

文章编号: 2095-4980(2016)04-0615-06

LCL 谐振型感应电能传输系统特性

周继昆, 张 荣, 张 毅

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 相对于传统的电感电容(LC)谐振型感应电能传输系统, 串并联(LCL)谐振型感应电能传输系统有更大的功率传输能力, 但其特性更为复杂。针对 LCL 型感应电能传输系统的高阶非线性和复杂的频率特性, 利用系统的互感耦合模型, 对系统的谐振参数匹配方法、变负载情况下系统的频率特性以及功率传输特性进行了分析研究, 给出了系统原边谐振参数、传输功率和效率的计算方法, 最后通过仿真验证了理论分析的正确性。

关键词: 串并联谐振; 感应电能传输系统; 参数匹配; 系统性能

中图分类号: TN702

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0615

Characteristics of LCL resonant Inductive Power Transfer system

ZHOU Jikun, ZHANG Rong, ZHANG Yi

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The Inductor Capacitor Inductor(LCL) type Inductive Power Transfer(IPT) system is a kind of new resonant topology for IPT system, with a larger power transfer capability and a more complicated frequency characteristic than the conventional LC resonant one. To deal with the high order nonlinear and complex frequency characteristics, the resonant parameter compensation method is presented by impedance analysis based on the mutual coupling model. The frequency and power transfer performance with load variation are analyzed and then the power transfer and efficiency computing method are presented. Simulation results have verified the theoretical results.

Key words: Inductor Capacitor Inductor resonance; Inductive Power Transfer system; parameter compensation; system performance

在感应电能传输(IPT)系统中, 为了提高系统传输效率和减小开关管损耗, 在系统原边通常采用谐振变换器来产生高频导轨电流。LC 串联或并联谐振网络是谐振变换器常用的 2 种拓扑结构^[1-2], 其结构简单, 容易实现。然而在串联谐振变换器中, 通过开关管的电流与导轨电流相等, 开关管导通损耗较大; 在并联谐振变换器中, 开关管所承受的电压为输入电压的 Q 倍(Q 为 LC 谐振网络的品质因数, 通常远大于 1), 开关管容易损坏^[3-4]。

LCL 谐振变换器可以避免这 2 种缺点, 近年来, 已经在 IPT 系统中得到了大量的应用^[5-8], 即 LCL 谐振型 IPT 系统。其输入为电压源, 因此, 开关管两端的电压与输入电压相等。然而由于 LCL 谐振网络增加了储能元器件, 系统的分析设计更为复杂。本文以 LCL 谐振型 IPT 系统为研究对象, 对系统谐振参数匹配、频率特性和功率传输特性进行了分析研究, 并通过在 Matlab 中搭建系统的拓扑结构验证分析结果的正确性。

1 LCL 谐振网络补偿参数匹配

根据副边拓扑结构的不同, LCL 型 IPT 系统的拓扑电路可分为 LCLS 型和 LCLP 型, 其中 S 和 P 分别代表副边串联和并联补偿, 系统电路拓扑如图 1(a),(b)所示。

图 1 中 R_r 和 R_p 分别为电感 L_r 和 L_p 的等效电阻, R_L 为纯电阻负载, M 为原副边之间的互感。 i_r 和 i_p 分别为原边逆变器电流和导轨电流, i_s 为副边谐振电流。 U_{in} 为逆变器的输出电压, 由于 LCL 网络有较好的滤波特性, 在分析时只考虑其基波分量, 其有效值为:

$$U_{in} = \frac{2\sqrt{2}U_{dc}}{\pi} \quad (1)$$

式中 U_{dc} 为逆变器的输入直流电压。

由于原、副边之间的耦合效应，在配置 IPT 系统原边谐振参数时，应充分考虑副边反射阻抗对原边固有谐振频率的影响，通过匹配原边电感 L_r 和电容 C_p ，使原边的零相角率与副边固有谐振频率相等，这样可以让系统获得最大的电能传输能力。因此，有必要通过系统的互感耦合等效模型来研究原边补偿拓扑参数的设计，互感耦合等效电路如图 2(a),(b)所示，其中 $-j\omega MI_s$ 和 $j\omega MI_p$ 分别为原、副边之间的感应电动势， ω 为系统的工作频率， I_r 和 I_p 为原边谐振电流的有效值， I_s 为副边谐振电流的有效值。

