

基于背包策略的WPT系统多拾取输出控制方法

代才莉¹, 戴欣²

(1. 重庆电子工程职业学院通信工程学院 重庆 沙坪坝 401331; 2. 重庆大学自动化学院 重庆 沙坪坝 400030)

【摘要】无线电能传输(WPT)是一种借助于高频电磁场实现电能以无线形式传输的新兴技术。在多拾取无线电能传输系统中,由于各个拾取系统的输出能力不均衡,导致系统综合协调控制相对困难。针对无线电能传输系统多拾取系统的输出稳压控制,该文提出了一种基于背包优化算法的输出稳压控制方法。分析了多拾取电路的工作原理,建立系统的输出交流阻抗模型,推导出输出电压与多拾取端稳压控制器占空比关系,提出了一种基于背包优化算法进行输出电压稳压控制的策略。实验结果表明,通过该优化控制算法,能实现多拾取WPT系统现输出电压的快速调节与稳压控制。

关键词 背包算法; 多拾取; 优化算法; 输出控制; 无线电能传输

中图分类号 TM315 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.04.009

Output Optimization Control Strategy for Wireless Power Transfer System with Multiple Pickups Using Knapsack Algorithm

DAI Cai-li¹ and DAI Xin²

(1. College of Communications Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering Shapingba Chongqing 401331;

2. School of Automation, Chongqing University Shapingba Chongqing 400030)

Abstract Wireless power transfer (WPT) technology realizes wireless power transfer with aid of high frequency magnetic field. In the multiple pickup WPT system, it is relatively difficult to realize output synthesis control due to unbalance output power capacity for each pickup. Aiming at the stabilizing output voltage for WPT system, this paper proposes a novel output control method for multi-pickup system by using knapsack optimization algorithm. The fundamental principle of multi-pickup system is first analyzed and the relationship between the output voltage and duty ratio of controller is derived. And then, the output voltage control strategy is proposed by using knapsack optimization algorithm. Experimental results verify that this control method can realize fast regulation and stabilize output control for multiple pickup WPT system.

Key words knapsack algorithm; multiple pickup; optimization algorithm; output control; wireless power transfer (WPT)

无线电能传输技术(WPT)是一种借助于高频电磁场耦合实现电能以无线形式传递的新兴技术。在电能无线传输过程中,用电设备将具有更大的灵活性与更高的安全性。近年来,该技术迅速成为学术界关注的焦点^[1-8]。

在大功率无线电能传输系统应用中,由于单体能量拾取机构的能量接收能力有限,通常需要多个拾取部分进行组合以满足大功率用电设备的需求。然而,由于各个电能拾取部分的能量输出能力并不均衡,因此,各拾取机构间的电动态智能调配成为实现系统有效控制的关键问题。

目前对于无线电能传输系统控制方法的研究集中于单拾取端的输出控制,主要采用Bang-Bang、

PID、滑模控制等通用控制方法^[9-13]。这些控制方法对于单输出的控制具有结构简单、易于实现等特点,但对于多拾取系统的综合输出控制,却通常无法满足控制要求。

针对这一问题,本文提出一种多拾取WPT系统输出控制方法。该方法基于背包算法思想,综合考虑各拾取系统的输出能力,实现对多拾取系统综合协调控制及负载运行过程中的动态优化。最后,通过实验验证了该方法的有效性。

1 多拾取WPT系统工作原理

对于单级谐振WPT系统,根据原、副边补偿结构的串、并联形式,可以分为SS、SP、PS、PP型4

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51377183)

