

感应耦合式电能无线传输发展及其亟待解决的关键问题

Wireless Transmission of Electrical Energy and the Key Problem

杜贵平 佛山科学技术学院电气工程及其自动化系 (佛山 528000)

张波 华南理工大学电力学院 (广州 510640)

摘要: 电磁感应耦合式电能无线传输模式是一种极具潜在发展前景输电方式,其所面临的问题也是具有极大挑战性的。

本文在简述了其工作原理、系统构成及国内外研究现状基础上,提出该领域所面临的亟待解决的关键问题。

叙词: 电磁感应耦合, 电能无线传输

中图分类号: TM4 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517 (2009) 04-4-92

1 引言

电能无线传输模式是一种基于电磁感应耦合理论、现代电力电子能量变换技术及控制理论的新型电能传输模式,具体表现为可以实现供电线路和用电设备之间的非物理连接而进行能量传输,即“无线供电”。因此可以克服传统导线供电方式所具有的电击、火花、磨损等缺陷,实现电能传输过程的安全、可靠、灵活及高效^[1]。由于目前研究深度和广度所限,主要局限于较小功率和短距离方面的研究,对于其传输电能的容量、效率、距离、电磁干扰等关键问题,还有待于进一步的研究和开发。

2 系统构成及工作原理

新型感应耦合能量无线传输系统主要由三大部分组成,即能量发送器 (Transmitter), 分离式功率变压器 (Transformer) 和能量接收器 (Receiver), 如图 1 所示。

能量发送器主要由整流滤波电路、高频逆变装置和控制电路 (调节逆变频率及脉宽) 构成,其主要功能是产生一交流能量并使之通过分离功率变压器传输到能量接收器。因为分离变压器具有较大的气隙或其他较低导磁特性的介

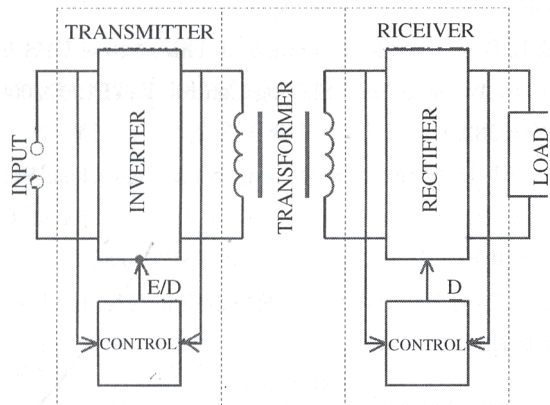


图1

质, 变压器初、次级之间的耦合程度较小。为了提高系统的功率传输能力, 初级绕组通常采用高频交流电压驱动; 能量接收器与变压器次级连接, 具有可灵活移动的特点, 由输出整流滤波环节和控制电路构成, 提供负载所需的电能; 发送器和接收器之间相对独立 (无机械、电气连接) 但又通过分离变压器的磁场耦合具有能量相关性。

分离式变压器由于有较大的绕组空间, 相应的有较大的漏感, 因此增加了绕组损耗。而且由于变压器初次级绕

组分别绕制在被气隙分割的初次级铁心上，激磁电感明显降低，激磁电流增加，从而使导通损耗增大。此外，由于较大气隙会产生严重辐射，所以应特别关注电磁干扰以满足 EMC 的需要。

系统工作时，在输入端将工频交流电经过整流和滤波（考虑功率因数校正）后进入逆变装置（Inverter）转换成高频交流电流供给变压器初级绕组。通过检测输入逆变器的电压信号来控制逆变频率使传输到变压器的能量基本保持稳定，这个频率调制是一个非线性过程；或通过检测初级电流调制脉宽来保持输入电流的稳定。输入能量经过变压器感应耦合后，次级端口输出的是高频电流，根据负载具体需求，若为直流负载，则将次级高频电流经过整流滤波环节后为负载供电；若为交流负载，则还需对整流后的直流再逆变为所需频率和幅值的交流信号。接收器的控制电路通过 PWM 方式保持输出能量的稳定性。此外，还有一些保护等辅助环节，在此不多做描述。

