

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.007

引用格式: 王激华, 吴刚, 乐璟黎, 等. 基于 LCC-S 的大功率高效 WPT 系统技术研究 [J]. 重庆大学学报, 2025, 48(12): 73-81.



# 基于 LCC-S 的大功率高效 WPT 系统技术研究

王激华<sup>1</sup>, 吴刚<sup>1</sup>, 乐璟黎<sup>1</sup>, 袁文杰<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司 宁波供电公司 浙江 宁波 315001; 2. 重庆大学 自动化学院 重庆 400044)

**摘要:** 无线电能传输技术为船舶近岸传能问题提供了有效途径, 研究提出了大功率高效无线电能传输设计方法, 对 LCC-S(inductor-capacitor-capacitor series) 拓扑的无线电能传输系统进行了损耗分析, 在外部输出参数确定情况下, 进一步分析系统效率与原边电感的关系, 选择最优效率点的各项参数, 设计了磁集成模式的耦合机构, 对系统进行了电路仿真。搭建了实验平台, 实验结果验证了所提方法的有效性, 系统输出功率达到 93 kW, 效率达到 96%。

**关键词:** 无线电能传输; 大功率; 最优效率点; 磁集成; LCC-S

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)12-073-09

## Research on high-power and high-efficiency wireless power transfer system based on LCC-S topology

WANG Jihua<sup>1</sup>, WU Gang<sup>1</sup>, LE Jingli<sup>1</sup>, YUAN Wenjie<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Ningbo Power Supply Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315001, P. R. China; 2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Wireless power transfer (WPT) technology provides an effective solution for near-shore energy transmission in ships. This paper proposes a design method for a high-power, high-efficiency WPT system based on the LCC-S compensation topology. The loss characteristics of the WPT system are analyzed, followed by a detailed examination of the relationship between system efficiency and primary inductance. Optimal efficiency point parameters are determined, and a magnetic integrated coupling mechanism is designed to enhance transmission performance. Circuit simulations are conducted to validate the theoretical analysis. Furthermore, an experimental platform is established, and the experimental results confirm the effectiveness of the proposed method. The system achieves an output power of 93 kW and an overall efficiency of 96%, demonstrating the feasibility and superior performance of the proposed design approach.

**Keywords:** wireless power transfer (WPT); high-power; optimal efficiency point; magnetic integration; LCC-S topology

收稿日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(52007012).

Supported by National Natural Science Foundation of China (52007012).

作者简介: 王激华(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事电网技术、综合能源技术、无线电能传输技术等方向研究, (E-mail) 15830557817@139.com。

通信作者: 袁文杰, 男, 博士生, (E-mail) yuanwenjie@cqu.edu.cn。

中国是船舶的制造大国,也是船舶的使用大国,船舶行业在国民经济中占据显赫地位。电池动力新能源船舶采用电池为动力,零排放、无污染,可以彻底解决船舶的燃油问题。然而,传统的船舶低压充电装置都是用有线连接的方式来连接充电系统和船舶的,这种连接存在一些问题:1)采用接插式连接方式充电,人工操作繁琐,无法实现即停即充,即断即走;2)目前有线连接的方式容易造成线缆磨损,长期使用会导致接触不良或漏电风险,威胁船上人员安全;3)线缆连接方式存在零电位不同的风险,会导致船体和水发生电解作用,损坏船体;4)船舶的靠港充电设备普遍存在兼容性问题,存在繁琐的等电势连接、绝缘保护等一系列问题。

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术为船舶近岸传能提供了有效途径<sup>[1-3]</sup>。该技术借助于高频率磁场实现电能非接触传递,具有较高的安全性和可靠性,同时还具有更好的灵活性、易用性和免维护性。近年来,对于大功率无线传能系统,国内外学者提出了多种方案。2017年,芬兰瓦锡兰公司<sup>[4]</sup>完成了首个船舶无线充电系统示范,实现了船舶无线充电技术的重大突破。重庆大学谢诗云<sup>[5]</sup>提出了基于无线电能传输技术的无线充电解决方案,系统功率可达10 kW,传输距离有35 cm,系统效率在85%。哈尔滨工业大学李东<sup>[6]</sup>提出了一种高功率密度WPT装置的设计方法,在30 mm传输距离下,系统效率可达75%以上,实现恒压输出功能。清华大学林云志<sup>[7]</sup>基于LCL-S(inductor-capacitor-capacitor series)型谐振,设计了一套大功率的无线电能传输装置实验平台,该实验平台的负载输出功率可达30 kW,整机效率超过了80%。重庆大学史可<sup>[8-9]</sup>通过磁集成方式,提高了整机功率密度,利用等效互感来抑制功率波动,整机效率达到了91%。韩国首尔汉阳大学Jeong<sup>[10]</sup>提出了一种考虑电池寿命的无线充电系统,传输距离有20 cm,系统效率最高为80%。新西兰奥克兰大学Chen<sup>[11]</sup>提出一种适用于道路电动汽车动态感应充电的新型集散控制系统,输出功率为5 kW时效率达到92.5%。

