

无人驾驶船舶岸基磁谐振式无线供电系统的设计与仿真

胡宣蔚¹ 孙雷霆¹ 杜晓雯² 李翔¹

HU Xuanwei SUN Leiting DU Xiaowen LI Xiang

摘要

为解决无人驾驶船舶岸基供电自动化程度低的问题,采取无线供电技术,设计无人驾驶船舶岸基无线供电系统,为无人驾驶船舶岸基供电提供新途径。为尽可能降低无线供电系统的无功功率,设计采用双边 LCCL 补偿网络结构,实现恒流输出,其系统补偿参数不受耦合系数影响。对双边 LCCL 补偿结构进行了推导,确定了系统谐振条件,并以此为基础对系统核心技术参数进行了设计。分析了系统的最佳谐振频率和耦合系数范围,通过搭建仿真系统进行实验,验证了系统设计的可行性。

关键词

磁谐振式;无线供电技术;LCCL 补偿网络;电路仿真

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.11.044

0 引言

在当今科技高速发展的今天,新质生产力成为推动社会进步的核心力量,通过智能化、数字化和绿色化的手段,提高效率,优化资源配置,为人类社会带来前所未有的发展机遇。无线供电作为前沿科技是新质生产力在新时代新征程下电子科技发展的代表领域之一。随着大数据、云计算、虚拟现实和人工智能的迅速发展,无人驾驶船舶已经取得了阶段性的进步,在海图测绘、海事安全和环境监测等方面展开应用,但无人驾驶船舶的大功率无线供电仍然是目前亟须突破的技术瓶颈。无人驾驶船舶主要采用大容量蓄电池为整船提供电能,目前通过有线电缆输送电能。这种供电方式自动化程度低,易受到水尘污染及不易便携等限制。同时,大功率供电接触点易发热产生火花,存在一定安全隐患。因此,研究无人驾驶船舶的大功率无线供电技术有广阔的应用前景。采取无线供电技术的无人驾驶船舶当电量达到需充电阈值时,可自动返回码头,选择充电平台进行电能补充,提升供电的自动化程度。

无线供电技术自出现以来,受到了全球广泛关注,现有研究已能够将电能利用发射器转化为微波、激光、机械波、电磁场能等形式的中继能量,隔空传输后利用接收器再转换回电能,实现电能的无线传输^[1]。本文基于岸基磁谐振式无线供电系统进行理论层面的探索,以期为无人驾驶船舶岸基无线供电实际应用提供一定的技术参考。

1 双边 LCCL 结构电路原理与特性分析

磁谐振式无线供电旨在科学计算出线圈与电容的相同谐

振频率,并保证该频率不会影响与周围物体的谐振频率。这种方式兼容性较高,传输距离远,供电速度快。文献[2]研究的双边 LCC 拓扑结构的无线电能传输系统设计,通过试验分析得出双边 LCC 拓扑结构下的系统有很好的传输性能和抗偏移能力,其系统传输效率很高。本文在 LCC 结构基础上,提出双边 LCCL 结构的系统电路,如图 1 所示,其中 V_i 为输入电压, V_o 为输出电压。

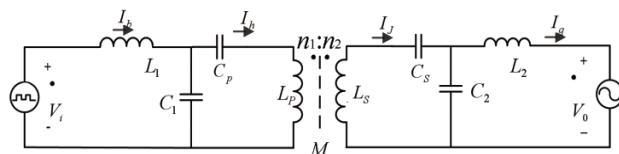


图 1 采取双边 LCCL 结构的系统电路图

对初级侧补偿网络进行分析,建立电压、电流方程, I_b 、 I_h 表示电感 L_1 、 L_p 上电流基波分量的向量形式。

$$\begin{cases} I_b(j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}) - I_h \frac{1}{j\omega C_1} = V_i \\ (j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + Z_r)I_h = (I_b - I_h) \frac{1}{j\omega C_1} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)得出输入电流,此时电流不受负载影响,实现了恒流输出。系统输入电流的表达式为:

$$I_b = V_i \omega_0^2 C_1^2 (Z_r + j\omega_0 L_p - j \frac{1}{\omega_0 C_p} - j \frac{1}{\omega_0 C_1}) \quad (2)$$

反射阻抗 Z_r 阻性成分,满足公式(2)时,可得:

$$\omega_0 L_p - \frac{1}{\omega_0 C_p} - \frac{1}{\omega_0 C_1} = 0 \quad (3)$$

系统呈现零相角状态,输入阻抗的阻抗角为 0。

同理,对补偿网络次级侧进行分析,谐振补偿条件为:

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \\ L_p - L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 C_p}; L_s - L_2 = \frac{1}{\omega_0^2 C_s} \end{cases} \quad (4)$$

1. 中国人民解放军海军勤务学院 天津 300450
2. 中国人民解放军北部战区海军参谋部军事训练和职业教育中心 山东青岛 266000

对次级侧的输出电流展开分析, 令 V_i 相角为 0 , 系统工作频率为 ω_0 时, 可以得到:

$$I_h = \frac{V_i}{j\omega_0 L_1} - j \frac{V_i}{\omega_0 L_1} \angle -90^\circ \quad (5)$$

根据互感原理, 次级侧接收线圈 L_s 的感生电动势可表示为:

$$j\omega_0 M L_h = k V_i \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \angle 0^\circ \quad (6)$$

当次级侧满足式(4)所述的谐振补偿条件, 可结合式(5)得出次级侧输出电流计算公式:

$$I_q = \frac{j\omega_0 M I_h}{j\omega_0 L_2} = \frac{k \sqrt{L_p L_s} V_i}{\omega_0 L_1 L_2} \angle 90^\circ \quad (7)$$

次级侧输出电流不受负载影响, 呈电流源特性, 且补偿网络不受耦合系数影响, 满足供电系统的应用需求^[3]。

2 磁谐振式无线供电系统参数优化设计

利用 T 型等效电路对采取 LCCL 的系统电路进行等效分析, 在双电源的情况下, 运用叠加原理分别对输入电压和输出电压进行分析, 进而得出各支路电流电压表达式。通过供电系统各项技术指标以及系统谐振条件公式, 计算出系统电路 LCCL 补偿网络元器件的工作参数, 完成核心参数设计。

2.1 磁谐振式无线供电系统原理分析

根据上文确定的 LCCL 补偿结构的系统电路模型, 进行折算为 T 型等效电路如图 2。将其次级侧折算到初级侧, 其中 L_m 为励磁电感, 其大小为 kL_1 ; k 为耦合系数。

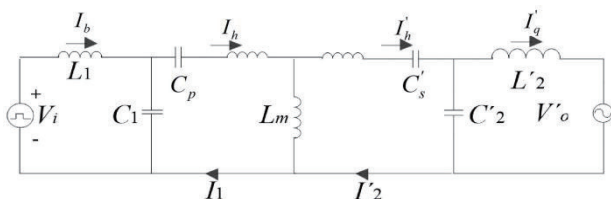


图 2 双边 LCCL 补偿结构 T 型等效电路

利用叠加原理对折算后的电路电流进行分析。设 L_p 为 C_p 与 L_{kp} 之和, L_s' 为 C_s' 与 L_{ks} 之和。

首先, 计算根据公式(4)可以得出 L_p 的大小。

$$L_p = \frac{1}{j\omega_0} \left(\frac{1}{j\omega_0 C_p} + j\omega_0 L_{kp} \right) = L_1 - kL_p = L_1 - L_m \quad (8)$$

同理, 可在次级侧得到:

$$L_s' = \frac{1}{j\omega_0} \left(\frac{1}{j\omega_0 C_s'} + j\omega_0 L_{ks} \right) = L_2' - kL_s' = L_2' - L_m \quad (9)$$

当只有 V_i 单独作用, $\omega = \omega_0$ 时, T 型等效电路如图 3 所示。

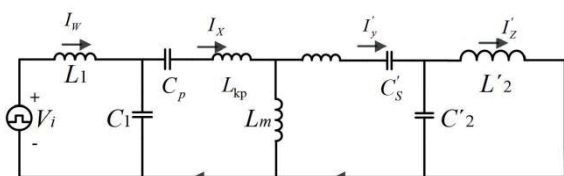


图 3 V_i 单独作用时 T 型等效电路

根据系统谐振条件的公式, 计算可得: L_1 与 C_1 、 L_2' 与 C_2' 并联时, 阻抗无穷大, 电路为断路。

因为 I_w , I_y 所在电路为断路, 所以其数值为 0。

$$I_x = \frac{V_i}{j\omega_0 L_p + j\omega_0 L_m} = \frac{V_i}{j\omega_0 L_1} \quad (10)$$

$$I_z' = \frac{V_i}{j\omega_0 L_1} \cdot j\omega_0 L_m \frac{1}{j\omega_0 L_2} = \frac{V_i L_m}{j\omega_0 L_1 L_2} \quad (11)$$

