

Resonant Compensation Design for Underwater Medium-voltage High-power Wireless Power Coupling Transmission

Lingyue Xu Peng Zhang Yiyun Zhu Zhen Chi Zhifeng Zhang

Zhongtian Ocean System Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 600522, China

Abstract

Marine observation networks rely on efficient and reliable energy transmission technologies for long-term operation. Traditional dry-mate or wet-mate connectors suffer from electrochemical corrosion and sealing failures under high-pressure, high-salinity conditions, leading to reduced efficiency and higher maintenance costs. This study investigates a mid-voltage high-power wireless power transfer (WPT) system using an LCC-S resonant compensation topology to enhance energy supply reliability and environmental adaptability. Experimental results show that the proposed system achieves stable constant-voltage output across a wide load range, a peak efficiency of 90.4% (compared to 78.2% with conventional SS topology), and maintains temperatures below 60°C during 8-hour continuous operation, demonstrating its practical feasibility. The LCC-S topology effectively addresses challenges in voltage regulation and efficiency optimization for underwater WPT applications. Future work will focus on high-permeability core materials, electromagnetic shielding, and fault-tolerant designs for deep-sea high-pressure environments.

Keywords

Wireless Power Transfer; LCC-S Type; Resonant Compensation; Constant Voltage Output; Efficiency Optimization

水下中压大功率无线电能耦合传输谐振补偿设计

许凌月 张鹏 朱逸云 迟震 张志峰

中天海洋系统有限公司, 中国·江苏 南通 600522

摘 要

海洋观测网络是深海环境监测与数据采集的核心, 其长期稳定运行离不开高效、可靠的能源传输技术。传统干/湿插拔式电连接器因金属插芯腐蚀问题会导致可靠性下降与维护成本增加。为解决该问题, 本研究聚焦于水下中压大功率无线电能传输(WPT)技术, 针对水下中压大功率场景的特殊需求, 本文提出基于电感-电容-电容-串联电容(LCC-S)型谐振补偿拓扑的无线电能传输系统架构, 从而提升海洋观测装备的能源供给可靠性及环境适应性。实验表明: 所设计的LCC-S型WPT系统在宽负载范围内具有稳定的恒压输出, 系统最高传输效率达90.4%; 8小时连续运行测试中, 系统温度最高不超过60°C(空气中), 并且可始终保持高效传输, 从而验证了工程应用可行性。本研究证实LCC-S型谐振补偿拓扑能够适用水下复杂的应用环境, 可以解决水下中压大功率无线电能传输的恒压控制与效率优化难题。未来将继续开展深海高压环境下的高磁导率磁芯材料、电磁场局部屏蔽技术、故障冗余技术的相关研究, 推动水下无线电能传输技术的规模化工程应用。

关键词

无线电能耦合; LCC-S型; 谐振补偿; 恒压输出; 效率优化

1 引言

海洋科学研究对海底环境参数的长期连续监测具有迫切需求, 海底观测网络通过集成多种传感器视线对海底环境的持续性监测^{[1][2]}。海底观测网络的稳定运行依赖高效能源供应体系, 传统解决方案多采用干/湿插拔连接器进行传输, 如日本海底地震观测网采用的同轴电缆系统, 以及我国同济

大学主导的“海底长期观测网络试验节点”项目中应用的接驳盒技术^{[1][3]}。此类技术虽可实现大功率传输, 但金属插芯在海水电解环境下的电化学腐蚀问题显著增加运维成本。浙江大学等机构通过阴极倒极法延缓电极结垢, 虽延长了维护周期, 仍未从根本上解决接触式传输的物理局限性^[4]。

相较之下, 新型无线电能耦合装置通过消除固定电缆连接, 在提升系统维护便利性和降低工程成本方面展现出显著优势。根据不同的电能传输机理, 无线电能传输可被划分为: 电场耦合式和磁场耦合式、微波式、激光式、超声式^[5]。不同种类的技术对比分析表明磁场耦合式在数十厘米范围内兼具传输效率高(>80%)、抗偏移能力强和穿透性优异等特性, 特别适用于大功率稳定传输场景, 因而成为水下应

