文章编号：2095-4980(2014)06-0817-04

一种基于 FPGA 的 LCL 型感应 IPT 系统的频率跟踪方法

周继昆

(中国工程物理研究院 总体工程研究所，四川 绵阳 621999)

摘 要：通过建立系统的互感耦合模型，对串并联(LCL)型感应电能传输系统的频率特性进行分析，结果表明，系统的软开关频率会因负载的变化而改变。针对这种特性，基于 FPGA 设计了一种闭环频率跟踪方法，经实验验证，当负载在较宽范围内发生变化时，该方法可使系统原边逆变器的工作频率跟踪系统的软开关频率，确保了逆变器开关管工作在零电流开关(ZCS)切换模式。

关键词：串并联谐振；IPT 系统；频率跟踪

中图分类号：TN702 **文献标识码：**A **doi：**10.11805/TKYDA201406.0817

A frequency tracking method of LCL type Inductive Power Transfer system based on FPGA

ZHOU Ji-kun

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

Abstract: The frequency characteristics of the inductor-capacitor-inductor(LCL) type Inductive Power Transfer(IPT) system are analyzed by establishing the system mutual inductance coupling model. As a result of the analysis, the soft switching frequency is varied with the load. Therefore, a closed loop frequency tracking method based on FPGA is designed. It is verified by experiments that this method can make the operation frequency of the primary converter track the soft frequency and ensures the switches work at Zero Current Switch(ZCS) mode.

Key words: inductor-capacitor-inductor(LCL) resonance; Inductive Power Transfer system; frequency tracking

感应电能传输(IPT)技术是一种借助于高频磁场实现电能传输的技术，由于其利用磁场作为媒介实现了电能的无线传输，具有较好的灵活性和安全性，近几年内受到学者的广泛关注[1-3]。

IPT 系统中，由于系统原、副边之间为空气间隙，因此，一般采用高频谐振的方式来提高能量传输效率。近年来提出一种基于 LCL 型复合谐振网络的 IPT 系统，提高了 IPT 系统的电能传输能力，但由于在系统中增加了储能元器件，使得系统的频率特性更为复杂，特别是系统的软开关频率会随着负载的变换而改变[4-6]，因此，设计一种频率跟踪控制方法，使原边逆变器工作频率跟踪系统软开关频率，可有效降低系统的开关损耗。FPGA 具有非常强大的逻辑处理能力[7-8]，因此本文选用 FPGA 作为控制器，设计一种让 LCL 型感应电能传输系统实时保持软开关运行的频率跟踪方法，并通过实验验证了该方法的有效性。

1 LCL 型 IPT 系统频率特性分析

1.1 IPT 系统基本原理

IPT 系统的典型结构如图 1 所示，其基本原理是：首先对 220 V/50 Hz 的工频电源进行整流滤波，使之变为直流电源，然后通过高频逆变器把直流电源逆变为高频交流电(通常为 20 kHz)并注入谐振网络，这样在原边谐振线圈上就会激发一个正弦特性的高频交流电流，这个电流会在线圈附近产生一个高频交变磁场，使处于该磁场中的能量接受线圈感应出高频电动势，最后经过功率调节输出到用电设备，从而实现电能的无线传输。