作者简介: 代才莉(1982-),女,博士生,副教授,主要从事无线电能传输技术方面的研究。

种电路拓扑。而多拾取WPT系统是在原边不变基础上, 副边加入多个拾取机构, 实现给多个负载供电, 或是叠加输出给较高功率需求的负载。本文以原边

为并联谐振, 副边为多个串联谐振电路(PS)型串联输出拓扑为例, 研究系统输出电压控制策略。多拾取WPT系统原理如图1所示。

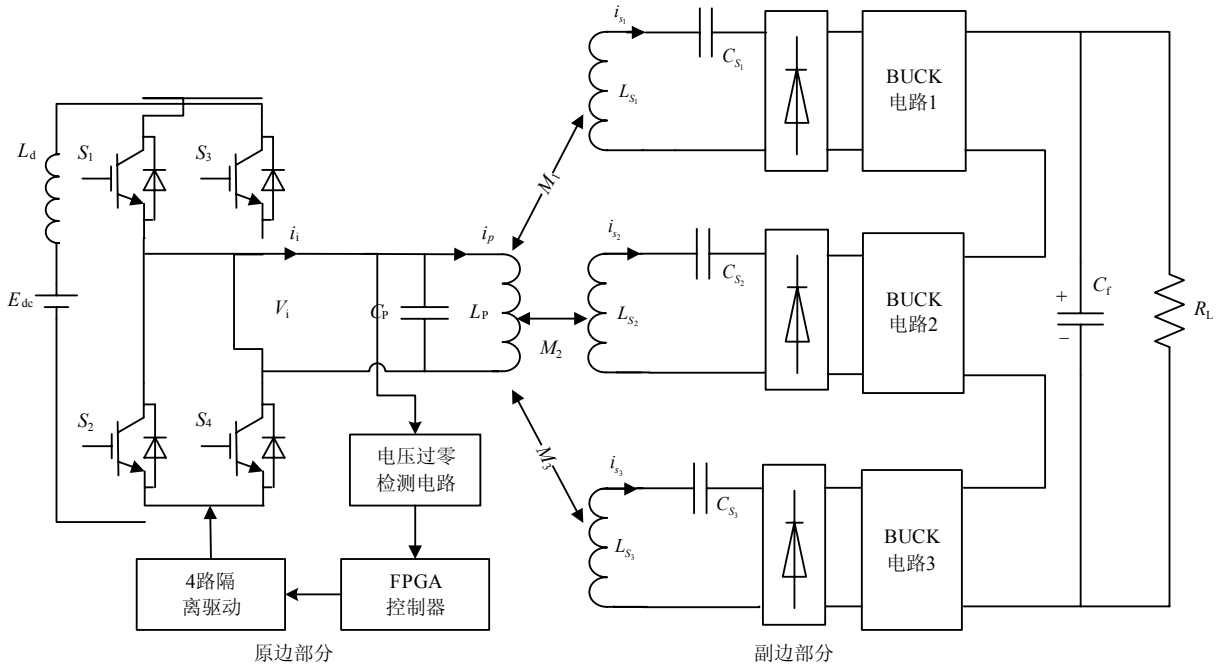


图1 多拾取WPT系统工作原理图

PS型WPT系统可分为原边部分和副边部分, 原、副边通过高频磁场进行耦合以完成能量的传输。其中原边部分包括直流输入 E_{dc} 和直流电感 L_d 组成的电流源, 高频逆变环节 ($S_1 \sim S_4$) 以及串联谐振环节 (L_p 、 C_p)。高频逆变将直流输入转换为高频方波电流输出, 并联谐振环节主要用于将高频方波输入转换为高频正弦谐振电流, 并在励磁线圈 L_p 周围产生高频磁场。而处于邻近空间中的拾取线圈 L_{sn} 将在高频磁场上产生感应电动势, 并通过副边的串联谐振环节产生谐振以提高功率传输能力。高频整流、Buck调压及滤波环节主要用于将高频形式的能量转换为直流形式输出给负载 R_L 。副边部分为多个单级串联谐振的组合, 每级输出正负串联, 输出到负载的电压为多个拾取输出的总和。

为保证系统工作在软开关模式, 减小逆变环节高频切换时开关损耗, 高频逆变环节的切换方式控制为 (S_1, S_4) 和 (S_2, S_3) 进行互补驱动, 并选择并联谐振网络的谐振电压 U_{C_p} 作为切换状态, 当 U_{C_p} 过零时完成逆变切换, 实现零电压开关 (zero voltage switching, ZVS) 软开关运行。

