

刘柱¹ 陈志璋¹ 林先其¹ 赵华鹏¹ 李金艳¹

磁谐振耦合无线能量传输的研究综述

摘要

近年来,无线能量传输在工业、植入式医疗、个人移动电子设备上得到了广泛的应用,成为当前电子领域的一个研究热点.首先介绍了无线能量传输的研究背景和基本概念,然后引出该领域当前研究最热的磁谐振耦合无线能量传输技术.从磁谐振耦合无线能量传输系统的强耦合区、适耦合区和弱耦合区的角度,对国内外的研究现状进行了总结和分析.最后,给出了磁谐振耦合无线能量传输中有待解决的一些问题.

关键词

无线能量传输;磁谐振耦合;强耦合区;弱耦合区

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-28

资助项目 国家自然科学基金(61471107)

作者简介

刘柱,男,博士生,主要研究方向为基于阵列结构的磁谐振耦合无线能量传输系统.780722487@qq.com

陈志璋(通信作者),男,国家“千人计划”特聘教授,主要研究方向为计算电磁理论与方法、无线技术.zdchen@uestc.edu.cn

0 引言

从电力的发明到人们日常生产生活中的应用,电线作为传输电力的媒质,几乎无处不在,给我们的生活工作带来极大的方便和效率.但是与各种各样的电子设备连接的电线也带来了诸多不便和安全隐患,所以人们一直在探索无线传输电能的技术.在 20 世纪初期,Nikola Tesla 发明了特斯拉线圈(Tesla coils)实现了电能的无线传输^[1],后来,由于商业前景和当时技术的限制该实验被搁置.近些年来,随着无线通信技术的突飞猛进,无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)又被提上了议事日程,并得到了迅速的发展.

如图 1 所示,无线能量传输可以分成如下几类.从能量传输原理上分,无线能量传输可以分为辐射式与非辐射式,前者为利用微波辐射和激光来传输能量的方法,这种方式适合远距离传输能量.Brown^[2]提出利用微波波束来传输能量,采用整流天线输出功率 4 W 时,传输效率能达到 50%.因为微波波束是利用电磁波的远场来实现能量传输的,所以发射机与接收机之间的传输距离要远远大于传输信号的波长.这种无线能量传输方式在传输过程中传输效率会以 $1/d^2$ 的速度衰减,其中 d 是发射机与接收机的距离.同时,使用这种技术需要在发射机和接收机采用高增益的天线或者天线阵列,传输的能量从几瓦到几千瓦,距离可以达到几千米^[3-4].无线能量传输使用辐射方式传输的效率是很低的.由于辐射能量是通过微波波束传输的,其在空气中的损耗可能很大,并且还需要非常精准的定位才能使发射端和接收端处在最大传输能量的位置上.基于上述技术上的劣势,辐射无线能量传输技术在应用上有很大的局限性.

无线能量传输还可以通过使用电磁场的近场来实现能量交换,即非辐射的方式.非辐射无线能量传输可以分为磁感应耦合和磁谐振耦合两种.目前,市场上大多数针对电子和医疗设备设计的无线充电方案都是采用磁感应耦合方式.一般结构如图 2 所示,它主要包括一个发射线圈(Source Coil)和一个负载线圈(Load Coil),它们之间没有物理接触,相隔一段距离,且不用导线连接.在发射线圈和接收线圈之间通过近场的磁场传输能量,时变电流通过发射线圈时产生时变磁场,磁场的磁力线切割接收线圈,并在接收线圈上产生交变电流,然后输出到负载上.接收线圈可集成于便携式设备中,发射线圈通过磁场然后是接收线圈给所连接的电池进行充电^[5-9].相比于辐射式无线

