

基于参数优化的抗偏移无线电能传输系统

王鹏,李中照,巩兆伟,张宁超

(西安工业大学 电子信息工程学院,陕西 西安 710016)

摘要:为解决无线电能传输系统中耦合机构偏移问题,提出基于参数优化的S-S与LCC-LCC双拓扑无线电能传输系统。首先对S-S,LCC-LCC拓扑能量传输通道进行输出特性分析,根据电流输出条件选取DDQ线圈结构实现其解耦特性,然后为了具有更好的抗偏移特性,提出一种参数优化方法对补偿网络的参数进行优化。最后搭建实验样机验证理论的可行性。实验结果表明,优化后的系统耦合机构最大偏移量可达160 mm,电流增益波动范围0.163 1~0.180 1,电流波动比例为 $\pm 4.9\%$,系统效率最高可达89.47%。

关键词:无线电能传输;参数优化;双拓扑;抗偏移

中图分类号:TM724 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23217

Anti-offset Wireless Power Transfer System Based on Parameter Optimization

WANG Peng, LI Zhongzhao, GONG Zhaowei, ZHANG Ningchao

(Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710016, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problem of coupling mechanism offset in wireless power transfer system, the S-S and LCC-LCC dual topological wireless power transfer system based on parameter optimization was proposed. Firstly, the output characteristics of S-S and LCC-LCC topological energy transmission channels were analyzed. According to the current output conditions, DDQ coil structures were selected to achieve their decoupling characteristics. Then, in order to have better anti-offset characteristics, a parameter optimization method was proposed to optimize the parameters of compensation network. Finally, an experimental prototype was built to verify the feasibility of the theory. The experimental results show that the maximum offset of the optimized coupling mechanism was up to 160 mm, the current gain fluctuation range was 0.163 1~0.180 1, the current fluctuation ratio was $\pm 4.9\%$, and the system efficiency was up to 89.47%.

Key words: wireless power transfer(WPT);parameter optimization;dual topology;anti-offset

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术是指一种借助于物理空间中的能量载体(如磁场、电场、电磁波、微波等),采用非导线接触方式,实现电能由电源侧传输至负载侧的技术^[1-3]。区别于传统的有线供电,无线供电系统利用耦合机构线圈间的磁场耦合实现较大距离的电能传输,避免了导电装置的直接物理接触,具有很高的安全性^[4]。因此在医疗、电子产品、水下供电、电动汽车充电和轨道交通等领域得到广泛应用^[5-9]。

在充电过程中,发射和接收两线圈间难免会发生相对偏移(横向偏移和垂直偏移,主要是横

向偏移),从而影响两线圈间互感,导致传输效率下降,这成为制约无线充电技术广泛应用的关键因素^[10]。为了提高无线电能传输系统耦合机构的抗偏移能力,研究主要集中在控制策略、磁耦合机构设计、参数优化及补偿网络设计等四个方面。文献[11]通过在系统中加入控制方案使得耦合机构在偏移情况下,仍然保证系统输出恒定,稳定系统的输出功率,达到抗偏移的效果。文献[12]通过提出了一种带有系列螺线管和DD垫(solenoid and double D pads, SDDP)的松散耦合变压器结构,以提高WPT系统的抗偏移性。文献[13]通过

基金项目:西安市科技计划项目(2020KJRC0035)

作者简介:王鹏(1979—),男,博士,教授,Email:Wangpeng@xatu.edu.cn

通讯作者:李中照(1996—),女,硕士研究生,Email:dzyxlz123@163.com

分析二次侧半桥整流器对充电电压的调节作用,得出占空比与充电电压的关系,采用PI控制算法实现变负载的恒压充电。文献[14]提出一种基于串联补偿拓扑的电路参数优化方法,来提高系统在负荷变化和耦合机构偏移情况下电压增益的平稳性。

研究具有抗偏移能力的拓扑结构,可以大大减少无线电能传输系统的复杂控制策略^[15-16]。为了降低系统对于系统耦合机构变化的敏感度,增强系统抗偏移能力,本文对S-S与LCC-LCC混合拓扑结构进行分析,发现该混合拓扑电路在耦合机构线圈交叉耦合为零的条件下具有抗偏移恒流输出特性。耦合机构线圈选取DDQ线圈(double D quadrant coil)结构,利用DD线圈(double D coil)与Q线圈解耦特性,实现横向的抗偏移恒流输出。然后分析不同参数下系统输出特性,提出一种参数优化方法对系统参数展开优化设计,通过调整参数取值来实现提升无线电能传输系统传输性能的目的。最后,搭建系统原理样机,验证该方法的有效性和可行性。

