

电子式互感器工作电源解决方案研究

聂一雄, 刘艺, 王星华, 彭显刚, 文波

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 介绍了一种基于无接触功率传输技术的适用于电子式互感器的直流电源的设计原理。通过采用 ANSYS 有限元分析软件对几种不同结构模型的无接触功率发射机构在不同发送-接收距离下的空间电磁场分布、互感与耦合系数的仿真计算与分析, 以高效、简洁为设计目标, 研究出一种适用于传感器高压回路信号处理的功率发送与接收电磁耦合结构。计算机仿真和原理性实验表明: 该功率传输结构具有输出功率稳定、工作可靠的特点, 完全满足电子式互感器高压侧对信号处理工作电源的要求。

关键词: 电子式互感器; 无接触功率传输; 直流电源; 耦合机构; 电路设计

Research on solution of electronic transducer power supply

NIE Yi-xiong, LIU Yi, WANG Xing-hua, PENG Xian-gang, WEN Bo

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper introduces the design principle of DC power supply based on the contactless power transmission technology. By means of the finite element analysis software ANSYS, the simulation and computation of four kinds of contactless power transmission emitter organization are done. And the spacial electromagnetic field distribution, the mutual inductance and coupling coefficient in different emitting-receiving distances are analyzed. And then, an efficient and simple frame is chosen as the electromagnetic coupling organization. A kind of power transfer-receive prototype device is developed, which can be used in the electronic transducer for signal processing of high voltage side. Computer simulation and principal experiments show that this type of power transfer structure has the characters of stable power output and reliable works. It can satisfy the signal processing requirements of the electronic transducer to the segment of high voltage totally.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.8151009001000059).

Key words: electronic transducer; contactless power transmission; DC power supply; coupling organization; circuit design

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0039-04

0 引言

随着低功率、数字化输出的电子式电流/电压互感器的研究开发的日渐成熟和深入, 有源电子式互感器以其结构简单、加工方便、互换性强、可靠性高、易于实现批量化生产等一系列优点而在近几年成为研究开发的重点, 并已有产品应用于中低压电力系统的测控设备中^[1]。

电子式互感器在其工作过程中, 为了实现高低压侧电信号的完全隔离, 高压侧信号处理用工作电源必须是悬浮式的。目前, 该电源的设计主要有两种方法。

1) 采用低压侧光供电方式, 利用光电转换的工

作原理, 通过大口径光纤实现能量供给, 其优点是电源稳定、可靠性高, 不受母线电流的影响, 但由于激光器提供的功率有限, 且光电转换的效率也不高, 光电池在长期满负荷工作条件下的寿命也难以保证, 成本较高等缺点也不能完全满足现场要求。

2) 利用工作电源与传感器同处高压端的特点, 采用带铁芯的感应线圈直接从高压线路获取能源。这种方案能降低装置的复杂程度和对绝缘的要求, 但存在线路电流过低或断路器跳闸时, 电子式互感器将因缺少工作电源而不能工作的缺陷。

采用无接触功率传输的方法则可以有效解决现有电源应用中的不足。本文介绍了一种利用无接触功率传输技术实现从低压侧向高压侧提供电源的直流电源的工作原理和设计过程。

基金项目: 广东省自然科学基金研究项目(8151009001000059)

1 设计原理

无接触功率传输技术(Contactless Power Transfer, CPT)是利用现代电力电子能量变换技术、磁场耦合技术,借助于现代控制理论和微电子控制技术,实现能量从静止设备向静止或可运动设备传输的一种有效方法。

无接触功率传输中,能量的传输是通过接收端线圈利用电磁耦合方式接收发射端线圈传送的电磁功率实现的,其模型与空心变压器相似,图1示出典型CPT系统的基本结构。图中: \dot{V}_p 、 \dot{V}_s 分别表示耦合机构发射端和接收端的电压; L_p 、 L_s 分别表示耦合机构发射端和接收端电感; M 表示耦合机构的互感; ω 则表示高频电源角频率; \dot{I}_{LP} 、 \dot{I}_{LS} 为耦合机构发射与接收端电流参考方向; $j\omega M \dot{I}_{LP}$ 表示耦合机构发射端电流 \dot{I}_{LP} 在接收端的感应电压; $j\omega M \dot{I}_{LS}$ 是接收端电流 \dot{I}_{LS} 在发射端的反映电压。 R_1 、 R_2 分别为发射接收端的电阻。

