

# Enroulement amortisseur pour la réduction des bruits et vibrations d'une machine asynchrone alimentée par MLI

Grégory BAUW <sup>(1)</sup>, François BALAVOINE <sup>(2)</sup>, Bertrand CASSORET <sup>(1)</sup>, Olivier NINET <sup>(1)</sup>, Raphaël ROMARY <sup>(1)</sup>

(1) Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE),  
Béthune, F-62400, France, (2) SATT Nord de France, 59000 Lille

**RESUME** – L'article présente un système qui permet la réduction passive des bruits et vibrations d'une machine asynchrone triphasée grâce à un enroulement amortisseur statorique connecté à des condensateurs. Il s'agit d'un système peu coûteux, simple et efficace pour réduire le niveau de bruit global audible d'une machine.

L'étude théorique est basée sur le schéma monophasé équivalent d'une machine équipée du système d'enroulement amortisseur et sur une modélisation par analogie avec un transformateur monophasé à deux enroulements. L'analyse du schéma équivalent permet de mettre en évidence les possibilités de réduction du flux harmonique. Le procédé est ensuite vérifié expérimentalement.

**Mots-clés** — *Moteur asynchrone, bruit, vibrations, harmoniques, enroulement auxiliaire, amortisseur, MLI.*

## 1. INTRODUCTION

Pour des questions de confort des utilisateurs, le bruit audible des machines électriques est devenu un aspect fondamental à traiter dès leur conception [1]. C'est également un paramètre à prendre en compte dans de nombreux domaines, comme le domaine militaire par exemple où la discrétion acoustique est de rigueur [2]. De plus les problèmes vibratoires peuvent être à l'origine de perturbation du milieu environnant ou d'usure mécanique prématurée. Le niveau de bruit global d'une machine résulte de trois sources principales : mécanique, aérodynamique et magnétique [3]. Nous nous intéresserons essentiellement à cette dernière qui est souvent prépondérante en particulier lorsque la machine est alimentée par modulation de largeur d'impulsions (MLI) [4].

En effet, le bruit magnétique est le bruit audible généré par les forces magnétiques présentes dans la machine. Les forces de Maxwell qui attirent le stator et le rotor sont à l'origine de déformations du stator, donc de vibrations et de bruit. Elles sont liées à la présence d'harmoniques d'induction dans l'entrefer. Ces harmoniques peuvent être générés par l'effet d'encoques, la saturation, l'excentricité ou, dans le cas d'une alimentation MLI, par les harmoniques de courant. Ces derniers peuvent conduire à un bruit spécifique important.

Diverses méthodes sont possibles pour réduire le bruit d'une machine électrique. En premier lieu, il convient de respecter les règles de construction et de dimensionnement des machines [5] en choisissant notamment un nombre d'encoques

statoriques et rotoriques adéquat. D'autre part, des travaux antérieurs proposent, par exemple, d'agir sur le bruit en injectant un système de courants harmoniques dans les enroulements, créant ainsi des ondes de forces en opposition avec celles naturellement générées par la machine [6]. Ces courants harmoniques peuvent être également injectés dans un enroulement auxiliaire [7]. Une autre méthode consiste à utiliser des actionneurs piézo-électriques pour limiter les vibrations produites par la machine et par conséquent réduire le niveau de bruit global [8].

La méthode proposée dans l'article est basée sur la génération de courants induits dans un enroulement auxiliaire au moyen d'un élément passif. Nous débuterons par une analyse théorique mettant en évidence les résonances. Puis, nous effectuerons une comparaison de ce système avec un filtre anti-harmonique et terminerons par des résultats expérimentaux témoignant de la validité et de l'efficacité de l'invention.

## 2. DESCRIPTIF TECHNIQUE DU SYSTEME

Le système que nous proposons permet la réduction passive des bruits et vibrations d'une machine asynchrone. L'idée est de bobiner dans les encoches un deuxième enroulement triphasé superposé au premier, mais électriquement indépendant. On peut parler d'un enroulement secondaire ou auxiliaire (Fig. 1).