1 混合拓扑电路输出特性

将S-S与LCC-LCC补偿网络输入端并联,输出端并联,构成图1所示S-S与LCC-LCC混合拓扑电路。

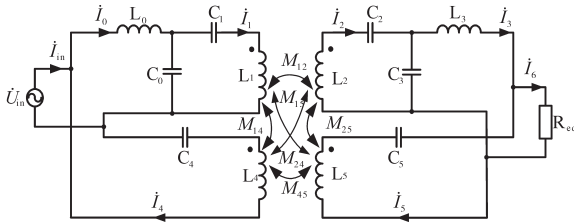


图1 S-S与LCC-LCC混合拓扑电路

Fig.1 S-S and LCC-LCC hybrid topology circuit

图1中,原边补偿电路由电感 L_0 ,电容 C_0 ,电容 C_1 及电容 C_4 构成,副边补偿电路由电容 C_2 ,电容 C_3 ,电感 L_3 及电容 C_5 构成;耦合机构线圈 L_1, L_2, L_4, L_5 ;四线圈的互感 M_{12}, M_{45} ,同时也产生交叉耦合 $M_{14}, M_{15}, M_{24}, M_{25}$ 。

1.1 LCC-LCC拓扑通道

列写LCC-LCC通道KVL方程整理可得:

$$\begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & 0 & 0 \\ Z_{01} & Z_{11} & Z_{12} & 0 \\ 0 & Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} \\ 0 & 0 & Z_{23} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} Z_{00} = j\omega L_0 + (j\omega C_0)^{-1} \\ Z_{01} = -(j\omega C_0)^{-1} \\ Z_{11} = (j\omega C_0)^{-1} + (j\omega C_1)^{-1} + j\omega L_1 \\ Z_{12} = -j\omega M_{12} \\ Z_{22} = j\omega L_2 + (j\omega C_2)^{-1} + (j\omega C_3)^{-1} \\ Z_{23} = -(j\omega C_3)^{-1} \\ Z_{33} = j\omega L_3 + (j\omega C_3)^{-1} + R_{eq} \end{cases} \quad (2)$$

当谐振元件参数与系统工作频率满足:

$$\begin{cases} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0} = 0 \\ \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_0} = 0 \\ \omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} = 0 \\ \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} - \frac{1}{\omega C_3} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

可以通过式(1)~式(3)求解得出LCC-LCC通道输出电流及输入电流为

$$\dot{I}_3 = \frac{M_{12} \dot{U}_{in}}{j\omega L_0 L_3} \quad (4)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{M_{12}^2 \dot{U}_{in} R_{eq}}{\omega^2 L_0^2 L_3^2} \quad (5)$$

由式(4)得出该传输通道输出电流 $\dot{I}_3$ 与输入电压、线圈间互感 M_{12} 及补偿电感 L_0, L_3 有关,与负载 R_{eq} 无关,同时与 M_{12} 呈线性关系。由式(5)可知,输入电流 $\dot{I}_0$ 与输入电压同相位,系统LCC-LCC拓扑通道输入阻抗呈纯阻性,当系统工作在谐振状态时,LCC-LCC拓扑通道的无功功率为零。

1.2 S-S拓扑通道

列写S-S拓扑通道KVL方程:

$$\begin{cases} (j\omega L_4 + \frac{1}{j\omega C_4}) \dot{I}_4 - j\omega M_{45} \dot{I}_5 = -\dot{U}_{in} \\ j\omega M_{45} \dot{I}_4 - (j\omega L_5 + \frac{1}{j\omega C_5} + R_{eq}) \dot{I}_5 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当谐振元件参数与系统工作频率满足:

$$\begin{cases} \omega L_4 = \frac{1}{\omega C_4} \\ \omega L_5 = \frac{1}{\omega C_5} \end{cases} \quad (7)$$

