



Minimisation du volume de la bobine de mode commun des filtres CEM en tenant compte de la saturation

Bilel Zaidi, Arnaud Videt, Nadir Idir

► To cite this version:

Bilel Zaidi, Arnaud Videt, Nadir Idir. Minimisation du volume de la bobine de mode commun des filtres CEM en tenant compte de la saturation. Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE'17), Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE), May 2017, Arras, France. hal-01558459

HAL Id: hal-01558459

<https://hal.science/hal-01558459>

Submitted on 7 Jul 2017

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.

Minimisation du volume de la bobine de mode commun des filtres CEM en tenant compte de la saturation

Bilel ZAIDI, Arnaud VIDET, Nadir IDIR

Univ. Lille, Centrale Lille, Arts et Metiers ParisTech, HEI, EA 2697 - L2EP - Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, F-59000 Lille, France

bilel.zaidi@ed.univ-lille1.fr, arnaud.videt@univ-lille1.fr, nadir.idir@univ-lille1.fr

RÉSUMÉ – Les filtres CEM sont largement utilisés dans les convertisseurs statiques afin de respecter les normes CEM, ce qui augmente considérablement le volume et le coût des installations à cause de la bobine de mode commun. Ce papier présente une nouvelle méthode qui permet de calculer le volume minimal de la bobine couplée de mode commun en tenant compte des contraintes de la saturation du matériau magnétique. Les résultats obtenus montrent que, dans certaines applications, augmenter la valeur de l'inductance jusqu'à une valeur optimale permet de réduire le volume du noyau magnétique tout en améliorant l'atténuation du filtre.

ABSTRACT – EMI filters are necessary in many applications in order to meet EMC standards, which significantly increase overall cost and volume mainly because of the common-mode choke. In this paper, a new method to calculate the minimum volume of the inductor is proposed. It takes into account core saturation issues that may greatly impact inductor volume. Consequently, it is shown that in some cases, increasing the inductance up to an optimal value can significantly reduce the magnetic core volume in addition to further enhancing filter attenuation.

MOTS-CLÉS – CEM, filtre de mode commun, matériau magnétique, saturation, optimisation, volume, fréquence de résonance.

1. Introduction

Dans une chaîne de conversion constituée d'un convertisseur de puissance, des câbles d'énergie et d'une charge, les commutations des interrupteurs de puissance génèrent des variations rapides de la tension découplée. Cette tension excite les capacités parasites naturellement existantes dans la chaîne et permet la circulation des courants de haute fréquence (HF) à travers les conducteurs, créant ainsi des perturbations électromagnétiques (PEM) de mode différentiel (MD) et de mode commun (MC). Ces PEM affectent non seulement le fonctionnement du convertisseur de puissance mais aussi le réseau électrique. Les normes de la compatibilité électromagnétique (CEM) imposent des niveaux de perturbations conduites maximaux à ne pas dépasser selon la nature de l'application à partir de 150 kHz (par exemple la norme DO-160 pour les applications aéronautiques).

On peut réduire les perturbations électromagnétiques en agissant directement sur la commande du convertisseur [1], mais cela ne permet généralement pas de respecter la norme. Ainsi, l'utilisation des éléments passifs de filtrage devient dans la plupart des cas une nécessité. Plusieurs structures de filtres MC et MD peuvent être utilisées en fonction de l'atténuation souhaitée et des impédances d'entrée/sortie du filtre. Dans ce papier, seule la structure LC de mode commun est étudiée. En monophasé, ce type de filtre est constitué de deux condensateurs dont la capacité est limitée par une valeur maximale selon l'application [2], et une bobine couplée de mode commun comme le montre la figure 1(a). Le volume de la bobine MC dépend non seulement de la valeur de l'inductance L , mais aussi de la variation de la tension V_L (figure 1(b)), responsable de l'ondulation du flux magnétique autour de la fréquence de commutation pouvant conduire à une saturation du matériau magnétique [3].

Plusieurs papiers dans la littérature ont proposé des méthodes pour la minimisation du volume de la bobine de mode commun. La référence [4] présente un calcul simplifié du volume de la bobine qui exprime les paramètres du noyau en fonction du nombre de spires N dont la valeur optimale est obtenue par itérations. Un autre calcul approximatif est présenté dans [5, 6] qui se base sur une simplification du "produit des aires" de la bobine. Enfin, des calculs numériques utilisant plusieurs méthodes d'optimisation sont présentés dans [7–9].