笔者提出了基于LCC-S的高效大功率WPT系统,分析了LCC-S拓扑无线传能原理和系统损耗,设计了大功率无线传能线圈,采用磁集成方案。实验结果表明,系统输出功率达到93 kW,效率达到96%。综上,无线电能传输技术在船舶、电动汽车等领域应用前景广阔,研究人员从系统拓扑、耦合机构设计和控制策略等不同角度开展了多样探索,为该技术的落地应用提供了扎实支撑<sup>[12-15]</sup>。

## 1 系统原理分析

### 1.1 基于LCC-S的高效大功率WPT系统

基于LCC-S的高效大功率WPT系统主要运用磁耦合无线电能传输技术,基于电磁感应耦合原理,综合利用现代电力电子电能变换技术、磁场耦合技术及大功率高频电能变换技术(包括谐振变换技术和电磁兼容技术等),借助现代控制理论和策略,实现用电设备以非接触方式从电网获取电能的一种新型的电能传输模式,系统总体方案设计如图1所示。

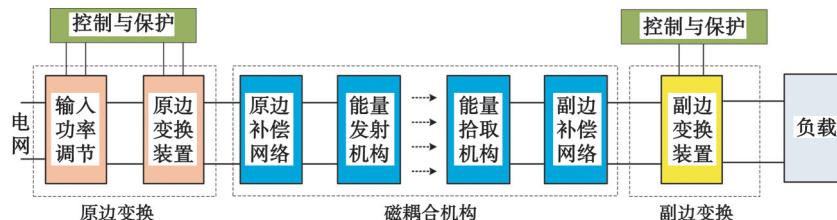


图1 系统结构框图

Fig. 1 System structure diagram

原级电能变换装置的主要功能是将电网输入交流电通过整流滤波、功率因数校正、直流调压、高频逆变器等一系列的电能变换环节,转换成特定频率和大小的高频交流电流。其最终目的是产生合适的高频交流电流,具体产生方式和所需要的电能变换环节根据实际系统需求不同而不同。

磁耦合机构由4个部分组成:原边补偿网络、能量发射机构、副边补偿网络和能量拾取机构。能量发射机构的主要功能是将原级电能变换装置产生的高频交流电流转换成高频交变磁场。能量拾取机构的主要功能是利用感应耦合原理将感应到的高频交变磁场转换成高频交流电流,输入至副边电能变换装置中。原边

和副边加入补偿网络的目的是降低系统无功功率, 提高功率输出能力和传输效率, 同时降低高频电流的高次谐波含量, 提高电能传输质量。

副边电能变换装置的主要功能是将能量拾取机构输出的高频交流电流经过整流滤波、直流调压等一系列的电能变换环节转换成电动船舶充电所需要的直流电压和电流, 为电动船舶充电。其最终目的是产生合适的直流电压和电流, 具体产生方式和所需要的电能变换环节根据实际系统需求而不同。

## 1.2 电路拓扑分析

基于 LCC-S 的 WPT 系统电路原理如图 2 所示,  $U_{dc}$  是系统的直流输入, 开关管  $Q_1 \sim Q_4$  组成电压型全桥逆变器。 $L_f$ 、 $C_f$ 、 $C_p$  分别为原边谐振网络补偿参数,  $C_s$  分别为副边谐振网络补偿参数,  $L_p$  和  $L_s$  分别是原边线圈和副边线圈自感。 $I_{L_i}$  为逆变输出电流,  $I_{Load}$  是系统输出电流,  $I_p$  和  $I_s$  分别是原边线圈电流和副边线圈电流,  $R_{eq}$  是等效负载。 $M$  是原边线圈和副边线圈之间的互感。

