

双边控制的恒压无线充电系统设计

郭丕凤^{1,2}, 邹必昌^{1,2}

(1. 长江大学 电工电子国家级实验教学示范中心, 湖北 荆州 434023;
2. 长江大学 智能电网控制技术研究中心, 湖北 荆州 434023)

摘要: 基于磁感应原理设计了用于变负载恒压充电的无线电能传输系统。首先, 分析二次侧半桥整流器对充电电压的调节作用, 得到占空比与充电电压的关系, 采用PI控制算法实现变负载的恒压充电; 其次, 原边通过扰动观测法跟踪调节最小输入电流, 用于提高系统效率; 最后, 搭建系统实验平台对该系统设计进行验证。结果表明, 在传输距离为5.5 cm时, 通过调整整流电路的占空比和最小输入电流跟踪算法下在负载电阻为1~10 Ω 时, 可实现12 V的恒压充电, 同时传输效率可达85%。

关键词: SP结构; 最小输入电流跟踪; 半桥整流; 恒压输出

中图分类号: TM921

文献标识码: A

DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed19662

Design of Constant-voltage Wireless Charging System with Dual-side Control

GUO Pifeng^{1,2}, ZOU Bichang^{1,2}

(1. *National Demonstration Center for Experimental Electrical and Electronic Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China*; 2. *Research Center for Smart Grid Control Technology, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China*)

Abstract: Based on the principle of magnetic induction, a wireless power transmission system for variable load constant voltage charging was designed. Firstly, the regulation effect of the secondary side half bridge rectifier on the charging voltage was analyzed, and the relationship between the duty ratio and the charging voltage was obtained. Secondly, the constant voltage charging with variable load was realized by using the PI control algorithm. The minimum input current was tracked and adjusted by the perturbation observation method to improve the system efficiency. Finally, the system experimental platform was built to verify the design of the system. The results show that when the transmission distance is 5.5 cm, by adjusting the duty cycle of the rectifier circuit and the minimum input current tracking algorithm, and when the load resistance is 1~10 Ω , 12 V constant voltage charge and transmission efficiency of 85% can be achieved at the same time.

Key words: SP structure; minimum input current tracking; half bridge rectifier; constant voltage output

无线功率传输用于将能量从固定的电源转移到个或多个可移动的负载, 电源至负载则不需要物理接触。通常, 系统的主侧连接到电源, 二次侧连接到负载上。由于电隔离电源端与负载之间没有物理接触, 无线功率传输技术能够在不受灰尘和湿气影响的恶劣环境中工作, 现在发展到可以以高达94%的效率传输电能。因此它被广泛用于诸如手机充电器、电动汽车固定充电器等设备中^[1]。

然而, 无线传输过程中系统性能易受负载变化影响进而传输效率, 文献[2]分析了负载位置检测和初级线圈切换原则。用于设备充电模式有恒流、恒压或者混合式充电3种模式。在无线传输拓扑中串联-串联(series-series, SS)、并联-并联(parallel-parallel, PP)结构可实现恒流输出, 串联-并联(series-parallel, SP)、并联-串联(parallel-series, PS)结构可实现恒压输出^[3-4]。补偿结构是用来提高松耦合线圈的原边和副边的电

力传输能力并可调节接收回路的电压,通常选择补偿技术来追求最大的功率传输能力^[5],而大多数忽略了电压可控性,导致负载变化时输出电压出现明显波动。

通常实现连续电压输出的方式有3种,即变频/全桥逆变移相、阻抗匹配、DC-DC变换^[6-10]。文献[11]的输出功率调节方法是通过 Buck 或 Boost 变换器改变逆变器的输入直流电压调节输出电压,此方式较简单,但增加了一次变换器的功率损耗、体积和成本。文献[12]提出了一种通过改变全桥逆变器的相移角来调节输出电压的方法,缺点是原、副边需要增加通信单元。文献[13]采用非连续注入和自由振荡的方法,优点是开关频率低且输出电流频率高,但电流波形波动小。文献[14]中采用了输出电压由半桥移相控制来控制,利用该方法系统的输出电压可以在不需要主、副边通信装置的情况下进行调节。然而,有源整流器的移相控制既不能实现零电压开关(zero voltage switch, ZVS),也不能实现零电流开关(zero current switch, ZCS),开关损耗增大,整体效率下降。

