

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.12.009

具有全向抗偏移能力及恒流输出的电动汽车 无线充电系统

胡 鹏, 王 宁, 杨庆胜, 宁 艳, 曹佳佳
(江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102)

摘要: 电动汽车无线电能传输 (electric vehicle wireless power transfer, EV-WPT) 技术具有巨大的应用前景。但是车辆停靠过程中, 由于各种因素导致耦合机构未对准或者发生角度偏移, 从而降低系统的充电功率、效率甚至充电失败等。为解决上述问题, 设计出一种新型的耦合机构, 实现耦合机构全向的抗偏移能力; 用杂间距的设计方式增强能量线圈之间的互感的同时, 减小发射线圈的自感, 减少了线圈绕制的用线量。另外利用双 D 型线圈与 Q 型线圈的解耦特性, 将接收线圈与接收端补偿线圈做磁集成处理, 节省了空间以及磁芯的用量; 最后, 搭建输出功率达 1.4 kW 的仿真模型, 验证系统良好的抗偏移能力和恒流输出效果。

关键词: EV-WPT; 全向抗偏移; 双边 LCC 谐振网络

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)12-092-08

Wireless charging system for electric vehicles with omnidirectional anti-offset capability and constant current output

HU Peng, WANG Ning, YANG Qingsheng, NING Yan, CAO Jiajia
(Jiangsu Fangtian Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, P. R. China)

Abstract: Electric vehicle wireless power transfer (EV-WPT) technology holds promising application potential. However, during vehicle parking, misalignment or angular deviation in the coupling mechanism can reduce charging power, efficiency, and may even cause charging failure. To address these issues, this paper presents a novel coupling mechanism with omnidirectional anti-offset capability. Additionally, the design method incorporates stray spacing to increase mutual inductance between energy coils, reduce the self-inductance of the transmitting coil, and minimize the wire required for coil winding. Leveraging the decoupling characteristics of dual D -type and Q -type coils, the receiving coil and the receiving-end compensation coil are magnetically integrated, saving space and reducing the amount of magnetic core material needed. Finally, a simulation model with 1.4 kW output power is developed to verify the system's robust anti-offset capability and stable constant current output.

Keywords: EV-WPT; omnidirectional anti-offset; double-sided LCC resonant network

收稿日期: 2023-06-11

基金项目: 江苏方天电力技术有限公司科技项目 (KJ202119)。

Supported by Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd. Technology Project (KJ202119).

作者简介: 胡鹏 (1988—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化、无线电能传输技术方向研究, (E-mail) hup_hust@163.com。

通信作者: 王宁 (1981—), 男, (E-mail) 15905166674@163.com。

随着时代的发展,汽车已经深入现代生活,且数量逐年增加,这对石油资源的消耗是巨大的,也会引起一系列气候环境问题,如:全球变暖、空气雾霾等。因此,国务院发布了《关于进一步释放消费潜力促进消费持续恢复的意见》^[1],提倡绿色出行,推动公共服务汽车电动化。同时,为了推动电动汽车行业的发展,中国启动了“863”计划及节能与电动汽车等重大项目。在“十二五”以及“十三五”期间,中国围绕电动汽车产业发展以及技术创新这 2 个方面,坚持三纵三横的技术体系,让电动汽车的产业链更加完善,促进电动汽车朝产业化方向发展。到 2020 年底,中国电动汽车的保有量已经达到 400×10^4 辆,发展态势十分迅猛^[2]。不过传统有线充电方式安全性不是很高,而且充电限制也比较大,这对电动汽车的全面发展有限制。

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术因其高可靠性、高安全性、便捷和灵活的特性,可进行广泛应用的非接触充电。WPT 技术中的能量传输需要利用电磁耦合或者电场耦合,其突出特点就是不再需要金属导线来连接电源与待充电对象,具有灵活方便、电气隔离、环境适应能力强等突出优点。根据传输介质分类,可分为磁耦合、电场耦合、微波传能、激光传能等方式。经过大量的理论研究和实践,该技术已成功应用在电动汽车、电子产品、家用电器、生物医学、矿井及水下等领域。