根据图 2，系统副边的输入阻抗为：

$$Z_s = \begin{cases} j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L & \text{LCLS} \\ j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + 1/R_L} & \text{LCLP} \end{cases} \quad (2)$$

副边反射到原边的等效阻抗 Z_p 可表示为：

$$Z_p = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (3)$$

为了使副边拾取到最大功率，通常将副边的固有谐振频率设定为逆变器的工作频率，即：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)，得反射阻抗为：

$$Z_{p0} = \begin{cases} \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} & \text{LCLS} \\ \frac{M^2 R}{L_s^2} - j \frac{\omega_0 M^2}{L_s} & \text{LCLP} \end{cases} \quad (5)$$

这时，LCL 谐振网络的输入阻抗(Z_{i0})可表示为：

$$Z_{i0} = j\omega_0 L_r + R_r + \frac{1}{j\omega_0 C_p + 1/(j\omega_0 L_p + R_p + Z_{p0})} \quad (6)$$

匹配系统谐振参数的目的是使原边的功率因数为 1，即输入阻抗的虚部($\text{Im}Z_{i0}$)为 0，在工程设计中线圈 L_r 和 L_p 是确定的，因此，应选择合适的 C_p 满足：

$$\text{Im}Z_{i0} = 0 \quad (7)$$

求解式(7)得：

$$C_{ps} = \frac{L_p^2 R_L^2 + M^4 \omega_0^2 + 2L_p L_r R_L^2 + \sqrt{(M^4 \omega_0^2 + L_p^2 R_L^2)^2 - 4L_r^2 M^4 R_L^2 \omega_0^2}}{2L_r \omega_0^2 (L_p^2 R_L^2 + M^4)} \quad (8)$$

$$C_{pp} = \frac{M^4 R_L^2 / L_s^4 + (L_p - M^2 / L_s)^2 \omega_0^2 + 2(L_p - M^2 / L_s) L_r \omega_0^2}{2L_r \omega_0^2 [\omega_0^2 (L_p - M^2 / L_s)^2 + M^4 R_L^2 / L_s^4]} + \frac{\sqrt{[M^6 R_L^2 / L_s^4 + (L_p - M^2 / L_s)^2 \omega_0^2]^2 - 4\omega_0^2 L_r^2 M^4 R_L^2 / L_s^4}}{2L_r \omega_0^2 [\omega_0^2 (L_p - M^2 / L_s)^2 + M^4 R_L^2 / L_s^4]} \quad (9)$$