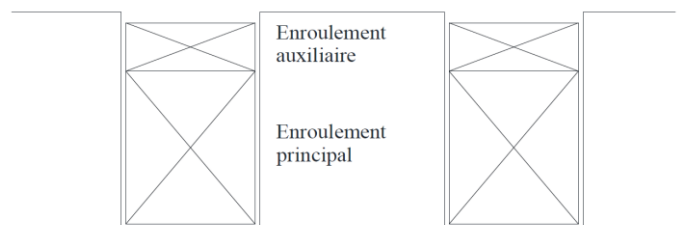


Fig.1 Disposition des enroulements dans une encoche

Couplées en étoile ou en triangle, les bobines auxiliaires sont simplement reliées à 3 condensateurs de valeurs adéquates. Le rotor reste, comme dans tous les moteurs asynchrones, en court-circuit (Fig. 2).

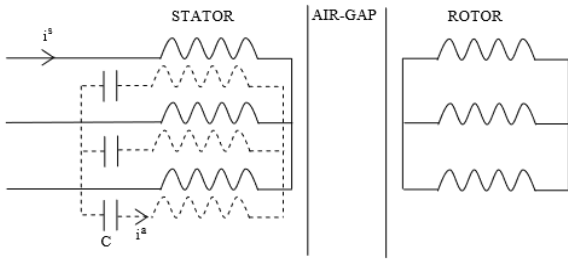


Fig.2 Schéma d'une machine avec enroulement amortisseur

Le principe est le suivant : les harmoniques d'induction créent des courants induits dans l'enroulement auxiliaire, ceux-ci créent des ondes d'induction qui s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, et rendent l'induction d'entrefer plus sinusoïdale.

Les ondes d'induction non désirables dues à la MLI créent dans les enroulements auxiliaires des courants induits à fréquence élevée pour lesquels l'impédance de la branche auxiliaire est faible. Au niveau du schéma équivalent, cela se traduit par le fait que les courants harmoniques provenant de l'alimentation circulent principalement dans l'enroulement auxiliaire. Ils génèrent par conséquent des harmoniques d'induction plus faibles.

A la faible fréquence d'alimentation (généralement 50 ou 60Hz, voire moins en vitesse variable), les condensateurs forment une impédance élevée si bien que les courants induits dans l'enroulement auxiliaire gardent des valeurs faibles à ces fréquences. Selon la valeur du condensateur et le nombre de spires de l'enroulement auxiliaire ajouté, la circulation de ces courants peut toutefois créer une partie de la puissance réactive nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique (amélioration du facteur de puissance) et faire diminuer le courant magnétisant absorbé au stator.

### 3. MODELISATION PAR TRANSFORMATEUR MONOPHASE A DEUX ENROULEMENTS

Le schéma monophasé équivalent est donné à la figure 3. Il s'agit du schéma équivalent classique de la machine asynchrone auquel a été ajoutée une branche auxiliaire comprenant la résistance et l'inductance de fuites de l'enroulement ainsi que le condensateur mis en série avec celui-ci. L'ensemble des grandeurs et paramètres du schéma sont ceux ramenés au primaire.

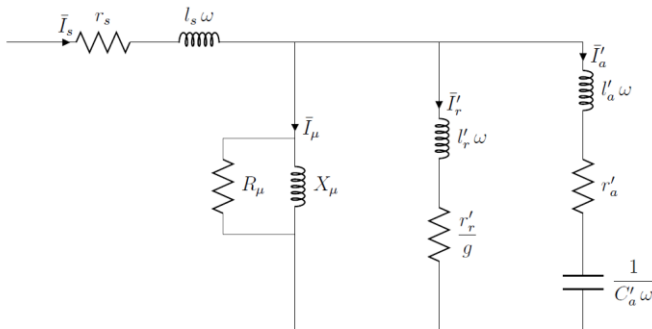


Fig.3 Schéma monophasé équivalent

L'analogie de notre système avec le transformateur monophasé nous permet de créer un modèle analytique simple et ainsi de comprendre le comportement des différentes grandeurs mises en jeu. Pour cela, nous partons du schéma équivalent (Fig 3), nous y négligeons l'influence du rotor ainsi que les pertes fer. Le primaire du transformateur modélise

l'enroulement statorique tandis que le secondaire modélise l'enroulement auxiliaire, ce dernier alimente une capacité  $C'_a$ .

