

L'effet de la mutuelle et des résistances parasites sur la performance d'un filtre CEM

A. Zhou¹, M. Bensetti², C. Joubert¹, F.Lafon³, F.De Daran⁴

¹Laboratoire Ampère - LYON, charles.joubert@univ-lyon1.fr, an.zhou.ext@valeo.fr

²Laboratoire IRSEEM - Saint Etienne du Rouvray, Mohamed.Bensetti@esigelec.fr

³VALEO - Créteil, frederic.lafon@valeo.com

⁴SAGEM DEFENSE SECURITE, francois.de-daran@sagem.com

Résumé : Ce travail est consacré à l'étude de l'influence du couplage inter-composant sur la performance des filtres CEM. Pour illustrer cette influence, une étude est réalisée sur un filtre CEM passif (LC) monté en Γ . En gardant les mêmes composants passifs du filtre (condensateur et inductance) et en optimisant seulement leurs positions respectives, le comportement du filtre est fortement modifié. En plus de la mutuelle inductive, les résistances parasites (ESR du condensateur et R_L de la self) vont aussi jouer des rôles sur la qualité du filtre CEM.

Mots-clés : Compatibilité Électromagnétique (CEM), couplage inter composants, couplage électromagnétique, Filtre passif, résistances parasites.

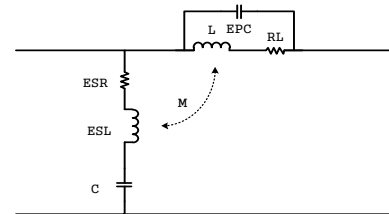
1. INTRODUCTION

Les filtres CEM sont largement utilisés dans les systèmes électroniques de puissance pour la suppression des interférences électromagnétiques. Ils sont en général composés d'une succession de condensateurs et de selfs. Ces composants étant décrits au premier ordre par leur grandeur caractéristique: la valeur de la capacité pour le condensateur, la valeur de l'inductance pour la self. Il est bien connu que cette description ne suffit pas à expliquer le comportement en haute fréquence (HF) de ces composants. Dans la figure 1(a), on est amené à compléter le modèle par des éléments parasites : une self (ESL) et une résistance série (ESR) pour le condensateur (C), une capacité (EPC) et une résistance parasite (R_L) pour l'inductance (L). Ces éléments parasites intrinsèques des composants, comme l'ESL de condensateurs et l'EPC d'inductances, et des parasites mutuels inter-composants (M), affectent considérablement les performances de filtrage du filtre CEM à des fréquences élevées [1].

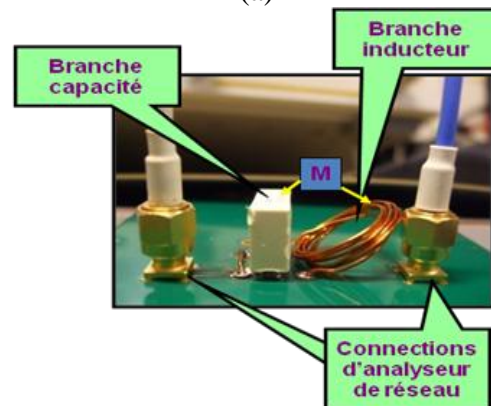
Afin d'améliorer la performance du filtre avec les mêmes composants, une méthode basée sur l'annulation de l'inductance parasite ESL ainsi que l'influence de la capacité EPC de la self et des résistances ESR et R_L sont présentées dans cet article.

2. ANNULATION DE L'INDUCTANCE PARASITE

Pour illustrer l'influence de la mutuelle, nous avons utilisé un filtre LC monté en Γ dans la figure 1. L'inductance à air utilisée peut être déplacée afin de faire varier le couplage.



(a)



(b)

Figure 1 Circuit équivalent d'un filtre LC (a) et son montage réalisé (b)

Pour la caractérisation du filtre CEM, nous avons utilisé les modèles HF des composants passifs. En combinant les effets mutuels sur la branche capacité et la branche inducteur, nous avons constaté que le comportement du filtre change selon les différentes valeurs de la mutuelle inductance entre le condensateur et la self. Les résultats d'analyse mathématique réalisés ont permis de mettre en évidence quatre configurations de la mutuelle, soit le couplage nul ($M=0$), le couplage faible ($M<ESL$), le couplage fort ($M>ESL$) et enfin le couplage optimal ($M=ESL$). Les résultats expérimentaux de la maquette pour ces quatre configurations de la mutuelle ont montré que les effets de couplages inter-composants jouent un rôle très important sur la performance du filtre. La meilleure performance du filtre est obtenue si $M=ESL$ [2] [3]. Si on le compare avec le cas $M=0$, on obtient une amélioration de plus de 20dB.

