

Influence du spectre de l'induction magnétique sur les pertes fer dans les stators de machines électriques

Alexandre GIRAUD^{1,2}, Alix BERNOT¹, Yvan LEFÈVRE², Jean-François LLIBRE²

¹ IRT Saint-Exupéry, Toulouse, France, alexandre.giraud@irt-saintexupery.com, ² LAPLACE, Université de Toulouse, France, lefevre@laplace.univ-tlse.fr

RÉSUMÉ – Cet article propose d'étudier expérimentalement la pertinence d'une analyse harmonique pour le calcul des pertes fer dans les matériaux magnétiques des machines électriques afin d'améliorer la représentativité de leurs modèles. Un banc d'essai avec un hystérésigraphe pouvant générer diverses formes d'ondes et mesurer les pertes fer induites sur des échantillons magnétiques sera utilisé. Des formes d'ondes sinusoïdales de différentes fréquences et amplitudes ont été étudiées seules, puis combinées entre elles. Ensuite l'influence de la phase des harmoniques a été observée. Il a ainsi été possible d'analyser l'impact de formes d'ondes complexes sur les pertes fer et collecter de nouvelles données afin d'établir ultérieurement des modèles de pertes fer sous spectre d'induction complexe.

Mots-clés—Pertes fer, Spectre complexe, harmoniques, hystérésis, matériaux magnétique, machines électriques.

1. INTRODUCTION

Suite à l'apparition et au développement de nouveaux systèmes d'alimentation comme la Modulation à Largeur d'Impulsion (MLI), les pertes fer dans les machines électriques ont augmenté. Elles dépendent des paramètres et des modes de fonctionnement de la MLI [1]. En effet, ce type de source d'énergie génère un nombre important d'harmoniques (harm.) hautes fréquences. Les modèles analytiques classiques de pertes fer [2] ne peuvent tenir compte convenablement des harmoniques et des formes d'ondes complexes. Plusieurs moyens d'atteindre un niveau de précision satisfaisant ont été proposés : des modèles numériques basés sur des modèles analytiques de calcul de champs [3] et des modèles utilisant des cartographies détaillées des pertes en fonction des champs et de leurs dynamiques [4], nécessitant dans les deux cas une grande puissance de calcul.

Cette étude s'intéresse en particulier à l'influence de la composition spectrale de l'induction magnétique sur les pertes fer. L'objectif est de rechercher des corrélations entre le contenu spectral de l'induction (nombre, phases et rangs des harmoniques, cycles mineurs...), les pertes globales et les pertes de chaque harmonique seul. La finalité est d'apporter une contribution à l'amélioration des modèles existants avec l'apport d'une approche harmonique permettant des calculs plus rapides.

2. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

2.1. Principe

Afin d'obtenir des modèles analytiques efficaces, il est nécessaire d'effectuer une étude comportementale sous différents niveaux de fréquences, fournissant ainsi des données essentielles concernant les pertes fer. De telles données phénoménologiques pourraient permettre d'établir de nouveaux modèles ou bien de perfectionner ceux existants. En réalité, les

pertes fer provoquées par des formes complexes d'inductions magnétiques doivent être analysées pour pouvoir décrire le comportement global des pertes. Pour cela, les pertes fer dues à des combinaisons de différentes inductions sinusoïdales sur différents matériaux magnétiques sont étudiées.

2.2. Protocole expérimental

Pour générer et contrôler l'induction de forme complexe dans les échantillons magnétiques, un hystérésigraphe MPG200 Brockhaus est utilisé, permettant également de mesurer les pertes fer ainsi produites. Celles-ci sont tout d'abord mesurées pour chaque induction sinusoïdale indépendamment des autres, avec ou sans offset DC. Elles le sont ensuite pour les différentes combinaisons de ces formes d'ondes « élémentaires », ayant ainsi divers rangs d'harmoniques (harm.), amplitudes et phases (ϕ), à l'instar de l'étude faite dans [5]. Les tests expérimentaux sont réalisés sur des tôles de Fer-Silicium NO20 de 60mm*60mm*0,35mm soumis à des inductions sinusoïdales de différentes fréquences et amplitudes, présentées Tableau 1.

