负载不对称三相串联谐振逆变器电流平衡控制策略

于月森 年长春 解光庆 刘志远 贾 娜 夏晨阳 伍小杰
（中国矿业大学信息与电气工程学院 徐州 221116）

摘要 为实现对三相无线电能传输系统功率传输的有效控制，对一次侧采用串联谐振逆变器的三相无线电能传输系统进行了详细的分析。基于 PR 控制器可有效实现对某一频率的正弦信号进行跟踪控制，针对负载不对称工作模式下三相电流不平衡导致功率传输控制困难问题，在αβ坐标系中采用 PR 控制器，对一次侧三相电流进行电流平衡控制。仿真和实验结果表明，PR 控制器能够对三相串联谐振逆变器的负载电流进行追踪控制，较好地解决三相电流不平衡问题，为三相无线电能传输系统的功率传输控制研究奠定了基础。

关键词：三相逆变器 串联谐振 PR 控制器 电流控制
中图分类号：TM464; TM724

Current Control Strategy of Three-Phase Series Resonant Inverter under Unbalanced Load

Yu Yuesen Nian Changchun Xie Guangqing Liu Zhiyuan Jia Na Xia Chenyang Wu Xiaojie
（China University of Mining and Technology Xuzhou 221116 China）

Abstract Aimed at the power transmission control for three-phase wireless power transfer system, three-phase wireless power transfer system adopted the series resonant inverter in primary side is analyzed detailedly. Aimed at the difficulty on power control caused by three-phase unbalanced current under unbalanced load, based on that the PR controller can realize the tracking control of sinusoidal signal for a certain frequency, balancing control is conducted for primary three-phase current by adopting PR controller in αβ coordinate system. The results of simulation and experiment indicate that PR controller can realize the tracking control of the load current of three-phase series resonant inverter which can solve the unbalance of three-phase and provide the basis for the power control of three-phase wireless power transfer system.

Keywords：Three-phase inverter, series resonance, proportional resonant(PR) controller, current control

1 引言

无线电能传输技术（Wireless Power Transmission, WPT）是一种新型电能传输模式，它主要利用电磁耦合、微波、电磁共振等形式来传输电能，不存在物理连接或接触，克服了传统接触式电能传输方式带来的火花、电击、磨损等缺点和不足，具有更高的安全性和可靠性[1,2]，因此正受到国内外越来越多学者和公司的关注，并得到了广泛的应用[3,4]。

目前国内对 WPT 的研究主要集中在单相无线电能传输技术，且主要从其拓扑结构、稳定性分析、频率特性、功率优化等方面进行了深入的研究[1,5,6]。随着 WPT 系统对其功率传输容量的提高，以及拾取电压平稳度的要求，三相无线电能传输技术也得到越来越多的重视和研究。

国家自然科学基金（51307173），江苏省自然科学基金（BK20130188），高等学校博士学科点专项科研基金（20120095120022）和中国博士后基金（2012M521140）资助项目。
收稿日期 2013-09-04

对三相无线电能传输系统而言，其二次侧可以有一个或多个负载。由于不同负载的性质或功率等级不同，或者同一负载在不同时刻的工作状态的不同，根据反射阻抗原理，二次侧受负载个数、性质、阻值的不同容易造成三相 WPT 系统一次侧三相供电线圈上等效反射阻抗的不同，从而使得一次侧各相线圈等效负载不平衡，直接导致各相供电线圈的供电电流不同，从而对三相无线电能传输系统功率的有效控制带来了极大困难。

本文针对三相无线电能传输系统在负载不平衡条件下的功率传输控制问题，基于一次侧采用三相串联谐振逆变器拓扑，对三相无线电能传输系统模型进行分析，通过采用 PR 控制器的电流环控制，使其获得三相平衡供电电流。通过 Matlab/Simulink 仿真和实验证明了 PR 控制器在三相串联谐振逆变器的电流控制中能够有效消除稳态误差，较好地解决了三相电流不平衡问题。