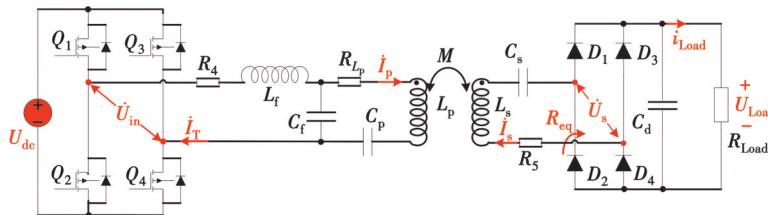


图 2 系统电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of system circuit

其中, 副边阻抗可以表示为

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

原边反射阻抗可以表示为

$$Z_{ref} = \frac{(\omega M)^2}{Z_s} = \frac{(\omega M)^2}{R_s + R_{eq}} \circ \quad (2)$$

忽略电源内阻, 则原边的阻抗可以表示为

$$Z_p = j\omega L_a + \frac{1}{j\omega C_f + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_p + R_p + Z_{ref}}} \circ \quad (3)$$

为了使系统工作在谐振状态下,  $Z_p$ 、 $Z_s$  的虚部应为 0, 则应该满足

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} = \frac{1}{\sqrt{(L_p - L_f) C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}, \quad (4)$$

当系统达到谐振时, 对电路电气参数进行化简, 可以得到 LCC-S 拓扑输出功率为

$$P_{out} = U_{out}^2 / R_{eq} = \left( \frac{M U_{in}}{L_f (R_s + R_{eq})} \right)^2 R_{eq} \circ \quad (5)$$

## 1.3 系统损耗分析

为了提升系统效率, 因此分析系统各部分损耗, 主要包括原边 DC-AC、副边 AC-DC 和线圈损耗等。原边 DC-AC 损耗主要为开关管的开关损耗和导通损耗。开关损耗为开通和关断开关管所需要的能量, 笔者采用定频驱动, 开关损耗可以表示为

$$P_{sw} = f E_{tot}, \quad (6)$$

式中:  $f$  为系统频率;  $E_{tot}$  为 MOSFET 一次开关所需要的所有能量; SW 为开关 switch。

导通损耗包含开关管中开关管和二极管的导通压降损耗和内阻损耗, 可以表示为

$$\begin{cases} P_{vt} = I_{vt} V_{vt} + |I_{vt}|_{RMS}^2 R_{vt}, \\ P_{vd} = I_{vd} V_{vd} + |I_{vd}|_{RMS}^2 R_{vd}, \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $V_{VT}$ 、 $V_{VD}$  分别为开关管与二极管的导通压降;  $R_{VT}$ 、 $R_{VD}$  分别为开关管与二极管的导通电阻。逆变器通态总损耗是单个器件通态损耗的4倍。

副边AC-DC为整流桥,式(7)中  $P_{VD}$  计算方式相同。线圈损耗包含原边线圈损耗、副边线圈损耗和原边电感损耗,单个线圈损耗可以表示为

$$P_{coil} = |I_{coil}|_{RMS}^2 R_{coil}, \quad (8)$$

式中:  $R_{coil}$  为线圈内阻,可由线圈的品质因数和自感表示为

$$R_{coil} = \frac{\omega L}{Q}, \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为系统角频率;  $L$  为线圈自感;  $Q$  为线圈品质因数。

因此,系统效率可以表示为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{sw} + P_{VT} + P_{VD} + P_{coil}}. \quad (10)$$

由式(5)可以看出,当输入电压、负载恒定,输出功率只与互感和原边电感有关,变化趋势如图3所示,系统输出功率与互感呈正相关,与原边电感呈负相关。

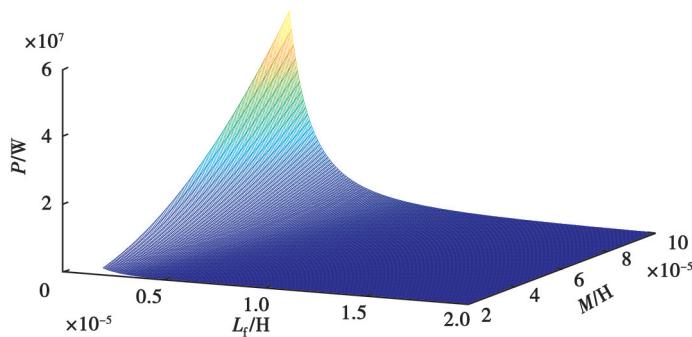


图3 输出功率与原边电感和系统互感的关系

Fig. 3 The relationship between output power and primary side inductance and system mutual inductance

若将输出功率设定为恒值,则系统参数  $M$  也可以用  $L_f$  表示,则系统各参数、状态都可以由  $L_f$  表示。图4表示的是在额定输出功率下,系统效率随系统参数变化情况。