1 电子科技大学 电子工程学院,成都,611731

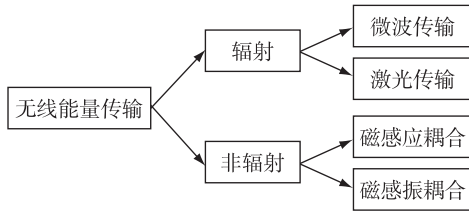


图1 无线能量传输的种类

Fig. 1 Category of the wireless power transfer

能量传输,磁感应耦合式无线能量传输能提供非常高的传输效率.Hui 等^[10]提到的磁耦合感应无线能量传输系统给电动车的电池充电时,可以达到90%以上的传输效率.通常这种传输方式的传输距离非常短,小于发射和接收线圈的几何直径,当接收机与发射机的距离 d 增加时,传输效率以 $1/d^3$ 的速度衰减.由于磁耦合感应式无线能量传输技术具有容易应用和安装,并且能提供较高的传输效率等优点,现在已经应用到成熟的产品中.不过由于磁耦合感应式无线能量传输的传输距离十分有限,并且发射机和接收机的轴心需要对准放置才能实现高效率的传输,这些缺点都限制了负载电子设备的移动性能,也限制了其进一步的广泛应用.

为了克服微波辐射无线能量传输效率低和磁感应式无线能量传输距离短的缺点,磁谐振耦合无线能量传输 (Magnetically-Coupled Resonant Wireless Power Transfer, MCR-WPT) 由麻省理工学院的 Kurs 等^[11]在2007年第一次提出来,并且命名为 Witricity.在该实验中的系统传输效率能达到50%左右,最远的有效传输距离可以达到2.74 m.磁谐振耦合无线能量传输技术是一种中距离非辐射的能量传输方式,发射端和接收端都工作在相同的谐振频率,再通过谐振的磁场实现高效率的能量传输.随后,很多研究工作者和工业界对这项技术进行了进一步的研究,并在电动车电池充电^[12-14]、植入式医疗设备供电^[15-16]和小型移动电子设备充电^[17]等方面得到了应用.下面针对磁谐振耦合无线能量传输做进一步描述.

1 结构和分析方法

1.1 磁谐振耦合的基本结构

磁谐振耦合无线能量传输是一种新型的非辐射式无线能量传输方式,Kurs 等^[11]提出的系统基本结构如图3所示.它主要由四部分组成:一个激励线圈 (Drive Loop),一个高品质因子的发射 LC 谐振线圈

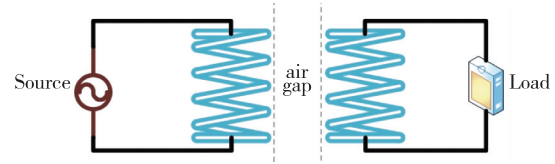


图2 磁感应耦合无线能量传输系统

Fig. 2 Schematic of inductive wireless power transfer

(Rx Resonator),接收 LC 谐振线圈 (Tx Resonator) 和一个负载线圈 (Load Loop).发射谐振线圈和接收谐振线圈之间的有效传输距离可以大于几倍谐振线圈的物理尺寸.其工作的物理机制如下:首先,由功率源在激励线圈上产生交变电流;然后激励线圈通过感应耦合传输能量给发射谐振线圈,由于接收谐振线圈与发射谐振线圈工作在同一频率,接收谐振线圈通过磁场从发射谐振线圈获得能量;最后,接收谐振线圈通过感应耦合传到负载线圈给灯泡供电.磁谐振耦合与磁感应耦合无线能量传输系统相比,传输距离得以提高,由于其工作原理是采用磁谐振耦合,所以在传输能量时没有特定的方向性,且对周围环境的电磁干扰和人体组织的伤害能减小很多.

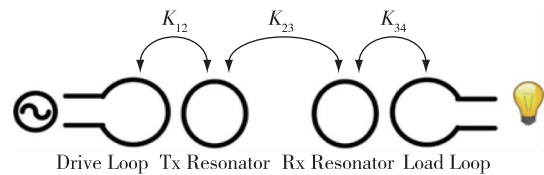
图3 磁耦合谐振无线能量传输的基本结构^[11]

