

基于D.D.D.型松耦合变压器的无线电能传输系统研究

王鹏程¹, 潘立刚², 王懿杰³

(1. 国网浙江省杭州市萧山区供电有限公司, 浙江 杭州 311215;

2. 杭州欣美成套电气设备制造有限公司, 浙江 杭州 311215;

3. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要:无线电能传输(WPT)技术克服了传统有线输电过程对输电场地条件、维护便利性以及安全性的严格要求,具有广泛的应用场景。在WPT技术中,原副边线圈间的抗偏移特性直接影响着系统电能传输的质量、效率及可靠性。通过对松耦合变压器进行优化,设计相对应的补偿网络以增强系统的抗偏移特性及输出稳定性。所设计的D.D.D.型松耦合变压器具有较强的抗偏移能力,并且具有良好的磁屏蔽特性。在传统变压器等效模型基础上,考虑漏磁通的影响,提出了对称型串并联/串并联补偿拓扑结构。通过调频控制,维持系统输入阻抗角为零,实现系统高效稳定的输出。最后,为了验证理论分析,搭建了基于D.D.D.型松耦合变压器的250 W实验平台,系统效率达到了88%。

关键词:无线电能传输;松耦合变压器;抗偏移;PS/SP补偿拓扑

中图分类号:TM **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24291

Research on Wireless Power Transmission System Based on D.D.D. Loosely-coupled Transformer

WANG Pengcheng¹, PAN Ligang², WANG Yijie³

(1. State Grid Hangzhou Xiaoshan Power Supply Company, Hangzhou 311215, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Xinmei Power Equipment Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 311215, Zhejiang,

China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of

Technology, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: The emergence of wireless power transmission(WPT) technology overcomes the strict requirements of traditional wire transmission process on transmission site conditions, maintenance convenience and security, which has a wide range of application scenarios. In the WPT technology, the misalignment tolerance characteristics between the primary and secondary coils directly affect the quality, efficiency and reliability of the power transmission. The loosely-coupled transformer was optimized and the corresponding compensation network was designed to enhance the misalignment tolerance characteristics and output stability. The D.D.D. loosely-coupled transformer designed has strong misalignment tolerance ability and good magnetic shielding characteristics. Considering the influence of magnetic flux leakage, a symmetric PS/SP topology was proposed based on the traditional transformer equivalent model. Through frequency modulation control, the input impedance angle of the system was maintained to zero, and the high-efficiency and stable output of the system was realized. Finally, in order to verify the theoretical analysis, a 250 W experimental platform based on the D.D.D. loosely-coupled transformer was built, and the system efficiency reached 88%.

Key words: wireless power transmission(WPT); loosely-coupled transformer; misalignment tolerance; PS/SP compensation topology

电能替代不可再生能源是实现“碳达峰”和“碳中和”的重要途径。近年来国家能源结构转型加速,一方面表现为风电、光伏等新能源大量

并网的新型发电方式,另一方面表现为高效可靠的输配电方式。构建高效、低耗、可靠的交直流流-配-用电系统将成为未来电网的发展趋势^[1-2]。

而电能传输技术作为电力系统的重要环节,其能量传输的效率、电能质量和安全可靠性的直接影响着整个系统高效可靠的运行。

传统的输电方式是采用金属介质传递电能。但有线输电方式存在电缆破损老化、线路损耗大、维护困难、存在较大安全隐患等问题^[3-4]。为了解决上述问题,人们提出了电气隔离的无线电能传输技术,通过电磁场、微波场等途径实现电能安全可靠的传递。目前无线电能传输(wireless power transmission, WPT)技术已经广泛应用于水下设备供电、电动汽车充电、植入式医疗等多种场合,具有广泛的应用前景^[5-6]。

图1给出了WPT技术的结构示意图。系统由隔离的原、副边两部分组成。直流输入经过高频逆变电路得到高频交流电。通过在原边侧加入功率因数校正(power factor correction, PFC)电路和补偿电路,可以降低电路的总谐波失真(total harmonic distortion, THD)、调节功率因数并实现原边开关管的软开关。副边电路为能量的接收端,感应交流电动势经过整流电路后得到直流电。为降低副边电路的无功损耗,同样需要在副边加入补偿电路^[7]。