通过式(6)~式(7)得出S-S通道输出电流及输入电流为

$$i_5 = \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega M_{45}} \quad (8)$$

$$i_4 = -\frac{R_{eq} \dot{U}_{in}}{\omega^2 M_{45}^2} \quad (9)$$

由式(8)得出该传输通道输出电流 i_5 仅与输入电压 $\dot{U}_{in}$ 、线圈间互感 M_{45} 有关,与负载 R_{eq} 无关。输入电流相位滞后输入电压 90° ,输出电流与互感 M_{45} 呈反比例关系。

因此,在不考虑交叉耦合,即 $M_{14}, M_{15}, M_{24}, M_{25}$ 为零时, S-S 与 LCC-LCC 混合拓扑电路的总输出电流的表达式如下:

$$i_6 = i_3 + i_5 = \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega} \left(\frac{M_{12}}{L_0 L_3} + \frac{1}{M_{45}} \right) \quad (10)$$

分析式(4)、式(8)、式(10),当输入电压及 L_0, L_3 一定时,输出电流仅与互感 M_{12}, M_{45} 有关,输出电流与 M_{12} 呈线性关系,输出电流与 M_{45} 呈线性关系。则 L_0, L_3 取值不同时,可得到不同的互感变化曲线,合理选取 L_0, L_3 系统即可实现抗偏移特性。当耦合机构偏移较小时,输出电流的大小主要取决于 LCC-LCC 拓扑通道;当耦合机构偏移增大时, LCC-LCC 拓扑通道输出电流减小,而 S-S 拓扑通道输出电流增大,输出电流主要取决于 S-S 拓扑通道。

1.3 DDQ 结构线圈选取

多发射线圈交替工作是提高无线充电系统效率的有效途径。

要实现 S-S 与 LCC-LCC 混合拓扑电路的抗偏移恒流输出特性,两对初、次级线圈间交叉耦合 $M_{14}, M_{15}, M_{24}, M_{25}$ 必须为零。而 Q 形线圈与 DD 形线圈间的耦合为零,则采用 DDQ 结构线圈作为耦合机构来消除交叉耦合。DDQ 型线圈结构及参数如图 2 所示。

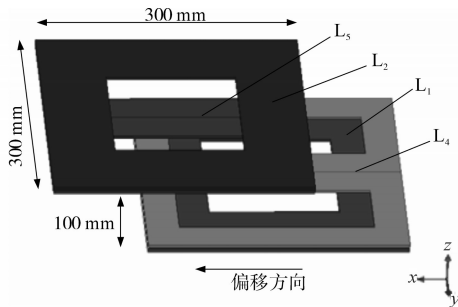


图2 DDQ型线圈结构及参数

Fig.2 Structure and parameters of DDQ coils

如图 2 所示,其中 L_1, L_2 为 Q 线圈, L_4, L_5 为 DD 线圈, DD 线圈与 Q 线圈的大小均为 $300 \text{ mm} \times 300$

mm, DD 线圈与 Q 线圈之前的距离为 100 mm , 系统耦合机构沿 x 轴方向发生偏移。

发生偏移时,使用 RLC 高精度测试仪对实际线圈的互感进行测量,不同类型线圈 L_1, L_2 与 L_4, L_5 间的互感始终为零,测得 DD 线圈与 DD 线圈间互感变化 M_{DD} , Q 线圈与 Q 线圈间的互感变化曲线 M_Q 以及将 M_{DD} 向上平移以便比较互感的变化趋势,如图 3 所示。

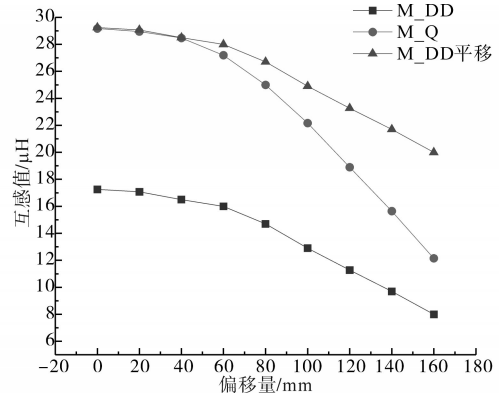


图3 互感值变化曲线

Fig.3 Change curves of inductance value

分析图 3 可以得出, DD 线圈间互感 M_{DD} 与 Q 线圈间互感 M_Q 都会减小。但比较曲线 M_{DD} 平移与 M_Q , DD 线圈的互感变化较缓,在偏移大于 100 mm 后, Q 线圈的互感下降更快。