L'objectif de ce papier est de proposer une nouvelle procédure pour la minimisation du volume de la bobine de mode

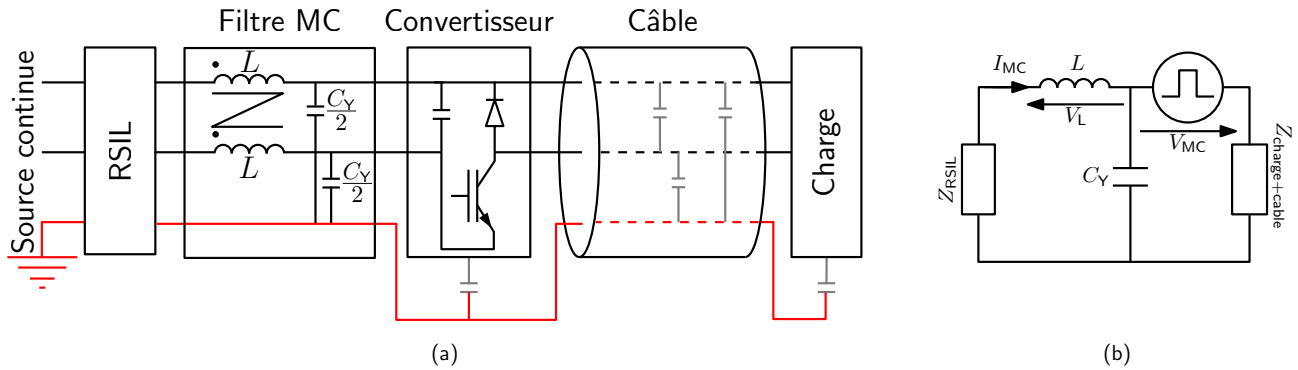


Figure 1: (a): Exemple d'une chaîne de conversion ; (b): Circuit équivalent de mode commun simplifié

commun en tenant compte des contraintes de la saturation du matériau magnétique. Cette méthode permet d'évaluer le volume en fonction de plusieurs paramètres tout en respectant les contraintes normatives. Les résultats obtenus montrent que, selon les caractéristiques de la chaîne de conversion, augmenter la valeur de l'inductance de la bobine couplée permet de réduire considérablement son volume tout en améliorant l'atténuation du filtre CEM. D'autres paramètres pouvant intervenir dans l'optimisation des bobines de MC sont détaillés dans [10].

2. Minimisation du volume de la bobine de mode commun

Le courant de mode commun I_{MC} , mesuré en présence du réseau stabilisé d'impédance de ligne (RSIL) comme le montre la figure 1(b), doit respecter la contrainte normative. Ce qui conduit à la résolution de l'inégalité donnée par eq. (1). Afin de simplifier le calcul, l'inductance de la bobine de mode commun est calculée pour respecter la norme CEM à sa première fréquence. Ainsi, la résolution analytique de eq. (1) à 150 kHz détermine pour chaque valeur de C_Y une valeur minimale de $L = L(150 \text{ kHz})$ qui permet de passer la norme, comme le montre la figure 3 (haut à gauche) pour un exemple de calcul. Une fois la valeur de l'inductance est déterminée, la procédure d'optimisation du volume de L sera présentée dans le paragraphe suivant.

$$\begin{cases} I_{MC}(\omega) = \frac{V_{MC}(\omega)}{Z_{RSIL}(\omega) + jL\omega + (1 - LC_Y\omega^2 + jC_Y\omega Z_{RSIL}) Z_{charge+cable}} \\ |I_{MC}(\omega)| \leq \text{Limite de la contrainte normative} \end{cases} \quad (1)$$

La bobine de mode commun dans la figure 1(a) est constituée de deux enroulements bobinés dans le même sens autour d'un noyau toroïdal. La figure 2(a) montre les paramètres géométriques de la bobine: les rayons intérieur (r) et extérieur (R), la hauteur (h) et le nombre de spires (N). Le diamètre du conducteur (d) est déterminé en fonction de la valeur efficace du courant différentiel. L'espacement entre les spires (s) est un paramètre constant choisi afin de réduire les capacités inter-spires. Le volume total (V) de la bobine en tenant compte des enroulements est alors exprimé en fonction de d , R , et h :

$$V = \pi (h + 2d) (R + d)^2. \quad (2)$$

D'une part, l'inductance d'une bobine torique exprimée dans eq. (3) dépend de la perméabilité relative et des paramètres géométriques du matériau magnétique. Ainsi, h peut être exprimée en fonction de R , r et N , L et μ_r . D'autre part, la perméabilité magnétique complexe du matériau ($\bar{\mu}_r(f) = \mu'_r - j\mu''_r$) est une entrée dans notre procédure de dimensionnement. Ce qui donne la valeur de $\mu_r = \mu'_r(150 \text{ kHz})$ dans eq. (3). Ainsi les variables restant à déterminer et dont dépend le volume se réduisent à trois paramètres: R , r et N .

$$L = \mu_0 \mu_r h \frac{N^2}{2\pi} \ln \left(\frac{R}{r} \right). \quad (3)$$

Les deux contraintes suivantes permettent par ailleurs d'exprimer le rayon intérieur en fonction du nombre de spires:

- Première contrainte "C1": La bobine est construite avec une seule couche afin de réduire les capacités parasites dans les hautes fréquences [11]. Alors: $2\pi(r - \frac{d}{2}) \geq 2N(d + s)$.
- Deuxième contrainte "C2": Le champ magnétique maximal (H_{max}) doit être inférieur au champ de saturation du matériau magnétique (H_{sat}). Alors: $H_{sat} \geq \frac{NI_{max}}{2\pi r}$, où I_{max} est le courant maximal de mode commun.