Tableau 1 : Fréquences, amplitudes et pertes des formes d'ondes utilisées

Formes d'onde (sinusoïdale)	Fréquence (Hz)	B maximum atteinte (consigne)	P_{fer} (W/kg)
1	500	0,497 T (0,5 T)	8,010
		0,996 T (1 T)	25,70
		1,285 T (1,3 T)	43,97
2	1500	0,0963 T (20 % de 0,5 T)	1,729
		0,2014 T (20 % de 1 T)	7,086
		0,2601 T (20 % de 1,3 T)	11,409
3	3500	0,0507 T (10% de 0,5 T)	1,723
		0,10027 T (10% de 1 T)	6,6292
		0,13039 T (10% de 1,3 T)	11,025
4	9500	0,0507 T (10% de 0,5 T)	9,1045
		0,1002 T (10% de 1 T)	34,317
		0,13152 T (10% de 1,3 T)	55,55
5	19500	0,02108 T (4% de 0,5 T)	5,9421
		0,03997 T (4% de 1 T)	19,809
		0,06108 T (4% de 1,3 T)	46,104

Ensuite, des combinaisons de ces sinusoïdes de mêmes phases sont utilisées afin de générer des spectres complexes pour l'induction dans les échantillons. Le but étant de se rapprocher des formes d'ondes de l'induction dans une machine électrique, ces fréquences et ces amplitudes ont été spécifiquement choisis. Ainsi, avec une fréquence fondamentale à 500 Hz, une harmonique à 1500Hz correspond au rang 3, 3500 Hz au rang 7, 9500 Hz au rang 19 et 19500 Hz au rang 39. Par exemple, pour une machine alimentée par MLI, les harmoniques de rang 3 et 7 représentent le fondamental et l'influence de la structure de la machine, celles de rang 19 à une fréquence de découpage de 10 kHz et celles de rang 39 à une fréquence de découpage de 20 kHz. Les amplitudes utilisées pour l'induction sont présentées Tableau 1 et sont également choisies pour se rapprocher d'une alimentation MLI ; ces dernières étant liées, entre autres, à l'inductance des phases de la machine.