式(8)和式(9)分别为 LCLS 和 LCLP 原边谐振电容匹配的计算方法。

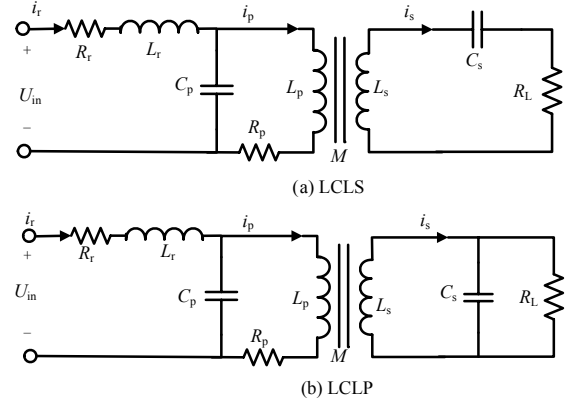


Fig.1 Topology of LCL IPT system
图1 LCL型IPT系统电路拓扑

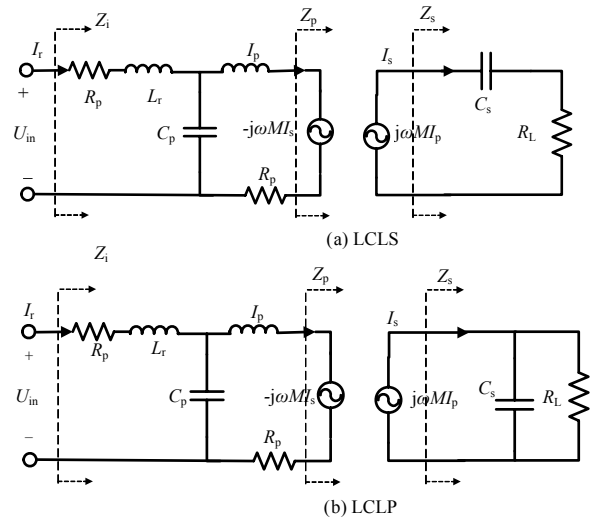


Fig.2 Mutual inductance coupling model
图2 系统互感耦合模型

2 系统频率特性分析

由式(8)和式(9)可知, LCL 谐振型 IPT 系统的原边补偿电容的大小与负载 R_L 有关, 因此, 当原边谐振电容固定后, 系统的零相角频率点会发生漂移, 若系统的零相角频率会随负载变化而改变, 导致原边功率因数降低, 因此, 有必要对这一现象进行分析。通过让式(7)中的虚部为 0, 可以求解出系统零相角频率关于负载 R_L 的解析表达式, 但方程的解过于复杂, 本文通过计算数值解的方法来观察负载变化时对于系统零相角频率的影响。为了便于分析, 定义系统归一化频率 μ :

$$\mu = \frac{\omega}{\omega_0} \tag{10}$$

设系统参数按 50 Ω 的负载阻值进行配置, 如表 1 所示, 式(10)中 ω_0 为负载 50 Ω 时对应的原边零相角频率, ω 表示负载变化后对应的原边零相角频率, μ 为两者之比。

设负载电阻值变化范围为 10 Ω 到 100 Ω , 步长为 10 Ω 。系统的归一化零相角频率随负载的变化规律如图 3 所示。

从图 3 可以看出: 对于 LCLS 型的系统, 当负载阻值向大于设计点(50 Ω 对应的系统参数)电阻方向变化时, 系统的零相角频率趋于稳定, 当负载阻值向小于设计点电阻方向变化时, 系统的零相角频率会随着负载电阻的变小而偏离设计点频率; 而对于 LCLP 型系统, 系统软的零相角频率会随着负载电阻偏离设计点阻值而偏离设计点频率。

表 1 系统参数表

Table1 Parameter of system

parameter	value
series inductor $L_s/\mu\text{H}$	220
primary inductor $L_p/\mu\text{H}$	110
secondary inductor $L_s/\mu\text{H}$	110
coupling inductor $M/\mu\text{H}$	33
load R_L/Ω	50
secondary capacitor $C_s/\mu\text{F}$	0.25

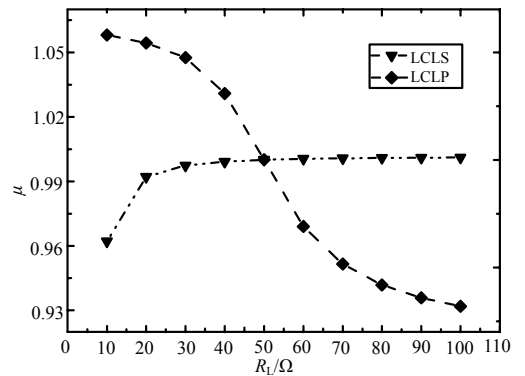


Fig.3 Normalized frequency changes with load

图 3 归一化频率随负载的变化

3 系统功率传输特性分析

设计 IPT 系统的最终目的就是让系统达到期望的传输功率和效率, 当用电设备的阻值在一定范围内变化时, 由图 3 可知系统的工作频率也会发生变化, 因此, 研究系统浮频工作模式下系统的传输功率和效率特性对系统拓扑和参数的设计有重要的指导意义。