同理可推得: 只有 V_0 单独作用时, I_{x-out} , I_{q-out} 为 0。

$$I_{b-out} = \frac{V_0 L_m}{j\omega_0 L_1 L_2} \quad I_{j-out} = \frac{V_0}{j\omega_0 L_2} \quad (12)$$

根据叠加原理可得:

$$I_b = I_{b-out} + I_w = \frac{k \sqrt{L_p L_s} V_0}{\omega_0 L_1 L_2} \quad (13)$$

$$I_q = \frac{I_q'}{n} = \frac{I_{q-out}' + I_z'}{n} = \frac{k \sqrt{L_p L_s} V_i}{\omega_0 L_1 L_2} \quad (14)$$

可以计算得出输入功率 P_i , 其表达式为:

$$P_i = V_i \cdot I_b = \frac{\sqrt{L_p L_s}}{\omega_0 L_1 L_2} k V_i V_o \quad (15)$$

2.2 供电系统核心参数设计

根据前节分析, 可得到输入电流、输出电流、输入功率的表达式。结合设定的无人驾驶船舶岸基无线供电系统各项核心指标及系统谐振条件, 设计额定功率 20 kW, 输入电压 380 V, 输出电压 200 V, 频率 85 kHz, 耦合系数 0.2, 耦合器参数为 $L_p=246 \mu\text{H}$, $L_s=246 \mu\text{H}$ 。

已知频率 85 kHz, 代入公式 $\omega_0=2\pi f$ 计算可得 ω_0 , 假设与 L_2 相等, 可得:

$$L_1 = L_2 = \sqrt{\frac{k V_o V_i}{\omega_0 P_i}} L_p \quad (16)$$

代入参数计算可得 $L_1=L_2=18.7 \text{ H}$

根据公式, $C_1 = C_2 = \frac{1}{L_1 \omega_0}$

由此求得 C_1 与 C_2 的数值为 187.4 nF。

根据公式(3)可得公式:

$$C_p = C_s = \frac{1}{(L_p - L_1) \omega_0^2} \quad (17)$$

由此求得 C_p 与 C_s 的数值为 15.4 nF。

根据以上分析及计算可以得出如表 1 所示的无线供电系统核心参数。

表 1 无线供电系统核心参数

参数	数值
初级侧补偿电容 C_p	15.4 nF
初级侧补偿电感 L_1	18.7 μ H
初级侧补偿电容 C_1	187.4 nF
次级侧补偿电容 C_s	15.4 nF
次级侧补偿电感 L_2	18.7 μ H
次级侧补偿电容 C_2	187.4 nF

3 磁谐振式无线供电系统仿真分析

本章根据上文推导条件,进一步分析耦合系数、频率变化对传输效率产生的影响,并得出结论,确定本系统应用的耦合系数和频率^[4]。

3.1 频率对传输效率影响仿真分析

传输效率受谐振频率和耦合系数的影响,故本节主要对谐振频率和传输效率展开分析。设定仿真系统参数如表 1 所示,设置 $R_p=R_s=0.5 \Omega$,耦合系数 k 为 0.2, $R_L=60 \Omega$ 。仿真分析谐振频率与传输效率的影响如图 4 所示。

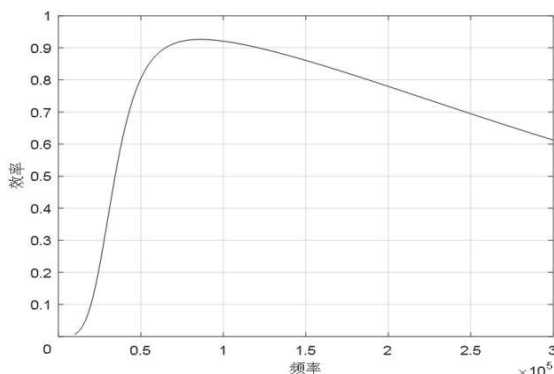


图 4 谐振频率与传输效率曲线图

根据图 4 中的信息可知,当系统谐振频率为 85 kHz 时,传输效率达到最大值。在 0 ~ 85 kHz 内,传输效率随谐振频率增大而升高。当谐振频率大于 85 kHz 时,传输效率随频率增大而减小。当谐振频率由 30 kHz 升高至 50 kHz 时,效率提升率为 50%。当谐振频率由 50 kHz 升高至 85 kHz 时,效率提升率只有 13%。这说明当谐振频率升高至一定点以后,频率变化对传输效率的影响减小。