针对无线电能传输(wireless power transfer, WPT)应用,半桥式整流器代替全桥整流器可以在不改变任何原边控制参数(如频率、占空比、相角等)的情况下控制输出电压,利用该电路特性可以实现对接收端的独立控制。本文中,控制策略分为2个自由度,原边移相全桥控制,副边半整流控制实现恒压(constant voltage, CV)与最大效率的追踪。该方案不需要在原、副边之间增加通信单元,通过理论分析和实验验证所设计系统能够实现变负载时恒压无线充电要求。

1 系统工作原理分析

系统的总体结构如图1所示。

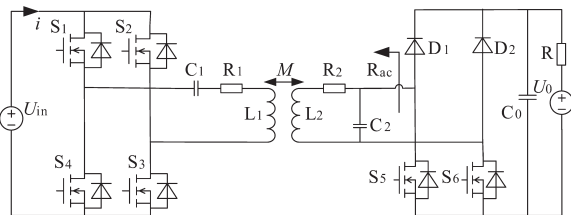


图1 系统结构图
Fig.1 System structure diagram

图1中, U_{in} 为系统输入直流源,电压型高频逆变器由4个MOS管($S_1 \sim S_4$)组成的全桥逆变,原边由 L_1 与 C_1 构成S(串联)拓扑,副边由 L_2 与 C_2

构成P(并联)拓扑,即补偿结构采用SP拓扑模型。整流部分由2个二极管(D_1, D_2)及2个MOS(S_5, S_6)构成,即半桥整流。 C_0 为整流输出侧的滤波电容,负载 R 为可变电阻, U_0 为输出直流电压,整个系统可实现直-交-直的变换过程。另外,用于发射和接收的线盘由螺旋线圈和条状磁芯构成。

简化后的系统电路图如图2所示,用电感 L_1 和 L_2 表示的线圈通过串联电容器 C_1 和并联电容器 C_2 进行补偿,其中, R_1, R_2 分别为电感 L_1, L_2 的寄生电阻,2个线圈之间的互感用 M 表示,补偿结构不需要附加元件。

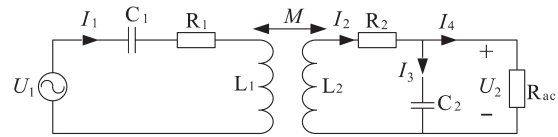


图2 SP等效电路模型
Fig.2 SP equivalent circuit model

图2中, U_1, U_2 分别为原、副边电压; I_1, I_2 分别为原、副边电流; I_3, I_4 分别为流过电容 C_2 与负载 R 的电流, R_{ac} 为二次侧等效负载值。

在电磁感应(inductive power transfer, IPT)系统中,图中SP模型可以用以下基尔霍夫的电压定律方程式来描述:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M & 0 \\ -j\omega M & Z_2 & \frac{1}{\omega C_2} \\ 0 & \frac{1}{\omega C_2} & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) \\ Z_2 = R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) \\ Z_3 = R_{ac} - j(0 + \frac{1}{\omega C_2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为系统工作角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

对于磁感应系统而言,忽略寄生电阻的存在情况下,反射阻抗 Z_r 表示为

$$Z_r = \frac{M^2 R_{ac}}{L_2^2} - j\omega \frac{M^2}{L_2} \quad (3)$$

SP结构在满足完全谐振条件下的二次输出电压,如下式:

$$U_2 = L_2 U_1 / M \quad (4)$$

从式(4)可以看出,SP结构的副边输出电压

与负载是无关的,因此可以通过此模型进行相应的控制单元实现输出电压稳定输出,可以得到传输效率表达式为

$$\eta = \frac{R_{ac} I_4^2}{U_1 I_1} = \frac{-\omega^2 M^2 R_{ac}}{Z_2(j\omega C_2 R_{ac} + 1) + \frac{j}{\omega C_2}} \times \frac{1}{(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2)(j\omega C_2 R_{ac} + 1) + j \frac{Z_1}{\omega C_2}} \quad (5)$$