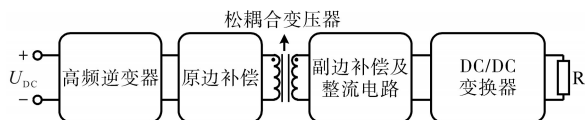


图1 WPT技术的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the WPT technology structure

松耦合变压器是WPT技术中摆脱导线输电的核心结构,常用的结构有平面圆形、方形、DD(double D-type)型、扁平螺旋线管型等^[8]。在能量传输过程中,原、副边结构之间往往存在着偏移,导致变压器耦合系数改变,造成输出电压及电流的波动,直接影响系统输电的质量和效率。当偏移较大时,较大的电压电流应力会降低系统的安全性。增强松耦合变压器的抗偏移性能、提升系统的安全性和可靠性成为当下WPT技术的研究热点^[9-11]。

文献[12]中提出了在原边串接第3组线圈的三线圈结构松耦合变压器,通过合理设计线圈的结构及参数,能够有效提升抗偏移性能。文献[13]中提出了螺线管与DD组合型磁耦合机构,通过将DD型磁耦合机构和扁平螺旋线管磁耦合机构进行组合,具有较强的抗偏移性能。考虑到松耦合变压器结构占据整个系统体积和重量的80%

以上,目前人们更青睐对单一磁结构进行优化设计。文献[14]设计了一种四面体结构副边接收结构,具有极强的多方向多自由度能量接收能力。文献[15]提出了一种采用分段接收线圈和工字形磁芯的松耦合变压器,大幅提升了原边和副边发生相同偏移时耦合系数抗偏移曲线的稳定性。

本文在上述研究的基础上,设计了具有较强抗偏移性能的D.D.D.(three D-type, D.D.D.)型松耦合变压器结构,实现了偏移范围内耦合系数的稳定。本文设计的基于调频控制的对称型并串联/串并联(PS/SP)拓扑结构,能够在特定频率下实现稳压输出。搭建了相应实验样机,验证理论分析的正确性和可靠性。

1 D.D.D.型松耦合变压器研究

1.1 D.D.D.型松耦合变压器的设计

扁平螺旋线管类变压器是常用的松耦合变压器结构,在正对位置具有较大的耦合系数和较强的单方向抗偏移能力,但全平面抗偏移特性较差,仅适用于单一方向抗偏移的应用场合。正对式松耦合变压器在一定程度上解决了上述问题。DLDD(double layer double D-type)型松耦合变压器是轴对称和中心对称结构,在全平面范围具有一定的抗偏移能力,但是DLDD结构的自由度低。本节在DLDD松耦合变压器结构的基础上,设计出新型的D.D.D.松耦合变压器结构,如图2所示。利用交错互补的6个线圈进行补偿,能够有效扩展抗偏移距离,同时便于系统的磁屏蔽。

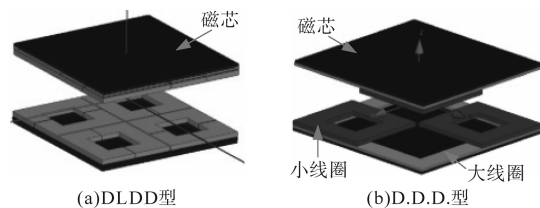


图2 松耦合变压器等效结构

Fig.2 Equivalent structure of loosely-coupled transformer

图2b所示为D.D.D.松耦合变压器结构。图中最上方和最下方的方形结构为磁芯,对角放置用利兹线绕制成的小线圈,绕制的大线圈位于小线圈下方。可以看出D.D.D.结构在DLDD结构基础上优化了线圈结构,减少了两组反向线圈,整合为一个大线圈,减少了线圈数量和线圈的用铜量,新的结构有助于增大耦合系数,获得更优表现的抗偏移曲线。

图3为D.D.D.松耦合变压器的线圈单边俯视

图和整体俯视图。原边绕组在下层,由小线圈②,④以及大线圈⑥相互串联组成,小线圈与大线圈外轮廓重合。副边绕组在上层,由小线圈①,③以及大线圈⑤相互串联组成。原、副边的6组线圈共同组成了交错互补六线圈松耦合变压器。

