

# 动态载荷下 WPT 系统的特性分析与实验研究

王宁 张恒军 杨庆新 王巍

(天津工业大学 天津市电工电能新技术重点实验室 天津 300387)

**摘要:** 针对无线电能传输系统中普遍存在的载荷动态变化的问题,提出了一种 LCC-S 补偿网络结构。建立了系统的互感模型,推导了发射端、接收端的动态性能特性,分析了动态载荷工况下,系统的发射端电流、相位角、谐振频率、输出功率的效率的变化趋势。最后,搭建实验平台,采用可变电阻负载和电机负载,测试了电阻的不同阻值和电机的不同转速时的系统特性,验证了理论分析的正确性。在传输距离为 5 cm 且负载电阻为  $10\ \Omega \sim 50\ \Omega$  时,实现 2.3 A 的发射端恒流输出。当负载电阻为  $30\ \Omega$  时,系统效率和传输功率分别为 83.4% 和 16.8 W。

**关键词:** 无线电能传输; 动态载荷; 恒流输出; 补偿网络

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-4390.2021.07.014

中图分类号: TM724

文献标识码: B

文章编号: 1001-4390(2021)07-0104-07

## Characteristic analysis and experimental study of WPT system with dynamic load

Wang Ning, Zhang Hengjun, Yang Qingxin, Wang Wei

(Key Laboratory of New Electrical and Energy Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** An LCC-S compensation network is proposed to solve the problem of dynamic load variation in wireless power transfer system. The mutual inductance model of the system is established. The dynamic performance characteristics of transmitter and receiver are derived. The variation trend of the transmitting terminal current, phase angle, resonance frequency and output power efficiency of the system under the dynamic load condition is analyzed. Finally, an experimental platform was built, and variable resistance load and motor load were used to test the system characteristics of different resistance values and motor speeds. The results verify the correctness of theoretical analysis. The transmitter constant current is 2.3 A when the transmission distance is 5 cm and the load resistance changes from  $10\ \Omega$  to  $50\ \Omega$ . When load resistance is  $30\ \Omega$ , the system efficiency and transmission power are 83.4% and 16.8 W respectively.

**Keywords:** wireless power transfer, dynamic load, constant current output, compensation network

### 0 引言

无线电能传输技术具有灵活、安全、稳定、不受天气影响等固有优点<sup>[1]</sup>。无线电能传输技术的典型应用,包括电动汽车<sup>[2]</sup>、生物医学植入设备<sup>[3]</sup>、便携式电子设备。近年来,WPT得到了国内外学者的广泛研究,如补偿拓扑和电路分析<sup>[4]</sup>、耦合线圈的材料设计<sup>[5]</sup>、高效率的优化<sup>[6]</sup>、控制方法<sup>[7]</sup>、异物检测<sup>[8]</sup>和安全问题<sup>[9]</sup>。

实际应用中,受电体接收到的电能通常储存到锂电池组或超级电容中,无线充电结束后,储能装置为受电体提供动力源。在无线充电过程中,受电体的等效

负载电阻是动态变化的,影响系统传输功率和效率<sup>[10]</sup>。文献[11]设计了一种基于平板磁心结构的变负载、恒流输出的无线电能传输系统,采用PI控制算法实现变负载的恒流充电。文献[12]提出一种混合型补偿拓扑结构,解决负载动态变化时,输出电流和电压的不稳定问题,用于电动汽车恒流恒压无线充电。文献[13]提出了一种移动式感应耦合供电系统,为直线感应电机驱动系统供电,将负载等效为一个可变电阻,并进行供电特性分析的方法。文献[14]提出一种新型自适应滑模控制算法,在未知负载参数和参数可变的情况下,实现了功率的自适应调整。

因此,WPT系统的载荷通常是动态的,大致分为:同种特性的载荷大小的变化,不同特性的载荷之间的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707134);天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)

切换,同时带载不同特性的负载<sup>[15]</sup>。目前,针对非阻性载荷的研究文献并不多见,本文基于 LCC-S<sup>[16-18]</sup> 拓扑结构,建立了系统的电路模型,分析了 WPT 系统的动态载荷性能。理论推导和实验证实了,在没有外界控制情况下,发射线圈中的电流不受载荷变化的影响,始终保持恒定。

