

一种带引导磁芯的齿轮状松耦合变压器

董艺,周玉斐,刘帅,王莹莹

(南京航空航天大学 电子信息工程学院,江苏 南京 210016)

摘要:感应耦合式无线电能传输系统中,松耦合变压器的耦合系数是影响系统变换效率的关键因素。为提高其耦合系数,针对普通圆盘型松耦合变压器,基于其磁场仿真结果建立等效的磁路模型并作分析,在此基础上对圆盘形磁芯先后采取挖通孔、加引导磁芯的方法进行优化,并结合多U型磁芯结构提出一种新型齿轮状变压器结构。通过仿真与实验验证了该结构能在降低变压器重量的同时,有效提高其耦合系数,且具有良好的旋转稳定性。

关键词:感应耦合无线电能传输;松耦合变压器;磁路模型;齿轮状磁芯

中图分类号: TM724 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23937

A Gear-shaped Loosely Coupled Transformer with Guiding Magnetic Core

DONG Yi, ZHOU Yufei, LIU Shuai, WANG Yingying

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: The coupling coefficient of the loosely coupled transformer in the inductively coupled wireless power transmission (ICPT) system is a key parameter affecting the conversion efficiency of the wireless energy transmission system. To improve the coupling coefficient, an equivalent magnetic circuit model was established and analyzed based on the magnetic field simulation results of ordinary disc-shaped loosely coupled transformer. On this basis, the disc-shaped magnetic core was optimized by digging through holes and adding guide cores, and a new gear-shaped transformer structure was proposed combined with multi-U-shaped magnetic core structure. Simulations and experiments verify that the structure can effectively increase the coupling coefficient of the transformer while reducing the weight of the transformer, and has good rotation stability.

Key words: inductively coupled wireless power transmission (ICPT); loosely coupled transformer; magnetic circuit model; gear-shaped magnetic core

感应耦合无线电能传输(ICPT)通过电磁耦合的方式进行电能传输,该技术传输功率和效率都较高且较易实现,是目前无线电能传输领域研究的主要方向,在诸如人体植入医疗设备、电动汽车、机器人、手机等方面均获得了广泛应用^[1-5]。

松耦合变压器的耦合系数直接影响到无线电能传输系统的变换效率。因此,很多文献对松耦合变压器进行了研究。文献[6]采用一种改进的类工字型磁芯结构,磁芯两端增加了翼状结构,并将绕组分成并联的两部分,分布在磁芯两端,从而增强抗偏移能力,减少铜的用量,但其整体宽度明显较大,实际应用中可能会有所限制。文献[7]将长度依次递减的条状磁芯叠加,得到一个横截面积从中间到两端依次递减的整体磁芯,

从而使得磁芯内部场强分布较为均匀,以减少磁芯损耗。文献[8]提出一种边沿扩展平面U型非接触变压器,该结构增加了原、副边磁芯的正对面积,以增大全耦合磁通的比例,提高耦合系数。在此基础上文献[9]又提出一种带电磁屏蔽的绕组混合绕制非接触变压器,该结构采用平面绕组和垂直绕组结合的方法,不仅能维持平面变压器的耦合系数,还减小了整个变压器的尺寸。文献[10]设计出一种DLDD(double layer double D-type)结构,将4个D型线圈串联,并采用双田字型磁芯以降低重量,该结构具有较好的抗偏移能力。文献[11-12]将不同形状的磁条旋转排列以替代圆盘型磁芯,能够大大降低变压器重量,但耦合系数会有一定程度降低。文献[13]基于罐型磁芯提出

一种多U型盘式磁芯结构,可有效减少漏感,提高耦合系数。文献[14]提出一种“分串绕组+凹凸磁芯”复合型磁耦合结构,该结构具有良好的纵向抗偏移能力。

本文以普通圆盘型松耦合变压器为基础,对磁芯采取引入通孔,引导磁芯的方法进行优化,提出一种新型齿轮状磁芯结构。该结构可有效降低变压器的重量,提高耦合系数,且保留了圆盘型结构的旋转稳定性。

1 普通圆盘型变压器的分析

由于圆盘形结构截面的高度对称性,本文部分采用其截面的一半来呈现其结构,图1展示了圆盘型变压器过圆盘磁芯中心的截面,其尺寸参数如图中所示, r 为线圈内侧到圆盘中心的距离, w 为线圈宽度, g 为上下线圈之间的气隙大小。