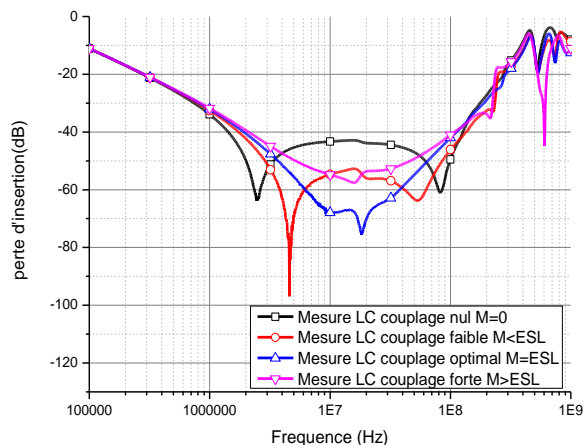


Figure 2 Perte d'insertion mesurée de la maquette pour les différentes mutuelles

Cette configuration permet à la mutuelle de compenser l'effet parasite de l'inductance ESL du condensateur. L'impédance du filtre et la fréquence de résonance dans ce cas sont donnés par les équations suivantes :

$$Z = \frac{1/j\omega C}{j\omega L(j\omega M(1-M/L)+1/j\omega C)} + j\omega EPC \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \cdot M \cdot L \cdot EPC \cdot (1-M/L)}} \quad (2)$$

En conséquence, il devient très important d'évaluer cette inductance mutuelle inter-composant pour déduire les placements des composants afin d'optimiser au maximum la performance du filtre [4].

3. EFFET CAPACITIVE (EPC) DE LA SELF

Dans la configuration $M=ESL$, il ne faut pas négliger l'effet de la capacité parasite EPC de la self. Selon les équations (1) et (2), la fonction transfert de la self dépend aussi de ce paramètre qui est lié à la construction physique de la self.

Il est bien connu que l'EPC est préjudiciable à la performance de la self en HF [5]. Afin de réduire les effets de l'EPC, traditionnellement, la distance entre les spires de l'enroulement est augmentée, mais cette amélioration des performances est encore limitée. Pour le cas de $M=ESL$, la perte d'insertion d'un filtre LC est simulée pour différentes valeurs d'EPC entre 5pF et 20pF. Dans la figure 3, on a constaté que l'EPC influence sur la partie inductive en HF, ainsi plus EPC est petit, plus le filtre est performant.

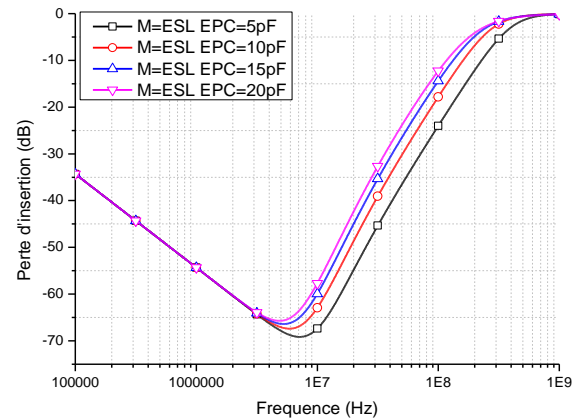


Figure 3 Perte d'insertion simulée d'un filtre LC optimisé ($M=ESL$) pour différentes capacités parasites (EPC) de la self

4. EFFET RESISTIF

La résistance ESR du condensateur est constituée non seulement de la résistance ohmique, mais aussi de la résistance série fictive représentant les pertes diélectriques. Ces pertes diélectriques sont représentées par la résonance supplémentaire du condensateur. La mesure d'ESR en fonction de la fréquence d'un condensateur film 2,2 μF est présentée dans la figure 4. Le phénomène de résonance supplémentaire du condensateur est remarqué à 19MHz. La variation d'ESR autour de cette fréquence de résonance est plus importante qu'en basse fréquence. Afin de réduire les pertes des filtres en HF, on veut notamment avoir des ESR les plus faibles possible.