根据上节分析, LCC-LCC 拓扑通道输出电流与互感呈正比例关系,而 LC-LC 拓扑通道输出的电流与互感呈反比例关系。如果 LC-LC 拓扑通道的耦合机构为 Q 型线圈,那么输出电流变化将会加快,所以, LC-LC 拓扑通道的耦合机构为 DD 型线圈, LCC-LCC 拓扑通道的耦合机构为 Q 型线圈。

2 系统输出特性分析

根据式(10)得出电流增益表达式如下:

$$G = \frac{M_{12}}{L_0 L_3} + \frac{1}{M_{45}} \quad (11)$$

式(11)中 L_0, L_3 满足 $L_0 = L_3$, M_{45}, M_{12} 满足线性关系 $M_{45} = aM_{12} + b$, 则式(11)可改写为

$$G = \frac{M_{12}}{L_0^2} + \frac{1}{aM_{45} + b} \quad (12)$$

不同参数 L_0 取值使得系统输出电流增益呈现不同的变化趋势,为了直观地反映不同参数下系统的增益变化,选取一组 a, b ,画出不同参数取值下的输出电流增益值,如图 4 所示。通

过图4可以得出,系统输出电流增益的变化趋势如下:

1)当互感值 M_{12} 相同的情况下,参数 L_0, L_3 的值越大,系统输出电流增益值 G 越小;

2)当系统耦合机构由无偏移到偏移值较小,即互感值 M_{12} 逐渐减小时,系统输出电流增益值 G 逐渐减小到最低点;之后互感值 M_{12} 减小而电流增益 G 呈上升趋势。

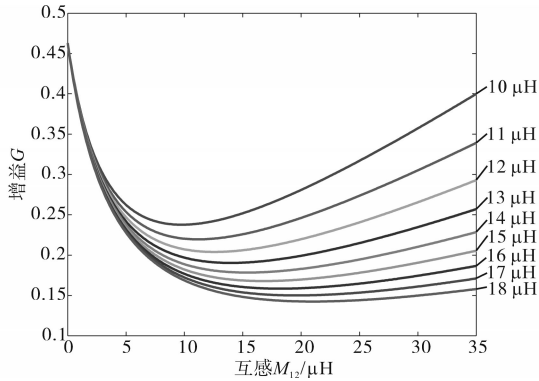


图4 不同参数下输出增益

Fig.4 Output gains under different parameters

3 系统参数优化

3.1 优化方法

由上节分析可知,合理的选择系统参数 L_0, L_3 ,可以使系统输出在一定的偏差范围内,互感值变化范围达到最大,具有更好的抗偏移特性。本文提出一种方法用于最优参数的选取:使用RLC高精度测试仪测得耦合线圈无偏移时的互感值 M_{12_max} ,计算不同参数 L_0 下最大互感值 M_{12_max} 对应的电流增益值 G_{max} ,在其电流增益 G 波动不超过 $\pm c\%$ 时,使得互感区间 $[M_{12_min}, M_{12_max}]$ 达到最大。图5所示为最优参数选取。

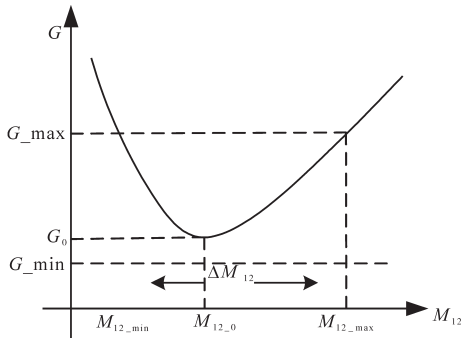


图5 最优参数选取

Fig.5 Optimal parameter selection

具体优化步骤如下:

1)确定每个参数 L_0 下, M_{12_max} 对应的电流增益值 G_{max} ;

2)根据 G_{max} 及系统输出电流增益 G 的波动比例为 $\pm c\%$,确定电流增益的波动范围为 $[G_{min}, G_{max}]$,其中:

$$\begin{cases} G_{max} = G(1 + c\%) \\ G_{min} = G(1 - c\%) \end{cases} \quad (13)$$

3)确定每个参数 L_0 对应的最小互感值 M_{12_0} 及其对应的电流增益值 G_0 ;