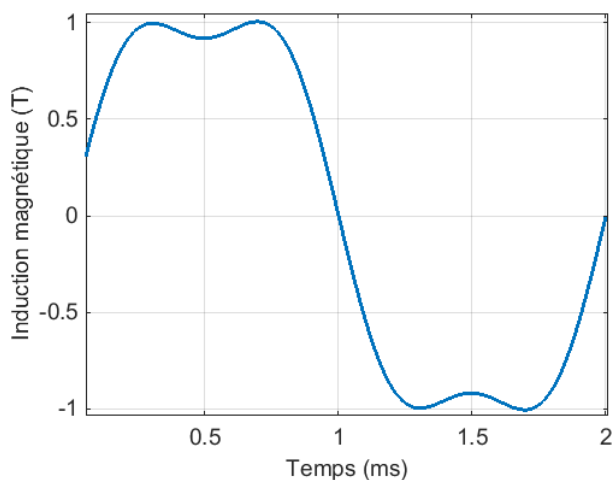


Figure 1 : Induction magnétique composée des sinusoïdes 1 et 2 - 1T 500Hz

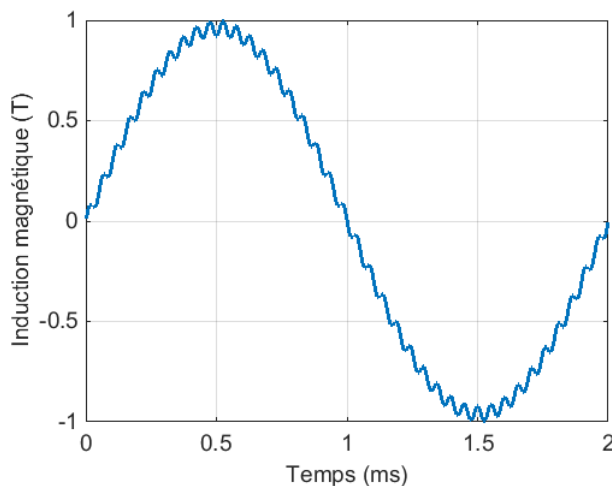


Figure 2 : Induction magnétique composée des sinusoïdes 1 et 5 - 1T 500Hz

Les signaux utilisés sont donc du type de l'équation (1) :

$$B(t) = \underline{B}(\sin(2\pi f \cdot t) + R \cdot \sin(2\pi(f \times rang) \cdot t)) \quad (1)$$

Où :

- \underline{B} désigne l'amplitude du fondamental de l'induction
- f sa fréquence fondamentale
- R représente le rapport entre l'amplitude de l'harmonique et celle du fondamental

- *rang* désigne le rang de l'harmonique utilisée

Les figures 1 et 2 présentent respectivement la combinaison des formes d'onde 1 et 2 et la combinaison de 1 et 5 à 500Hz et 1T. L'amplitude du signal combiné sera différente de l'amplitude du fondamental, les amplitudes de chaque harmonique restant les mêmes. Les comparaisons se font à même niveau d'induction du fondamental.

Dans cet article nous nous limiterons à une harmonique seulement pour en avoir la maîtrise et justement essayer d'en estimer sa contribution aux pertes fer. Pour être réellement représentatif de la MLI, il faudrait directement en générer un signal et l'étudier, mais il serait alors plus complexe d'analyser l'interdépendance des harmoniques sur les pertes. Une étude sur des formes d'onde plus représentatives représentera la suite logique du travail effectué ici.

3. INFLUENCE DE LA FREQUENCE DES HARMONIQUES

La Figure 3 représente les cycles d'hystérésis pour une amplitude de \underline{B} de 1T avec une harmonique de rang 3 et $R = 20\%$. La Figure 4 le même cycle pour un rang 7 et $R = 10\%$, la Figure 5 pour un rang 19 et $R = 10\%$ et enfin la Figure 6 pour un rang 39 et $R = 4\%$.