Fig. 3 Schematic of magnetically-coupled resonant wireless power transfer system

1.2 分析方法

对磁谐振耦合无线能量传输系统的分析计算方法主要有耦合理论^[11]和等效电路模型^[18-19]两种.大多数研究都是通过等效电路模型来分析和计算系统的效率,对整个系统进行直观和定量分析.Jolani 等^[18]给出了比较准确的平面四线圈结构等效电路模型,如图4所示.根据图4的等效电路,建立相应的电路方程.通过解上面的矩阵方程,就可以得到激励线圈、发射谐振线圈、接收谐振线圈和负载线圈的电流.其中 Z_{11} 、 Z_{22} 、 Z_{33} 和 Z_{44} 分别为激励线圈、发射谐振线圈、接收谐振线圈和负载线圈的阻抗,系统的输入阻抗 Z_{in} 根据文献^[20]可得,如式(2)所示.最后得到四线圈结构无线能量传输系统的表达式如(3)所示,所对应的电压电流系统方程为式(1)–(3).

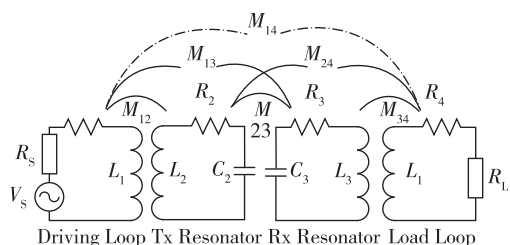


图4 平面四线圈结构的磁谐振无线能量传输系统完整等效电路模型^[18]

Fig. 4 The complete circuit model of planar four-coil structure MCR-WPT system^[18]

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} & j\omega M_{14} \\ j\omega M_{12} & Z_{22} & j\omega M & j\omega M_{24} \\ j\omega M_{13} & j\omega M & Z_{33} & j\omega M_{34} \\ j\omega M_{14} & j\omega M_{24} & j\omega M_{34} & Z_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$Z_{11} = \left(R_s + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right),$$

$$Z_{22} = \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right),$$

$$Z_{33} = \left(R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right),$$

$$Z_{44} = \left(R_4 + R_L + j\omega L_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \right), \quad (1)$$

$$Z_{in} = j\omega L_1 + \frac{(\omega M_{12})^2}{Z_{22} + \frac{(\omega M_{23})^2}{Z_{33} + \frac{(\omega M_{34})^2}{Z_{44}}}}, \quad (2)$$

$$\eta = |S_{21}|^2 = \frac{V_L^2}{R_L} / \frac{V_s^2}{(4R_s)}. \quad (3)$$

2 关键问题和解决方法

无线能量传输在实际应用中,人们一直都关注着传输效率与传输距离这两方面的问题.磁感应耦合无线能量传输的效率较高,而距离较短.微波辐射无线能量传输的传输距离远,而传输效率较低.磁谐振耦合无线能量传输较前两者有其明显的优势,增加了传输距离和传输效率.但是它的最大传输效率是在发射端和接收端之间的最优化距离上获得的.当发射端和接收端之间的距离大于或者小于最优化距离的时候,其效率也会随之迅速变化. Sample 等^[20]、Zhang 等^[21-22]和 Niu 等^[23]用等效电路模型分析和计算了效率与距离之间的关系,详细阐述了强耦合区 (Over-Coupled region)、适耦合区 (Critically-

Coupled region) 和弱耦合区 (Under-Coupled region) 的形成^[20-23],如图5所示.

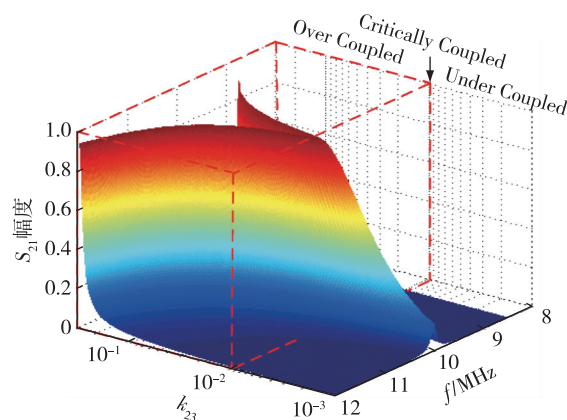


图5 发射机与接收机的 S_{21} 幅度随频率和它们之间耦合系数的变化关系 (红色部分是频率分裂现象出现在强耦合区^[20])
Fig. 5 Magnitude of S_{21} as a function of frequency and coupling coefficient between transmitter and receiver. The red-highlighted volume is the over-coupled region, where frequency splitting occurs^[20]