在电动汽车无线电能传输系统中,车辆不能精确停靠在规定充电位置,导致系统传输功率不足、效率较低甚至充电失败,阻碍电动汽车无线充电技术的发展。目前,国内外针对电动汽车无线充电系统的抗偏移问题已经取得一些研究成果。例如,庄廷伟等^[3]针对耦合机构偏移后引起系统输出不稳以及充电效率低的问题,提出基于 DDQ/DD 耦合机构(原边 DDQ、副边 DD 耦合机构)和双路 LCC/S 补偿拓扑(原边 DD 和 Q 线圈均采用 LCC 补偿,副边 DD 线圈采用 S 补偿)的强抗偏移无线充电系统。同时,为减小补偿元件应力,提高系统抗偏移性能,还提出基于电压波动率最小原则的 DDQ/DD 耦合机构和补偿参数联合优化设计方法。实现系统输出电压稳定,提升系统传输效率。但该方法在耦合机构的绕制上较为负载,同时系统采用了 2 种逆变器,拓扑网络器件较多,增加了系统成本。另外,肖蕙蕙等^[4]提出一种基于双层正交 DD(DQDD)线圈的高抗偏移偏转 WPT 系统,给出了 DQDD 线圈空间位置和导磁机构特征参数与耦合系数之间的作用规律,分析水平偏移、垂向偏移和垂向偏转 3 种情况下线圈互感的变化规律;同时构建基于双路逆变器-双路整流器的 LCC-S 谐振电路结构,提升了系统多方向的抗偏移能力。但该方法需要 2 组正交耦合机构,绕制较为复杂,系统需要 2 组逆变电路及谐振网络,在输出功率不足 1 kW 情况下,需要器件较多,增加了系统成本。闭环控制方面,李小飞等^[5]通过在 WPT 系统后级加入 Buck 变换器实现恒压输出,这种方式会增加系统功率变换级数,导致额外损耗,降低系统效率。文献[6-7]通过移相控制提高 WPT 系统的抗偏移性能,但该方法中,副边反馈信号需实时传输至原边,对无线通信要求高。谐振网络方面,任洁等^[8]将传统 LCL 拓扑中用于补偿的电感替换为 1 对耦合线圈,形成一种双耦合 LCL 拓扑 IPT 系统。

从国内外研究现状来看,大部分学者是通过耦合机构、谐振拓扑以及控制策略几个方面展开研究,虽然能够实现一定的抗偏移,但会增加系统成本,控制难度等。因此,提出一种新型耦合机构形成发射线圈一定区域内的均匀磁场,实现系统全向抗偏移。

1 EV-WPT 系统输出特性分析

如图 1 所示,电动汽车无线充电系统原理图,原边电路由 4 个 MOSFET($Q_1 \sim Q_4$)组成的逆变电路、原边谐振电路 L_{f1} 、 C_{f1} 和 C_p 以及原边线圈组成,原边发射线圈自感为 L_p ,内阻为 R_p 。副边 LCC 谐振电路由 L_s 、 L_{f2} 、 C_s 和 C_{f2} 组成,副边轨道线圈自感为 L_s ,内阻为 R_s 。发射线圈与接收线圈之间互感为 M_1 ,与接收端补偿线圈互感为 M_2 。全桥整流滤波电路($D_1 \sim D_4$)将接收线圈感应到的交流电变为直流电输出, R_L 为系统输出等效负载。

系统等效模型如图 2 所示,结合耦合机构设计,发射线圈、接收线圈和接收端补偿线圈均存在耦合。利用基尔霍夫电压定律(kirchhoff's voltage law, KVL),根据整流器的输入和输出电压之间的关系,忽略线圈的寄生阻力,推导出以下方程

