

文章编号: 1672 - 058X(2009)05 - 0485 - 04

无线电能传输技术综述^{*}

张茂春¹, 王进华², 石亚伟²

(1. 重庆市电力公司 万州供电局, 重庆 万州 404000; 2 西南大学 电子信息工程学院 重庆 400715)

摘 要:叙述了无线电能传输的概念和发展历程,着重对电磁感应式、电磁共振式和电磁辐射式三种无线电能传输进行了详细分析;电磁感应式传输距离近、效率低且需要补偿;电磁共振式是对感应式的突破,可以在几米的范围内传输中等,其研究前景较好;电磁辐射式传输距离远,功率较大,但传输较远距离时需要高效整流天线和高方向性天线,其研制难度较大。

关键词:无线电能传输;电磁感应;磁谐振;微波

中图分类号: TM72

文献标志码: A

所谓无线电能传输^[1] (Wireless Power Transmission——WPT)就是借助于电磁场或电磁波进行能量传递的一种技术。无线输电分为:电磁感应式、电磁共振式和电磁辐射式。电磁感应可用于低功率、近距离传输;电磁共振适于中等功率、中等距离传输;电磁辐射则可用于大功率、远距离传输。近年来,一些便携式电器如笔记本电脑、手机、音乐播放器等移动设备都需要电池和充电。电源电线频繁地拔插,既不安全,也容易磨损。一些充电器、电线、插座标准也并不完全统一,这样即造成了浪费,也形成了对环境的污染。而在特殊场合下,譬如矿井和石油开采中,传统输电方式在安全上存在隐患。孤立的岛屿、工作于山头的基站,很困难采用架设电线的传统配电方式。在上述情形下,无线输电便愈发显得重要和迫切,因而它被美国《技术评论》杂志评选为未来十大科研方向之一。在无线输电方面,我国的研究才刚刚起步,较欧美落后。在此旨在阐述当前的技术进展,分析无线输电原理,为我国在无线输电方面的深入研究提供参考。

1 无线电能传输技术的发展历程

最早产生无线输电设想的是尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla),因而有人称之为无线电能传输之父。1890年,特斯拉就做了无线电能传输试验。特斯拉构想的无线电能传输方法是把地球作为内导体,把地球电离层作为外导体,通过放大发射机以径向电磁波振荡模式,在地球与电离层之间建立起大约 8 Hz的低频共振,利用环绕地球的表面电磁波来传输能量。最终因财力不足,特斯拉的大胆构想没能实现^[1,2]。

其后,古博(Goubau)、施瓦固(Schweing)等人从理论上推算了自由空间波束导波可达到近 100%的传输效率,并随后在反射波束导波系统上得到了验证。20世纪 20年代中期,日本的 H. Yagi和 S. Uda发明了可用于无线电能传输的定向天线,又称为八木-宇田天线。20世纪 60年代初期雷声公司(Raytheon)的布朗(W. C. Brown)做了大量的无线电能传输研究工作,从而奠定了无线电能传输的实验基础,使这一概念变成了现实^[3]。在实验中设计了一种效率高、结构简单的半波电偶极子半导体二极管整流天线,将频率 2.45 GHz的微波能量转换为了直流电。1977年在实验中使用 GaAs-Pi肖特基势垒二极管,用铝条构造半波电

收稿日期: 2008 - 02 - 21;修回日期: 2008 - 04 - 25。

*基金项目:西南大学博士基金(104180 - 20710912)。

作者简介:张茂春(1973 -),男,重庆万州人,工程师,从事电力系统的研究。

偶极子和传输线,输入微波的功率为 8 W,获得了 90.6%的微波——直流电整流效率。后来改用印刷薄膜,在频率 2.45 GHz 时效率达到了 85%。

自从 Brown 实验获得成功以后,人们开始对无线电能传输技术产生了兴趣。1975 年,在美国宇航局的支持下,开始了无线电能传输地面实验的 5 a 计划^[4]。喷气发动机实验室和 Lewis 科研中心曾将 30 kW 的微波无线输送 1.6 km,微波——直流的转换效率达 83%。1991 年,华盛顿 ARCO 电力技术公司使用频率 35 GHz 的毫米波,整流天线的转换效率为 72%。1998 年,5.8 GHz 印刷电偶极子整流天线阵转换效率为 82%。

