

Gaonengxiao Ganying Ouhe Dianneng Chuanshu Xitong Fenxi Yu Yanjiu

高效感应耦合 电能传输系统分析与研究

夏晨阳 伍小杰 庄裕海 著

中国矿业大学出版社

高能效感应耦合电能传输 系统分析与研究

夏晨阳 伍小杰 庄裕海 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要在国内外学者研究的基础上,通过对感应耦合电能传输系统的各种工作模式和拓扑结构下传输功率和效率特性(简称能效特性)进行全面、系统的分析,并根据分析结果,提出了相应的优化措施以提高系统的能效特性。

图书在版编目(CIP)数据

高能效感应耦合电能传输系统分析与研究/夏晨阳,伍小杰,庄裕海著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2014. 7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2402 - 6

I. ①高… II. ①夏… ②伍… ③庄… III. ①无导线输电

IV. ①TM724

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 155324 号

书 名 高能效感应耦合电能传输系统分析与研究

著 者 夏晨阳 伍小杰 庄裕海

责任编辑 何 戈

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 6 字数 156 千字

版次/印次 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

感应耦合电能传输(Inductively Coupled Power Transfer, 简称 ICPT)技术是 20 世纪 90 年代新西兰奥克兰大学的学者提出的一种基于电磁感应耦合原理,实现电气设备以无线的方式从固定电网灵活获取电能的一种电能传输技术。相比于传统的“导线+接触器”的有线电能传输模式,该模式更加安全、可靠、灵活。美国、德国、日本、新西兰、韩国等发达国家投入了大量的人力、物力、财力,从该技术机理与产品应用等方面进行了大量的分析和研究。目前,该技术及产品开发已成为电力电子应用最活跃的研究领域之一,已经在电动汽车充电、桌面家用电气设备无线供电、体内微机电无线能量传输等领域取得了较大的进展。随着该技术的进一步成熟和应用,相信它将成为工业自动化及能源利用的重点投资领域之一。

虽然目前 ICPT 技术研究与应用已经取得阶段性的进展,但由于对 ICPT 技术研究与应用开发尚不全面和不够深入,尤其在如何提高系统的传输功率和效率特性(以下简称能效特性)方面还不够系统、全面,系统的能效品质还停留在一个比较低的水平上,相关实验系统和产品的能效特性仍然比较低下,使得该技术的推广和应用仍存在较大难度。究其原因,主要是由于 ICPT 系统是一个磁电一体化综合系统,制约系统能效特性的参数众多,各个参数之间存在强力粘连性,从而为系统能效特性的分析和优化设计带来了很大的困难。因此,对 ICPT 系统能效特性的研究具有重

要的理论 and 现实意义。

本书以第一作者的博士论文理论研究成果为基础,融合了国家自然科学基金青年基金“自配置非对称无线蜂窝网供电机制及关键技术研究”(项目编号:51307173)、江苏省自然科学基金青年基金“自由高效无线平面供电网关键技术研究”(项目编号:BK20130188)、高等学校博士学科点专项科研基金“高瓦斯粉尘矿井无线安全供电机理与建模研究”(项目编号:20120095120022)、中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金(2014ZDPY17)等课题的研究内容。旨在针对 ICPT 系统的能效特性优化问题,从系统的等效耦合模型出发,对各种工作模式和拓扑结构下 ICPT 系统的能效特性进行全面和系统的分析,同时根据理论分析结果提出相应的能效优化方法,并将该方法应用到实际 ICPT 系统的分析与研究中。

除第一章绪论外,本书分为两部分,第一部分主要对单相 ICPT 系统能效特性进行分析和研究,包括第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章;第二部分主要对三相 ICPT 系统能效特性进行分析和研究,包括第 7 章、第 8 章、第 9 章。其中,第 1 章、第 7 章为第一作者、第二作者和第三作者联合撰写,其余各章为第一作者独立撰写。

本书的成绩包含了恩师重庆大学自动化学院孙跃教授、苏玉刚教授的辛劳与关怀,并得到了中国矿业大学戴鹏教授、宗伟林副教授、周娟副教授、于月森副教授等的悉心支持,重庆大学自动化学院戴欣教授和中国矿业大学耿乙文老师、王颖杰老师等也给予了热情鼓励与帮助,在此表示衷心感谢和崇高敬意。