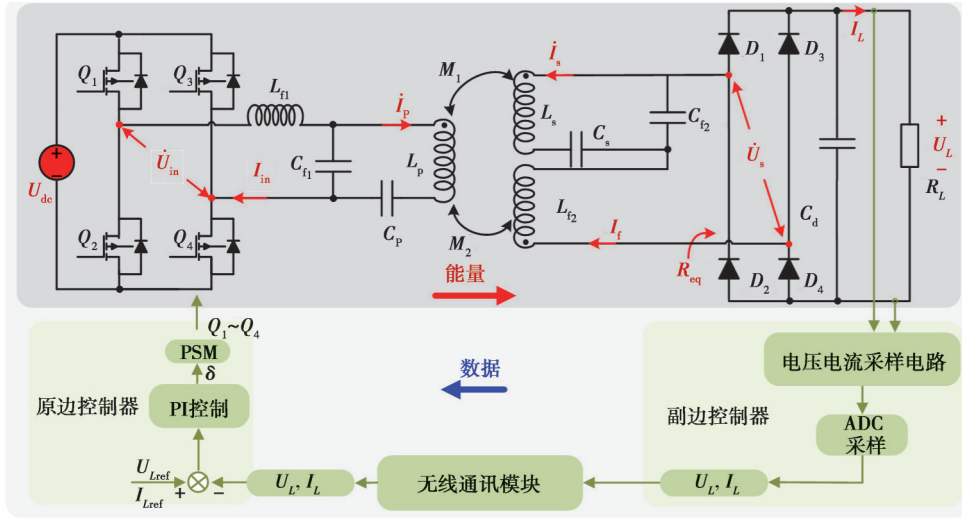


图 1 电动汽车无线充电系统原理图

Fig. 1 Electric vehicle wireless charging system schematic diagram

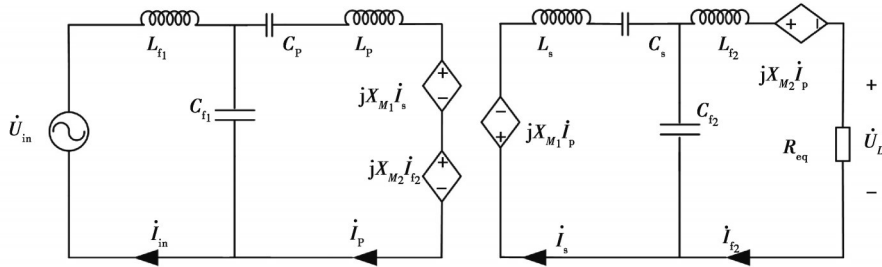


图 2 双边 LCC 系统等效模型

Fig. 2 Equivalent model of two-sided LCC system

$$\begin{cases} \dot{U}_{in} = (jX_{L_{f1}} - jX_{C_{f1}}) \dot{I}_{in} + jX_{C_{f1}} \dot{I}_p, \\ 0 = (jX_{L_p} - jX_{C_p} - jX_{C_{f1}}) \dot{I}_p + jX_{C_{f1}} \dot{I}_{in} - jX_{M1} \dot{I}_s - jX_{M2} \dot{I}_{f2}, \\ 0 = -jX_{M1} \dot{I}_p + (jX_{L_s} - jX_{C_s} + jX_{C_{f2}}) \dot{I}_s + jX_{C_{f2}} \dot{I}_{f2}, \\ 0 = (jX_{L_{f2}} + jX_{C_{f2}} + R_{eq}) \dot{I}_{f2} - jX_{M2} \dot{I}_p + jX_{C_{f2}} \dot{I}_s, \\ I_L = \frac{2\sqrt{2}}{p} I_{f2}, \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} X_{L_{f1}} = \omega L_{f1} & X_{C_{f1}} = 1/\omega C_{f1} & X_{L_p} = \omega L_p \\ X_{C_p} = 1/\omega C_p & X_{L_s} = \omega L_s & X_{C_s} = 1/\omega C_s \\ X_{M1} = \omega M_1 & X_{M2} = \omega M_2 & X_{L_{f2}} = \omega L_{f2} \\ X_{C_{f2}} = 1/\omega C_{f2} & R_{eq} = 8R_L(\pi^2)^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

系统工作在谐振状态时,

$$\begin{cases} j\omega L_{f1} + \frac{1}{j\omega C_{f1}} = 0, \\ j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_{f1}} + \frac{1}{j\omega C_p} = 0, \\ j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{1}{j\omega C_{f2}} = 0, \\ \frac{1}{j\omega C_{f2}} + j\omega L_{f2} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)(3)代入式(1)可得

$$I_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{dc}}{\omega L_{f_1}} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

$$I_L = \frac{8}{\pi^2} \frac{M_1 U_{dc}}{\omega L_{f_1} L_{f_2}} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (5)$$

