

# LCL-S型无线电能传输系统负载与互感辨识方法

仇逸<sup>1,2</sup>,汪凤翔<sup>1,2</sup>,黄卫东<sup>1</sup>,黄东晓<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118;

2. 中国科学院海西研究院泉州装备制造研究中心,

电机驱动与功率电子国家地方联合工程研究中心,福建 泉州 362000)

**摘要:**针对无线电能传输系统因线圈偏移、受电设备阻抗变化等导致系统模型参数不精确的问题,提出一种基于粒子群算法的LCL-S型无线电能传输系统负载与互感辨识方法。根据LCL-S补偿拓扑原边恒流及副边恒压的输出特性,采用滤波电容能量守恒理论,建立负载输出电压与互感、原边线圈电压与负载的数学描述。以输出电压理论值与实际值之间的误差构建成本函数,设计粒子群算法,通过数值寻优实现参数的辨识。仿真与实验结果均验证了该方法能够较为准确地辨识出互感与负载大小,且无需增加额外硬件电路及控制,降低了系统复杂程度。

**关键词:**磁耦合谐振;无线电能传输;多参数辨识;粒子群算法;多谐振补偿拓扑

中图分类号:TM724

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2022)03-0275-06

## Identification method of load and mutual inductance in LCL-S wireless power transmission system

QIU Yi<sup>1,2</sup>, WANG Fengxiang<sup>1,2</sup>, HUANG Weidong<sup>1</sup>, HUANG Dongxiao<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.National Local Joint Engineering Research Center for Electrical Drives and Power Electronics,

Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the model parameters of wireless power transmission system are not accurate due to coil deviation and impedance change of the receiving device, a method of load and mutual inductance identification of LCL-S wireless powerless transmission system based on particle swarm optimization was proposed. According to the output characteristics of constant current on the primary side and constant voltage on the secondary side of LCL-S compensation topology, the mathematical description of load output voltage and mutual inductance, the primary side coil voltage and load was established by using the conservation theory of filter capacitor energy. The cost function was constructed based on the error between the theoretical value and the actual value of the output voltage, and the particle swarm optimization algorithm was designed to transform the parameter identification into a numerical optimization problem, thus realizing the parameter identification. Simulation and experimental results verify that the proposed method can accurately identify the mutual inductance and load, and no additional hardware circuits and controls are needed, thus reducing the complexity of the system.

**Keywords:** magnetically-coupled resonance; wireless power transmission; multi-parameter identification; particle swarm optimization; multi-resonance compensation topology

收稿日期:2022-03-04

基金项目:福建省科技计划项目(2020T3016)

第一作者简介:仇逸(1995—),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向:无线电能传输。

通信作者:汪凤翔(1982—),男,江西九江人,研究员,博士,研究方向:电力电子与电力传动。

磁耦合谐振式无线电能传输 (MCR-WPT) 因其传输功率较大、传输距离较远、相对安全以及成本低等特性成为研究的热点<sup>[1]</sup>, 被应用于电动汽车<sup>[2,3]</sup>、工业机器人<sup>[4]</sup>等诸多领域。随着无线电能传输技术的发展, 传输功率小、系统损耗大、开关器件应力较大的问题使得单谐振拓扑无法满足系统性能的要求。而更为复杂的多谐振拓扑结构如 LCL、LCC 等由于拓扑的负载适应性更强、具有更大的谐振电容量等优势受到了青睐<sup>[5,6]</sup>。在无线充电系统使用中谐振器偏移、负载等变化等将使开环系统的性能降低甚至导致系统失控。为保证系统的高效传输, 需要设计一种能够准确识别互感与负载的方法, 提升系统模型精确度。

