

两负载式谐振耦合无线电能传输系统

吴大中, 李晓曼

(南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

摘要:在无线电能传输系统应用中,接收装置之间互相靠近时交叉耦合的存在,使发射端的能量不能有效的传送给多个接收端.针对无线电能传输系统中多负载装置这一研究热点,建立了含有两个接收端的谐振耦合式无线电能传输系统模型.首先从等效电路的角度进行展开,提出在交叉耦合的情况下运用最大平均功率传输定理,使系统满足阻抗匹配;然后从耦合系数的角度研究接收端的负载功率,对不同负载功率的公式进行了推导和数值计算,并通过实验仿真验证了理论分析的正确性.结果表明,系统在最大平均功率传输定理实现阻抗匹配的基础上,通过调节发送端和接收端的耦合系数,不需要改变接收装置的位置,就能够减少发送端的反射系数,从而使负载端有效的接收发送端发送的能量.

关键词:谐振耦合;无线电能传输;阻抗匹配;交叉耦合;最大功率传输

中图分类号:TM724

文献标志码:A

由于传统的用电使用裸露的导线,这带来很多的不便并且存在很大的安全隐患^[1],因此寻找一种更为灵活方便的电能传输方式成为电能传输领域的研究热点.目前无线电能传输技术通过电磁感应技术、磁耦合谐振技术和微波或激光的形式进行传输^[2-3].利用传统电磁感应原理进行无线传输的技术具有传输效率高、电磁辐射小、可穿透非磁性障碍物等优点^[4],已被广泛应用于消费类产品中^[5],然而这种方式传输距离比较短,并且当系统位置偏移时会导致电能传输效率大幅度下降.利用微波或激光进行传输的技术具有传输范围广、传输距离远的优点,但是该方式对传输方向性要求过高,并且传输过程中散射严重,损耗大效率低.

2007年美国麻省理工学院(MIT) Marin Soljacic教授为首的研究团队提出了谐振耦合式无线能量传输的概念^[6].研究者们认为,通常情况下相距一定距离的两个带电物体之间的耦合为弱耦合,但是若两带电物体具有相同的谐振频率,系统间强的磁场耦合使发射端能够提供源源不断的电能,实现无线传输,该项技术将带动更长距离、更大功率的无线电能传输的研究和发展.磁耦合谐振无线传输的理论研究工具可分为时域的耦合模理论和频域的集总参数电路理论^[6-7].相对来说,运用较多的是集总参数电路理论.文献[8-10]通过建立等效电路模型来描述磁耦合谐振式无线电能传输系统,经过分析传输效率与线圈尺寸、距离的关系,得到了系统传输效率的表达式,进一步分析了最大效率的传输条件,但是建立的等效模型缺少对电源内阻的考虑和负载功率的分析.对于磁耦合谐振式无线电能传输系统,当发射端和接收端频率一致时,达到一种强耦合状态,能够实现最佳距离传输.当系统之间的频率发生偏移,系统的耦合效应迅速衰弱,发射端向接收端的传输性能也急剧恶化^[11-14].文献[15]对带有单中继线圈的磁耦合谐振式无线电能传输系统进行了研究,探讨了发射端和接收端之间的交叉耦合系数 K_{31} 对系统的影响,得出临界耦合条件和最大功率传输条件.

本文在发射线圈和接收线圈之间以及两接收线圈之间的交叉耦合的基础上,运用阻抗匹配对两接收装置的谐振耦合式无线电能传输系统进行分析研究.在该情况下建立了系统模型,并对运用的最大功率传输定理进行了公式推导和理论验证,通过实验仿真发现不需要改变接收线圈的位置,通过耦合系数的调节满足阻

收稿日期:2014-11-12;修回日期:2014-12-10.

基金项目:国家自然科学基金(41175033)

第1作者简介:吴大中(1958-),男,江苏涟水人,南京信息工程大学副教授,研究方向为无线电能传输.

通信作者:李晓曼(1989-),女,河南商丘人,研究方向为谐振耦合式无线电能传输, E-mail:15751838092@163.com.