由式(5)可以看出,系统输出电流与负载解耦,可以实现恒流输出,同时发射线圈和接收端补偿线圈的互感不影响系统的恒流输出特性。

2 全向抗偏移耦合机构设计

在磁耦合无线充电系统中,耦合机构是至关重要环节,能产生能量传输的耦合磁场,发射线圈通过交变电流产生交变磁场,这些磁场是看不见的,但是规律地穿过发射线圈形成回路,而接收线圈通过这些交变磁场进行耦合产生交变电流,为接收端的控制器及负载供电。随着无线电能传输技术的发展,耦合机构的类型也各种各样,针对不同应用场景需要设计不同的结构。较为常见的是平面型线圈,如方形线圈、圆形线圈、双D型线圈等。这些线圈的磁场方向会有所不同,就平面方形线圈与圆形线圈而言,产生的磁场是垂直于平面向上或向下的,与其耦合的线圈也必须是垂直穿过所在平面的线圈,所以一般的平面线圈都是成对出现。考虑该系统用于电动汽车领域,且无线充电系统的耦合机构安装在车辆底部,对其进行扁平化设计。同时由于车辆停靠过程中会引起各方向偏移,需对耦合机构的任意方向(360°)进行抗偏移设计。

笔者设计出一种新型耦合机构,在传统平面圆形线圈基础上,内部增加线圈匝数,外圆与内圆电流方向一致,其模型及磁场分布如图3所示。

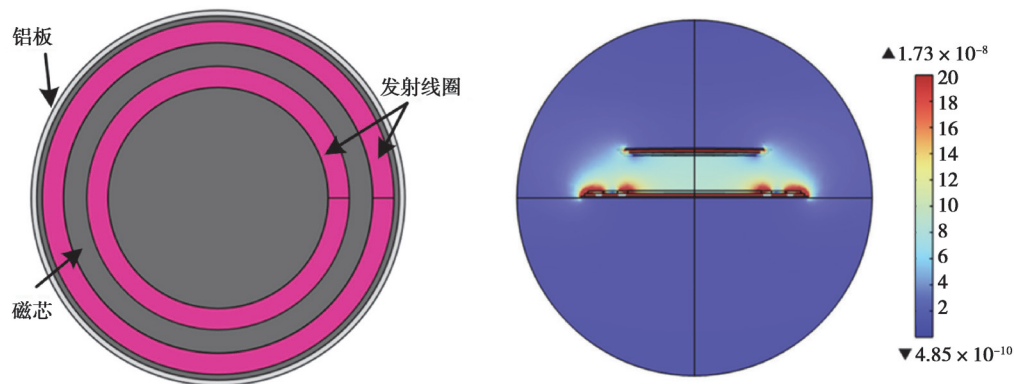


图3 发射线圈模型及磁场分布

Fig. 3 Transmitting coil model and magnetic field distribution

在匝数、尺寸以及线径相同的情况下,新型耦合机构与传统耦合机构对比结果如图4所示。综合分析,选择 $d_{1,2}=2\text{ cm}$ 开展后续研究。除绕制方式不同,其他参数一致的情况下,对比新型线圈与传统线圈的自感等参数变化结果如图5所示。

由上图可以看出,在同等条件下,线圈自感较于传统形式会减小,但是线圈之间的互感却明显增加,同时新型线圈的用线量也会减小很多。在前文的系统分析中,可以看出发射线圈与接收端补偿线圈之间的互感不会影响LCC-LCC系统的恒流输出特性,本文考虑将接收线圈与接收端补偿线圈做磁集成处理。利用双D型线圈与Q型线圈解耦这一特性,设计如图6所示的接收端模型。接收端线圈采用平面圆形线圈,而接收端补偿线圈采用2个绕制方向相反匝数不等的双Q型线圈。

综上所述,本文设计一种变匝间距且集成补偿线圈的耦合机构,各项参数如表1所示,其模型如图7所示。表1中, d 为耦合机构线径, $d_{p,1}$ 为发射线外圆直径, $d_{p,2}$ 为发射线内圆直径, $N_{p,1}$ 为发射线圈外圆匝数, $N_{p,2}$ 为发射线圈内圆匝数, d_s 为接收线圈直径, d_{f_2} 为接收端补偿线圈直径, N_s 为接收线圈匝数, $N_{f_2,1}$ 为补偿线圈外圆匝数, $N_{f_2,2}$ 为补偿线圈内圆匝数,通过仿真得到结果如图8。