文献[7]提出了基于遗传算法考虑高次谐波的 MCR-WPT 系统负载和互感参数辨识算法。文献[8]提出基于谐波注入的基波谐波双通道并行的负载识别方法。文献[9]中提出了利用系统的状态方程同时引入粒子群算法进行参数辨识。文献[10]提出了基于 MCR-WPT 系统稳态模型参数辨识方法, 仅需要对系统直流输入电压与直流输出电压进行采样, 针对滤波电容能量守恒设计粒子群算法的边界条件, 实现互感参数的辨识。文献[11]设计了一种基于参数识别的双面自整定 LCC-S 系统。文献[12]针对双向 LCC 补偿提出只需检测发射端电压电流实现负载大小的辨识。文献[13]提出基于副边可切换电容的方法, 调整系统的工作状态, 从而实现互感辨识。文献[14]提出基于粒子群算法的互感辨识方法, 只需检测发射端电流即可。

上述对辨识方法的研究中, 部分方法基于 S-S 谐振补偿拓扑, 无法运用于多谐振拓扑中; 部分方法的多谐振拓扑中没有针对 LCL-S 型拓扑, 且无法进行多参数辨识。综上, 本研究提出一种 LCL-S 型无线电能传输系统互感和负载辨识方法, 建立系统稳态电路模型, 设计粒子群算法, 通过采样电压和预测电压等信息辨识系统实际参数。

## 1 系统原理与辨识方法设计

### 1.1 系统建模与分析

LCL-S 型谐振电路的 MCR-WPT 系统拓扑兼具原边恒流、副边恒压的输出特性, 如图 1 所示。系统整体由直流电源 ( $U_{in}$ )、全桥逆变器 ( $S_1 \sim$

$S_4$ )、谐振模块 ( $L_p, L_s$ )、控制器、整流滤波模块和负载 ( $R_L$ ) 组成。发射端发出高频交流电产生的磁场, 通过耦合线圈将能量传递到接收端, 对负载进行供电。

$R_e$  为整流器后的等效负载, 即

$$R_e = \frac{8R_L}{\pi^2} \quad (1)$$

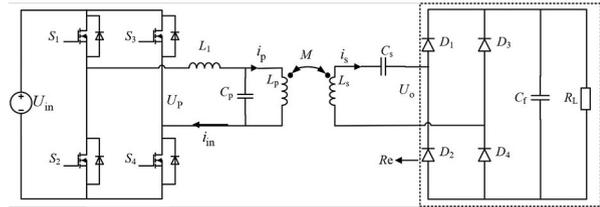


图 1 LCL-S 型 WPT 系统电路图

Fig.1 Circuit diagram of LCL-S system

为了降低电源输入的无功功率以及提高系统能量传输能力, 一般会使系统的激励频率与原副边固有频率相近。因此设计的系统电路参数选择满足以下条件。

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L_1 C_p}} \approx \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (2)$$

### 1.2 系统建模及辨识方法

图 1 中输入的直流电经过全桥逆变过后, 输出的方波用傅里叶级数展开后可得:

$$U_p = \frac{4U_{in}}{\pi} \left[ \sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{2n-1}\sin(2n-1)\omega t \right] \quad (3)$$

由于 LCL-S 具有良好的低通滤波性, 因此分析该拓扑时只需要分析基波分量即可, 即:

$$U_p = \frac{2\sqrt{2}U_{in}}{\pi} \quad (4)$$

根据互感原理, 假定系统的工作频率为  $\omega$ , 可得系统的输入阻抗为:

$$Z_{in} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + Z_r}} \quad (5)$$

由于系统工作频率为副边的谐振频率, 因此反射阻抗为:

$$Z_r = \frac{(\omega M)^2}{R_e} \quad (6)$$

根据电路图结构、互感耦合定律及基尔霍夫定律可算得原副边的电流。

$$\begin{cases} I_{in} = \frac{U_p}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + Z_r}}} \\ I_p = \frac{U_p}{Z_r(1 - \omega^2 L_1 C_p) + j\omega(L_1 + L_p) - j\omega^3 L_1 L_p C_p} \\ I_s = \frac{j\omega M I_p}{R_e + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}\right)} \end{cases} \quad (7)$$

