

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

¹IRT Saint-Exupéry, Toulouse, France, alexandre.giraud@irt-saintexupery.com, ²LAPLACE, 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). 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 choisies. Ainsi, avec une fréquence fondamentale à 500 Hz, une harmonique à 1500 Hz 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.

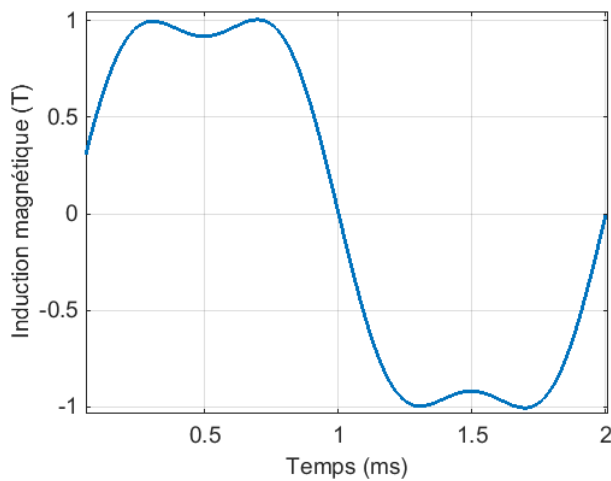


Figure 1 : Induction magnétique composée des sinusoïdes 1 et 2 - 1T 500Hz

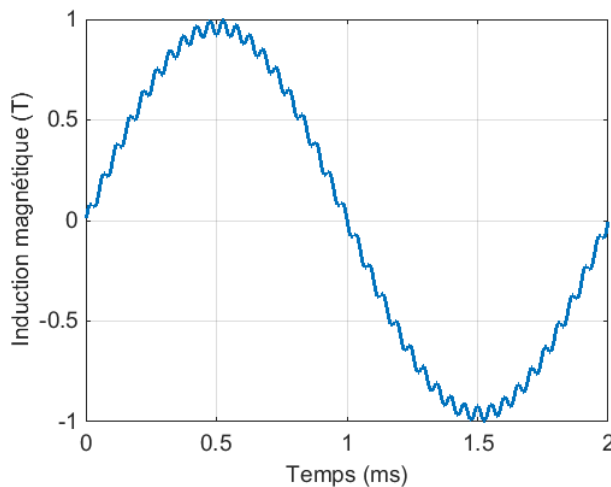


Figure 2 : Induction magnétique composée des sinusoïdes 1 et 5 - 1T 500Hz

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.

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 B de 1T avec une harmonique de rang 3 et $R = 20\%$. La Figure 4 le mêmes cycles 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 $R = 4\%$.

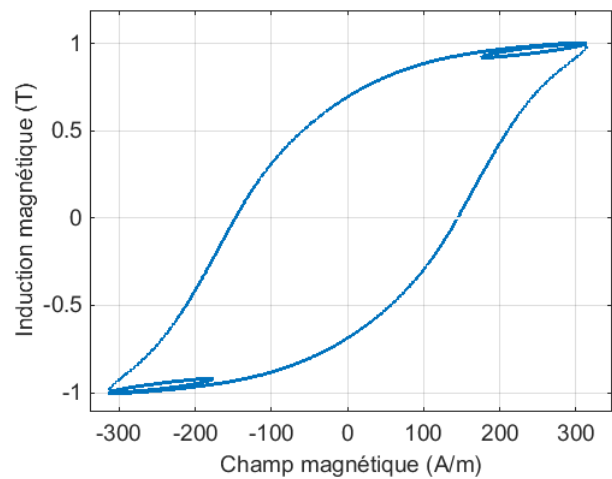


Figure 3 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 3 - 1T 500Hz

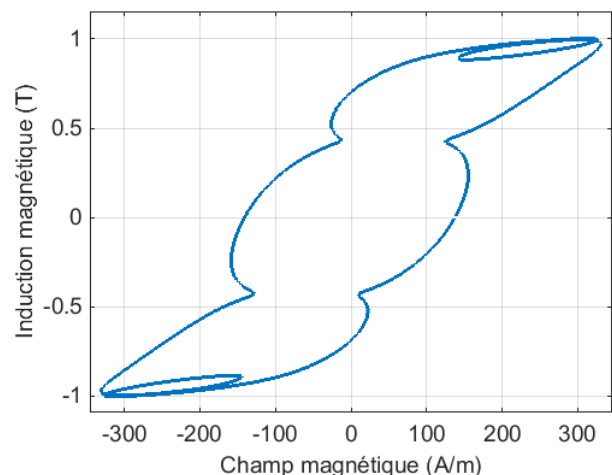


Figure 4 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 7 - 1T 500Hz

MPG200 efficace. Au-delà, le contenu harmonique gêne voire empêche la régulation.