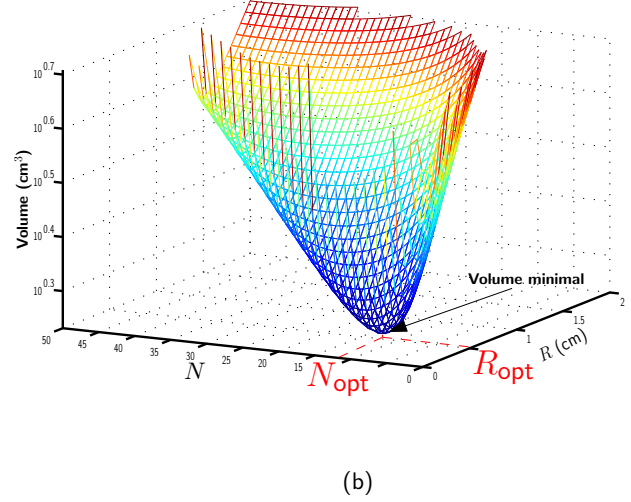
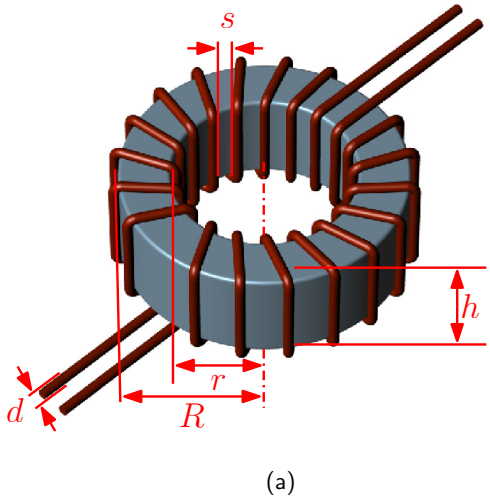


Figure 2: (a): Paramètres géométriques de la bobine MC ; (b) Exemple de l'évolution du volume en fonction de R et N

Tableau 1: Contraintes imposées sur le nombre de couches et sur la saturation

Contrainte	condition	$r_{\min 1,2} = K_1 N + K_2$
C1: une seule couche	$r \geq \frac{d+s}{\pi} N + \frac{d}{2} \quad (= r_{\min 1})$	$K_1 = \frac{d+s}{\pi} \quad K_2 = \frac{d}{2}$
C2: $H_{\max} < H_{\text{sat}}$	$r \geq \frac{I_{\max}}{2\pi H_{\text{sat}}} N \quad (= r_{\min 2})$	$K_1 = \frac{I_{\max}}{2\pi H_{\text{sat}}} \quad K_2 = 0$

Selon le tableau 1, chaque contrainte se traduit par une valeur minimale $r_{\min}$ du rayon intérieur r en fonction de N . Afin de trouver le volume minimal de la bobine, r doit être égal à $r_{\min 1}$ ou bien $r_{\min 2}$ et peut s'exprimer comme une fonction affine ($r = K_1 N + K_2$) selon la contrainte imposée. Ainsi, V ne dépend que de R et de N comme le montre eq. (4). L'évolution de V avec R et N dans la figure 2(b) montre clairement l'existence d'un optimum (R_{opt} , N_{opt}) qui est facile à déterminer et qui mène à un volume minimal.

$$V(R, N) = \pi \left(\frac{2\pi L}{\mu_0 \mu_r N^2 \ln \left(\frac{R}{K_1 N + K_2} \right)} + 2d \right) (R + d)^2. \quad (4)$$

La méthode proposée est décrite dans l'organigramme de la figure 3 ("Détermination de la géométrie optimale"). La procédure commence par imposer la première contrainte C1 sur le nombre de couche en donnant à r l'expression de $r_{\min 1}$. Ensuite, l'absence de saturation est vérifiée: si la contrainte C2 est satisfaite, alors R_{opt} et N_{opt} donnent le volume optimal de la bobine. Sinon, la procédure continue en imposant C2 ($r = r_{\min 2}$) et en vérifiant C1. Enfin, dans le cas où le nombre de couches n'est plus respecté, le calcul se fait en imposant les deux contraintes C1 et C2 en même temps.

Les entrées de la procédure de dimensionnement de la bobine de mode commun sont: la valeur de l'inductance L , les propriétés du matériau magnétique (μ_r , H_{sat}), et la valeur maximale du courant de mode commun $I_{\max}$ (la première partie de la figure 3). $I_{\max}$ joue un rôle important dans la saturation du noyau. Sa valeur dépend du choix du couple (L , C_Y) qui permet de respecter la norme CEM, et de l'évolution de perméabilité magnétique complexe ($\bar{\mu}_r(f)$) [12]. Ainsi, le calcul de $I_{\max}$ avec eq. (1) et eq. (5) tient compte de la dépendance de la valeur de l'inductance L avec la fréquence en remplaçant μ_r par $\bar{\mu}_r(f) = \mu'_r - j\mu''_r$ et L par $\bar{L}$:

$$\begin{cases} \bar{L} = \frac{\bar{\mu}_r(f)}{\mu_r} L \\ I_{\max} = \max |\text{IFFT}(I_{\text{MC}}(\omega))|. \end{cases} \quad (5)$$