收稿日期：2013-11-29；修回日期：2014-03-18

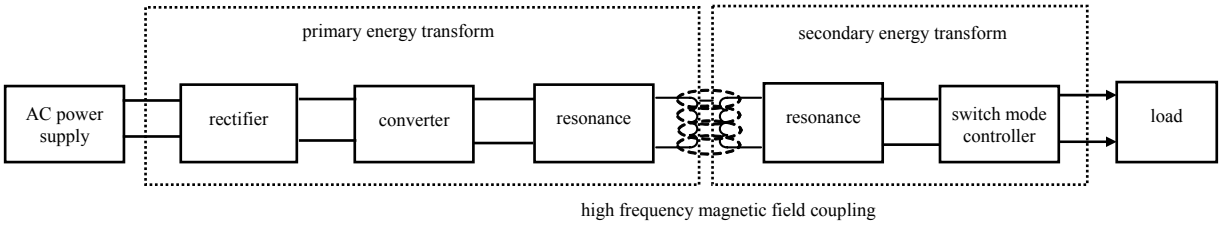


Fig.1 Block diagram of IPT system
图 1 IPT 系统结构框图

1.2 LCL 型 IPT 系统频率特性

图 1 中，若原边部分的谐振网络采用 LCL 拓扑结构，则称之为 LCL 型 IPT 系统。本文以全桥型逆变器为例，分析系统的频率特性，全桥型 IPT 系统的电路原理图如图 2 所示。

系统原边部分包括电压源 U_{dc}、高频逆变器(由开关管 S_1,S_2,S_3 和 S_4 构成)以及 L_r,L_p 和 C_p 构成的 LCL 谐振网络。副边包括串联谐振网络(L_s 和 C_s 构成)及负载 R_L。通过交替切换开关对 S_1,S_4 和 S_2,S_3 可以向 LCL 谐振网络注入高频交流能量，在 L_p 周围激发正弦高频交变磁场，以磁场耦合的方式向副边传送能量，其中 U_i 和 i_i 分别为逆变器的输出电压和电流，i_p 和 i_s 分别为能量发射线圈和能量接收线圈上的电流。R_L 为副边等效负载，为简化分析，假设其为纯阻性负载。

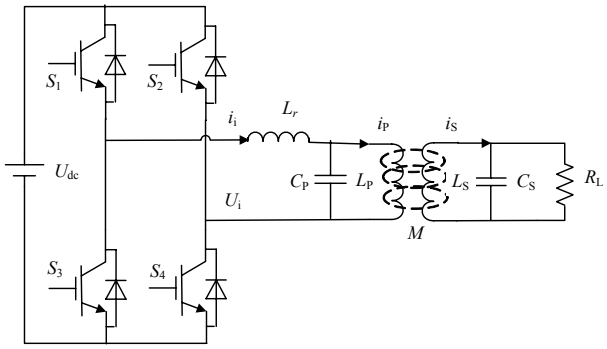


Fig.2 Circuit schematic diagram of LCL type IPT system
图 2 LCL 型 IPT 系统电路原理图

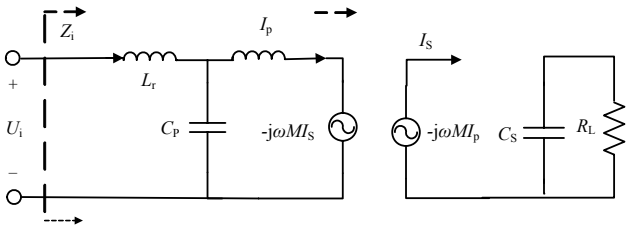


Fig.3 Mutual inductor coupling model
图 3 IPT 系统互感耦合模型

设系统的工作频率为 ω，原副边之间的互感为 M，则系统的互感耦合模型如图 3 所示，副边输入阻抗 Z_s 可表示为：

$$Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + 1/R_L} \tag{1}$$

根据互感耦合原理，副边反射到原边的阻抗为：

$$Z_p = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \tag{2}$$

则系统的输入总阻抗为：

$$Z_i = j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_p + 1/(j\omega L_p + Z_p)} \tag{3}$$

当 $\mathrm{Im}(Z_i)=0$ 时，逆变器的输出电压和电流同相位，通过求解方程 $\mathrm{Im}(Z_i)=0$，即可得出系统软开关频率与负载的关系。

为了更直观地观察系统软开关频率与负载的变化规律，本文通过数值方法得到软开关频率相对于负载的变化曲线。系统的参数设置如表 1 所示，令负载的变化范围为 10 Ω~90 Ω，步长为 10 Ω。

表 1 系统参数表
Table1 Parameters of system

parameter	value/μH	parameter	value
seris inductor L_r	220	load R_L	10 Ω–90 Ω
track inductor L_P	110	primary capacitor C_p	0.335 μF
secondary inductor L_S	110	secondary capacitor C_s	0.330 μF
coupling M	30		