本课题组的邵祥、童为为、年长春、林克章、解光庆、王延焯、陈国平、李玉华等为研究成果的取得做出了大量贡献,在此表示深切的感谢。

在本书编写过程中,参阅了一些优秀的资料文献,并且引用了

前 言

一些参考资料中的相关内容,在此一并表示由衷的感谢。

由于水平有限,书中的谬误之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

著 者

2014 年 3 月于徐州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 感应耦合电能传输(ICPT)系统简介	6
1.3 感应耦合电能传输系统能效分析.....	18
1.4 本书主要内容.....	26
第 2 章 单相 ICPT 系统组成及其能效特性影响因素分析	30
2.1 引言.....	30
2.2 ICPT 系统组成及关键技术	30
2.3 基于能效特性分析的 ICPT 系统选型与设计	36
2.4 ICPT 系统设计	55
2.5 本章小结.....	59
第 3 章 基于互感耦合参数优化的 ICPT 系统能效特性分析	60
3.1 引言.....	60
3.2 ICPT 系统工作模式分析	61
3.3 最大功率传输目标下的 ICPT 系统互感耦合 参数优化.....	63
3.4 最大效能积指标下的 ICPT 系统互感耦合 参数优化.....	68
3.5 仿真与实验验证.....	73

3.6	本章小结	77
第4章	ICPT 系统效率分析与参数优化	79
4.1	引言	79
4.2	ICPT 系统效率计算	80
4.3	额定负载电阻下电流型 ICPT 系统效率分析与优化	86
4.4	特定磁路结构下 ICPT 负载电阻优化	89
4.5	ICPT 系统效率验证	93
4.6	本章小结	96
第5章	导轨式 ICPT 系统能效特性的研究	97
5.1	引言	97
5.2	导轨式 ICPT 系统磁路机构介绍	98
5.3	导轨式 ICPT 系统能效分析	99
5.4	磁芯空气磁阻的近似计算	105
5.5	导轨式 ICPT 系统优化设计策略	108
5.6	导轨式 ICPT 系统优化实验验证	109
5.7	本章小结	113
第6章	多负载 ICPT 系统能效特性的分析	115
6.1	引言	115
6.2	多负载 ICPT 系统模型	116
6.3	多负载 ICPT 系统功率传输能力分析与优化	118
6.4	基于互感优化的多负载 ICPT 系统能效特性优化控制	123
6.5	多负载 ICPT 系统能效特性优化实验验证	127
6.6	本章小结	131

第 7 章 三相 ICPT 分析研究	132
7.1 引言	132
7.2 三相 ICPT 系统分析	132
7.3 本章小结	140
 第 8 章 三相串联谐振逆变器功率控制策略.....	141
8.1 引言	141
8.2 三相 ICPT 系统原理及串联谐振拓扑分析	142
8.3 三相串联谐振逆变器移相控制策略分析	143
8.4 仿真与实验验证	150
8.5 本章小结	154
 第 9 章 高效非对称磁路三相无线平面供电网.....	155
9.1 引言	155
9.2 自配置非对称磁路三相无线平面供电网的 组成与工作机理分析	156
9.3 传统对称磁路与新型非对称磁路三相 ICPT 系统对比分析	161
9.4 非对称磁路三相 ICPT 系统功率传输容量研究	166
9.5 实验验证	167
9.6 本章小结	172
 参考文献.....	173

第1章 绪论

1.1 引言

众所周知,电能和信号是现代电子电气工程的两个重要方面。随着现代信息技术的高速发展,无线信号传输技术已经得到了长足的发展并得到了越来越普遍的应用,在信息现代化的进程中占据了非常重要的位置。然而,电能的无线传输远远落后于信号的传输,随着现代工业技术的发展,其传输技术依然局限于传统的电源直接接入模式,即接触式接入模式。

接触式电能传输系统通过导体之间直接相连的形式,即采用“导体+接线器”的形式传送电能。为了提高能量的传送效率,人们采用了多种方法包括优化设计参数、采用新型器件、增加系统补偿电路等形式来尽量减小能量的损失率,使“导体+接线器”的传统的电能传送模式取得了很大的成功,为整个社会的发展做出了巨大的贡献。但是随着科学技术与社会经济的不断发展与进步,电气设备日益普及到社会的各个角落,各种各样的新式电气设备尤其是移动电气设备的相继出现,基于传统理论的供电模式带来的弊端越来越明显,特别在以下几个领域的供电方面更是存在很大的现实问题:

(1) 家庭和办公桌面用电设备的供电问题。现代办公桌上有大量用电设备,如笔记本电脑、台灯、手机、MP3 充电器、相机等,

由于这些用电设备都各自配有专用的充电器,且各自充电器之间不相互通用,因此每种用电设备都需要单独的电源线,从而造成桌面存在大量的线缆,影响了美观,并存在一定的安全隐患。