4)比较 G_{min}, G_0 ,当 $G_{min} > G_0$,此时互感变化区间 $[M_{12_min}, M_{12_max}]$ 最小,令对应区间长度 $\Delta M = 0$;当 $G_{min} \leq G_0$,记录互感变化区间 $[M_{12_min}, M_{12_max}]$ 及其区间对应长度 ΔM ;

5)选取各参数中最大 ΔM ,其对应的 L_0 为最优参数, $[M_{12_min}, M_{12_max}]$ 为最优互感变化区间, $[G_0, G_{max}]$ 为最优电流增益的波动区间。

3.2 最优参数优化过程

采用上节提出的优化方法,对系统参数 L_0 进行优化选取。在优化参数前,使用RLC高精度测试仪测得耦合机构最大互感值 $M_{12_max} = 29.175 \mu\text{H}$ 及 M_{45}, M_{12} 的线性关系。参数优化思路为:计算不同参数 L_0 在电流增益波动比例 $\pm 5\%$ 时的互感值区间 $[M_{12_min}, M_{12_max}]$,选取最大 ΔM ,那么其对应的参数就是全局最优参数,则此参数对应的系统抗偏移性达到更优。参数最优参数优化取值如表1所示,优化的具体流程图如图6所示。

表1 系统参数的取值

Tab.1 WPT system parameter value

参数	取值
最大互感值 $M_{12_max}/\mu\text{H}$	29.175
待优化参数 $L_0/\mu\text{H}$	10~18
电流增益 G 波动比例 $\pm c\%$	$\pm 5\%$
$M_{45} = aM_{12} + b$ 中 a, b	0.51, 2.16

通过采用Matlab软件根据上述方法优化系统参数。参数优化后的取值如表2所示。上节提出的参数优化方法可用于其他拓扑网络的参数设计优化,具有普遍使用性。

表2 系统最优参数的取值

Tab.2 WPT system optimal parameter value

参数	取值
最优参数 $L_0/\mu\text{H}$	15.5
最优互感变化区间 $[M_{12_min}, M_{12_max}]/\mu\text{H}$	[9.86, 29.175]
最优互感区间长度 $\Delta M/\mu\text{H}$	19.315
最优电流增益的波动区间 $[G_{min}, G_{max}]$	[0.163, 0.180 1]
最优电流增益标准值 G	0.171 6
电流增益波动比例 $\pm c\%$	$\pm 4.9\%$

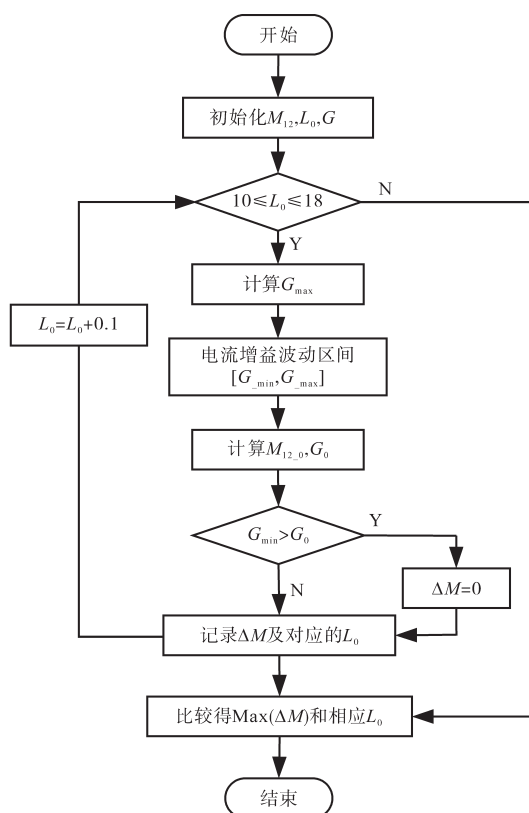


图6 最优参数选取流程图

Fig.6 Flow chart of optimal parameter selection

4 实验验证

采用 Matlab 软件仿真得到该混合拓扑结构参数优化后的系统输出电流 I_{out} 与耦合机构互感 M_{12} 、负载 R_L 的三维曲面图如图 7 所示。分析可得该优化参数下的混合拓扑系统输出的电流变化与负载无关,且输出电流变化较为平缓,呈先下降后上升的趋势。

