

基于电场耦合方式的无线电能传输技术综述^{*}

苏玉刚^{*,1} 周 川¹ 阎 琳² 唐春森¹

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 2. 成都电子机械高等专科学校, 成都 611730)

摘 要:在对无线电能传输技术研究现状做了简单介绍后,详细阐述了电场耦合电能传输技术的基本原理、特点、国内外研究现状和应用领域,提出了电场耦合电能传输技术应用中亟需解决的问题,并展望了电场耦合电能传输技术的未来发展趋势。

关键词:电场耦合;无线;电能传输

中图分类号:TM743 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2013.02.004

Reviews on Wireless Power Transmission Technique Based on Electrical-field Coupled Mode^{*}

SU Yugang^{*,1} ZHOU Chuan¹ LV Lin² TANG Chunsen¹

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. Chengdu Electromechanical College, Chengdu 611730)

Abstract: Firstly, the research status of the wireless power transmission technique is briefly introduced. Then the basic principle, the characteristic, the research status and applications of electrical-field coupled power transfer technology are elaborated in detail. At last, some problems have been proposed according to the application of the electrical-field coupled power transfer technology, with its development prospect described.

Key words: electrical-field coupled; wireless; power transfer

1 引言

随着科技的进步,人们对于便携,安全,高效,环保等概念的要求越来越高,而以摆脱电缆线束缚为初衷的无线电能传输技术使这一愿望在电能的使用上成为可能。所谓无线电能传输技术(Wireless Power Transmission Technique):是利用某种特殊设备将电源的电能转变为无线的方式进行传播,从而实现在无电缆线连接情况下的电能传输技术。

目前,无线电能传输技术的研究主要集中在以下几种:电磁感应,微波,磁共振,激光等。从目前国内外的研究看来,感应耦合电能传输(ICPT, Inductive Coupled Power Transfer)技术的应用最为广泛^[1-5]。但是在 ICPT 技术中,电磁干扰问题和金属障碍物能量传输阻断的问题一直是影响 ICPT 技术更进一步发展的关键问题。于是在能量的无线传输中,人们又开始将目光转向一种新型的无线电能传输技术,即本文中所要论述的电场耦合电能传输(ECPT, Electrical-field coupled power transfer)技术。它相对于目前广泛应用的 ICPT 技术而言,在能量的传输过程中引入了电场耦合的概念,能够降低电磁干扰和克服金属障碍物能量传输阻断问题,实现能量的无线传输。

2 ECPT 技术的原理及其特点

2.1 ECPT 技术的原理

ECPT 技术是指在电能的传输过程中,在发送能量侧和接收能量侧分别设置电极,通过极板间产生的电场来传输能量的技术。ECPT 系统结构框图如图 1 所示,该系统主要由能量发送部分和能量接收部分组成。

能量发射部分功能是将供电电网输入的交流电经过整流后输入到高频逆变器(或者直接由直流电源输入),高频逆

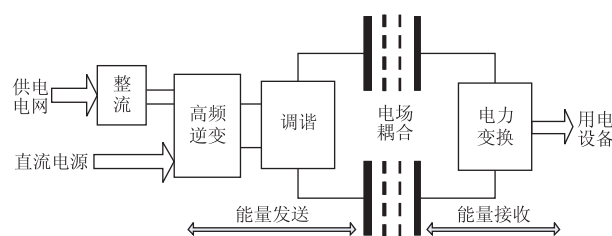


图 1 ECPT 系统结构框图

Figure 1 The principle diagram of ECPT system

变器输出的高频交流电再经过调谐电路后提供给发射极板,最终完成能量的发射。当发射极板在高频交流电作用下时,能够与接收极板间形成交互电场,在交互电场作用下产生位移电流“流过”极板,实现极板间的能量传输。而高频交流电能够有效的降低耦合机构的等效阻抗,减少系统的损耗,从而改善 ECPT 系统性能。再者,在能量发射端加入调谐电路来改善耦合机构的性能,使耦合机构能够更好的实现能量的传输,减小极板上的无功功率,提高系统的传输功率。系统能量接收部分功能是将通过极板耦合传输的能量,根据用电设备的需要,经过电力变换后为不同的用电设备提供合适的交流或直流电。

以交流输入直流输出为例,ECPT 系统原理图如图 2 所示。该系统能够实现将工频电网输入的电能以电场耦合的方式传输并转换成直流电源提供给负载的功能,其中 Cs1 和 Cs2 为耦合极板的等效电容。