当系统在零相角频率点工作时, 输入阻抗的虚部 $\text{Im}(Z_i)$ 为 0, 则激励电流有效值为:

$$I_i = \frac{2\sqrt{2}U_{dc}}{\pi \text{Re}(Z_i)} \tag{11}$$

将式(1)和式(5)代入式(11)可以分别求出 LCLS 型拓扑和 LCLP 型拓扑的激励电流 I_{is} 和 I_{ip} , 其中

$$I_{is} = \frac{2\sqrt{2}U_{dc} (C_p^2 L_p^2 R_L^2 \mu^4 \omega_0^4 + C_p^2 M^4 \mu^6 \omega_0^6 - 2C_p L_p R_L \mu^2 \omega_0^2 + R_L^2)}{\pi M^2 \mu^2 \omega_0^2 R_L} \tag{12}$$

$$I_{ip} = \frac{2\sqrt{2}U_{dc} (C_p^2 L_p^2 L_s^4 \mu^4 \omega_0^4 + C_p^2 M^4 \mu^2 \omega_0^2 R_L^2 + C_p^2 L_s^2 M^4 \mu^4 \omega_0^4)}{\pi L_s^2 M^2 R_L} + \tag{13}$$

$$\frac{2\sqrt{2}U_{dc} [2C_p L_s^3 M^2 \mu^2 \omega_0^2 + L_s^4 - 2C_p L_p L_s^3 \mu^2 \omega_0^2 (C_p M^2 \mu^2 \omega_0^2 + L_s)]}{\pi L_s^2 M^2 R_L}$$

根据文献[7]可知, 原边谐振电流和逆变器输出电流有以下关系:

$$I_p = \frac{L_r}{L_p} I_i \tag{14}$$

令 $L_r = nL_p$, 则在理想情况下系统可传输的最大功率为:

$$P_{\max} = \begin{cases} \frac{n^2 I_{is}^2 \mu^2 \omega_0^2}{R_L} & \text{LCLS} \\ \frac{n^2 I_{ip}^2 M^2 R_L}{L_s^2} & \text{LCLP} \end{cases} \quad (15)$$

则系统的最大传输效率为:

$$\eta_{\max} = \begin{cases} \frac{n^2 I_{is} \mu^2 \omega_0^2}{R_L U_{dc}} & \text{LCLS} \\ \frac{n^2 I_{ip} \mu^2 \omega_0^2}{R_L U_{dc}} & \text{LCLP} \end{cases} \quad (16)$$

为了验证理论分析的正确性, 在 Matlab/Simulink 搭建电路拓扑模型如图 4 所示, 仿真参数如表 1 所示, 图 4 中 Controller 模块为频率跟踪控制器, 当系统因负载变化导致零相角频率改变时, 控制器可根据电流相位实时改变逆变器工作频率, 保持逆变器工作频率与系统零相角频率一致^[1]。设系统输入电压为 50 V, 负载从 10 Ω 到 100 Ω 变化, 变化步长为 10 Ω。其中 E 表示系统传输效率, W 表示系统传输功率。