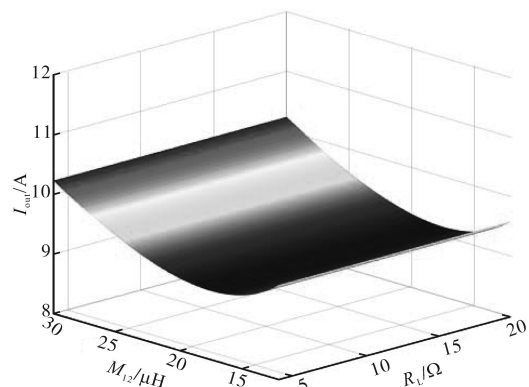


图7 输出变化图

Fig.7 Output variation diagram

对理论分析进行实验验证,实验中系统各参数取值如下表 3 所示。

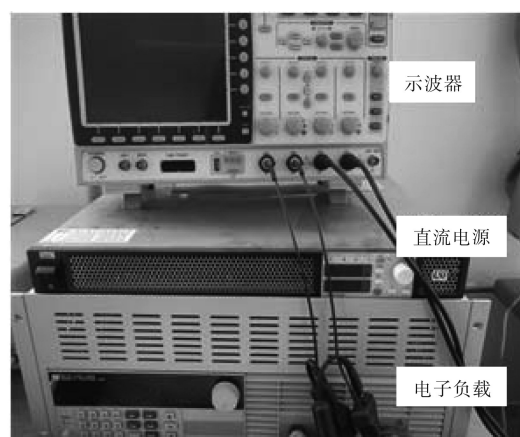
搭建如图 8 所示的 IPT 系统实验验证平台,

系统采用直径为 4.0 mm 的高频利兹线,初级次级线圈中 DD 线圈及 Q 线圈外围大小均为 300 mm×300 mm,初级线圈与次级线圈间距为 100 mm。

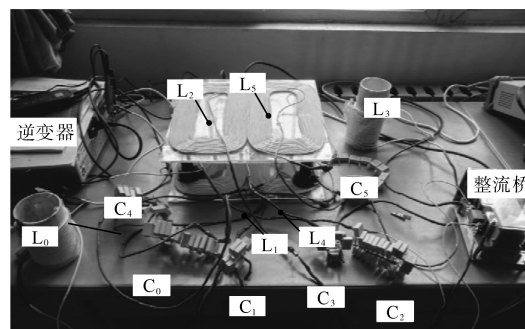
表3 系统实验参数值

Tab.3 WPT system experiment parameter value

参数	取值	参数	取值
系统工作频率/kHz	85	电感 $L_3/\mu\text{H}$	15.6
直流电源电压 E/V	30	电容 C_0/nF	226.3
初级线圈 L_1 自感/ μH	150	电容 C_1/nF	26.1
次级线圈 L_2 自感/ μH	149.8	电容 C_2/nF	25.9
初级线圈 L_4 自感/ μH	160.6	电容 C_3/nF	226.5
次级线圈 L_5 自感/ μH	160.4	电容 C_4/nF	21.6
电感 $L_0/\mu\text{H}$	15.5	电容 C_5/nF	21.8



(a)实物图1



(b)实物图2

图8 实验装置图

Fig.8 Experimental setup diagram

本文实验以 6 Ω 负载为例,在系统耦合机构向下偏移 0~160 mm 的范围内,系统的输出电流的波动范围始终介于 ±4.9% 范围内。

图 9 为负载 6 Ω,系统偏移量分别为 0 mm, 80 mm, 160 mm 时,逆变器输出电压及电流、负载端电压及电流波形。系统在 3 个偏移量处的输出电流分别为 9.914 A, 9.472 A, 9.854 A。输出电流的变化率最大为 4.4%,满足优化要求,系统最大传输效率可达 89.47%。