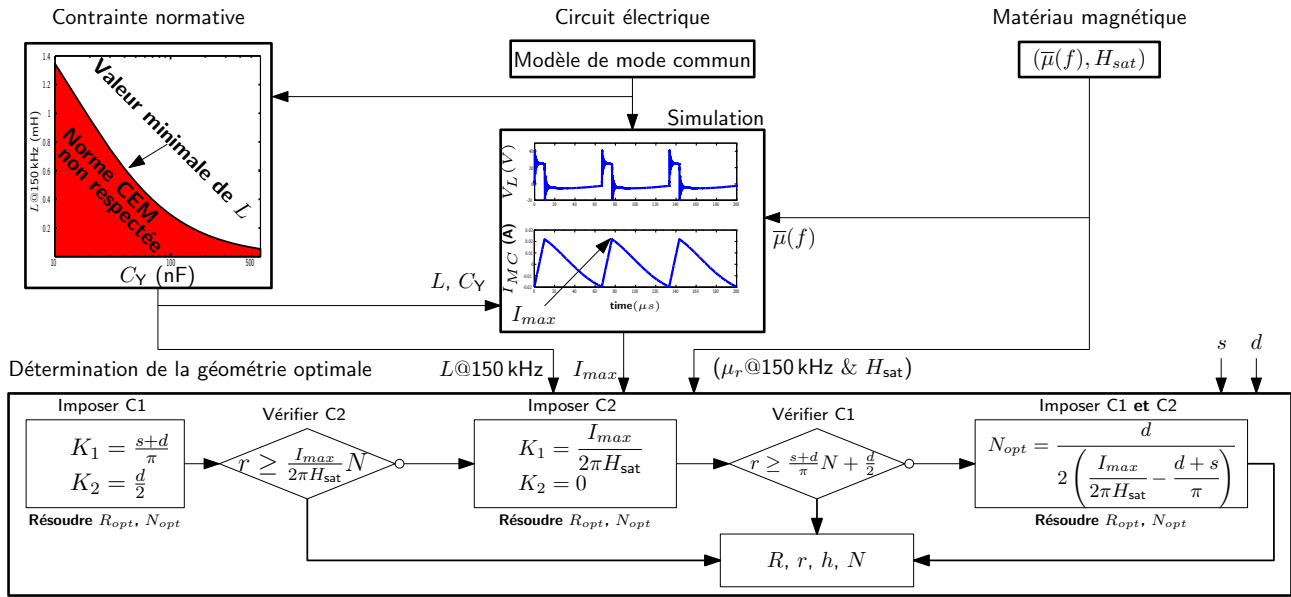


Figure 3: Méthode proposée pour le dimensionnement optimal du volume de la bobine de mode commun

3. Validation

Un dispositif expérimental semblable à celui de la figure 1(a) a été réalisé afin de valider la méthode de dimensionnement proposée. Le convertisseur DC-DC commute à $F_s = 15$ kHz avec un rapport cyclique $D = 15\%$ et est alimenté avec une source continue de 540 V. Une charge R-L est connectée au convertisseur par l'intermédiaire d'un câble blindé de longueur 28 mètres qui augmente la capacité parasite à la terre. Le RSIL est défini par la norme aéronautique D0-160 catégorie B. Les impédances de la figure 1(b) ont été mesurées afin de calculer la valeur minimale de L qui permet de passer la norme CEM pour chaque C_γ (figure 3 en haut à gauche). Le matériau magnétique choisi pour cette application est le nanocristallin avec $\mu_i = \mu_r'(1 \text{ kHz}) = 180000$ et $B_{\text{sat}} = 1.2$ T. Un champ de saturation équivalent H_{sat} est défini avec la valeur de la perméabilité relative à la fréquence de commutation F_s :

$$H_{\text{sat}} = \frac{B_{\text{sat}}}{\mu_0 \mu_r'(F_s)}. \quad (6)$$

Dans la suite, l'influence du choix du couple (L, C_γ) sur le volume de la bobine de mode commun sera détaillée.