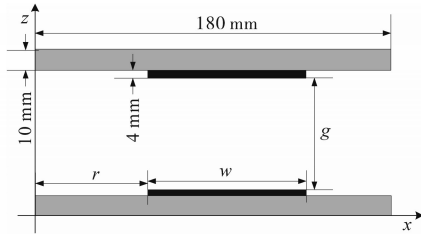


图1 圆盘型变压器结构截面示意图

Fig.1 Sectional diagram of disc-shaped transformer

图2给出变压器副边开路、原边电流为20 A(若无特殊说明,下文仿真中电流参数保持不变)、 r 取60 mm及 w 取80 mm的条件下Maxwell 2D静磁场仿真结果。可以看出,越靠近磁芯中心,分布的磁力线就越少,主要的互感磁力线分布于线圈覆盖下的外侧磁芯部分,最外侧磁力线分布稀疏。

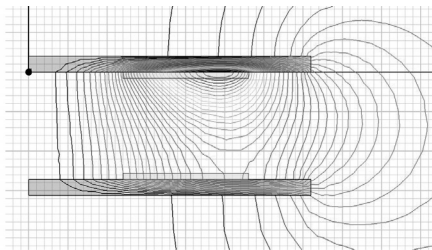


图2 磁场仿真结果

Fig.2 Electromagnetic field simulation results

图3给出磁通管分割示意图,磁通管形状为各个分区绕中心轴旋转一圈所得。从图3可以看出,影响各个磁通管截面积的一个共同因素是气隙,另外一个因素是线圈的位置。由于本文主要是为了改进磁芯的结构,因此暂时不考虑线圈的位置影响。

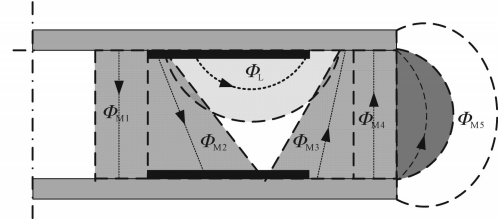


图3 磁通管分割示意图

Fig.3 Sketch of flux tube division

由于圆盘型磁芯的高度旋转对称性,在任意一个截面看到的磁场都是近乎相同的,因此可以将此变压器的结构从三维近似至二维,进而得到图4的磁路模型。各个磁通和磁阻在图3、图4中一一对应,其中, Φ_L 为漏磁通, Φ_{M_x} 为互感磁通, i 为线圈电流。

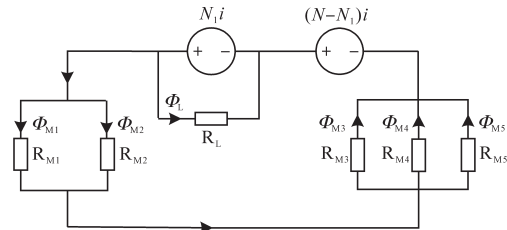


图4 圆盘型变压器磁路模型

Fig.4 Magnetic reluctance circuit

变压器的耦合系数定义为

$$k = \frac{M}{L_{Lp} + M} = \frac{1}{L_{Lp}/M + 1} \quad (1)$$

式中: L_{Lp} 为原边漏感; M 为互感。

假设原、副边绕组各 N 匝, Φ_L 只与 N_1 匝原边绕组匝链。由磁路欧姆定律可得磁路方程:

$$\begin{cases} N_1 i = \Phi_L R_L \\ \Phi_{M3} R_{M3} = \Phi_{M4} R_{M4} = \Phi_{M5} R_{M5} \\ \Phi_{M1} R_{M1} = \Phi_{M2} R_{M2} \\ \Phi_{M1} + \Phi_{M2} = \Phi_{M3} + \Phi_{M4} + \Phi_{M5} \\ \Phi_{M1} + \Phi_{M2} = \frac{N i}{R_{M1} \parallel R_{M2} + R_{M3} \parallel R_{M4} \parallel R_{M5}} \end{cases} \quad (2)$$

由自感和互感的定义可得:

$$L_{Lp} i = N_1 \Phi_L = N_1^2 i / R_L \quad (3)$$

$$M i = N (\Phi_{M1} + \Phi_{M2}) = \frac{N^2 i}{R_{M1} \parallel R_{M2} + R_{M3} \parallel R_{M4} \parallel R_{M5}} \quad (4)$$

