

恒压恒流型无线充电系统负载识别特性研究

浦润琴,唐忠,王晓毅,邹玉洁

(上海电力学院 电气工程学院,上海 200090)

摘要:针对电动汽车锂电池充电过程中的恒压恒流充电特性的需求,提出一种基于LCCL-LCCL补偿网络的感应耦合电能传输(ICPT)系统,该系统在不借助任何外在结构的条件下通过切入与切出电容来实现锂电池充电过程中的恒压恒流特性的切换,同时,根据系统原边补偿电容两端电压与负载电阻之间的关系实现了负载大小较高精度的识别,从而避免了非法负载接入对系统产生危害。实验表明该方法进行恒压恒流状态切换以及负载识别的可靠性和可应用性。

关键词:锂电池;恒压恒流;感应耦合电能传输系统;负载识别

中图分类号: TTM74

文献标识码: A

DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd19741

Research on Load Identification Characteristics of Constant Voltage Constant Current Wireless Charging System

PU Runqin, TANG Zhong, WANG Xiaoyi, ZOU Yujie

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to meet the requirement of constant voltage and constant current characteristics of lithium batteries charging in electric vehicles, an inductively coupled power transfer (ICPT) system based on LCCL-LCCL compensation network was proposed. The system realized constant voltage and constant current in lithium batteries charging process by cutting in and out capacitors without any external structure. At the same time, according to the relationship between the voltage of the primary compensation capacitor and the load resistance, a high accuracy identification of the load was realized, thus avoiding the harm of illegal load access to the system. The experiment shows that the method is reliable and applicability for constant voltage and constant current state switching and load identification.

Key words: lithium battery; constant voltage and constant current; inductively coupled power transfer(ICPT) system; load identification

传统的有线传输方式由于传输场合的原因经常存在摩擦、接触不良或老化等一系列弊端,因此无线电能传输技术应运而生,其中感应耦合电能传输(ICPT)是一种利用空间电磁场实现电能从供电端到受电端的非接触传输的新型供电方式,该方式解决了传统电能传输方式带来的缺陷,获得了国内外学者们的众多关注,目前已在医疗设备、手机和电动汽车充电等领域得到了广泛的应用^[1-6]。

近年来,由于传统能源带来的环境污染问题日益严重,新能源的发展变得越来越迫切。其中,由电力驱动的电动汽车是目前的新兴研究方

向,而电动汽车电池的续航时间又无疑是阻碍电动汽车行业发展的一大难题。电动汽车锂电池的充电是一个比较复杂的过程,在充电的过程中,电能需在电池内部转换成化学能,并且在电池的正负两极形成材料的堆积。随着充电时间的累积,电池的电量不断增加,电池两端的电压同时提高,充电电流的大小则由充电器的输出电压与电池两端电压之间的压差,即充电电压差所决定。而锂电池的电阻相对而言比较小,如果将充电器输出电压固定在一个常值,那么在充电的初期,电池的充电电流会由于电阻较低而变得非常大,这将会对电池产生非常大的危害,因此针对电

电动汽车电池的充电过程需要做一个合理的计划。

在电动汽车锂电池充电的初期,充电桩会根据电池的初始电压设定一个充电电压,然后随着电池初始电压的变化动态改变充电电压的大小,从而保证充电电压基本保持不变,那么初期的充电电流基本上是以一个恒定的状态进行,故该阶段称为电池充电的恒流阶段;但是一段时间以后,充电电压仍然保持恒定,但随着电池电量的不断提高,电池电压会小幅上升,当电池电压达到某个值后,若继续以一个固定的充电电压充电会因为过压而危害电池。故在该阶段应控制电池电压,将充电电压提升到充满的状态从而控制充电电流,因此该阶段称为电池充电的恒压阶段。一般情况下,为了实现锂电池的恒流和恒压充电控制,需要设计专门的直流恒压与恒流转换电路。文献[7-10]通过在ICPT系统次级侧增加直流变换器为手持设备提供恒压充电,但是该方法较为复杂;文献[11-14]基于SS,SP等基础补偿拓扑设计了一套ICPT系统,通过在原、副边加入开关来改变系统谐振网络结构从而达到恒压恒流充电的需求,该方法虽然实现较为容易,但是需要加入通信手段,因此对系统的稳定性和安全性产生一定的影响。通过研究发现,ICPT系统中某些特定的补偿网络通过一定的参数设计可以达到恒压恒流输出的要求,故若可以利用ICPT系统本身的拓扑特性来实现锂电池充电过程中的恒压恒流特性要求将对减小系统后端电路的复杂程度具有重要的意义。