本文设计传输效率大于 85%,可知频率范围 60 ~ 150 kHz 皆可,同时为满足有关无线供电技术对频率要求的国际惯例,故本文选取 85 kHz 作为供电系统谐振频率。

3.2 耦合系数对传输效率影响仿真分析

耦合系数 k 值的计算公式为:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (18)$$

耦合系数表示初级线圈与次级线圈之间的耦合状态,当 $k=0$ 时,表示初、次级线圈互感为 0,此时两线圈无法进行能量传递;当 $k=1$ 时,表示初、次级线圈处于全耦合状态,此时两线圈之间漏感为 0。初级线圈的能量除电路寄生阻抗消耗的部分外将全部传输至次级线圈,此时传递效率处于峰值状态。耦合系数的数值不是恒定的,它会随着线圈之间相对位置的变动而调整。当耦合器处于复杂的海洋条件下,受到海流强烈的冲击作用,将对耦合器造成极大的影响,容易导致耦合线圈出现错位现象。故而,应当站在耦合系数的视角下分析其对传输效率所产生的影响。图 5 为当供电系统谐振频率为 85 kHz 时, $R_p=R_s=0.5 \Omega$, $R_L=60 \Omega$ 时传输效率呈现特定的变化曲线。

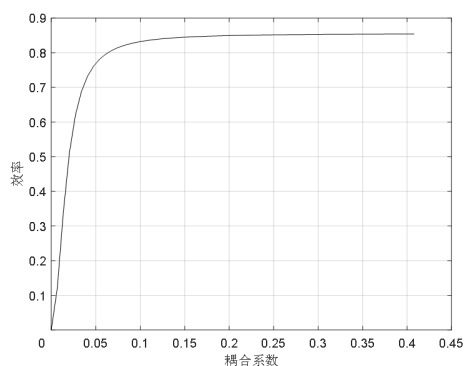


图 5 传输效率随耦合系数的变化曲线

根据图 5,次级侧负载电阻保持恒定不变的条件下,传输效率伴随耦合系数数值的增加而提升,二者之间存在正相关特性。当 $k < 0.1$ 时,效率曲线上升较快,走向陡直,代表该参数下传输效率变化率较高;当 $k \geq 0.2$ 时,效率曲线走势趋于平缓,代表该参数下传输效率变化率较低,此时传输效率对耦合系数变化的敏感度较低。在实际运行过程中,若 $k \geq 0.2$,能够减弱相对位置变化给传输效率带来的影响^[5]。

本文设计传输效率大于 85%,故选取只要在 $k > 0.1$ 的情况下皆可,但过大的耦合系数对传输效率的提升并不明显。为了给海水对耦合器的冲击留下一定预留值,可采取 0.2 作为无线供电系统的耦合系数。

3.3 供电系统仿真

开展无线供电系统仿真模型与实物模型等效分析,得到设计参数,为实物制作提供了依据^[6]。按照上述计算出来的参数,搭建如图 6 所示的无线供电系统仿真电路。由图 7 可知,输入电压大小为 380 V,频率为 85 kHz,波形为方形波,其参数满足系统供电设计需求。输入电压大小为 53 A 左右,波形为正弦波,参数同样满足供电系统设计需求。已知输入电压和输入电流,由公式(19)计算出实际输入功率大于系统设定的额定功率,故满足核心指标需求。