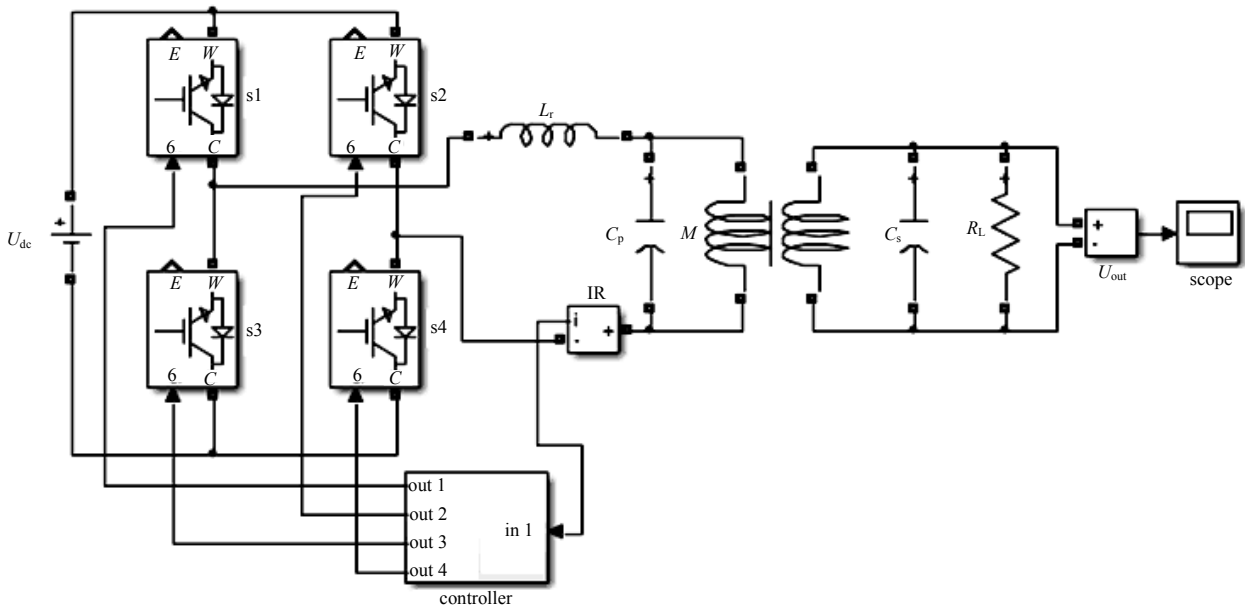


Fig.4 Simulink simulation model
图 4 Simulink 仿真模型

2 种不同拓扑型 IPT 系统的传输效率随负载的变化曲线分别如图 5(a),(b)所示。

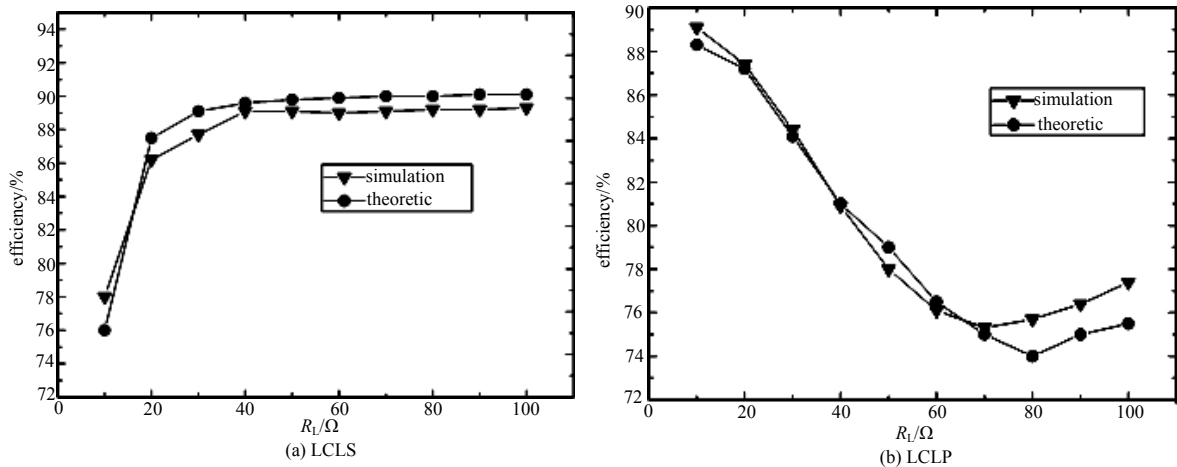


Fig.5 Efficiency characteristic curves of the system
图 5 系统效率特性曲线

从图5可以看出系统传输效率仿真结果与理论分析结果较为接近:LCLS型拓扑的IPT系统在负载阻值较大时,可以实现较高的传输效率,而LCLP型的IPT系统在负载阻值较小时,系统传输效率较高。