1) 强耦合区:当发射端与接收端之间的距离小于最佳传输距离的时候,出现了频率分裂的现象.此时,在发射和接收线圈的谐振频率传输效率十分低,而系统谐振频率两边各有一个频点效率很高,这是由于发射线圈和接收线圈之间的耦合过强导致了谐振频率发生偏移.

2) 适耦合区:当发射端与接收端之间的距离逐渐增大到最佳传输距离,两个分裂的频率逐渐合成为一个谐振频率并且传输效率达到最大.

3) 弱耦合区:当发射端与接收端之间的距离继续增大,此时大于最佳传输距离,并且发射谐振线圈与接收谐振线圈之间的耦合减小,导致效率下降.

人们通常针对以上3个区域的特点来设计磁谐振耦合无线能量传输系统,提出了许多方法来提高传输效率.为了减小磁谐振耦合无线能量传输系统在强耦合区频率分裂现象的影响,基于频率追踪技术的自适应匹配方法由 Ramrakhiani 等^[15]和 Park 等^[24]提出来,根据负载的变化调节匹配网络,以此减小强耦合区频率分裂的影响,从而提高传输效率. Kim 等^[25]和 Park 等^[26]用开关控制连接不同激励和负载线圈来设计自适应阻抗匹配网络,与此同时调整激励线圈和负载线圈的匹配电容值,最后在强耦合和弱耦合区都提高了传输效率,效率可以提高

24%.分别调整激励线圈与发射谐振线圈,以及负载线圈和接收谐振线圈之间距离来改变耦合情况,可以减小频率分裂的影响,这种改变耦合的方法由 Duong 等^[27] 提出来,效率可以从 29.3% 提高到 46.2%.以上方法是通过控制电路追踪频率的变化,来改变匹配和耦合,以此减小频率分裂的影响,从而提高传输效率的.然而, Lee 等^[28] 提出了平行反向线圈的设计方案,当接收端与发射端之间的距离减小时,前向线圈和反向线圈之间的磁场方向相反,然后通过合适的设计使得它们在强耦合区的磁耦合强度基本保持在一个水平,使得传输效率提高.这种设计的好处是,不需要任何额外的匹配调节电路和频率追踪电路去减小频率分裂现象,但是其弱耦合区的效率下降迅速.

为了提高在弱耦合区的传输效率,也就是增加磁共振耦合系统的有效传输距离,研究人员提出了许多解决方法.在近几年,人们采用了很多增加中继耦合谐振线圈的方法,也就是在发射和接收端之间放置中继耦合谐振器来增加传输距离. Imura^[29] 在发射端和接收端之间放置了一个谐振线圈当中继耦合器,使得传输距离从 30 cm 增加到 61 cm. Awai 等^[30] 设计了多级中继耦合的结构,他们使用了 4 个中继耦合线圈. Lee 等^[31] 设计了 Domino 中继耦合无线能量传输系统(图 6),对系统中非相邻谐振线圈之间的耦合进行了研究,并且进一步提高了传输效率和传输距离.同时,人们研究了非相邻的共轴和非共轴的 Domino 中继耦合无线能量传输系统的传输特性,并且设计了相应的模型^[32].磁谐振耦合无线能量传输系统使用多个中继耦合谐振线圈结构,使得耦合情况变得复杂,给计算和分析带来了困难,所以 Kim 等^[33] 提出了一种新的计算 N 个中继谐振线圈结构的方法,它用来分析并且设计一个非对称机构中继耦合无线能量传输系统以提高传输距离.然而, N 个中继谐振线圈结构的磁谐振耦合无线能量传输系统的分析方法,以及计算其等效电路模型的公式求解过程过于复杂.为了解决这个问题,一种新的设计方法被提出,它用阻抗匹配对任意数量的中继耦合线圈进行优化设计^[34].为了进一步提高传输效率, Huang 等^[35] 对关键参数进行了优化.不过,以上提出的中继结构是放置于发射端与接收端之间,且垂直于能量传输方向的,这样就比较占用空间.所以 Kim 等^[36] 和 Ye 等^[37] 设计了垂直于发射和接收端平面且与能量传输方向平行的中继谐振器和中继谐振线