3.1. Résultats de simulations

D'abord, le volume de la bobine couplée a été calculé pour les valeurs minimales de l'inductance qui permettent de respecter la norme CEM. Pour des valeurs de capacité C_γ entre 50 nF and 400 nF, le volume de la bobine diminue en augmentant la valeur de C_γ comme le montre la figure 4(a) (courbe en noir nommée "Inductances minimales pour respecter la norme CEM"). Pour cette courbe, la procédure de la figure 3 a imposé la contrainte de la saturation C2 qui a engendré un grand rayon interne r et un faible nombre de tours N afin de réduire le champ magnétique maximal H_{max} dans le noyau. Selon eq. (1), augmenter la valeur de l'inductance L permet de réduire le courant maximal I_{max} et d'éviter la saturation du matériau sans imposer la contrainte C2. Pour cette raison, le volume de la bobine couplée a été calculé pour plusieurs couples (L, C_γ) qui permettent de respecter la norme CEM dans la figure 4(a). Ce résultat confirme que le volume diminue quand C_γ augmente pour toutes les inductances qui permettent de passer la norme. Dès qu'une valeur de C_γ est fixée (dans cet exemple, $C_\gamma = 136$ nF), la valeur minimale de L au point A de la figure 4(a) ($L = 223 \mu\text{H}$) ne correspond pas au volume minimal de la bobine à cause de la contrainte de la saturation ($V = 8.25 \text{ cm}^3$). Augmenter la valeur de l'inductance améliore d'une part l'atténuation du filtre, et diminue d'autre part le volume jusqu'à une valeur optimale égale à 2.34 cm^3 et située au point B de la figure 4(a). Au point B, la valeur de l'inductance est $700 \mu\text{H}$ et l'algorithme a imposé les deux contraintes C1 et C2. Augmenter encore davantage la valeur de l'inductance sort le matériau complètement de la contrainte de saturation. Ainsi, le volume est calculé en imposant uniquement la contrainte C1 qui ne dépend pas de la valeur du courant de mode commun. Pour cette raison, augmenter la valeur de L au delà du point B augmente le nombre de spires N , le rayon interne $r = K_1 N + K_2$ et le volume de la bobine comme le montre la figure 4(a). Par conséquent, la volume optimal de la bobine de mode commun est obtenu pour une valeur d'inductance (autour du point B) qui est plus grande que la valeur minimale qui permet de respecter la norme CEM.

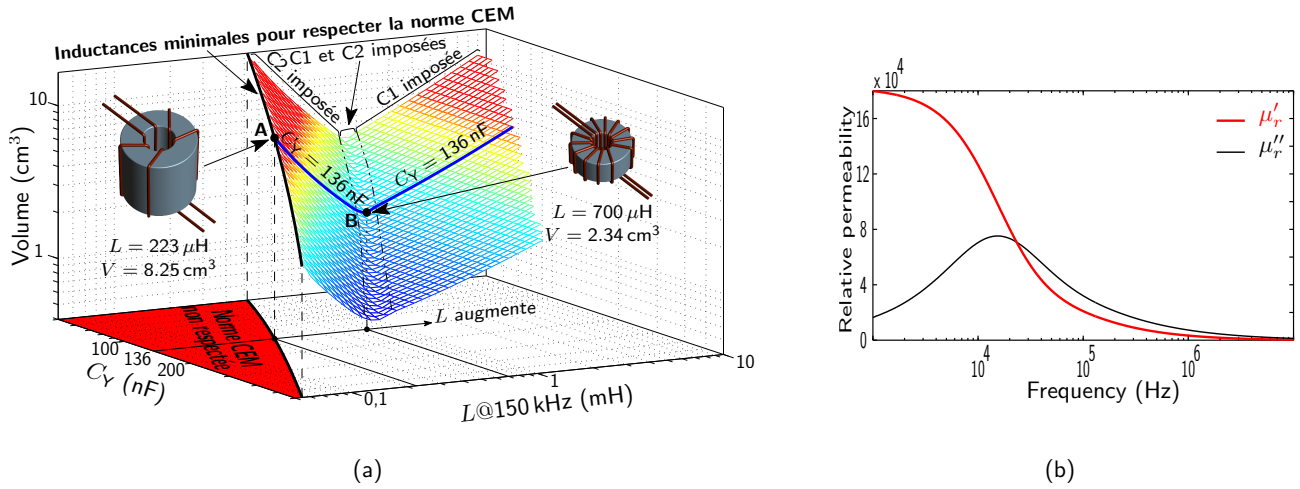


Figure 4: (a): Évolution du volume en fonction L et C_Y ; (b): Perméabilité complexe du nanocristallin

3.2. Détermination de la fréquence de résonance du filtre

Les résultats précédents peuvent être reliés à la fréquence de résonance du filtre qui diminue quand la valeur de l'inductance augmente. Quand la valeur de C_Y est suffisamment grande devant les autres capacités parasites de la chaîne de conversion, la fréquence de résonance du filtre est égale à $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC_Y}$. Par contre, à cause de la perméabilité magnétique qui varie avec la fréquence, L n'est pas constante, surtout quand le matériau utilisé est le nanocristallin dont la perméabilité magnétique diminue rapidement même dans les basses fréquences (Figure 4(b)). Ainsi, la fréquence de résonance du filtre ne peut pas être déterminée directement depuis les valeurs de L et de C_Y . Dans la suite, une fréquence "apparente" ν est définie comme suit:

$$\nu(f) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(f)C_Y}}. \quad (7)$$

La valeur de L au point B de la figure 4(a) est 700 μH. La valeur de ν correspondante est $\nu_B = 16.3$ kHz. A priori, la résonance du filtre semble être excitée par la fréquence de commutation du convertisseur ($F_s = 15$ kHz), ce qui engendrerait une forte ondulation du courant de mode commun et un volume gigantesque pour éviter la saturation [13]. Il s'avère que ce n'est pas correct parce que la valeur de l'inductance au point B est considérée à 150 kHz, et selon l'évolution de la perméabilité dans la figure 4(b), la valeur de l'inductance à 16.3 kHz est beaucoup plus grande que 700 μH ce qui conduit à une fréquence de résonance qui n'est pas excitée par la fréquence de commutation du convertisseur.