为便于分析，定义归一化频率 μ：

$$\mu=\omega_Z/\omega_0 \tag{4}$$

式中：ω_Z 表示负载变化后系统的软开关频率；ω_0 为系统副边固有谐振频率，即

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{L_sC_s}} \tag{5}$$

系统的归一化频率与负载的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出，对于 LCL 型 IPT 系统，当负载发生变化时，系统的软开关频率会随之发生改变，且系统存在 2 个实数的软开关频率解。根据文献[5]，系统只有在较大的一个软开关频率点上工作时，其激励电流才会呈正弦规律，而较小的一个软开关频率点为不正常的频率点，系统不会在较小的频率点上发生自激振荡。根据这种特性，可以设计一种基于自激振荡的闭环的频率跟踪方法。当分别强迫系统在这 2 个频率点工作时，逆变器输出电压和电流如图 5 所示。

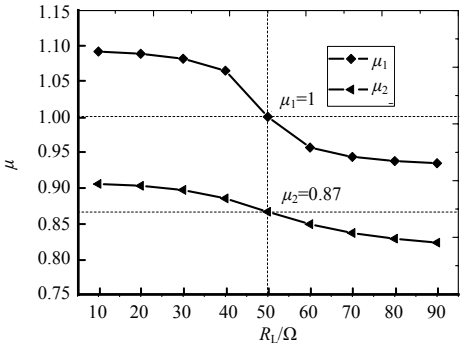
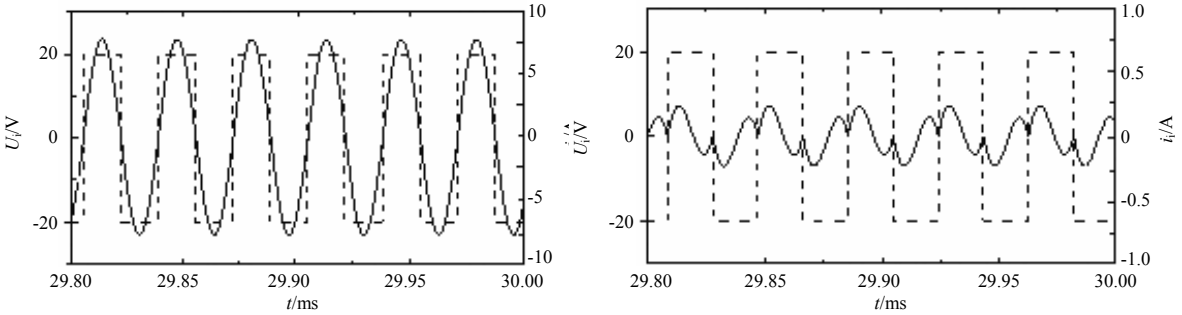


Fig.4 Relation between normalization μ and load
图 4 归一化频率 μ 与负载的关系图



(a) $\omega_0\mu_1$　　(b) $\omega_0\mu_2$

Fig.5 Output voltage and current of converter
图 5 逆变器输出电压与电流

2　基于 FPGA 的频率跟踪方法

闭环频率跟踪方法的主要思想是，利用逆变器的输出电流 i_i 的相位特征信号来同步逆变器开关管的切换，从而使逆变器的输出电压与电流同相位，实现系统的软开关运行，闭环系统框图如图 6 所示。

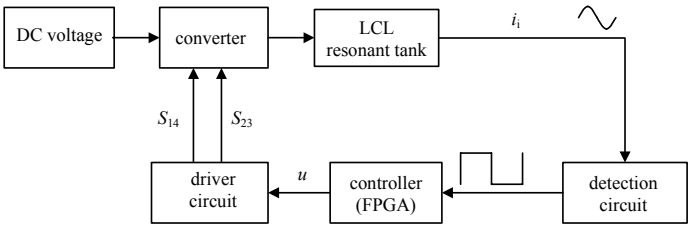


Fig.6 Schematic diagram of closed loop control system
图 6 闭环控制系统原理图

图 6 中，检测电路部分由电流互感器、超前校正电路和过零比较器组成，通过电流互感器检测激励电感上的电流送入超前校正电路，超前校正电路用来对整个控制系统进行延时补偿，信号经过超前校正电路补偿后，通过过零比较器得到与激励电流同频率的方波信号，并送往控制器。FPGA 根据电流的相位特征，输出相应信号到驱动电路，驱动电路对信号隔离放大后驱动逆变器开关管实现 ZCS 工作。控制律的表达式为：