2 三相串联谐振逆变器拓扑分析

2.1 三相 WPT 系统原理

三相 WPT 系统的一次侧为三相磁能发射机构，二次侧为单相或三相磁能拾取机构，与传统单相无线电能传输系统的单发射单拾取机构有所不同。因此，三相 WPT 系统的拓扑机构、互感耦合模型和工作模式与单相相比较为复杂。

根据电源输入类型的不同，三相 WPT 系统可分为电压型和电流型三相 WPT 系统；根据三相负载联结方式的不同，其三相线圈可连接成星形和三角形；为减少系统的无功功率，提高系统功率传输的效率，根据一、二次侧补偿环节的不同，三相 WPT 系统有 SS、SP、PS、PP 四种谐振补偿模式，其中，第一个 S 或 P 分别代表一次侧磁能发射线圈采用串联或并联谐振补偿，第二个 S 或 P 分别代表二次侧磁能拾取线圈采用串联或并联谐振补偿。

本文以电压型 SS 谐振单拾取机构三相 WPT 系统为研究对象，对其功率传输控制方法进行分析，其原理图如图 1 所示。

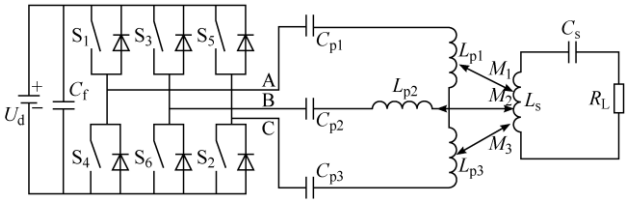


图 1 电压型三相 WPT 系统原理图

Fig.1 Schematic of a voltage-fed three-phase WPT system

图 1 中 U_d 为直流电源输入，S_1～S_6 为高频逆变环节，L_{p1}、L_{p2}、L_{p3} 与 C_{p1}、C_{p2}、C_{p3} 分别为一次谐振补偿环节，L_s、C_s 为二次谐振补偿环节，M_1、M_2、M_3 为一、二次侧互感耦合环节，R_L 为负载。

三相 WPT 系统的工作原理为：直流电源经三相逆变环节之后得到各相相差 120°的三相高频交流电，通过一次谐振环节，再经互感耦合，二次线圈拾取到磁场能量，再经磁电转换和功率变换为负载供电。

2.2 三相串联谐振逆变器模型分析

由于 M_1、M_2、M_3 分别为一次侧三相线圈电感 L_{p1}、L_{p2}、L_{p3} 与二次侧线圈电感 L_s 之间的互感，基于互感耦合原理，将三相 WPT 系统的二次谐振环节及负载等效到一次侧三相后，即得到等效三相串联谐振逆变器模型，如图 2 所示。

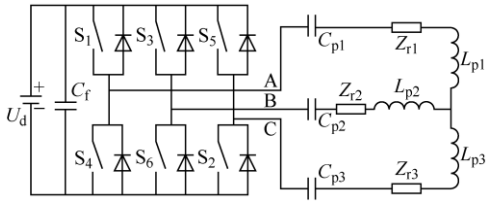


图 2 等效三相串联谐振逆变器

Fig.2 Primary equivalent three-phase series resonant inverter

图 2 中，Z_{r1}、Z_{r2}、Z_{r3} 分别为二次电路反射到一次侧的等效阻抗。

本文分析忽略一次侧三相线圈绕组之间的互感，并且 L_{p1}=L_{p2}=L_{p3}，C_{p1}=C_{p2}=C_{p3}，所以三相串联谐振逆变器的负载不对称即 Z_{r1}、Z_{r2}、Z_{r3} 之间的差异。

3 基于 PR 控制器的三相串联谐振逆变器电流平衡控制

3.1 三相串联谐振逆变器控制系统构成

针对三相串联谐振逆变器的电流控制问题，有两种控制策略。一种是在同步旋转坐标系下，对 d-q 轴直流电流利用 PI 调节器进行控制；另一种是在两相同步静止坐标系下，对α-β 轴交流电流利用 PR 调节器进行控制。由于第一种的坐标变换较为复杂，且 d-q 轴电流是互相耦合的，需要在控制回路加入前馈解耦环节，增加系统的复杂度。因此本文采用第二种策略。

