

Limites de la modélisation du couplage champ proche en présence des sources secondaires

Zhao LI, Arnaud BREARD, François TAVERNIER, Laurent KRÄHENBÜHL et Damien VOYER

Université de Lyon-Ampère (CNRS UMR5005), ECL, 69134 Ecully, France

RESUME - La caractérisation des interférences électromagnétiques générées dans les systèmes d'électroniques de puissance est une activité importante dans la compatibilité électromagnétique (CEM). En utilisant une méthode de développement multipolaire en harmoniques sphériques, le couplage magnétique entre deux éléments peut être déterminé à partir de leurs modèles équivalents. Cependant, cette méthode peut engendrer une erreur sur le couplage calculé. Dans ce papier, cette erreur sera discutée et calculée dans un cas canonique. Une solution sera aussi proposée pour compenser cette erreur.

Mots-clés — CEM, harmonique sphérique, induction.

1. INTRODUCTION

Les problématiques liées à la CEM sont souvent traitées après la mise au point d'un prototype, ce qui conduit à des coûts supplémentaires et à des retards importants avant mise en fabrication. Pour prendre en compte ces problèmes dès la phase de conception, nous avons développé une méthode prédictive, basée sur des développements multipolaires en harmoniques sphériques du rayonnement en champ proche [1]. Dans cette approche, une source est représentée par un modèle ponctuel équivalent, ce qui permet le calcul du couplage en champ proche avec un autre élément.

L'inductance mutuelle, qui quantifie le couplage magnétique entre deux dispositifs, peut ainsi être calculée à partir des coefficients du développement multipolaire de chacun des deux dispositifs. Un banc de mesure a été conçu au Laboratoire Ampère pour déterminer ces coefficients à partir des mesures du champ magnétique tout autour de la source [3]. Dans l'approche proposée, les mesures sont réalisées pour chacun des dispositifs pris séparément. L'inductance mutuelle peut ensuite être calculée pour n'importe quelles positions relatives entre les deux dispositifs en utilisant le théorème de translation des harmoniques sphériques vectorielles [2].

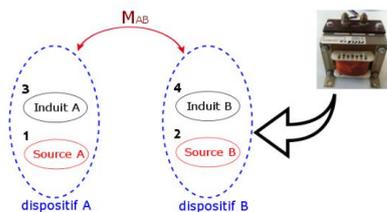


Figure 1: schéma du système pour le calcul d'inductance mutuelle

Néanmoins, en raison de l'absence de la deuxième source lors de la mesure du rayonnement de la première (et réciproquement), l'inductance mutuelle calculée avec cette méthode

est possiblement différente de la valeur théorique. L'écart est principalement dû au couplage entre les courants induits dans chacun des deux dispositifs. Concrètement, cela concerne les parties conductrices passives qui se comportent par induction comme des sources secondaires. C'est l'impact de ces couplages qui sera évalué ici dans un cas canonique.

2. DEVELOPPEMENT MULTIPOLAIRE EN HARMONIQUES SPHERIQUES

Le développement multipolaire en harmoniques sphériques Y_{nm} (ordre n et moment m) est utilisé pour la représentation du champ d'induction magnétique dans l'approximation quasi-statique (gamme 20kHz-20MHz). Il permet de décomposer un champ proche ($<1m$) en une somme infinie de termes liés à des sources élémentaires (dipôle, quadripôle, octopôle...). En coordonnées sphériques (r, θ, φ) , pour un point situé à l'extérieur de la sphère de validité de la source réelle, ce développement s'exprime pour chaque fréquence comme [1] :

$$\mathbf{B}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=-n}^{+n} -\frac{\mu_0}{4\pi} Q_{nm} \nabla \left(\frac{1}{r^{n+1}} Y_{nm}(\theta, \varphi) \right) \quad (1)$$

où les Q_{nm} sont les coefficients multipolaires qui caractérisent la source pour un courant unitaire.

Une fois les coefficients harmoniques ${}_A Q_{nm}$ et ${}_B Q_{nm}$ de deux dispositifs A et B identifiés, nous pouvons déterminer le couplage entre eux via le calcul de l'inductance mutuelle \mathcal{M}_{AB} [2]:

$$\mathcal{M}_{AB} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=-n}^{+n} (-1)^m ({}_A Q_{n,-m} * {}_B Q_{nm}) \quad (2)$$

La précision du calcul pour la mutuelle est liée au choix de l'ordre maximal n_{max} utilisé pour représenter les sources. Cependant, même pour n_{max} élevé, une partie des phénomènes induits dans le système n'est pas prise en compte comme nous allons le décrire dans ce qui suit.