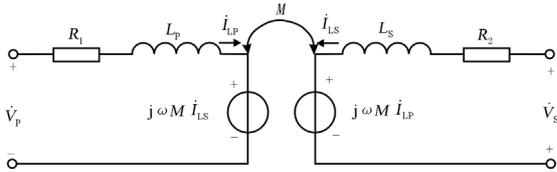


图1 耦合机构电路模型

Fig.1 Equivalent circuit of coupling organization

该系统由两个分离的电气部分组成:①能量变换装置,它通过线圈回路提供高频交流电流;②能量拾取线圈和调节装置,它通过两部分之间的电磁感应耦合,实现无接触的能量传输。由于耦合形式属于松耦合,与普通变压器相比,感应电压需经过调节装置进行变换方可供负载使用。

基于CPT技术的直流电源的原理性方框图如图2所示。

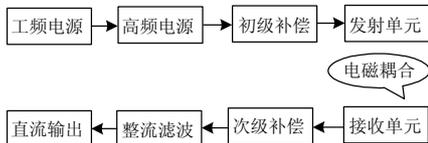


图2 实现原理性方框图

Fig.2 Implementation principle of block diagram

高频电源提供的高质量回路电流对整个CPT系统起着至关重要的作用,是保证电能传输效果的前提。由于电力电子技术的高速发展,高频电源的获得已不再是问题。电路拓扑方面的研究已有大量文献报道^[2-3]。设计高效的电磁耦合机构以及选择合适

的电路拓扑是CPT系统应用的关键;电磁耦合机构的设计重点是磁性材料选取、线圈绕组位置等;能量拾取部分需考虑负载的折算和电路补偿。本文重点介绍实现中耦合机构的设计。

CPT 技术应用于电子式互感器工作电源的设计,必须考虑该技术在应用时的特殊要求:空间距离长(根据互感器应用电压等级的不同,最大距离可达到米级)、传输的功率信号不能对高压侧的传感信号产生任何影响。因此,如何尽量提高无接触传输距离、如何解决功率传输过程中的传输效率(提高互感系数和耦合效率)是耦合机构设计中必须解决的关键问题。

2 耦合机构计算机仿真分析

由诺以曼公式知,如果空间有两个任意位置的匝数分别为 N_1 和 N_2 的线圈组 1 和线圈组 2,则两线圈之间的互感为:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{R} \quad (1)$$

式中: \vec{l}_1 、 \vec{l}_2 分别表示两个通流线圈的方向。

由公式(1)可见,互感系数的大小与线圈的位置密切相关,不同结构、不同布置的线圈间的互感变化极大。由于发射端线圈的组合方式对发射磁力线的集中程度和方向影响非常大,考虑到磁场的空间矢量叠加特性,为了获得最佳耦合效率,从使发射端的磁场尽可能的具有较强的方向性、减少接收侧的漏磁的角度出发,在研究中设计了四种不同的线圈结构和布置方式的电磁耦合模型进行比较性分析与研究,即:多个小线圈组合结构(抛物面型和平面型)和螺旋线圈结构(抛物面型和平面型),如图3。

由于空间任意多个线圈任意组合在任意点产生的磁感应强度或者线圈组合之间的互感与耦合系数的计算相当复杂^[4],本文采用 ANSYS 有限元计算软件完成对所设计的耦合机构的互感和耦合系数的计算。仿真计算中,所有的发射接收端均假设由空芯线圈组合而成。多线圈组合结构模型分别仿真由多个半径为 2 cm 的小线圈组成的大线圈半径为 10 cm 的平面型和抛物面型结构两种模式,线圈材料为半径 1 mm 的铜线;而螺旋线圈结构模型仿真是对用同样型号的铜线绕成的由半径为 1~10 cm 逐渐递增的 10 个等距离圆环组成的平面型和抛物面型模式。