本文针对锂电池的充电特性设计了一种基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统,该系统同时具备负载识别和电动汽车恒压恒流充电需求的功能。首先,阐述了其工作原理;然后,通过对系统效率与功率特性的分析,优化选取系统关键参数;最后,通过实验验证了系统的可行性与理论研究的正确性。

2 基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统工作原理分析

2.1 基于LCCL-LCCL补偿网络的恒压恒流特性分析

由文献[15-16]可知LCCL补偿网络通过一定的参数设计可保持输出电压电流维持恒定状态。图1为LCCL补偿网络的原理图。

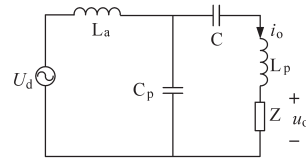


图1 LCCL补偿网络

Fig.1 LCCL compensation network

根据图1,可得其输入阻抗为

$$Z_{in} = j\omega L_a + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{Z + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C}}} \quad (1)$$

式中: ω 为系统工作频率。

且系统谐振角频率 ω_0 为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_a C_p}} \quad (2)$$

由此可得系统输出电流、电压为

$$\begin{cases} \dot{I}_o = \frac{U_d}{Z_{in}} \times \frac{\frac{1}{j\omega C_p}}{Z + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_p}} \\ \dot{U}_o = \frac{U_d}{Z_{in}} \times \frac{\frac{Z}{j\omega C_p}}{Z + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_p}} \end{cases} \quad (3)$$

由此可知,改变电路中的某些参数将会使该电路呈现不同的特性,下面主要分析系统工作频率 ω 对电路特性的影响,为简便计算,令

$$\omega L_p - \frac{1}{\omega C} = \omega L_a \quad (4)$$

则由式(3)可知,当

$$\omega = \sqrt{2} \omega_0 \quad (5)$$

有:

$$\begin{cases} \dot{U}_o = -U_d \\ Z_{in} = \omega_0 L \frac{\sqrt{2} Z}{\sqrt{2} \omega_0 L_a - j2Z} \end{cases} \quad (6)$$

当

$$\omega = \omega_0 \quad (7)$$

有:

$$\begin{cases} \dot{I}_o = \frac{U_d}{j\omega_0 L} \\ Z_{in} = \frac{2\omega_0^2 L_a^2}{Z} \end{cases} \quad (8)$$

由此可知,当 $\omega = \sqrt{2} \omega_0$ 时,LCCL网络具有恒压输出特性;当 $\omega = \omega_0$ 时,LCCL网络具有恒

流输出特性。因此,本文基于此确定该ICPT系统的补偿网络为LCCL-LCCL,系统主电路拓扑如图2所示。由于恒压输出时,系统的工作频率需要改变,但若改变频率 ω 将会影响原边网络的恒流特性,故本文考虑通过改变系统参数从而改变副边网络的谐振频率 ω_0 来等效改变系统工作频率 ω ,即通过加入电容 C_1 以改变副边网络的谐振频率,开关S控制 C_1 的切入与

切出。图2中, U_d 为直流电源, $G_1\sim G_4$ 为高频逆变电路, L_a 为原边电感, C_p 为原边补偿电容, C_a 为原边电容, L_p 为原边发射电感, L_s 为副边拾取电感, C_b 为副边电容, C_s 为副边补偿电容, L_b 为副边电感, $D_1\sim D_4$ 为整流电路,C为滤波电容, R_L 为直流负载。