式(3)、式(4)代入式(1)得到耦合系数表达式:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{N_1}{N}\right)^2 \frac{R_{M1} \parallel R_{M2} + R_{M3} \parallel R_{M4} \parallel R_{M5}}{R_L} + 1} \quad (5)$$

气隙磁阻的计算公式一般为

$$R_m = \frac{l_p}{\mu_0 S_p} \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; l_p 为磁通管的平均长度; S_p 为磁通管的平均截面积。

考虑到 R_{M5} 所对应的磁通管体积和磁阻较大,磁通量较少,且不易集中,可以重点考虑从磁通管长度方面减小其余的互感磁阻,另外磁芯重量也需要进一步降低,具体优化内容在第2节。

2 磁芯结构的优化

本文用磁芯的体积来体现重量大小。耦合系数的比较基础为普通圆盘型变压器仿真结果, $k=0.52$,其中原、副边磁芯体积为 $1.02 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

2.1 引入中心通孔及引导磁芯

图5为气隙为60 mm时圆盘型变压器初级侧磁芯的磁感应强度标量图。从图中可以看到,磁芯中央的磁感应强度较低,考虑在磁芯中央挖出通孔,不仅有利于散热,也可在一定程度上降低重量。

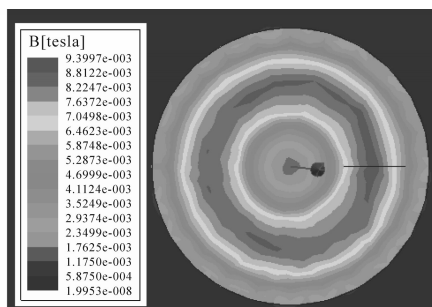


图5 圆盘型变压器初级侧磁芯磁感应强度标量图

Fig.5 Scalar diagram of magnetic induction intensity of magnetic core at primary side of disc-shaped transformer

文献[15]在外部增加引导磁芯,在增加少量磁芯的情况下提高了原、副边的耦合系数。结合第1节内容,考虑在带通孔磁芯的内、外侧各增加一圈引导磁芯,减小磁通管的平均长度以减小对应的互感磁阻。图6是引入引导磁芯后的变压器2D磁场仿真结果,引导磁芯的厚度与线圈厚度相同,不影响气隙的大小。与图2对比可以看出,引导磁芯聚集了周围的互感磁力线,使其更集中到

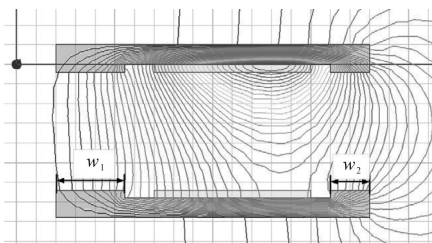


图6 带引导磁芯的圆盘型变压器2D磁场仿真结果

Fig.6 2D magnetic field simulation results of disc-shaped transformer with guide core

Φ_{M1} 和 Φ_{M4} ,且磁阻的磁通管平均长度减小,从而可以减小磁阻,提高互感。

引导磁芯主要影响的是磁阻 R_{M1} 和 R_{M4} ,其磁通管均为圆筒形。图7给出了统一化的磁通管截面,图中, t 和 $t+c$ 分别为内外两层磁通管壁到中心的距离, $g+8$ 为磁通管的平均长度,其磁阻计算公式如下:

$$R_m = \frac{g+8}{\mu_0 \pi (2tc + c^2)} \quad (7)$$

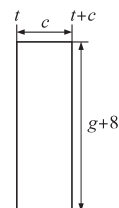


图7 磁通管截面

Fig.7 Section of the flux tube

引入内外引导磁芯后,磁通管的平均长度从 $g+8$ 变为 g ,互感磁阻也随之减小,从而增强互感,提高耦合系数。考虑到不同的内外引导磁芯宽度 w_1, w_2 对自感和互感磁力线的影响不同,引导磁芯宽度越大,覆盖的范围也越大,则减小磁通路径长度的效果也越大。但若自感磁通也在引导磁芯的范围之内,则自感磁通的磁通路径也会减小。保持其他条件不变,改变内外两圈引导磁芯的宽度,记录耦合系数的变化,如图8所示。