3 现有技术水平

国外对该技术的研究较早。早在 20 世纪 70 年代中期就出现了电动牙刷，随后发布了几项有关这类设备的美国专利^[1,2]，这一系统属于分离式无接触能量传输系统。当牙刷不用时，杯型底座通过电磁感应给牙刷中的电池充电。虽然传递的功率比较低，但感应耦合技术极好的满足了这种应用。由于牙刷要经常暴露在水和灰尘当中，无接触的能量传递使充电过程中没有裸露导体接触，从而大大提高电动牙刷的可靠性和安全性。

目前，国外有较多科研院所和公司从事此项技术的研究，对该技术进行研究和产品化的功率级别从几个千瓦到几百千瓦。比较有代表性的研究机构是新西兰奥克兰大学电子与电气工程系功率电子学研究中心。该中心从 20 世纪 90 年代初开始主要从事滑动式无接触能量传输系统的研究^[3]，经过 10 多年的努力，该技术在理论和实践上已获得重大突破，先后获有关发明专利 11 项^[4,5,6]。主要研究集中于移动设备，特别是在恶劣环境下的供电问题，如电动汽车、起重机、运货车，以及水下、井下设备。目前实用的设备已达 200kW、数公里的传输距离和 85% 以上的传输效率。目前该技术已被成功推广到日本、德国、美国^[7]等地。其典型的商业化产品有：

(1) 日本大阪幅库公司的单轨型车和无电瓶自动货车。

这些设备目前已成功地用于许多运输系统中，特别是在一些恶劣的环境下，如喷漆车间等。

(2) 新西兰奥克兰大学所属奇思公司基于电子与电气工程的技术成功地开发了两项有关 IPT 的实用项目：一是高速公路发光分道猫眼系统，目前正运行于新西兰 Rotorua 国家地热公园的 40kW 旅客电动运输车，现已安全运行约 4 年。

(3) 德国奥姆富尔公司的载人电动列车已试车成功。在奥姆富尔总部的测试轨是目前为止建造的最大的 IPT 系统，总容量达 150kW，轨道长度近 400 米，气隙为 120 毫米。该系统允许该接受绕组向各个方向移动的位置公差为 50 毫米。该公司还成功将这种新型无接触能量传输技术用于电动游船的水下驱动。此外，美国通用汽车公司推出的 EV1 型电车无接触感应系统也备受世人瞩目。由美国通用汽车公司的一个分公司 Delco Electronics 公司研制的 Magne-charge TM 是最先商业化的电车感应耦合充电器之一，现正由 Delco 生产和出售，专门用于 GM 的 EV1 型电动车充电^[8]。EV1 型电车的一个电池组，包括 26 个铅酸电池，可以储存约 16kW 的能量。这个能量等效于一个高效发电机利用大约 1 加仑汽油产生的电能。要进行充电，只需要将充电板插入车辆的充电端口即可。感应耦合进行能量传递的频率可以在 80kHz-350kHz 范围变动。充电可以反复进行，过程简单、安全、高效。

有关新型无接触能量传输系统的开发研究仍然在不断进行中。它涉及的领域也日益广泛，除了上述的交通、运输领域外，还有生物医学、钻井、工矿、水下作业等领域。文献 [9] 提出了“飞机座位上的无接触供电系统”。这个系统用于给每个座位上的娱乐设施提供能量，每个单元大约消耗能量 50W。在频率为 28kHz 时通过感应耦合界面进行能量传递。系统采用电流反馈耦合技术。该电能传输装置易拆开、易安装，使座位在飞机内可以灵活的移动。同时利用感应耦合技术提高了系统的安全性、可靠性和舒适度。文献 [10] 提出了一滑动式无接触能量传输系统概念，用于给深海中钻井、采矿和探测用的水下设备提供能量。生物医学领域正利用这一技术进行人工心脏^[11]和恶性肿瘤疗法^[12]等的研究。这些系统通过在病人皮肤下植入电路，由带在病人腰间的感应耦合装置透过皮肤向体内进行能量传递，开辟了新型的损伤性较小的医疗天地。由于耦合装置的放置以及病人皮肤的厚度不同，系统的电力电子驱动设备必须能经受耦合参数的变化。