3. COMPARAISON DE L'INDUCTANCE MUTUELLE ENTRE LA METHODE PROPOSEE ET LA THEORIE

3.1. Calcul dans un cas canonique

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence l'erreur sur le calcul de la mutuelle à partir d'un système pour lequel les calculs sont en partie analytiques. Sur la Fig. 1, nous considérons deux dispositifs chacun constitué d'une source (la bobine qui alimente le dispositif) et d'un inducteur (l'ensemble des phénomènes d'induction qui ont lieu sur les matériaux conducteurs du dispositif - carcasse, etc. ...). L'inducteur sera ici modélisé simplement par une bobine court-circuitée.

L'étude du couplage entre les deux dispositifs A et B revient à étudier le couplage entre les 4 circuits élémentaires notés {1 et 2} pour les sources et {3 et 4} pour les induits. Nous pouvons écrire le système à quatre accès sous la forme matricielle avec les inductances propres et les mutuelles qui définissent le couplage entre les 4 circuits élémentaires :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

En imposant que les circuits {3 et 4} sont court-circuités, le système se réduit à deux accès et on peut exprimer l'inductance mutuelle M_{AB} entre les deux dispositifs :

$$M_{AB} = M_{12} - \frac{M_{24}}{L_4} M_{14} - \frac{M_{13}}{L_3 - \frac{M_{34}M_{34}}{L_4}} M_{23} + \frac{M_{24}M_{13}}{L_3L_4 - M_{34}M_{34}} M_{34} + \frac{M_{23}L_4 - M_{24}M_{34}}{L_3L_4 - M_{34}M_{34}} M_{14} \quad (4)$$

L'inductance mutuelle M_{AB} peut par ailleurs s'écrire à partir du théorème de réciprocité de Lorentz :

$$M_{AB} = \oint_S (\mathbf{E}_A \times \mathbf{H}_B - \mathbf{E}_B \times \mathbf{H}_A) \cdot d\vec{s} \quad (5)$$

où $\{\mathbf{E}_A, \mathbf{H}_A\}$ est le champ électromagnétique induit par le dispositif A quand le dispositif B est éteint et $\{\mathbf{E}_B, \mathbf{H}_B\}$ est obtenu dans la situation réciproque. Ces champs se déduisent des champs élémentaires $\{\mathbf{e}_i^j, \mathbf{h}_i^j\}$ générés par les circuits $\{i=1,2,3 \text{ et } 4\}$ quand les circuits $\{j=1 \text{ ou } 2\}$ sont alimentés :

$$M_{AB} = \oint_S [(\mathbf{e}_1^1 + \mathbf{e}_3^1 + \mathbf{e}_4^1) \times (\mathbf{h}_2^2 + \mathbf{h}_3^2 + \mathbf{h}_4^2) - (\mathbf{e}_2^2 + \mathbf{e}_3^2 + \mathbf{e}_4^2) \times (\mathbf{h}_1^1 + \mathbf{h}_3^1 + \mathbf{h}_4^1)] \cdot d\vec{s} \quad (6)$$

Il est possible de montrer que (4) et (6) sont rigoureusement équivalentes : d'abord, on développe (6) et on en fait ressortir des termes d'inductance propre et de mutuelles associées aux circuits élémentaires ; ensuite, on établit l'expression des courants dans les circuits {3 et 4} en imposant qu'ils sont court-circuités et en utilisant la matrice de couplage (3).

Par ailleurs, nous pouvons adopter la même approche pour l'expression de M_{AB} donnée en équation (2). Celle-ci est obtenue en considérant les champs induits par chacun des deux dispositifs pris séparément :

$$M_{AB} = \oint_S (\mathbf{E}_A' \times \mathbf{H}_B' - \mathbf{E}_B' \times \mathbf{H}_A') \cdot d\vec{s} \quad (7)$$

où $\{\mathbf{E}_A', \mathbf{H}_A'\}$ est le champ électromagnétique induit par le dispositif A seul et $\{\mathbf{E}_B', \mathbf{H}_B'\}$ par le dispositif B seul. Cela revient à considérer uniquement le champ généré par les circuits {1 et 3} quand le circuit 1 est alimenté et le champ généré par les circuits {2 et 4} quand le circuit 2 est alimenté :

$$M_{AB} = \oint_S [(\mathbf{e}_1^1 + \mathbf{e}_3^1) \times (\mathbf{h}_2^2 + \mathbf{h}_4^2) - (\mathbf{e}_2^2 + \mathbf{e}_4^2) \times (\mathbf{h}_1^1 + \mathbf{h}_3^1)] \cdot d\vec{s} \quad (8)$$