抗匹配,能够实现能量的有效传输.

1 模型建立

1.1 系统的工作原理

两负载谐振耦合式无线电能传输系统的基本结构如图 1 所示,电源部分由工频电源整流逆变而成,与发射线圈相连,发射线圈通电后,在其周围形成交变磁场并作用于接收线圈,在该磁场中接收线圈在调谐电容的调节下满足和发射线圈相同的谐振频率,从而使发射线圈和接收线圈之间耦合到能量并发生谐振,同时,两个接收线圈之间也存在微弱的能量交换.工作中接收端的负载不断地吸收从发射线圈发送的能量,从而完成电能的无线传输.

1.2 系统的传输模型

本系统是在两个接收端的基础上进行研究的.图 2 为谐振耦合无线电能传输系统的等效电路图,主要包括发射系统,接收系统 1 和接收系统 2. Z_{L0} 为发射系统中高频电源的电源电阻, L_1 和 C_1 分别代表发射系统的电感和电容, L_2 和 C_2, L_3 和 C_3 分别对应接收系统 1 和接收系统 2 的电感和电容, K_{12} 对应发射线圈和接收线圈 1 之间的耦合系数, K_{31} 对应发射线圈和接收线圈 2 之间的耦合系数, K_{23} 对应接收线圈 1 和接收线圈 2 之间的耦合系数, Z_{L1} 和 Z_{L2} 是相应接收系统的负载阻抗.

当系统运行在高频情况下,假定发射线圈绕组和接收线圈绕组都采用绞线绕制,电阻值较小,图 2 重绘等效电路分析图见图 3.

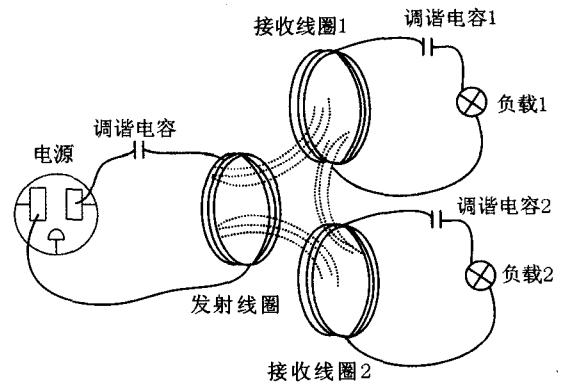


图1 两接收端谐振耦合式无线电能传输系统的基本结构

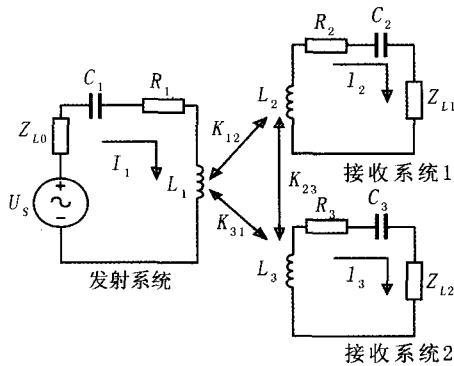


图2 两接收端谐振耦合式无线电能传输系统的等效电路

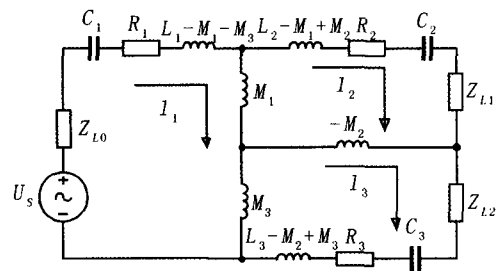


图3 互感等效电路分析图

为简化分析,线圈的内部电阻 R_1, R_2, R_3 忽略不计.运用基尔霍夫电压定律(KVL)列出图 3 等效电路的方程

$$\begin{cases} \left[Z_s + j\omega(L_1 - M_1 - M_3) + \frac{1}{j\omega C_1} \right] I_1 - j\omega M_1 I_2 - j\omega M_3 I_3 = \dot{U}_s, \\ -j\omega M_1 I_1 + \left[Z_{L1} + j\omega(L_2 - M_1 + M_2) + \frac{1}{j\omega C_2} \right] I_2 + j\omega M_2 I_3 = 0, \\ -j\omega M_3 I_1 + j\omega M_2 I_2 + \left[Z_{L2} + j\omega(L_3 - M_3 + M_2) + \frac{1}{j\omega C_3} \right] I_3 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