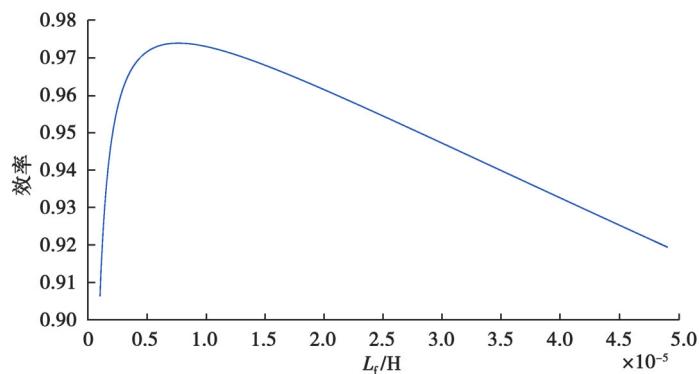


图4 系统效率随  $L_f$  变化图  
Fig. 4 System efficiency as a function of  $L_f$

由图4可以看出,系统存在一个最高效率点,系统损耗最低,研究将在最高效率点附近根据实际限制条件进行耦合机构参数设计。

## 2 耦合机构设计

根据最高效率点,综合考虑线圈弯折半径,线圈尺寸等因素,进一步对耦合机构进行分析研究,确定各个

元器件参数。无线电能传输系统分为原边和副边 2 部分, 其耦合机构也分为原边部分和副边部分。利用有限元仿真软件 COMSOL 建立耦合机构模型, 其整体结构如图 5 所示。其中, 原边部分由铝板、磁芯和线圈构成, 将 LCC-S 的电感集成在功率线圈中央, 绕成“8”字型线圈, 使集成电感与原边、副边的功率线圈相互解耦, 提高整个系统的功率密度。副边部分由铝板、磁芯和线圈构成。

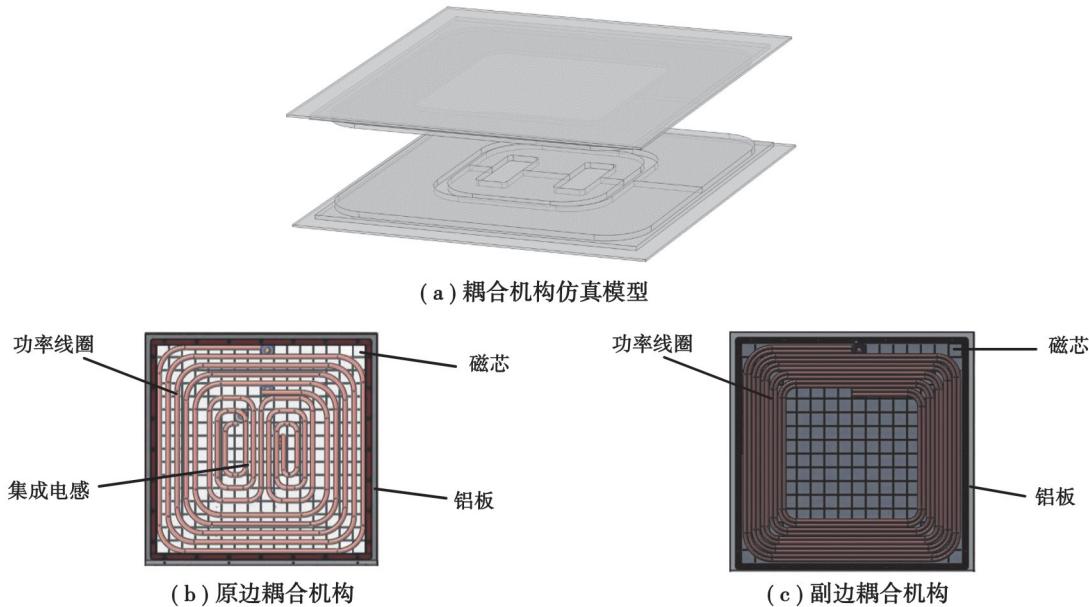


图 5 耦合机构模型

Fig. 5 Coupling mechanism model

耦合机构参数如表 1 所示, 机构中铝板尺寸为  $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ , 线圈尺寸为  $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ , 原副边距离为  $200 \text{ mm}$ 。由表 1 可知, 集成电感与原边、副边线圈交叉耦合互感非常小, 相较原边和副边线圈互感小 3 个数量级以上, 可以忽略不计。

