

电动汽车无线充电原理分析

曲振江¹, 王小平², 刘娜¹

(1. 沧州师范学院 物理与电子信息系, 河北 沧州 061001;
2. 石家庄铁道大学 电气与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:就一款主、副边互感线圈均为串联谐振感应耦合的电动汽车无线充电原理电路进行了深入分析,经对电动汽车的蓄电池电压与输入交流电源电压之比的优化,得出了它在稳态工作时电路的输出功率、传输效率与电路参数的关系,并得到了与互感线圈对应的补偿电容上的电压与输入交流电源电压、蓄电池电压及互感线圈互感量间的关系。通过仿真,对以上结果进行了验证,此结果可以为电动汽车在行进中充电打下基础。

关键词:谐振感应耦合;无线充电;互感线圈;耦合系数;传输功率;传输效率

中图分类号:TM832 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2014)02-0096-05

0 引言

对于采用谐振感应耦合的无线电能传输电路的探讨已有不少文章,在对其进行分析时均以电阻作为无线电能传输电路的负载^[1-4]。但对于电动汽车的无线充电电路,它的负载则不是电阻负载而是蓄电池,既反电势负载,这种负载和电阻负载相比具有一定的特殊性。由于文献[5]通过对各种谐振感应耦合电路的分析,指出与其他拓扑方式相比,主、副边互感线圈均采用串联谐振感应耦合的拓扑方式时,负载可以从电源端获得最大的功率。所以本文就一款主、副边互感线圈均为串联谐振感应耦合的电动汽车无线充电原理电路进行分析,得出了这种电路在稳态工作时输出功率和传输效率与电路参数的关系,经对蓄电池电压与交流电源电压之比 E/U_i 的优化得出了经优化后的电路输出功率和传输效率与电路参数的关系,并通过仿真实验进行了验证。此结果可以为电动汽车在行进中充电打下基础。

1 充电电路的传输功率及效率分析

本款电动汽车无线充电原理电路拓扑如图1所示,为分析方便,假定其电源 U_i 为正弦交流电源,另外 L_1 、 L_2 为有互感的两个线圈,其互感量为 M , R_1 、 R_2 为线圈导线电阻, C_1 、 C_2 为两个互感线圈的补偿电容, $j\omega M\dot{I}_1$ 和 $j\omega M\dot{I}_2$ 分别为电流 I_1 、 I_2 在对方线圈中产生的感应电动势,其中 ω 为正弦交流电源 U_i 的角频率,同时也是互感线圈 L_1 、 L_2 回路的谐振角频率, $\dot{U}_0$ 为感应耦合回路的输出电压, E 为电动汽车蓄电池的电压, R_0 为蓄电池的内电阻, $D_1 \sim D_4$ 构成一桥式整流电路,它把电流 I_2 整流成直流为蓄电池 E 充电。

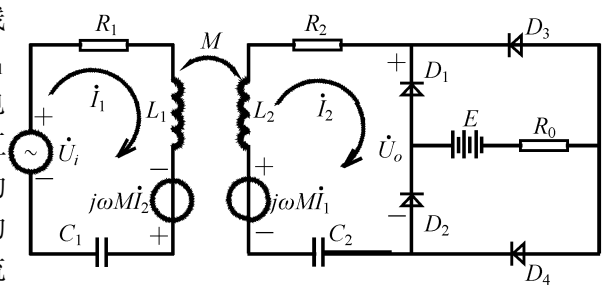


图1 串联谐振感应耦合的充电电路

由于线圈 L_1 、 L_2 所在回路稳定工作时均处于谐振状态,故电流 I_1 、 I_2 都为正弦电流,又由于蓄电池内阻 R_0 的影响,感应耦合回路的输出电压 U_0 的波形如图2所示,并与 I_2 同相位,其瞬时值可用式(1)表示

$$u_0 = \begin{cases} E + \sqrt{2}R_0I_2 \sin \omega t, n\pi \leq \omega t \leq (n+1)\pi \\ -E + \sqrt{2}R_0I_2 \sin \omega t, (n+1)\pi \leq \omega t \leq (n+2)\pi \end{cases}, n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

对式(1)进行傅里叶级数分解,可得 u_0 的基波及其有效值的表达式为

$$u_{01} = \left(\frac{4E}{\pi} + \sqrt{2}R_0I_2 \right) \sin \omega t \quad (2)$$

$$U_{01} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}E + R_0I_2 \quad (3)$$