对于并联补偿接收端,等效电阻 R_{ac} 与负载电阻 R 的关系表示如下式:

$$R_{ac} = \frac{\pi^2}{8} DR \quad (6)$$

原边输入电流如下式:

$$I_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} i \cos \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

式中: D 为副边半桥控制的占空比; α 为原边输入电流 I_1 与直流输入电流 i 的相位角。

结合式(3)~式(7)可以知道,输出电压与副边整流开关器件的占空比有关,而传输效率与占空比和原边相位角都有关,通过相应的控制策略则可以在满足负载电压恒定的同时提高传输效率。

2 双边控制

2.1 副边PI控制

为了简化分析,假设二极管、电容滤波器 C_0 和MOS是理想的,工作模式如图3所示。当 D_1, D_2, S_5, S_6 全开通时,为整流模式,输出有电压(D);当 D_1, D_2 关断, S_5, S_6 开通时,为短路模式,无电压输出($1-D$)。

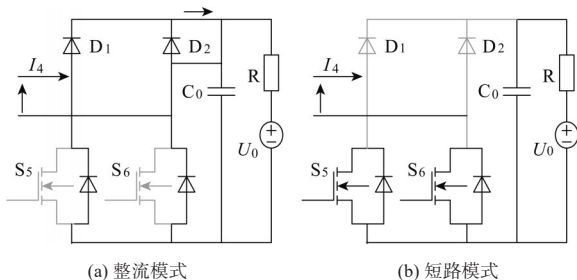


图3 半桥整流电路

Fig.3 Half-bridge rectifier circuit

如图3所示,负载充电电压 U_0 若欲达到预设值,则可以通过PI控制降低参考电压 U_{ref} 和调节MOS驱动信号的占空比 D 来实现。通过式(4)证

明副边电压与等效负载是无关的,但是若等效负载变化很快,则副边电压可能无法达到稳定状态,因此对于副边控制中首先用电压的均方值代替副边的交流电压 U_2 。

充电电压 U_0 用下式表示:

$$C_0 \frac{du_0}{dt} = S_{ab} I_2 - \frac{u_0}{R} \quad (8)$$

式中: S_{ab} 为副边开关管 S_5 或 S_6 的通断。

图4所示为PI控制框图,通过PI控制器得到给定参考电压值 U_{ref} ,将 U_2 的 $1/U_2$ 倍减去 U_{ref} 即可获得交流侧的调制信号,积分环节 G_c, G_d 调节输入信号 U_{ref} 与输出信号 U_2 的误差 U_{err} ,控制开关管的导通和关断即调节占空比 D ,使得PI控制器首先获得系统输入信号与系统输出信号的偏差及其偏差积分 G_{id} ,然后对两者进行组合来获得控制信号,最后生成PWM算法,将 U_2 与 U_{ref} 作差得到 D 的增量,与前一次 D 相加,得到此次PWM波的占空比,最后通过调节占空比 D 来维持观察负载电压,负载电压值与输入给定电压参考值通过反馈 G_s 传递给输入信号,直至系统输出电压稳定,从而达到利用线性特性来优化被控系统的暂态性能和稳态偏差的目的。

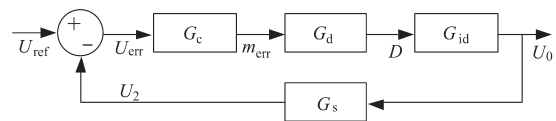


图4 PI控制

Fig.4 PI control

该无线充电系统中负载变化过程中,占空比与充电电压关系如图5所示,从图5中可以看到,波动范围较小,在11.85~12.3V范围内。同时,当负载阻值变化范围为1~10 Ω 时,占空比在0.2~0.9范围内调节即可维持充电电压恒定(12V附近),改变占空比即可实现充电电压调节。

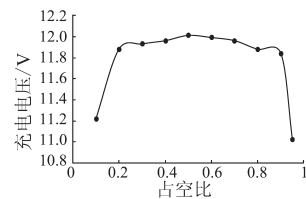


图5 充电电压与占空比关系曲线

Fig.5 The relation curve between charge voltage and duty cycle

通过仿真可以发现,随着负载阻值的变化,充电电压在设定的电压内波动,通过调节半桥整流器的开关管的占空比,即 D_1, D_2, S_5, S_6 全开通时,输出电压接近充电电压设定值。