当系统处于固有谐振频率时,原边电流大小为:

$$I_p = \frac{U_{in}}{j\omega L_p} \quad (8)$$

则输出电压为:

$$U_o = j\omega M I_p = \frac{M U_{in}}{L_p} \quad (9)$$

可以看出,LCL-S系统在谐振条件下,原边电流与副边输出电压与负载大小无关。因此原边可视为恒流源,副边可视为恒压源。

将输出与输入电压代入式(9)可算出互感,但经过多次测量与计算,该式算得的互感  $M$  与实际值有着较大的误差,如图2所示,当互感实际值为  $30 \mu\text{H}$  时,计算值约为  $31.79 \mu\text{H}$ ,误差值为  $6.57\%$ ,误差较大。

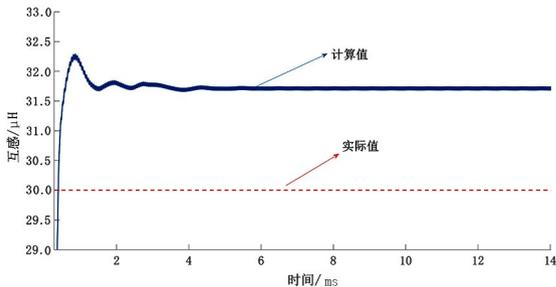


图2 互感的公式计算结果与实际值对比

Fig.2 Calculated mutual inductance value compared with the actual value

根据欧姆定律可算得原边线圈电压为:

$$U_{Lp} = I_p \times |Z_{Lp}| \quad (10)$$

式中,  $I_p$ 、 $U_{Lp}$  分别为原边线圈处电流、电压的有效值,  $|Z_{Lp}|$  为原边线圈处阻抗的模。

将式(6)、式(7)代入式(10)中,可推算出  $R_L$  的表达式:

$$R_L = \frac{(\omega M)^2 \times \pi^2}{8 \sqrt{\left(\frac{U_{Lp}}{I_p}\right)^2 - (\omega L_p)^2}} \quad (11)$$

根据式(7)可推算出系统的负载输出功率为:

$$P_o = I_s^2 R_e = \frac{(U_{in} \omega M)^2 (Z_r^2 + Y^2 \omega^2 L_p^2)}{Z_r^2 (Z_r^2 + \omega^2 L_p^2) R_e} \quad (12)$$

式中,

$$Y = (1 - \omega^2 L_p C_p)^2 + \omega^2 C_p^2 Z_r^2 \quad (13)$$

如图1所示,为了减少整流器输出的直流电的纹波,整流器后端使用滤波电容  $C_f$ 。根据电容能量守恒公式可获得电容端电压和外部输入的能量关系为:

$$\frac{C_f (V_{final}^2 - V_{initial}^2)}{2} = P \times T \quad (14)$$

其中,  $V_{initial}$  为初始时刻电压,  $V_{final}$  为结束时刻的电压,  $P$  为外部输入功率,  $T$  为持续时间。

将滤波电容公式(14)离散化,可得系统在  $kT$  时刻输出电压  $U_{out}(k)$  与  $(k+1)T$  时刻输出电压  $U_{out}(k+1)$  具有一下关系:

$$U_{out}(k+1) = \sqrt{\frac{2}{C_f} \times \left[ P_o(k) \cdot T + \frac{1}{2} C_f U_{out}^2(k) - \frac{U_{out}^2}{R_L} \cdot T \right]} \quad (15)$$

由于副边为恒压源,即  $R_L$  的值大小对于输出电压没有影响,因此在使用式(15)做辨识时,可以先设负载  $R_L$  为一个任意定值,可先辨识出互感值  $M$ ,再将  $M$  代入式(11)中,将负载  $R_L$  算出。

### 1.3 粒子群算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 源于对鸟群捕食的行为研究而得出的一种进化计算技术。

本研究基于粒子群算法提出一种 LCL-S 型 WPT 系统负载与互感辨识方法,通过粒子群寻优算法,建立系统稳态模型,并在相同的系统参数和输入条件下使其与实际系统性能达到最优拟合,从而实现参数辨识。主要分为两个步骤:

首先对粒子群初始化,包括粒子速度  $v$  与粒子位置  $x$ ,其中  $x$  代表辨识值的变量,也就是互感  $M$ 。第二步是进入迭代计算,在迭代过程中需要

对  $v$  和  $x$  不断地更新, 具体公式如下:

$$\begin{cases} k(n) = k_{\max} - \frac{(n-1)(k_{\max} - k_{\min})}{n_{\max} - 1} \\ v(n) = k(n) \times v(n-1) + c_1 \times \text{random} \times \\ [\text{gbest}(n-1) - x(n-1)] + c_2 \times \text{random} \times \\ [\text{zbest}(n-1) - x(n-1)] \\ x(n) = x(n-1) + v(n) \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $k$  为惯性权重因子,  $k_{\max}$  与  $k_{\min}$  为权重系数的上限和下限;  $x(n)$  为当前迭代的次数;  $n_{\max}$  为最大迭代次数,  $v(n)$  为粒子在第  $n$  次迭代的速度,  $x(n)$  为粒子在第  $n$  次迭代的位置,  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,  $\text{random}$  为 0-1 的随机数,  $\text{zbest}$  为个体最优,  $\text{gbest}(n)$  为全局最优。

当每一次迭代都需要将最优值代入式 (17) 中计算适应度值, 其中  $U_{\text{out}}^*(k)$  与  $U_{\text{out}}^*(k+1)$  为输出电压的理论值。再选择适应度最低的粒子作为最佳值, 并对单粒子全局适应度  $\text{gbest}$  和粒子群全局适应度  $\text{zbest}$  进行更新, 当循环结束时, 粒子全局最佳适应度  $\text{zbest}$  值表示 PSO 辨识出参数的值。

$$\text{fitness} = \left( \frac{[U_{\text{out}}(k) - U_{\text{out}}^*(k)]^2}{2} + \frac{[U_{\text{out}}(k+1) - U_{\text{out}}^*(k+1)]^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

#### 1.4 仿真

为了验证识别方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台根据图 1 及上述的理论分析搭建相应的仿真模型, 仿真时间设为 2 ms, 仿真步长设为 0.1  $\mu\text{s}$ 。仿真参数按照实际系统的真实测量值进行设置, 具体参数设置如表 1 所示。

由于负载的大小改变不会影响输出电压, 因此在对  $M$  辨识时, 可以将式 (15) 中的  $R_L$  视作一个定值, 设  $R_L = 15 \Omega$ , 通过该方式可以先将  $M$  值辨识出来。

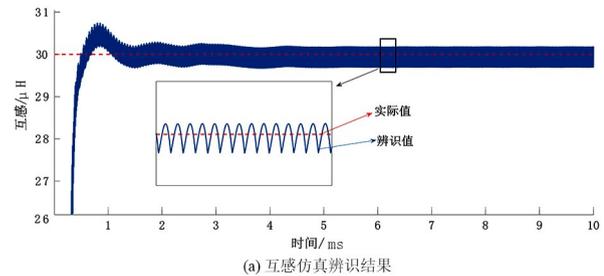
在系统处于稳定时, 即可按照粒子群算法流程对系统的互感与负载进行辨识。所辨识的互感值最大误差不超过 2%, 结果远好于式 (9) 的计算值。

在辨识出互感值之后, 可以将辨识出的互感值代入式 (11) 中, 将  $R_L$  辨识出, 表 2 列出互感  $M$  分别在 20、30  $\mu\text{H}$ , 负载分别在 20、30  $\Omega$  时的 4 种

