

耦合谐振无线电力传输谐振频率跟随设计

王学通, 冀文峰, 薛卧龙

(河北大学 电子信息工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 耦合谐振无线电力传输是一种新的电力传输技术, 传输距离和效率是这项技术取得突破的关键。从发生耦合谐振的收发线圈电路模型出发, 找出了线圈失谐是效率降低的关键因素。进而, 设计了一个频率跟随电路, 通过检测线圈电流的大小, 并与最大电流进行比较, 而后改变线圈的自谐振频率使电流保持最大, 从而实现谐振频率对发射源频率的跟随, 减小失谐对传输效率的影响, 提高耦合谐振电力无线传输的效率。

关键词: 耦合谐振; 失谐; 频率跟随; 收发线圈

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)08-0058-03

The design of resonant frequency tracking based on coupled resonant wireless power transfer

Wang Xuotong, Ji Wenfeng, Xue Wolong

(Department of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract: The coupled resonant wireless power transmission is a new power transmission technology which is restricted by transmission distance and efficiency to obtain the key breakthrough. On the basis of transceiver coil circuit coupled resonance model, the coil detuning is identified, which is the key factor to reduce efficiency. Therefore, A novel design named frequency-follower circuit is proposed. By comparing the current size of detection coil with the maximum current, and then to change the self-resonant frequency of the coil to make the current maintain maximum, it can achieve that the resonant frequency can follow the frequency of the emission source, and reduce the impact of coil detuning to the transmission efficiency. At last, it can improve the efficiency of the wireless transmission of power coupled resonator.

Key words: resonant; detuning; frequency tracking; receiving and emission coil

无线电力传输技术主要有 3 种: 电磁感应技术、微波技术和耦合谐振技术。利用电磁感应技术可在近距离传输较大的电能而且效率较高, 但是这种方法的传输距离只在 1 cm 之内, 极大地限制了其发展。采用微波技术能够实现远距离电能无线传输, 但是这种技术需要复杂的跟踪定位系统而且效率较低。2007 年, MIT 的科学家利用耦合谐振技术实现了中等距离的无线电力传输, 使无线电力传输取得了突破性进展^[1-6]。

然而, 现阶段关于耦合谐振无线电力传输理论和实验研究比较欠缺, 特别是在谐振过程中, 受外界干扰等方面的影响易导致失谐, 引起效率大大降低。目前这方面的研究多集中在使发射源跟踪发射线圈的频率来减小失谐对效率的影响^[7]。本文从理论上提出一种优化设计方案, 即通过对发射线圈的电流检测实现对发射线圈

谐振频率的实时控制, 进而实现对发射源频率的跟踪, 使传输效率最高, 为以后的设计和实验提供依据。

1 耦合谐振原理

1.1 耦合谐振工作原理

耦合谐振无线电力传输系统如图 1 所示, 包括发射功率源、发射线圈、接收线圈和负载。其中, 发生耦合谐振的只有发射线圈和接收线圈。当发射源的频率与收发线圈固有谐振频率一致时, 发射回路和接收回路阻抗最低, 收发线圈流过的电流最大, 此时系统效率最高。相反, 如果两者频率不一致, 即处于失谐状态, 则大部分的能量会消耗在线圈阻抗



图 1 谐振系统模型

技术与方法 Technique and Method

上,效率降低。因此,保持线圈的固有谐振频率与发射源的频率一致是设计的关键。

1.2 失谐原因

将两线圈等效,如图2所示,其中 L_S 、 L_D 分别代表发射线圈和接收线圈, \dot{U}_{in} 代表前级等效信号源, R_S 、 C_S 分别表示发射线圈的电阻和分布电容, R_D 、 C_D 分别表示接收线圈的电阻和分布电容, R_L 为负载电阻, M 为互感, D 为两线圈之间的距离^[8]。

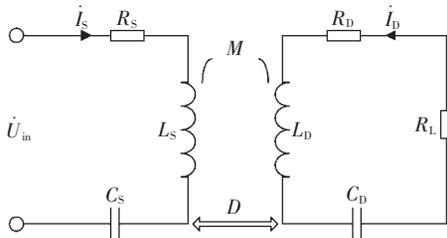


图2 线圈谐振电路模型

若系统的频率为 f ,则两线圈回路的阻抗分别为:
 $Z_S = R_S + j2\pi fL_S + \frac{1}{j2\pi fC_S}$, $Z_D = R_D + R_L + j2\pi fL_D + \frac{1}{j2\pi fC_D}$, 根据图中电流方向列电路回路电流方程为:

$$Z_S \dot{I}_S + j2\pi fM \dot{I}_D = \dot{U}_{in} \quad (1)$$

$$j2\pi fM \dot{I}_S + Z_D \dot{I}_D = 0 \quad (2)$$

求解式(1)、式(2)可得出线圈 L_S 、 L_D 的回路电流:

$$\dot{I}_S = \frac{Z_D \dot{U}_{in}}{Z_S Z_D + (2\pi fM)^2} \quad (3)$$

$$\dot{I}_D = \frac{-j2\pi fM \dot{U}_{in}}{Z_S Z_D + (2\pi fM)^2} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)中可以看出,谐振后线圈的阻抗发生了变化,可将图2中的发射线圈和接收线圈等效如图3所示的两个相互独立电路。