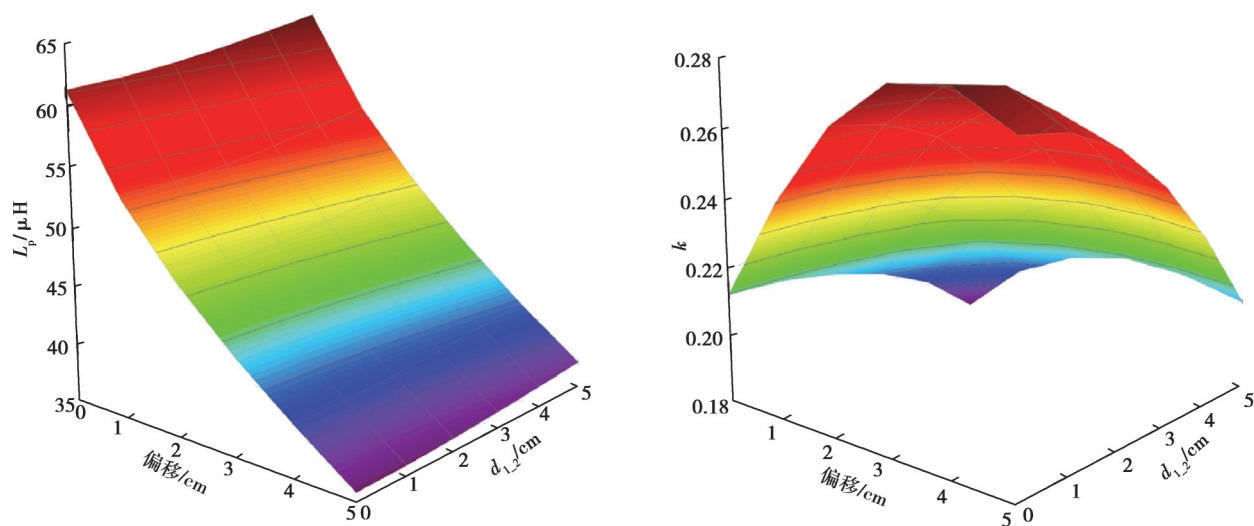


图4 发射线圈自感及耦合机构与偏移距离关系

Fig. 4 The relationship between the self-inductance of the transmitting coil, the coupling mechanism and the offset distance

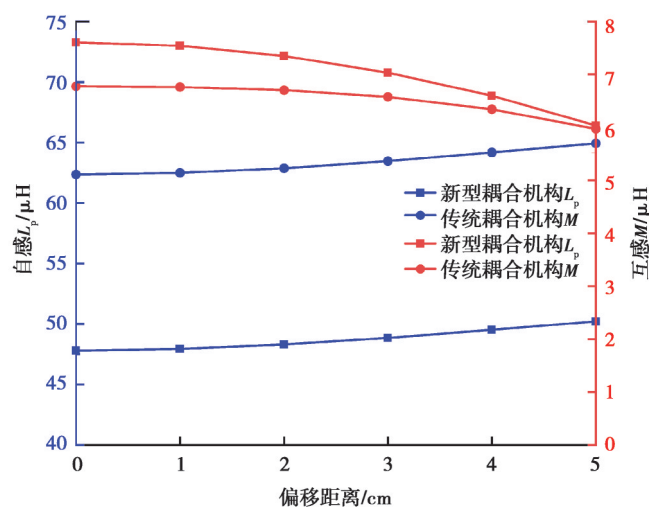


图5 新型线圈与传统线圈的自感等参数变化

Fig. 5 Changes in parameters such as self-inductance of new coils and traditional coils

