

线圈匝数对磁耦合谐振式 WPT 输出功率的影响

王国东¹ 姬惠强² 乔振鹏³

(1. 河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454000; 2. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000;

3. 国网河南省电力公司检修公司 郑州 450007)

摘要: 针对磁耦合谐振式无线电能传输的4线圈模型中线圈匝数对系统传输功率的影响,本文通过建立系统模型,利用电路理论计算得出系统的输出功率公式,并使用 MATLAB 软件仿真分析了系统的输出功率曲线。分析结果表明在4线圈的结构和材质相同的情况下,接收线圈的匝数增加比发射线圈匝数的增加使系统的输出功率要提高很多。同时,接收线圈匝数的增加使系统功率达到最大值的频率有明显的下降,而发射线圈增加相同匝数时,频率变化不明显。该结果还表明,接收线圈匝数增加时系统输出功率达到最大值对应的负载电阻在变大。因此,在4个线圈结构相同时,增加接受线圈匝数可以提高输出功率。

关键词: 磁耦合谐振;无线电能传输;线圈匝数

中图分类号: TM724 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4014

Effect between coil turns and output power of magnetic resonant coupling wireless power transmission

Wang Guodong¹ Ji Huiqiang² Qiao Zhenpeng³

(1. School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. State Grid Henan Electric Power Corporation Maintenance Company, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to analyze the effect between output power and coil turns of the four coils model of magnetic resonant coupling wireless power transmission system, in this paper, the system model was established and the output power formula was calculated using the circuit theory. The output power curve of system was analyzed through the MATLAB software simulation. The result shows that the increase of the receiving coil turns make the system output more power than the increase of the transmitter coil turns when the four coils have the same structure and material. Meanwhile, the increase of receiving coil turns make the system frequency have obvious drop when the system reach maximum output power, and the frequency variation is not obvious when the increase of transmitter coil turns. The result also shows that when the receiving coil turns increase the peak load resistance of output power is also increasing. So when the four coils have same structure, the increase receiving coil turns can improve the output power.

Keywords: magnetic resonance coupling; wireless power transmission; coil turns

0 引言

磁耦合谐振式无线电能传输(wireless power transmission, WPT)技术实现了电能的中等距离传输。该项技术是由麻省理工学院的研究团队在2006年提出,并于2007年利用该原理在2 m的距离范围内点亮了一个60 W的灯泡。从此,磁耦合谐振无线电能传输技术受到国内外学者的广泛关注^[1-3]。并对该技术进行理论建模方面的分析^[4-6]。相比于其他方式的无线电能传输技术,该技术具有电能传输距离远、传输功率大、效率高^[7-8],且受障碍物对传

输效率影响不大^[9]的特点。无线电能传输技术的应用范围广泛,有电动车、消费电子、无尾家电等领域^[10-13]。无线电能传输装置是由功率放大器提供能量^[14-15]。其中,无线电能传输技术线圈对能量传输的影响也做了相关的研究^[16]。

本文针对4线圈模型的磁耦合谐振式无线电能传输系统模型,以电路理论为基础,分析了发射线圈和接收线圈对系统影响。通过仿真分析得出发射线圈和接收线圈匝数变化时,系统的输出功率不同。同时,线圈匝数变化对系统达到最大输出功率时的负载电阻和频率都有影响。

1 理论推导

磁耦合谐振式无线电能传输系统的4线圈结构模型如图1所示,其中电源电阻忽略不计,系统主要有源线圈(P),发射线圈(S),接收线圈(R)和负载线圈(L)(图1中从左至右)组成。其中 R_1, R_2, R_3, R_4 为4个线圈的回路中的电阻, L_1, L_2, L_3, L_4 为4个线圈回路中的电感。 C_1, C_2, C_3, C_4 为4个线圈回路中的电容(包括分布电容和外加电容),其主要是起匹配作用,使每个线圈处于谐振状态。 M_{12}, M_{23}, M_{34} 分别是电感线圈耦合时的互感, R_L 为系统的负载, U_S 为电源电压。本文采用电阻作为系统的负载。