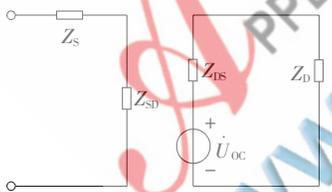


图3 线圈谐振电路模型等效电路

其中, $Z_{S0} = \frac{(2\pi fM)^2}{Z_D}$ 是 L_D 反射到 L_S 的阻抗, $Z_{DS} = \frac{(2\pi fM)^2}{Z_S}$

是 L_S 反射到 L_D 的阻抗, $\dot{U}_{oc} = \frac{j2\pi fM \dot{U}_{in}}{Z_S}$ 。因为耦合系数 M

随着线圈之间的距离增大而减小^[9],所以发射阻抗也会随着两个线圈之间距离的变化而发生变化,距离越远反射阻抗越小。又因为 L_S 、 L_D 中含有电阻和电抗,所以 Z_{DS} 、 Z_{S0} 中也含有电阻和电抗。因此,反射电抗的变化会改变线圈自身的谐振频率。

同理,当其他含有电抗元件的电子设备靠近时,线圈自身的谐振频率也会受到影响。此外,外界的环境变

化(温度)也会对系统电抗参数造成一定的影响。

2 耦合谐振无线电力传输系统优化设计

2.1 系统结构设计

图4为线圈在高频信号下的模型。线圈的阻抗 $Z =$

$$R + j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC}$$

线圈电流 $i = \frac{\dot{U}_{in}}{R + j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC}}$,当线圈

自谐振时($Z=R$),线圈的电流最

大: $i = \frac{\dot{U}_{in}}{R}$ 。根据这一性质,可通过检查线圈电流的大小来判断线圈是否谐振。

本设计的系统结构如图5所示^[10],与图1相比增加了频率控制电路模块。频率控制电路的设计思想为:(1)检测线圈电流的大小,找出当前工作的最大电流;(2)当电流减小时,频率控制电路做出反应,调节发射线圈的谐振频率使线圈电流最大;(3)调整后的电流反馈回频率控制电路与最大电流比较,进行进一步调整。

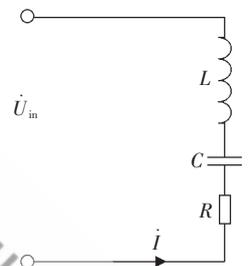


图4 线圈高频信号模型

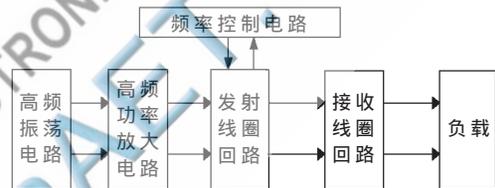


图5 耦合谐振系统优化模型

2.2 频率控制电路

能够完成频率控制功能的电路就叫频率控制电路,常用的频率控制方法是用控制信号控制回路阻抗。图6所示为频率控制电路,用一个可变电抗元件并联在谐振回路上;用控制信号控制可变电抗元件参数的变化,使线圈回路的频率发生变化。

本设计采用的频率控制电路如图7所示,在线圈回路中并入一个变容二极管,其电容值随着两端电压的变化而变化。变容二极管两端电压由数字电位器控制,单片机的输出信号控制数字电位器输出阻值变化,从而改变变容二极管两端的电压。

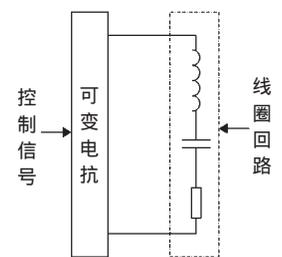


图6 频率控制电路示意图

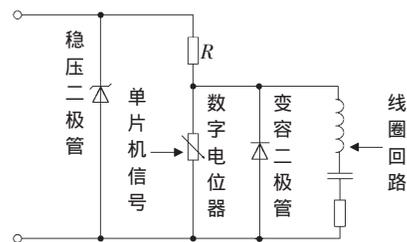


图7 数字电位器频率控制电路

技术与方法 Technique and Method

2.3 频率跟踪控制设计

此部分主要由高频电流检测、AC/DC 转换、A/D 转换、信号处理、频率控制电路来实现,如图 8 所示。

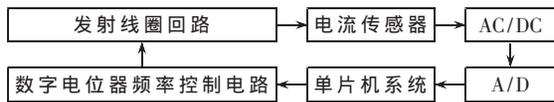


图 8 频率控制电路方框图

利用电流传感器检测线圈回路的电流,将检测到的交流信号转换成直流信号,再将直流模拟信号经过 A/D 转换后输入到单片机系统中,经单片机系统处理,记录电流的一个最大值,当电流小于最大电流时通过改变输出电压改变数字电位器的输出阻值,数字电位器的输出阻值的变化使得变容二极管上的电压发生变化,从而改变了并入线圈回路的电容值,调整的结果是使线圈谐振。

