

Etude des caractéristiques et du champ rayonné par le coupleur inductif d'un système de recharge sans contact pour véhicule électrique

Mohammad IBRAHIM, Laurent BERNARD, Lionel PICHON, et Adel RAZEK

Laboratoire de Génie Electrique de Paris UMR 8507 CNRS, SUPELEC, Université Paris-Sud, UPMC, 11 rue Joliot-Curie, Gif-sur-Yvette cedex, 91192 France

RESUME - Un système de recharge sans contact pour le véhicule électrique (VE) est considéré. Un modèle 3D par éléments finis (FE) du coupleur inductif est développé dans le but de calculer les inductances (Propres et Mutuelles) et le champ magnétique rayonné à travers le système. En outre, un modèle de circuit associé à un champ de calcul permet la détermination du comportement électrique du système pendant la charge. Les résultats de simulation sont ensuite validés par comparaison avec des mesures expérimentales. Le modèle développé permet la conception du système compte tenu de l'optimisation du transfert d'énergie et des contraintes de compatibilité électromagnétique rayonnée (CEM).

Mots-clés— Chargeur Inductif, Modélisation EM, CEM Rayonné.

1. INTRODUCTION

Sécurité, fiabilité, efficacité et innocuité sont les principales exigences de la conception de transfert de puissance inductif (IPT) des systèmes de batteries de véhicules électriques. Le but est de transférer de l'énergie entre le sol et le véhicule (batterie à bord) par un système à boucle d'induction (sur le principe d'un transformateur), comme illustré à la Fig. 1 [1]. Il est nécessaire d'évaluer le niveau de champ électromagnétique à l'intérieur et autour du véhicule afin de s'assurer que les valeurs sont conformes aux normes en vigueur [2], [3], [4]. La conception nécessite la modélisation avancée du coupleur inductif et de l'électronique de puissance depuis la source jusqu'à la batterie. Une modélisation par éléments finis 3D a été développée prenant en compte les bobines, le blindage magnétique assuré par des ferrites et une représentation simplifiée du châssis du véhicule dont l'effet sur le champ rayonné est très important [4].

Quatre configurations sont envisagées pour le coupleur: avec châssis et ferrites, sans châssis mais avec ferrites, sans châssis ni ferrites et avec châssis sans ferrites. Cette étude permet de montrer l'effet de ces différents éléments sur les caractéristiques du coupleur en fonction du positionnement du véhicule.

Enfin, un test pour une puissance transmise de 2 kW est effectué dans le but de valider le modèle développé en termes de grandeurs électriques dans le circuit et de champ rayonné.

2. MOSELISATION DU COUPLEUR INDUCTIF (CI)

Un modèle de structure circulaire planaire du coupleur est constitué comme illustré sur la Fig. 2. Il contient deux bobines circulaires (émetteur et récepteur), et deux plaques de ferrites circulaires qui recouvrent entièrement les bobines comme un blindage magnétique.

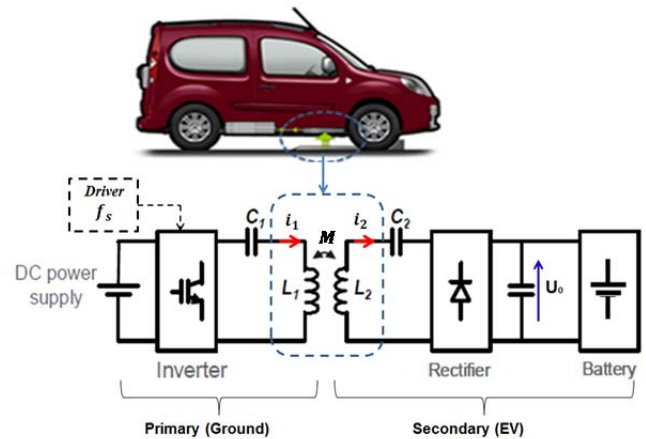


Fig.1: IPT système de recharge pour VE (KANGOO-RENAULT)

La conception comprend également une plaque en acier qui représente le châssis simplifiée du VE. Les deux bobines dans ce modèle sont identiques et situées dans des plans parallèles. La distance entre bobines (d), et le décalage entre les axes (sh) dépendent de la position du VE. Les courants dans les bobines peuvent être considérés comme sinusoïdaux et le problème est donc résolu dans le domaine fréquentiel en utilisant la formulation en potentiel vecteur magnétique (1):

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) + i\omega\sigma A = J_e \quad (1)$$

où A représente le potentiel vecteur, μ est la perméabilité, ω est la pulsation de la fréquence, σ est la conductivité électrique et J_e est la densité de courant.