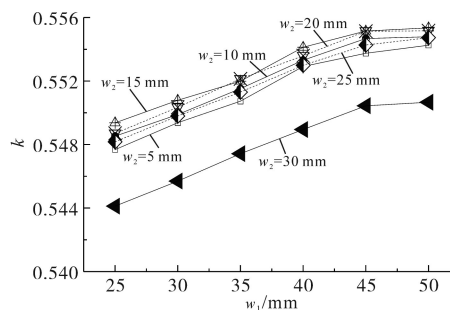


图8 耦合系数随内外层引导磁芯宽度的变化

Fig.8 Values of coupling coefficient against width of the guiding magnetic core

在之前多次仿真中,内侧互感磁通的覆盖范围均在原边磁芯55 mm到60 mm的半径内,在已挖去半径20 mm通孔的基础上, w_1 超过35 mm后也无法再覆盖更多的互感磁通,引导磁芯提高耦合系数的效果趋于饱和,因此图8中曲线在该处出现了拐点。 w_2 为30 mm时,变压器耦合系数相较于其他组合明显较低,这证明外侧引导磁芯宽度过大会减小自感部分的磁阻,从而降低耦合系

数。本节将磁芯结构定为内圈宽度45 mm,外圈宽度15 mm,该耦合系数为0.555,磁芯体积为 $1.12 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

2.2 齿轮状磁芯结构

引入通孔和引导磁芯后,该结构的磁感应强度矢量图的磁芯边缘处会间断出现明显较低的磁感应强度标量值,形似一个个小的缺口,如图9所示。

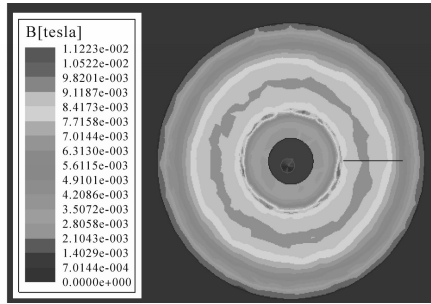


图9 加引导磁芯后原边磁芯的磁感应强度标量图
Fig.9 Scalar diagram of magnetic induction intensity of primary magnetic core with guide magnetic core

基于文献[13]的多U型盘式磁芯结构提出一种新型齿轮状变压器磁芯结构,如图10所示,位于中间一圈的灰色环形结构为线圈,其余为该磁芯结构。该结构内侧结构与2.1节中相同,通孔半径为20 mm,内侧引导磁芯宽度为35 mm;外侧相当于18个长度为150 mm的U型磁芯旋转排列后合并而成,自然形成齿轮状边缘,但向下突出的一圈引导磁芯宽度仍为15 mm,该结构可在保留圆盘型磁芯基本特性的基础上降低重量。

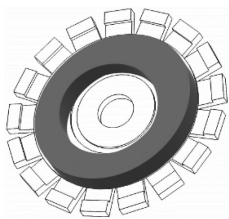


图10 齿轮状变压器结构示意图
Fig.10 Structure of gear-shaped transformer

由于组成齿轮状磁芯的U型磁条个数和宽度均会影响耦合系数,分别建立含有12,18,24和36个齿的磁芯模型,仿真得到耦合系数随U型磁条宽度的变化,如图11所示,其中 s 代表各个U型磁条的宽度。从图中可以看出,不同齿轮数下,耦合系数都随着齿轮宽度的增加有微小提高,但是其变化幅度仅限于小数点后第3位之后。因此可以得出,齿轮状结构在降低重量的同时对耦合系数影响甚小。