三相串联谐振逆变器系统控制框图如图 3 所示。具体方法如下：直流电源经过三相逆变桥，通过一次谐振环节给不对称负载供电。三相负载电流

i_A、i_B、i_C 通过 3/2 坐标变换，得到在两相静止坐标系上的电流 i_α、i_β，同时三相幅值相等、相位相差 120° 的给定电流也经过 3/2 变换得到 i_α^*、i_β^*，比较后，通过 PR 控制器产生 SVPWM 控制信号，对逆变器进行控制，从而负载得到三相平衡电流。

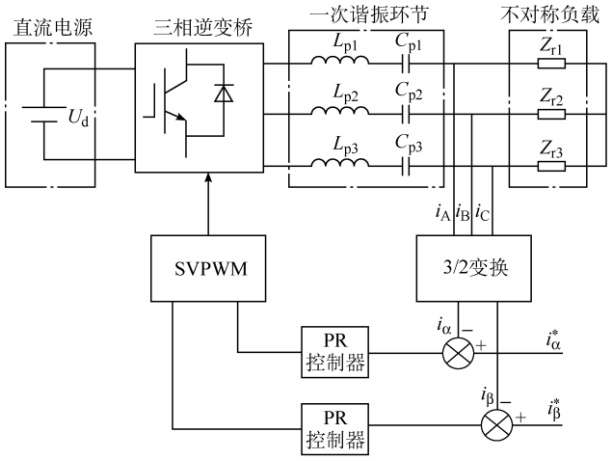


图 3　系统控制框图

Fig.3　The control diagram of system

3.2　PR 控制器的原理

传统的电流环控制方法有两种：①电流滞环控制，方法简单，但是逆变器的开关频率变化范围宽，输出电流波形脉动较大；②PI 控制，PI 控制器的算法简单，可靠性高，在实际工程中已得到广泛应用。虽然 PI 控制器对直流量可以实现无静差追踪，但对正弦电流指令则存在稳态误差和抗干扰能力差的问题[7]，而这都将对逆变器的功率因数和控制精度产生影响。

近年来，提出了一种新型控制器——比例谐振控制器（Proportional Resonant，PR）[8]。PR 控制器利用谐振来增大对所控信号某一特定频率的增益，因此可以无误差的跟踪正弦信号，并且可以有效地消除系统稳态误差。PR 控制器目前已应用在有源滤波、谐波补偿以及 UPS 等领域中。近年来，PR 控制器也逐渐应用于单相及三相逆变器的电流控制中[9-13]。

PR 控制器的传递函数式为 $G_S = K_P + \dfrac{K_R s}{s^2+\omega_0^2}$，从 PR 控制器的传递函数可以看出，其原理是在其传递函数的虚轴上加入了两个固定频率的闭环极点，形成在该频率下的谐振，理论上在该频率点系统增益趋近于无穷大，因此 PR 控制器可以实现在该频率下给定信号的无误差跟踪。

由于 PR 控制器可以实现对某一特定频率的交流信号的无误差跟踪，因此在逆变器的电流控制中，PR 控制器比 PI 控制器有着明显的优越性。对三相 WPT 系统中的三相串联谐振逆变器的电流控制，将传统矢量控制的三相供电电流转换到两相静止坐标后，利用 PR 控制器，将 PR 控制器的谐振频率设置成一次线圈谐振的频率，即可实现对三相供电电流的无差跟踪。