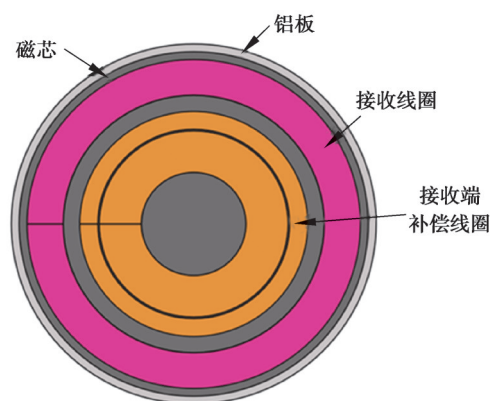


图6 接收端耦合机构模型

Fig. 6 Coupling mechanism model of receiving end

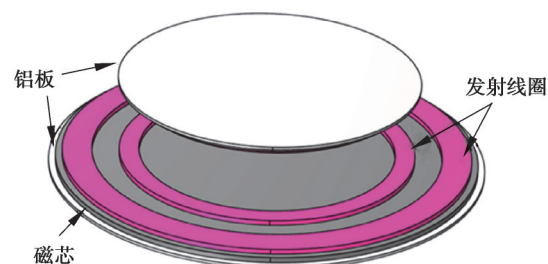


图7 新型耦合机构模型

Fig. 7 New coupling mechanism model

表 1 线圈参数
Table 1 Coil parameters

参数	数值	参数	数值
d/mm	3.4	d_s/cm	20
d_{p_1}/cm	30.0	d_{t_2}/cm	14
d_{p_2}/cm	22.0	N_s	6
N_{p_1}	5.0	$N_{f_{2-1}}$	3
N_{p_2}	5.0	$N_{f_{2-2}}$	7

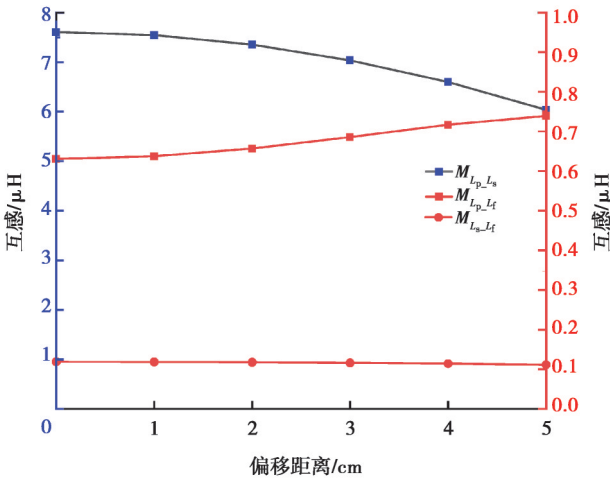


图 8 新型线圈与传统线圈的自感等参数变化

Fig. 8 Changes in parameters such as self-inductance of new coils and traditional coils

其中, $M_{L_p-L_s}$ 为发射线圈与接收线圈之间互感, $M_{L_p-L_{t_2}}$ 为发射线圈与接收线圈之间互感, $M_{L_s-L_{t_2}}$ 为发射线圈与接收线圈之间互感。由上图可以看出,接收线圈与补偿线圈互感相对于能量线圈之间的互感小很多,对系统影响忽略不计。

3 系统仿真

发射端回路由 1 个逆变器和 LCC 谐振网络组成。接收端电路则由接收端谐振网络和不可控整流电路组成。系统直流输入通过逆变器输出高频交流电并向发射端谐振网络注入能量,能量大小可通过移相控制环节进行控制,经过耦合机构向接收端传输能量,通过整流滤波电路向负载输出直流电。系统参数值如表 2 所示。为验证电动汽车无线充电系统恒压、恒流切换的可行性,特在 MATLAB/Simulink 中搭建 1 套输出为 55V/27 A 的电路模型,如图 9 所示。

表 2 系统参数
Table 2 The system parameter

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	400.00	f/kHz	100.0
$L_p/\mu\text{H}$	49.00	$L_s/\mu\text{H}$	17.0
$L_{t_1}/\mu\text{H}$	25.00	$L_{t_2}/\mu\text{H}$	7.3
C_{t_1}/nF	126.13	C_s/nF	215.0
C_p/nF	68.00	C_{t_2}/nF	410.0