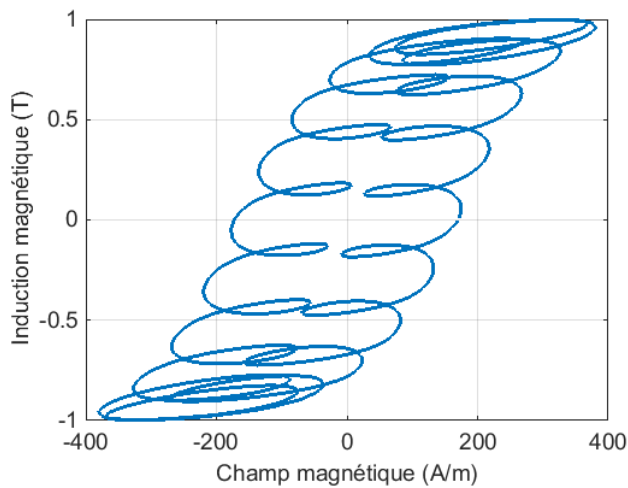


Figure 5 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 19 - 1T 500Hz

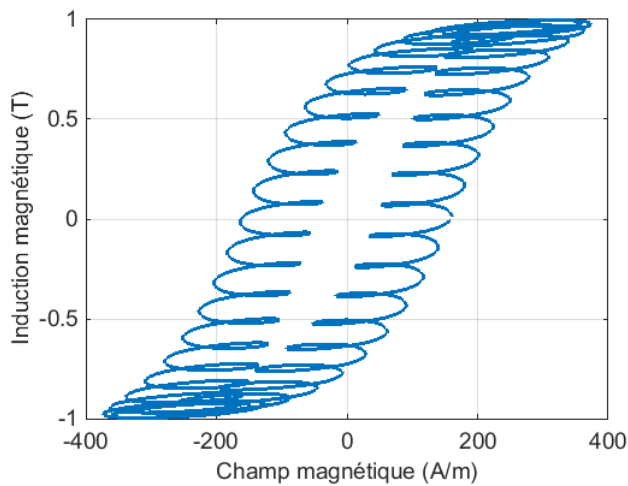


Figure 6 : Cycle d'hystérésis de la combinaison de 1 et 39 - 1T 500Hz

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

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

Amplitude de B (consigne)	Rang harm. (composition des formes d'ondes)	Fréquence harm.	R (amplitude réellement atteinte)	Pertes fer (W/kg)
0,5 T	3 (1 et 2)	1,5 kHz	20% (0,501 T)	11,1875
	7 (1 et 3)	3,5 kHz	10% (0,503 T)	8,8346
	19 (1 et 4)	9,5 kHz	10% (0,4981 T)	12,9676
	39 (1 et 5)	19,5 kHz	4% (0,4993 T)	11,629
1 T	3 (1 et 2)	1,5 kHz	20% (1,0042 T)	37,2746
	7 (1 et 3)	3,5 kHz	10% (1,002 T)	29,7334
	19 (1 et 4)	9,5 kHz	10% (0,9988 T)	47,7982
	39 (1 et 5)	19,5kHz	4% (0,9966 T)	41,997
1,3	3 (1 et 2)	1,5 kHz	20% (1,2984 T)	66,7645
	7 (1 et 3)	3,5 kHz	10% (1,297 T)	56,412
	19 (1 et 4)	9,5 kHz	10% (1,2982 T)	96,044
	39 (1 et 5)	19,5 kHz	4% (1,2945T)	87,926