表 1 耦合机构参数

Table 1 Parameters of the coupling mechanism

参数	数值
原边线圈匝数	5.00
原边线圈线径/mm	15.00
原边线圈自感/ $\mu\text{H}$	33.50
原边线圈内阻/ $\Omega$	0.10
副边线圈匝数	5.00
副边线圈线径/mm	10.00
副边线圈自感/ $\mu\text{H}$	33.60
副边线圈内阻/ $\Omega$	0.10
能量线圈互感/ $\mu\text{H}$	10.30
原边能量线圈与集成电感互感/ $\mu\text{H}$	0.003 0
副边能量线圈与集成电感互感/ $\mu\text{H}$	0.002 3
系统频率/kHz	85.000 0
集成电感线圈自感/ $\mu\text{H}$	9.800 0
集成电感线圈内阻/ $\Omega$	0.150 0

通过仿真得出磁耦合机构的磁力线仿真分布如图6所示。

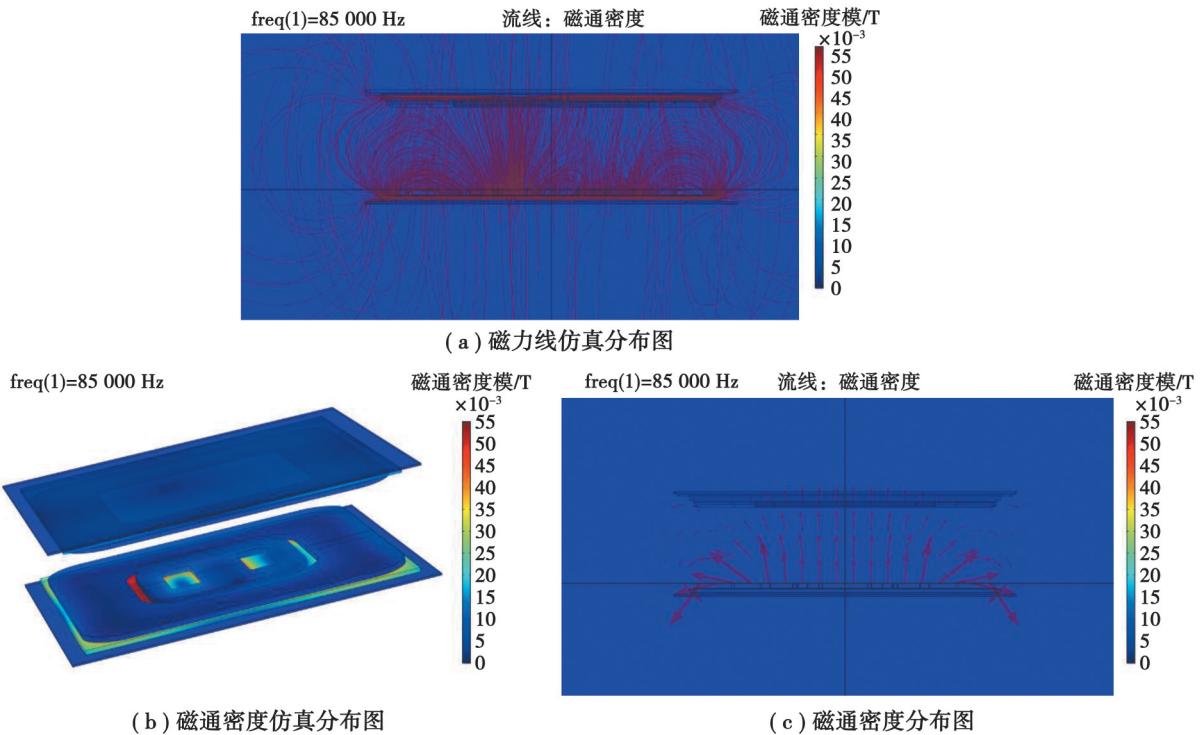


图6 耦合机构仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of coupling mechanism

由图6(a)可知此结构漏磁较小,磁力线基本上分布在原副边正对中间,由图6(b)磁通密度最大处位于原边磁芯,由图6(c)可以看出在传输过程中,系统磁通密度主要集中在原副边正中间。

### 3 系统仿真

本文设计系统参数如表2所示。

表2 系统参数  
Table 2 Parameters of the coupling mechanism

参数	数值
直流输入电压/V	700
原边电容 $C_f/nF$	358
原边电容 $C_p/nF$	148
副边电容 $C_s/nF$	104
副边母线电容 $C_d/uF$	600
负载电阻/ $\Omega$	5.11