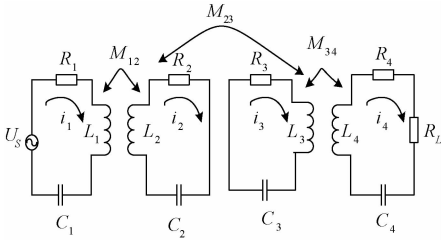


图1 系统电路模型

磁耦合谐振式无线电能传输系统处于谐振状态时,其等效电路的KVL方程为:

$$\begin{cases} R_1 i_1 + j\omega M_{12} i_2 = U_S \\ j\omega M_{12} i_1 + R_2 i_2 + j\omega M_{23} i_3 = 0 \\ j\omega M_{23} i_2 + R_3 i_3 + j\omega M_{34} i_4 = 0 \\ j\omega M_{34} i_3 + (R_4 + R_L) i_4 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由方程组(1)可得系统的输出功率为:

$$P_L = \frac{\omega^6 (M_{12} M_{23} M_{34})^2 U_S^2 R_L}{(\omega^2 M_{34}^2 (R_1 R_2 + (\omega M_{12})^2) + A \cdot (R_4 + R_L))^2} \quad (2)$$

其中, $A = (\omega M_{23})^2 R_1 + (R_1 R_2 + \omega^2 M_{12}^2) R_3$ 。

磁耦合谐振式无线电能传输系统的线圈采用螺旋管式结构。线圈的参数对系统的传输功率有一定的影响,主要影响到线圈的电感值和电阻值。其中线圈的电感的计算公式为:

$$L = \mu_0 N^2 r \left[\ln\left(\frac{8r}{a}\right) - 1.75 \right] \quad (3)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, N 为线圈匝数, r 为线圈半径, a 为线圈导线半径。

在电源频率为高频的情况下,线圈的辐射电阻不可忽略。此时线圈电阻主要包括欧姆电阻 R_0 和辐射电阻 R_r ,其相应的计算公式为:

$$\begin{cases} R_0 = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \cdot \frac{Nr}{a} \\ R_r = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left[\frac{\pi}{12} N^2 \left(\frac{\omega r}{c}\right)^4 + \frac{2}{3\pi^3} \left(\frac{\omega h}{c}\right)^2 \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ 为电导率; μ_0 为真空磁导率; ϵ_0 为空气介电常数; h

为线圈宽度; c 为光速; N 为线圈匝数; r 为线圈半径; a 为导线半径。

两线圈之间耦合时的互感为 M_{ij} ,互感的计算公式为:

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 \pi N_i N_j r_i^2 r_j^2}{2(r_i^2 + r_j^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

式中: L_i 为第 i 个线圈的电感; N_i 为第 i 个线圈的匝数; r_i 为第 i 个线圈的半径; D 为系统中线圈之间的距离。

2 仿真分析

为了研究磁耦合谐振式无线电能传输系统中的发射线圈和接收线圈匝数变化对系统输出功率的影响,采用前述公式,通过MATLAB软件对系统进行仿真分析。本系统采用的是对称结构的4线圈模型,源线圈和负载线圈结构对称,4个线圈具有相同的导线材质和结构,简化了模型的分析。

本文中系统的基本参数为:电源的频率2 MHz,4个线圈半径都是0.15 m,源线圈和发射线圈之间的距离 D_{12} 为0.1 m,发射线圈和接收线圈的距离 D_{23} 为0.5 m,接收线圈和负载线圈的距离 D_{34} 为0.1 m。导线的半径为1.05 mm,负载为30 Ω ,电源电压为7.5 V。发射线圈匝数(N_2)和接收线圈匝数(N_3)都是从1匝到30匝不断增加,每次增加为1匝。此外,线圈匝数增多产生的分布电容远小于外加电容,可忽略不计。

2.1 发射线圈、接收线圈匝数变化对系统传输功率的影响

如图2(a)所示,固定接收线圈匝数为1,随着发射线圈匝数的增加,输出功率逐渐增大,且逐渐趋于饱和。这是由于线圈之间互感增大的原因。线圈匝数的增加使发射线圈和接收线圈之间的互感变大,使得系统总负载阻抗变得更小,更多的能量传递到负载上。类似的规律也可以在图2(b)中观察到,即固定发射线圈匝数为1,逐渐增加接收线圈匝数时,输出功率也表现为随着接收线圈的匝数增加而增加。