En suivant la même démarche que celle qui établit le lien entre (4) et (6), on déduit de (8) :

$$M_{AB} = M_{12} - \frac{M_{24}}{L_4} M_{14} - \frac{M_{13}}{L_3} M_{23} + \frac{M_{24}M_{13}}{L_3L_4} M_{34} \quad (9)$$

Nous constatons que l'inductance mutuelle calculée équation (9) ne correspond pas à la formule théorique donnée équation (4).

4. DEMONSTRATION DANS UN CAS CANONIQUE

Afin d'établir les configurations pour lesquelles l'erreur sur l'inductance mutuelle devient non négligeable, nous avons effectué les simulations avec des boucles élémentaires : chacun

des dispositifs est constitué d'une spire alimentée (source) et d'une spire en court-circuit (induit).

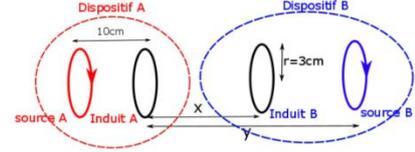


Figure 2: étude d'inductance mutuelle pour un exemple canonique

Différentes combinaisons pour la position des quatre éléments ont été testées. Finalement, nous avons trouvé que l'erreur relative de l'inductance mutuelle entre deux systèmes est critique quand les quatre boucles sont alignées avec les deux induits en vis-à-vis (voir Figure 2).

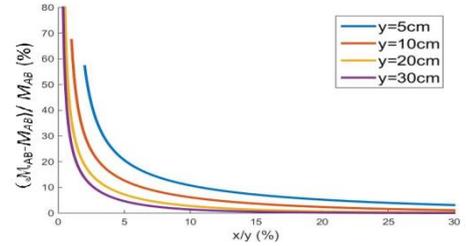


Figure 3: étude de l'erreur relative sur l'inductance mutuelle

La figure 3 montre l'évolution de l'erreur relative sur l'inductance mutuelle entre deux dispositifs pour différentes valeurs des paramètres x et y. Pour y=10 cm, nous observons une erreur de 10 % quand x/y=0.05. Dans ce cas, la distance entre les deux dispositifs est de 0,5 cm et la distance entre la source et l'induit à l'intérieur de chacun des deux dispositifs est de y-x = 9,5 cm. Cette situation correspond au cas où par exemple la carcasse des dispositifs présenterait un encombrement important vis-à-vis de celui de la source elle-même et que dans le même temps les deux dispositifs seraient très proches l'un de l'autre.

5. CONCLUSIONS

Dans ce papier, nous avons étudié certaines limites de la méthode prédictive que nous avons développée pour le couplage champ proche. Le problème canonique qui a été traité ici montre que l'erreur commise devient importante dans des configurations que l'on peut estimer peu courantes.

6. PERSPECTIVES

Dans le papier étendu nous proposerons une solution pour compenser cette erreur. La correction s'appuie sur l'approximation de Born [4] qui permet de séparer une source de rayonnement en deux parties : primaire (source) et secondaire (induit). Cette méthode pour compenser l'erreur d'estimation de l'inductance mutuelle sera appliquée et vérifiée avec des simulations en éléments finis et des mesures expérimentales.

7. REFERENCES

- [1] S. Zangui, K. Berger, C. Vollaie et al., "Modeling the near-field coupling of EMC filter components," Proc. of the IEEE International Symposium on EMC, pp. 825-830, 2010.
- [2] B. C. Brock, "Using vector spherical harmonics to compute antenna mutual impedance from measured or computed fields," SANDIA Report, 2001.
- [3] T.-Q. V. Hoang, A. Bréard, and C. Vollaie, "Near Magnetic Field Coupling Prediction Using Equivalent Spherical Harmonic Sources," IEEE Trans. on EMC, Vol. 56, n°6, pp. 1457-1465, 2014.
- [4] A. Abubakar, T. Habashy, "A Green function formulation of the Extended Born approximation for three-dimensional electromagnetic modelling," Wave motion 41 2005, 211-277.