根据表1和2的参数,使用PLECS软件,按照图2的系统原理图,搭建电路仿真模型,模型如图7所示。图8为系统运行时的逆变波形,从图中可以看出,电压相位稍微超前于电流,系统呈弱感性。图9为系统输出电压电流仿真波形,可以看出,输出电压714 V,输出电流140 A,输出功率为99.96 kW,系统DC-AC-DC效率为96.5%。

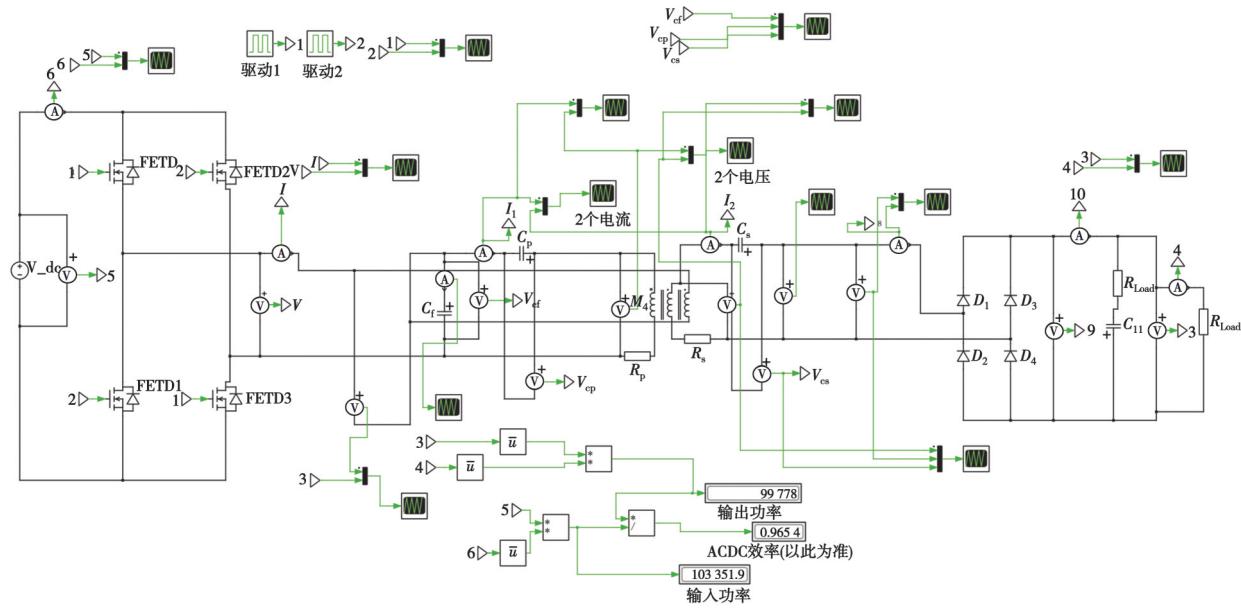


图 7 系统仿真模型

Fig. 7 Simulation of system model

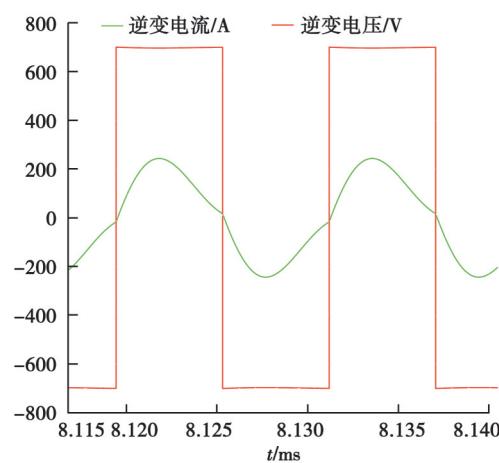


图 8 逆变波形

Fig. 8 Inverted waveform

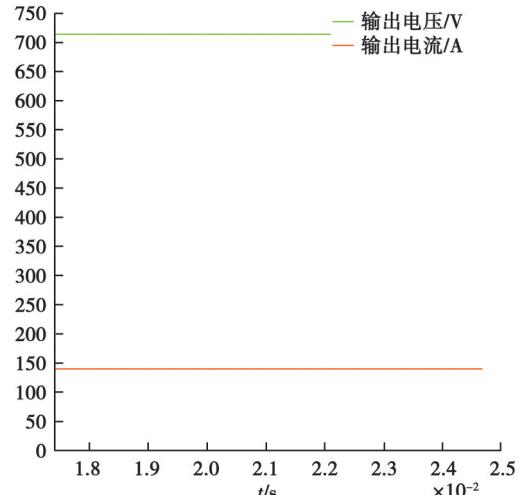


图 9 系统输出波形

Fig. 9 Simulation results of system output

#### 4 实验验证

整机系统研发装置如图 10 所示, 从左至右分别为原边发射电路、耦合机构以及副边接收电路, 系统耦合机构和諧振网络参数与表 1, 2 一致。系统直流电源和负载均采用 NHR-9300-100, NHR-9300-100 最高输入输出电压为 1 200 V, 最高电流为 333 A, 最大功率为 100 kW; 逆变模块采用 Microsemi 公司的 MSCSM120AM042CD3 AG, 最大电压为 1 200 V; 逆变器驱动采用与之配套的 The AgileSwitch 62EM1-62 mm; 布控整流模块采用 SiC 的 MSC2X51SDA120J, 单个二极管最大电流为 50 A, 使用 4 个二极管并联的方式来满足系统要求。