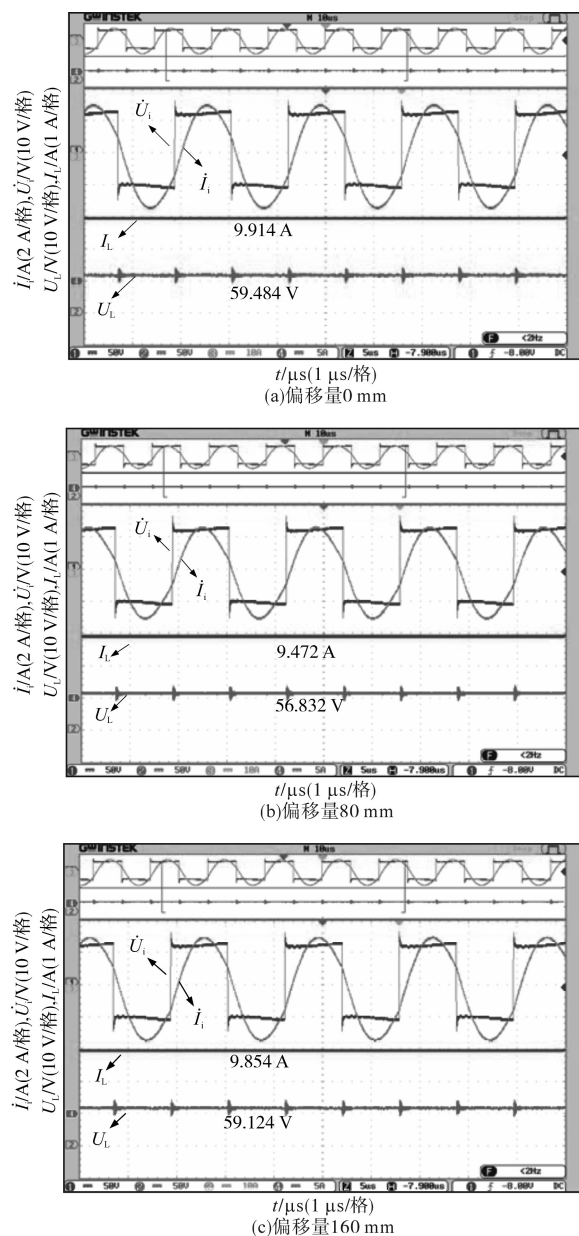


图9 系统输出波形

Fig.9 System output waveforms

5 结论

提出一种基于参数优化S-S与LCC-LCC混合拓扑电路的无线电能传输系统。首先,对补偿电路中S-S与LCC-LCC双能量传输通道进行分析,得出在交叉耦合为零的条件下系统具有抗偏移性,选取DDQ结构消除交叉耦合。为了使系统具有更好的抗偏移特性,提出一种参数优化的方法对系统中的各参数进行优化。优化后的参数系统耦合机构的偏移量可以达到最大,互感变化范围是 $9.86\sim 29.175\ \mu\text{H}$,电流增益波动比例 $\pm 4.9\%$,同时,参数优化后的系统传输效率最高

可达89.47%。

参考文献

- [1] 杨若冰,王琳.磁耦合无线电能传输系统研究与前景展望[J].电子技术与软件工程,2019(1):218-219.
Yang Ruobing, Wang Lin. Research and prospect of magnetically coupled radio energy transmission system[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(1):218-219.
- [2] 朱运晓,段平平.基于初级线圈切换的三相无线供电平台设计[J].电气传动,2018,48(9):93-96.
Zhu Yunxiao, Duan Pingping. Design of three-phase wireless power supply platform based on primary coil switching[J]. Electric Drive, 2018, 48(9):93-96.
- [3] Pearce M G S, Covic G A, Boys J T. Reduced ferrite double D pad for roadway IPT applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5055-5068.
- [4] 沈栋,杜贵平,丘东元,等.无线电能传输系统电磁兼容研究现状及发展趋势[J].电工技术学报,2020,35(13):2855-2869.
Shen Dong, Du Guiping, Qiu Dongyuan, et al. Research status and development trend of electromagnetic compatibility of wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13):2855-2869.
- [5] Lopes I F, Valle R Lacerda, Fogli G Azevedo, et al. Low-frequency underwater wireless power transfer: maximum efficiency tracking strategy[J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(7): 1200-1208.
- [6] 赵军,李乃良,王磊,等.电动汽车无线充电系统对人体及体内植入器件电磁安全研究[J].电工技术学报,2018,33(S1):26-33.
Zhao Jun, Li Nailiang, Wang Lei, et al. Research on electromagnetic safety of electric vehicle wireless charging system to human body and implanted devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1):26-33.
- [7] 薛明,杨庆新,章鹏程,等.无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J].电工技术学报,2021,36(8):1547-1568.
Xue Ming, Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8):1547-1568.
- [8] Yang Y, Dai C, Long Z, et al. Research on contactless power supply system of medium speed maglev train based on inductive power transfer[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020:2068-2073.
- [9] Zhang Y, Chen S, Li X, et al. Design methodology of free-positioning non-overlapping wireless charging for consumer electronics based on antiparallel windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 69(1):825-834.
- [10] 吴理豪,张波.电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J].电工技术学报,2020,35(8):1662-1678.