由此可建立充电电路拓扑中互感耦合线圈 L_1 、 L_2 的回路电压方程为

$$(R_1 + jX_1)I_1 - j\omega MI_2 = \dot{U}_i \quad (4)$$

$$-j\omega MI_1 + (R_2 + jX_2)I_2 + \dot{U}_{01} = 0 \quad (5)$$

式中, $X_1 = \omega L_1 - 1/(\omega C_1)$, $X_2 = \omega L_2 - 1/(\omega C_2)$ 分别为互感线圈 L_1 、 L_2 所在回路的电抗。由于 U_{01} 与 I_2 同相位,通过式(5)可以求得

$$I_1 = \frac{1}{\omega M} [X_2 I_2 - j(R_2 I_2 + U_{01})] \quad (6)$$

其有效值为

$$I_1 = \frac{1}{\omega M} \sqrt{X_2^2 I_2^2 + (R_2 I_2 + U_{01})^2} \quad (7)$$

将式(6)代入式(4)后,得用 I_2 表示的输入电压 U_i 为

$$U_i = \frac{1}{\omega M} [(R_1 X_2 + R_2 X_1)I_2 + X_1 U_{01}] - j \frac{1}{\omega M} [(R_1 R_2 + \omega^2 M^2 - X_1 X_2)I_2 + R_1 U_{01}] \quad (8)$$

其有效值为

$$U_i = \frac{1}{\omega M} \sqrt{[(R_1 X_2 + R_2 X_1)I_2 + X_1 U_{01}]^2 + [(R_1 R_2 + \omega^2 M^2 - X_1 X_2)I_2 + R_1 U_{01}]^2} \quad (9)$$

由于互感线圈 L_1 、 L_2 在稳定工作时处于谐振状态时回路电抗 $X_1 = X_2 = 0$, 由式(9),再结合式(3)可解得

$$I_2 = \frac{U_i}{\pi} \frac{\pi \omega M - 2\sqrt{2}R_1 \frac{E}{U_i}}{R_1 R_{20} + \omega^2 M^2} \quad (10)$$

同理在式(7)中令 $X_2 = 0$, 将式(10)代入,即可解得

$$I_1 = \frac{U_i}{\pi} \frac{\pi R_{20} + 2\sqrt{2}\omega M \frac{E}{U_i}}{R_1 R_{20} + \omega^2 M^2} \quad (11)$$

式中, $R_{20} = R_2 + R_0$ 为互感线圈的直流电阻和蓄电池的内阻之和。由式(10)可以看出,若要 $I_2 > 0$, 既充电电路能够向蓄电池提供电能,则必须满足条件

$$R_1 < \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{\omega M}{E/U_i} \quad (12)$$

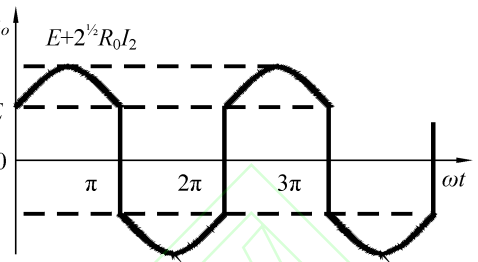
在满足上述条件的情况下,交流电源在稳定工作时 U_i 提供的功率(其实为视在功率)为

$$S = U_i I_1 = \frac{U_i^2}{\pi} \frac{\pi R_{20} + 2\sqrt{2}\omega M \frac{E}{U_i}}{R_1 R_{20} + \omega^2 M^2} \quad (13)$$

而充电电路给蓄电池充电的功率为

$$P = U_{01} I_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E I_2 = \frac{2\sqrt{2}U_i^2}{\pi^2} \frac{E}{U_i} \frac{\pi \omega M - 2\sqrt{2}R_1 \frac{E}{U_i}}{R_1 R_{20} + \omega^2 M^2} \quad (14)$$

图2 感应耦合回路的输出电压的波形



那么,充电电路的电能传输效率则为

$$\eta = \frac{P}{S} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{U_i} \frac{\pi\omega M - 2\sqrt{2}R_1 \frac{E}{U_i}}{\pi R_{20} + 2\sqrt{2}\omega M \frac{E}{U_i}} \quad (15)$$

从式(14)、式(15)可见,充电电路向蓄电池的充电功率 P 和电能传输效率 η 除与电路参数 R_1 、 R_2 、 ωM 有关外,还和蓄电池电压 E 与交流电源电压 U_i 的比有关。可以通过优化 E/U_i 的值,使效率 η 达到极大值。