将系统负载设为恒阻模式, 当输入电压为 700 V 时用示波器测试系统关键波形, 并记录输入电压电流值和输出电压电流、系统功率及效率如表 3 所示。系统满载时逆变器输出电压电流波形如图 11 所示, 此处电压相位超前电流, 系统呈弱感性, 实现开关管零电压开通, 减小开关损耗。

如表 3 所示, 在输入电压为约 700 V 时, 无线电能传输系统直流侧能输出 93 kW, 效率在 96% 以上, 实现了大功率高效无线电能传输。

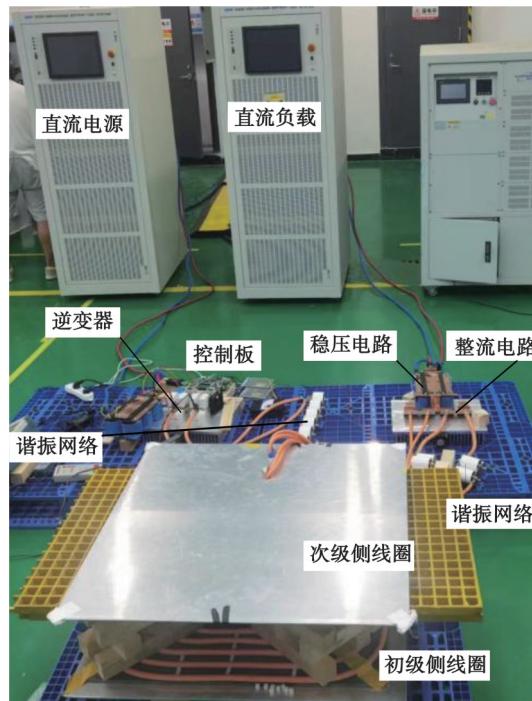


图 10 系统实验装置图

Fig. 10 System experimental device diagram

表 3 实验数据记录表

Table 3 Experimental data record sheet

参量	输入		输出	
	$U_{in}/V$	$I_{in}/A$	$U_{out}/V$	$I_{out}/A$
测量值	698.72	138.51	694.32	133.99
功率/kW	96.779		93.032	
效率/%		96.13		

为了验证该系统的稳定性,对该系统进行了烤机实验,图 12 为系统各关键部件在 1/2 h 内的温升情况。由图可以看出,系统各个环节都能稳定在相应温度区间,没有局部发热,表明系统能持续运行。