Les ferrites sont considérées comme des matériaux linéaires, car l'induction ne dépasse pas 0.4T. Les courants de Foucault

dans les ferrites sont pris en compte et le châssis est considéré comme un conducteur électrique parfait. En effet, l'épaisseur de peau dans le châssis en acier est négligeable pour la fréquence de fonctionnement $f = 30kHz$.

Les résistances des bobines sont négligées dans la conception. En outre, l'effet des condensateurs parasites apparaît seulement à des fréquences très élevées (de l'ordre MHz) [5]. Pour notre application de 2kW, la fréquence de fonctionnement est de l'ordre de quelques dizaines de kHz (30 kHz)[6]. Le facteur de couplage est donné par:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2)$$

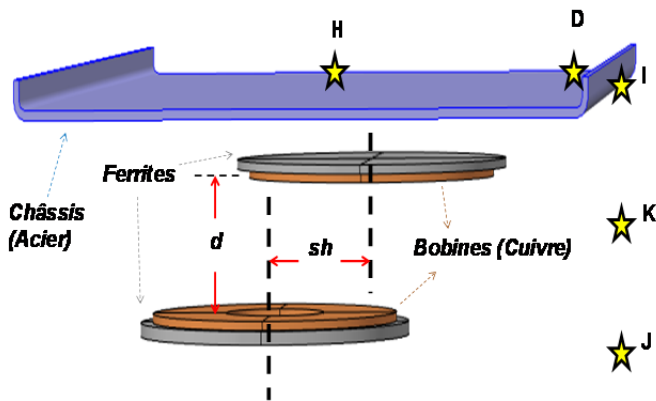


Fig.2: Structure 3D d'un CI avec un blindage, un châssis simple et les points de mesure (étoiles) pour $|B|$

Les inductances propres et mutuelles (L_1 , L_2 et M) sont calculées pour différentes valeurs des paramètres d et sh , pour quatre configurations du CI comme présenté dans le Tableau 1. Ces inductances sont calculées par des intégrales de volume dérivées de l'expression de l'énergie magnétique donnée par le calcul par éléments finis.

Tableau 1. Configurations du CI

	Configuration
BFC	Le système de Fig. 2 comprenant Bobines, Ferrites et Châssis
BF	Bobines et Ferrites
B	Bobines seules
BC	Bobines et Châssis

3. COMPARAISONS ENTRE LES CONFIGURATIONS

Les valeurs de ces inductances et du facteur de couplage pour les quatre configurations sont données dans les graphiques des Fig. 4 et Fig. 5. Par comparaison entre ces résultats, on observe les tendances suivantes :

- Inductances propres L_1 et L_2 : les valeurs les plus grandes sont obtenues dans les configurations avec ferrites. Dans toutes les configurations le décalage a peu d'effet. L'augmentation de la distance entre bobines a des effets contraires dans les

configurations avec et sans ferrites. Dans les configurations BFC et BF, les inductances propres diminuent lorsque la distance augmente. Dans la configuration BC, les inductances propres augmentent avec la distance. On constate aussi que la valeur de L_2 est toujours légèrement inférieure celle de L_1 en présence du châssis ce qui rend donc le système non-symétrique.

- Pour la mutuelle M : La présence des ferrites permet d'obtenir de valeurs de M beaucoup plus grandes que dans les autres configurations. La valeur de M dans la configuration BFC est plus petite que celle dans la configuration BF mais elle est moins sensible au décalage. L'effet de l'augmentation de la distance entre bobines est similaire pour toutes les configurations.

En conclusion, l'utilisation d'un blindage magnétique est essentielle pour obtenir des valeurs de mutuelle satisfaisantes. La présence du châssis dans une configuration réaliste diminue les valeurs des inductances propres et mutuelles. Il a aussi pour effet d'introduire une dissymétrie dans le système et de le rendre moins sensible au décalage.

Le facteur de couplage k pour les quatre configurations est représenté en Fig.6. Le meilleur couplage est obtenu pour la configuration BFC, mais il est de configuration BFC trop quand il y a un décalage entre les axes des bobines. Ceci est un avantage à considérer le châssis dans le FEM comme un cas réel pour EV.