$$P_i = V_i I_b = 380 \times 53 = 20\ 140\ \text{W} \quad (19)$$

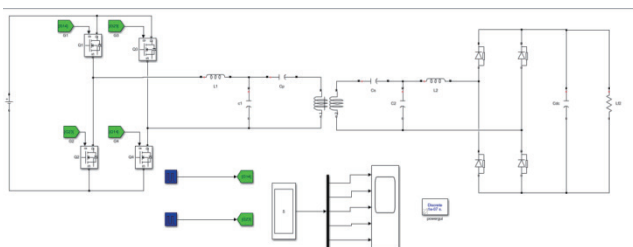


图6 无线供电系统仿真电路

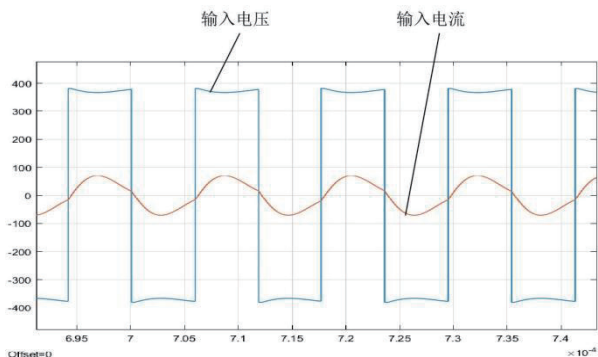


图7 输入电压与输入电流随时间变化曲线

由图8可知,输出电压为195 V的直流电,其大小与波形满足系统供电设计需求,输出电流恒定为90 A左右,满足供电系统设计要求的恒流输出。

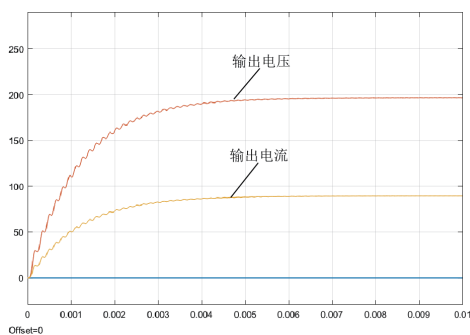


图8 输出电压与输出电流随时间变化曲线

已知输出电压、输出电流,根据公式(20)求出额定输出功率。通过公式(21)计算可得,系统传输效率大于系统设计参数,故系统输入功率满足系统核心指标要求。

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = 88\% \quad (20)$$

$$P_o = V_o I_q = 17.6 \text{ kW} \quad (21)$$

4 总结

本文主要进行了岸基谐振式无线供电系统设计,通过仿真分析耦合系数、频率变化对传输效率产生的影响,得到以下结论:系统频率与传输效率呈抛物线,当系统频率为85 kHz时,传输效率达到最大值。在0~85 kHz内,传输效率随频率增大而升高,当频率大于85 kHz时,传输效率随频

率增大而减小。因此,频率最佳取值范围为60~150 kHz。传输效率与耦合系数呈正相关,且当 $k < 0.2$ 时,随着耦合系数的降低,传输效率会急剧降低。为保持传输效率稳定,应维持 $k \geq 0.2$ 。根据上述结论,确定本文研究的无线供电系统采取的谐振频率为85 kHz,耦合系数为0.2。

综上所述,将基磁谐振式无线供电系统应用于无人驾驶船舶的岸基供电,突破传统供电方式在无人驾驶船舶应用中的局限性,综合调控供电系统的核心参数,提升电能的传输效率,增强供电的安全性与稳定性,为无人驾驶船舶在各领域的广泛应用开辟了广阔前景。

参考文献:

- [1] 王松岑,何浩,柳宇航,等.移动式无线充电系统中的通信技术应用研究[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(8):17-22.
- [2] 王子俨.基于双边LCC拓扑结构的无线电能传输系统设计[J]. 东北电力大学学报,2022,42(6): 83-89.
- [3] 程福临,刘春喜,邵翔宇,等.一种对称式双LCC补偿无线电能传输系统参数设计方法[J]. 电工电能新技术,2021,40(12): 64-72.
- [4] YAN Z T, XIE H Q, LI Y, et al. A monitoring equipment charging system for HVTL based on domino-resonator WPT with constant current or constant voltage output[J]. IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(3): 3668-3680.
- [5] 邵英,杨深钦,何笠.基于双边LCCL结构的ICPT系统水下适应性研究[J]. 海军工程大学学报,2020,32(3):64-70.
- [6] FANG Y R, QU J L, PONG B M H, et al. Quasi-static modeling and optimization of two-layer PCB resonators in wireless power transfer systems for 110-kV power grid online monitoring equipment[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(2):1400-1410.

【作者简介】

胡宣蔚(1982—),男,山东文登人,硕士研究生,工程师,研究方向:控制管理。

孙雷霆(1980—),通信作者(email: sunleiting@163.com),男,吉林长春人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:项目治理、控制管理。

杜晓雯(1993—),女,山东青岛人,硕士,助理工程师,研究方向:军事项目管理。

李翔(1996—),男,天津人,硕士研究生,研究方向:工程项目管理、信息管理。

(收稿日期:2024-07-28)