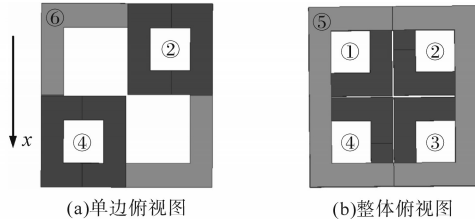


图3 D.D.D.型松耦合变压器俯视图

Fig.3 D.D.D. loosely-coupled transformer top view

图4为D.D.D.型松耦合变压器的磁场仿真图。在正对条件下,靠近的小线圈①~④之间形成的磁场将大线圈⑤和⑥之间的磁场修正;在偏移条件下,小线圈①~④之间由偏移位置逐渐趋于正对位置,如图所示,在移动80 mm时最明显,此时磁路集中在小线圈之间。等效来看,D.D.D.型结构降低了正对时的耦合系数,相对地增加了偏移时的耦合系数,实现了松耦合变压器整体耦合系数的平稳,提升了系统的抗偏移性能。同时

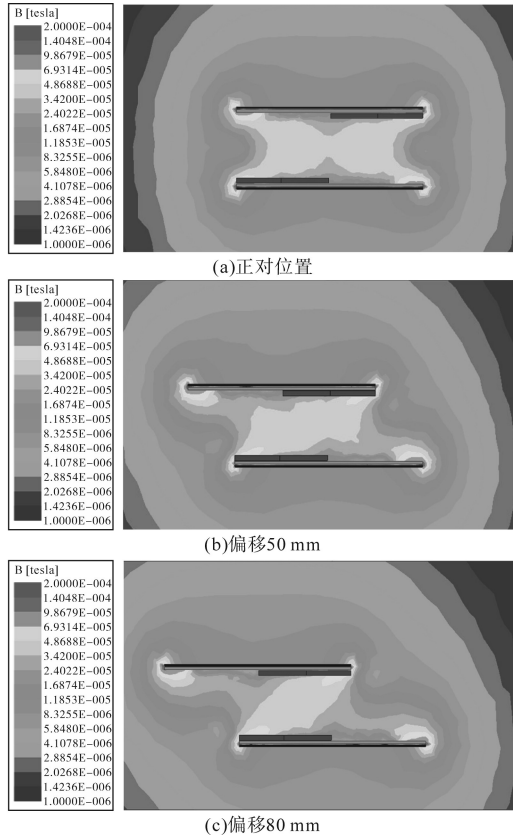


图4 D.D.D.型松耦合变压器磁场仿真图

Fig.4 Magnetic field simulation diagram of D.D.D. loosely-coupled transformer

可以看出,所设计的D.D.D.型结构磁路面积较小,绝大部分磁路均在原边和副边之内,具有良好的磁屏蔽特性,增强了系统的抗干扰能力。

为了满足在各平面都具有较强的抗偏移性能,D.D.D.型松耦合变压器需要具备良好的中心对称特性和轴对称特性,所以原、副边的6组线圈中,4组小线圈①~④匝数相同,2组大线圈⑤,⑥的匝数相同。需要设计的变量简化为大线圈与小线圈之间的匝数比。将小线圈的匝数固定在10匝,通过调整大线圈的匝数观察D.D.D.型松耦合变压器抗偏移性能的变化,如图5所示。通过对比图5a~图5c,可以看出,随着大线圈匝数的减小,D.D.D.型结构的偏移曲线越来越平缓,具有更强的抗偏移能力。