2.2 ECPT 技术的特点

目前,应用最为广泛的无线电能传输技术是 ICPT 技术。相对于 ICPT 技术而言,ECPT 技术主要具有以下优点:

1) 金属环境中的能量不间断传输^[6]:在 ICPT 系统中,由于电磁屏蔽,金属障碍物将阻断能量的传输。而在 ECPT 系统中,能量传输的形式为交互电场,能量的传输不会被金属障碍物所阻断,而是将金属障碍物作为耦合极板的一部分来完成能量的传输。

^{*} 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20070611012)资助

^{**} E-mail: yugangsu@gmail.com

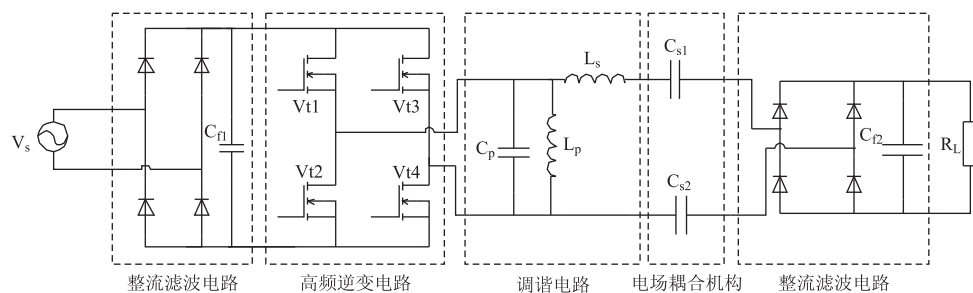


图 2 ECPT 系统原理图

Figure 2 The Schematic of ECPT system

2)低电磁干扰^[6]:在 ICPT 系统中,能量的传输是通过电磁感应原理来完成的,则在系统环境中存在电磁干扰。而在 ECPT 系统中,采用电场耦合的方式,电场基本被限制在耦合极板之间而存在,系统中的电磁干扰得到了大大的减少。

3)降低特殊机构待机功耗:对于一些特殊机构而言(如移动负载等),当负载处于待机状态而无需系统供电时,移开负载,使系统的原边供电电路处于开路状态,从而降低了系统的待机损耗。

4)系统体积小,重量轻,系统发热小^[6,7]。

3 ECPT 技术研究现状分析

ECPT 技术作为一门新兴技术,是无线电能传输技术研究的新领域。早在几十年前,尼古拉·特斯拉已经提出了基于电场耦合方式的无线能量传输技术^[8,9]。近几十年来,电场耦合技术在信号方面的应用得到了比较好的发展与应用^[10-14],而在能量传输方面,由于技术条件的限制,该技术在能量传输方面的应用受到了一定的制约。但随着技术等各方面的进步,电场耦合技术在能量传输方面的优势逐渐显露出来。因其独特的结构与性质,ECPT 技术已经开始引起国内外许多研究团队的重视。目前,主要的研究团队包括:

- 1)新西兰奥克兰大学:新西兰奥克兰大学在 ECPT 技术的研究中主要致力于对旋转机构的研究。提出了适合旋转机构的两种极板耦合模型^[6],发表了近十篇高水平论文,在理论上提出了适合于 ECPT 系统的拓扑结构^[15]、系统稳态特性分析方法^[16]以及系统控制算法^[17],分析了调谐电路对系统的影响^[18],并完成了 10 W 以上的电力传输(其中效率为 66.7%)^[6],在 ECPT 技术的研究中做出了重要贡献。
- 2)日本株式会社村田制作所:村田制作所成功开发出了基于 ECPT 技术的无线电力传输系统,它能够实现 1 ~ 10 W 的电力传输能力,并具有位置自由度高和高效率的特点。他们的研究重点在 ECPT 技术的应用开发上。
- 3)美国加州大学:美国加州大学在 ECPT 技术方面的研究主要集中在基础理论上,在他们目前进行的项目(BPN555)中,实现了 3.8 W 的电力传输能力(其中效率为 83%)^[19]。
- 4)重庆大学:重庆大学电力电子与控制工程研究所在国内率先开始了对 ECPT 技术的研究,取得了一定的理论研究

成果^[20],并研发出了小功率的样机装置。

除了上述研究团队外,目前还有伊朗、日本^[21,22]、新加坡^[23]等多个国家的研究团队在 ECPT 技术的研发和推广上做着努力。首先,在对 ECPT 技术拓扑结构的研究中,大多采用文献[12]中所提出的通用拓扑结构模型。在文献中,作者应用“电容耦合系数”的概念对拓扑进行了详细的理论分析,为耦合机构的理论研究提供了有效的突破口。其次,在对 ECPT 系统的控制方法的研究中,主要采用基于开关模式有源负载电容的控制^[24]和基于能量流的控制^[17]等方式来完善系统的性能。