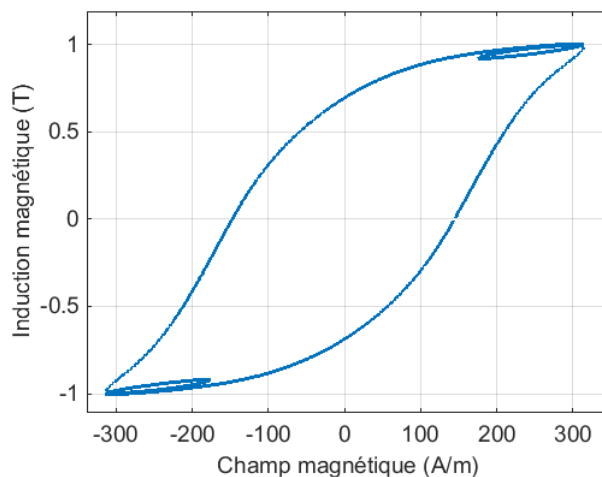


Figure 3 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 3 - 1T 500Hz

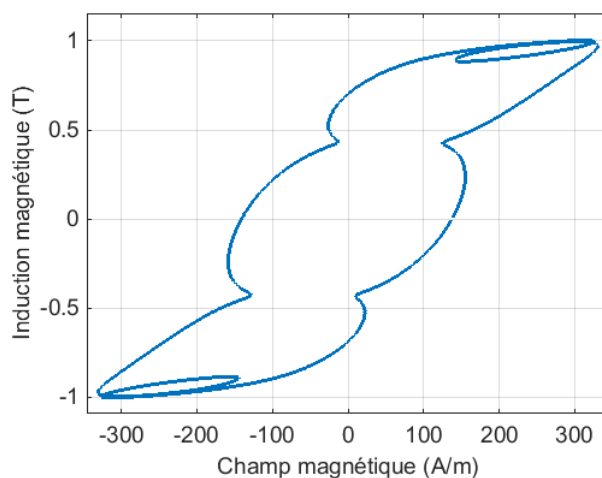


Figure 4 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 7 - 1T 500Hz

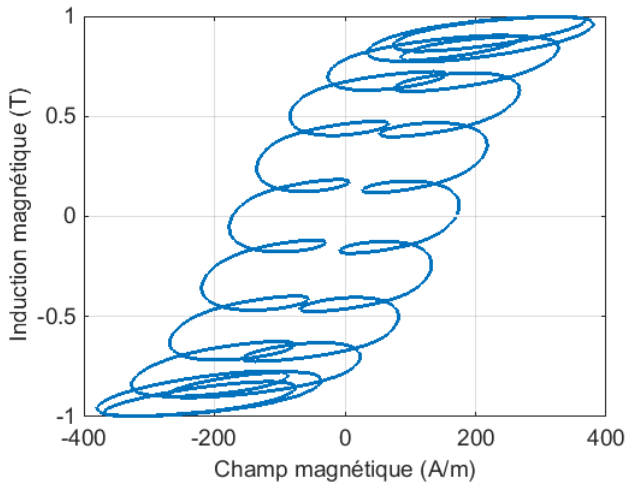


Figure 5 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 19 - 1T 500Hz

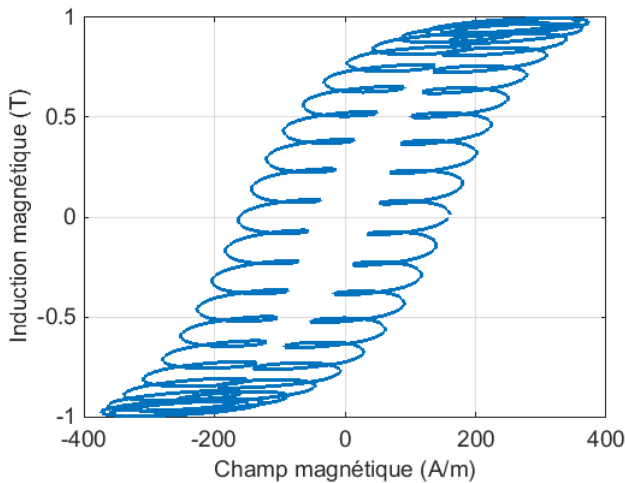


Figure 6 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 39 - 1T 500Hz

Le contenu harmonique des différentes combinaisons de sinusoïdes induit des ondulations sur le cycle d'hystérésis. Lorsque la variation de l'amplitude de l'harmonique est assez grande par rapport à la variation d'amplitude du fondamental, les ondulations se rebouclent sur elles-mêmes pour former un cycle mineur au sein du cycle d'hystérésis principal. Ce dernier est appelé cycle majeur et correspond au cycle du fondamental sinusoïdal.

Il est ainsi possible de prévoir le nombre d'ondulations sur ce cycle majeur en fonction du contenu harmonique : il y a autant d'ondulations que le rang de l'harmonique moins un. En effet, une harmonique de rang 1 n'existe pas puisqu'il s'agit du fondamental. Ainsi pour une harmonique de rang 3 (Figure 3) il y a deux ondulations (ici des cycles mineurs) et pour une harmonique de rang 7 (Figure 4) on peut en compter six. En réalité, si l'on ajoute au compte le cycle majeur lui-même, on retrouve directement le rang de l'harmonique.