2种不同拓扑型IPT系统的传输功率随负载的变化曲线分别如图6(a),(b)所示。

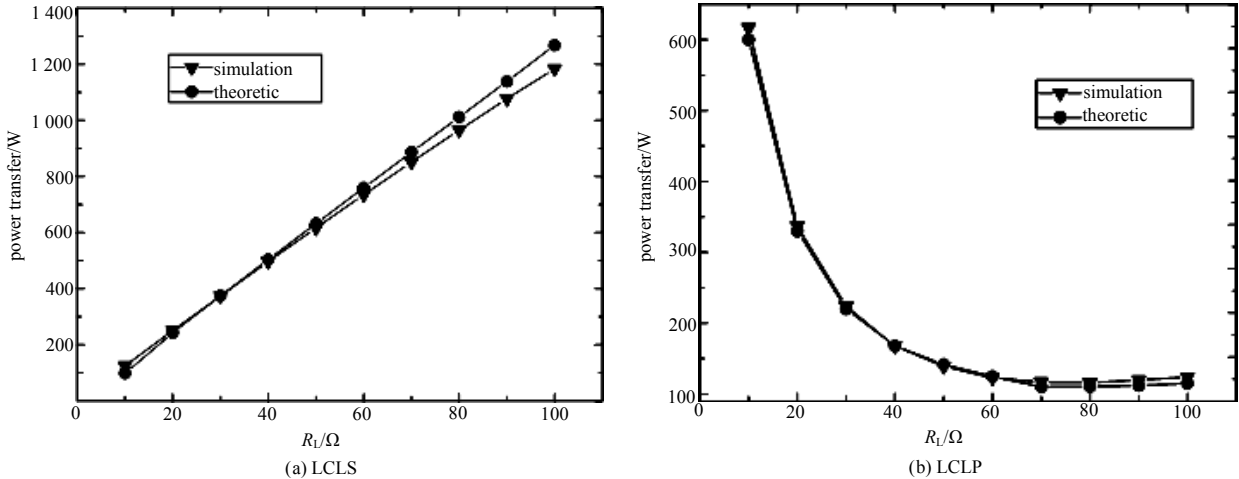


Fig.6 Power characteristic curves of the system

图6 系统功率特性曲线

从图6可以看出系统传输功率的仿真结果与理论分析结果较为接近:LCLS型拓扑的最大传输功率与负载电阻基本成线性关系,电阻越大,系统的最大输出功率越大;而LCLP型拓扑的最大传输功率与负载电阻成反比,负载电阻越小,系统的最大输出功率越大。

综上所述,LCLS拓扑型IPT系统在负载阻值较大时可以实现大功率、高效率的传输,而LCLP拓扑型IPT系统在负载阻值较小时可以实现大功率、高效率的传输。这2种不同拓扑的系统在性能上可以相互补充,在实际应用中,可以根据不同的需求来选择IPT系统的拓扑结构。

4 结论

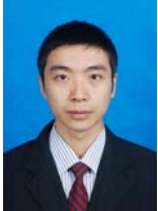
本文以LCL谐振型IPT系统为研究对象,给出了原边LCL谐振网络补偿电容的匹配方法,对负载变化情况下系统的频率特性和功率传输特性进行了分析,得出了传输功率和效率的计算方法。最后通过在Matlab中搭建系统的拓扑结构验证分析结果的正确性,为系统参数设计提供了相应的依据。