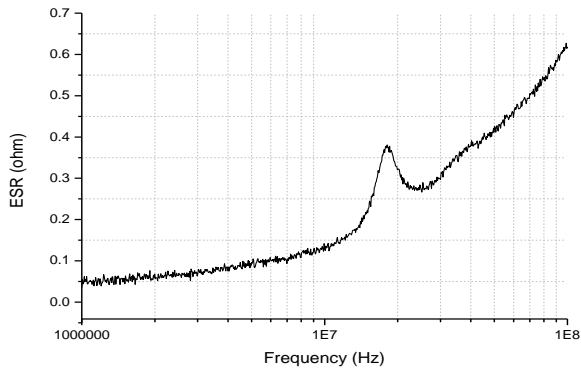


Figure 4 Résistance parasite ESR mesurée en fonction de la fréquence pour un condensateur film de 2,2uF

L'effet des résistances est souvent ignoré dans l'analyse du filtre passif. Pour montrer l'influence de ces résistances parasites (ESR du condensateur et EPR de la self), une étude est réalisée dans le cas d'un filtre LC pour différentes valeurs d'ESR et d'EPR.

4.1 Effet ESR sur le comportement du filtre

Dans le design général d'un filtre passif, les couplages inter composants sont souvent négligés ($M=0$). L'effet d'ESR est souvent ignoré quand la valeur de l'inductance $ESL \cdot \omega$ est plus importante que la valeur de l'ESR. Parce que la valeur de l'ESR est différent, l'effet inductif du condensateur domine toujours le comportement du filtre. Dans la figure 5, le gain d'un filtre LC mesuré est comparé avec les résultats de simulations pour $ESR=0.03\text{ohm}$ et un ESR mesuré en fonction de fréquence. On a constaté que l'effet de l'ESR peut être complètement négligé dans le cas $M=0$.

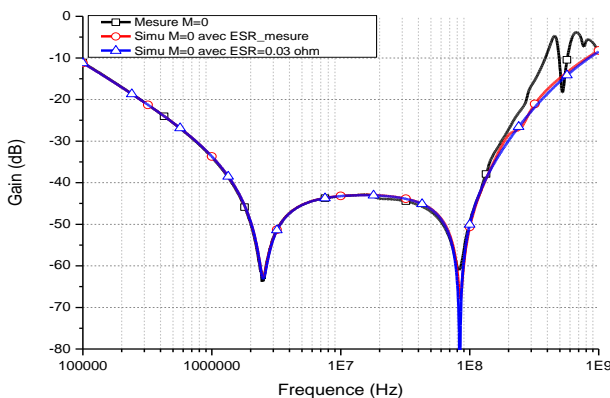


Figure 5 Gain d'un filtre LC mesuré et simulé avec ESR mesurée de 0.03 ohm quand $M=0$

Afin d'optimiser la performance du filtre, l'ESL peut être compensé par le couplage inductif direct entre le condensateur et la self. Dans ce cas-là ce paramètre ne peut plus être négligé lorsque l'ESL du condensateur est de même ordre de grandeur que l'ESR. Pour montrer cela, nous avons étudié l'influence de cette résistance dans le cas d'un filtre LC (bobine gravée sur substrat + condensateur). L'emplacement des composants est réalisé de telle façon que $M=ESL$. Pour deux valeurs de l'ESR (0Ω et 0.1Ω), nous avons constaté une variation du gain du filtre. Cette variation est bien illustrée dans la figure 6.

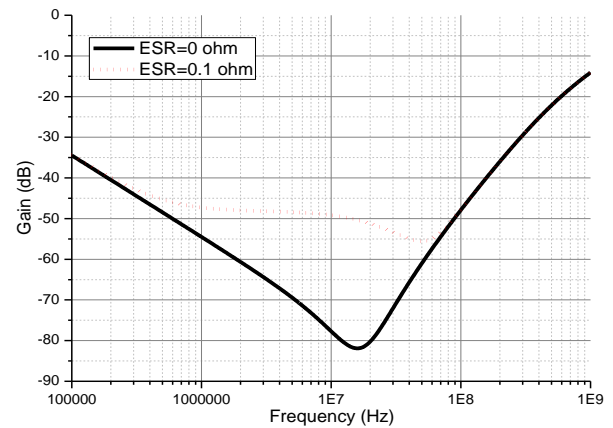


Figure 6 Simulation de gain d'un filtre LC pour $M=ESL$ dans le cas de différentes valeurs d'ESR