### 1 WPT 系统结构及原理分析

#### 1.1 系统的整体结构

典型的无线电能传输系统<sup>[19-25]</sup> 的整体结构如图 1 所示。系统采用 220 V 交流电输入,发射端部分主要包括整流滤波电路和高频的全桥逆变电路;耦合机构包括发射线圈和接收线圈,二者直接没有电气连接,通过磁感应或磁耦合方式传输电能。接收端部分包括整流滤波电路和 DC-DC 变换器,负载具有动态变化的特性。

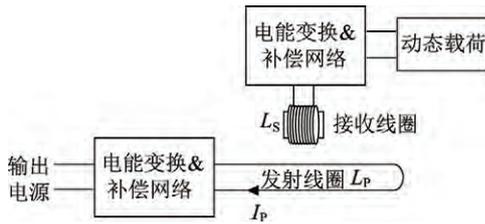


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system structure

#### 1.2 系统的电路模型

目前,无线电能传输系统的电路模型主要有:基于松耦合变压器的漏感模型、有损变压器模型和互感模型。互感模型最大的优点是不需要进行复杂的电路分析。通过互感参数,观察收发侧线圈的相互耦合效果,反映初级和次级绕组之间的程度。适用于动态负载下的无线电能传输系统建模,互感模型如图 2 所示。

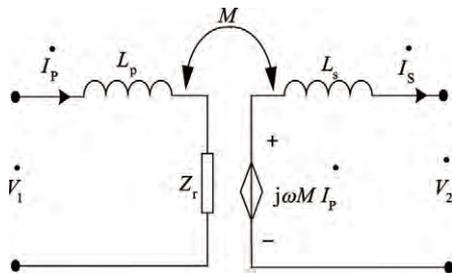


图 2 互感模型等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of mutual inductance model

根据互感耦合原理关系有:

$$\dot{U}_s = j\omega M \dot{I}_p, \dot{U}_p = -j\omega M \dot{I}_s \quad (1)$$

式中  $\dot{U}_p$ ;  $\dot{U}_s$  分别为收发侧的感应电压大小;  $\dot{I}_p$ ;  $\dot{I}_s$  分别为收发侧的电流;  $L_p$ 、 $L_s$  分别为收发侧线圈的电感大小;  $\omega$  为系统的工作角频率;  $M$  为收发侧线圈的互感系数。

反射阻抗  $Z_r$  的计算公式见式(2)<sup>[13]</sup>,  $Z_s$  为接收端的总阻抗。

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

#### 1.3 系统的补偿拓扑结构

为了提高系统的传输效率,减少无功功率,收发侧均需要增加补偿元件以使双侧形成谐振补偿电路。多元件补偿拓扑结构效果通常比单一元件补偿效果好,在实际应用中经常运用多元件补偿拓扑结构。LCC 谐振补偿拓扑具有串联谐振拓扑和并联谐振拓扑两者的优点,变压器的寄生参数被谐振元件吸收,LCC 系统的开关频率得到明显的提高。并且当 LCC 系统在谐振状态下时,其发射线圈恒流,系统输出恒压。本文发射端采用 LCC 结构,接收端采用 S 结构,如图 3 所示,  $L_1$ 、 $C_1$  和  $C_2$  构成发射端 LCC 补偿结构,  $L_p$  为发射端的发射电感,  $L_s$ 、 $C_s$  构成接收端的 S 型补偿拓扑。

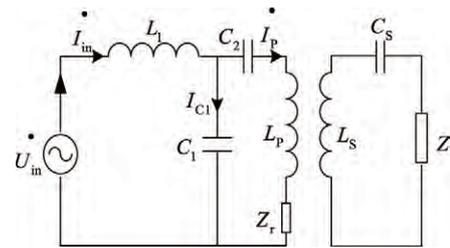


图 3 LCC-S 补偿拓扑模型

Fig. 3 LCC-S compensation topology model

### 2 动态载荷下 WPT 系统的性能分析

#### 2.1 动态性能参数

##### 2.1.1 接收端动态性能分析

由感应耦合原理可知,接收端反射到发射端的反射阻抗  $Z_r$  会影响发射端的电路特性。另外,系统的传输功率也受到反射阻抗的影响,反射阻抗中阻性部分的功率视为系统传输的有功功率,抗性部分的功率为系统传输的无功功率<sup>[15]</sup>。