同时,对比图2(a)和(b)发现,当发射线圈和接收线圈增加相同匝数时,发射线圈匝数增加引起的输出功率增大的幅度明显小于接收线圈增加所引起的输出功率增加幅度。

这一现象可以做如下解释:电路经戴维南等效定理等效后的电源电压为:

$$U_{eq} = \frac{\omega^3 M_{12} M_{23} M_{34} U_S}{\omega^2 M_{23}^2 R_1 + R_1 R_2 R_3 + \omega^2 M_{12}^2 R_3} \quad (6)$$

等效电阻为:

$$R_{eq} = \frac{\omega^2 M_{34}^2 (R_1 R_2 + \omega^2 M_{12}^2)}{\omega^2 M_{23}^2 R_1 + R_1 R_2 R_3 + \omega^2 M_{12}^2 R_3} \quad (7)$$

令描述发射线圈和接收线圈匝数变化的系统分为2个模型,1号模型中接收线圈为1匝,其他参数不变,发射线圈增加。2号模型中发射线圈为1匝,接收线圈增加,其他参数不变,如图3所示。图3(a)表示1号模型是用戴维南等效定理等效的电阻(Z_1)随发射线圈匝数(N_2)的变化,

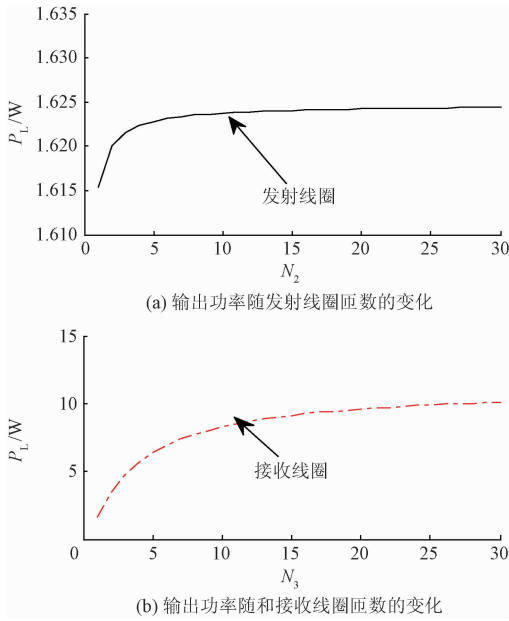


图 2 P_L 随 N_2, N_3 的变化

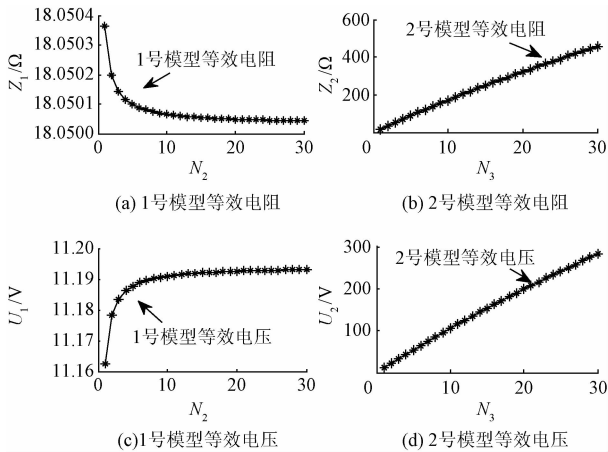


图 3 Z_1, Z_2, U_1, U_2 随 N_2, N_3 的变化

图 3(b) 表示 2 号模型是用戴维南等效定理等效的电阻 (Z_2) 随接收线圈匝数 (N_3) 增加时的变化。图中可见, 在两个模型中, 发射线圈匝数变化的等效电阻几乎不变, 在 18.05~18.054 Ω 之间, 接收线圈匝数变化的等效电阻变化大, 大约在 18.05~500 Ω 之间。可见发射线圈匝数增加, 等效电阻降低, 但变化不明显。接收线圈匝数增加, 等效电阻明显增大。图 3(c) 表示 1 号模型用戴维南等效定理等效的电压 (U_1)。图 3(d) 表示 2 号模型用戴维南等效定理等效的电压 (U_2)。图中可见, 随着发射线圈匝数的增加等效电压增加, 但是不明显, 在 11.16~12 V。接收线圈匝数的增加等效电压在大约 11.16~300 V。由等效电压, 等效电阻和负载组成回路。当负载一定时, 可知发射线圈匝数增加系统输出功率增加且变化不明显, 接收线圈匝数增