2 系统稳态模型分析

系统稳态运行时, 原边发射线圈的谐振电流保

持不变, 拾取端的等效电路如图2所示, 此时原边的谐振电流有效值为 I_p , 则3个拾取端的电压为:

$$\begin{cases} U_{S_1} = j\omega M_1 I_p \\ U_{S_2} = j\omega M_2 I_p \\ U_{S_3} = j\omega M_3 I_p \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 为谐振角频率。

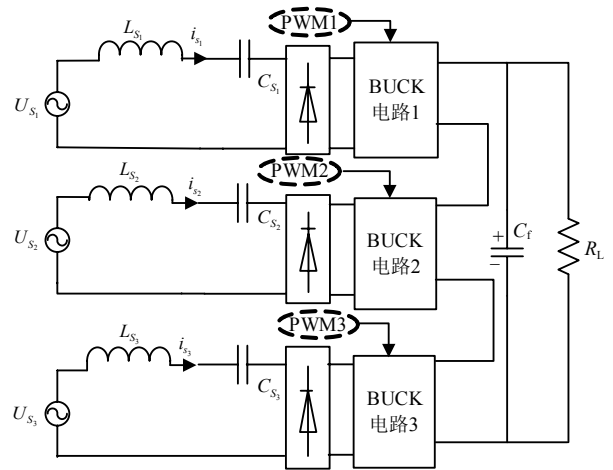


图2 系统稳态时拾取等效模型

三路拾取电压经Buck调压电路分别输出响应占空比控制的电压, 在完全谐振状态下, 设定三路PWM控制信号的占空比分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 , 对应的每路输出电压为:

$$\begin{cases} U_{O_1} = 0.9D_1\omega M_1 I_p \\ U_{O_2} = 0.9D_2\omega M_2 I_p \\ U_{O_3} = 0.9D_3\omega M_3 I_p \end{cases} \quad (2)$$

三路Buck调压经正负串联输出, 可得负载上的电压为:

$$U_o = U_{O_1} + U_{O_2} + U_{O_3} \quad (3)$$

由式(3)可知, 通过调节三路Buck占空比, 即可对输出电压进行相应的稳压输出控制。

3 基于背包策略的输出控制器设计

为实现多拾取系统的综合控制, 本文基于背包策略的思想, 提出一种新型的多拾取WPT系统综合控制方法。该方法围绕给定的控制目标, 通过对多拾取端进行综合优化, 并综合考虑各拾取端的输出能力, 实现以最小代价满足控制需求。

由式(3)可知通过独立调节三路Buck占空比, 能够实现输出电压的稳压控制。因三路拾取机构位置差异, 拾取到的电压各不相同, 根据三路电压霍尔采样结果判定支路的电压拾取能力, 输出采用DSP控制器优化算法控制。

在控制步长设定情况下, 三路Buck占空比同时调节可能使输出电压纹波较大, 造成输出电压不稳定。在预设相同占空比条件下检测三路输出电压, 可相应判断对应支路的拾取能力。优化算法控制步骤如下:

1) Buck 电路预设占空比 D_1 、 D_2 、 D_3 同为 50%, 对应支路拾取电压 U_{S_1} 、 U_{S_2} 、 U_{S_3} , 设定三路 Buck 占空比的控制步长分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ;

2) 检测三路输出电压计算拾取电压 U_{S_1} 、 U_{S_2} 、 U_{S_3} , 假定电压关系为 $U_{S_1} > U_{S_2} > U_{S_3}$, 检测输出电压 U_o , 计算稳压偏差 $\delta U = U_{ref} - U_o$, $|\delta U| > 2V$ 时进入步骤 3), 否则进入步骤 4);

3) δU 为正时增加三路占空比, δU 为负时减小三路占空比, 使输出电压快速逼近设定电压附近范围, 重新计算 δU , $|\delta U| > 2V$ 时重复步骤 3), 否则进入步骤 4);