接收端 S 型补偿网络结构如图 3 所示,  $L_s$  是次级线圈的电感,  $Z$  是系统的等效负载,  $C_s$  是二次侧的补偿电容,可得接收端系统的等效阻抗为:

$$Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + Z \quad (3)$$

根据互感原理,接收端系统在发射端中的反射阻抗为:

$$Z_r = \omega^2 M^2 \times \frac{j\omega C_s(1 - \omega^2 L_s C_s) + \omega^2 C_s^2 Z}{(1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + \omega^2 C_s^2 Z^2} \quad (4)$$

为了提高接收端的输出功率和传输效率,需使接收端工作频率处于谐振频率,接收端串联谐振频率与二次侧线圈电感和串联补偿电容应满足:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (5)$$

接收端谐振时,代入式(4),反射阻抗简化为:

$$Z_{r0} = \frac{\omega^2 M^2}{Z} \quad (6)$$

假设等效负载为:

$$Z = R + jX \quad (7)$$

将式(7)~代入式(6),计算可得:

$$Z_{r0} = \frac{\omega^2 M^2 R - j\omega^2 M^2 X}{R^2 + X^2} \quad (8)$$

由式(8)可知,当满足  $X > 0$  时,接收端反射阻抗  $Z_{r0}$  显容性;当满足  $X = 0$  时,接收端反射阻抗  $Z_{r0}$  为纯阻;当满足  $X < 0$  时,接收端反射阻抗  $Z_{r0}$  显感性。

### 2.1.2 发射端动态性能分析

发射端的等效电路如图 3 所示,反射阻抗对发射端的作用主要是表现为阻性和抗性之和,即:反射阻抗拆分为  $Z_r = \text{Re}(Z_r) + j\text{Im}(Z_r)$ 。当电感  $L_p$  用来补偿一部分电容  $C_2$ ,定义通过电感  $L_p$  补偿后的电容  $C_2$  与反射阻抗的电抗部分组成新的补偿电容  $C$ ,则:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_2} - \omega^2 L_p - \omega \text{Im}(Z_r) \quad (9)$$

可将发射端电路简化为 LCC 电路,如图 4 所示。

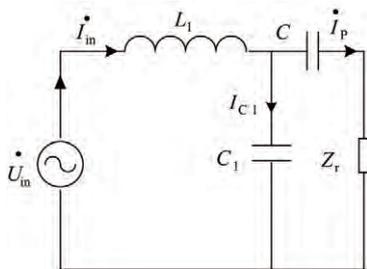


图 4 发射端 LCC 型补偿拓扑结构简化图  
Fig. 4 Simplified topology diagram of LCC compensation at transmitter

为了使整个系统的传输功率最大,要求系统必须工作在谐振情况下,由图可知发射端补偿网络的阻抗表达式为:  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$  对发射端电路进行计算,可得:

$$R_{in} = \frac{\omega^2 C^2 R}{(\omega C_1 + \omega C)^2 + (\omega^2 C_1 C R)^2} \quad (10)$$

$$X_{in} = \omega L_1 + \frac{-\omega C_1 - \omega C - \omega^3 C_1 C^2 R^2}{(\omega C_1 + \omega C)^2 + (\omega^2 C_1 C R)^2} \quad (11)$$

发射端逆变输出电流  $\dot{I}_{in}$  和发射线圈中电流  $\dot{I}_p$  分别为:

$$\dot{I}_{in} = \frac{(j\omega C_1 + j\omega C - \omega^2 C_1 C R)\dot{U}_{in}}{j\omega C R(1 - \omega^2 L_1 C_1) + 1 - \omega^2 L_1 C_1 - \omega^2 L_1 C} \quad (12)$$

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_{in} \cdot j\omega C}{j\omega C R(1 - \omega^2 L_1 C_1) + 1 - \omega^2 L_1 C_1 - \omega^2 L_1 C} \quad (13)$$

### 2.2 动态载荷下性能分析

输出功率和效率是无线电能传输系统的关键指标。同时,载荷的动态变化将导致反射阻抗的变化,进一步改变发射端的电路特性,本节详细分析发射线圈的电流、发射端的相位角、系统的谐振频率。

#### 2.2.1 发射线圈的电流分析

由互感公式  $\dot{U}_s = j\omega M \dot{I}_p$  可知,接收端的感应电压与系统的工作频率、互感和发射线圈的电流有关。在实际应用中,互感和工作频率通常是固定的,此时感应电压只取决于发射线圈的电流的大小。发射线圈的电流为恒定,则接收端的感应电压保持稳定,有利于接收端补偿网络参数、电能变换电路参数的选择。