加系统输出功率增加且变化明显。发射线圈匝数增加使得系统的输出功率小于接收线圈增加使系统输出的功率。

进一步地, 通过解式 (1) 的方程组可得负载线圈上的电流:

$$i_4 = \frac{\omega^3 (M_{12} M_{23} M_{34}) U_s}{\omega^2 M_{34}^2 (R_1 R_2 + (\omega M_{12})^2) + A \cdot (R_4 + R_L)} \quad (8)$$

其中, $A = (\omega M_{23})^2 R_1 + (R_1 R_2 + \omega^2 M_{12}^2) R_3$ 令负载线圈上的电流: $i_4 = \frac{B_x}{C_x}$ 。

其中, x 表示的是线圈匝数。

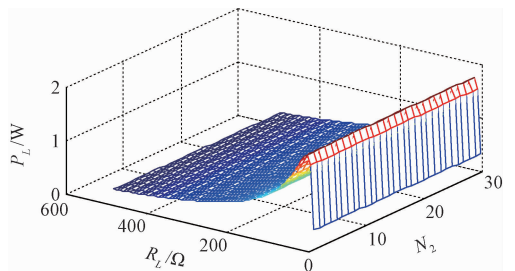
当 4 个线圈结构相同, 1 号模型中发射线圈匝数和 2 号模型中发射线圈匝数增加相同时, B_x 项的增加量相同。而 C_x 项的增加量是在发射线圈匝数增多时比负载线圈增加时要多。因此, 在负载上产生的电流增加少, 功率增加少。

同时可以证明, 当其他参数一定, 而源线圈和负载线圈导线的匝数, 线圈半径和 D_{12}, D_{34} 不同时。使发射线圈匝数增加和接收线圈匝数增加, 可知两个 B_x 项数值的变化相同。而两个 C_x 项的数值增加的快慢由 $\omega^2 M_{34}^2 R_1 R_2 + \omega^2 M_{12}^2 R_3 (R_4 + R_L)$ 确定, 也就是与源线圈和发射线圈之间的互感, 接收线圈和负载线圈之间的互感, 电源频率和 4 个线圈回路上的电阻有关。负载上产生的功率为: $P_L = i_4^2 \cdot R_L$ 。

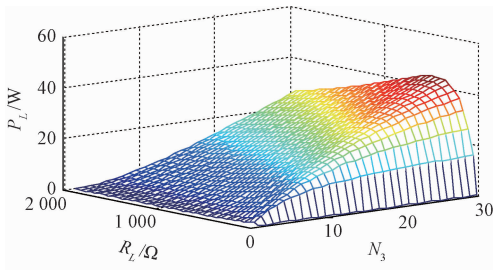
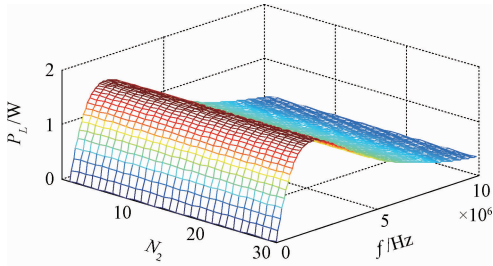
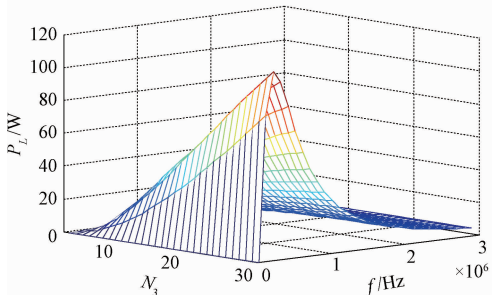
2.2 发射线圈、接收线圈匝数变化对负载和频率的影响