前苏联在无线电能传输方面也进行了大量的研究。莫斯科大学与微波公司合作,研制出了一系列无线电能传输器件,其中包括无线电能传输的关键器件——快回旋电子束微波整流器^[5]。

近几年,无线电能传输发展更是迅速。Wildcharge、Powercast、SplashPower 东京大学,相继开发出非接触式充电器。MIT 在 2007 年 6 月宣布,利用电磁共振成功地点亮了一个离电源约 2 m 远的 60 W 电灯泡,这项技术被称为 WiTricity。该研究小组在实验中使用了两个直径为 50 cm 的铜线圈,通过调整发射频率使两个线圈在 10 MHz 产生共振,从而成功点亮了距离电力发射端 2 m 以外的一盏 60 W 灯泡。

2 无线电能传输的原理

2.1 基于变压器的疏松耦合非接触式的无线电力传输

非接触电能传输系统利用疏松感应耦合系统和电力电子技术相结合的方法,实现了电能的无物理连接传输。它将系统的变压器紧密型耦合磁路分开,初、次级绕组分别绕在具有不同磁性的结构上,实现在电源和负载单元之间进行能量传递而不需物理连接^[6]。其一次侧、二次侧之间通过电磁感应实现电能传输,因气隙导致的耦合系数的降低由提高一次侧输入电源的频率加以补偿。

理论和经验都表明:当原边电流频率、幅值越高,原、副边距离越小,与空气相比,磁心周围介质的相对磁导率越大时,可分离式变压器的传输效率越高。但实际应用当中原副边距离不可能无限小,必须对原副边采取相应的补偿措施,这种无线电能传输效率较低。

2.2 基于电磁辐射的无线电力传输

对无线电能传输来说,能量传递的效率是最重要的。因此,方向性强、能量集中的激光与具有类似性质的微波束是值得考虑的选择。但激光光束在空间传输易受到空气和尘埃的散射,非线性效应明显,且输出功率小,因此微波输能成为首选。微波输能,就是将微波聚焦后定向发射出去,在接收端通过整流天线(rectenna)把接收到的微波能量转化为直流电能。

(1) 布朗的微波输电系统。上世纪 60 年代,William C. Brown 向世人展示的微波传输电能示意图^[7,8]如图 2 所示。该微波传输系统包括微波源、发射天线、接收天线 3 部分。微波源内有磁控管,能控制源在 2.45 GHz 频段输出 5~200 W 的功率;微波源输出的能量通过同轴电缆连接至和波导管之间的适配器上;亚铁酸盐的循环器连接在波导管上,使波导管和发射天线相匹配。发射天线包含 8 个部分,每个部分上都有 8 个缝隙。这 64 个缝隙均匀的向外发射电磁波。这种开孔的波导天线很适合用于无线电能传输,因为它有高达 95% 的孔径效率和很高的能量捕捉能力。硅控整流二极管天线用来收集微波并把它转换成直流电,在布朗展示的系统该接收天线拥有 25% 的收集和转换效率,这种天线在 2.45 GHz 测试时曾经达到甚至超过 90% 的效率。传输距离比较远之后,增强天线的方向性和效率会十分困难。