La tension  $V_s$  est la tension d'alimentation de la machine asynchrone délivrée par l'onduleur MLI. Le courant  $I_s$  circule dans l'enroulement statorique et induit un courant  $I'_a$  dans l'enroulement auxiliaire.  $\Phi$  est le flux commun aux deux enroulements et canalisé par le circuit magnétique. Le schéma équivalent est alors donné figure 4 :

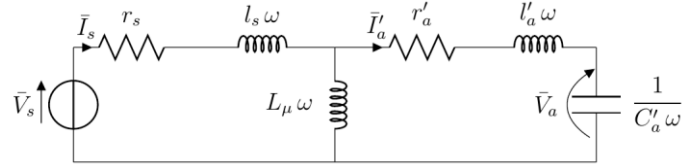


Fig.4 Schéma équivalent du transformateur monophasé à deux enroulements

$\omega$  : pulsation telle que  $\omega = 2 \pi f$

$r_s, r'_a$  : résistances statorique et auxiliaire

$l_s, l'_a$  : inductances de fuites statorique et auxiliaire

$n_s, n_a$  : nombres de spires des enroulements statorique et auxiliaire

$C'_a = C_a \left(\frac{n_s}{n_a}\right)^2$  : capacité mise en série avec l'enroulement auxiliaire ramenée au primaire

On définit également :

$L_\mu$  : inductance magnétisante

$L_s, L'_a$  : inductances magnétisantes des enroulements statorique et auxiliaire telles que :

- $L_s = L_\mu$
- $L'_a = L_\mu \left(\frac{n_s}{n_a}\right)^2$

$M$  : inductance mutuelle entre les deux enroulements telle que  $M = \sqrt{L_s L'_a}$

L'impédance complexe équivalente du système vue du primaire s'exprime par :

$$\bar{Z}_{eq} = \frac{1}{r'_a + j((L_s + l'_a)\omega - \frac{1}{C'_a\omega})} \times \left[ r_s r'_a + L_s \left( \frac{1}{C'_a} - l'_a \omega^2 \right) - l_s \left( (L_s + l'_a) \omega^2 - \frac{1}{C'_a} \right) + j \left( (L_s + l'_a) \omega - \frac{1}{C'_a \omega} \right) + r'_a (L_s + l'_a) \omega \right]$$

L'étude de cette impédance nous montre l'existence de deux résonances :

- une résonance série  $\omega_{rs}$ , elle peut être exprimée ainsi :

$$\omega_{rs} = \sqrt{\frac{L_s + l_s}{C'_a (L_s l_s + l'_s l'_a + L_s l'_a)}}$$

En négligeant le produit des inductances de fuites et en admettant que  $L_s + l_s$  est environ égal à  $L_s$  on met en évidence le caractère « série » de cette résonance,  $C'_a$  résonne avec  $l_s$  et  $l'_a$  :

$$\omega_{rs} \approx \sqrt{\frac{1}{C'_a (l_s + l'_a)}}$$

- une résonance parallèle  $\omega_{rp}$ , où  $C'_a$  résonne principalement avec  $L_s$ :

$$\omega_{rp} = \sqrt{\frac{1}{C'_a (L_s + l'_a)}}$$

Les applications numériques concernent une machine de 4kW dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau I.