由上述分析可知,当系统工作频率与谐振频率相同时,系统输出电流保持恒定;当系统工作

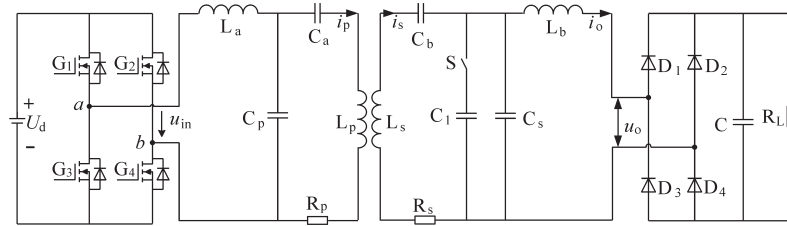


图2 基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统

Fig.2 ICPT system based on LCCL-LCCL compensation network

频率为谐振频率的 $\sqrt{2}$ 倍时,系统输出电压保持恒定。因此当电动汽车需要恒压充电时,系统只需在恒流输出的基础上改变副边网络的谐振频率,使其成为工作频率的 $1/\sqrt{2}$ 倍即可。

当系统工作频率与谐振频率相等时,有:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = j\omega M \times \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega L_a} = \frac{M\dot{U}_{in}}{L_a} \\ \dot{I}_o = \frac{\dot{U}_s}{j(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_b})} = \frac{\dot{U}_s}{j\omega L_b} = \frac{M\dot{U}_{in}}{j\omega L_a L_b} \end{cases} \quad (9)$$

式中: M 为原副边线圈之间的互感; U_{in} 为逆变电路输出电压; U_s 为原边网络作用在副边网络上的感应电压; U_o, I_o 分别为系统输出交流电压和电流。

故系统输出电流为与负载无关的恒定量。

当改变系统副边网络谐振频率使其成为工作频率的 $1/\sqrt{2}$ 时,有:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = j\omega M \times \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega L_a} = \frac{M\dot{U}_{in}}{L_a} \\ \dot{U}_o = -\dot{U}_s = -\frac{M\dot{U}_{in}}{L_a} \end{cases} \quad (10)$$

即输出电压与负载无关,为恒定量。由于系统原副边网络的工作频率不一致,因此在参数设计时需要加入电容 C_1 ,从而改变副边网络的谐振频率。

1.2 基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统负载识别方法分析

如前所述,本文提出的基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统工作在不同的频率下可以达

到不同的要求,同时还能够实现负载接入系统后的负载识别要求。当ICPT技术被应用于电池充电时,往往要为不同的电池设计不同参数的ICPT系统,这也就意味着一个已经设计好的系统,其供电对象往往只有一类,不同类型的电池不可随意接入系统。该系统可充电负载为合法负载,若非法负载接入系统,有可能会对系统造成伤害。因此,在ICPT系统中,如何避免非法负载的接入以及接入系统后的保护研究是非常有必要的。

由于电池的充电过程为先恒流后恒压,故本文只需在恒流状态下判断该负载是否为合法负载即可,由图2及文献[17]可知,整流电路前端等效负载 R_{eq} 与后端负载 R_L 之间的关系为

$$R_{eq} = \frac{\pi^2}{8} R_L \quad (11)$$

根据电压电流关系可知:

$$\dot{U}_o = \dot{I}_o R_{eq} = \frac{MR_{eq}\dot{U}_{in}}{j\omega L_a L_b} \quad (12)$$

而原边补偿电容 C_p 两端电压 U_{Cp} 为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Cp} &= \dot{I}_p \cdot (j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_a} + Z_f) \\ &= \dot{U}_{in} (1 + \frac{R_{eq} M^2}{j\omega L_a^3}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: U_o 为整流电路输入电压; I_o 为整流电路输入电流; U_{in} 为逆变电路输出电压; ω 为系统工作角频率; U_{Cp} 为原边补偿电容 C_p 两端电压。

故系统等效阻抗 R_{eq} 与原边补偿电容 C_p 两端电压 U_{Cp} 之间的关系为

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{\omega^2 L_a^6 \sqrt{\left| \frac{\dot{U}_{Cp}}{U_{in}} \right|^2} - 1}{M^4}} \quad (14)$$

由式(14)可知,原边补偿电容 C_p 两端电压 U_{Cp} 与系统等效负载 R_{eq} 之间呈现一个正相关的关系,当检测出原边补偿电容两端的电压即可知道负载电阻的大小,从而判断该系统是否可为该负载供电;若根据式(12)计算出的系统输出电压高于负载的额定电压,表明该负载对于本文设计的 ICPT 系统而言为非法负载,需将系统进行断电处理。