目前,虽然 ECPT 技术的研究还处于起步阶段,研究主要集中在小功率设备上,但 ECPT 所具有的独特优势,必将吸引更多研究团队的加入,为 ECPT 技术的发展而共同努力。

4 ECPT 技术目前亟需解决的问题

ECPT 技术作为一种新兴的技术,它的推广与应用将为人类的生产生活带来很多的便利。但 ECPT 技术的应用研究还处于起步阶段,为了更好的推广 ECPT 技术,让更多的人将目光投向 ECPT 技术,有许多问题亟待解决。

4.1 系统性能问题

ECPT 技术作为一种新型的能量传输技术,首先需要解决的是系统传输效率问题。而影响系统传输效率的关键是耦合机构的设计。将耦合极板等效为电容,如式(1)所示, C 、 A 、 d 、 ϵ_0 和 ϵ_r 分别表示极板电容、耦合面积、绝对介电常数 and 相对介电常数。

$$C = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{d}$$

(1)

当 ϵ_r 一定时,耦合极板的电容主要由耦合面积 A 和极板间距 d 所决定。研究发现, A 和 d 的变化将使系统的传输效率受到一定的影响。因此如何结合实际要求来设计耦合机构,优化系统结构以提高系统传输效率,是 ECPT 系统的一个重要问题。其次,ECPT 系统的稳定性也是必须考虑的一个重要因素,一般通过在系统中加入调谐电路来提高系统的稳定性。除此之外,还可以通过增加外围检测电路,结合先进的控制算法对系统各部分进行监测与控制,从而最终提高系统稳定性。

4.2 系统输出功率问题

目前 ECPT 技术的应用大都集中在小功率系统中。如何提高 ECPT 系统的输出功率,从而将 ECPT 技术推广到更广阔的领域中,也是目前迫切需要解决的一大问题。从先进的控制算法设计、合理的耦合机构设计以及新型的电力变换拓扑等方面入手,寻求适合于较大输出功率的 ECPT 系统结构,是提高系统输出功率的有效途径。

4.3 产品标准化与市场化

产品相关标准的建设是产品良好发展的有力保证;产品成本的高低是影响产品市场化的重要因素。ECPT 技术是一门综合了多学科的新型技术,涉及领域广,国内国际上现有的生产制造、运营及监督标准都不能满足 ECPT 技术发展的需要,亟需新的标准来促进 ECPT 技术的发展壮大。同时,ECPT 技术作为一种电能传输技术,系统的组成涉及到元件材料、型号、加工标准以及生产工艺等多个方面。目前,市场化的概念在 ECPT 技术应用领域还未得到具体的体现。产品生产链的形成及优化和各领域的协同合作,也是 ECPT 技术推广过程中需要解决的问题。

5 ECPT 技术的未来发展趋势

近几年来,ECPT 技术在供电方面拥有日趋多样的应用。如:多个移动设备的同时充电,人体内置设备的供电,家用照明台灯,足球机器人充电设备等。随着人们对 ECPT 技术的逐渐重视,越来越多的领域将融合进 ECPT 技术,以实现更完善的功能。

5.1 便携类设备、家用电器等多个设备的充电系统

科技的进步,越来越多的电子产品进入了人们的世界。然而各种电子产品的充电问题一直困扰着追求方便快捷生活节奏的现代人,这就促使着一种新的电能传输方式的出现来解决电线连接的限制。ECPT 技术摆脱了传统电缆线的限制,应用该技术,在房间桌面上放置能量发射装置,即发射极板,各种需要充电终端置于桌面上,通过预先安装在终端内的能量接收装置即可获取能量,实现能量的供给或充电。该系统可以实现多个终端的同时供电,很好的解决了多个设备的无线供电问题。

5.2 ECPT 技术在生物医学工程领域的应用

随着生物医学的进步,越来越多的生物体内置人工设备被用于体内诊断和治疗。由于这些系统一般采用电池驱动,但由于电池中含有对人体有害的重金属,存在危及患者生命安全的问题。因此为了确保设备的正常工作和人体的安全,就必须解决设备的供电问题。ECPT 技术就为生物体内置装置提供了一套可行的技术方案。在体外安置能量发射极板,在内置设备中植入能量接收极板,可以同时实现能量和信号的双向传输。不仅解决了设备的供电问题,而且同时实现了无电磁干扰状态下信号的可靠传输。