Tableau I Caractéristiques de la machine 4kW étudiée

$V_s = 230V$	$L_s=L_a = 0,126H$	$r_s = 1,6\Omega$
$n_s=n_a = 26$ spires	$l_s=l_a = 0,0085H$	$r_a = 10\Omega$

On retrouve ces deux résonances sur les courbes des courants en fonction de la pulsation comme le montre la figure 5. La résonance parallèle à 1363 rad/s donne un minimum de courant dans l'enroulement statorique tandis que la résonance série à 3897 rad/s donne le maximum.

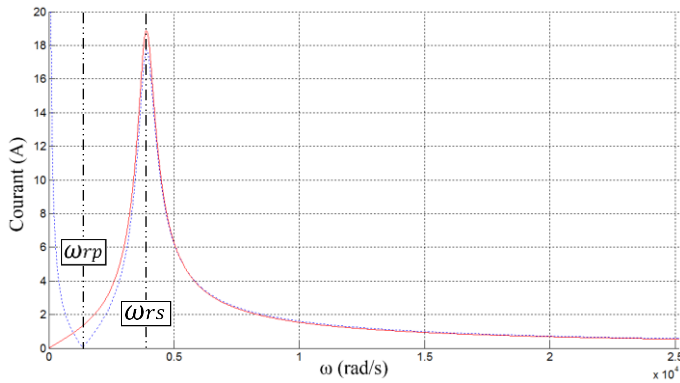


Fig.5 Courants  $I_s$  (en pointillés) et  $I_a$  (en trait plein) en fonction de la pulsation  $\omega$  pour  $C'_a = 4\mu F$

Le flux résultant  $\Phi$  dans le circuit magnétique s'exprime :

$$\Phi = \frac{L_s I_s}{n_s} - \frac{M l'_a}{n_s} = \frac{M I_s}{n_a} - \frac{L_a l'_a}{n_a}$$

La figure 6 montre ce flux (en trait plein) en fonction de la pulsation  $\omega$  pour  $C'_a$  égal à  $4\mu F$ . Il est superposé au flux qui existerait naturellement, sans présence de l'enroulement auxiliaire (en pointillés).

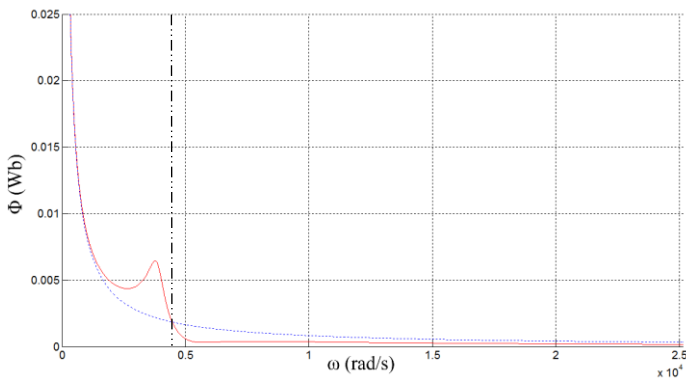


Fig.6 Flux avec système (en trait plein) et sans système (en pointillés) en fonction de la pulsation  $\omega$  pour  $C'_a = 4\mu F$

On remarque que pour les basses fréquences, et notamment à 50Hz, ces deux flux sont identiques et que le système ne perturbe pas le fonctionnement normal de la machine. Pour les fréquences plus élevées, ici à partir de 4460 rad/s environ soit

710Hz, le flux  $\Phi$  est inférieur au flux initial ce qui montre que l'enroulement auxiliaire s'oppose aux effets harmoniques présents dans le courant statorique. On montre alors que le système sera bénéfique si la fréquence de découpage de l'onduleur MLI est supérieure à 710Hz. Par contre, le système amplifie le flux lorsque la fréquence est inférieure à 710Hz.