Ce qui manque dans l'analyse précédente est dans la formulation de ν_B , qui doit s'écrire comme suit: $\nu_B(150 \text{ kHz}) = 16.3 \text{ kHz}$. Cette expression montre que la fréquence "apparente" (16.3 kHz) ne correspond pas à la fréquence à laquelle l'inductance L est calculée (150 kHz). Or la résonance apparaît uniquement à la fréquence f_0 à laquelle la valeur l'inductance $L(f_0)$ conduit à la même valeur de la fréquence "apparente" $\nu = f_0$:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(f_0)C_Y}} = \nu(f_0). \quad (8)$$

L'évolution de ν en fonction de la fréquence pour les point A et B de la figure 4(a) est tracée dans la figure 5(a). Les fréquences de résonance pour ces deux inductances sont obtenues respectivement à l'intersection de $\nu_A(f)$ et $\nu_B(f)$ avec l'identité $\nu = f$. La fréquence de résonance pour l'inductance du point B est égale à $f_0^B = 5.2$ kHz, qui est beaucoup plus petite que la fréquence de commutation parce que la valeur de l'inductance à f_0^B est égale à 7 mH. De même pour le point A qui a une fréquence "apparente" $\nu_A(150 \text{ kHz}) = 29$ kHz, la fréquence de résonance est en fait égale à $f_0^A = 10.25$ kHz. Ces deux fréquences de résonance sont inférieures à la fréquence de commutation du convertisseur, ce qui est également vérifié pour tous les points tracés dans la figure 4(a). Ainsi l'augmentation du volume en diminuant la valeur de l'inductance du point B vers le point A peut s'interpréter par l'augmentation de la fréquence de résonance du filtre qui amplifie le courant de mode commun et qui, à son tour, force l'algorithme à imposer la contrainte de la saturation C2 et augmente les dimensions du matériau magnétique au point A.

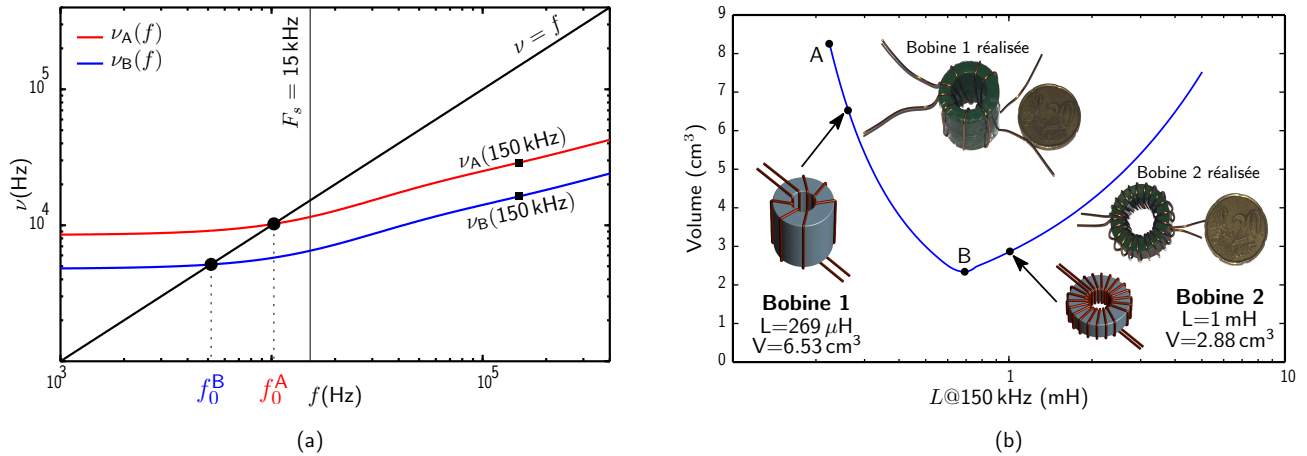


Figure 5: (a): Détermination de la fréquence de résonance pour le nanocristallin ; (b) Volume de l'inductance de mode commun en fonction de L pour $C_Y = 136 \text{ nF}$

3.3. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux ont été obtenus avec deux bobines de mode commun dont les inductances sont proches des points A et B, choisies en raison de la disponibilité au laboratoire de tores de géométries similaires à celles obtenues par la méthode proposée. Le diamètre du conducteur est $d = 0.8 \text{ mm}$ et l'espacement entre les spires s est fixé à 0.5 mm . Les valeurs d'inductances, leurs géométries optimales, ainsi que les géométries réalisées sont présentées dans le tableau 2. La figure 5(b) montre les géométries des bobines réalisées.