2.2 原边最小输入电流的扰动观测

原边采用扰动观测法的相角控制与DC/AC变换器实现最小输入电流,从而达到最小输入功率控制。结合数字控制器的工作原理,设计了相角控制算法。扰动观测法的基本步骤是:首先测量相位角和输入电流的初始值 $\alpha(0)$ 和 $i(0)$, $\alpha(0)$ 每加一个相位角 $\Delta\alpha$,将下一刻的电流值与初始电流比较,若比初始电流小且 $\Delta\alpha>0$,则增加 $\Delta\alpha$,直至下一刻的电流值与初始值相等。 $\alpha(1)$ 被用作下一次迭代的 $\alpha(0)$,以确保即使系统的运行条件发生变化,也能使得输入电流始终保持最小。当找到最佳移相角和最小输入电流时,系统的输入功率达到最小。具体相角控制算法可表示为

$$\begin{cases} I(1) = i(0) \\ \alpha(1) = \alpha(0) + \Delta\alpha \\ \alpha(1) = \alpha(0) - \Delta\alpha \end{cases} \quad (9)$$

同时通过调节负载的输出电压,使其同时满足参考电压要求。

在相角控制算法下,输入电流在移相角调节范围内变化,原边相位角与传输效率关系如图6所示。可以发现,输入功率在移相角接近 80° 时可实现最小输入电流即可使输入功率最小,系统传输效率最佳。

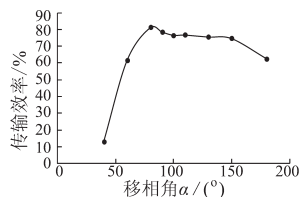


图6 原边相位角与传输效率关系图

Fig.6 The relation between the phase shift angle of the primary and the transmission efficiency

3 实验验证

为验证本文提出的系统设计方法和二次侧PI控制算法调节充电电流的有效性,对系统进行实验验证。系统实验装置主要包括直流源、电子负载、高频逆变器(MOS和二极管)、线圈、信号发生器、整流器。实验将直流电压转换为交流电压,然后通过线圈(利兹线圈)将交流电压传递到二次侧。半桥整流器(MOS和二极管)和电容补偿滤波器(薄膜电容器)将交流电转换为直流电。

实验参数为: $U_{in}=52\text{ V}$, $C_1=C_2=33.25\text{ nF}$, $L_1=L_2=108.86\text{ }\mu\text{H}$, $M=21.78\text{ }\mu\text{H}$, $f=90\text{ kHz}$ 。实验中,将直流源串联获取 52 V 的输入电压,线圈距离固定为 5.5 cm ,利用电子负载改变负载阻值分别观

察电路的电压及电流波形。首先保持逆变电路的相位不变,调节副边整流桥的占空比(0.2~0.9),观察负载电压波形的变化,找到最佳占空比对应的负载恒压。最佳占空比条件下,改变逆变电路的相位,观察输入电流的变化趋势即追踪输出功率的最大值,同时观察相位的变化。

图7所示为在占空比为0.5且相位角为 80° 时的输入电压 U_1 和负载端的最终输出直流电压 U_0 电压波形图。图8是半桥整流器的占空比在0.5时的输出电压波形。调节占空比 D 和相位角输出电压 U_0 可达到稳定值,显然,原边电压 U_1 是高度正弦的无谐波,这有利于系统的传输效率,线圈中的高次谐波不涉及有功功率传输,但会增加功率损耗和电磁干扰。在占空比为0.5且相位角为 80° 时输出功率最大,实验测得的效率为81.2%,与仿真结果接近。同时在实验过程中由于输出电压在初始阶段有较小的尖峰存在,在满足不同的负载条件下为了使系统稳定且保护电路元器件,因此在整流器的输出端加入了小模块的双向DC-DC变换器用以稳压。