Afin de connaître la valeur optimale de  $C'_a$  pour laquelle le système s'oppose le mieux au flux résultant, il est nécessaire de travailler à fréquence donnée, par exemple 4kHz, et de tracer le flux  $\Phi$  en fonction de la valeur de  $C'_a$  (Fig. 7). On note alors qu'une valeur permet un minimum de flux à cette fréquence, elle est de 185nF environ dans le cas de cette machine asynchrone. Au-delà, le flux tend vers une valeur constante, qui reste inférieure à la valeur sans condensateur, et augmenter la valeur de  $C'_a$  n'a plus d'influence sur  $\Phi$ . L'idée est de choisir  $C'_a$  de manière à ce que le minimum de flux se produise autour de la fréquence de découpage de la MLI, car c'est souvent dans cette zone que se situent les raies prépondérantes du spectre de bruit de la machine. Cependant il faut veiller à la précision de la valeur de  $C'_a$  ou, à défaut, préférer une valeur légèrement supérieure afin de ne pas risquer de se trouver dans la zone de la courbe où le flux est amplifié.

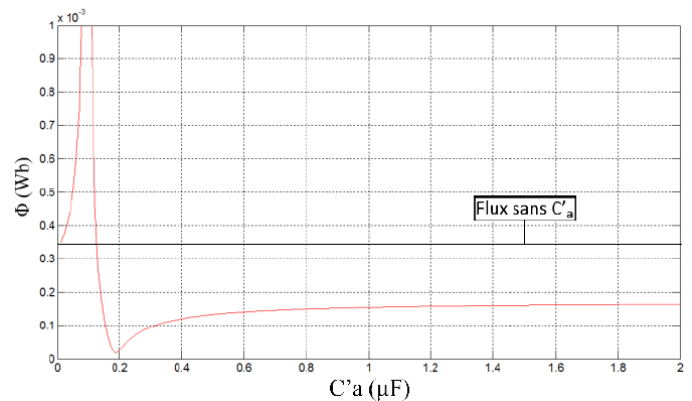


Fig.7 Flux  $\Phi$  à 4kHz en fonction de  $C'_a$

#### 4. COMPARAISON DU SYSTEME AVEC UN FILTRE LC

Il existe dans le commerce des systèmes de filtres passifs, dit aussi anti-harmoniques qui, une fois accordés, réduisent les fréquences gênantes responsables des bruits et vibrations mais aussi l'usure prématurée des conducteurs internes de la machine. Notre système assure les mêmes fonctions et agit de manière semblable à ce genre de filtres.

Cependant les avantages d'un enroulement auxiliaire bobiné dans les encoches de la machine sont réels. D'un point de vue utilisateur, le système offre d'abord une simplicité de mise en service et de maintenance puisqu'il s'agit d'une technologie robuste. L'encombrement d'un système extérieur à la machine est également supprimé, il est simplement nécessaire de disposer de place suffisante dans les encoches, ainsi que de prévoir un boîtier pour les condensateurs. On peut imaginer cependant que ces condensateurs soient intégrés directement dans la boîte à bornes de la machine. Dans ce cas, le système est totalement transparent pour l'utilisateur. D'autre part, même si l'ajout de cuivre peut apparaître comme une contrainte, l'économie est faite sur le volume de fer nécessaire au bobinage, puisqu'il profite du circuit magnétique de la machine. De plus, on évite l'ajout d'une inductance qui risque de vibrer et d'être bruyante. Le fait de placer l'enroulement auxiliaire au sein de la machine permet également de combattre les fréquences dues aux phénomènes d'encoches dans le cas d'une alimentation sinusoïdale. Cela n'est bien entendu pas possible avec un filtre placé en amont.

## 5. SPECTRE DE BRUIT ET EXPLOITATION DES RESULTATS

Des mesures de bruit ont été effectuées sur une machine asynchrone triphasée de 4kW alimentée par variateur de vitesse avec un micro à une distance de 1 mètre dans une chambre semi-anéchoïque. La fréquence de découpage est de 8 kHz et les spectres présentés utilisent une pondération en A pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille humaine.