3.3　基于 PR 控制器的电流环控制

三相串联谐振逆变器电流环 α 轴控制框图如图 4 所示。其中，i_α 和 i_α^* 分别为三相供电电流和给定电流在 αβ 坐标系中 α 轴的分量。$G_{PR}(s)$为 PR 控制器的传递函数；$G_{PWM}(s)$为 SVPWM 环节的传递函数；K_s 为 PWM 装置的放大系数；T_s 是 PWM 装置的延迟时间，$T_s < T$，T 为 PWM 装置的开关周期。当开关频率为几千赫兹或者几十千赫兹时，时间常数 T_s 很小，PWM 装置可近似看成是一个一阶惯性环节，则有 $G_{PWM}(s)=\dfrac{K_s}{T_s s+1}$；$G_0(s)$为谐振环节（包括负载阻抗）的传递函数，$G_0(s)=1/\left(L_s+1/C_s+Z_{r1}\right)$

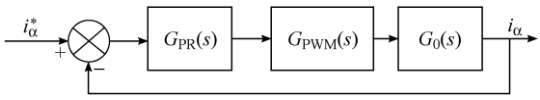


图 4　基于 PR 控制器的电流环控制框图

Fig.4　The current-loop control diagram with PR regulator

工作原理如图 4 所示：α 轴电流采样值 i_α 与电流给定值 i_α^* 相比较，其误差通过 PR 控制器，输出量纲值为电流，电流在 SVPWM 环节转换成电压指令，除以直流电压值得到调制度，与三角载波比较后，产生 PWM 波，来控制逆变器开关动作，从而控制一次供电电流。

α 轴电流的表达式为

$$i_\alpha = \frac{G_{PR}(s)G_{PWM}(s)G_0(s)}{1+G_{PR}(s)G_{PWM}(s)G_0(s)} i_\alpha^*$$

当逆变器工作在谐振频率点上时，PR 控制器的传递函数可认为足够大，因此，$G_{PR}(s)G_{PWM}(s)G_0(s)$ 增益远大于 1，上式等式右端 i_α^* 系数约为 1，所以 $i_\alpha \approx i_\alpha^*$。

4　仿真分析与实验验证

本文通过 Matlab/Simulink 对三相串联谐振逆变器进行仿真分析，并搭建实验平台进行实验验证。其主电路如图 2 所示，负载为三相不平衡阻性负载。通过 PR 控制器进行电流的跟踪。根据之前的分析，仿真中取比例系数 K_P=50，谐振系数 K_R=1 000。系

统其他参数见下表。

表 系统仿真参数

Tab. Parameters of the system

参 数	取 值
直流侧电压/V	300
一次谐振电感/mH	1
一次谐振电容/μF	25.3
三相负载电阻 Z_{r1}、Z_{r2}、Z_{r3}/Ω	10、6、1
谐振频率/kHz	1

图 5a、5b 分别为三相串联谐振逆变器三相供电电流仿真和实验波形。图 5 中，A 相电流略低于 B、C 相电流，经过调节后，A、B、C 相电流相位互差 120°，幅值基本相等。因此，在负载不对称的情况下，通过 PR 调节器的电流环控制，三相供电电流基本达到平衡。在三相 WPT 系统中，三相供电电流的平衡控制可以使系统的功率进行有效传输。

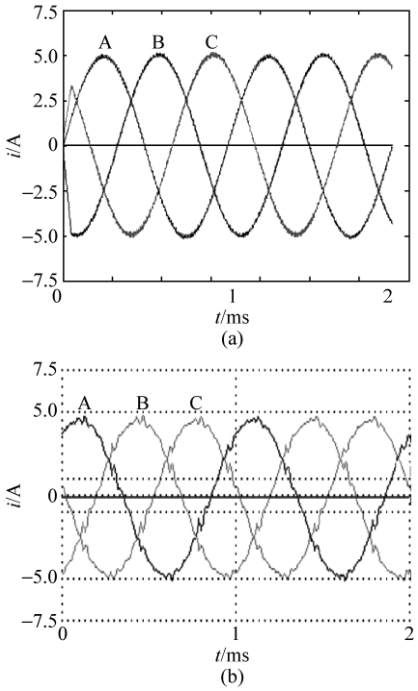


图 5 三相供电电流仿真及实验波形

Fig.5 Simulation and experimental waveforms of the three-phase power supply current