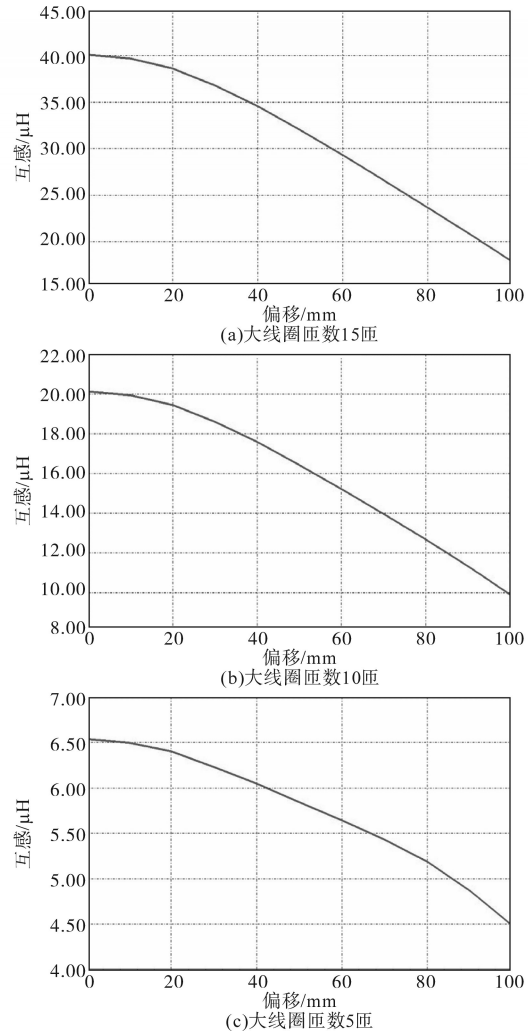


图5 D.D.D.型松耦合变压器偏移曲线

Fig.5 Migration curves diagram of D.D.D. loosely-coupled transformer

1.2 D.D.D.松耦合变压器的抗偏移性分析

体积、重量、抗干扰、磁屏蔽、耦合系数等参数都是松耦合变压器设计的重要指标。其中对

松耦合变压器性能影响最大的是自感与耦合系数。定义抗偏移系数(coupling coefficient retaining ratio, CCRR)如下:

$$\begin{cases} CCRR = k/k_0 \\ k = \frac{M}{L_p L_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_p 为原边线圈自感; L_s 为副边线圈自感; M 为原、副边之间存在的互感; k 为原、副边之间发生偏移时的耦合系数; k_0 为原、副边之间正对位置时的耦合系数。

k 值越大,表示松耦合变压器的原边和副边之间耦合更加充分。为了直观地反映耦合系数随 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向偏移时变化的速度大小,即反映在各方向上的抗偏移能力,将 $CCRR$ 分为 $CCRR-X$ 、 $CCRR-Y$ 和 $CCRR-Z$ 。

下面对几种常用的松耦合变压器的性能进行对比,包括:扁平螺线管(IP)型、DDXP(double D-X-type Pad)型,DLDD型及D.D.D.型4种。各变压器的利兹线选取、正对尺寸、偏移尺寸、气隙长度及原副边的自感大小均保持一致。图6为4种松耦合变压器跟随 Y 轴方向发生偏移时,变压器的耦合系数和 $CCRR$ 的变化曲线。其中DDD- x 表示大线圈与小线圈的匝数比。

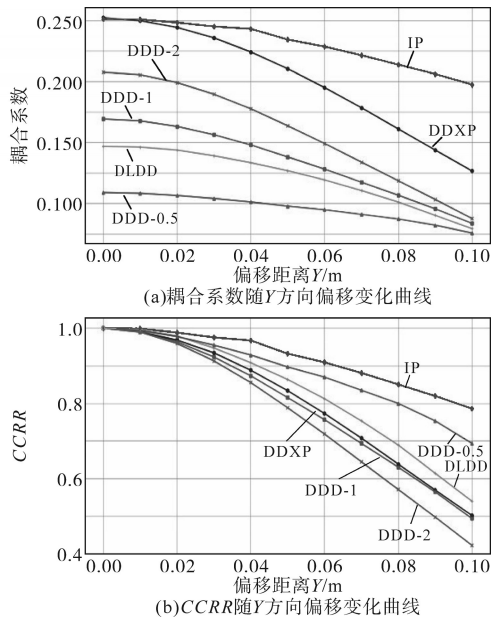


图6 4种变压器的抗偏移特性随 Y 方向偏移变化曲线
Fig.6 Variation curves of misalignment tolerance characteristics of four transformers with offset in Y direction

由图6可以看出,IP型在 Y 方向上耦合系数最高,并且对比于DDXP结构,有着较强的抗偏移能力。DLDD与D.D.D.两种结构变压器,因为小线圈产生的反向磁场,削弱了在正对位置处的起