设耦合角频率为 ω_0 ,则系统谐振时得到矩阵方程

$$\begin{bmatrix} Z_{L0} & -j\omega_0 M_1 & -j\omega_0 M_3 \\ -j\omega_0 M_1 & Z_{L1} & j\omega_0 M_2 \\ -j\omega_0 M_3 & j\omega_0 M_2 & Z_{L2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

互感线圈耦合的紧密程度用耦合系数 K 来表示,结合互感系数 M ,发射线圈与接收线圈之间的耦合系数为 K_{12} 和 K_{31} ,接收线圈间的耦合系数有 K_{23} ,可以表示为

$$K_{ij} = M_i (L_i L_j)^{-\frac{1}{2}}, i, j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

用谐振线圈的终端阻抗与谐振线圈的电抗斜坡参数的比值来表示外部耦合系数^[13-14],即

$$K_m = Z_{Ln} / (\omega_0 L_{n+1}), n = 0, 1, 2. \quad (4)$$

其中, K_{r0} 是发射线圈外部耦合系数, K_{r1} 是接收线圈 1 的外部耦合系数, K_{r2} 是接收线圈 2 的外部耦合系数.

解矩阵式(2),得到电流 \dot{I}_2, \dot{I}_3 关于电流 \dot{I}_1 的关系式为

$$\begin{cases} \dot{I}_2 = \frac{\omega_0^2 M_2 M_3 + j\omega_0 M_1 Z_{L2}}{Z_{L2} Z_{L1} + \omega_0^2 M_2^2} \dot{I}_1, \\ \dot{I}_3 = \frac{\omega_0^2 M_1 M_2 + j\omega_0 M_3 Z_{L1}}{Z_{L2} Z_{L1} + \omega_0^2 M_2^2} \dot{I}_1. \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5),结合式(2),得到关于电压 U_S 与电流 I_1 的关系表达式

$$\frac{U_S}{I_1} = Z_0 + \frac{\omega_0^2 M_1^2 Z_{L2} - j\omega_0^3 M_1 M_2 M_3}{Z_{L2} Z_{L1} + \omega_0^2 M_2^2} + \frac{\omega_0^2 M_3^2 Z_{L1} - j\omega_0^3 M_1 M_2 M_3}{Z_{L2} Z_{L1} + \omega_0^2 M_2^2} = Z_0 + Z_1 + Z_2. \quad (6)$$

则系统最终可以简化为图 4 所示的等效电路,由电源 U_S , 电源的阻抗 Z_0 (即图 3 的阻抗 Z_{L0}), 负载阻抗 Z_1 和 Z_2 组成. 将式(3)和(4)中耦合系数的表达式代入式(6),结合耦合系数,可以分别得到式(6)中阻抗 Z_0, Z_1, Z_2 的表达式为

$$\begin{cases} Z_0 = K_{r0} \omega_0 L_1, \\ Z_1 = \frac{K_{12}^2 K_{r2} - jK_{12} K_{31} K_{23}}{K_{r1} K_{r2} + K_{23}^2} \omega_0 L_1, \\ Z_2 = \frac{K_{31}^2 K_{r1} - jK_{12} K_{31} K_{23}}{K_{r1} K_{r2} + K_{23}^2} \omega_0 L_1. \end{cases} \quad (7)$$