On remarque nettement que les raies autour de la fréquence de découpage qui sont prépondérantes dans le spectre sont fortement atténuées grâce au système. La raie à 7850Hz passe de 68dB(A) à 52dB(A) comme le montrent les figures 8 et 9. Cela s'accompagne par une réduction du niveau de pression acoustique global mesuré de plus de 8,5dB(A) dans ce cas. Les vibrations sont également considérablement réduites.

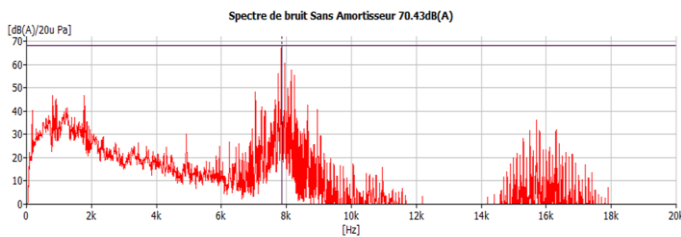


Fig.8 Spectre de bruit sans enroulement amortisseur pour  $f_{MLI}=8kHz$

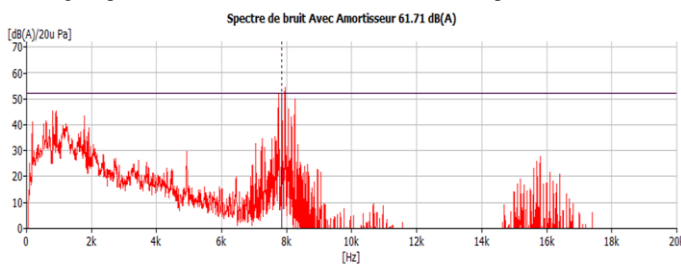


Fig.9 Spectre de bruit avec enroulement amortisseur pour  $f_{MLI}=8kHz$

De nombreux essais ont été effectués conformément à la norme 3745, avec dix positions de microphone formant une demi-sphère autour de la source, de manière à mesurer le niveau de puissance acoustique de la machine avec et sans système, pour différentes valeurs de fréquences de découpage, de condensateurs, de charge et de vitesse.

Tableau II Niveaux de puissance acoustique relevées pour  $f_{MLI}=4kHz$

Niveau de puissance acoustique en dB(A), MLI 4kHz					
Etats moteur	0μF (sans système)	4μF	12μF	20μF	Ecart moyen
0% charge 0tr/min	57,46	48,59	51,71	48,25	7,95
0% charge 500tr/min	74,06	65,20	65,32	65,30	8,79
0% charge 1000tr/min	75,03	69,01	69,03	69,07	5,99
0% charge 1500tr/min	77,31	71,78	71,79	71,78	5,52
50% charge 500tr/min	73,22	63,89	63,96	63,93	9,30
50% charge 1000tr/min	73,44	66,64	66,59	66,58	6,83
50% charge 1500tr/min	73,41	69,83	69,65	69,67	3,70
100% charge 500tr/min	72,04	63,36	63,32	63,30	8,72
100% charge 1000tr/min	72,98	65,35	65,29	65,25	7,68
100% charge 1500tr/min	71,34	69,17	69,01	69,04	2,27

Le tableau II, pour  $f_{MLI}=4kHz$ , confirme les résultats et illustre le fait que l'effet du système est identique quand  $C_a$  est

égal à 4, 12 ou 20μF. Cela peut s'expliquer par la zone stable de la courbe du flux  $\Phi$  en fonction de  $C_a$  (Fig. 7).

Le graphique (Fig. 10) récapitule les réductions de vibrations obtenues sur la machine 4kW étudiée. On voit clairement que le résultat est bénéfique quelque soit la vitesse et que la réduction moyenne peut atteindre plus de 60%.