(下转第44页)

- [J]. 电气传动, 2020, 50(2): 55-62.
- Wang Lan, Chen Li. Fault-tolerant control technology of three-phase four-switch active power filter[J]. Electric Drive, 2020, 50(2): 55-62.
- [9] 张建忠, 耿治, 徐帅. 基于T型逆变器的APF故障诊断与容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 245-255, 339.
- Zhang Jianzhong, Geng Zhi, Xu Shuai. APF fault diagnosis and fault-tolerant control based on T-type inverter [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 39(1): 245-255, 339.
- [10] 马晓伟. 四桥臂有源电力滤波器IGBT开路故障诊断与容错控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Ma Xiaowei. Research on IGBT open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control for four-leg active power filter[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [11] 陈仲, 许亚明, 王志辉, 等. 航空高压直流电网低频纹波的有源抑制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 151-158.
- Chen Zhong, Xu Yaming, Wang Zhihui, *et al.* Active inhibition of the low frequency ripple in aeronautical high voltage DC power system[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2015, 30(20): 151-158.
- [12] 汪玉凤, 祝杰, 张影. 基于H桥电压与电流的级联SAPF故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 80-84, 92.
- Wang Yufeng, Zhu Jie, Zhang Ying. Cascade SAPF fault diagnosis method based on H-bridge voltage and current[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2019, 31(6): 80-84, 92.
- [13] 韩丽, 罗朋, 汤家升, 等. 基于H桥变流器的IGBT开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 163-171.
- Han Li, Luo Peng, Tang Jiasheng, *et al.* Fault diagnosis research based on the H-bridge inverter IGBT open circuit[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2016, 31(16): 163-171.
- [14] 高晓芝, 乔宇, 孙会琴, 等. 一种新型直流微电网DC-APF控制策略[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(4): 303-314.
- Gao Xiaozhi, Qiao Yu, Sun Huiqin, *et al.* A new DC-APF control strategy for DC microgrid[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(4): 303-314.
- [15] 郭振, 乐全明, 郭力, 等. 交直流混合微电网中直流母线电压纹波抑制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2896-2904.
- Guo Zhen, Yue Quanming, Guo Li, *et al.* Control method of DC bus voltage ripple mitigation in hybrid AC/DC microgrid[J]. Grid Technology, 2017, 41(9): 2896-2904.

收稿日期: 2021-01-09

修改稿日期: 2021-02-28

(上接第36页)

- Wu Lihao, Zhang Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: Part II[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1662-1678.
- [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 of wireless charging system with variable load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society. 2017, 32(13): 130-136.
- [12] Mai J, Wang Y, Yao Y, *et al.* High-misalignment tolerant IPT systems with solenoid and double D pads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 69(4): 3527-3535.
- [13] 郭丕凤, 邹必昌. 双边控制的恒压无线充电系统设计[J]. 电气传动, 2020, 50(7): 113-117.
- Guo Pifeng, Zou Bichang. Design of constant-voltage wireless charging system with dual-side control[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 113-117.
- [14] 任洁, 刘野然, 岳鹏飞, 等. 基于参数优化法的输出抗偏移感应电能传输系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1452-1461.
- Ren Jie, Liu Yeran, Yue Pengfei, *et al.* Research on output antioffset induction power transmission system based on parameter optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1452-1461.
- [15] Qu X, Yao Y, Wang D, *et al.* A family of hybrid IPT topologies with near load-independent output and high tolerance to pad misalignment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6867-6877.
- [16] 曾庆奇. 磁耦合谐振式电动汽车动态无线充电系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Zeng Qingqi. Research on dynamic wireless charging system of magnetic coupling resonant electric vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

收稿日期: 2021-03-15

修改稿日期: 2021-05-21