LCC 谐振补偿拓扑发射线圈的电流如式(12)所示,如果发射端发射电流  $\dot{I}_p$  保持恒定,则要满足  $1 - \omega^2 L_1 C_1 = 0$ ,即  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ ,此时发射端发射电流  $\dot{I}_p$

可简化为:

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega L_1} \quad (14)$$

当系统处于谐振状态时, $\omega$  保持定值,由式(14)可得发射线圈的电流与载荷无关,即 LCC 补偿拓扑结构具有恒流输出的特性。

#### 2.2.2 发射端的相位角分析

相位角  $\theta$  是电路中电压和电流的相位差。当相位角不等于 0 时,电路中存在无功功率,增大了系统的视在功率。通常,需要保证相位角等于 0。对于 LCC-S 补偿结构的无线电能传输系统,其发射端的相位角是发射端等

效阻抗的抗性部分与阻性部分的比值 即:

$$\tan\theta = \frac{X_{in}}{R_{in}} = [\omega C_1(\omega^2 L_1 C_1 - 1) + \omega C(\omega^2 L_1 C - 1) + \omega^3 C_1 C^2 R^2(\omega^2 L_1 C_1 - 1) + 2\omega^3 C_1 C L_1] / \omega^2 C^2 R \quad (15)$$

在保持  $i_p$  恒定的前提下,改变反射纯阻部分的阻值,变化范围是  $0\Omega \sim 5\Omega$ 。依据式(15)可得出系统相位角与等效电容  $C$  的关系如图 5 所示,其中  $L_1 = 85.5\mu\text{H}$ ,  $C_1 = 0.747\mu\text{F}$ ,  $L_p = 2\mu\text{H}$ ,  $C_2 = 0.643\mu\text{F}$ 。

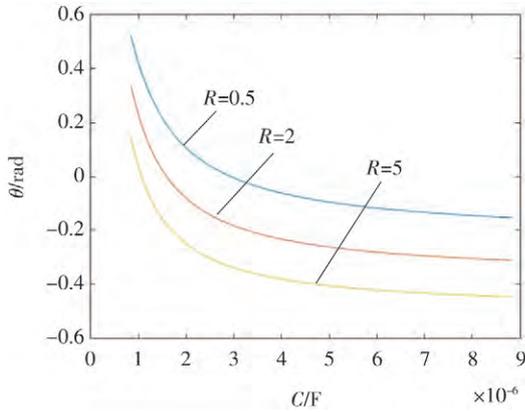


图 5 不同等效纯阻下  $C$  对相位角的影响

Fig. 5 Effect of  $C$  on phase angle under different equivalent pure resistances

由图 5 可看出,在 LCC 补偿拓扑结构下,载荷的不同阻值下,系统谐振状态时所需要的补偿电容的值不同,即 LCC 补偿拓扑结构下,载荷会对系统的谐振频率具有一定的影响。进一步,可以得出不同等效纯阻下,等效电容  $C$  对系统功率因数的影响曲线图,如图 6 所示。

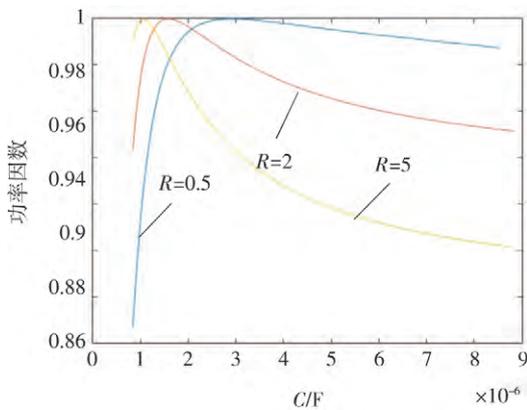


图 6 不同等效纯阻下  $C$  对功率因数的影响

Fig. 6 Effect of  $C$  on power factor of system under different equivalent pure resistances

### 2.2.3 系统谐振频率分析

当阻抗角为 0 时,认为系统处于谐振状态,即,当阻抗角为 0 时的频率为谐振频率。当简化结构等效于 LCC 补偿拓扑模型时,由式(15)可得:

$$[\omega C_1(\omega^2 L_1 C_1 - 1) + \omega C(\omega^2 L_1 C - 1) + \omega^3 C_1 C^2 R^2(\omega^2 L_1 C_1 - 1) + 2\omega^3 C_1 C L_1] / \omega^2 C^2 R = 0 \quad (16)$$