5 结论

利用 PR 控制器可以无静差追踪某一频率的交流信号这一特点，将其用于解决三相串联谐振逆变器负载电流不平衡的问题。与采用 PI 控制器不同，PR 控制器省去了坐标旋转变换环节，降低系统的复杂性。仿真与实验表明，PR 控制器在三相电流平衡控制上的优越性，可以为负载提供更高质量的电流。

本文仅以电压型三相 SS 拓扑为例进行分析，该控制方法可以有效的解决电压型 SS 拓扑三相 WPT 系统的功率传输控制问题，对其他拓扑结构的三相 WPT 系统的功率传输控制问题具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 武瑛，严陆光，徐善纲. 新型无接触电能传输系统的稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2004，24(5): 63-69.
Wu Ying, Yan Luguang, Xu Shangang. Stability of the new contactless power delivery system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 63-66.

[2] 戴卫力，费俊涛，肖建康，等. 无线电能传输技术综述及应用前景[J]. 电气技术, 2010, 7: 1-6.
Dai Weili, Fei Juntao, Xiao Jiankang, et al. An overview and application prospect of wireless power transmission technology[J]. Electrical Engineering, 2010, 7: 1-6.

[3] 王璐，陈敏，徐德鸿，等. 磁浮列车非接触紧急供电系统的工程化设计[J]. 中国电机工程学报，2007，27(18): 67-70.
Wang Lu, Chen Min, Xu Dehong, et al. The engineering design of contactless emengency power supply in maglev[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 67-70.

[4] Hatanaka K, Sato F, Matsuki H, et al. Power transmission of a desk with a cord-free power supply[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(5): 3329-3331.

[5] 周雯琪，马皓，何湘宁. 基于动态方程的电流源感应耦合电能传输电路的频率分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 119-124.
Zhou Wenqi, Ma Hao, He Xiangning. Frequency analysis of a current source inductively coupled power transfer system based on dynamic equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 119-124.

[6] 孙跃，夏晨阳，戴欣，等. 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 44-50.
Sun Yue, Xia Chenyang, Dai Xin, et al. Analysis and optimization of mutual inductance for inductively

coupled power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 44-50.

[7] 叶礼清, 孙培德. 采用比例谐振控制器的逆变器[J]. 仪表技术, 2011(4): 30-32.
Ye Liqing, Sun Peide. Proportional-resonant controllers for inverters[J]. Instrumentation Technology, 2011(4): 30-32.

[8] 叶珠环, 肖国春, 曾忠, 等. 基于电流状态反馈的串联电压质量调节器比例谐振和谐波补偿控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 84-92.
Ye Zhuhuan, Xiao Guochun, Zeng Zhong, et al. PR and harmonic compensation control for an active voltage quality regulator with current state feedback scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 84-92.

[9] Gong J W, Zhao X M, Guo S X, et al. Analysis and realization of a fast repetitive controller in active power filter system[C]. Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2010: 1704-1710.

[10] Lob P C, Newman M J, Zmood D N, et al. A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 8(5): 1176-1185.

[11] Hasanzadeh A, Mokhtari H, Khaligh A. A proportional-resonant controller-based wireless control strategy with a reduced number of sensors for parallel-oparated UPSs[J]. IEEE Transacions on Power Delivery, 2010, 25(1): 468-478.

[12] Daniel N Z, Donald G H. stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.

[13] 马琳, 金新民, 唐芬, 等. 小功率单相并网逆变器并网电流的比例谐振控制[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(2): 128-132.
Ma Lin, Jin Xinmin, Tang Fen, et al. Proportional-resonant gird-connected current control of low power single phase inverter[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(2): 128-132.

作者简介

于月森　男，1978 年生，博士，讲师，研究方向为电力电子与电力传动、自动控制理论。

年长春　男，1990 年生，硕士研究生，研究方向为三相无线电能传输技术。