Tableau 2: Les caractéristiques des bobines réalisées

Caractéristiques	Bobine 1	Bobine 2
Valeur de l'inductance à 150 kHz	$269 \mu\text{H}$	1 mH
Nombre de spires optimal N	4	11
Géométrie optimale (R, r, h)	(8.17 mm, 5 mm, 16.25 mm)	(9 mm, 5.43 mm, 3.6 mm)
B_{max} calculée	1.1 T	0.83 T
Géométrie réalisée (R, r, h)	(9 mm, 7 mm, 13 mm)	(9 mm, 7 mm, 6.5 mm)
Isolation du noyau	1.2 mm pour les deux bobines	

La bobine 1 est dimensionnée en imposant la contrainte C2 du tableau 1 qui fixe la densité du flux magnétique maximale dans le noyau à la limite de saturation. Pour cette raison, sa géométrie est déterminée avec un faible nombre de spires et une grande hauteur afin d'obtenir la valeur d'inductance souhaitée tout en réduisant le champ magnétique maximal H_{max} au dessous de H_{sat} . Dans la section 2, il est précisé que les bobines sont dimensionnées afin de respecter la norme CEM à sa première fréquence 150 kHz . Au delà de cette fréquence, le niveau du bruit peut dépasser la limite imposée par la norme parce que la procédure de dimensionnement ne laisse aucune marge d'erreur sur la valeur de l'inductance et les effets des capacités inter-spires ne sont pas encore pris en compte dans la méthode proposée. Ainsi, la figure 6(a) montre que la norme CEM est respectée à 150 kHz pour 15 % du rapport cyclique, qui est le point de fonctionnement considéré pour le dimensionnement. Changer le rapport cyclique à 17 % augmente le niveau du bruit et la norme n'est plus respectée parce que les effets de la saturation apparaissent et le noyau commence à perdre sa perméabilité. L'ondulation du courant de mode commun augmente encore quand le rapport cyclique s'approche de 50 % et induit un flux magnétique plus grand pour un noyau qui est déjà dimensionné à la limite de la saturation. Ainsi, la bobine 1 se sature et perd complètement son inductance dès 18 % de rapport cyclique. La contrainte normative est alors largement non respectée.

La deuxième bobine est dimensionnée en imposant la contrainte C1 du tableau 1 qui calcule la géométrie du noyau indépendamment de la valeur du courant de mode commun. En effet, le champ magnétique maximal H_{max} est inférieur au champ de saturation H_{sat} grâce à sa valeur d'inductance qui réduit considérablement I_{MC} . Ainsi, le volume de la bobine 2 est beaucoup plus petit que celui de la bobine 1 qui avait pourtant une plus petite valeur d'inductance (2.88 cm^3 pour $L = 1 \text{ mH}$ devant 6.53 cm^3 pour $L = 269 \mu\text{H}$). Dans ce cas, comme le montre la figure 6(b), la norme CEM est facile-

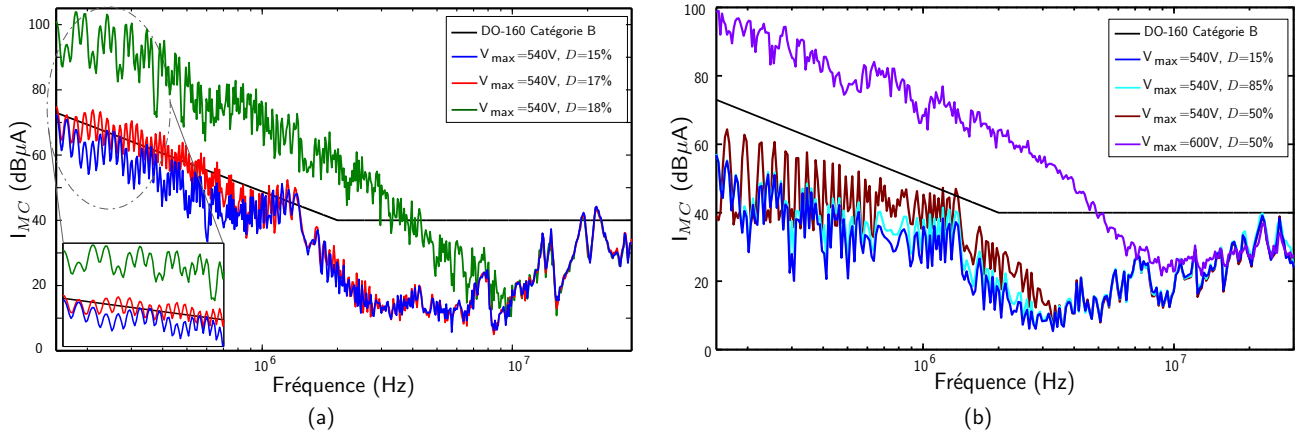


Figure 6: (a): Mesure du spectre du courant de mode commun avec la bobine 1 ; (b): Mesure du spectre du courant de mode commun avec la bobine 2

ment respectée sur toute sa plage de fréquence pour 15 % du rapport cyclique. Les effets de la saturation n'apparaissent qu'en augmentant le rapport cyclique jusqu'à $D = 50\%$ pour une tension d'entrée de 540 V, ce qui confirme que la bobine 2 est optimisée à $D = 15\%$ et sa densité de flux maximale reste proche de la saturation avec une marge plus importante que celle de la bobine 1. Une saturation complète de la bobine a été observée seulement en augmentant la tension de la source jusqu'à 600 V avec un rapport cyclique de 50 %.