Le Tableau 2 regroupe les pertes fer massiques pour toutes les combinaisons proposées précédemment, pour 0,5T, 1T et 1,3T. Il a été choisi de ne pas dépasser 1,3T pour s'approcher de la saturation au maximum tout en gardant une régulation du MPG200 efficace. Au-delà, le contenu harmonique gêne voire empêche la régulation.

Tableau 2 : Pertes fer massiques pour chaque combinaison d'harmoniques présentées Figures 3, 4, 5 et 6 - pour 0,5T, 1T et 1,3T

Amplitude de \underline{B}	Rang harm. (composition des formes d'ondes)	Fréquence harm.	R (B réelle)	Pertes fer (W/kg)
0,5 T	3 (1 et 2)	1,5 kHz	20% (0,437 T)	7,004
	7 (1 et 3)	3,5 kHz	10% (0,5085T)	8,532
	19 (1 et 4)	9,5 kHz	10% (0,544 T)	16,2
	39 (1 et 5)	19,5 kHz	4% (0,516 T)	15,31
1 T	3 (1 et 2)	1,5 kHz	20% (0,873T)	25,671
	7 (1 et 3)	3,5 kHz	10% (1,0195T)	30,257
	19 (1 et 4)	9,5 kHz	10% (1,088T)	60,82
	39 (1 et 5)	19,5kHz	4% (1,034 T)	56,92
1,3	3 (1 et 2)	1,5 kHz	20% (1,1327T)	37,227
	7 (1 et 3)	3,5 kHz	10% (1,321 T)	59,642
	19 (1 et 4)	9,5 kHz	10% (1,088T)	202,4
	39 (1 et 5)	19,5 kHz	4% (1,3461T)	121,35

Tableau 3 : Ecarts relatifs entre la somme des pertes fer du fondamental et de son harmonique et les pertes fer de la combinaison du fondamental et de son harmonique

Combinaison de formes d'onde	Amplitude de \underline{B} (consigne)	Pertes fer de la combinaison (W/kg)	Somme des pertes fer de chaque sinusoïde (W/kg)	Ecart relatif - voir (2)
1 et 2 (R=20%)	0,5 T	7,004	9,739	39,049%
	1 T	25,671	32,786	27,72%
	1,3 T	37,227	55,379	48,76%
1 et 3 (R=10%)	0,5 T	8,8346	9,733	10,17%
	1 T	30,257	32,3592	6,948%
	1,3 T	59,642	54,995	-7,792%
1 et 4 (R=10%)	0,5 T	16,2	17,1145	5,645%
	1 T	60,82	59,87	-1,562%
	1,3 T	202,4	99,52	-50,83%
1 et 5 (R=4%)	0,5 T	15,31	13,9521	-8,87%
	1 T	56,92	45,509	-20,05%
	1,3 T	121,35	90,074	-25,77%

Le Tableau 3 regroupe les différents écarts relatifs E_r entre la somme des pertes fer du fondamental et de son harmonique et les pertes fer de la combinaison du fondamental et de son harmonique tel que :

$$E_{r1} = \frac{[P_{fer}(1) + P_{fer}(X)] - P_{fer}(1 \text{ et } X)}{P_{fer}(1 \text{ et } X)} \quad (2)$$

Avec $X \in \{2,3,4,5\}$

Traditionnellement l'écart relatif se calcule en valeur absolue, mais ici, puisque par définition les pertes fer ne sont jamais négatives, nous avons décidé de travailler en valeurs réelles pour que le signe de l'écart relatif permette d'indiquer laquelle des deux données comparées est la plus grande. Ainsi calculé, l'écart relatif traduit en quelque sorte la linéarité des pertes fer vis-à-vis de la fréquence. Plus il sera proche de zéro, plus la séparation des pertes entre fondamental et harmonique sera possible : analytiquement parlant, les pertes fer d'un spectre complexe harmonique seront la somme linéaire de chaque contributions.