参考文献:

- [1] 周继昆.一种基于FPGA的感应电能传输系统频率跟踪方法[J].太赫兹科学与电子信息学报,2014,12(6):817-820. (ZHOU Jikun. A frequency tracking method of LCL type inductive power transfer system based on FPGA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(6):817-820.)
- [2] BOYS J T, COVIC G A, GREEN A W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems[J]. Inst. Elect. Eng. Proc. Electr. Power Appl., 2000,147(1):37-43.
- [3] 王智慧,胡超,戴欣,等.基于推挽拓扑的非接触充电系统设计[J].电源技术,2011,135(7):834-837. (WANG Zhihui, HU Chao, DAI Xin, et al. Design of contactless charging system based on push-pull topology[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011,135(7):834-837.)
- [4] HUANG C Y, BOYS J T, COVIC G A, et al. Practical considerations for designing IPT system for EV battery charging[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn, MI: IEEE, 2009:402-407.
- [5] BORAGE M B, NAGESH K V, BHATIA M S, et al. Characteristics and design of an asymmetrical Duty-Cycle-Controlled LCL-T resonant converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(10):2268-2275.
- [6] 李砚玲,孙跃,戴欣,等.LCL型双向感应电能传输系统建模及控制[J].重庆大学学报,2012,35(10):117-123. (LI Yanling, SUN Yue, DAI Xin, et al. Modeling and control of an LCL bi-directional inductive power transfer system[J]. Journal of Chongqing University, 2012,35(10):117-123.)
- [7] WANG C S, COVIC G A, STIELAU O H. Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004,19(4):995-1002.

- [8] BORAGE M B,NAGESH K V,BHATIA M S,et al. Characteristics and design of an asymmetrical duty-cycle-controlled LCL-T resonant converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(10):2268–2275.

作者简介:



周继昆(1987–), 男, 重庆市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事感应电能传输技术、嵌入式等方面的工作.email:405zhoujk@caep.cn.

张 荣(1978–), 男, 四川省资阳市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事测控技术研究.

张 毅(1975–), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事测控技术研究.

(上接第 602 页)

- [6] 卢宁,吴勇,张麟兮. 一种小型化平面倒置 F 型三频天线的设计[J]. 计算机测量与控制, 2009,17(4):760–762,802. (LU Ning,WU Yong,ZHANG Linxi. Design of miniaturized and tri-band planar inverted-F antenna[J]. Computer Measurement & Control, 2009,17(4):760–762,802.)
- [7] 许伟. 薄型双频 PIFA 天线研究与设计[D]. 济南:山东大学, 2009. (XU Wei. Research and design on slim dual-band PIFA antenna[D]. Jinan,Shandong,China:Shandong University, 2009.)
- [8] CHOU Jinhung,CHANG Jofan,LIN Dingbing,et al. A compact loop-slot mode combination antenna for ultra-thin tablet computer with metallic bottom cover[J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2014,13:746–749.
- [9] 侯佳琪,郭庆功. 用于平板电脑的小型化 LTE/GSM/UMTS 多频段天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(4):596–600. (HOU Jiaqi,GUO Qinggong. Compact LTE/GSM/UMTS multi-band antenna for tablet computers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(4):596–600.)
- [10] LUHAIB S W,QUBOA K M,ABAOY B M. Design and simulation dual-band PIFA antenna for GSM systems[C]// 2012 IEEE 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Chemnitz,Germany:[s.n.], 2012:1–4.

作者简介:



王 轺(1992–), 男, 内蒙古自治区乌海市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为多频天线设计.email:wlhsdd@163.com.

郑宏兴(1962–), 男, 宁夏回族自治区银川市人, 教授, 主要研究方向为天线、微波电路和计算电磁学.

邓东民(1990–), 男, 太原市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为超宽带天线设计.