4) $\sigma < \delta U \leq 2V$ 时, 计算电压增量 $\Delta U_1 = \Delta U_1 + d_1 U_{S_1}$, 若 $\Delta U_1 < \delta U$, D_1 设定为 $D_1 + d_1$, 则重复步骤 4), 否则清零 ΔU_1 , 重新计算 δU , 进入步骤 5);

5) $\sigma < \delta U \leq 2V$, 计算电压增量 $\Delta U_2 = \Delta U_2 + d_2 U_{S_2}$, 若 $\Delta U_2 < \delta U$, D_2 设定为 $D_2 + d_2$, 则重复步骤 5), 否则清零 ΔU_2 , 重新计算 δU , 进入步

骤 6);

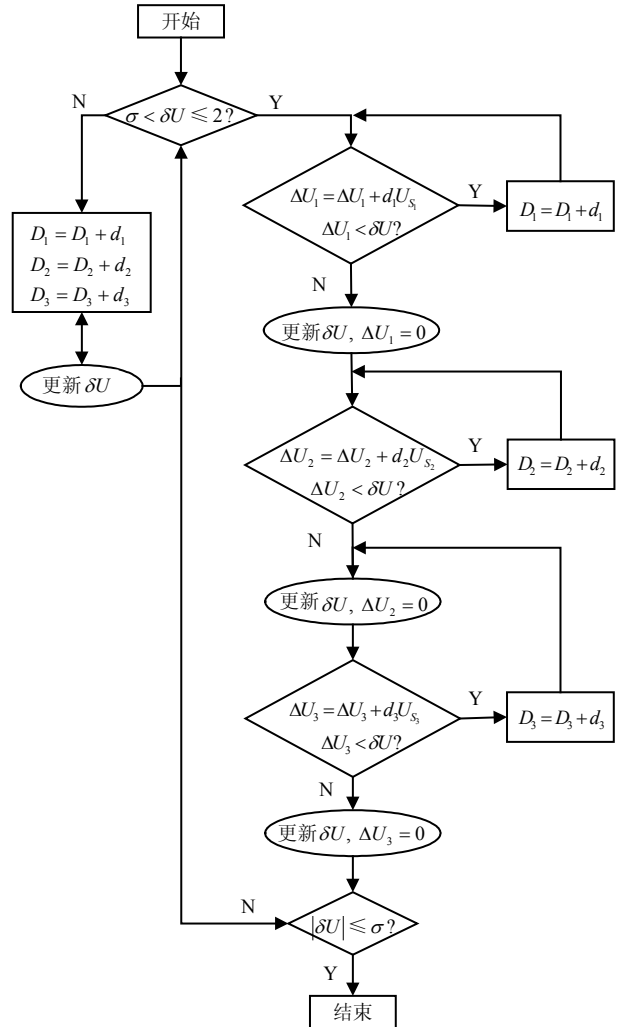


图3 优化控制算法流程图

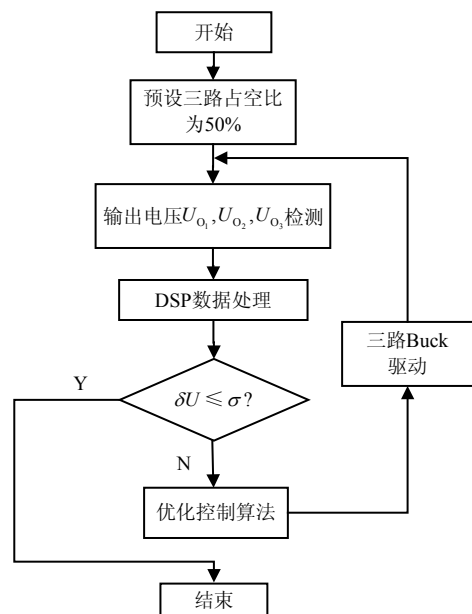


图4 系统稳压控制流程图

6) $\sigma < \delta U \leq 2V$ 时, 计算电压增量 $\Delta U_3 =$

$\Delta U_3 + d_3 U_{S_3}$, 若 $\Delta U_3 < \delta U$, D_3 重新设定为 $D_3 + d_3$, 则重复步骤6), 否则清零 ΔU_3 , 重新计算 δU , 进入步骤7);