3 基于 LCCL-LCCL 补偿网络的 ICPT 系统功率和效率特性分析

基于图2以及各系统参量之间的关系,本节将从系统功率、效率的角度为系统参数设计提供思路。经过上文对系统的分析可知,首先将 C_1 切出系统,则该 ICPT 系统副边网络输入阻抗 Z_s 如下式:

$$Z_s = j\omega L_s + R_s + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R_{eq} + j\omega L_b}} \quad (15)$$

则原边网络的输入阻抗 Z_p 为

$$Z_p = j\omega L_a + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_b} + R_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s}}} \quad (16)$$

故系统原边导轨电流 I_p 为

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_{in}}{Z_p} \times \frac{j\omega C_p}{j\omega L_p + R_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} + \frac{1}{j\omega C_a} + \frac{1}{j\omega C_p}} \quad (17)$$

则系统输出电流 I_o 及输出功率 P_o 为

$$\begin{cases} \dot{I}_o = \frac{j\omega M \dot{I}_p}{Z_s} \times \frac{j\omega C_s}{j\omega L_b + R_{eq} + \frac{1}{j\omega C_s}} \\ P_o = |I_o|^2 R_{eq} \end{cases} \quad (18)$$

由以上计算可得系统工作效率 η 为

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_1 + P_2} = \frac{|I_o|^2 R_{eq}}{|I_o|^2 R_{eq} + |I_p|^2 R_p + |I_s|^2 R_s} \quad (19)$$

式中: R_p, R_s 分别为原边发射线圈 L_p 和副边拾取线圈 L_s 的内阻。

在负载电阻 $R_L=10 \Omega$, 系统谐振频率 $f_0=30 \text{ kHz}$, 系统原副边线圈内阻 $R_p=R_s=0.1 \Omega$ 的情况下,系统效率与原边电感 L_a 以及系统工作频率 f 之间的关系曲线如图3所示。

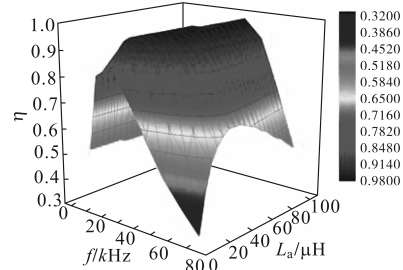


图3 系统工作效率与原边电感 L_a 和工作频率 f 之间的关系
Fig.3 The relationship between system efficiency η and primary inductance L_a and working frequency f

由图3可以看出,效率随着系统工作频率 f 和原边电感 L_a 的提高先增大后减小,在谐振频率点达到最大值。

图4为谐振频率下系统输出功率 P_o 与效率 η 和原边电感 L_a 之间的关系,因此,为提高系统效率及输出功率,设计系统参数时应充分考虑原边电感 L_a 的大小对其产生的影响。

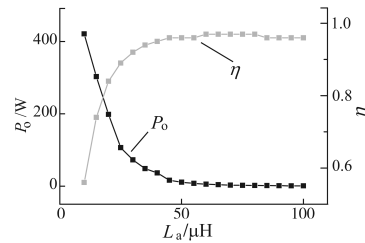


图4 系统输出功率 P_o 与效率 η 和原边电感 L_a 之间的关系
Fig.4 The relationship between system output power P_o and efficiency and side inductance L_a

4 实验验证

为了验证本文所提出的基于 LCCL-LCCL 补偿网络的 ICPT 系统恒压恒流输出特性以及负载识别方法的正确性,搭建了实验平台。由于工作频率过高,实验器件将会产生较大的损耗,同时对器件质量的要求也会有所提高,而实验频率过低则会影响系统的正常工作,故综合考虑后选择系统谐振频率为 $f_0=30 \text{ kHz}$, 则恒流条件下,系统原副边网络工作频率 $f=f_0=30 \text{ kHz}$; 恒压条件下,系统工作频率仍为 30 kHz , 原边谐振频率 $f_0=30 \text{ kHz}$, 切入电容 C_1 后,使副边谐振网络的谐振频率降为 21.22 kHz , 由此得到系统工作频率与谐