求解式(16)可得:

$$A = \frac{-L_1 + \sqrt{L_1(-L_1 C_1^2 R^2 + C_1 C^2 R^4 + C_1 R^2 - L_1 C^2 R^2 + L_1)}}{L_1 C_1 C R^2} \quad (17)$$

式中  $\omega = \sqrt{A}$ ,采用 Matlab 软件,绘制系统的频率与等效电容  $C$  和等效纯阻  $R$  的三维图像,如图 7 所示。

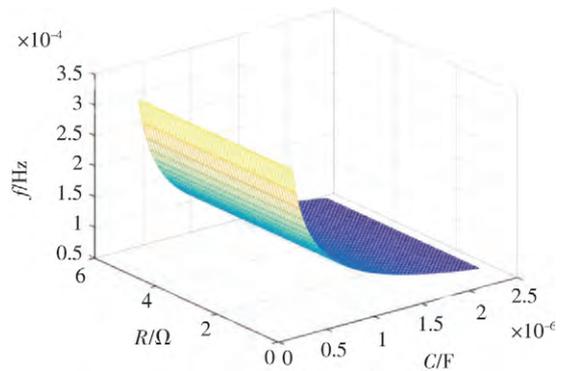


图 7 系统谐振频率与  $R$  和  $C$  的关系图

Fig. 7 Relation diagram of the system resonance frequency and  $R$  and  $C$

由图 7 可知,当等效电容  $C$  的值与补偿电容  $C_1$  相等时,系统的频率为谐振频率 20 kHz。当  $R$  的范围从  $0\Omega \sim 5\Omega$  变化时,系统的频率也随着变化,这与上文的系统相位角分析所得的结果相同,验证了上文的分析。

### 2.2.4 系统输出功率与传输效率分析

根据式(13),接收端的感应电压为:

$$\dot{U}_{oc} = \frac{-\omega^2 C M \dot{U}_m}{j\omega C R(1 - \omega^2 L_1 C_1) + 1 - \omega^2 L_1 C_1 - \omega^2 L_1 C} \quad (18)$$

负载  $Z$  中的电流为:

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{U}_{oc}}{Z_s} \quad (19)$$

所以,可计算出负载  $Z$  的功率为:

$$P_{OUT} = I_s^2 \text{Re}(Z) \quad (20)$$

系统的初级线圈和次级线圈具备相同的谐振频率,即  $f_1 = f_2 = 20\text{kHz}$ ,系统的主要参数:  $U_{in} = 24\text{V}$ ,

$L_1 = 85.5 \mu\text{H}$ ,  $C_1 = 0.747 \mu\text{F}$ ,  $L_p = 2 \mu\text{H}$ ,  $L_s = 85.5 \mu\text{H}$ ,  $C_s = 0.747 \mu\text{F}$ , 根据式 (1)、式 (18) ~ 式 (20) 可得出系统的输出功率与系统的频率和负载大小的关系如图 8 所示。

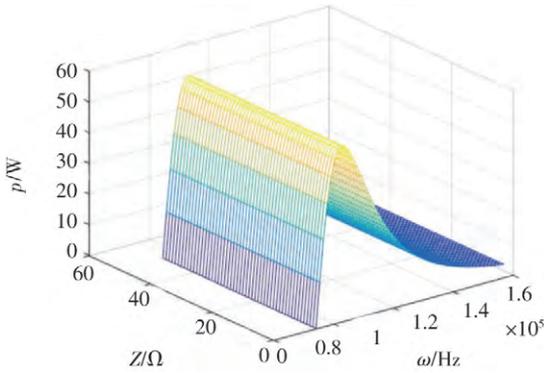


图 8 系统输出功率与负载大小和系统工作频率的关系图

Fig. 8 Relation diagram of output power with load size and system working frequency

从图 8 看出: 当系统处于谐振频率时, 负载的输出功率达到最大值; 当系统的频率一定, 当负载增大, 负载的输出功率减小。

系统的传输效率公式为:

$$\eta = \frac{P_{\text{OUT}}}{U_{\text{in}} I_{\text{in}} \cos\theta} \quad (21)$$