7) 当 $|\delta U| \leq \sigma$, 输出电压偏差在容许范围内 ($\sigma = 0.1$), 则结束, 否则跳转步骤2)。

算法步骤中只考虑 $\sigma < \delta U \leq 2\text{ V}$ 时的情况, 优化控制算法流程如图3所示, 当 $-2\text{ V} \leq \delta U < -\sigma$ 时, 步骤3)~步骤6)都相应进行减小占空比处理。此种方法能使系统的输出电压较快地逼近设定电压, 且输出电压的纹波较小, 系统输出稳定。系统控制整体流程图如图4所示。

4 实验研究

为进一步验证本文提出拓扑的有效性, 采用表1给出的参数进行实验研究。

实验系统工作频率为25.8 kHz, 采用FPGA作为逆变器主控芯片, 主开关管采用FGA25N120型

IGBT, 通过检测谐振电压 U_{C_p} 的过零点, 可使开关管工作于零电压开关(zero voltage switching, ZVS)模式下, 以此降低高频开关损耗。Buck电路中的开关管型号为IRFP460的MOSFET, Buck驱动信号通过DSP控制, Buck驱动频率为19.95 kHz。

实验原理图如图5所示, 实验实物图如图6所示。

表1 实验系统参数

参数名称	参数值
谐振频率/KHz	25.8
原边谐振电感 L_p / μH	25.8
原边谐振电感内阻 R_p / Ω	0.025
原边补偿电容 C_p / μF	1.25
L_{S_1} 、 L_{S_2} 、 L_{S_3} / μH	415
R_{S_1} 、 R_{S_2} 、 R_{S_3} / Ω	0.6
C_{S_1} 、 C_{S_2} 、 C_{S_3} / μF	0.1
互感 M_1 / μH	7.1
互感 M_2 / μH	9.9
互感 M_3 / μH	7.2
系统负载 R / Ω	20