在项目开发的同时,更多的研究工作集中在系统性能的改进方面。系统的研究逐步向大容量、高效率、远距离、高功率因数、高稳定性等方向发展。文献[13]描述的系统采用同轴绕变压器给负载进行大功率传输。多个运动负载可以通过独立的同轴变压器接收能量。同轴绕组变压器沿着单匝初级导体自由滑动。系统可用于拖车、传送装置以及在地下矿区的其他支撑设备。能量的传递是通过一个大型的电流源逆变器进行的,工作频率为2kHz。该系统涉及负载达10个,每个负载功率为100kW。整个系统功率达1MW。文献[14]集中于技术选择,重点放在变换器的利用和效率上。通过对几个合适的感应耦合电车充电变换器技术进行比较,根据效率和变换器的利用选择优化技术,建造模型系统。比较结果支持双极变换器设计。实验系统在单相240V交流电下,3.7kW功率级运行,效率大约为90%。文献[15]提出了超大间隙感应能量传输系统。通过使用在几百kHz范围的较高的传输频率,并对初、次级机构进行优化,实现传输功率为几个千瓦,气隙为160cm时。磁耦合结构的效率上升到90%。

目前在国内仅有个别综述性文献报道^[3, 16, 17],有关这方面的研究尚处于空白阶段。

综合上述研究,可以看出,感应耦合式电能无线传输是一项具有划时代意义的高新关键技术。由于其本身特点,这种新的能量接入模式能满足恶劣工作环境和灵活性、安全生产的需要,在工矿企业及高层建筑等方面具有巨大的市场需求;在交通运输方面,该技术对电动汽车乃至电动机车、磁悬浮列车等提供巨大的生命力;同时该技术可推广应用于室内用电设备、生物医学和人机电一体化装置能量的灵活接入,甚至还可以推广应用到国防、军事等众多领域。

4 关键问题

4.1 新型感应耦合能量传输机理

新型感应耦合能量传递机理与变压器传递功率有类似之处,即都是通过电磁感应原理将能量由一次侧传递到二次能量接收侧。但与传统变压器不同的是:(1)变压器的原边线圈通常都是多匝线圈,而在新型能量传输模式中,原边仅仅是一根载流体(相当于一匝线圈);(2)变压器原副边均采用紧密耦合且磁场介质通常采用具有高磁导特性的

铁磁性材料,具有很高的传输效率,而新型电能无线传输模式由于安全的需要或机械因素的限制,初次级之间有一定的距离,使系统的能量发射端(原边)与能量接收端(副边)具有较大的间隔,致使磁场传输介质中包括磁导率很低的空气磁路段,其耦合程度大大降低。因此,新型能量感应耦合传输同传统变压器的能量传输具有根本的区别,对这种新型电能传输模式的机理和能量传输模型进行深入地探索和研究是该技术的核心和关键所在。

新型感应耦合能量无线传输系统是通过使用特殊结构变压器的电磁感应实现的,在这种变压器中,初级能量通过气隙或其他介质感应耦合到次级,因此和传统变压器有很大的不同,较大气隙导致变压器具有较大漏感,其储能降低变压器效率并增加器件应力。因此,利用漏感的电路拓扑如谐振或软开关拓扑是解决这一问题的较优选择。

