

文章编号:1671-6833(2014)05-0040-04

磁耦合电能传输系统两类建模法的等效性分析

栗安鑫¹, 张江飞¹, 张祖洸²

(1. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 国网安徽阜阳供电公司 基建部, 安徽 阜阳, 236001)

摘要:以磁耦合无线电能传输系统为对象,应用耦合模理论给出了磁谐振系统的动力学模型,从能量的磁场耦合和衰减特性角度阐释了其中关键参数的电路含义,进而导出了输出功率和传输效率表达式.结合等效电路法的有关输出功率和传输效率结论,证实了两者在该层面的一致性.最后,给出了系统输出功率、传输效率与传输距离、工作频率之间的实验关系曲线,说明了理论分析结果的正确性,间接验证了两类建模方法在输出功率和传输效率方面的一致性.

关键词:磁谐振;无线电能传输;等效电路;耦合模理论;耦合系数

中图分类号: TM74 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.010

0 引言

最近几十年来,无线电能传输技术得到了广泛关注^[1-3],特别是感应耦合电能传输(ICPT)技术,具有传输效率高、供电安全可靠等特点,在电动汽车充电、射频识别(RFID)、生物医学供电等方面被广泛应用^[4-5],然而 ICPT 技术的传输距离较短,在一定程度上限制了其发展应用.近年来发展起来的近场谐振磁耦合无线电能传输技术^[6-7],具有传输距离远,频率可调等优点,逐渐引起专家学者的兴趣.目前对近场谐振磁耦合无线电能传输系统的研究主要是对其传输特性进行分析,具体包括:①通过建模分析导出系统的输出功率和传输效率表达式,分析系统参数对二者的影响;②优化系统参数,提高输出功率和传输效率.分析系统传输特性,首先要建立系统模型,目前常用的建模方法有等效电路法^[8]和耦合模理论^[9].等效电路法从电路理论和工程应用角度出发,通过电路等效和阻抗反射导出系统参数间关系并对系统传输特性分析,发展比较成熟,在系统建模中应用较多.基于磁耦合理论的耦合模理论法,主要是从物理学角度对系统建模分析,与等效电路法相比,适用于品质因数较高、传输距离较大的近场谐振磁耦合系统^[10],近年被广泛用于磁耦合电能传输系统建模.

目前,关于谐振磁耦合无线电能传输系统的建模分析大多是分别利用等效电路法或耦合模理论,同时利用两类方法分别从物理和电路角度对系统建模分析的研究较少.文献[10]分别利用两类方法初步对两传输线圈的谐振磁耦合电能传输系统进行建模,导出两种建模方式下系统传输效率相同,但未对系统的输出功率特性进行分析.笔者拟以近场谐振磁耦合无线电能传输系统为对象,利用耦合模理论对传输系统建模分析,结合电路理论知识,导出系统的输出功率和传输效率表达式,通过与等效电路建模方法下导出的输出功率和传输效率表达式对比,得出两类建模方法对系统建模分析具有等效性的结论,并在此基础上对系统的输出功率和传输效率进行分析.最后,通过理论计算和实验测量验证两种建模分析方法在输出功率和传输效率层面的一致性和理论分析的正确性.

1 耦合系统建模分析

谐振磁耦合无线电能传输系统的传输结构如图 1 所示,由驱动源、传输线圈和负载组成.其中,驱动源为高频交流电源,电压为 U ,平均值为 V ,由 E 类谐振逆变电路产生.传输网络中,线圈的传输距离为 D ; L_p 、 L_s 分别为发射和接收线圈;电容 C_a 、 C_b 分别与 L_p 和 L_s 相连,用来调节两线圈谐

收稿日期:2014-04-30;修订日期:2014-06-19

作者简介:栗安鑫(1984-),男,河南周口人,硕士,研究方向为电力电子,磁谐振无线电能传输,E-mail:lianxin324@126.com.

振频率,尽量使谐振频率与驱动频率相等,以使系统在强耦合谐振状态工作,使负载得到最大的输出功率和最优的传输效率。

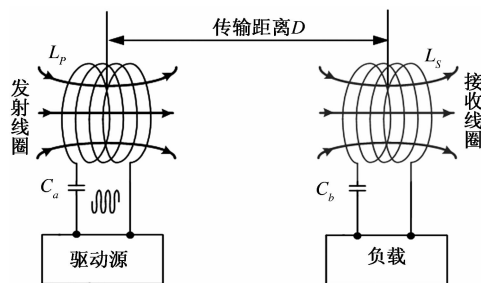


图1 传输系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of the transfer system