$$u=\begin{cases}1 & i_i>0\\ -1 & i_i\leqslant 0\end{cases} \tag{6}$$

当 u=1 时，开通开关管对 S_1 和 S_4，关闭开关管对 S_2 和 S_3；当 u=−1 时，则开通开关管对 S_2 和 S_3，关闭开关管对 S_1 和 S_4。开关管对的状态方程可描述为：

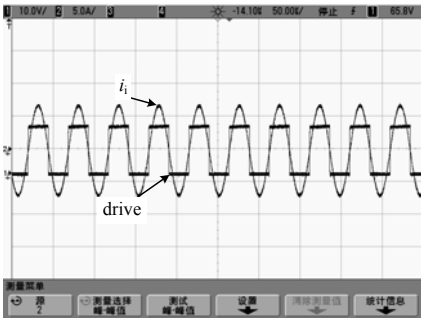


Fig.7 Result of experiment
图 7 实验结果

$$S_{14}=\begin{cases}1 & u=1\\ 0 & u=-1\end{cases} \tag{7}$$

$$S_{23}=\begin{cases}1 & u=-1\\ 0 & u=1\end{cases} \tag{8}$$

式中：逻辑“1”表示开通开关管；逻辑“0”表示关断开关管，系统实验波形如图 7 所示。

3 结论

本文分析了 LCL 型 IPT 系统的频率特性，分析结果表明，系统的软开关频率会随负载的变化而改变。针对这种特性，本文基于 FPGA 设计了一种闭环的频率跟踪方法，有效确保系统中开关管在 ZCS 模式下工作。

参考文献：

[1] WANG Bob,HU Aiguo Patrick,Budget David Mortimer. Development of a push-pull current doubler synchronous rectifier for powering heart pumps[C]// 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Taichung,Taiwan,China: IEEE Computer Society, 2010:1368–1372.

[2] 戴欣,周继昆,孙跃. 具有频率不确定性的π型谐振感应电能传输系统H_∞控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30):45–53. (DAI Xin,ZHOU Ji-kun,SUN Yue. H_∞ control method with frequency uncertainty for π type resonant inductive power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(30):45–53.)

[3] WU H H,Covic G A,Boys J T,et al. A series-tuned inductive-power-transfer pickup with a controllable AC-voltage output[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(1):98–109.

[4] 张敏,周雒维. 松耦合感应电能传输系统的分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006,29(7):34–37. (ZHANG Min, ZHOU Luo-wei. Analysis of loosely coupled inductive power transfer system[J]. Journal of Chongqing University:Natural Science Edition, 2006,29(7):34–37.)

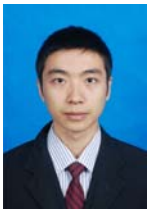
[5] TANG Chun-sen,SUN Yue,SU Yu-gang,et al. Determining multiple steady-state ZCS operating points of a switch-mode contactless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(2):416–425.

[6] 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.

[7] 唐春森,周继昆,戴欣,等. 基于 FPGA 的 AC-AC 谐振变换器实现[J]. 电子技术应用, 2011,37(6):71–76. (TANG Chun-sen,ZHOU Ji-kun,DAI Xin,et al. Implementation of an AC-AC resonant converter based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2011,37(6):71–76.)

[8] 李进,金龙旭,韩双丽,等. 基于 FPGA 的空间 TDICCD 相机控制器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):650–654. (LI Jin,JIN Long-xu,HAN Shuang-li,et al. Space TDICCD camera controller implementation using algorithmic state machine in FPGA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):650–654.)

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.