【基金项目】中天海洋系统有限公司科技项目(项目编号: C-24JSW002)。

【作者简介】许凌月(1991-), 女, 中国江苏南通人, 本科, 工程师, 从事海底观测网研究。

用的首选方案。

典型无线电能传输系统采用电气隔离的双边架构设计，其能量转换过程遵循电磁感应原理。系统设计中，谐振补偿网络通过无功功率补偿可有效提升传输效率，传统串联-串联/串联-并联/并联-串联/并联-并联补偿拓扑^[6-7]虽结构简单，但存在谐振元件灵敏度高、增益不可调的缺陷，而 LCC-S 结构能够完成系统输出电压与功率的解耦设计，可以降低负载变化对系统影响的敏感性，具有更高的设计自由度，因而适用于中高功率场景。

基于如上对比，本研究采用 LCC-S 型来设计无线电能耦合传输系统，通过灵活的参数调整，开发出匹配水下功率需求的系统，并且根据理论仿真结果搭建了实验样机。

2 系统结构

2.1 系统结构

本系统采用模块化架构设计，由六个核心功能模块构成：直流电源、逆变器、谐振补偿网络、磁耦合器、整流滤波电路、DC-DC 电源，其拓扑架构如图 1 所示。

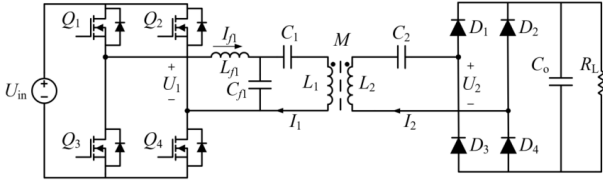


图 1 无线电能耦合传输系统拓扑图

其中，为初级侧全桥逆变电路的 4 个 MOS 管，为次级侧全桥整流电路的 4 个整流二极管，和分别为电磁耦合器的初级侧和次级侧线圈的自感，为电磁耦合器的互感，是初级侧串联补偿电感，为初级侧并联补偿电容，为初级侧串联补偿电容，为次级侧整流滤波电容。

2.2 谐振参数设计

基于 LCC-S 补偿结构的无线电能传输系统拓扑架构通过互感等效可简化为图 2 所示电路模型。系统设计需重点考虑如下关键参数：谐振电容参数、谐振电感参数、耦合电感参数。

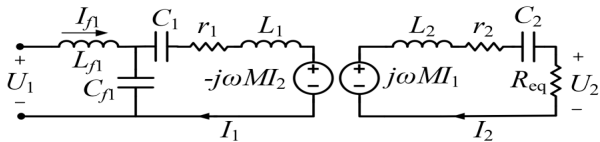


图 2 等效 LCC-S 补偿拓扑

当直流电源经全桥逆变器转换为设定频率的方波信号时，其电压波形可通过傅里叶级数展开表示为：

$$U_1 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4U_{in}}{\pi n} \sin(\omega n t) \quad (1)$$

式中， U_1 为输入电压幅值， U_{in} 为输入电压， ω 为角频率， $n=1,3,5,\dots$ ， t 为时间。对于连接全桥整流电路的负载电阻 R_L ，其等效交流阻抗 R_{eq} 可等效为：