在式(15)中,令 $d\eta/d\frac{E}{U_i} = 0$, 得

$$\frac{E}{U_i} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left[\sqrt{\left(\frac{R_{20}}{\omega M}\right)^2 + \frac{R_{20}}{R_1}} - \frac{R_{20}}{\omega M} \right] \quad (16)$$

在满足条件

$$R_1 R_{20} \ll \omega^2 M^2 \text{ 且 } R_{20} \ll \omega M \quad (17)$$

的情况下可得优化后的 E/U_i

$$\frac{E}{U_i} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_{20}}{R_1}} \quad (18)$$

将式(18)代入式(14)可得优化后的充电电路输出功率为

$$P = \frac{U_i^2}{R_1} \frac{\frac{\omega M}{\sqrt{R_1 R_{20}}} - 1}{\left(\frac{\omega M}{\sqrt{R_1 R_{20}}}\right)^2 + 1} \quad (19)$$

将式(18)代入式(15)式可得优化后系统的最大电能传输效率则为

$$\eta = \frac{\frac{\omega M}{\sqrt{R_1 R_{20}}} - 1}{\frac{\omega M}{\sqrt{R_1 R_{20}}} + 1} \quad (20)$$

在满足式(17)的情况下,将式(19)、式(20)联立便可得到充电电路输出功率 P 与传输效率 η 的关系为

$$P = \frac{U_i^2}{R_1} \frac{\eta - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (21)$$

2 仿真实验结果

由于两互感线圈的耦合系数 $k = M/\sqrt{L_1 L_2} = \omega M/\sqrt{X_{L_1} X_{L_2}}$, 将式(19)、式(20)中的 ωM 用含有耦合系数 k 的表达式 $k\sqrt{X_{L_1} X_{L_2}} = k\sqrt{2\pi f L_1 \cdot 2\pi f L_2}$ 来代替,选取电路参数 $R_1 = R_{20} = 0.1 \Omega$, $L_1 = L_2 = 0.5 \text{ mH}$, $f = 22.2 \text{ kHz}$, $U_i = 100 \text{ V}$, $E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_i = 111 \text{ V}$ 。对图 1 电路进行仿真实验和理论计算,结果是它们

吻合的很好,画出该充电电路归一化的输出功率 P/P_m 、效率 η 与互感线圈的耦合系数 k 间关系的仿真实验结果,如图 3 所示。而图 4 是归一化的输出功率 P/P_m 与系统的最大传输效率 η 间关系的仿真实验结果。

式(21)为系统的输出功率与最大电能传输效率效率的关系,由式(21)可以看出,当效率 η 较高时系数 $(\eta - \eta^2)/(1 + \eta^2)$ 会较小,但由于 R_1 通常很小而使 U_i^2/R_1 绝对数值很大,所以充电电路仍能够有很可观的功率输出。因此,当系统参数确定以后,需要在系统输出功率和效率间进行权衡和选择,使系统在有满意的传输效率的同时,又有足够的功率输出。

3 谐振回路中储能元件上的电压分析

由于系统在稳定工作时处于电压谐振状态,两个互感线圈 L_1 、 L_2 及其补偿电容 C_1 、 C_2 上会有较高的电

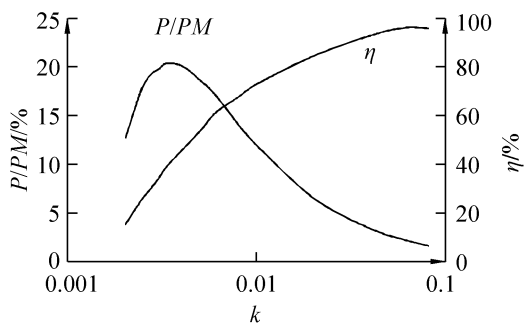


图3 充电电路输出功率和效率与耦合系数的关系

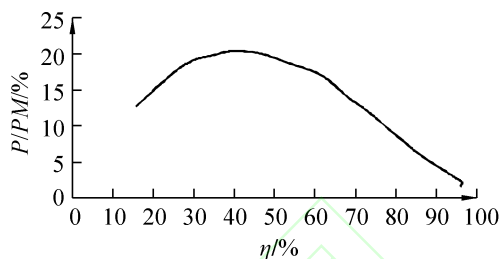


图4 充电电路的输出功率与传输效率的关系

压。由式(14)有

$$I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{P}{E} \quad (22)$$

将此式与式(10)联立,在 $R_1 R_2 \ll \omega^2 M^2$ 时,可得一个一元二次方程

$$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{P}{E} \omega^2 M^2 - \omega M U_i + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 E = 0 \quad (23)$$