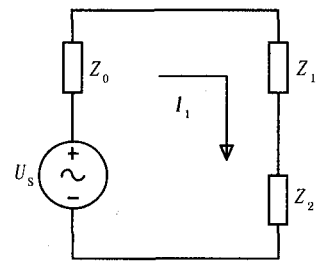


图4 简化等效电路图

根据最大平均功率传输定理公式

$$Z_0 = \overline{Z_1 + Z_2}, \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),求解发射线圈的外部耦合系数

$$K_{r0} = \frac{(K_{12}^2 K_{r2} + K_{31}^2 K_{r1} - 2jK_{12} K_{31} K_{23})}{(K_{r1} K_{r2} + K_{23}^2)}. \quad (9)$$

此时,系统达到阻抗匹配状态. 又因为相同的电流流经负载阻抗 Z_1 和 Z_2 ,得到负载之比

$$Z_1 : Z_2 = (K_{12}^2 K_{r2} - jK_{12} K_{31} K_{23}) : (K_{31}^2 K_{r1} - jK_{12} K_{31} K_{23}). \quad (10)$$

2 最大平均功率传输定理的可行性证明

磁耦合谐振式无线电能传输系统给定条件 $Z_1 : Z_2 = 1 : 1$, 即负载端相等,发射线圈和接收线圈的等效电感均为 $10 \mu\text{H}$, 调谐电容为 13.8 pF , 谐振频率为 13.56 MHz , 此时满足发射线圈与接收线圈的固有频率等于谐振频率,发射线圈与接收线圈 1 的耦合系数 K_{12} 为 0.05 , 发射线圈与接收线圈 2 的耦合系数 K_{13} 为 0.1 , 接收线圈间的耦合系数 K_{23} 为 0.08 , 电源阻抗 Z_{L0} 选择 50Ω . 将各耦合系数 $K_{12}, K_{13}, K_{23}, K_{r1}, K_{r2}$ 分别代入式(5)得

$$\begin{cases} \dot{I}_2 = \frac{K_{31} K_{23} + jK_{12} K_{r2}}{K_{r1} K_{r2} + K_{23}^2} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \dot{I}_1, \\ \dot{I}_3 = \frac{K_{12} K_{23} + jK_{31} K_{r1}}{K_{r1} K_{r2} + K_{23}^2} \sqrt{\frac{L_1}{L_3}} \dot{I}_1. \end{cases} \quad (11)$$

由图 2 和图 4 可以表示出各负载功率,又根据式(5)中电流 I_2 和 I_1 的关系,得到负载功率 P_{Z1} 和 P_{Z2} 的表达式为

$$\begin{cases} P_{Z_1} = \left| \frac{K_{12}^2 K_{r_2} - jK_{12} K_{31} K_{23}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right| |I_1|^2 \omega_0 L_1 = P_{Z_1}' |I_1|^2 \omega_0 L_1, \\ P_{Z_{L1}} = \left| \frac{K_{31} K_{23} + jK_{12} K_{r_2}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right|^2 K_{r_1} |I_1|^2 \omega_0 L_1 = P_{Z_{L1}}' |I_1|^2 \omega_0 L_1. \end{cases} \quad (12)$$

分析式(12)得到,证明 $P_{Z_1} = P_{Z_{L1}}$ 即是证明

$$\left| \frac{K_{12}^2 K_{r_2} - jK_{12} K_{31} K_{23}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right| = \left| \frac{K_{31} K_{23} + jK_{12} K_{r_2}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right|^2 R[K_{r_1}]. \quad (13)$$

通过式(13)可以得到阻抗 Z_1 的有用功率等于负载 Z_{L1} 的功率.

同理,得到负载功率 P_{Z_2} 和 $P_{Z_{L2}}$ 的表达式及其变换式

$$\begin{cases} P_{Z_2} = \left| \frac{K_{31}^2 K_{r_1} - jK_{12} K_{31} K_{23}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right| |I_1|^2 \omega_0 L_1 = P_{Z_2}' |I_1|^2 \omega_0 L_1, \\ P_{Z_{L2}} = \left| \frac{K_{12} K_{23} + jK_{31} K_{r_1}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right|^2 K_{r_2} |I_1|^2 \omega_0 L_1 = P_{Z_{L2}}' |I_1|^2 \omega_0 L_1, \end{cases} \quad (14)$$