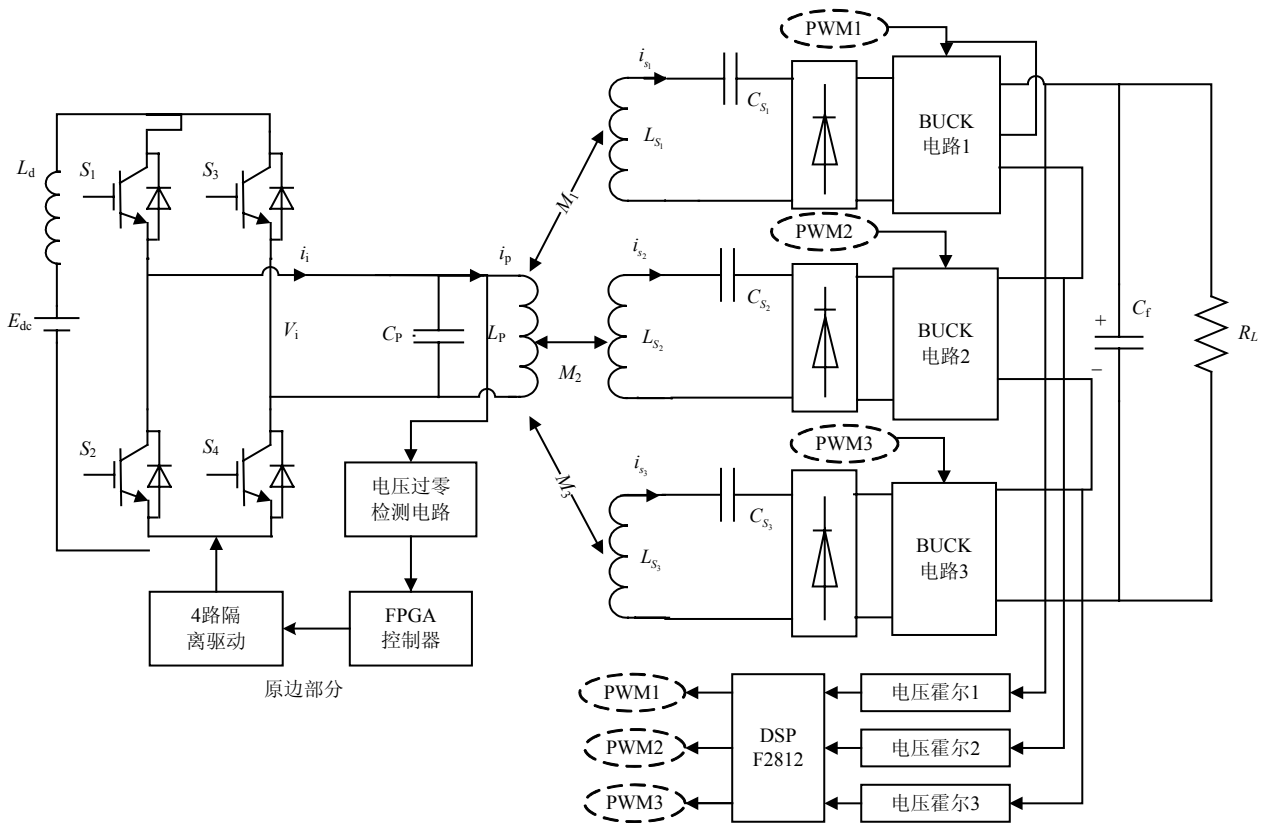


图5 多拾取WPT系统实验原理图

图7是逆变输出谐振电压 U_{C_p} 与开关管 S_1 驱动信号 V_{g1} 相位图。由图可知开关管的开通和关断都运行在谐振电压的过零点, 逆变部分能工作在ZVS(zero voltage switching)软开关模式下。

系统设计要求稳压输出为24 V给指定负载供

电, 电压偏差控制在0.1 V以内。在负载 $R=20\ \Omega$ 时, 图8为输入电压40 V时的输出稳压波形, 图9为输入电压60 V时系统输出稳压波形, 其中CH1、CH2、CH3为对应三路Buck占空比。由图可知系统能稳定在给定电压值, 且输出电压纹波较低。在不同的电