始耦合系数。当大小线圈的匝数比不同时,表现出不同的抗偏移曲线特性。可以看出随着大小线圈的匝数比增加,D.D.D.型结构的初始耦合系数增加,小线圈产生的磁场削弱作用减弱。根据图6b可知IP型结构的 $CCRR$ 衰减量最小,在 Y 轴方向具有最强的抗偏移性能,对于正对式松耦合变压器DLDD和D.D.D.的 $CCRR$ 曲线有着较大改善。其中在大小线圈匝数比2:1和1:1的条件下,D.D.D.型结构的优势并不明显。当小线圈的匝数达到大线圈的2倍时,系统的抗偏移能力有着明显的提升,接近于IP型结构。在半偏位置时,仍具有较高的 $CCRR$ 值。同时因为D.D.D.的匝数比可以调节,可以根据不同的偏移量需求进行设计,增加了系统设计的灵活性和自由度。

进一步探究4种松耦合变压器在全平面范围内的抗偏移性能,在 X 轴方向上进行偏移。各松耦合变压器的耦合系数和 $CCRR$ 值在 X 轴方向偏移的变化曲线如图7所示。IP型结构在 X 轴方向上没有闭合的磁路,其耦合系数迅速衰减,在半偏的情况下已经不具有抗偏移性能。而D.D.D.型、DLDD型和DDXP型松耦合变压器具有中心对称性,它们在 X 轴方向上的偏移与在 Y 轴方向上的偏移相同。根据图7b可知,IP型结构的 $CCRR$ 变化最大,抗偏移性能最弱。当D.D.D.型结构的大小线圈匝数比为0.5时,系统具有最强的抗偏移性能。

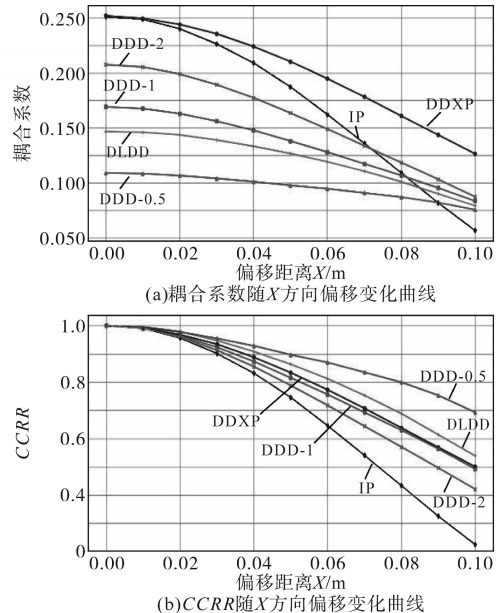


图7 4种变压器的抗偏移特性随 X 方向偏移变化曲线
Fig.7 Variation curves of misalignment tolerance characteristics of four transformers with offset in X direction

由以上分析可以得出,所设计的D.D.D.型松

耦合变压器在全平面范围内具有良好的抗偏移特性,并且可以通过调整大、小线圈的匝数比调整抗偏移曲线,可以满足更多的工程设计需要。

2 基于互感模型的对称PS/SP拓扑研究

采用互感等效模型对补偿拓扑进行分析。假设系统的互感不受耦合系数变化的影响,分析端口传输矩阵方程中各方程需要满足的条件。将WPT系统简化为图8所示的二端口网络。

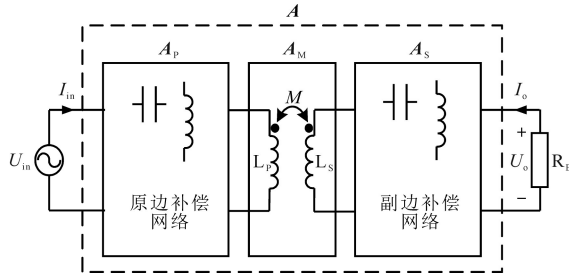


图8 WPT系统的二端口网络

Fig.8 Two port network for WPT system

图8中, U_{in} 为等效后逆变器输出交流电的基波有效值; R_E 为等效阻抗, U_o 为输出电压的基波有效值; I_{in}, I_o 分别为补偿拓扑的输入、输出电流的基波分量; A_p 为原边补偿的传输矩阵; A_s 为副边补偿的传输矩阵; A_M 为松耦合变压器的二端口传输矩阵。系统总的二端口传输矩阵为 A , 其中的各元素分别用 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 表示。列写出总的二端口传输矩阵方程如下:

$$\begin{bmatrix} I_{in} \\ U_{in} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} -I_o \\ U_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_o \\ U_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $A = A_p A_M A_s$ $a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} = 1$