(2) 特殊环境如潮湿环境下、水中和煤矿井下的安全供电问题。例如对于充电牙刷来说,牙刷总处于潮湿状态,造成充电存在很大的安全隐患;在水中,接触式电能传输已经不能完成水下机器人的供电问题,机器人一旦检测到电量即将消耗完,必须提前停止作业返回进行充电,这样就造成了时间和能源的浪费,并造成了其工作的不连贯性;在易燃易爆的煤矿井下,输电线的任何磨损,接触火花和炭积都存在很大的安全隐患,在每年的工矿企业事故死亡人数中,由接触取电产生的电火花而导致的各种矿难事故死亡人数占较大的比例。

(3) 电子医疗产品的供电问题。随着科学技术的发展,各种功能的电子医疗产品不断进入人们的生活,对于短时间内工作于人体内的人工心脏、电子耳蜗以及体内微型诊疗机器人等生物体内置电子装置也正发挥着巨大的作用,为患者带去生活上的方便甚至延续着患者的生命。但目前此类生物体内置电子装置普遍采用电池供电的电源模式,虽然电池容量在不断增大,但由于其没有实时能量补给功能,始终存在电量耗尽的窘境。为了更换电池,病人要定期进行手术,如果能够以非接触的方式,在体外为安装在病人体内的人工器官供电,则可以避免因为重复手术给病人带来痛苦,从而能够使患者感觉舒适,大大提高移植手术病人的生活质量。

(4) 轨道交通方面的供电问题。对于目前广泛采用的电力机车、城市电车和轻轨电车等设备,采用的供电方式主要是通过受电弓或者滚轮从导轨上滑动或滚动取电,这种方式容易产生接触不良、摩擦火花等问题,存在一定的安全隐患。另外,随着电动汽车、电动摩托车的广泛应用,其充电问题也得到越来越广泛的关注,除

了研发大容量的充电电池外,另一个方面是研究无线和快速充电技术,在固定的充电站可以实现电动车的无线快速充电,从而避免因用户遗忘充电器而使得机车停在半路上的尴尬状况。

(5) 机器人的供电问题。目前主要是通过给机器人身上背负的电池进行供电,由于电池体积大,重量重,这种方式不但增加了机器人的负担,而且造型也不美观,另外在大量机器人同时充电的时候,造成电源线错综复杂的局面。如果能对某些特定环境下工作的机器人通过实时供电,不但可以解决其灵活供电问题,还可以减少机器人的负担和成本。

以上的分析和事实证明,随着人们生活以及生产活动范围的扩大和新兴技术的发展,传统的导线直接相连的电传输模式已经不能满足生产以及生活的需要,人们迫切需要一种新型的电传输技术来满足各种新型电气设备及各种特殊条件下的供电需求。

其实,早在一百多年前,美籍克罗地亚物理学家尼古拉·特斯拉就有过对无线电能传输技术的憧憬和向往,并搭建了著名的华登克里夫塔(Wardenclyffe Tower),这个塔一度被当时的报纸称为“特斯拉的百万大建筑”,特斯拉希望用这个塔进行跨大西洋的无线电广播和无线电能传输实验,他当初的无线输电构想绝对是足够大胆。他把地球作为内导体,把距离地面约 60 km 的电离层作为外导体,在地球与电离层之间建立起大约 8 Hz 的低频共振,再利用环绕地球的表面电磁波来远距离传输电能,最终可以实现向全球供电的目的。虽然其最终梦想未能实现,但是他的发明对后世影响深远,他也堪称是无线输电的鼻祖。但是,在其后的一百多年里,当无线信号技术突飞猛进的时候,无线电能传输的研究却陷入了停滞。近年来,随着社会的发展和需要,无线电能传输又重新回到了科技研究的前沿。

无线电能传输技术^[1~5]由于实现了电源和用电设备之间完全

的电气隔离,具有安全、可靠、灵活等传统电能传输方式无可比拟的优点,因此得到了国内外学者的广泛关注。

目前已经问世的无线电能传输技术,根据其电能传输原理,大致上可以分为以下几类:

第一类是基于电磁感应原理的无线电能传输技术,即感应耦合电能传输技术^[2,6,7]。这种无线电能传输技术在许多便携式终端里应用日益广泛,该方法主要将两个线圈放置于邻近位置上,当电流在一个线圈中流动时,所产生的磁通量成为媒介,导致另一个线圈中也产生电动势。

第二类是直接应用了电磁波能量可以通过天线发送和接收的原理,即 RF 电能传输技术。这和一百年前的收音机原理基本相同,直接在整流电路中将电波的交流波形变换成直流后加以利用,但不使用放大电路等。