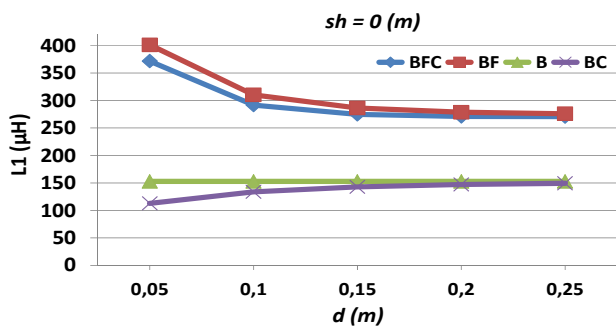
4. TEST DE VALIDATION

Un test de validation pour une puissance transmise de 2kW pour charger une batterie 300 V est effectué pour vérifier le niveau de $|B|$ en certains points de VE et dans l'environnement proche (points I, J et K dans la Fig. 2).

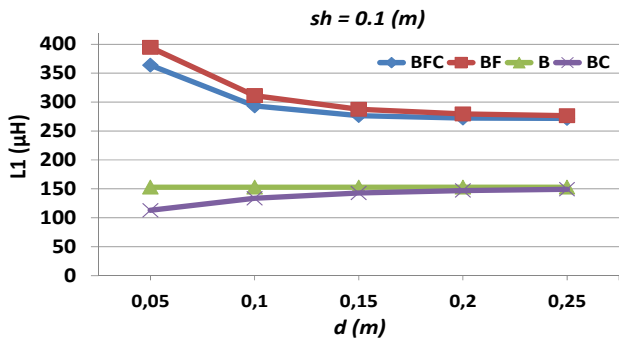
Les paramètres de positionnement sont: $d = 10$ cm, $sh = 0$ avec une fréquence de commande de l'onduleur $f_s = 33kHz$ et le courant primaire $i_1 = 15A$. Les simulations et les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 2 pour certains paramètres de systèmes. Ici, nous montrons le point où le niveau de $|B|$ supérieur aux autres qui est K sur la Fig. 2. Donc les autres points sont sous le niveau de densité de flux magnétique maximale autorisée pour l'exposition humaine ($6,25 \mu T$).

Tableau 2. Paramètres de Test

Paramètre	Mesuré	Simulé
U_0	300 V	300 V
P_0	1812 W	2038 W
Point H	0.6 μT	0 μT
Point D	1.93 μT	1.88 μT
Point I	4.13 μT	4.8 μT
Point K	4.84 μT	5.01 μT

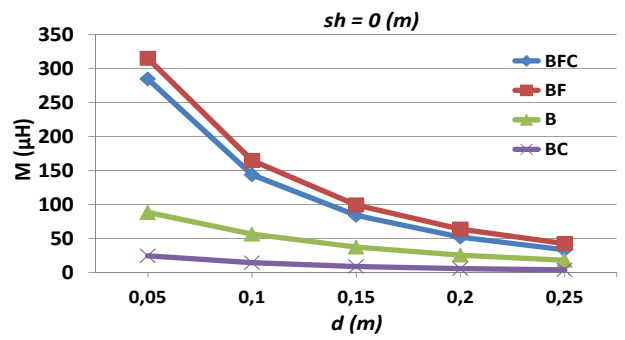


a)

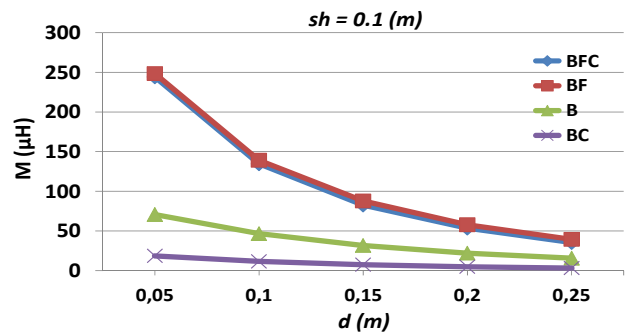


b)

Fig.3 : L_1 pour les configurations du Tableau 1) pour des décalages: a) $sh=0$, b) $sh=0.1$ m