将松耦合变压器等效为电压源控制的电流源的结构,采用对称PS/SP补偿拓扑的WPT系统等效模型如图9a所示。图中 Z_{p1} 和 Z_{p2} 为原边补偿电路各支路的阻抗, Z_{s1} 和 Z_{s2} 为副边补偿电路各支路的阻抗。 I_1, I_2, U_p 和 U_s 分别为对应原边和副边绕组中的电流及受控源的电压。因为阻抗 Z_{p2} 与 L_p 串联可以简化为 Z_{p2}^* 表示, 阻抗 Z_{s1} 与 L_s 串联可以简化为 Z_{s1}^* 表示, 将等效模型进一步简化为图9b所示。图中 A_p^*, A_M^* 和 A_s^* 分别对应简化后的二端口矩阵, 其关系为

$$A = A_p^* A_M^* A_s^* \quad (3)$$

其中

$$A_p^* = \begin{bmatrix} \frac{Z_{p1} + Z_{p2}^*}{Z_{p1}} & \frac{1}{Z_{p1}} \\ Z_{p2}^* & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_M^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -j\omega M & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_s^* = \begin{bmatrix} 1 & 1/Z_{s2} \\ Z_{s1}^* & Z_{s2} \end{bmatrix}$$

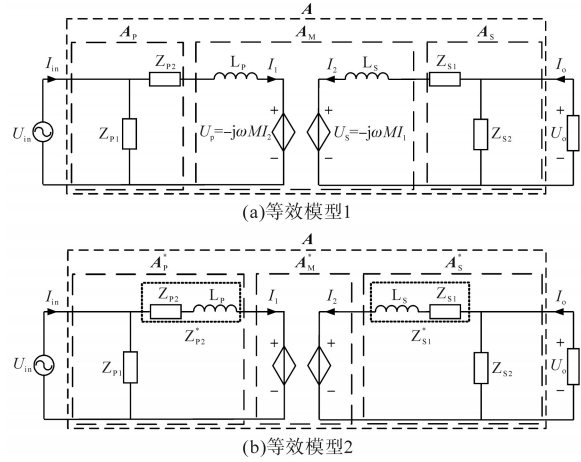


图9 采用互感型补偿网络的WPT系统受控源模型电路图

Fig.9 Controlled source model of WPT system with mutual inductance compensation network

所设计的补偿结构为对称拓扑,各参数需要满足下式:

$$\begin{cases} Z_{p1} = Z_{s2} \\ Z_{p2}^* = Z_{s1}^* \end{cases} \quad (4)$$

将 A_p^* 与 A_M^* 改写成下式形式:

$$\begin{cases} A_p^* = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \\ A_M^* = \begin{bmatrix} 0 & m_1 \\ m_2 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

计算出系统总的二端口传输矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & m_1 \\ m_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d & b \\ c & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

因为拓扑结构对称,在矩阵 A 中有 $a_{11} = a_{22}$ 。将式(6)代入式(2),得到输入阻抗关系如下:

$$R_{in} = \frac{R_E a_{12} + a_{11}}{R_E a_{22} + a_{21}} \quad (7)$$

控制输入阻抗角为零, R_{in} 须为实数以实现输入电压电流同相。忽略补偿部分的等效电阻,各部分阻抗为纯虚数,所以 a_{11} 与 a_{22} 为纯虚数,而 a_{12} 与 a_{21} 为纯实数。所以 $a_{21}/a_{12} = R_E^2$, 代入式(3)可得:

$$a_{11}^2 - R_E^2 a_{12}^2 = 1 \quad (8)$$

假设PS/SP对称补偿拓扑在零相角时输入输出电压变比为 E 。将 $U_{in} = E U_o$ 以及对称结构条件 $a_{11} = a_{22}$ 代入式(7),求得下式:

$$a_{11}^2 - R_E^2 a_{12}^2 = E^2 \quad (9)$$

对比式(8)、式(9),可知当 $E=1$ 时对称的PS/SP补偿拓扑存在在零相角条件下输出电压等于折算后的输入电压的特殊解,此时电路参数满足下式:

$$\begin{cases} Z_{P1} = Z_{S1} = j\omega M_0 \\ Z_{P2} = Z_{S2} = -2j\omega M_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: M_0 为松耦合变压器的互感。这个特殊解的存在将输入阻抗角为零和系统实现恒压输出这一结果建立了等效关系。由式(10)可知,即使去除副边电路,原边不会发生短路,此时原边线圈电流 I_p 满足下式,保证了电路的安全性。

$$I_p = 4U_{in}/(\pi Z_{P1}) \quad (11)$$

3 实验验证

为了验证上述理论分析,搭建了尺寸为 $200 \times 200 \times 14 \text{ mm}^3$ 的松耦合变压器,如图10所示。

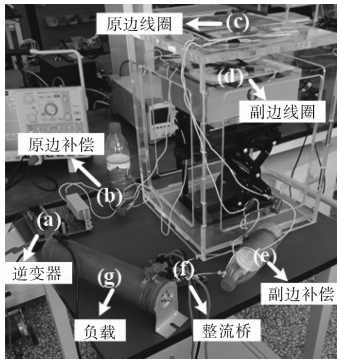


图10 实验样机平台

Fig.10 The experimental prototype

图10中,原、副边补偿电路均采用了空心电感的结构,防止自感的变化与耦合。表1为实验样机的器件选型及参数值。

表1 器件选型及参数值

Tab.1 Device selection and parameter values

器件	型号	参数	参数值
开关管	IPW60R099P7	Z_1	$L_{P1}=50 \mu\text{H}$ $C_{P1}=100 \text{ nF}$
驱动芯片	Si8273	C_1	50.5 nF
隔离电源	URA1D_YMD-6WR3	C_2	50.3 nF
整流芯片	UCC24612	Z_2	$L_{P1}=50 \mu\text{H}$ $C_{P1}=100 \text{ nF}$
采样芯片	AD8302	L_p	207 μH
运放	TLV272	L_s	209 μH
DSP	TMS320F28335	R	10 Ω

图11为实验样机在输入电压 $U_{in}=50 \text{ V}$,偏移初始位置为正对位置的实验条件下的输入输出特性。测量可得此时负载两端的输出电压为

55.7 V,这是因为补偿电路经过了纯电容的整流桥,输出电压增加了1.1~1.2倍。所以可以认为实验样机通过调频控制实现了输入电压与输出电压比为1:1的相角补偿。当松耦合变压器逐渐发生偏移时,观察到电路输入输出特性的波形图与图11十分相近。当原、副边线圈达到最大偏移位置时,输出电压仍维持在55.7 V左右,此时系统的频率从40 612 Hz增加到了40 720 Hz,观察到系统输出波形仍与图11几乎相同。实验结果说明,采样芯片AD8302读取了系统阻抗角的变化,DSP对应地调整频率补偿了阻抗角,实现了输出电压的稳定,此时系统效率为88%。

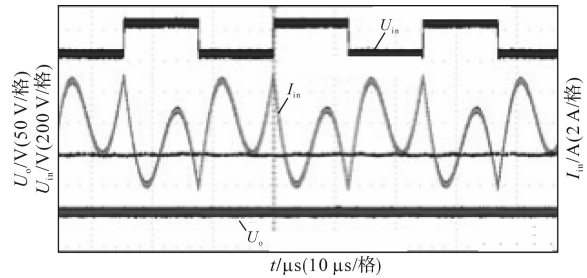


图11 正对位置时系统输入电压、电流及输出电压波形

Fig.11 The input voltage, current and output voltage waveforms of the system are in positive position

对系统的动态响应速度进行测试,系统的输出波形如图12所示。可以看出在快速将原边线圈从正对位置调整到最大偏移位置的过程中,输出电压波动很小。

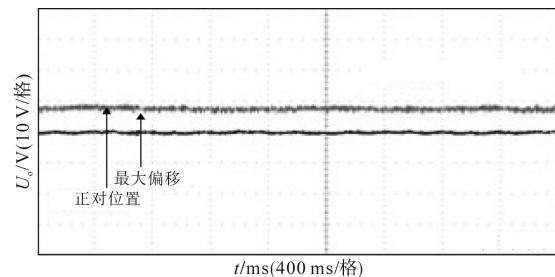


图12 系统闭环控制响应速度测试

Fig.12 Test of response speed of system closed-loop control

上述实验结果证明了所设计的基于D.D.D型松耦合变压器的无线电能传输系统具有较强的抗偏移性能和较快的闭环调节速度,具有安全可靠的工作特性,验证了前文理论分析的正确性和可靠性。