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 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	11,1875	9,739	12,95%
	1 T	37,2746	32,786	12,04%
	1,3 T	66,7645	55,379	17,05%
1 et 3 (R=10%)	0,5 T	8,8346	9,733	-10,17%
	1 T	29,7334	32,3592	-8,83%
	1,3 T	56,412	54,995	2,51%
1 et 4 (R=10%)	0,5 T	12,9676	17,1145	-31,98%
	1 T	47,7982	59,87	-25,26%
	1,3 T	96,044	99,52	-3,62%
1 et 5 (R=4%)	0,5 T	11,629	13,9521	-19,98%
	1 T	41,997	45,509	-8,36%

	1,3 T	87,926	90,074	-2,44%
--	-------	--------	--------	--------

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 :

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

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.

À 0,5T et 1T, le comportement du matériau est loin d'être linéaire avec les pertes fer. Néanmoins, plus le matériau est proche de la saturation, plus il est linéaire vis-à-vis des pertes fer. La tendance qui se dégage est que, à part pour l'harmonique de rang 3, plus l'amplitude est importante, plus l'écart relatif est proche de zéro (pour le rang 3, il varie moins que pour les autres harmoniques) : il apparaît donc qu'une amplitude importante va limiter l'écart relatif et assurer une plus grande linéarité des pertes dans le matériau. 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.

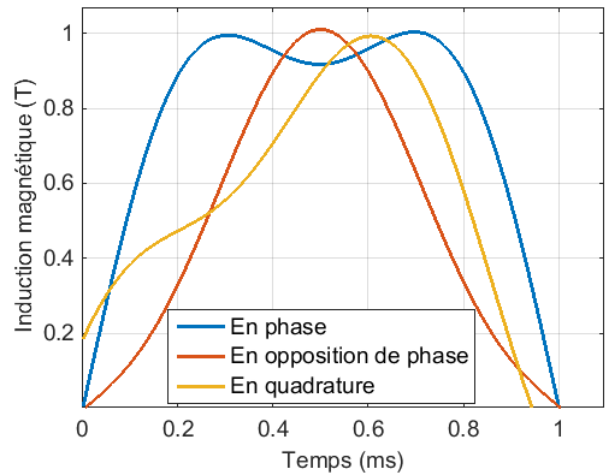


Figure 7 : Comparaison des inductions pour les 3 phases de l'harmonique 3 - 500Hz 1T

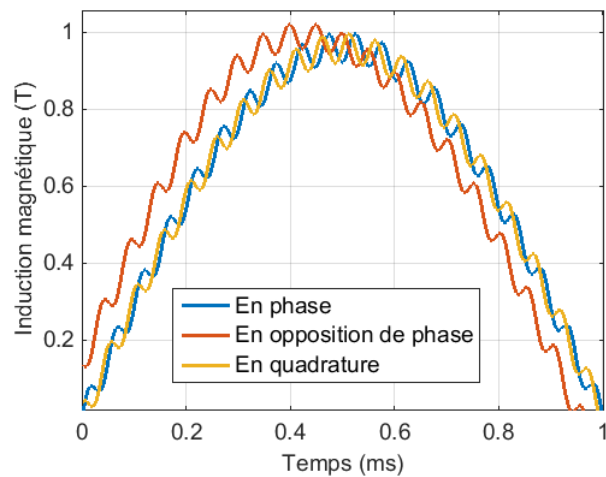


Figure 8 : Comparaison des inductions pour les 3 phases de l'harmonique 3 - 500Hz 1T

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

Rang d'harm.	Amplitude de B	Phase harm.	Pertes fer (W/kg)	Ecart relatif : $\frac{P_{fer}(\phi) - P_{fer}(\phi = 0)}{P_{fer}(\phi = 0)}$
3 (R=20%)	0,5 T	$\phi = 0$	11,186	
		$\phi = \pi$	7,618	-31,90%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	8,189	-26,79%
	1 T	$\phi = 0$	37,275	
		$\phi = \pi$	25,110	-32,55%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	26,023	-30,19%
	1,3T	$\phi = 0$	66,766	
		$\phi = \pi$	44,832	-32,85%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	46,243	-30,74%
39 (R=4%)	0,5 T	$\phi = 0$	11,629	
		$\phi = \pi$	12,018	3,35%
		$\phi = \frac{\pi}{2}$	12,063	3,73%
	1 T	$\phi = 0$	41,997	