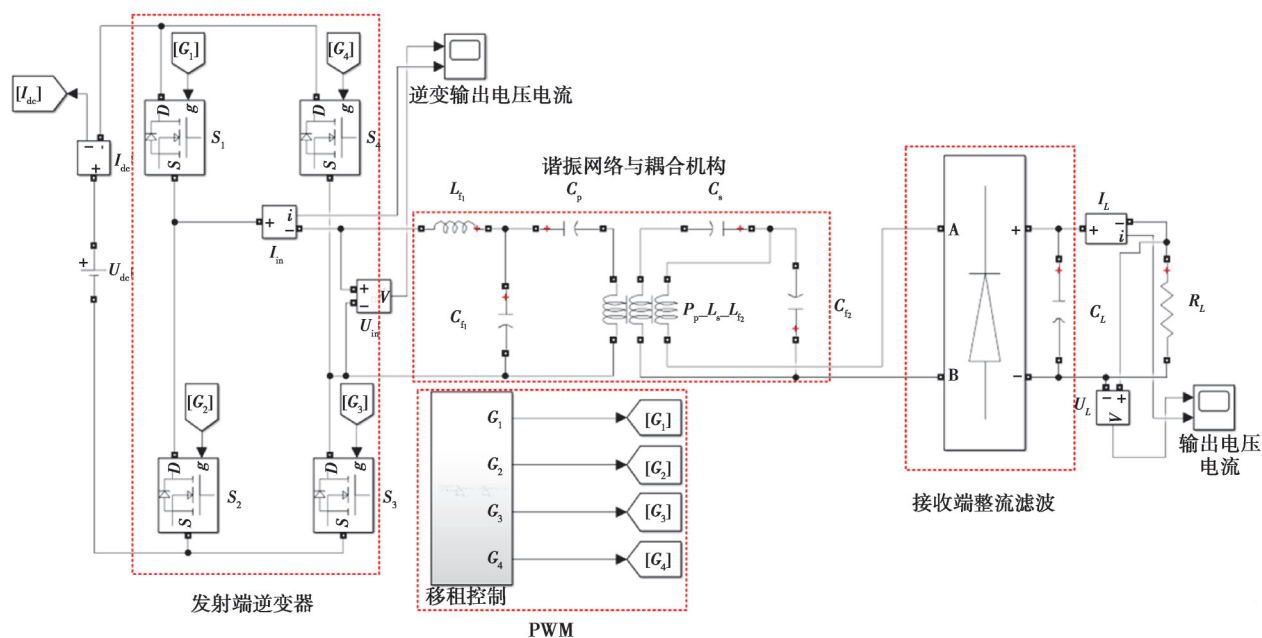


图 9 电动汽车无线充电系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of electric vehicle wireless charging system

选用谐振频率 $f=100\text{ kHz}$, 输入电压 $U_{dc}=400\text{ V}$, 耦合机构和谐振网络参数与表 2 保持一致, 得到逆变器与系统输出端电压, 电流波形如图 10 所示。