分析式(14)得到,证明 $P_{Z_2} = P_{Z_{L2}}$ 即是证明

$$\left| \frac{K_{31}^2 K_{r_1} - jK_{12} K_{31} K_{23}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right| = \left| \frac{K_{12} K_{23} + jK_{31} K_{r_1}}{K_{r_1} K_{r_2} + K_{23}^2} \right|^2 R[K_{r_2}]. \quad (15)$$

式(15)的成立可以得到阻抗 Z_2 的有用功率等于负载 Z_{L2} 的功率.

有电源阻抗 Z_{L0} 为 50Ω , 中心频率 f_0 13.56 MHz, 电感值 $10 \mu\text{H}$, 将已知数据代入式(4), 得到发送线圈的耦合系数 $K_{r_0} = 0.0587$, 进一步计算出接收线圈的耦合系数 K_{r_1}, K_{r_2} 的表达式, 再结合 $Z_1:Z_2 = 1:1$, 计算得到接收线圈 1 的外部耦合系数 $K_{r_1} = \frac{50}{587} - j\frac{1}{25}$, 接收线圈 2 的外部耦合系数 $K_{r_2} = \frac{200}{587} - j\frac{4}{25}$. 将所有有关的已知量代入式(12)和式(14), 得到负载功率表达式中不同的部分 $P_{Z_1} = 0.0294, P_{Z_{L1}} = 0.0294 - j0.0138, P_{Z_2} = 0.0294, P_{Z_{L2}} = 0.0294 - j0.0138$.

由上可知, 图 4 中分配给阻抗 Z_1 的有用功率被图 3 中的负载 Z_{L1} 全部吸收. 同样的, 图 4 中阻抗 Z_2 的有用功率被图 3 中的负载 Z_{L2} 全部吸收. 并且, 负载 Z_{L1} 和 Z_{L2} 的无用功率在接收线圈间的互感 M_2 的作用下得到消除, 这表明接收线圈间虽然存在能量交换, 但是负载端的无用功率可以被接收线圈间存在的其他阻抗平衡消除, 从而减小了对发射端发送功率的影响.

3 仿真分析验证

利用电路仿真软件 LTspice 进行电压电流仿真, 此时系统处于谐振耦合状态, 同时给定电源电压 $U_s = 10 \text{ V}$, 结合 2.2 节中的参数, 得到电压和电流的仿真图, 如图 5 和图 6 所示.

由图 5 和图 6 的电压电流和, 在系统运行稳定的情况经 LTspice 软件测得数值, 可得到表 1. 通过效率公式计算负载端的效率, 计算得到, 负载 Z_{L1} 的接收效率超过 48%, 负载 Z_{L2} 的接收效率超过 49%. 所以, 在满足阻抗匹配情况下, 发送系统几乎完全把功率传输给两接收端.

由图 2 得到负载 Z_{L1} 和 Z_{L2} 的效率表达式

$$\begin{cases} n_{21} = \frac{I_2^2 Z_{L1}}{(U_s I_1)}, \\ n_{31} = \frac{I_3^2 Z_{L2}}{(U_s I_1)}. \end{cases}$$

表 1 不同阻抗对应的电压电流值

阻抗	U/V	I/mA
Z_0	4.33	113.05
Z_{L1}	4.12	56.50
Z_{L2}	8.30	28.63

根据分析出的表达式以及 Matlab 仿真得到负载 Z_{L1} 和 Z_{L2} 的接收效率关于频率的曲线图, 如图 7 所示. 运用 Matlab 的测量工具, 在系统达到谐振耦合状态, 即在谐振频率 13.56 MHz 下运行时, 两负载的最大接

收效率分别可以达到 48.06%和 49.05%,这与用 LTspice 测量后计算得出的数据几乎保持一致,并且根据两负载阻抗端的效率之和计算出发射系统的反射系数不足 1%. 从而得出结论,使用最大平均功率传输定理,能够使系统达到谐振耦合的同时满足阻抗匹配,并且发送线圈发送的能量几乎完全被负载端吸收.