Il apparait tout d'abord que pour les différents rangs d'harmonique étudiés ici, plus l'amplitude du fondamental de l'induction est élevée (donc plus on se rapproche de la saturation), plus l'écart relatif de (2) est faible (excepté pour 1,3T pour l'harmonique 3). On constate la même évolution quand la fréquence de l'harmonique augmente. D'ailleurs, pour les harmoniques 7, 19 et 39 l'écart relatif devient négatif (partiellement pour les harmoniques 7 et 19, complètement pour l'harmonique 39). Ainsi, plus la fréquence des harmoniques est haute, plus leurs contributions rajoute des pertes par rapport à la somme des pertes de chaque harmonique.

D'une manière générale, lorsque le matériau est proche de la saturation, l'écart relatif est important et son comportement vis-à-vis de la fréquence des harmoniques n'est pas linéaire.

Il faut cependant moduler ces résultats avec l'incertitude propre à toute mesure expérimentale et avec le fait que le MPG 200 ne peut pas garantir exactement le même niveau d'amplitude d'induction pour chaque mesure, même si l'incertitude vis-à-vis de la consigne reste inférieure à 5%. Ainsi, après avoir observé l'influence de la fréquence des harmoniques, il est nécessaire d'étudier celle de leurs phases.

4. INFLUENCE DE LA PHASE DES HARMONIQUES

Dans cette dernière partie, il est question de l'influence de la phase des harmoniques. Ne seront étudiées ici que les combinaisons des formes d'onde 1 et 2 et 1 et 5, soit un sinus à 500Hz avec respectivement une harmonique 3 et une harmonique 39, leurs amplitudes toujours à 0,5T, 1T et 1,3T.

Les Figures 7 et 8 comparent les trois inductions avec les phases différentes, pour chacune des combinaisons à 1T. Les Figures 9 et 10 présentent les trois cycles d'hystérésis pour respectivement les harmoniques 3 et 39, pour les trois phases, à 1T. Le Tableau 4 donne quant à lui les pertes fer massiques dans tous les cas, ainsi que leurs écarts relatifs aux les pertes avec harmonique en phase selon la relation :

$$E_{r2} = \frac{P_{fer}(\phi) - P_{fer}(\phi = 0)}{P_{fer}(\phi = 0)} \quad (3)$$

Tout d'abord, pour l'harmonique basse fréquence (rang 3), les pertes fer sont plus importantes lorsqu'elle n'est pas en phase. Cela se remarque sur la Figure 9, puisque les aires des cycles d'hystérésis avec une phase non nulle sont plus grands que celui du cycle avec l'harmonique en phase. Par ailleurs, pour 0,5T et 1T, on retrouve des écarts relatifs similaires aux résultats de [5]. En revanche, avec l'harmonique de rang 39, cette influence est positive : les harmoniques hautes fréquences génèrent moins de pertes supplémentaires lorsqu'elles ne sont pas en phase. L'écart reste d'ailleurs relativement constant, mais non négligeable. Néanmoins, il faut ici aussi considérer les conditions expérimentales et modérer quelque peu ces conclusions, essentiellement pour des harmoniques de rang faibles où l'écart entre l'amplitude du fondamental \underline{B} et l'amplitude crête du signal combiné est important (1,13T en phase, respectivement 1,56T et 1,44T pour l'harmonique 3 en opposition de phase et celui en quadrature, pour un fondamental de 1,3T). En effet, du fait de la superposition des harmoniques, le signal combiné aura un maximum différent de son fondamental. Les niveaux de pertes variant significativement selon le niveau d'induction, le signal combiné se trouvera dans des niveaux d'induction assez différents selon la phase, expliquant l'écart de pertes, notamment lorsque la combinaison de signaux approche l'induction de la saturation. C'est le cas dans nos mesures, où 1,3T pour \underline{B} induit des amplitudes crêtes faisant saturer le matériau (1,56T) et donc exploser les pertes fer.