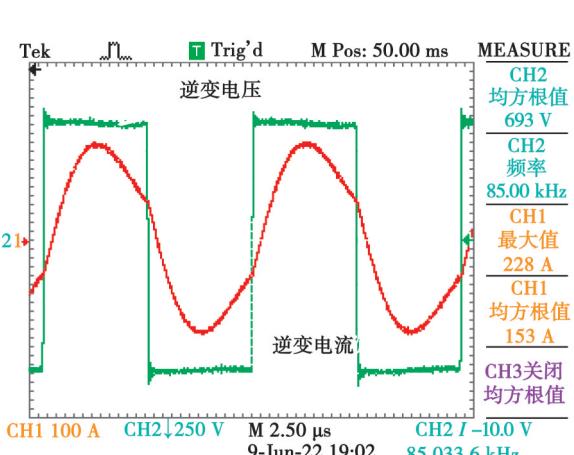


图 11 系统逆变器输出电压电流波形

Fig.11 System inverter output voltage current waveform

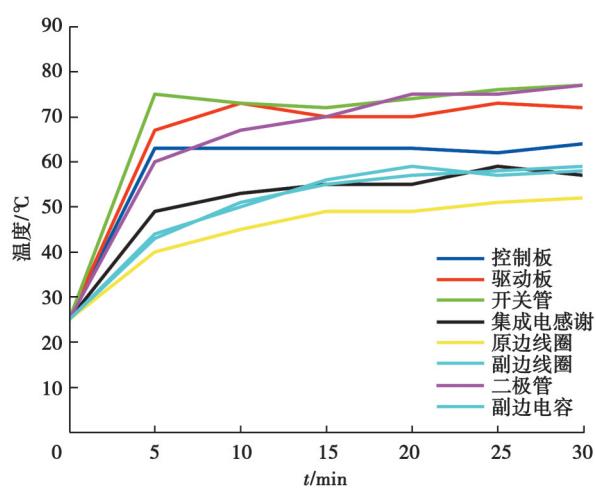


图 12 系统烤机测试温升

Fig. 12 Temperature rise in system stress testing

## 5 结 论

研究分析了 LCC-S 拓扑原理和无线电能传输各环节损耗, 得到输出功率与原边电感、系统互感的关系, 在外部输出参数确定情况下, 进一步分析系统效率与原边电感的关系, 综合考虑元器件的耐压耐流等限值, 设计了大功率高效无线电能传输系统, 采用“8”字型线圈使原边电感集成于线圈中, 提高系统功率密度。搭建了无线电能传输系统实验平台, 系统输出功率为 93 kW, 系统效率为 96%, 实现大功率高效无线电能传输系统, 为解决港口岸电大功率无线电能传输系统提供了解决思路。

### 参 考 文 献

- [1] Li M Y, Chen X Y, Huang Q, et al. Conceptual design and characteristic analysis of a rotary-type superconducting wireless power transfer system using ReBCO primary at 50 Hz[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.
- [2] He G M, Chen Q H, Ren X Y, et al. Modeling and design of contactless sliprings for rotary applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(5): 4130-4140.
- [3] Jiang X G, Wang K Q, Shao R J, et al. Self-compensation theory and design of contactless energy transfer and vibration system for rotary ultrasonic machining[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8650-8660.
- [4] 唐慧妍, 陈亚杰, 周晶, 等. 大功率船用无线充电系统及其关键设备设计[J]. 水运管理, 2022, 44(7): 23-28.  
Tang H Y, Chen Y J, Zhou J, et al. High-power marine wireless charging system and its key equipment design[J]. Shipping Management, 2022, 44(7): 23-28. (in Chinese)
- [5] 谢诗云, 苏玉刚, 陈龙, 等. 基于双侧 F-LCLC 网络的恒压型电场耦合无线电能传输系统[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 134-141.  
Xie S Y, Su Y G, Chen L, et al. Constant-voltage electric-field coupled wireless power transfer system based on double-sided F-LCLC networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 134-141. (in Chinese)
- [6] 李东, 侯睿, 刘威, 等. 高功率密度无线电能传输系统设计[J]. 电力电子技术, 2019, 53(10): 99-101.  
Li D, Hou R, Liu W, et al. Research on high power density wireless power transmission system[J]. Power Electronics, 2019, 53(10): 99-101. (in Chinese)
- [7] 林云志, 赵争鸣. 基于 LCL-S 型谐振的大功率无线电能传输实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(1): 93-98.  
Lin Y Z, Zhao Z M. Design of high-power wireless power transmission experimental platform based on LCL-S resonance[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(1): 93-98. (in Chinese)
- [8] Shi K, Tang C S, Long H, et al. Power fluctuation suppression method for EV dynamic wireless charging system based on integrated magnetic coupler[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 1118-1131.
- [9] Shi K, Tang C S, Wang Z H, et al. A magnetic integrated method suppressing power fluctuation for EV dynamic wireless charging system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7493-7503.
- [10] Jeong S, Jang Y J, Kum D. Economic analysis of the dynamic charging electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6368-6377.
- [11] Chen L, Nagendra G R, Boys J T, et al. Double-coupled systems for IPT roadway applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 37-49.
- [12] Mi C C, Buja G, Choi S Y, et al. Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6533-6545.
- [13] Lu F, Zhang H, Hofmann H, et al. A dual-coupled LCC-compensated IPT system to improve misalignment performance[EB/OL]. (2017-05-20) [2021-05-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7959355>.
- [14] Li S Q, Li W H, Deng J J, et al. A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2261-2273.
- [15] Nguyen T D, Li S Q, Li W H, et al. Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers[C]//2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2014: 1676-1682.

(编辑 侯 湘)