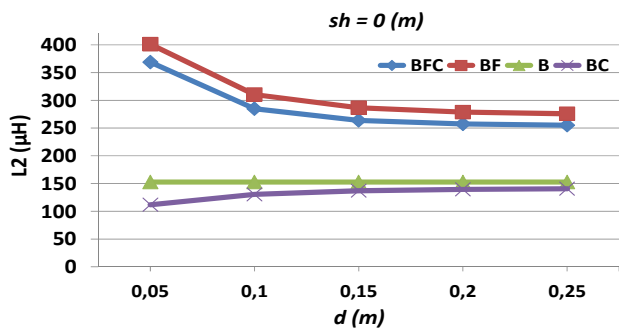


a)

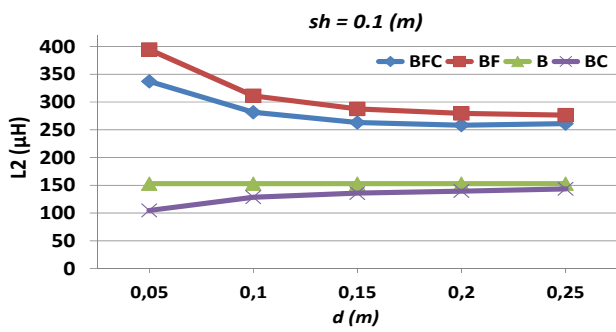


b)

Fig.5 : M pour les configurations du Tableau 1) pour des décalages: a) $sh=0$, b) $sh=0.1$ m

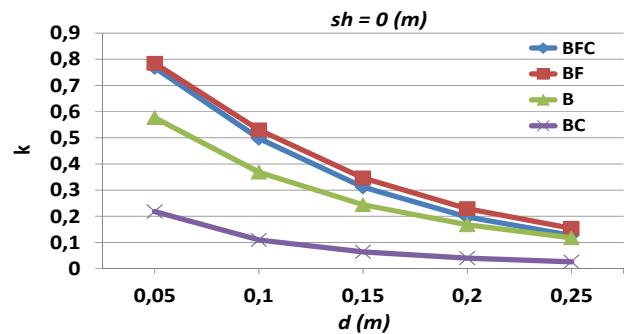


a)

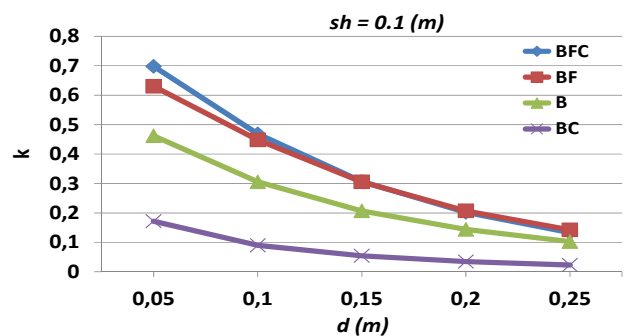


b)

Fig.4 : L_2 pour les configurations du Tableau 1) pour des décalages: a) $sh=0$, b) $sh=0.1$ m



a)



b)

Fig.6 : Facteur de couplage k pour les configurations du Tableau 1) pour des décalages: a) $sh=0$, b) $sh=0.1$ m

Le calcul de l'induction B est effectué sur un segment de 1m partant du bord du châssis vers l'extérieur du véhicule et équidistant des deux bobines afin de comparer les résultats d'excitations de la bobine primaire avec 15A et 40A. Deux cas sont considérés : un cas sans un décalage ($sh=0$), et le cas avec décalage ($sh=0.1m$). Le système étudié est illustré dans la Fig. 7.

Les résultats des simulations sont montrés dans la Fig. 8 et comparés avec la limite pour l'exposition humaine ICNIRP ($6.25\mu T$). Ces résultats montrent que le décalage a un effet important sur le champ rayonné. La valeur du champ peut dépasser la norme même pour des valeurs de courant correspondant au fonctionnement normal du système.

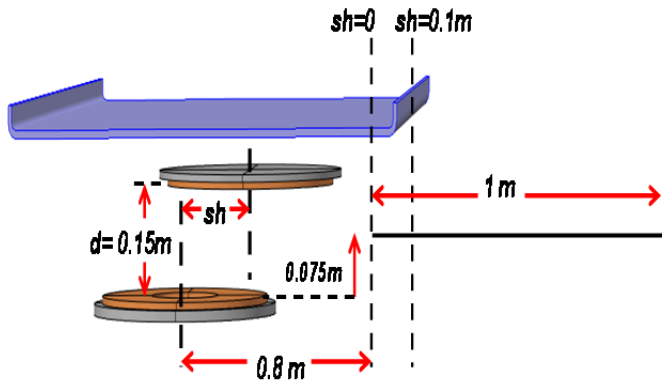


Fig.7: Schéma de la configuration avec le châssis et la ligne où le calcul de l'induction est effectué (à l'extérieur du véhicule).