4 结论

为了提高无线电能传输技术的抗偏移特性,本文从松耦合变压器结构设计、补偿电路的优化以及闭环控制策略分析几个方面进行研究。设

计了新型的D.D.D.松耦合变压器结构,在平面范围内具有良好的抗偏移性能,同时具有良好的磁屏蔽特性。基于互感等效模型,提出了对称的PS/SP补偿结构,并证明了系统存在零相角条件下输入输出电压比1:1的特殊解,将输入阻抗角为零和系统实现恒压输出这一结果建立了等效关系。搭建了250 W的闭环实验样机,通过调频控制调整输入阻抗角,系统具有较强的抗偏移能力和较快的动态响应速度。系统的输出电压稳定,效率为88%,验证了理论分析的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 杨子龙,宋振浩,潘静,等.分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2213-2220.
YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220.
- [2] 张波,疏许健,黄润鸿.感应和谐振无线电能传输技术的发展[J].电工技术学报,2017,32(18):3-17.
ZHANG Bo, SHU Xujian, HUANG Runhong. The development of inductive and resonant wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 3-17.
- [3] ZHANG Zhen, PANG Hongliang, GEORGIADIS Apostolos, et al. Wireless power transfer-an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.
- [4] 赵志勇,杨中平,林飞,等.基于停车误差规律的有轨电车无线电能传输系统线圈优化设计[J].中国电机工程学报,2017,37(S1):196-203.
ZHAO Zhiyong, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Coil optimization of wireless power transfer system applied in trams based on parking error law[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 196-203.
- [5] ZHANG Z, CHAU K T. Homogeneous wireless power transfer for move-and-charge[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6213-6220.
- [6] LIU H, SHAO Q, FANG X. Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2017, 11(1): 35-43.
- [7] 范兴明,莫小勇,张鑫.无线电能传输技术的研究现状与应用[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2584-2600.
FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [8] 王懿杰,陆凯兴,姚友素,等.具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3907-3917.
WANG Yijie, LU Kaixing, YAO Yousu, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907-3917.
- [9] 刘晓胜,顾轩溥,姚友素,等.基于电容调制的无线电能传输系统信号电能同步传输[J].电力自动化设备,2018,38(3):140-146,154.
LIU Xiaosheng, GU Xuanpu, YAO Yousu, et al. Synchronous transmission of signal and power in WPT system based on capacitor modulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 140-146, 154.
- [10] WANG Y, MAI J, YAO Y, et al. Analysis and design of an IPT system based on S/SP compensation with improved output voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3256-3266.
- [11] 郭贻佳,王国庆,徐帅,等.直流高压开关柜用无线电能传输系统优化研究[J].电气传动,2021,51(12):74-80.
GUO Laijia, WANG Guoqing, XU Shuai, et al. Optimization research on wireless power transmission system for DC high voltage switchgear[J]. Electric Drive, 2021, 51(12): 74-80.
- [12] CHEN Y, MAI R, ZHANG Y, et al. Improving misalignment tolerance for IPT system using a third-coil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3009-3013.
- [13] TEJEDA A, KIM S, LIN F Y, et al. A hybrid solenoid coupler for wireless charging applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5632-5645.
- [14] 戴欣,李璐,余细雨,等.基于正四面体的无线电能传输系统多自由度电能拾取机构[J].中国电机工程学报,2016,36(23):6460-6467,6612.
DAI Xin, LI Lu, YU Xiyu, et al. Multi-degree-of-freedom pick-up mechanism of wireless power transfer systems based on the regular tetrahedron[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6460-6467, 6612.
- [15] YANG G, DONG S, ZHU C, et al. Design of a high lateral misalignment tolerance magnetic coupler for wireless power transfer systems[C]//2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2017: 34-39.

收稿日期:2022-04-06
修改稿日期:2022-05-19