5.3 ECPT 技术在能源交通方面的应用^[25]

伴随着绿色、环保、高效等概念的提出,电动汽车的概念成为了当今汽车领域的热门话题。电动汽车具有清洁污染小、动力源多样化、能量转化效率高、结构简单、维修便捷等优点。作为“21 世纪的绿色环保汽车”,电动汽车的电池充电技术的研究是制约其发展的最重要的因素。ECPT 技术能够为电动汽车的充电问题提供一个很好的解决途径。在公共停车场等停车地点设置充电发射极板,于汽车底板安装能量接收模块接收能量,完成电动汽车的能量补给。同时,ECPT 技术也可以应用于固定轨道交通设备的能量供给。在轨道上铺设能量发射极板,将接收端极板安装在轨道交通设备上,能够在避免摩擦损耗、接触不可靠、火花等问题的同时为轨道交通设备提供动力。

5.4 ECPT 技术其他特殊领域的应用

作为一门新兴技术,ECPT 技术拥有广阔的应用空间。目前,ECPT 技术是应用研究最多的无线传能技术之一,存在两个影响它更进一步发展的问题:一是高频交变磁场产生的电磁干扰问题;二是电磁感应原理的制约,使得磁场无法穿越金属屏障,能量在传输过程中遇到金属屏障时而被迫终止。而本文阐述的 ECPT 技术能够在降低电磁干扰的同时,实现能量穿越金属障碍物的不间断传输,使无线电能传输在更加广阔的领域中得到实现。

同时,在旋转机构供电方面,电场耦合方式可以有效去除电刷方式存在的摩擦损耗、接触不可靠、火花等问题,是一种较为理想的供电方式。如图 3 所示^[6],也可以根据不同的需要来设计耦合机构。

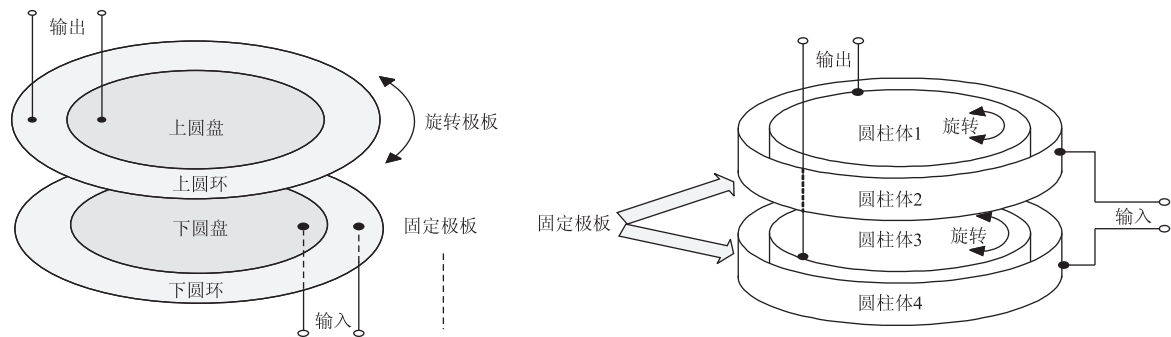


图 3 ECPT 系统两种旋转耦合机构示意图
Figure 3 Two kinds of revolving coupling organization schematic drawing of ECPT system

6 结论

伴随着科技的进步,无线电能传输技术越来越为人们所青睐,为人们提供了更加安全、便捷、高效的生活环境。而本文所阐述 ECPT 技术,更是打破了传统的限制,将无线电能传输技术推向了更广阔的应用领域。该技术的推广与应用将促进相关领域技术的进步与创新,为经济与科技的进步做出贡献。虽然,该技术还处于初期起步阶段,依然存在许多问题需要解决,但其本身所拥有的独特优势,使该技术的发展成为必然。越来越多的国内外研究团队开始注重该技术的开发。ECPT 领域是一个充满活力、具有巨大应用前景的高新技术领域。