4.2 能量无线传输的效率

在新型能量传输系统中,能量损耗主要包括初级损耗、耦合损耗及次级损耗三大部分。初级损耗主要指电网能量经整流滤波及高频逆变过程的能量损耗,主要是开关管的开关损耗,本课题拟采用软开关技术加以解决;耦合损耗是该系统能耗的主要部分,因为磁场传输介质中包括磁导率很低的空气磁路段,造成感应效率较低,在本课题采用高频(10~30kHz)传输磁场和合理的变压器结构提高耦合的效果和程度;能量耦合后还要经过变换后为负载所用,在变换过程中也会存有一部分能量损失,减少次级能量变换过程的开关损耗和输出回路的无功功率补偿也是本项目的主要研究内容之一。

4.3 能量无线传输容量和距离

能量无线传输的容量和距离决定新型能量传输模式的应用范围和程度。传输距离增大,耦合效率降低,为了提高效率,就必须提高电磁能的频率,传输频率的提高会对传输容量有一定的制约。通过采用科学有效的技术措施(如高频逆变后耦合、力争减小功耗、合理的变压器结构等),力图使电能具有较大的传输容量和较远的传输距离。

4.4 能量传输的安全性和可靠性

安全性和可靠性是能量传递的前提。在新型能量传输系统中包含大功率整流滤波、高频逆变,远距离感应耦合、次级整流滤波等环节,不可避免的存在较强的电磁干扰及

能量辐射,对电网及周围用电设备甚至人体都可能存在一定程度的负面效应。因此对系统进行电磁兼容性和可靠性设计也是本课题的核心研究内容。

参考文献

- [1] D.A.G. Pedder, A. D. Brown, and J. A. Skinner. A contactless electrical energy transmission system. IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 46, PP. 23-30, Feb. 1999.
- [2] Roszyk L. Barnas L. Hand held battery operated device and charging means therefore[P]. U. S. Patent 3, 840, 795, October 1974.
- [3] Giuliani D, McMahon R, Engel D. Pacing toothbrush[P]. U. S. Patent 5, 544 382, August 13, 1996.
- [4] 李宏. 感应电能传输-电力电子及电气自动化的新领域[J]. 电气传动, 2001, (2): 62—64.
- [5] Boys J T. Supply of power to primary conductors[P]. International Patent, WO 99/30402.
- [6] John T B Inductive power pick-up coils[P]. U. S. Patent, 5, 528, 113, Jun 1996.
- [7] Boys J T. Inductive power transfer across an extended gap [P]. International Patent, WO 98/50993.
- [8] Elliott G A J, Boys J T, Green A W. Magnetically coupled systems for power transformer to electric vehicles[J]. IEEE Catalogue 95th 8025: 797—801.
- [9] Jackson D K. Inductive-coupled Power transfer for electromechanical system[J]. Ph. D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, March 1998.
- [10] Kawamura A. Ishiosa K. Wireless transmission of power and information through one high-frequency resonant AC line inverter for robot manipulator applications [J]. IEEE Trans. Ind. Appl, 1996, 37(3): 503—508.
- [11] Heeres B J, Novotny DW, etc. Contactless underwater power delivery [J]. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 1994, 418—423.
- [12] Abiomed. Inc. Total Artificial Heart. Cerry Hill Drive, Danvers. MA01923.
- [13] Hinchliffe S, Hobson L. High efficiency DC-AC converters suitable for high frequency induction process heating. IEEE Power Electronics Specialists Conference, April, 1988, 1228—1235.
- [14] Klontz K W, Divan D M. Contactless power delivery system for mining applications[J]. IEEE Trans. Ind. Appl. , 1995, 31(1): 27—35.
- [15] Klontz K. Esser A, Wolfs P, Divan D. Converter selection for electric vehicle charger systems with a high-frequency high-power link. IEEE Power Electronics Specialists Conference. June 1993, 855—861.
- [16] Mecke R. Optimisation of inductive energy transmission systems with an extraordinarily large air gap [J]. Proceedings of Maglev2002, Sept, 2002.
- [17] 宋跃, 杜雪飞, 戴欣等. 非接触式移动电源新技术[J]. 电气自动化, 2003, (5): 11—13.
- [18] 武瑛, 严陆光, 徐善纲. 新型无接触能量传输系统[J]. 变压器, 2003, (6).