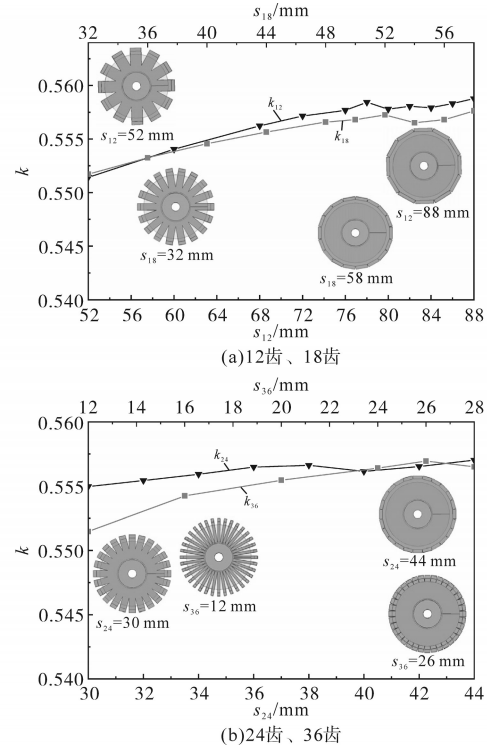


图11 四种齿轮状变压器的比较

Fig.11 Comparison of gear-shaped transformers

3 新型齿轮状变压器的分析

为了进一步比较与分析该新型结构的性能,表1选取了几个不同齿轮数磁芯的结构与普通圆盘型和带引导磁芯的结构进行比较,其中以体积代表重量的大小。

表1 不同变压器结构的比较

Tab.1 Comparison of different transformer structures

不同变压器结构	$V \times 10^{-3} / \text{m}^3$	k
普通圆盘	1.020 1	0.520
带引导磁芯	1.120 0	0.555
12齿	$s_{12}=60 \text{ mm}$	0.971 0
	$s_{12}=72 \text{ mm}$	1.061 7
	$s_{12}=78 \text{ mm}$	1.090 0
18齿	$s_{18}=40 \text{ mm}$	0.966 1
	$s_{18}=48 \text{ mm}$	1.054 0
	$s_{18}=52 \text{ mm}$	1.080 2
24齿	$s_{24}=30 \text{ mm}$	0.964 0
	$s_{24}=34 \text{ mm}$	1.026 3
36齿	$s_{36}=20 \text{ mm}$	0.963 0

从表1可以看出,与普通圆盘型结构相比,齿轮状结构不仅可以降低变压器重量,还可以有效提高耦合系数;与带引导磁芯的结构相比,齿轮状结构的变压器耦合系数变化微小,但重量降低较多。因此,该齿轮状结构可以较好地兼顾降低重量和提高耦合系数两大改进要求。

仿真得到不同气隙下新型齿轮状变压器与普通圆盘型变压器的耦合系数,结果如图12所示,齿轮状变压器为18齿,齿宽40 mm。可以看出,各个气隙下新型变压器的耦合系数比普通圆盘型变压器都有所提升。

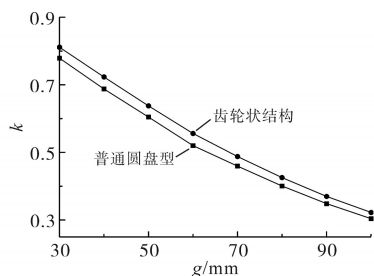


图12 两种结构变压器的耦合系数随气隙的变化

Fig.12 Variation of coupling coefficient versus air gap for two types of transformers

4 实验

本文制作了18齿齿轮状非接触变压器,如图13所示,整体直径90 mm,齿宽7 mm,重量71 g。与直径90 mm、重量86 g的普通圆盘型相比,质量降低了15 g。



图13 齿轮状变压器实物图

Fig.13 Physical diagram of gear-shaped transformer

测量两种结构不同气隙下的耦合系数如表2所示,各个气隙下该新型变压器的耦合系数均有所提高,气隙较小时,有0.05的提高,效果较好;由于耦合系数衰减较快,气隙较大时,有0.02的提高,效果有所减弱。另外,测量了原、副边相对旋转不同角度下的耦合系数,其变化幅度在0.005之内,表明该齿轮状变压器具有良好的旋转稳定性。

表2 不同气隙下的耦合系数对比

气隙/mm	k	
	普通圆盘型	18齿齿轮状
6	0.81	0.86
9	0.75	0.80
12	0.69	0.73
15	0.63	0.65
18	0.56	0.58

5 结论

本文基于圆盘型变压器的Maxwell静磁场仿真结果建立等效磁路模型,得到耦合系数的计算公式并分析,在此基础上,对磁芯采取挖通孔和添加引导磁芯的方法进行优化,在一定程度上提高了耦合系数。最后在引导磁芯结构的基础上,结合多U型盘式磁芯提出一种新型的齿轮状变压器磁芯结构,实验数据表明,该结构可有效降低松耦合变压器的重量,提高其耦合系数,并具有良好的旋转稳定性。