振频率为 $\sqrt{2}$ 倍的关系,系统硬件实验平台见图5,系统参数为:直流电压 $U_d=25\text{ V}$,原边电感 $L_a=28\text{ }\mu\text{H}$,原边补偿电容 $C_p=1\text{ }\mu\text{F}$,原边电容 $C_a=0.03\text{ }\mu\text{F}$,原边发射线圈 $L_p=122\text{ }\mu\text{H}$,副边拾取线圈 $L_s=122\text{ }\mu\text{H}$,副边电容 $C_b=0.03\text{ }\mu\text{F}$,副边补偿电容 $C_s=1\text{ }\mu\text{F}$,副边电感 $L_b=28\text{ }\mu\text{H}$,电容 $C_1=1\text{ }\mu\text{F}$,互感 $M=36.6\text{ }\mu\text{H}$ 。

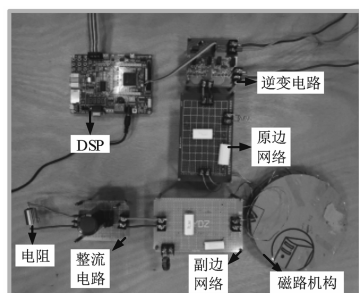


图5 系统硬件实验平台

Fig.5 System hardware experimental platform

本文设计的基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统既能够实现恒压恒流输出,同时也具有负载识别的功能。基于图5所示的实验平台,首先对系统的恒流恒压特性进行验证,图6为系统的逆变电路输出电压、电流波形;图7为逆变器输出电压和原边补偿电容两端电压波形;图8、图9分别为系统恒压输出和恒流输出条件下改变系统负载时的情况。由图8及图9可知,实验时将负载大小从 $100\text{ }\Omega$ 降为 $50\text{ }\Omega$ 时,本文设计的LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统具有良好的恒压恒流输出特性。

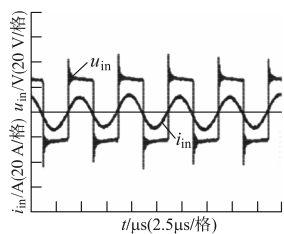


图6 逆变输出电压电流波形

Fig.6 Voltage and current waveforms of inverter output

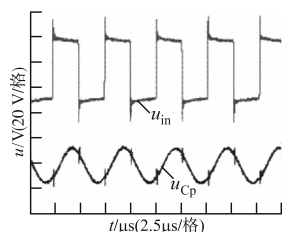


图7 逆变输出电压和原边补偿电容两端电压

Fig.7 Inverter output voltage and side compensation capacitor voltage

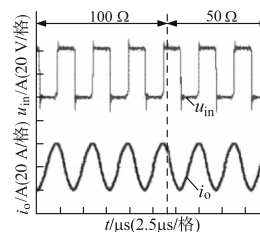


图8 负载改变时的恒流输出特性研究

Fig.8 Study on constant current output characteristics with load change

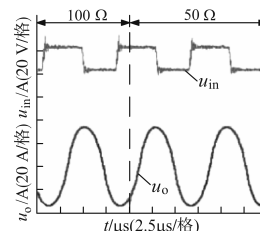


图9 负载改变时的恒压输出特性研究

Fig.9 Study on the constant voltage output characteristics with load change

同时,该ICPT系统还具有负载识别的特性,实验时选取了10组负载进行验证。表1为负载真实值与实验结果对比。

表1 负载真实值与实验值的对比

Tab.1 Comparison of load real value and experimental value

负载真实值 R_{eq}/Ω	电容电压 U_{Cp}/V	负载电压 U_i/V	负载实验值 R'_e/Ω	识别精度/%	功率 P_e/W	效率 $\eta/\%$
5	43.12	26.3	5.05	99.5	149.83	95.3
10	75.77	51.96	9.9	99.3	289.37	94.5
15	109.99	75.85	14.78	99.1	419.4	93.2
20	145.6	97.89	19.76	99	540.63	91.7
25	179.49	118.6	24.45	98.7	653.7	90.6
30	214.54	138.9	29.29	98.1	759.23	89.9
35	251.3	156.3	34.36	98	857.74	87.4
40	282.48	173.5	38.66	97	949.75	85.2
45	315.87	189.8	43.25	96.3	1040	84.7
50	352.15	205.2	48.25	96	1120	83.6