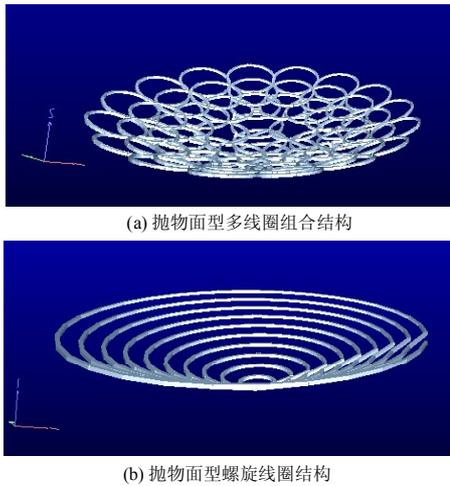


图 3 线圈结构

Fig.3 Coil structure

图 4 给出了四种发射模型通电时的磁场发射方向、大小和集中程度仿真分析结果, 仿真电源频率为 200 kHz。

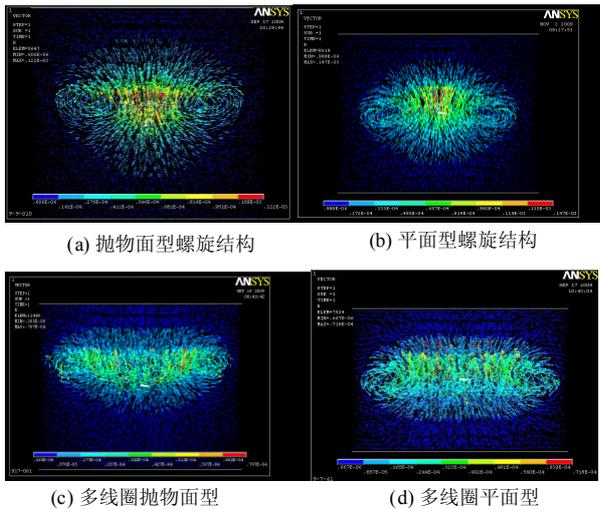


图 4 不同发射模型的空间磁场分布剖视图

Fig.4 Spatial distribution of magnetic field cutaway view of different emitting coil structure

空间磁场分布的仿真计算结果表明, 平面螺旋线圈型结构产生的磁场强度最大、集中度最高。但无接触功率传输实现中考虑的重点是传输效率, 互感大的结构其传输效率不一定高, 耦合系数更能反映传输效率的高低。图 5、图 6 为对上述四种功率发射单元的互感和耦合系数的仿真计算结果, 并给出了半径同为 10 cm 的传统的螺线管型发射机构的仿真计算结果。由计算结果可以看出, 在长距离无接触功率传输时 (图中只绘出了接收距离为 20~30 cm 段), 在采用同样结构的接收装置的条件, 螺

旋型线圈发射结构和抛物面型多线圈发射结构的互感系数均远优于螺线管型结构, 而平面螺旋线圈型结构与传统的耦合结构比较, 更是在各方面均有明显优势。

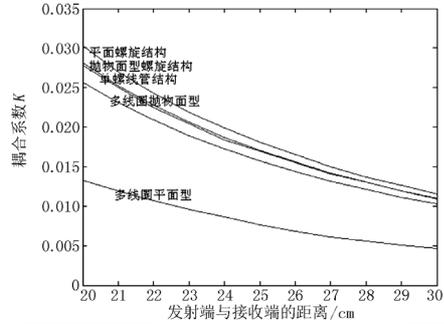


图 5 耦合系数比较图

Fig.5 Curve comparison of coupling coefficient

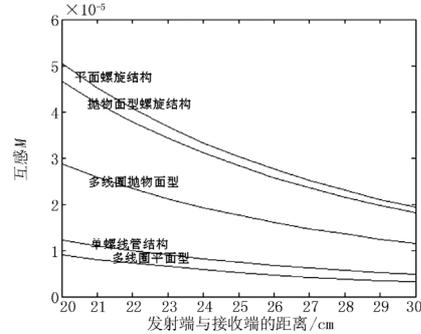


图 6 互感比较图

Fig.6 Curve comparison of mutual inductance

实验研究中, 对平面螺旋型电磁耦合结构作为电子式互感器功率收发单元进行了探索。

3 实验设计

为检验计算机仿真结果的正确性, 笔者设计了一套半径各为 10 cm 的收发装置, 辅以其他工作电路, 在实验室完成了对该原理的功率传输过程工作特性的基本实验。实验过程主要进行了以下几方面的处理。