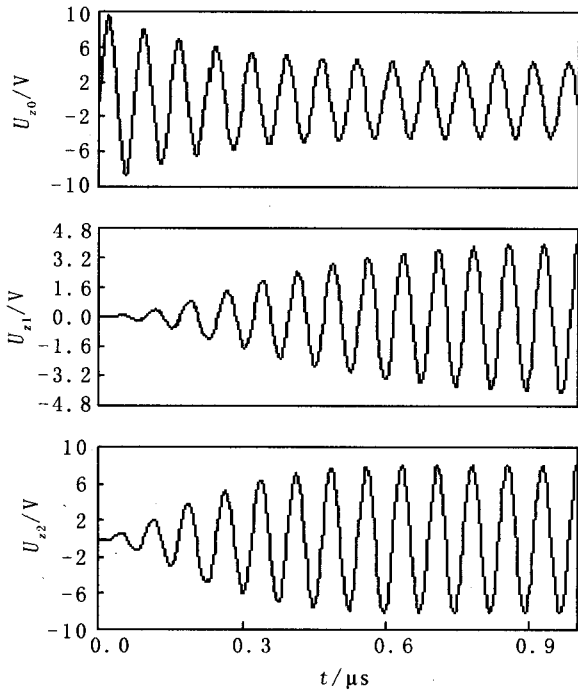


图5 不同负载对应的电压值

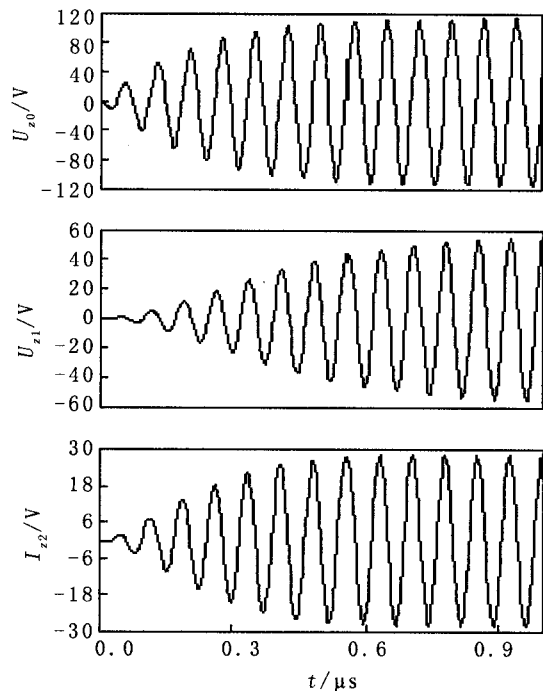


图6 不同负载对应的电流值

4 结 语

本文针对含有两个接收端的谐振耦合谐振式无线电能传输系统进行研究. 首先在考虑发射端和接收端之间以及两个接收端之间的交叉耦合的基础上建立了系统模型,从等效电路的角度对模型进行分析,进一步对最大功率传输定理进行公式推导数值计算,并将其应用到本系统中,然后通过仿真进行验证,计算结果和实验仿真结果是保持一致的. 最大功率传输定理的应用使系统满足阻抗匹配,提高了系统两负载接收端的效率,使得有效的接收了发射线圈发送的能量.