1,3T	$\phi = \pi$	43,963	4,68%
	$\phi = \frac{\pi}{2}$	43,486	3,55%
	$\phi = 0$	87,926	
	$\phi = \pi$	89,949	2,30%
	$\phi = \frac{\pi}{2}$	90,22	3,39%

Les Figures 7 et 8 comparent les trois inductions avec les phases différentes, pour chacune des combinaisons à 1T. La Figure 9 présente à titre d'exemple les trois cycles d'hystérésis avec l'harmonique 3 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 harmonique en phase.

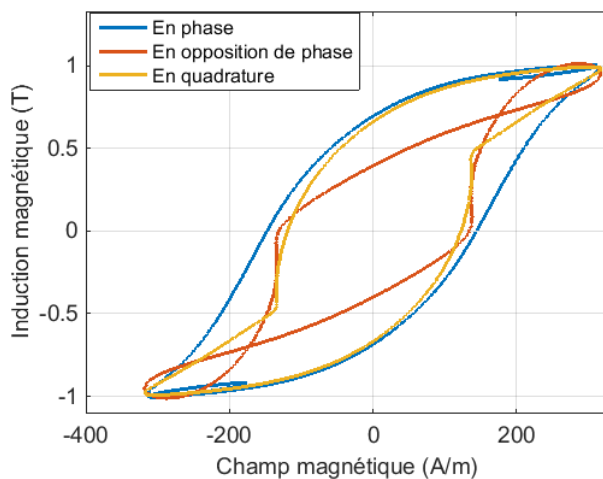


Figure 9 : Comparaison des cycles d'hystérésis pour les 3 phases de l'harmonique 3 - 500Hz 1T

Tout d'abord, pour l'harmonique basse fréquence (rang 3), les pertes fer sont plus faibles lorsqu'elle n'est pas en phase. Cela se remarque sur la Figure 9, puisque l'aire des cycles d'hystérésis avec une phase non nulle est plus faible que celui du cycle avec les harmoniques en phase. Cela nous amène à la conclusion suivante : plus la fréquence de l'harmonique est haute, moins la phase n'a d'influence sur les pertes fer. Cependant, avec l'harmonique de rang 39, cette influence est négative : les harmoniques haute-fréquences génèrent plus de pertes lorsqu'elles ne sont pas en phase. Enfin, dans les deux cas il apparaît logiquement que l'harmonique en opposition de phase est celle qui diffère le plus de l'harmonique en phase, générant moins de pertes à basse fréquence d'harmonique, et plus de pertes à haute fréquence d'harmonique. Néanmoins, il faut ici aussi considérer les conditions expérimentales et modérer quelque peu ces conclusions, essentiellement pour des harmoniques de rang élevés où il est difficile de dissocier erreur de mesures et écarts relatifs lié uniquement au comportement du matériau, vu la faiblesse de ces derniers dans ce cas.

5. CONCLUSION

Ces premiers résultats apportent des informations sur l'influence du contenu spectral de l'induction sur les pertes fer. Tout d'abord, il apparaît que la fréquence des harmoniques joue un rôle non négligeable, surtout si le matériau n'est pas saturé. À bas niveau d'induction (0,5T), le comportement du matériau n'est pas linéaire vis-à-vis des pertes fer et la contribution du contenu harmonique est importante. À des

niveaux d'induction plus important, l'écart relatif entre sommes des pertes de chaque contribution et perte de la combinaison des contributions diminue, traduisant un comportement linéaire du matériau vis-à-vis des pertes fer. Ce comportement « fréquentiel » nous renseigne sur l'influence de l'alimentation sur les pertes et ouvre des pistes quant à la conception de l'alimentation des machines électriques

Par ailleurs, la phase des harmoniques influe également sur les pertes fer, particulièrement pour des rangs faibles d'harmonique (rang 3). De plus, cette influence est positive : lorsque l'harmonique est en quadrature, et surtout en opposition de phase, les pertes fer sont plus faibles. En revanche, cette influence devient négative à haute fréquence d'harmonique (rang 39) tout en restant assez faible voire négligeable. 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.

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