本设计利用霍尔电流传感器进行电流测量。霍尔电流传感器是利用霍尔器件为核心敏感元件用于隔离检测电流的模块化产品。众所周知,当电流流过一根导线时将在导线周围产生磁场且磁场的大小与流过导线的电流大小成正比,这一磁场可以通过软磁材料来聚集,然后用霍尔器件进行检测。由于磁场的变化与霍尔器件的输出电压信号有良好的线性关系,因此利用霍尔器件测得的输出信号,可直接反映出导线中的电流大小。霍尔电流传感器的优点是不用改变原电路结构即能进行隔离检测电流。单片机选用 AT89C51 系列,A/D 转换器件选用 AD590 系列,数字电位器选用 X9312WP,它是一种通过改变输入电压来改变输出电阻的集成电路,可输出的阻值范围为 0~100 kΩ。

3 频率控制流程框图

图 9 所示为单片机系统的编程流程图。在实际工作过程中,系统在稳定的谐振工作状态下线圈中的电流最

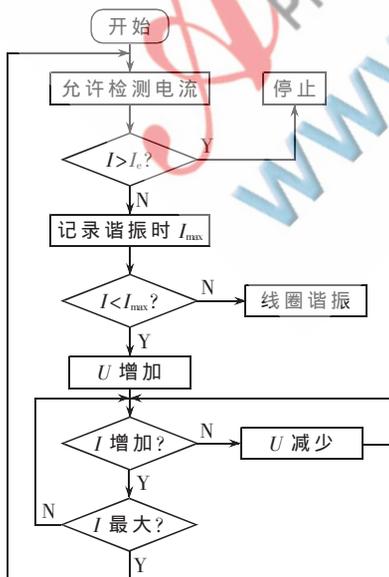


图 9 频率控制流程

大,此时单片机记录最大工作电流 I_{max} 。当外界环境干扰使线圈的谐振频率发生变化时,线圈回路的电流也会改变。单片机系统对输入的电流信号进行检测,若输入的电流信号 I 大于单片机额定工作电流 I_e ,系统停止工作;若电流信号 I 小于单片机额定工作电流 I_e ,系统经行数据处理,当线圈失谐时 $I < I_{max}$,单片机调整输出电压 U 的大小使电流 I 增大,找出并记录此时的最大电流值 I_{max} ,电流最大时线圈重新处于谐振^[11]。

耦合谐振无线电力传输技术的关键在于提高传输效率和传输距离。本设计在耦合谐振无线电力传输系统的基础上利用频率控制技术解决了由于谐振频率实时变化带来的传输效率低下问题,对以后的研究具有借鉴意义。

参考文献

- [1] HIRAI J J, KIM T W, KAWAMURA A. Wireless transmission of power and information for cableless linear motor drive[J]. IEEE Transactions on Electronics Power, 2000, 15(1): 21-27.
- [2] ESSER A, SKUDELNY H C. A new approach to power supplies for robots[J]. IEEE Transactions on Applications Industry, 1999, 27(5): 871-875.
- [3] MANOLATOU C, KHAN M J, Fan Shanhui, et al. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(9): 1322-1331.
- [4] 聂一雄, 文波, 刘艺. 无接触功率传输技术[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(3): 13-24.
- [5] SOLJAČIĆ, KURS A, KARALIS A, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [6] 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.
- [7] 傅文珍, 张波, 丘东元. 基于谐振耦合的电能无线传输系统设计[J]. 机电工程学报, 2011, 28(6): 746-749.
- [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): 21-26.
- [9] GROVER F W. Inductance calculations[M]. New York: Courier Dover Publication, 2004.
- [10] 唐金元, 于璐, 王波. 自动天线调谐器的调谐算法和调谐流程[J]. 仪表技术, 2012(8): 5-8.
- [11] 高寒. 应用单片机控制的感应加热电源频率跟踪调功方式[J]. 潍坊学院学报, 2011, 11(2): 8-11.

(收稿日期: 2012-12-17)

作者简介:

王学通,男,1987年生,工学硕士,主要研究方向:谐振耦合式无线电力传输。