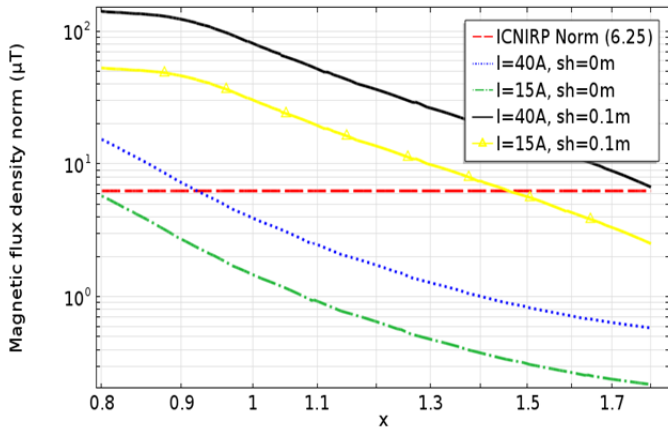


Fig.8: Norme de l'induction magnétique (μT) calculée à l'extérieur du véhicule sur la ligne de 1 m présentée en Fig.6.

Les résultats des simulations électriques de l'interface circuit électrique avec la modélisation EF pour le test de validation est effectué sous l'hypothèse du premier harmonique pour le système en Fig. 1. Le schéma électrique au premier harmonique qui est simulé dans COMSOL est présenté en Fig. 9 [7]. v_1 est la tension de sortie de l'onduleur au premier harmonique, et v_2 est la tension d'entrée au niveau de la redresseur, et R_e est la résistance équivalente à l'ensemble redresseur-capacité de filtrage-charge (la capacité est assez grande pour maintenir une tension continue aux bornes de la batterie) (analyse au premier harmonique). Les résultats des simulations sont montrés dans la Fig. 10.

Les courbes de la Fig. 10 montrent que le système est à la résonance. Les courants primaire et secondaire sont en opposition de phase et les courants sont en phase avec les tensions au primaire et au secondaire [8]. On note aussi que le circuit de double résonance série-série peut travailler comme un transformateur élévateur. L'inconvénient est le niveau de tension élevée aux bornes de chaque bobine (v_{L1} , v_{L2}) et aux bornes des capacités de résonance.

Enfin, les valeurs du courant absorbé par la charge et la tension aux bornes de la batterie peuvent être calculées par : $I_0 = \frac{2|i_2|}{\pi} \approx \frac{2}{\pi} * 10.2 = 6.65A(dc)$, $V_0 = \frac{\pi|v_2|}{4} \approx \frac{\pi}{4} * 400 = 314V(dc)$, donc la puissance transférée est $P_0 = I_0V_0 = 2038W$.

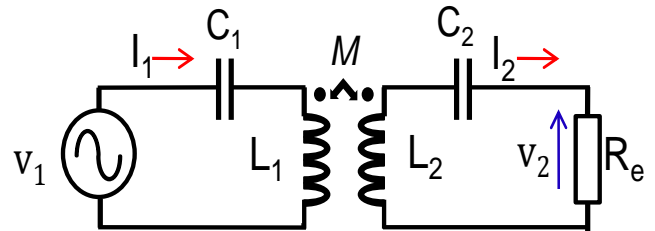


Fig.9 : Schéma électrique au premier harmonique du système global en Fig.1.