根据上文数据和式 (12)、式 (20) 和式 (21) 可得出系统的传输效率与系统的频率和负载大小的关系, 如图 9 所示。

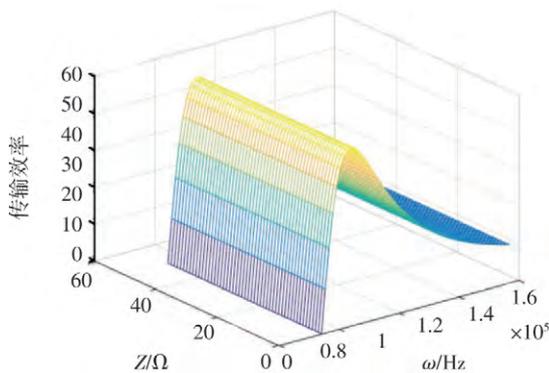


图 9 系统传输效率与负载大小和系统工作频率的关系图

Fig. 9 Relation diagram of system transmission power with load size and system working frequency

### 3 实验过程与结果分析

实验平台如图 10 所示。主要包括发射端部分(开

关电源和高压逆变)、耦合线圈、整流模块和可变电阻, 系统的供电电源为  $24 \text{ V}_{\text{DC}}$ , 高频逆变模块的工作频率为  $20 \text{ kHz}$ 。

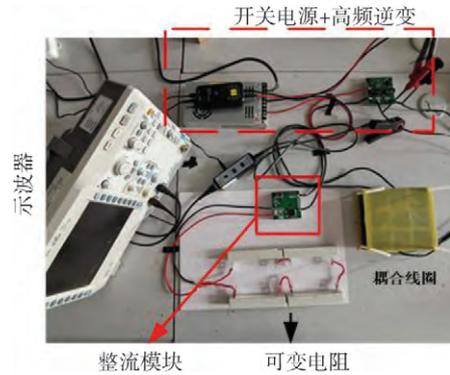
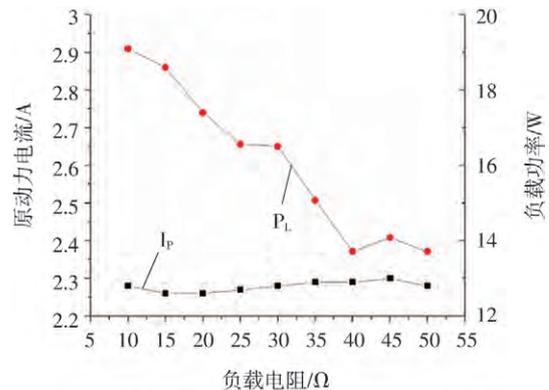


图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

#### 3.1 可变电阻负载

调节可变电阻的阻值, 利用示波器测量在不同阻值下发射端输出的电流波形, 并用功率计测量接收端的输出功率。图 11 为不同阻值下发射端输出电流的大小与接收端输出功率的对应曲线关系以及发射端电流输出波形。



(a) 不同阻值下发射端电流与接收端输出功率曲线



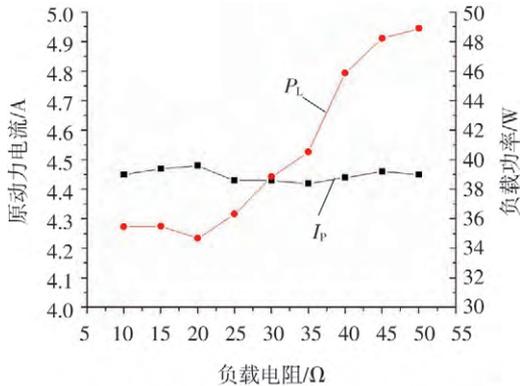
(b) 等效负载为可变电阻时发射端输出电流波形

图 11 不同阻值下发射端电流与接收端功率曲线及电流波形

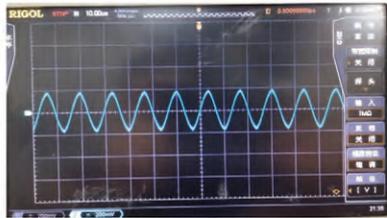
Fig. 11 Power curve and current waveform of transmitter and receiver under different resistance values

### 3.2 电机负载

如图 10 所示,发射端部分保持不变,实验系统的负载由可变负载变为三相同步电机。通过调节电机的不同转速模拟受电体的运动速度,观察转速对发射线圈中电流的影响。将电机的转速调节为三种档位:低速、中速、高速,用示波器分别测量在不同档位下发射端输出的电流波形,并用功率计测量接收端的输出功率。图 12 为不同转速下发射端输出电流的大小与接收端输出功率的对应曲线关系以及发射端电流输出波形。