圈,这样的设计就给予了接收端灵活性,使得整个系统占用的空间减小,如图 7 所示.

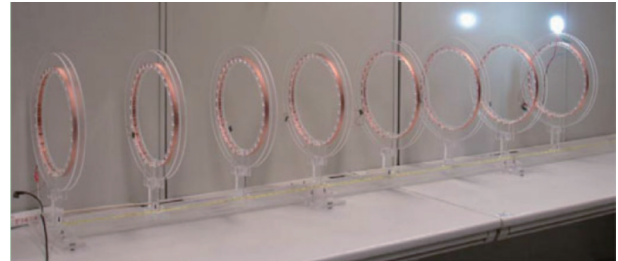


图 6 8 个谐振器的多米诺无线能量传输实验模型为距离 2.1 m 外的 18 W 灯泡供电^[31]

Fig. 6 Photograph of the experimental setup of an 8-resonator system powering an 18 W compact fluorescent lamp over a distance of 2.1 m^[31]

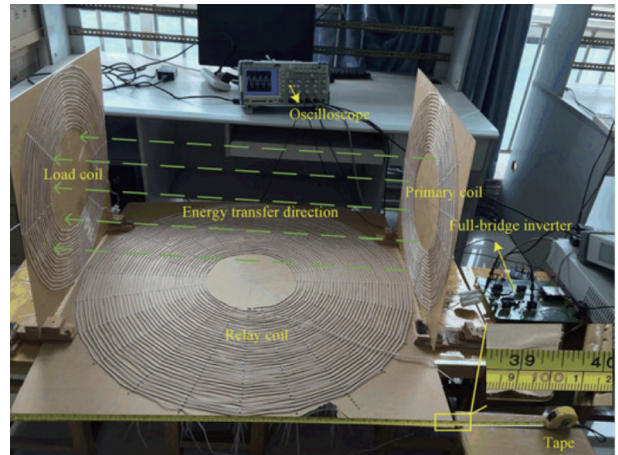


图 7 U 型无线能量传输系统的实验模型^[37]

Fig. 7 Experimental setup of the U-coil WPT system^[37]

还有很多研究工作者将超材料的技术引入到磁谐振耦合无线能量传输系统中.因为消逝波的谐振耦合特性,负向参数的材料能放大消逝波^[38],因此 Wang 等^[39] 研究了运用超材料增加消逝波的耦合方法,并且传输效率从 17% 提高到了 47%.超材料结构放置于无线能量传输系统的发射端和接收端之间^[40],使得传输效率随传输距离的增加而下降缓慢,从整体上看是提高了传输效率,但是效率在强耦合区的提高并不明显.此外,这种结构占据了发射端与接收端之间的自由空间,减小了灵活性.

为了在强耦合区和弱耦合区都提高传输效率,同时保持结构简单,天线的阵列技术被应用到磁谐振无线能量传输上.人们提出了基于阵列结构的多线圈磁谐振耦合无线能量传输系统^[41-42].通过调节发射端的 4 个阵列谐振线圈使得传输效率在整个传输平面上均