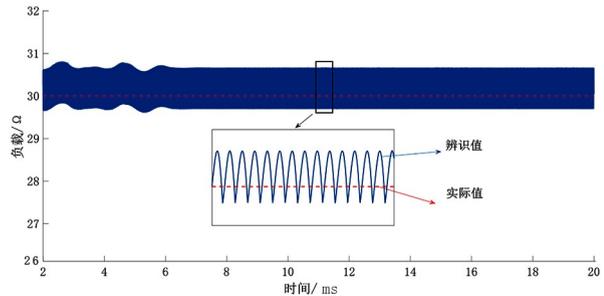
工况下的辨识结果。

表 1 系统仿真及实验参数

参 数	数 值
逆变输入直流电压 $U_{\text{in}}/\text{V}$	15
逆变频率 $f/\text{kHz}$	50
原边线圈电感 $L_p/\mu\text{H}$	192.942
副边线圈电感 $L_s/\mu\text{H}$	201.512
原边补偿电感 $L_1/\mu\text{H}$	188.356
原边谐振电容 $C_p/\text{nF}$	56
副边谐振电容 $C_s/\text{nF}$	53
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	68
互感 $M/\mu\text{H}$	30
负载 $R_L/\Omega$	30



(a) 互感仿真辨识结果



(b) 负载仿真辨识结果

图 3 辨识值与实际值对比

Fig.3 Identified value compared with the actual value

仿真结果表明, 互感辨识误差较小, 最大误差不超过 2.00%; 同时互感辨识是采用负载输出电压做辨识模型, 而该拓扑副边可等效为恒压源, 互感辨识不受负载变化影响。负载的辨识结果受互感变化影响较大, 最大误差为 5.35%, 究其原因是互感发生变化时, 系统最佳负载发生变化, 原边线

圈电压高次谐波含量增多,而系统模型仅考虑基波分量,因此会影响负载辨识精度。

表2 负载互感仿真辨识结果

Tab.2 Load mutual inductance simulation identification results

互感实际值/ $\mu\text{H}$	负载实际值/ $\Omega$	互感辨识值/ $\mu\text{H}$	负载辨识值/ $\Omega$
20	20	19.95	19.93
20	30	20.02	31.68
30	20	29.97	19.07
30	30	29.98	30.97

## 2 实验

根据图1以及上述仿真分析搭建了LCL-S型WPT系统实验装置,系统参数由表1给出。全桥逆变电路选择GaN SYSTEM公司的GS61004B-EVBCD,逆变信号由函数信号发生器生成。识别算法在TI公司的LAUNCHXL-F28379D中实现。

当实验系统负载 $R_L$ 为 $30\ \Omega$ 、互感 $M$ 为 $43.57\ \mu\text{H}$ 时,辨识结果如图4所示。

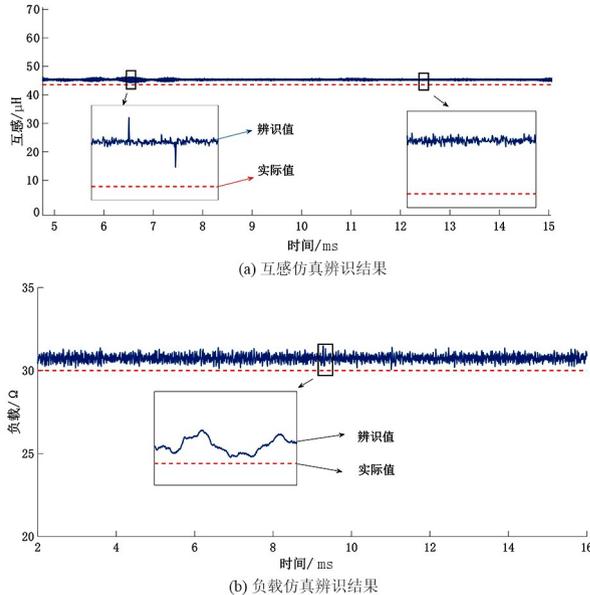


图4 部分实验结果

Fig.4 Partial experimental results

在忽略噪声干扰后互感的辨识最大误差为3.90%,数值为 $42.59\ \mu\text{H}$ ,负载最大误差为5.70%,

数值为 $31.72\ \Omega$ 。通过切换负载以及调节线圈之间的相对位置以实现负载与互感的变化,进一步在不同的负载与互感条件下完成参数辨识,其辨识结果如图5所示。