(a) 不同阻值下发射端电流与接收端输出功率曲线



(b) 等效负载为可变电阻时发射端输出电流波形

图 12 不同转速下发射端电流与负载功率曲线及电流输出波形

Fig. 12 Power curve and current output waveform of transmitter current and load at different speeds

通过观察发射端输出电流的波形和对比图 11 和图 12 的对应曲线,可知当系统工作在谐振频率 20 kHz 时,发射端输出电流波形为稳定的正弦波,输出电流无大波动,可以认为是恒流源。接收端无论是电机还是电阻,改变转速或阻值大小,对发射端输出电流都没有影响,证实了发射端系统的恒流输出特性。

### 4 结束语

本文设计了基于 LCC-S 补偿结构的无线电能传输系统。该系统在载荷动态变化的情况下,发射端电流输出恒定。通过互感模型,推导了发射端、接收端的动态性能特性,进一步分析了动态载荷下,系统的发射端

电流、相位角、谐振频率、输出功率的效率。最后,搭建实验平台,采用可变电阻负载和电机负载,测试了电阻的不同阻值和电机的不同转速时的系统特性,验证了理论分析的正确性。

### 参考文献

- [1] 仲崇德,朱武,张乐. 谐振耦合式无线电能传输系统谐振线圈的优化设计[J]. 电测与仪表,2017,54(21): 116-121.  
Zhong Chongde, Zhu Wu, Zhang Le. Optimal design of the resonant coil of resonant coupling wireless power transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(21): 116-121.
- [2] 袁瑞铭,姜振宇,易忠林,等. 电动汽车无线充电电能计量关键技术研究与探讨[J]. 电测与仪表,2018,55(15A): 11-16.  
Yuan Ruiming, Jiang Zhenyu, Yi Zhonglin, et al. Research on electric energy metering key technology of electric vehicle wireless charging[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(15A): 11-16.
- [3] M R Basar, M Y Ahmad, J Cho, et al. Stable and high efficiency wireless power transfer system for robotic capsule using a modified Helmholtz coil[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1113-1122.
- [4] Q Zhu, L Wang, Y Guo, et al. Applying LCC compensation network to dynamic wireless EV charging system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2016, 63(10): 6557-6567.
- [5] 邓其军,范惠子,罗焱. 接收端的电磁超材料对无线电能传输系统的影响[J]. 电测与仪表,2019,56(7): 1-6.  
Deng Qijun, Fan Huizi, Luo Yao. Effect of electromagnetic metamaterials to receive coil on wireless power transfer system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 1-6.
- [6] L Tan, J Guo, X Huang, et al. Coordinated Source Control for Output Power Stabilization and Efficiency Optimization in WPT Systems[J]. IEEE transactions on power electronics, 2018, 33(4): 3613-3621.
- [7] Y Li, H Du, M Yang, et al. Two-degree-of-freedom  $H_{\infty}$  robust control optimization for IPT system with parameter perturbations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10954-10969.
- [8] 马中原,廖承林,王丽芳. 金属异物对电动汽车无线充电系统影响分析[J]. 电工电能新技术,2017,36(2): 14-20.  
Ma Zhongyuan, Liao Chenglin, Wang Lifang. Analysis of metal foreign object setting on electric vehicle wireless power transfer system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(2): 14-20.
- [9] 高妍,张献,杨庆新,等. 电动汽车无线充电环境的生物电磁安全评估[J]. 电工技术学报,2019,34(17): 3581-3589.  
Gao Yan, Zhang Xian, Yang Qingxin, et al. Bio-Electromagnetic Safety Assessment of Wireless Charging Environment for Electric Vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3581-3589.
- [10] H Li, J Li, K Wang, et al. A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems using magnetic resonant coupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3998-4008.
- [11] 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.