压输入情况下，三路Buck占空比会有差异，说明优化算法能很好地实现输出电压稳压控制。

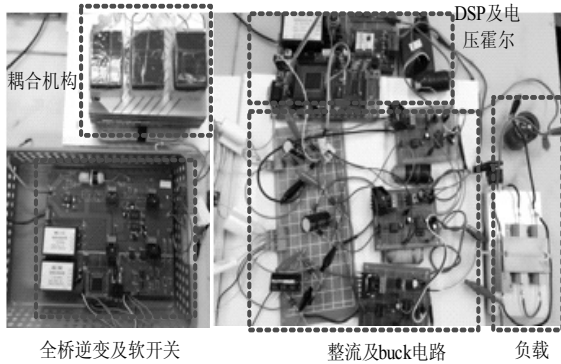


图6 实验系统实物图

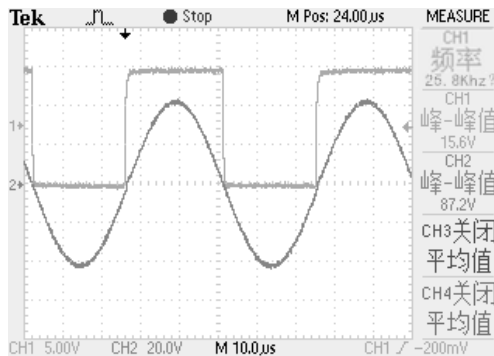


图7 系统逆变谐振波形

图10为负载变化 $R=50\ \Omega$ 时，输入电压40 V系统输出稳压波形。与图8相比系统仍能实现输出稳压控制，因负载为轻载，Buck开通占空比减小。

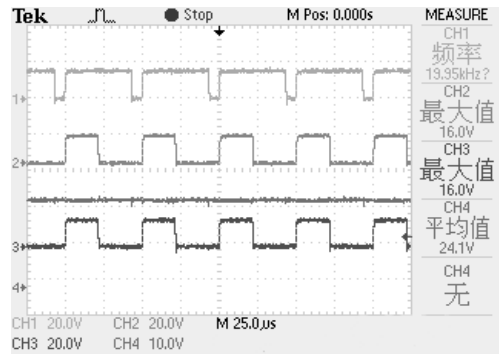


图10 系统40 V输入时轻载输出波形

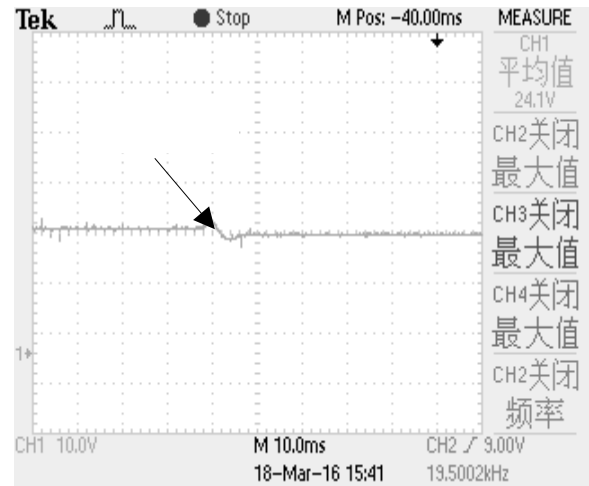


图11 负载跳变1输出波形

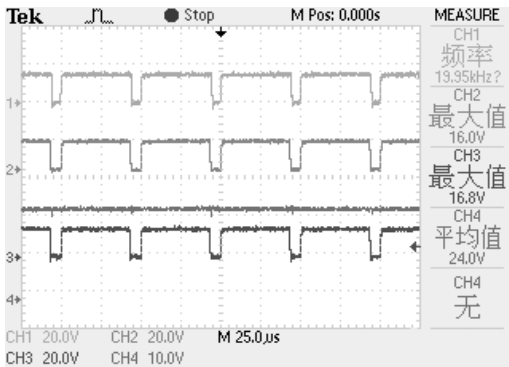


图8 系统40 V输入时输出波形

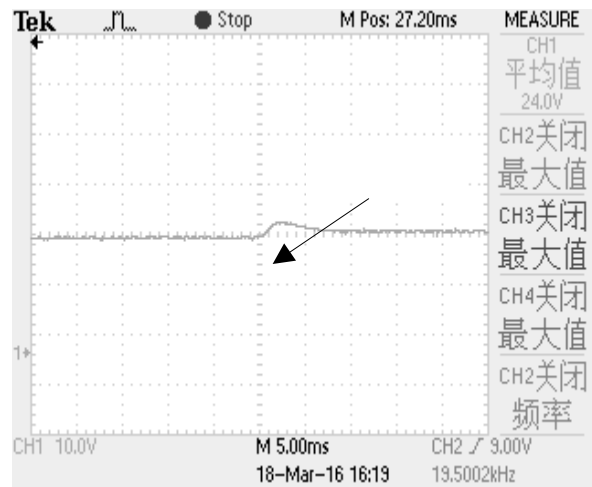


图12 负载跳变2输出波形

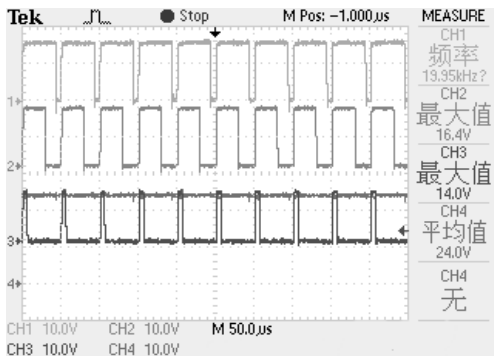


图9 系统60 V输入时输出波形

为验证系统在负载扰动情况下的动态调节能力，实验分别测试了轻载切换重载和重载切换轻载时的输出稳压效果。实验中在相同输入电压(输入电压为40 V)情况下切换 $20\ \Omega$ 和 $50\ \Omega$ 阻性负载，分别对应图11负载切换1和图12负载切换2，系统输出稳压效果如图11和图12所示。图中可看出负载跳变点1由 $50\ \Omega$ 阻性负载切换到 $20\ \Omega$ ，系统变为重载，输出电压出现1 V的超调，经10 ms的调节过程输出电压稳定在设定值。在负载跳变点2由 $20\ \Omega$ 阻性负载切换

到50 Ω , 系统变为轻载, 输出电压有2 V超调, 经10 ms调节过程系统输出电压仍稳定在设定值, 从而验证了在负载扰动条件下系统的控制效果。从以上分析可以看出, 在控制作用下, 系统输出电压具有较好的稳恒性及鲁棒性。

5 结束语

针对多拾取非接触电能传输系统输出稳压控制, 本文提出了一种优化算法的输出稳压控制策略。该方法在不同拾取电压情况下, 根据多拾取支路的拾取能力差异, 动态调节拾取支路占空比, 最终实现输出电压的稳压调节。该方法易于实现, 具有较快的响应速度, 系统的输出纹波较小, 且系统具有较强的鲁棒性。该方法对于其他类型的电力电子系统电压调节具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] DAI X, SUN Y. An accurate frequency tracking method based on short current detection for inductive power transfer system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 776-783.
- [2] LIU C, HU A P, WANG B, et al. A capacitively coupled contactless matrix charging platform with soft switched transformer control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 249-260.
- [3] 傅文珍, 张波, 丘东元, 等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 21-26.
FU Wen-zhen, ZHANG Bo, QIU Dong-yuan, et al. Maximum efficiency analysis and design of self-resonance coupling coils for wireless power transmission system[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(18): 21-26.
- [4] 张献, 杨庆新, 陈海燕, 等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 167-173.