匀分布,这是阵列结构无线能量传输系统的另外一个优点,因此可以在获得一个更大的能量传输覆盖面积的同时,实现效率均匀分布.Jolani 等^[43-44]进一步优化了阵列线圈的结构,提出了基于阵列的平面多线圈结构,而且激励源由多个减少至 1 个,如图 8 所示,传输效率在强耦合区和弱耦合区都得到了较大的提高.由于接收端向发射阵列单元靠近时,虽然其与另外 2 个谐振单元的互感值减小,但另外 2 个谐振单元与接收谐振线圈的互感值增加,总互感值维持在同一个水平,因此传输效率在强耦合区和弱耦合区都增加了.平面阵列结构的发射端使得整个传输能量覆盖范围的效率均匀分布^[44-47],同时,基于阵列结构多个谐振阵列线圈的等效电路模型和计算仿真得到了充分的研究^[45],相应的优化和计算方案被应用于磁谐振无线充电桌,以及对手机、台灯以及蓝牙音箱无线供电,如图 9 所示^[46].此外,阵列天线中的波束赋形的概念也被用到了磁谐振耦合无线能量传输中.利用凸优化对多个发射端进行优化设计来合成磁场的波束方向,得到了最大的传输效率^[48].有些磁谐振无线能量传输系统利用了 MIMO 的概念^[49],通过类比信道估计的概念推出磁场信道估计的方法,来对接收端进行定位,然后改变阵列谐振线圈的幅度和相位使得磁场合成一个波束指向接收端,从而实现了高效率全方向的对手机无线充电,最大充电距离为 40 cm.

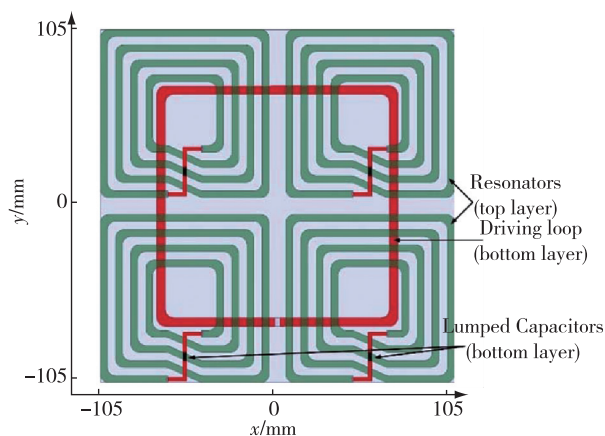


图 8 基于阵列结构的平面线圈磁谐振耦合无线能量传输系统^[44]

Fig. 8 Planar spiral array of MCR-WPT system^[44]

3 总结与展望

由于磁谐振耦合无线能量传输系统有着广泛的应用前景,例如工业、植入式医疗和消费类电子等方面,因此受到国内外学者的广泛关注.虽然在磁谐振

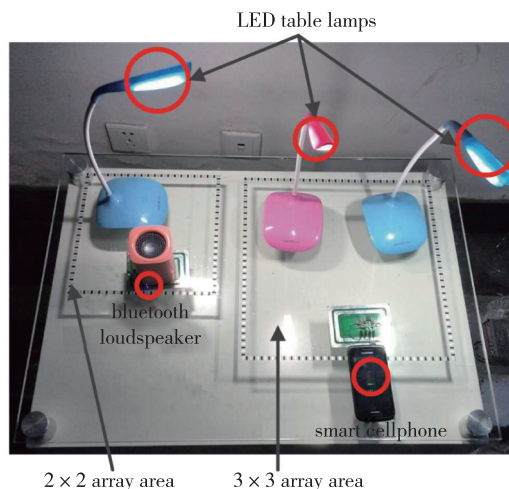


图 9 基于磁谐振耦合无线能量传输系统的无线充电桌^[46]

Fig. 9 Wireless charging table using MCR-WPT^[46]

无线能量传输系统的研究取得了令人瞩目的成果,但是仍然未完全成熟,没有在我们的工作生活中普遍使用.对磁谐振耦合无线能量传输系统的应用研究,只是刚刚起步,例如系统在遇到金属物体时,在金属上产生的涡旋电流会降低传输效率,引起谐振频率偏移;还有在能量传输过程中线圈的发热问题以及对电子设备电磁干扰等问题.随着社会的发展,新问题的出现,还需要对磁谐振无线能量传输系统在各个应用领域进行深入研究.