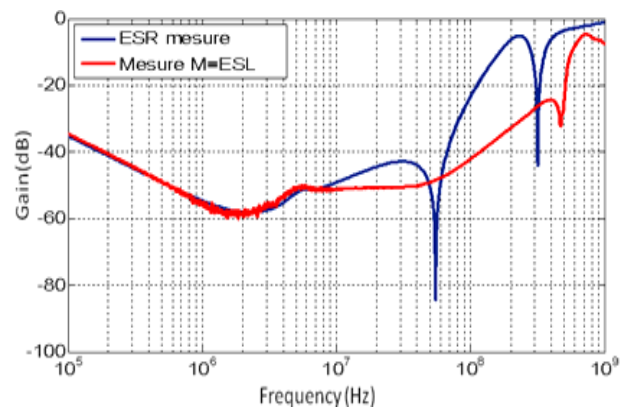


Figure 7 Simulation de gain du filtre LC avec la valeur ESR mesurée et mesure du comportement d'un filtre LC

Dans un condensateur, la valeur de l'ESR dépend énormément de la fréquence. Pour nous permettre de bien optimiser notre filtre, il est nécessaire de connaître l'évolution de cette résistance sur toute la gamme de fréquence de fonctionnement. La valeur de l'ESR en fonction de la fréquence peut être

mesuré avec un analyseur de réseau. Mais la limite de la précision de la mesure reste dans la gamme de quelques MHz. Pour notre cas, la mesure a été validée jusqu'à 6 MHz. Dans la figure 7, nous avons simulé notre filtre LC avec les valeurs de mesure d'ESR en fréquentielle. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre le modèle et la mesure jusqu'à 6 MHz.

4.2 Effet R_L sur le comportement du filtre

Les enroulements de fil de la self présente une résistance parasite en série (R_L) avec l'inductance (L) [5]. Ce paramètre peut aussi influencer la performance du filtre passif. La figure 8 montre le gain du filtre LC pour différentes valeurs de R_L (1 Ohm jusqu'à 100 Ohms). On constate que l'effet d' R_L est moins important que l'ESR du condensateur.

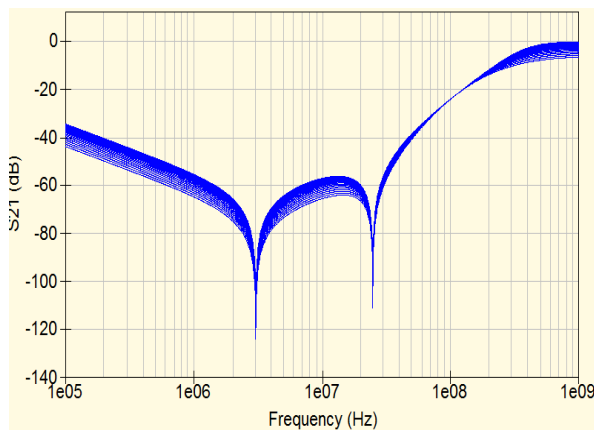


Figure 8 Simulation du gain du filtre LC avec la valeur EPR entre 1 ohm et 100 ohms

5. CONCLUSION

Ce travail présente une étude sur l'influence de l'inductance mutuelle (M), la capacité parasite (EPC) de la self et les résistances parasites (ESR du condensateur et R_L de la self) sur la performance du filtre passif. Compte-tenu des différents résultats obtenus, une bonne performance de filtre est obtenue si $M=ESL$ et la résistance parasite du condensateur ESR est prise en considération. Le processus de l'enroulement de spires de fil sur une forme cylindrique introduit la résistance du fil (R_L) ainsi que la capacité entre spires voisines (EPC). L'influence de la résistance R_L sur la performance du filtre est moins importante par rapport à l'ESR du condensateur. Minimiser EPC afin d'améliorer considérablement la performance de filtrage est

aussi important pour la suppression du bruit et la réduction d'ondulation de courant dans les applications d'électronique de puissance.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu en partie par VALEO, AIRBUS et HISPANO-SUIZA.

7. REFERENCES

- [1] S. Wang, F.C. Lee and W.G. Odendaal, "Effects of Parasites Parameters on EMI Filter Performance", Power Electronics, IEEE Transactions, Vol. 19, pp. 869-877, May 2004.
- [2] A. ZHOU, M. Bensetti, C. Joubert, F. de Daran, P. Asfaux, N. Gazel "Etude et Modélisation du couplage inter-composant pour l'optimisation de filtre CEM", Workshop 2EMC 2010
- [3] S. Wang, F.C. Lee "Effects of mutual Inductance between Inductor and Capacitor on LC Filter Performance ", Power Electronics, IEEE Transactions, pp.2615-2620, May 2008.
- [4] A. ZHOU, M. Bensetti, C. Joubert, F. de Daran, "Study and modeling of inter-component coupling to optimize EMC filter", pp 518 - EMC Europe 2011 York
- [5] Bahl, I. J. , "Lumped Elements for RF and Microwave Circuits", ISBN 1-58053-309-4