参考文献

- [1] HU A P, KWAN I L W, TAN C, et al. A Wireless Battery-less Computer Mouse with Super Capacitor Energy Buffer [C]. Proceeding IEEE 2nd Conf. Industrial Electronics and Applications. Harbin, China, 2007; 2 024-2 029.
- [2] BOYS J T, COVIC G A, ELLIOTT G A. Pick-up transformer for ICPT applications [J]. Electronics Letters, 2002, 38 (21) : 1 276-1 278.
- [3] SI P, HU A P. Designing the dc inductance for ICPT power pick-ups [A]//5th IASTED International Conference on Power and Energy Systems, EuroPES 2005 [C]. Benalmadena, 2005; 162-167.
- [4] BOYS J T, CHEN C I, COVIC G. A. Controlling inrush currents in inductively coupled power systems [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2006, 5 (2) : 1-15.
- [5] HU A P, HUSSMANN S. Improved power flow control for contactless moving sensor applications [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2 (4) : 135-138.
- [6] LIU Chao, HU A P, NAIR N-K C. Coupling Study of a Rotary Capacitive Power Transfer System [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. Australia, 2009.
- [7] CULURCIELLO E, ANDREOU A G. Capacitive Inter-Chip Data and Power Transfer for 3-D VLSI [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2006, 53 (12) : 1 348-1 352.
- [8] MARTIN T C, Tesla N. Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla, with special reference to his work in poly phase currents and high potential lighting [M]. New York: The Electrical Engineer. 1894.
- [9] HUGO G. Tesla Nikola and His Achievements [M]. Electrical Experimenter, 1919; 615-615.
- [10] KIM J, CHOI J, KIM C, et al. A low power capacitive coupled bus interface based on pulsed signaling [C]. Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference. Orlando, 2004; 35-38.
- [11] SODAGAR A M, AMIRI P. Capacitive Coupling for Power and Data Telemetry to Implantable Biomedical Microsystems [C]. 2009 4th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER '09. Antalya, Turkey, 2009; 411-414.
- [12] PIIPPONEN K V T, SEPPONEN R, ESKELINEN P. A Biosignal Instrumentation System Using Capacitive Coupling for Power and Signal Isolation [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 54 (10) : 1 822-1 828.
- [13] CARDU R, SCANDIUZZO M, CANI S, et al. Chip-to-chip communication based on capacitive coupling [C]. 2009 IEEE International Conference on 3D System Integration. San Francisco, CA, United states, 2009.
- [14] FAZZI A, CANEGALLO R, CICCARELLI L, et al. 3D Capacitive Interconnections with Mono- and Bi-Directional Capabilities [C]. Digest of Technical Papers-IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, 2007; 356-608.
- [15] LIU Chao, HU A P, BUDHIA M. A Generalized Coupling Model for Capacitive Power Transfer Systems [C]. Proceedings-IECON 2010, 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, United states, 2010; 274-279.
- [16] LIU Chao, HU A P. Steady State Analysis of a Capacitively Coupled Contactless Power Transfer System [C]. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, 2009; 3 233-3 238.
- [17] LIU Chao, HU A P. Power Flow Control of a Capacitively Coupled Contactless Power Transfer System [C]. Proceedings-IECON 2009, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Porto, Portugal, 2009; 743-747.
- [18] LIU Chao, HU A P, COVIC G, et al. Comparative study of CCPT systems with two different inductor tuning positions [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 99; 1-13.
- [19] KLINE M, IZYUMIN I, BOSER B, et al. Capacitive power transfer for contactless charging [C]// Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. Fort Worth, TX, United states, 2011; 1 398-1 404.
- [20] 孙跃, 李砚玲. 非接触传输系统的广义状态空间平均法分析 [J]. 同济大学学报, 2010, 38 (10) : 1 521-1 524.
- [21] CHIKU Y., FUNATO H. Proposal of Wireless Power Transfer System with Capacitive Coupling with Active Capacitor [C]// Proceeding of Technical meeting of IEE. Japan, 2010; 87-92.
- [22] SAYAMA Y, NAKANO H, NABAE A. Switching Power Supply Using Capacitive Isolation [C]. Proceeding of Technical meeting of IEE. Japan, 1994; 931-932.
- [23] WAHAB A, TAN E C, LOW K M. Wireless pointing device using capacitive coupling [C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Consumer Electronics. Singapore, 1997; 149-152.
- [24] FUNATO H, CHIKU Y, HAKAKAWA K. Wireless Power Distribution with Capacitive Coupling Excited by Switched Mode Active Negative Capacitor [C]. 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS2010. Incheon, Korea, 2010; 117-122.
- [25] ROSE J A, CATES J A. Capacitive charge coupling with dual connector assemblies and charging system. US, 5714864 [P], 1998-02-03.

作者简介

苏玉刚 (1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向: 电力电子智能控制技术, 无线电能传输技术;

周川 (1987-), 男, 硕士生, 主要研究方向: 无线电能传输。