参考文献

References

- [1] Tesla N.Apparatus for transmitting electrical energy[P]. U S Patent 1119732,1907-05-04
- [2] Brown W C.The history of wireless power transmission [J].Solar Energy,1996,56(1):3-21
- [3] Brown W C.Experiments involving a microwave beam to power and position a helicopter[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1969,5(5):692-702
- [4] Brown W C. Free-space microwave power transmission study, phase 3[R].NASA STL/Recon Technical Report, N76-16619,1975-09-10
- [5] Jang Y, Jovanovic M M. A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2000,50(3):520-527
- [6] Choi B, Nho J, Cha H, et al.Design and implementation of low-profile contactless battery charger using planar printed circuit board windings as energy transfer device [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2004,51(1):140-147
- [7] Hui S Y R, Ho W W C.A new generation of universal contactless battery charging platform for portable

- consumer electronic equipment[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(3):620-627
- [8] Raval P, Kacprzak D, Hu A P. A wireless power transfer system for low power electronics charging applications [C]//6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011:520-525
- [9] Phaebuga K, Torrungrueng D, Phongcharoenphanich C. Design of planar rectangular spiral antennas for the wireless vehicle battery charging system [C]//2013 Asia-Pacific in Microwave Conference Proceedings, 2013:1172-1174
- [10] Hui S Y R, Zhong W, Lee C K. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):4500-4511
- [11] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834):83-86
- [12] Wang C S, 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
- [13] Imura T, Okabe H, Hori Y. Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for Electric Vehicles by using magnetic resonant couplings [C]//IEEE 2009 Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009:936-940
- [14] Shin J, Shin S, Kim Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3):1179-1192
- [15] Ramrakhiani A K, Mirabbasi S, Mu C. Design and optimization of resonance-based efficient wireless power delivery systems for biomedical implants [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2011, 5(1):48-63
- [16] Na K, Jang H, Ma H, et al. Tracking optimal efficiency of magnetic resonance wireless power transfer system for biomedical capsule endoscopy [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(1):295-304
- [17] Zhao J, Xu G Z, Zhang C, et al. The design and research of a new kind small size resonator used in magnetic coupling resonance wireless energy transmission system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11):4030-4033
- [18] Jolani F, Yu Y Q, Chen Z Z. A planar magnetically coupled resonant wireless power transfer system using printed spiral coils [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13:1648-1651
- [19] Mirbozorgi S A, Bahrami H R, Sawan M, et al. A smart multicoil inductively coupled array for wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11):6061-6070
- [20] Sample A P, Meyer D A, Smith J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2):544-554
- [21] Zhang Y M, Zhao Z M, Chen K N. Frequency splitting analysis of magnetically-coupled resonant wireless power transfer [C]//2013 IEEE in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013:2227-2232
- [22] Zhang Y M, Zhao Z M, Chen K N. Frequency-splitting analysis of four-coil resonant wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4):2436-2445
- [23] Niu W Q, Chu J X, Gu W, et al. Exact analysis of frequency splitting phenomenon of contactless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems. I: Regular Papers, 2013, 60(6):1670-1677
- [24] Park J, Tak Y, Kim Y, et al. Investigation of adaptive matching methods for near-field wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(5):1769-1773
- [25] Kim J, Choi W S, Jeong J. Loop switching technique for wireless power transfer using magnetic resonance coupling [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 138(10):197-209
- [26] Park B C, Lee J H. Adaptive impedance matching of wireless power transmission using multi-loop feed with single operating frequency [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(5):2851-2856
- [27] Duong T P, Lee J W. Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(8):442-444
- [28] Lee W S, Son W I, Oh K S, et al. Contactless energy transfer systems using antiparallel resonant loops [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):350-359
- [29] Imura T. Equivalent circuit for repeater antenna for wireless power transfer via magnetic resonant coupling considering signed coupling [C]//2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011, 131(12):1373-1382
- [30] Awai I, Komori T, Ishizaki T. Design and experiment of multi-stage resonator-coupled WPT system [C]//2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, 2011:123-126
- [31] Lee C K, Zhong W X, Hui S Y R. Effects of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless power domino-resonator systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4):1905-1916
- [32] Zhong W X, Lee C K, Hui S Y R. General analysis on the use of Tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):261-270
- [33] Kim J H, Park B C, Lee J H. New analysis method for wireless power transfer system with multiple n resonators [J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2013, 13(3):173-177
- [34] Lee J, Lim Y, Ahn H, et al. Impedance-matched wireless power transfer systems using an arbitrary number of coils with flexible coil positioning [J]. IEEE Antennas and