Enfin, il est nécessaire de vérifier que le flux magnétique de fuite n'est pas la cause de la saturation observée dans le noyau lorsqu'on augmente la tension d'entrée ou bien le rapport cyclique [14]. Ainsi, un dernier test a été effectué avec un rapport cyclique de 85 % (avec $V_{dc}=540\text{ V}$), ce qui augmente le courant dans les enroulements de la bobine tout en gardant théoriquement la même valeur maximale du courant de mode commun que lorsque $D = 15\%$. Comme le montre la figure 6(b), aucun effet de saturation n'est observé sur le spectre de courant de mode commun qui reprend son niveau initial lorsque $D = 15\%$. Ce résultat confirme les analyses précédentes et montre la validité de l'approche proposée qui tient compte des effets de la saturation sur le noyau magnétique.

4. Conclusion

Ce papier propose une nouvelle méthode de réduction du volume de la bobine de mode commun d'un filtre CEM qui tient compte de la saturation du matériau magnétique. À cause de ce phénomène et selon les caractéristiques du circuit électrique, la valeur minimale de l'inductance qui permet de respecter la norme CEM ne correspond pas nécessairement à un volume minimal de la bobine. D'une façon générale, quand le dimensionnement de la bobine est effectué en imposant la contrainte de la saturation, il est utile d'augmenter la valeur de son inductance jusqu'à une valeur optimale pour obtenir un volume plus faible tout en améliorant l'atténuation du filtre. La prochaine étape de ces travaux consiste à inclure d'autres critères dans la procédure de dimensionnement optimal de la bobine de mode commun, comme les capacités inter-spires, le choix du matériau magnétique et les contraintes thermiques.

Remerciement

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet CE2I (Convertisseur d'Énergie Intégré Intelligent). Le CE2I est co-financé par l'Union européenne avec le soutien financier du Fonds européen de développement régional (FEDER), de l'État français et de la Région française des Hauts-de-France.

References

- [1] A. Videt, M. Messaoudi, N. Idir, H. Boulharts, and H. Vang, "PWM strategy for the cancellation of common-mode voltage generated by three-phase back-to-back inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 2675–2686, April 2017.
- [2] D. Boroyevich, X. Zhang, H. Bishinoi, R. Burgos, P. Mattavelli, and F. Wang, "Conducted EMI and systems integration," in *Integrated Power Systems (CIPS), 2014 8th International Conference on*, Feb 2014, pp. 1–14.

- [3] X. Zhang, D. Boroyevich, and R. Burgos, "Impact of interleaving on common-mode EMI filter weight reduction of paralleled three-phase voltage-source converters," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept 2013, pp. 1669–1675.
- [4] A. Muetze and C. R. Sullivan, "Simplified design of common-mode chokes for reduction of motor ground currents in inverter drives," in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, vol. 5, Oct 2006, pp. 2304–2311.
- [5] L. Fang, P. Mattevelli, D. Boroyevich, and N. Gazel, "A comprehensive design for high power density common mode EMI inductor," in *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept 2011, pp. 1861–1867.
- [6] B. Revol, "Filtrage des émissions conduites: analyse et prédimensionnement des filtres de mode commun : Compatibilité électromagnétique," *La Revue 3 E I (Paris)*, no. 65, pp. 19–28, 2011, fre.
- [7] B. Touré, J. L. Schanen, L. Gerbaud, T. Meynard, J. Roudet, and R. Ruelland, "EMC modeling of drives for aircraft applications: Modeling process, EMI filter optimization, and technological choice," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1145–1156, March 2013.
- [8] M. Delhommais, G. Dadanema, Y. Avenas, F. Costa, J. L. Schanen, and C. Vollaie, "Design by optimization of power electronics converter including EMC constraints," in *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Sept 2016, pp. 182–187.
- [9] D. O. Boillat, F. Krismer, and J. W. Kolar, "EMI filter volume minimization of a three-phase, three-level T-type PWM converter system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 2473–2480, April 2017.
- [10] B. Zaidi, A. Videt, and N. Idir, "Design method for the minimization of CM inductor volume with consideration of core saturation in EMI filters," in *PCIM*, Mai 2017.
- [11] R. Wang, D. Boroyevich, H. F. Blanchette, and P. Mattavelli, "High power density EMI filter design with consideration of self-parasitic," in *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Feb 2012, pp. 2285–2289.
- [12] C. Cuellar, A. Benabou, and N. Idir, "Characterization and modeling of hysteresis for magnetic materials used in emi filters of power converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4911–4920, Sept 2014.
- [13] F. Luo, S. Wang, F. Wang, D. Boroyevich, N. Gazel, Y. Kang, and A. C. Baisden, "Analysis of CM volt-second influence on CM inductor saturation and design for input EMI filters in three-phase DC-fed motor drive systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 7, pp. 1905–1914, July 2010.
- [14] M. L. Heldwein, L. Dalessandro, and J. W. Kolar, "The three-phase common-mode inductor: Modeling and design issues," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3264–3274, Aug 2011.