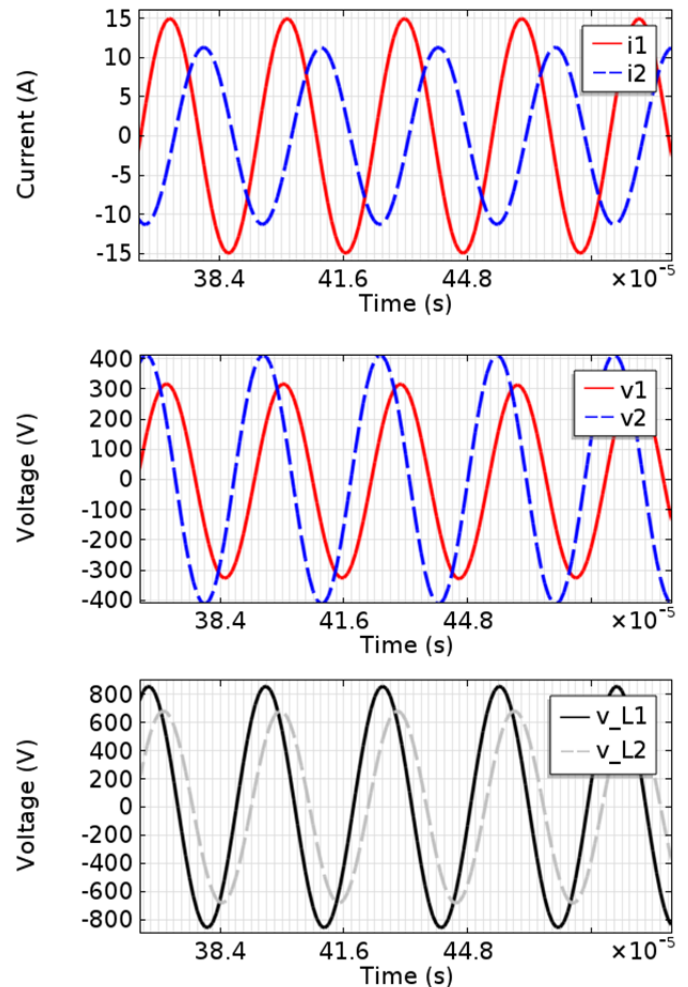


Fig.10 : Résultats des simulations circuit; courants et tensions primaires et secondaires, et tensions aux bornes des bobines.

5. CONCLUSIONS

Dans ce papier un système de recharge sans contact est étudié pour l'évaluation des paramètres du coupleur et du rayonnement. Une modélisation par éléments finis est effectuée pour quatre configurations différentes du CI. La modélisation permet de calculer les inductances propres et mutuelles dans chaque configuration. Les résultats montrent que la présence du châssis modifie significativement les valeurs de (L1, L2, M) et le rayonnement du système.

Un test de 2kW est considéré pour valider les simulations. Les valeurs mesurées sont cohérentes avec les résultats des simulations. Ainsi le modèle développé est validé et peut être utilisé pour d'autres tests. La présence de personnes à proximité du système et la géométrie du VE seront l'objet de prochains travaux de recherche.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les partenaires qui ont soutenu ce travail dans le cadre du projet de CINELI (Charge Inductive Electrique Interopérable). Entreprises: Renault, Schneider Electric et Newtech Concept. Le projet est labellisé Movéo, et les organismes de financement sont: Oséo (Fond Unique Interministériel) et Ile-de-France.

7. REFERENCES

- [1] M. Ibrahim, L. Pichon, L. Bernard and A. Razek, "A 3D Electromagnetic Analysis and Circuit Modeling for Wireless Charging of Electrical Vehicles", International Conference on Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), Budapest, Hungary, 2013.
- [2] M. Budhia, G.A. Covic, J.T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 26, No. 11, pp 1115-1123, Nov. 2011.
- [3] H. Wu, A. Gilchrist, Ky Sealy, D. Bronson, "A High Efficiency 5kW Inductive Charger for EVs using Dual Side Control," IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 8, No. 3, pp. 585 - 595, Aug. 2012.
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, [ICNIRP] "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields", Health Physics, Vol. 74, No. 4, Apr 1998.
- [5] S. Raju, R. Wu and M. Chan, C. P. Yue, "Modeling of Mutual Coupling between Planar Inductors in Wireless Power Applications," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 0, No. 0, pp. 1 - 10, Mar. 2013.
- [6] J. Acero, C. Carretero, I. Lope, R. Alonso, O. Lucía, and J.M. Burdio, "Analysis of the Mutual Inductance of Planar-Lumped Inductive Power Transfer Systems," IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1 pp. 410-420, Jan. 2013.
- [7] R.W. Erickson and D.Maksimovic', Fundamentals of Power Electronics, 2nd ED., Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [8] J. Sallán, J. L. Villa, A. Llombart, and J. Fco. Sanz "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, No. 6, pp. 2140 – 2149, Jun 2009.