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

为实现系统谐振工作状态，LCC-S 补偿网络的参数需满足以下约束条件：

$$\omega^2 L_{f1} C_{f1} = 1 \quad (3)$$

$$\omega^2 L_2 C_2 = 1 \quad (4)$$

式中， ω 为系统谐振角频率， r_1, r_2 分别为耦合器线圈 L_1, L_2 的内阻， L_{f1} 为初级侧补偿电感， C_{f1} 为初级补偿电容， L_2 为次级侧电感， C_2 为次级谐振补偿电容。满足上述谐振条件时，次级侧输出电压 U_2 可推导为：

$$U_2 = I_2 R_{eq} = \frac{M U_1 R_{eq}}{L_{f1} (R_{eq} + r_2)} \quad (5)$$

M 为耦合互感。根据以上公式，忽略各元件内阻时，可以推出以下结论：

在忽略元件内阻的理想条件下，理论分析表明：次级侧输出电压仅与耦合互感 M 、初级补偿电路输入 U_1 、初级侧补偿电感 L_{f1} 相关，展现出与负载无关的恒压输出特性。当系统以恒压源供电且参数固定时，在耦合状态稳定的工作条件下，次级侧输出可维持恒定电压水平。这一特性使得 LCC-S 型无线电能传输系统在工程应用中具有显著优势。

结合如上分析，设定系统参数如下：

基于前述理论分析，设定无线电能传输系统参数如下：后端配置降压斩波型直流转换模块，实现输入电压 400-600VDC 范围至 375VDC 恒压输出，工作频率设定为 50kHz，系统最大传输功率设计目标为 2.5kW。选定核心参数如下：DC-DC 模块的输入电压为 500V，初级电感参数为 190 μ H，次级电感 290 μ H，耦合系数 0.85，初级补偿电感 150 μ H。

根据 LCC-S 拓扑谐振条件，关键补偿元件参数计算公式如下：

$$C_{f1} = \frac{1}{\omega^2 * L_{f1}} \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 * (L_1 - L_{f1})} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 * L_2} \quad (8)$$

式中， C_{f1} 为初级补偿电容， C_1 为初级谐振补偿电容， C_2 为次级谐振补偿电容。

代入预设参数进行理论计算：初级补偿电容 C_{f1} 为 67.5nF，初级谐振补偿电容 C_1 为 253nF，次级谐振补偿电容 C_2 是 34.9nF。

3 仿真验证

基于理论推导建立 LCC-S 型无线电能传输系统仿真模型,核心参数配置如表 1 所示。该模型采用 500V 直流输入源,工作频率设定为 50kHz,谐振网络参数严格依据公式 (6)-(8) 计算值进行配置。

表 1 LCC-S 型无线电能传输系统参数配置表

参数名称 / 单位	取值
U1/V	500
F/Hz	50k
L1/ μ H	190
L2/ μ H	290
l/ μ H	150
/nF	67.5
/nF	253
/nF	34.9

通过设置 10 Ω 与 1 Ω 两种典型负载条件,观测系统动态响应特性:

谐振网络输出特性

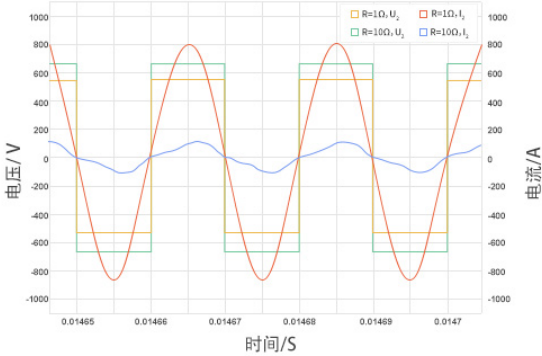


图 3

当负载阻值为分别为 10 Ω 和 1 Ω 时,谐振补偿后电压、电流情况 (蓝色: U_2 , 红色: I_2)