(2) 微波输能的传输效率。若 D 代表微波在自由空

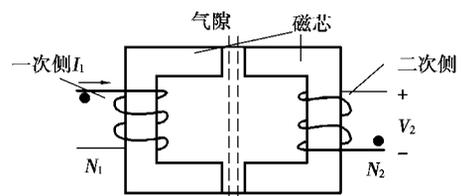


图 1 疏松式变压器,原副线圈分离

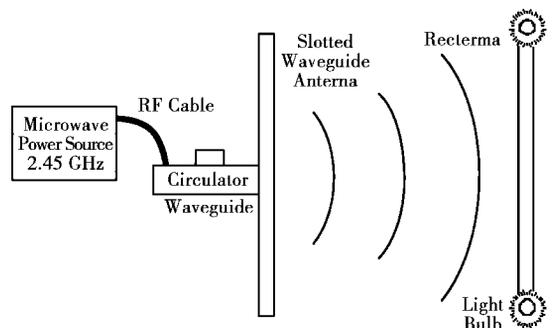


图 2 利用微波传输电能

间传输的距离, A_t, A_r 分别代表发射天线和接收天线的面积, λ 表示工作波长, 则微波在自由空间的传输效率 η 是参数

的函数。 $\eta = \sqrt{\frac{A_t A_r}{2}} \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 1$, 图 3 表示出了它们之间的关系, 假设发射天线的口径场分布为高斯型。

从曲线可以得出这样一个结论, 传输效率和传输距离没有直接的联系, 而是由 $\sqrt{\frac{A_t A_r}{D}}$ 决定。故距离 D 增大的效应可由 A_t, A_r 的增加或 λ 的减小来补偿。微波输能的总效率等于直流到微波、微波传输和接收整流三部分效率之积。表 1 给出了微波输能总效率的分布。由表 1 可以看出, 当前微波传输能量的效率还不高, 但是还是很有发展潜力的。

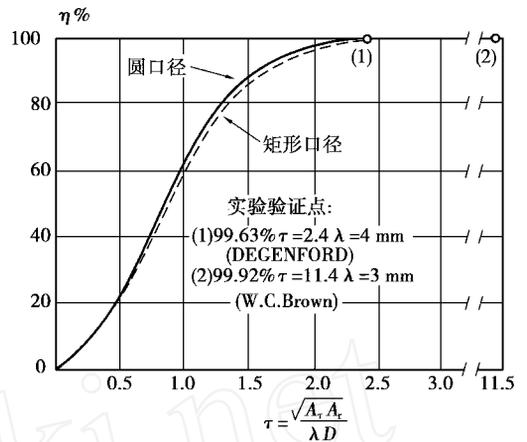


图 3 自由空间微波传输效率和 τ 的关系

表 1 微波输能总效率和各部分的效率

	当前值	改进值	预期值
微波发生器的效率	76.7	85	90
发生器至接收天线口径之间的传输效率	94	94	95
接收整流效率	64	75	90
总效率	45	60	77

2.3 基于强耦合磁谐振实现的无线电力传输

辐射性传输, 虽然完全适合于传输信息, 但是将其应用于电能传输却会引起很多的困难: 如果辐射是全方向性的, 则电能传输效率会十分的低; 如果是定向辐射, 也要求具有不间断可视的方位和十分复杂的追踪仪器设备, 而磁谐振却没有这么复杂。

(1) 自谐振线圈的模型描述。A 是一个半径为 25 cm 的单匝铜环, 它是激励电路的一部分, 输出频率为 9.9 MHz 的正弦波。S 和 D 是自谐振线圈。B 是连接到负载 (灯泡) 的单匝导线环。不同的 k 代表箭头表示的对象之间的直接耦合。调整线圈 D 和 A 之间的角度, 保证它们之间的直接耦合等于零。线圈 S 和 D 同轴排列。线圈 B 和 A 以及 B 和 S 的直接耦合是可以忽略不计的。

(2) 强耦合磁谐振下的电能传输效率。在耦合谐振系统 (如声音、电磁、磁、核等) 里, 经常会产生“强耦合”运行状态。如果处于给定系统中的这种状态, 谐振体之间的能量交换则期望达到很高的效率。如果不考虑周围空间的结构, 并且在干涉损耗和散失在周围环境中的损耗很

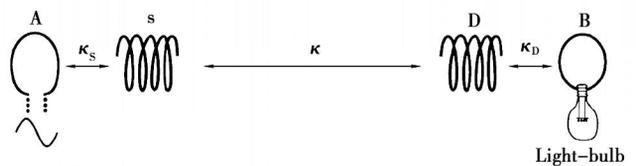


图 4 磁谐振系统模型

低时, 中等距离的能量传输用这种方法可以在接近全方向的状态下实现并达到很高的效率。

强耦合磁谐振系统可以借助耦合模理论加以描述。当发射和接收装置谐振时, 功率最佳, 此时的效率可表示为^[1-3]:

$$\eta = \frac{w_s k^2}{\left[\left(1 + \frac{w_s}{D} \right) \frac{w_s k^2}{D} \right] + \left[\left(1 + \frac{w_s}{D} \right) \right]} \quad (1)$$