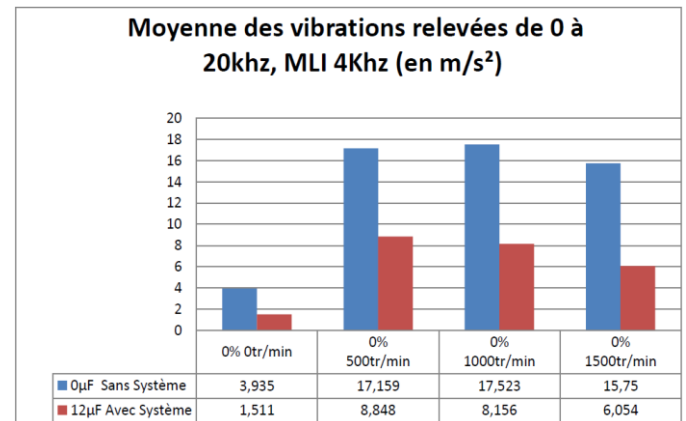


Fig.10 Moyenne des vibrations relevées de 0 à 20kHz

## 6. CONCLUSION

Le système proposé ici permet de réduire considérablement le bruit magnétique de manière passive, donc sans faire appel à une électronique complexe. La réduction obtenue est stable dans le temps, même lorsque la vitesse de la machine varie. Une large gamme de valeurs de condensateurs convient. Le système a pour inconvénient de nécessiter de la place dans les encoches pour y ajouter le bobinage auxiliaire. Toutefois ce bobinage est parcouru par des courants faibles et nécessite donc moins de place que le bobinage initial.

Le modèle présenté dans cet article permet de comprendre quels sont les paramètres qui influent sur le comportement du système. Il permet également de dimensionner de manière optimale le bobinage ou encore la valeur du condensateur pour une machine donnée. Si ce dimensionnement n'est pas effectué correctement, cela peut conduire à une augmentation du bruit.

Les avantages de notre système en comparaison avec un filtre LC classique sont réels. Il offre une simplicité d'utilisation et de maintenance ainsi qu'un encombrement très réduit. Il agit de façon bénéfique sur le niveau de vibrations et de bruit global de la machine, et dans certains cas sur le facteur de puissance.

## 7. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la SATT Nord de France (Société d'Accélération du Transfert de Technologie) qui a breveté cette invention [9] et qui nous a permis de financer des prototypes de moteur modifiés ainsi que le matériel nécessaire à nos expérimentations.

## 8. REFERENCES

- [1] Jean Le Besnerais, Vincent Lanfranchi, Michel Hecquet, Pascal Brochet, "Bruit audible d'origine magnétique dans les machines asynchrones", Techniques de l'Ingénieur, référence D3580, 10/05/13.
- [2] Gwenaëlle Le Coat, « Discretion électromagnétique des machines tournantes ». Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1997.
- [3] P.L. Timar, A. Fazekas, J. Kiss, A. Miklos, S.J. Yang, "Noise and vibration of electrical machines", Elsevier, 1989.
- [4] Jean Le Besnerais, « Réduction du bruit audible d'origine magnétique dans les machines asynchrones alimentées par MLI – règles de conception silencieuse et optimisation multi-objectif », thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2008.

- [5] H. Jordan, 'GERÄUSCHARME ELEKTROMOTOREN', W. Girardet, Essen 1950.
- [6] B. Cassoret, R. Corton, D. Roger, J. F. Brudny. "Magnetic noise reduction of induction machines". IEEE Trans. on Power Electronics, US, vol. 18, N°2, Mars 2003, pp. 570-579.
- [7] J. P. Lecointe, R. Romary, J.F. Brudny, M. McClelland, "Analysis and active reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance motor". IEE, Electric Power Applications, Londres, Grande Bretagne, novembre 2004, Vol. 151, N°6, pp. 725-733.
- [8] X. Ojeda, X. Mininger, H. Ben Ahmed, M. Gabsi, M. Lecrivain, "Piezoelectric Actuator Design and Placement for Switched Reluctance Motors Active Damping". IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, Vol 24, N°2, pp. 305 – 313.
- [9] B. Cassoret, R. Romary, "Moteur électrique à enroulement auxiliaire isolé", Brevet déposé le 23 juin 2015 auprès de l'INPI, demande n° 1555757.