如图 4 所示, 磁耦合谐振式无线电能传输系统的输出功率随发射线圈匝数, 接收线圈匝数和负载电阻的变化。随着负载电阻 (R_L) 的增加, 每匝线圈处的输出功率都是先增大后减小, 都有一个最优电阻值对应每匝线圈。图 4(a) 中发射线圈匝数的增加对最优电阻的变化影响不明显。图 4(b) 中当接收线圈匝数的增加时, 有最优电阻对应最大输出功率, 且最优电阻值在增加, 同时输出的功率增大明显。这主要是因为线圈匝数的变化使电路系统中的阻抗发生的变化大小不同。

随着频率的增加, 发射线圈和接收线圈变化引起的磁耦合谐振式无线传输系统的输出功率都是先增大后减小, 如图 5 所示。图 5(a) 和 (b) 中对于每匝线圈, 都有一个最优频率使得系统的输出功率达到最大值。发射线圈匝数的增加对最优频率的影响不大, 最优频率变化小。接收线圈匝数的增加使得最优频率不断变小, 由 1 匝时的 1.8 MHz 减小到 30 匝时大概 0.2 MHz 左右, 最优频率变化大。



(a) 输出功率随负载电阻 R_L 和发射线圈匝数的变化

(b) 输出功率随负载电阻 R_L 和接收线圈匝数的变化图 4 P_L 随 R_L, N_2, N_3 的变化(a) 输出功率随频率 f 和发射线圈匝数的变化(b) 输出功率随频率 f 和接收线圈匝数的变化图 5 P_L 随 f, N_2, N_3 的变化

3 结 论

本文通过理论和 MATLAB 仿真分析了 4 线圈模型的磁耦合无线电能传输系统中发射线圈和接收线圈的匝数对系统的影响。当系统的 4 个线圈的结构和材质相同时,增加接收线圈的匝数与增加发射线圈的匝数相比,前者使系统的输出功率更大,前者的最优负载电阻值增加,对应的最优频率下降更加明显。

参 考 文 献

- [1] AWAIL I. Design theory of wireless power transfer system based on magnetically coupled resonators[C]. 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and System, Honolulu, HI, 2010: 1-4.
- [2] THOMAS E M, HEEBL JASON D, PFEIFFER C, et al. A power link study of wireless non-radiative power transfer systems using resonant shielded loops [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:

Regular Papers, 2012, 59(9): 2125-2136.

- [3] 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, 21.
- [4] 沈娜, 李长生, 张合. 磁耦合共振无线能量传输系统建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2735-2741.
- [5] 杨明博, 管延智, 李强, 等. 磁共振无线能量传输拓扑结构特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, (10): 2382-2391.
- [6] 黄学良, 吉青晶, 谭林林, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统串并式模型研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 171-176.
- [7] 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, 18(29): 21-26.
- [8] 辛文辉, 曹忠鲁, 张博. 中等工作频率下 MRPT 传输效率研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1114-1119.
- [9] 田子建, 杜欣欣, 朱元忠, 等. 障碍物对磁耦合谐振无线输电系统传输效率的影响[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 49-53.
- [10] 张宝群, 李香龙. 电动汽车非接触式充电研究概况及实用化分析[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 1-6.
- [11] 曹玲玲, 陈乾宏, 任小永, 等. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 1-13.
- [12] 张剑韬, 朱春波, 陈清泉. 应用于无尾家电的非接触式无线能量传输技术[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 33-37.
- [13] 黄学良, 谭林林, 陈中, 等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 1-11.
- [14] 黄晓生, 陈为, 陈庆彬. 用于 WPT 的双路 E 类逆变器功率合成拓扑及其电感耦合集成[J]. 中国电机工程学报, 2015(21): 5577-5584.
- [15] 储江龙, 李玉玲, 杨仕友. 非辐射共振耦合式无线电能传输系统前端功率放大系统设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(z2): 55-60.
- [16] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输方向性分析与验证[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 197-203.

作者简介

王国东, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为光电子器件、无线电能传输。

姬惠强, 硕士研究生, 主要研究方向为电工理论与新技术。

乔振鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为电工理论与新技术。

E-mail: jhq12123@163.com