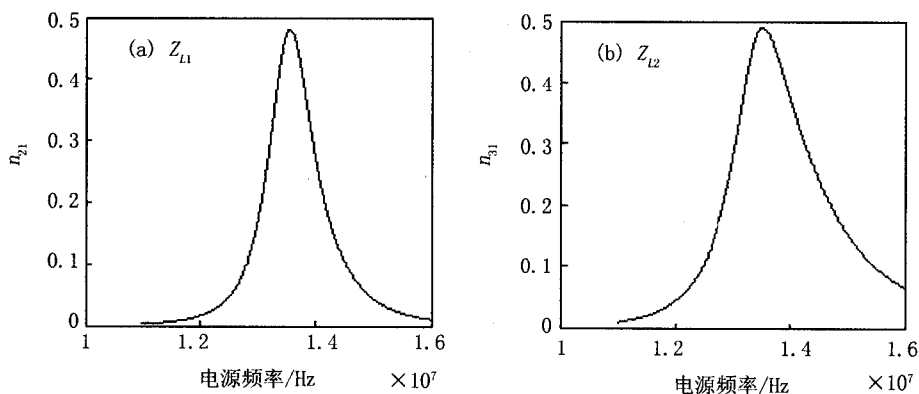


图7 负载的接收效率

参 考 文 献

- [1] 杨庆新,陈海燕,徐桂芝,等.无接触电能传输技术的研究进展[J].电工技术学报,2010,25(7):6-13.
- [2] 赵相涛.无线输电技术研究现状及应用前景[J].科技信息,2011(10):122-123.
- [3] 戴卫力,费峻涛,肖建康,等.无线电能传输技术综述及应用前景[J].电气技术,2010(7):1-6.
- [4] Karalis A,Joannopoulos D,Soljagic M. Efficient wireless non-radioactive mid-range energy transfer[J]. Annals of Physics,2008(323): 34-48.
- [5] 黄 辉,黄学良,谭林林.基于磁场谐振耦合的无线电力传输发射及接收装置的研究[J].电工电能新技术,2011,30(1):32-35.
- [6] Kurs A,Karalis A,Moffatt R,et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science,2007,317(6): 83-86.
- [7] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠.磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J].中国电机工程学报,2013,33(3):1-13.
- [8] 傅文珍,张 波,丘东元,等.自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J].中国电机工程学报.2009,29(18):21-25.
- [9] 吴 琴,吴昕芸.高校教师创新能力提升分析[J].实验室研究与探索,2014,33(5)248-267
- [10] 傅文珍.频率跟踪式谐振耦合电能无线传输系统研究[C].第三届中国高校电力电子与电力传动学术年会,北京,2009.
- [11] 李 阳,杨庆新,闫 卓,等.磁耦合谐振式无线电能传输系统的频率特性[J].电机与控制学报,2012,16(7):7-11.
- [12] 李 阳,杨庆新,闫 卓,等.无线电能有效传输距离及其影响因素分析[J].电工技术学报,2013,28(1):106-112.
- [13] 张 献,杨庆新,陈海燕,等.电磁耦合谐振式无线电能传输系统的建模、设计与实验验证[J].中国电机工程学报,2012,32(21): 153-158.
- [14] 骆彦廷,杨拥民,陈仲生.磁耦合谐振式无线电能传输系统建模与分析[J].中国集成电路,2013,22(8):46-51.
- [15] 罗 斌,生茂棠,吴仕闯,等.磁谐振耦合式单中继线圈无线功率接力传输系统的建模与分析[J].中国电机工程学报,2013,33(21): 170-176.

Wireless Power Transmission System of Two Loads Based on Magnetic Resonant Coupling

WU Dazhong, LI Xiaoman

(Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of
Information Science & Technology, Nanjing 210044,China)

Abstract: For wireless power transmission system, the transmitting device can not effectively transmit energy to the receivers because of the coupling between the receiving devices. With wireless power transmission system in multi-loads being a hot research, a model of magnetically coupled wireless power transmission system with two receivers is established. From the perspective of the equivalent circuit, maximum average power transfer theorem of the system is proposed to meet the impedance matching with the presence of cross-coupling. Then two load powers at the receivers are to be studied combining with the coupling coefficients. The power formulas of different loads are derived and the correctness of the theoretical analysis is verified through the experiment of simulation. The results show that, without changing the position of the receivers, the system, based on the theorem of transferring maximum average power, can reduce the reflection coefficient of transmitter by adjusting the coupling coefficients of transmitter and receivers, thus it can transmit the energy to receivers effectively.

Keywords: magnetic coupling; wireless power transmission; impedance matching; cross coupling; maximum power transfer