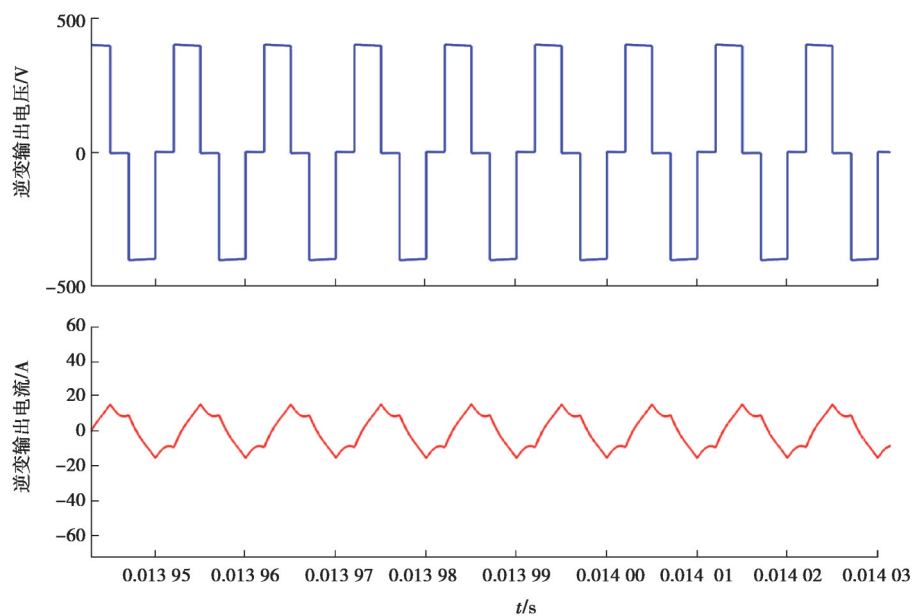


图 10 逆变输出电压电流波形

Fig. 10 Inverter output voltage and current waveform

可以清晰看出, 逆变器谐振网络呈弱感性可以实现 ZVS。系统输出电流波形如图 11 所示, 输出电流在负载切换过程中基本恒定, 实现了良好的恒流输出。

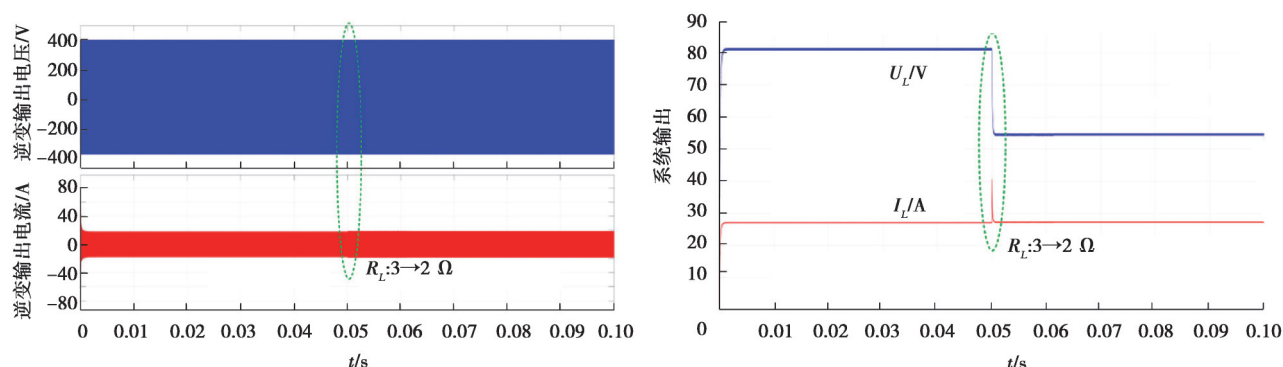


图 11 负载切换时逆变器与系统输出电压电流波形

Fig. 11 Output voltage and current waveforms of inverter and system during load switching

4 结 论

本文设计出一种新型的耦合机构,使原边线圈在一定区域内形成均匀磁场,使耦合机构实现全向的抗偏移,并用杂间距的设计方式增大能量线圈之间互感的同时,减小发射线圈自感和线圈绕制的用线量。同时利用双D型线圈与Q型线圈的解耦特性,将接收线圈与接收端补偿线圈做磁集成处理,节省空间以及磁芯的用量。最后搭建输出功率达1.4 kW的仿真模型,验证系统的恒流输出效果。

参 考 文 献

- [1] 范天骐,张越,陆一凡.无线充电技术在电动汽车上的发展现状及趋势[J].时代汽车,2023(1):109-111.
Fan T C, Zhang Y, Lu Y F. The development status and trend of wireless charging technology in electric vehicles[J]. Auto Time, 2023(1): 109-111.(in Chinese)
- [2] 余金永,段佳钢.电动汽车无线充电技术的研究与应用[J].时代汽车,2022(1):125-126.
Yu J Y, Duan J G. Research and application of wireless charging technology for electric vehicles[J]. Auto Time, 2022(1): 125-126.(in Chinese)
- [3] 庄廷伟,姚友素,袁悦,等.基于DDQ/DD耦合机构的强抗偏移电动汽车用无线充电系统[J].中国电机工程学报,2022,42(15):5675-5685.
Zhuang T W, Yao Y S, Yuan Y, et al. A DDQ/DD-coupler-based wireless power transfer system for electric vehicles charging featuring high misalignment tolerance[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5675-5685.(in Chinese)
- [4] 肖蕙蕙,周青山,熊山香,等.基于双层正交DD线圈抗偏移偏转的无线电能传输系统[J].电工技术学报,2022,37(16):4004-4018.
Xiao H H, Zhou Q S, Xiong S X, et al. Wireless power transfer system based on double-layer quadrature double-D coupling structure with anti-misalignment and anti-deflection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4004-4018.(in Chinese)
- [5] Li X F, Dai X, Li Y L, et al. Coupling coefficient identification for maximum power transfer in WPT system via impedance matching[C]//2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer. Knoxville, TN, USA: IEEE, 2016: 27-30.
- [6] Li H C, Chen S X, Fang J Y, et al. Synchronous rectification-based phase shift keying communication for wireless power transfer systems[C]//2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference. Singapore: IEEE, 2018: 1-4.
- [7] Berger A, Agostinelli M, Vesti S, et al. A wireless charging system applying phase-shift and amplitude control to maximize efficiency and extractable power[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6338-6348.
- [8] 任洁,周坤卓,李宏超,等.基于DDQ线圈的双耦合LCL拓扑IPT系统及其抗偏移方法研究[J].中国电机工程学报,2019,39(9):2778-2788.
Ren J, Zhou K Z, Li H C, et al. Study of dual coupled LCL topology IPT system based on DDQ coils and its anti-misalignment method[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2778-2788.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)