第三类是利用电磁场的共振方法,即磁共振电能传输技术^[8,9]。共振技术在电子领域应用广泛,但是,在供电技术中应用的不是电磁波或者电流,而只是利用电场或者磁场。2006 年 11 月,美国麻省理工学院(MIT)物理系助理教授 Marin Soljacic 的研究小组首次宣布了将电场或者磁场应用于供电技术的可能性。

第四类是激光电能传输技术。激光具有方向性强、携带能量大等特点,在无线电能传输中越来越被人们所重视。无线电能传输实现的原理很简单,和一般的激光发生器相差无几,只是在数量级上和激光接收上有差距。它包含电源和激光发生器,电源给激光发生器提供必要的工作能量。激光发生器将电能转换成激光能,然后发射出去。激光接收装置用来接收激光发射装置发出的激光并将其转化为电能,这是微光发生过程的逆过程。当激光照射到光电转换器,光电转换器可以实现由光能向电能的转化,转化后的电能还要经过整流、滤波来提高电能的质量。然而利用激光技术进行输电有很多问题需要解决。激光束的能量场强度高、汇

聚能力强,接收端会产生很大的热量,而且激光的产生过程中也会伴随着电磁辐射的产生。高强度的激光能量会瞬间对人体产生不可修复的伤害,所以激光输电技术目前还只局限于太阳能空间基地的理论研究和一些实验研究。

第五类是微波电能传输技术。微波能够有效地传输能量,不仅地面的电子设施可以用微波的照射来供给能量进行工作,空中的飞机也能够通过接收从地面发射的微波束中得到能量,进行预定的飞行计划。地面上的微波站将能量很高的微波发射到很远的空间,装置在飞机上的仪器就可以接收到微波能量,并将这种能量转化成为电能,驱动飞机上的发动机。根据这样的原理,人们只要在地面上每隔一二百千米设置一个微波发送站,就可以使微波飞机不用着陆、不用加油,持续不断地围绕地球飞行。

然而,在这几类方式中,激光电能传输技术只能实现点对点的传输,而且容易受天气等环境的影响;微波电能传输技术和 RF 电能传输技术在大功率传输时均存在辐射太强、对人体有害的弊端;磁共振电能传输技术由于频率较高,对人体伤害较大,因此目前比较有效且得到广泛应用的主要是基于电磁场近场耦合方式的感应耦合电能传输技术。

感应耦合电能传输技术,简称为 ICPT 技术,是 20 世纪 90 年代以新西兰奥克兰大学波依斯(J. T. Boys)教授为首的课题组率先提出的无线电能传输技术。此项技术一诞生,立刻引起了国际同行的高度关注。新西兰奥克兰大学、日本东京大学、崇城大学、东北大学、中国重庆大学、香港城市大学等的研究团队从 20 世纪 90 年代初开始分别从不同的应用领域对 ICPT 技术进行了研究,并取得了很好的成果,为后期的发展奠定了基础。与此同时,新西兰、德国、美国和日本等国家相继投入大量的人力和物力,针对一些特殊用途已经开发了相应的产品。

这种基于感应耦合原理实现电能无线传输的技术,实现了用

电设备以无线的方式从电网获取电能,是一种用电设备向固定电网系统获取电能的全新模式,因此,感应耦合电能传输技术及其产品开发将成为电力电子应用最活跃的研究领域之一,也将是工业自动化及能源利用的重点投资领域之一。可以这样说,蓝牙技术是解决设备信号接入最后一米工程的最佳解决方案,在供电和电源领域,基于感应耦合原理的无线电能传输技术是电气设备电源接入最后一米工程的最佳解决方案。

本书主要研究的是目前比较有效且得到广泛应用的基于电磁场近场耦合方式的感应耦合电能传输技术。

1.2 感应耦合电能传输(ICPT)系统简介

1.2.1 概述

感应耦合电能传输技术在不同领域和研究团队有着不同的名称,如在生物医电领域称为 TET(Transcutaneous Energy Transmission)技术,在其他领域也称为 WET(Wireless Energy Transfer)、CPS(Contactless Power Supply)、CLPS(Contactless Power Station)、IPT(Inductive Power Transfer)及 ICPT(Inductively Coupled Power Transfer)等等,本书采用 ICPT 这种称谓。

ICPT 技术基于电磁感应及耦合原理,综合利用现代电力电子技术、磁场耦合技术及大功率高频变换技术(包括谐振变换技术和电磁兼容技术等),借助现代控制理论和策略,实现用电设备以无线方式从电网获取电能,是一种新型的电能传输模式。和传统的接触式电能传输技术相比,ICPT 技术主要有以下优点:

(1) 由于感应耦合电能传输系统的原副边磁路完全分离,意味着用电设备可以完全脱离供电设备进行运动,仅在需要时靠近供电设备进行充电。这样可以减少活动部分的负载重量,如被充电部分不必配置电源功能模块,不仅可以应用于一些特殊场合,也

可以降低产品的成本。

(2) 由于供电系统和负载之间无直接的电气连接,不会产生火花,不必担心触电和短路,没有机械磨损和摩擦,电气的可靠性和安全性得到了极大的提高,设备易维护易管理。

(3) 由于电气两端可完全封闭,系统各部分之间可真正实现完全电气绝缘,可以确保系统的水密性和气密性。在室外雨天或水下环境应用有先天优势,可以保证一些特殊系统的全天候运行。

(4) 由于无需机械插拔动作,可以实现真正的无人化管理。适用于无人区域、环境恶劣区域以及一些需要全自动智能工作的场合。

基于感应耦合原理的电能传输系统结构框图如图 1.1 所示。

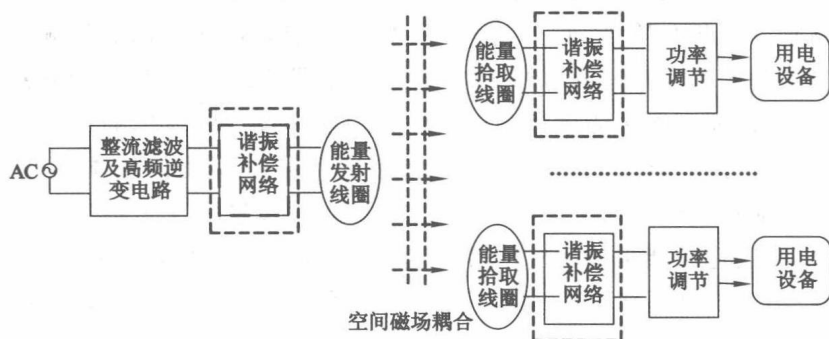


图 1.1 ICPT 系统结构框图

整个 ICPT 系统的基本原理如下:利用整流器将三相或单相工频电源经过整流滤波成直流电,再通过高频逆变装置将直流电逆变成高频交流电流,这种高频交流电流流经能量发射线圈时便向外界发射电磁能量,在电磁感应原理的作用下,能量拾取线圈中便产生相应频率的感应电流,经过功率调节装置的调节后向电气设备提供电能,高频电磁能的发射和拾取为其核心部分。能量发射线圈可做成多匝线圈或者单匝导轨线圈的形式,这样就可以在

无线方式下向各种用电设备提供相当灵活的电源接入模式。能量拾取线圈可以为多个拾取结构,从而实现能量的一对多传输。

感应耦合电能传输技术与传统的电源供电技术相比,其最大的优势就是能够实现电能的无线传递,而实现这一过程主要是由原边磁能发射线圈中的高频交流电流通过空气隙辐射电磁波的形式向副边传递电能,可等效地看成一种松耦合变压器,原边能量发射线圈与副边拾取线圈之间有较强的空气磁路,这也是与传统变压器之间的区别。根据磁路的欧姆定律和安培环路定律,考虑到空气的磁阻远大于磁芯的磁阻,因此磁路的磁动势降主要分布在空气磁路上,随着空气磁路磁阻的增加,就需要在原边能量发射线圈中产生较大的激励电流,而激励电流的增大一方面会增大电磁机构的体积和质量,另一方面会降低电磁能量传输机构的传输效率。为了提高系统的电能传输效率,减小器件的体积,提高功率密度,就需要在电磁能量传输机构的原边能量发射线圈中通过高频电流,通过高频化来提高整个系统的功率密度,减小器件体积,提高电能传输效率。因此需要在原边回路加入整流及高频逆变环节,提高电磁能量传输机构的原边能量发射电流频率,达到减小系统体积、提高系统传输功率密度和效率的目的。而为了实现系统的最大化能量传输,同时减少系统的输入伏安容量,通常需要对原、副边励磁电感进行补偿。

感应耦合电能传输技术主要包含单相感应耦合电能传输技术和三相感应耦合电能传输技术。目前大多数国内外学者对单相 ICPT 技术研究较多,而对于三相 ICPT 技术研究较少,因此与三相 ICPT 技术相比较起来,单相 ICPT 技术相对较为成熟。

1.2.2 国内外发展现状

1.2.2.1 国外发展现状

20 世纪 80 年代,E. Abel 和 S. M. Third 提出了感应耦合电