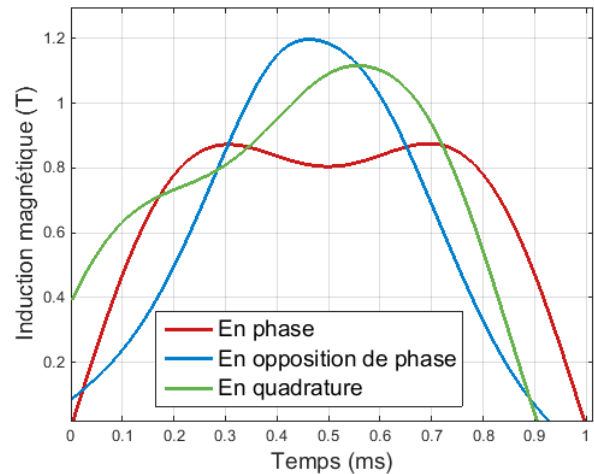


Figure 7 : Comparaison des inductions pour les 3 phases de l'harmonique 3 sur une demi période - 500Hz 1T

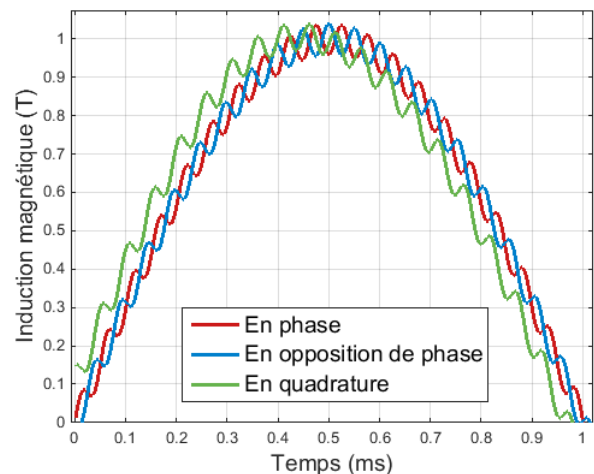


Figure 8 : Comparaison des inductions pour les 3 phases de l'harmonique 3 sur une demi période - 500Hz 1T

Tableau 4 : Pertes fer massiques et Ecart relatifs selon la phase des harmoniques

Rang harm.	Amplitude de \underline{B}	Phase harm.	Pertes fer (W/kg) (B réelle)	Ecart relatif (%)
3 (R=20%)	0,5 T	$\phi = 0$	7,004	
		$\phi = \pi$	10,09 (0,601T)	44,06%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	9,414 (0,5564T)	34,41%
	1 T	$\phi = 0$	25,671	
		$\phi = \pi$	35,073 (1,197T)	36,62%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	31,229 (1,116T)	21,66%
	1,3T	$\phi = 0$	37,227	
		$\phi = \pi$	122,24 (1,563T)	228,36%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	71,991 (1,445T)	93,38%
39 (R=4%)	0,5 T	$\phi = 0$	15,31	
		$\phi = \pi$	12,578 (0,5207T)	-17,85%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	12,619 (1,351T)	-17,58%
	1 T	$\phi = 0$	56,92	
		$\phi = \pi$	45,895 (1,0404T)	-19,37%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	45,118 (1,0385T)	-20,73%
	1,3T	$\phi = 0$	121,35	
		$\phi = \pi$	106,41 (1,35T)	-12,31%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	106,66 (1,351T)	-12,11%