由表1可知,本文设计的ICPT系统具有负载识别功能,同时识别精度较高,本次实验是在恒流状态下进行的,故随着负载的增大,系统输出功率不断提高。基于图5的实验平台实现了最大功率 1.12 kW ,最高效率 95% 的实验设计,较好地完成了前文关于系统特性的验证。

5 结论

本文针对电动汽车无线充电过程中对系统恒压恒流特性的要求,提出了一种基于LCCL-LCCL补偿网络的ICPT系统,该系统利用LCCL拓扑本身因参数设计即可达到恒压恒流输出的特性,通过改变副边网络的谐振角频率来达到恒流状态到恒压状态的切换;同时为了避免非法负载的接入对系统产生危害,本文根据原边补偿电

容两端电压与负载电阻之间的关系对负载进行判断,从而对系统进行保护。首先根据要求对系统补偿拓扑进行选择;然后对系统恒压恒流特性满足的条件进行分析,得出通过改变副边网络谐振频率的方法可实现两种状态之间的切换的结论;接着根据原边补偿电容两端电压和负载电阻之间的关系换算出电阻的大小,从而对其进行判断是否可接入系统,同时分析系统功率效率与系统某些参数之间的关系,为系统参数设计提供参考;最后搭建实验平台对前述理论分析进行验证,实验表明,该系统可较好地实现恒流与恒压之间的切换,但由于恒压状态下改变副边网络的谐振频率,造成系统效率有一定的下降,且LCCL拓扑本身的固有缺陷导致在重载时识别精度降低,在后续的研究中将针对此对系统进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 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 Trans. on Power Electron., 2011, 26(1):98-109.
- [2] Matsumoto H, Neba Y, Ishizaka K, *et al.* Comparison of Characteristics on Planar Contactless Power Transfer Systems [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2012, 27(6):2980-2993.
- [3] Neath M J, Madawala U K, Thrimawithana D J. A New Controller for Bi-directional Inductive Power Transfer Systems[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011, 11(8):1951-1956.
- [4] Song B M, Kratz R, Gurol S. Contactless Inductive Power Pickup System for Maglev Applications[C]//37th IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference, Pittsburgh, PA, USA, 2002:1586-1591.
- [5] Pantic Z, Lukic S M. Framework and Topology for Active Tuning of Parallel Compensated Receivers in Power Transfer Systems [J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2012, 27(11):4503-4513.
- [6] 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 Trans. on Power Electron., 2009, 24(2):416-425.
- [7] Boys J T, Covic G A, Xu Y. DC Analysis Technique for Inductive Power Transfer Pick-ups [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 99(2):51-53.
- [8] Wu H H, Gilchrist A, Sealy K D, *et al.* A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3):585-595.
- [9] Fu M, Yin H, Zhu X, *et al.* Analysis and Tracking of Optimal Load in Wireless Power Transfer Systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7):3952-3963.
- [10] Budhia M, Covic G A, Boys J T. Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11):3096-3108.
- [11] 孙跃,张欢,陶维,等.基于变结构模式的宽负载恒压感应耦合电能传输系统[J].电力系统自动化,2016,40(5):109-114.
- [12] 麦瑞坤,陈阳,刘野然.基于变补偿参数的IPT恒流恒压电池充电研究[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5816-5821.
- [13] 王彦,袁小芳,向永忠.LCL型非接触电能传输系统模糊电压控制[J].电力系统及其自动化,2016,28(5):29-40.
- [14] Qu X H, Han H D, 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.
- [15] 邹爱龙,王慧贞,华洁.基于LCL补偿的多负载移动式感应非接触电能传输系统[J].中国电机工程学报,2014, 34(24):4000-4006.
- [16] 李均锋,廖承林,王丽芳,等.基于LCCL的电动汽车无线充电系统最大效率与传输功率解耦设计研究[J].电工技术学报,2015(s1):199-203.
- [17] Boys J T, Covic G A, Xu Y. DC Analysis Technique for Inductive Power Transfer Pick-ups [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1(2):51-53.

收稿日期:2018-12-01

修改稿日期:2019-01-23