参考文献

- [1] 高世萍,冯玉明.感应式和电场式结合的无线电能传输系统研究[J].电气传动,2020,50(12):88-92.
GAO Shiping, FENG Yuming. Research on an inductive and capacitive combined wireless power transfer system[J]. Electric Drive, 2020, 50(12): 88-92.
- [2] ZHOU Y J, LIU C H, HUANG Y C. Wireless power transfer for implanted medical application: a review[J]. Energies, 2020, 13(11):2837.
- [3] ZHANG Z, PANG H L, LEE C H T, et al. Comparative analysis and optimization of dynamic charging coils for roadway-powered electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11):1-6.
- [4] BARBRUNI G L, ROS P M, DEMARCHI D, et al. Miniaturised wireless power transfer systems for neurostimulation: a review [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2020, 14(6):1160-1178.
- [5] 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.
- [6] BUDHIA M, COVIC G, BOYS J T. A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems[C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, 2010:2487-2492.
- [7] PARK C, LEE S, CHO G, et al. Innovative 5-m-off-distance inductive power transfer systems with optimally shaped dipole coils[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 817-827.
- [8] 张巍,陈乾宏, WONG S C, 等.新型非接触变压器的磁路模型及其优化[J].中国电机工程学报,2010,30(27):108-116.
ZHANG Wei, CHEN Qianhong, WONG S C, et al. Reluctance circuit and optimization of a novel contactless transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 108-116.
- [9] 侯佳,陈乾宏,任小永.一种带电磁屏蔽的绕组混合绕制非接触变压器[J].电力系统自动化,2016,40(18):91-96.

HOU Jia, CHEN Qianhong, REN Xiaoyong. Loosely coupled transformer with mixed winding and electromagnetic shielding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 91-96.

[10] 王智慧,胡超,孙跃,等. 基于输出能效特性的IPT系统磁耦合机构设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 26-31.
WANG Zhihui, HU Chao, SUN Yue, et al. Design of magnetic coupler for inductive power transfer system based on output power and efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 26-31.

[11] BUDHIA M, COVIC G A, BOYS J T. Design and optimization of magnetic structures for lumped inductive power transfer systems[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, 2009: 2081-2088.

[12] BUDHIA M, COVIC G A, BOYS J T. Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3096-3108.

[13] 黄伟义. 应用于旋转式无线励磁电源的松耦合变压器研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2018.
HUANG Weiyi. Research on loosely coupled transformer for rotating wireless excitation power supply[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2018.

[14] 吴新刚,田阳,刘羽,等. 一种新型电动汽车无线充电系统磁耦合机构[J]. 广东电力, 2018, 31(11): 72-78.
WU Xingang, TIAN Yang, LIU Yu, et al. A novel magnetic coupling mechanism for wireless charging system of electric vehicle[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(11): 72-78.

[15] 唐云宇,祝帆,马皓. 应用于汽车无线充电的松散耦合变压器优化设计[J]. 电力电子技术, 2015, 49(10): 1-3.
TANG Yunyu, ZHU Fan, MA Hao. Optimization design of loosely coupled transformer for wireless charging in vehicle applications[J]. Power Electronics, 2015, 49(10): 1-3.

收稿日期:2021-08-13

修改稿日期:2021-12-27

~~~~~  
(上接第 38 页)

putation method with dual sampling modes to improve the current control performance of the LCL-type grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1445-1454.

[13] 谢文浩,刘一琦,王建曠,等. 提高LCL型并网逆变器阻抗重塑控制鲁棒性的延时补偿方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 178-185.  
XIE Wenhao, LIU Yiqi, WANG Jianzhu, et al. A delay compensation method of the grid-connected inverter with LCL filter to improve robustness of the impedance shaping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 178-185.

[14] 方天治,黄淳,陈乃铭,等. 一种提高弱电网下LCL型并网逆变器鲁棒性的相位超前补偿策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4813-4820.  
FANG Tianzhi, HUANG Chun, CHEN Naming, et al. A phase-lead compensation strategy on enhancing robustness of LCL-type grid-tied inverters under weak grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4813-4820.

[15] HE Yuying, WANG Xuehua, RUAN Xinbo, et al. Capacitor-current proportional-integral positive feedback active damping for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid impedance variation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12423-12436.

收稿日期:2021-10-14

修改稿日期:2022-02-09