1) 工作电源采用自己设计的输出功率为 10 W 的高频电源, 工作频率 223.7 kHz。

2) 耦合机构内芯材料的选择: 为提高收发功率, 耦合机构收发两侧宜采用磁性材料作磁放大。本实验由于是验证性目的, 且限于实验条件, 采用的是空芯结构。

3) 原副边回路无功补偿电路的设计: 为了改善系统的功率因数, 减小对原边的视在功率要求, 需要利用补偿电路对系统的无功进行补偿。

补偿的方法有多种组合, 每种都有各自的优缺点^[5]。由于本设计采用的是高 Q 值无功补偿方案,

为减少因频率波动带来的自感变化对补偿效果的影响,本实验中采用了原边串联-副边并联补偿的拓扑结构,并精选了补偿电路参数。

4) 电磁兼容的考虑: 由于设计的直流电源的工作对象是电子式互感器,由麦克斯韦理论可知,近区场中占主导地位的是非辐射场,场源与这部分场进行能量交换,能量交换依电磁场的规律变化进行,主要能量存储于振荡的磁场中,而电场的能量较弱,因此,电磁兼容主要考虑的是高频磁场对装置的影响。通过磁屏蔽结构的设计有效地解决了该问题。

图 7 为在原副方之间的距离为 30 cm、副方负载开路时的副方输出波形图。由图中可以清楚地看出,采用无接触图功率传输的方法可以有效地实现通过自由空间对功率信号的传送。

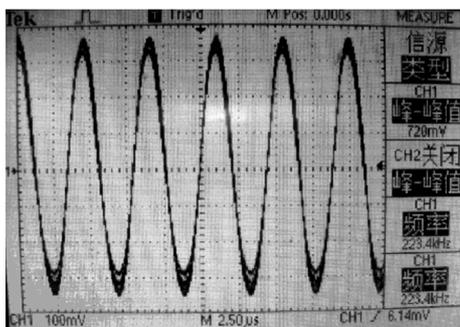


图 7 副方输出波形图

Fig.7 Complementary output waveform

副方接收到功率信号后,经高频小功率变压器隔离及变压,采用常规的整流及稳压电路即可获得稳定的直流电源。实验结果验证了这点。

有关无接触功率传输中有关无功补偿、功率输出控制、功率传输效率及品质因素等相关问题的理论分析及其相关处理方法,限于本文的篇幅,将另辟专文介绍。

4 结论

电子式互感器工作电源性能的好坏直接关系到电子式互感器工作特性的优劣,是电子式互感器应用设计中的一个关键环节。采用无接触功率传输技术实现该特种电源的设计方案能有效解决目前各种方法的不足,是一种非常有前途的方法。功率远距离、高效、定向发射与接收电磁耦合机构的设计是

无接触功率传输技术在电子式互感器中应用的关键。

通过采用 ANSYS 有限元分析软件对几种不同结构模型的无接触功率发射机构在不同发送-接收距离下的空间电磁场分布、互感与耦合系数的仿真计算与分析,研究表明利用空间电磁场的矢量叠加特性,采用平面螺旋线圈型结构能有效提高功率发射与接收线圈之间的电磁耦合效率,无论是空间电磁场分布集中度、互感值还是耦合系数,均远高于常规结构。原理性实验表明:该功率传输结构具有输出功率稳定、工作可靠的特点,满足电子式互感器对工作电源的长期工作要求。

参考文献

[1] Luxa A H, Mueller A B. 中压开关柜的监测和传感器技术[C]//CIRED. 2000: 426-434.
Luxa A H, Mueller A B. Monitoring and transducer technology used in middle voltage switchgear[C]// CIRED. 2000:426-434.

[2] Wang Chwei-sen, Stielau O H, Covic G A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005,52(5): 1308-1314.

[3] Elliott G A J, Covic G A, Kacprzak D T, et al. A new concept: asymmetrical pick-ups for inductively coupled power transfer monorail systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3389-3391.

[4] Zierhofer C M, Hochmair E S. Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils[J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 1996,43(7): 708-714.

[5] Boys J T, Green A W. Inductively coupled power transmission—concept, design and application[J]. IPENZ Transactions,1995, 22: 1-9.

收稿日期: 2009-03-03; 修回日期: 2009-03-31

作者简介:

聂一雄(1964-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电子式互感器、数字化变电站技术、智能检测及仪表; E-mail: nieyx529@gdut.edu.cn

刘 艺(1964-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电机与电器, 电磁场分析与计算。