根据图 3,可以观察到在谐振补偿后,电压波动较小,维持在 500V 上下,经过后级全桥整流电路处理后,输出电压维持在设计值;而电流则根据负载需求发生了显著变化。

效率特性验证

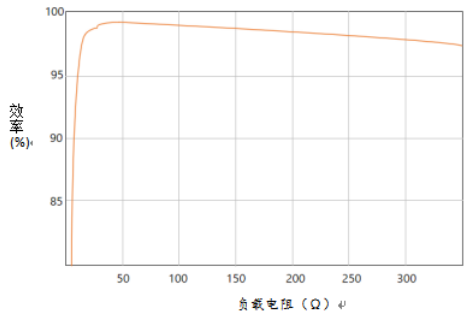


图 4 不同负载条件下的传输效率

图 4 系统能效测试可以得出,磁耦合效率始终维持在 95% 以上,与负载变化呈弱相关性。仿真验证系统整体效率在额定负载范围内达到 85% 以上。

实验数据表明,所提出的 LCC-S 拓扑补偿在宽负载范围内可保持稳定的恒压输出,系统综合效率达 85% 以上,为后续工程化应用提供了理论依据。

4 测试验证

4.1 样机测试

基于理论设计与仿真结果,研制了 LCC-S 型无线电能传输实验样机。实验样机包含高频逆变模块、LCC-S 谐振网络及散热系统;整体装配形态为圆柱型,其结构设计充分考虑了电磁兼容性与热管理需求。

采用可编程直流电源 (0-1000V/20kW) 与电子负载 (600V/90A) 构建测试平台,经测试得出,在额定 1kW 负载工况下,系统整体效率达到 90.4%,与理论仿真结果系统整体效率在额定负载范围内达到 85% 以上吻合。动态负载切换过程中电压恢复时间 <100 μ s。

4.2 性能验证与工程适用性

实验数据与仿真结果的误差控制在 5% 以内,验证了理论模型的准确性。实测效率较仿真预测值提升,主要源于以下优化措施: (1) 采用低损耗磁芯材料降低涡流损耗; (2) 优化电路板布局减少寄生参数影响; (3) 实施动态频率跟踪补偿频率漂移。

该实验样机在连续 8 小时运行测试中,温度最高不超过 60 $^{\circ}$ C (室温 10 $^{\circ}$ C),一般海洋观测网络布放在深层海底水域 (1000 米以下),此区域海水温度稳定在 2 $^{\circ}$ C~4 $^{\circ}$ C,低于测试时室温,散热条件更佳。表明系统具备良好的工程化应用潜力,可满足高功率非接触电能传输场景的技术要求。

5 结语

本文介绍了水下中压大功率的无线电能耦合传输的应用场景及其系统整体拓扑。为了提高系统传输效率,利用互感耦合理论对 LCC-S 型谐振补偿设计建立了数学模型,推导得出了次级侧输出电压公式,从而得出 LCC-S 型无线电能耦合传输系统具有恒压输出的特点;结合谐振条件约束,搭建了包含补偿电容、电感等关键参数的数学模型,并通过仿真验证发现了当负载阻抗变化时,输入电流呈现动态调节能力,而输出电压呈现恒压输出的特点。实验样机测试数据证明了系统的整体传输效率大于 90%,由此验证了 LCC-S 谐振补偿设计适用于中压大功率的水下无线电能耦合传输系统的场景应用,后续研究将拓展至电磁场屏蔽、软开关控制技术,进一步提升系统的稳定性。

参考文献

[1] 汪品先. 发展深海科技的前景与陷阱[J]. 科技导报, 2021, 39 (03): 71-79.

- [2] 刘长华,王春晓,王旭,等. 锚定式海洋水体剖面观测技术的研究与应用[J]. 海洋科学, 2019, 43 (12): 139-147.
- [3] 冯迎宾. 海底观测网能源供给方法及故障定位技术研究[D]. 中国科学院大学,2014.
- [4] 金波,张志峰,张锋,等. 一种海底观测网电极切换和维护系统:浙江,CN201410155915.X[P], 2014-07-23.
- [5] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等.无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术,2023,42(2):48-67.
- [6] 王亚晓,王鹏坤. 磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43 (11): 58-65.
- [7] 庄亚杰. 磁耦合谐振无线电能传输系统的拓扑结构研究[D]. 兰州理工大学, 2020.