式 (1) 中, w_s 和 w_D 分别代表源和被驱动装置的衰减率 (辐射和吸收能量的损失); w 是无负载装置时的附

加项:是发射和接收装置之间的耦合系数。由式(1)可见,当 $\frac{w}{D} = \sqrt{1 + k^2 / (s_D)}$ 时,具有最大值,且高效率能量转移的关键是: $k^2 / (s_D) > 1$ 。这就涉及了强耦合状态,磁谐振在这种装置中扮演着重要的角色。M II的论文数据显示,在2 m距离上的磁共振输电效率只有40%。

3 结束语

我国东西部经济发展的差距日益扩大,资源分布不平衡的矛盾日益突出。一些边远山区、牧区、高原、海岛,人口稀少,居住分散,交通不便,经济落后,那儿缺乏常规能源,又远离大电网,严重影响当地经济发展。这种情况下,利用微波输能技术,可以解决电网的死角。输电工程最关心的是效率和经济性。无线电能传输的效率取决于微波源的效率、发射/接收天线的效率和微波整流器的效率;其经济性如何,依赖于所用频段的微波元器件的价格与有线输电系统所用器材价格的比较,也与具体的输电网络的参数有关系。

除了关心经济 and 效率以外,还要对大功率微波对环境和身体健康可能造成的影响进行研究,需保证如下方面:(1)传输微波能流密度不能对电离层产生明显扰动;(2)必须保证不干扰日常通信;(3)地面整流接收站不能对飞机等交通工具及周围的生物体(如鸟类、居民等)产生不良作用。

参考文献:

- [1] NIKOLA T. The TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY WITHOUT WIRES[J]. Electrical World and Engineer, 1904(5): 566-572
- [2] NIKOLA T. WORLD SYSTEM OF WIRELESS TRANSMISSION OF ENERGY[J]. Telegraph and Telegraph Age, 1927, 10(16): 1515-1510
- [3] NIKOLA T. The true wireless[J]. Electrical Experiments, 1919(5): 56-59
- [4] TANUJ K. Wireless Transmission of Electricity-Development and Possibility[R]. SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM NIKOLA TESLA, 2006/10/18
- [5] James O. McSpadden. Wireless Power Transmission Demonstration[Z]. Texas A&M University, 1997
- [6] 崔明浩,沈祥,卓放,王兆安.非接触感应电能传输系统中可分离变压器磁场的仿真分析[J].技术与应用,2008(04): 112-116
- [7] 林为干,赵愉深,文一舸.微波输电,现代化建设的生力军[J].科技导报,1994(03): 31-34
- [8] 王秩雄,胡劲蕾,梁俊,王长华.无线输电技术的应用前景[J].空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(1): 82-85

Review of the wireless power transmission technology

ZHANG Mao-chun¹, WANG Jin-hua², SHI Ya-wei²

(1. Wanzhou Electric Power Supply Bureau, Wanzhou Electric Power Corp., Chongqing Wanzhou 404000, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: This paper reviews the concept and development of the wireless power transmission (WPT) and analyzes the three types of WPT, i.e., electromagnetic induction, electromagnetic resonance and electromagnetic radiation with details. The electromagnetic induction WPT has a short transmission distance and low efficiency which needs to be compensated. The electromagnetic resonance WPT is an update of the electromagnetic induction WPT. It can transmit medium power in several meters area and has a rather good development potential. The electromagnetic radiation WPT can transmit power to a long distance with high power. But it needs high-efficient rectification antenna and high-directional antenna, which are difficult to be made.

Key words: wireless power transmission; electromagnetic induction; magnetic resonances; microwave

责任编辑:代晓红