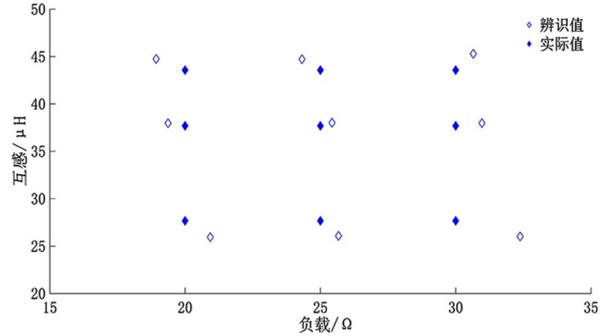


图5 实验结果

Fig.5 Experimental results

在实验中,互感的实际测量值分别为 $27.67$ 、 $37.69$ 、 $43.57\ \mu\text{H}$ ,负载分别为 $20$ 、 $25$ 、 $30\ \Omega$ ,在同一互感下进行了3次负载变化辨识实验。其中负载辨识结果最大误差约为9.7%,最小误差为2.8%,互感最大辨识误差约为3.9%,最小误差为1.3%。由于实际电路和仿真参数有偏差,且存在采样误差,因此辨识出的参数相比于仿真误差更大。

## 3 结论

针对LCL-S拓扑多参数辨识问题,本研究提出了一种基于粒子群算法的互感与负载辨识方法,利用LCL-S拓扑恒压输出特性建立了输出电压的数学模型。基于该模型的准确性,向实际系统模型和数学模型输入相同数据,以判别两者输出状态变量的误差。该模型需要的系统采样点较少,信号采样方便。为了使辨识结果更准确,本研究引入粒子群算法,选取状态变量的差值作为其适应度函数,将传输系统的参数辨识问题转换为最优解问题,完成参数辨识随后通过系统原边线圈恒流特性计算出负载大小。实验通过调整谐振线圈之间的距离和负载电阻来改变互感与负载的大小,在DSP28379中实现在线辨识。

仿真与实验结果均表明,基于粒子群算法的负载、互感辨识方法模型简单、易于实现且可以同时以较高精度辨识出互感和负载,且无需增加额外硬件电路及控制,降低了系统复杂程度。

**参考文献:**

- [1] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547-1568.
- [2] LI S Q, MI C C. Wireless power transfer for electric vehicle applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 4-17.
- [3] 吴丽君, 李冠西, 张朱浩伯, 等. 一种具有恒流恒压输出自切换特性的电动汽车无线电能传输系统拓扑[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3781-3790.
- [4] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等. 基于磁耦合谐振的自主无线充电机器人系统设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 38-43.
- [5] WU H H, GILCHRIST A, SEALY K, et al. Design of symmetric voltage cancellation control for LCL converters in inductive power transfer systems[C]//2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2011: 866-871.
- [6] 钟庆, 童晋方, 马新华, 等. 电压源型换流器 LCL 滤波器确定性设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3068-3074.
- [7] 苏玉刚, 陈龙, 吴学颖, 等. 基于遗传算法的 SS 型磁耦合 WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4199-4206.
- [8] XIA C Y, ZHU W T, MA N, et al. A load identification method for ICPT system utilizing harmonics[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 13(6): 2178-2186.
- [9] 向永忠. 感应耦合电能传输系统的参数辨识与控制仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [10] ZHOU F, HUANG D X, WANG F X. A particle swarm optimization parameter identification algorithm based on model predictive control of wireless power transfer system[C]//2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing, China: IEEE, 2019: 391-396.
- [11] LI W H, WEI G, CUI C, et al. A double-side self-tuning LCC/S system using a variable switched capacitor based on parameter recognition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3069-3078.
- [12] GUO Y J, ZHANG Y W, ZHANG W J, et al. Battery parameter identification based on wireless power transfer system with rectifier load[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6893-6904.
- [13] 牛昊伟. 电动汽车动态无线电能传输系统补偿与控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [14] 马姝亭. 基于 LCC-S 型磁耦合谐振式 DWPT 系统控制策略研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.

(责任编辑:方素华)