ZHANG Xian, YANG Qing-xin, CHEN Hai-yan, et al. Research on characteristics of frequency splitting in electromagnetic coupling resonant power transmission systems[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(9): 167-173.
- [5] 李晨东, 黄守道, 李中启, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输功率与效率分析[J]. 电力电子技术, 2014, 48(3): 28-31.
LI Chen-dong, HUANG Shou-dao, LI Zhong-qi, et al. Analysis on the power and efficiency of magnetic coupling resonant based on wireless power transfer[J]. Power Electronics, 2014, 48(3): 28-31.
- [6] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输方向性分析与验证[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 197-203.
LI Yang, YANG Qing-xin, YAN Zhuo, et al. Analysis and validation on characteristic of orientation in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 197-203.
- [7] SAKAMOTO H, WASHIMIYA S. Magnetic coupled power and data transferring system with detachable transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(5): 4983-4985.
- [8] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.
- [9] HUANG C Y, BOYS J T, COVIC G A. LCL pickup circulating current controller for inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 2081-2093.
- [10] PIJL V D F, BAUER P, CASTILLA M. Control method for wireless inductive energy transfer systems with relatively large air gap[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 382-390.
- [11] MADAWALA U K, THRIMAWITHANA D J. New technique for inductive power transfer using a single controller[J]. Power Electronics IET, 2012, 5(2): 248-256.
- [12] LI Y L, SUN Y, DAI X. Robust control for an uncertain LCL resonant ICPT system using LMI method[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(21): 31-41.
- [13] NEATH M J, SWAIN A K, MADAWALA U K, et al. An optimal PID controller for a bidirectional inductive power transfer system using multiobjective genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1523-1531.

编辑 漆 蓉