A. De Castro, and J. A. Cobos, "Effect of the tolerances in multi-phase DC-DC converters," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron.*

Spec. Conf., vol. 2005, pp. 1452–1457, 2005.

- [14] M. Kasper, D. Bortis, and J. W. Kolar, “Scaling and balancing of multi-cell converters,” *2014 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Hiroshima -*

ECCE Asia 2014, no. Ipec, pp. 2079–2086, 2014.