- Wireless Propagation Letters,2014,13(6):1207-1210
- [35] Huang S D, Li Z Q, Li Y. Transfer efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(17):17A336-17A336-3
- [36] Kim J W, Son H C, Kim K H, et al. Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10(3):389-392
- [37] Ye Z H, Sun Y, Dai X, et al. Energy efficiency analysis of U-Coil wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7):4809-4817
- [38] Pendry J B. Negative refraction [J]. Contemporary Physics, 2004, 45(3):191-202
- [39] Wang B N, Teo Koon Hoo, Nishino T, et al. Experiments on wireless power transfer with metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(25):254101-254101-3
- [40] Zhao Y, Vutipongsatorn V, Leelarasmee E. Improving the efficiency of wireless power transfer systems using metamaterials[C] // 10th International Conference on Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) in Electrical Engineering/Electronics, Computer, 2013:1-4
- [41] Miwa K, Kaneda J, Kikuma N, et al. A consideration of arrayed transmitting coils in wireless power transfer with magnetically coupled resonance[J]. International Symposium on Antennas and Propagation, 2012:451-454
- [42] Miwa K, Mori H, Kikuma N, et al. A consideration of designing coil array in wireless power transfer with magnetically coupled resonance [J]. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 2013, 14(6):1215-1217
- [43] Jolani F, Yu Y Q, Chen Z Z. A planar magnetically-coupled resonant wireless power transfer using array of resonators for efficiency enhancement[C] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2015, DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7166947
- [44] Jolani F, Yu Y Q, Chen Z Z. A planar positioning-free magnetically-coupled resonant wireless power transfer [C] // IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2015, DOI:10.1109/WPT.2015.7140176F
- [45] Jolani F, Yu Y Q, Chen Z Z. Electromagnetic modeling and optimization of magnetic resonant coupling wireless power transfer using coil array[C] // IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization, 2015, DOI: 10.1109/NEMO.2015.7415044
- [46] Liu Z, Guo Y L, Jolani F, et al. Planar magnetically-coupled resonance wireless power transfer systems using array of coil resonators[C] // IEEE MTT-S International Wireless Symposium, 2016, DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2016.7585444
- [47] Liu Z, Chen Z Z, Guo Y L, et al. A novel multi-coil magnetically-coupled resonance array for wireless power transfer system [C] // IEEE Wireless Power Transfer Conference, 2016, DOI:10.1109/WPT.2016.7498868
- [48] Lang H D, Ludwig A, Sarris C D. Convex optimization of wireless power transfer systems with multiple transmitters [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(9):4623-4636
- [49] Jadidian J, Katabi D. Magnetic MIMO: How to charge your phone in your pocket [C] // The 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2014:495-506

A review of progress in magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology

LIU Zhu¹ CHEN Zhizhang¹ LIN Xianqi¹ ZHAO Huapeng¹ LI Jinyan¹

¹ School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731

Abstract Wireless power transfer has recently become a hot research topic due to its potential wide applications in different areas such as implanted medical devices and personal electric devices. This paper presents a review of the progress in the area. Firstly, the backgrounds and basic theories of general wireless power transfer technologies are introduced. Then one of the technologies, the magnetically-coupled-resonant system, is presented and focused on. Properties of the magnetically-coupled-resonant system are described, including over-, critical- and under-couplings. Finally, challenges in developing and applying the magnetically-coupled resonant wireless power transfer systems are summarized.

Key words wireless power transfer; magnetically-coupled resonant; over-coupled region; under-coupled region