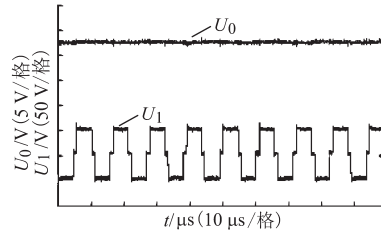


图7 一次侧电压与负载电压波形图

Fig.7 Primary side voltage and load voltage waveforms

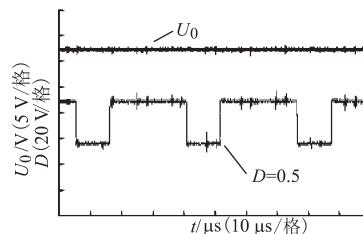


图8 负载电压与占空比的输出波形

Fig.8 Output waveform of load voltage and duty cycle

图9为输入电流 i 波形。在一定时间内,电流随着调节相位角 α 的变化先趋于平缓最终呈现递

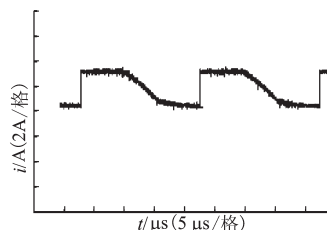


图9 输入电流波形

Fig.9 Input current waveform

减状态,一定周期内总有一个输入电流最小值,因此在最佳相位角下输入功率可达到最小,负载恒压且传输效率达到最大。

4 结论

本文提出了一种IPT系统实现恒压充电和最大效率跟踪。首先分析了SP结构参数对充电电压和充电效率的影响。通过测量二次侧谐振电流,使半桥整流器输入电流与输入电压之间的相位同步。此外,采用PI控制的二次侧半主动整流电路实现恒压充电。其次,结合扰动观察算法控制的移相H桥逆变器,通过搜索给定输出功率的最小系统直流输入电流,实现最大效率跟踪。最后,通过仿真和实验验证了理论分析的正确性。结果表明,不仅实现了恒压充电,而且提高了输出功率。由于本文未考虑寄生参数的影响,且SP结构的恒压特性需要较大的负载电阻,因此实验中在整流器的输出端加入了小模块的双向DC-DC变换器用以稳压。

参考文献

- [1] Wang C S, Stielau O H, Covic G A. Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1308-1314.
- [2] 朱运晓,段平平.基于初级线圈切换的三相无线供电平台设计[J].电气传动,2018,48(9):93-96.
- [3] 宋凯,李振杰,杜志江,等.变负载无线充电系统的恒流充电技术[J].电工技术学报,2017,32(13):130-136.
- [4] Qu X, Han H, Wong S C, *et al.* Hybrid IPT Topologies with Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11):6329-6337.
- [5] 张辉,雷艳婷,王换民.电动汽车LCC型无线充电电路特性分析[J].电气传动,2017,47(8):63-66,75.
- [6] Liu N, Habetler T G. Design of a Universal Inductive Charger for Multiple Electric Vehicle Models [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11):6378-6390.
- [7] Kim S, Covic G, Boys J. Tripolar Pad for Inductive Power Transfer Systems for EV Charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7):5045-5057.
- [8] Lu X, Niyato D, Wang P, *et al.* Wireless Charger Networking for Mobile Devices: Fundamentals, Standards, and Applications [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 22(2): 126-135.
- [9] Koh K E, Beh T C, Imura T, *et al.* Impedance Matching and Power Division Using Impedance Inverter for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 2061-2070.
- [10] Li Zhenjie, Zhu Chunbo, Jiang Jinhai, *et al.* A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5):3301-3316.
- [11] Aditya K, Williamson S S. Advanced Controller Design for a Series-series Compensated Inductive Power Transfer Charging Infrastructure Using Asymmetrical Clamped Mode Control [C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2015:2718-2724.
- [12] Zhong W X, Hui S Y R. Maximum Energy Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7):4025-4034.
- [13] Li H L, Hu A P, Covic G A. FPGA Controlled High Frequency Resonant Converter for Contactless Power Transfer [C]// Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC. IEEE, 2008:3642-3647.
- [14] Tang C S, Sun Y, Su Y G, *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.

收稿日期:2018-11-02

修改稿日期:2019-02-18