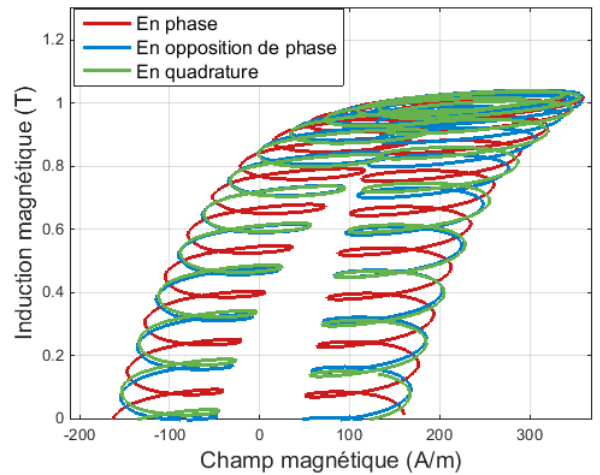


Figure 10 : Comparaison des cycles d'hystérésis pour les 3 phases de l'harmonique 39 - 500Hz 1T

5. CONCLUSION

Ces premiers résultats apportent des informations sur l'influence du contenu spectral de l'induction sur les pertes fer. La fréquence des harmoniques joue un rôle non négligeable : les harmoniques basses fréquences génèrent moins de pertes supplémentaires que les harmoniques hautes fréquences. L'amplitude de l'induction joue également un rôle puisque plus elle sera élevée, plus la contribution des pertes des harmoniques sera importante. Dans la plupart des cas, l'écart relatif reste non négligeable, traduisant un comportement non linéaire du matériau vis-à-vis de la fréquence des harmoniques et des pertes fer qu'elles génèrent.

Par ailleurs, la phase des harmoniques influe également sur les pertes fer : son influence sera négative pour les harmoniques basses fréquences et positive pour les harmoniques hautes fréquences. Ce point est très intéressant si l'on considère l'influence de la structure des machines électriques sur le contenu spectral de l'induction, les harmoniques de rangs faibles y étant liées.

Ces conclusions ouvrent la voie à de nouvelles études afin de corroborer ou non ces résultats. Ajouter du contenu spectral et coupler les deux phénomènes seraient la suite logique de cette étude, en apportant des résultats plus précis sur le design de la structure et de l'alimentation de la machine.

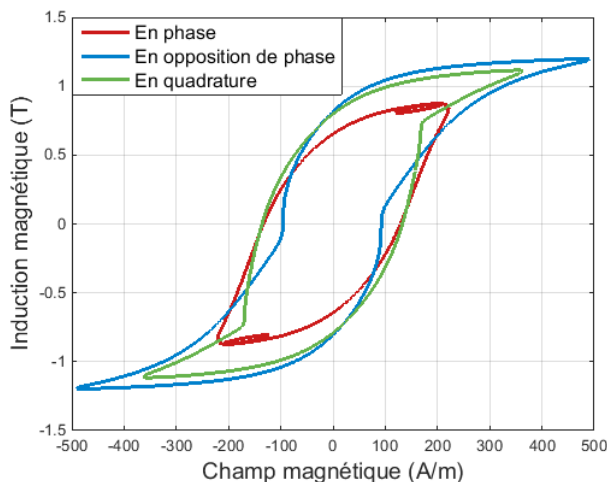


Figure 9 : Comparaison des cycles d'hystérésis pour les 3 phases de l'harmonique 3 - 500Hz 1T

6. RÉFÉRENCES

- [1] A.Boglietti, « Comparison of Lamination Iron Losses Supplied by PWM Voltages : US and European Experiences », IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, 2005
- [2] G.Bertotti, « General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials », IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, n°1, 1988
- [3] O.De La Barrière, H.Ben Ahmed, M.Gabsi et M.LoBue, « Computation of the Losses in a Laminated Ferromagnetic Material Under Bidirectional Induction Excitation », IEEE Transaction on Magnetics, vol. 46, n°2, 2010
- [4] A.Frias, A.Kedous-Lebouc, C.Chillet, L.Albert et L.Calegari, « Electrical steel solicitation in traction electrical machine », IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, 2012
- [5] K.Yamazaki, N.Fukushima, « Experimental Validation of Iron Loss Model for Rotating Machines Based on Direct Eddy Current Analysis of Electrical Steel Sheets », IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, Miami, 2009.