- Song Kai, Li Zhenjie, Du Zhijiang, et al. Constant Current Charging Technology for Variable Load Wireless Charging System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 130-136.
- [12] 张辉, 王换民, 李宁, 等. 电动汽车无线充电混合补偿拓扑电路分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 71-75.  
Zhang Hui, Wang Huanmin, Li Ning, et al. Analysis on Hybrid Compensation Topology Circuit for Wireless Charging of Electric Vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 71-75.
- [13] 蔡华, 史黎明, 张发聪, 等. 基于直线感应电机负载的移动式无接触供电特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 505-511.  
Cai Hua, Shi Liming, Zhang Facong, Characteristics Analysis of Movable Inductively Coupled Power Transfer with Linear Induction Motor Drive [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 505-511.
- [14] F Pijl, M Castilla, Pavol Bauer, et al. Adaptive sliding-mode control for a multiple-user inductive power transfer system without need for communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6557-6567.
- [15] 吴亮亮, 钱晓明. 无接触供电系统发射端恒流技术的研究[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(4): 128-133.  
Wu Liangliang, Qian Xiaoming. Research on Current Stability Technology of ICPT System [J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(4): 128-133.
- [16] 连海生, 夏能弘, 田孟林. 双拾取结构 WPT 系统稳定性分析[J]. 电力科学与技术学, 2019, 34(1): 54-58.  
Lian Haisheng, Xia Nenghong, Tian Menglin. Stability analysis of WPT system with dual-picking structure [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 54-58.
- [17] 杨世亮, 汪宁, 柳俊岗, 等. 磁耦合谐振串串式补偿结构分析[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(10): 11-13, 30.  
Yang Shiliang, Wang Ning, Liu Jungang, et al. Analysis of Series Compensation Structure of Magnetic Coupling Resonance [J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(10): 11-13, 30.
- [18] 周念成, 梁清泉, 王强钢, 等. 基于 SS 型磁耦合谐振无线电能传输频带序列划分[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 1-12.  
Zhou Niancheng, Liang Qingquan, Wang Qianggang, et al. Frequency band sequence allocation of magnetically coupled resonant wireless power transmission systems based on SS type [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 1-12.
- [19] 陈忠华, 卢韦, 时光, 等. 无线电能传输系统的线圈参数及耦合系数研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 205-210.  
Chen Zhonghua, Lu Wei, Shi Guang, et al. Study on Coil Parameters and Coupling Coefficient of Wireless Power Transfer System [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 205-210.
- [20] 胡娟, 赵波, 孙谊. 中距离传输共振磁耦合无线取能装置设计与实验[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 22-27.  
Hu Juan, Zhao Bo, Sun Yi. Design and Experiment of Magnetic Resonance Coupling Wireless Power Supply System with Mid-Range Transmission Distance [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2019, 35(1): 22-27.
- [21] 王惠中, 赵辉, 庄亚杰. 磁耦合谐振式无线电能传输中磁屏蔽特性分析[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(10): 37-40.  
Wang Huizhong, Zhao Hui, Zhuang Yajie. Analysis of Magnetic Shielding Characteristics in Magnetically Coupled Resonant Radio Power Transmission [J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(10): 37-40.
- [22] 杨世亮, 汪宁, 柳俊岗, 等. 磁耦合谐振串串式补偿结构分析[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(10): 11-13, 30.  
Yang Shiliang, Wang Ning, Liu Jungang, et al. Analysis of Series Compensation Structure of Magnetic Coupling Resonance [J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(10): 11-13, 30.
- [23] 刘国波, 胡凡君, 曲皓玥, 等. 无线电能传输系统耦合线圈优化设计[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 66-72.  
Liu Guobo, Hu Fanjun, Qu Haoyue, et al. Bingquan Optimization Design of Magnetic Coupling Coil for Wireless Power Transmission System [J]. Smart Power, 2019, 47(12): 66-72.
- [24] 谭泽富, 张伟, 王瑞, 等. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 42-47, 111.  
Tan Zefu, Zhang We, Iwang Rui, et al. Review on Wireless Charging Technology for Electric Vehicles [J]. Smart Power, 2020, 48(4): 42-47, 111.
- [25] 连海生, 夏能弘, 田孟林. 双拾取结构 WPT 系统稳定性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 54-58.  
Lian Haisheng, Xia Nenghong, Tian Menglin. Stability analysis of WPT system with dual-picking structure [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 54-58.

作者简介:



王宁(1985—)男, 硕士, 从事机电磁一体化理论及应用研究。Email: wangning620@163.com

张恒军(1996—)男, 硕士研究生, 从事无线电能传输研究。

杨庆新(1961—)男, 教授, 博士, 从事无线电能传输和工程电磁场计算研究。

王巍(1970—)男, 教授, 博士, 从事汽车电子技术应用研究。

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2020-10-25

(杜景飞 编发)