在满足条件 $4R_1 P \ll U_i^2$, 即 $P \ll \frac{U_i^2}{4R_1}$ 时,得解 $\omega M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_i E}{P}$ 。

根据耦合系数的定义 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, 当 $L_1 = L_2 = L$ 时,便有 $k = \frac{M}{L}$, 即 $\omega M = k\omega L$, 由此可得

$$\omega L = \frac{2\sqrt{2}}{k\pi} \frac{U_i E}{P} \quad (24)$$

结合式(22)、式(24),互感线圈 L_2 上的电压为

$$U_{L_2} = \omega L I_2 = \frac{U_i}{k} \quad (25)$$

在式(7)中,令 $X_2 = 0$, 结合式(3)并设 $R_2 I_2 \ll U_{01}$, 则

$$I_1 = \frac{U_{01}}{\omega M} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{\omega M} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{k\omega L}。$$

再结合式(24),互感线圈 L_1 上的电压为

$$U_{L_1} = \omega L I_1 = \frac{U_{01}}{k} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{k} \quad (26)$$

可见充电电路稳定工作时,在满足式(17)的情况下,系统中两个互感线圈上的电压取决于电路的输入电压 U_i 和输出电压 U_{01} , 且耦合系数 k 减小会使输出功率增大,但同时使电能传输效率下降和互感线圈上的电压增大。

4 结论

经对电动汽车的蓄电池电压与输入交流电源电压之比的优化,在电动汽车无线充电电路的两个互感线圈的耦合系数 k 较小的情况下,仍然可以实现无线充电,并且可以获得足够的充电功率和电能传输效率,其条件就是两个互感线圈的电流回路处于谐振状态,且回路电阻 R_1 、 R_{20} 足够小。这一结果可以为电动汽车在行进中充电打下基础。存在的问题是两个互感线圈和它们的补偿电容上的电压较高,因而对绝缘的要求会比较高。

参 考 文 献

Surface Uniformity of ITO Thin Films Prepared by Repeatedly Electro-spinning and Annealing

Chang Xi, Yang Lining, Qi Haibo

(Institute of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract:ITO Transparent conductive thin film on slide glass was prepared by multiple electro-spinning and annealing process. The results indicate that that annealing promotes crystallinity and reduces size distribution of ITO particles. As the result, uniform and smoothing thin film of high loading of ITO particles can be obtained with less surface defects and small roughness.

Key words:ITO transparent conductive film; multiple electro-spinning; annealing; surface uniformity
(责任编辑 刘宪福)

(上接第 99 页)

[2]赵彪,陈希有,余庆广.用于非接触电能传输的自适应谐振技术原理[J].电工电能新技术,2010,29(2):33-37.
[3]杨民生,王耀南,欧阳红林.无接触电能传输系统的补偿及性能分析[J].电力自动化设备,2008,28(9):15-18.
[4]武瑛,严陆光,徐善纲.新型无接触点能传输系统[J].中国电机工程学报,2004,24(5):63-66.
[5]孙跃,夏晨阳,戴欣,等.感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[J].中国电机工程学报,2010,30(33):44-50.

Analysis of Wireless Charging Circuit for Electric Vehicle

Qu Zhenjiang¹, Wang Xiaoping², Liu Na²

(1. Physics and electronic information Department, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001, China;
2. Institute of electrical and electronic engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract:The wireless charging circuit of electric vehicles, whose primary and secondary side mutual inductance coil are both series resonant inductive coupling, is deeply analyzed. And the relationship between the output power, the transmission efficiency and the circuit parameters is concluded when it is in the steady state. Moreover, the relationship is concluded between the voltages of the compensation capacitor corresponding to the mutual inductance coil, AC supply and battery and the mutual inductance by means of optimizing the electric vehicle battery voltage and AC supply voltage ratio. Furthermore, all the results are verified by simulation, which may lay a foundation for electric vehicles charging while the vehicle is moving.

Key words:esonant inductive coupling; wireless charging; the mutual inductance coil; the coupling coefficient;transmission power; transmission efficiency

(责任编辑 刘宪福)