利用耦合模理论对图1所示的谐振磁无线电能传输系统建模,得到系统的矩阵微分方程

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} a_p \\ a_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (j\omega_0 - \Gamma) & j\kappa \\ j\kappa & (j\omega_0 - \Gamma - \Gamma_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V e^{-j\omega t} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: a_p 、 a_s 分别为表征发射和接收线圈能量的特征复变量,线圈包含的能量分别为 $|a_p|^2$ 、 $|a_s|^2$; ω_0 为线圈谐振频率,发射和接收线圈相同; ω 为系统工作频率,且有 $\omega_a = \omega_0 - \omega$; Γ 为线圈内部电阻损耗引起的衰减率, Γ_L 为负载损耗引起的衰减率; κ 为线圈耦合系数; $V e^{-j\omega t}$ 为系统驱动源。

对式(1)所示的微分方程求解可得

$$\begin{bmatrix} a_p \\ a_s \end{bmatrix} = \frac{V e^{-j\omega t}}{\kappa^2 + \Gamma(\Gamma + \Gamma_L) - \omega_a^2 + j(2\Gamma + \Gamma_L)\omega_a} \begin{bmatrix} \Gamma + \Gamma_L - j\omega_a \\ j\kappa \end{bmatrix}. \quad (2)$$

系统在谐振状态下工作时,依据能量与功率之间的关系可知由一次侧发射线圈流入二次侧接收线圈的总功率为

$$P_{sp} = \frac{d|a_s|^2}{dt} = 2j\kappa a_p a_s^* - 2(\Gamma + \Gamma_L)|a_s|^2 = 2\Gamma[(\Gamma + \Gamma_L)^2 + \omega_a^2] + 2(\Gamma + \Gamma_L)\kappa^2. \quad (3)$$

假设系统在理想状态下工作,即系统工作频率 ω 和谐振频率 ω_0 相等($\omega_a = 0$)。那么,由文献[10]可知,系统输出功率 P_L 和传输效率 η 为

$$P_L = 2\Gamma_L |a_s|^2 = \frac{2\Gamma_L \kappa^2 V^2}{[\kappa^2 + \Gamma(\Gamma + \Gamma_L)]^2}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_L + P_{RP} + P_{RS}} = \frac{\Gamma_L \kappa^2}{\Gamma(\Gamma + \Gamma_L)^2 + (\Gamma + \Gamma_L)\kappa^2}. \quad (5)$$

由式(4)和(5)可知:系统的输出功率 P_L 与驱动电压 V 、线圈间耦合系数 κ 和系统衰减率 Γ

有关;传输效率与耦合系数 κ 和系统衰减率 Γ 有关。

对于图1所示的磁耦合无线电能传输系统,从电路角度而言,发射线圈 L_p 和接收线圈 L_s 的等效电感、等效电阻分别为 L_1 、 L_2 、 R_1 、 R_2 ,且有 $L_1 = L_2 = L$, $R_1 = R_2 = R$ 。系统在高频状态下工作时,线圈辐射电阻远小于其等效电阻,辐射电阻损耗常忽略不计;发射线圈 L_p 和接收线圈 L_s 之间的互感记为 M 。从能量耦合角度对磁耦合系统分析可知,系统的能量传输与线圈间的能量耦合系数有关;从电路角度进行分析可知,能量传输与线圈互感有关,因此线圈间能量耦合系数 κ 与线圈互感 M 存在某种定量关系。综合以上分析,结合电路理论中线圈互感与耦合系数的关系和文献[6]可知,磁耦合电能传输系统中耦合系数 κ 与线圈互感 M 满足

$$\kappa = \frac{\omega}{2} \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\omega}{2} k. \quad (6)$$

对传输系统中单个发射线圈 L_p 或接收线圈 L_s 进行分析,可把发射线圈 L_p 等效成电阻 R 、电感 L 和电容 C 的串联谐振电路。假想电感和电容中的能量随时间按指数规律衰减,衰减的快慢取决于谐振电路微分方程特征根的实部,记为衰减率 Γ ,且有

$$\Gamma = R/(2L). \quad (7)$$

将式(6)和(7)带入式(4),经过重新整理可得传输系统输出功率 P_L 为

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{R_L V_p^2}{R(R + R_L)} \frac{k^2 Q^2}{[1 + k^2 Q^2]^2}. \quad (8)$$

式中:系统品质因数满足 $Q_1 = Q_2 = \omega/(2\Gamma)$, $Q_L = \omega/(2\Gamma_L)$, $Q_{2L} = Q_2 Q_L / (Q_2 + Q_L)$, $Q^2 = Q_1 Q_{2L}$ 。

同理,将式(6)、(7)带入式(5)可得传输效率

$$\eta = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot \frac{k^2 Q^2}{1 + k^2 Q^2}. \quad (9)$$

由式(8)和(9)分别可以看出:系统的输出功率 P_L 与接收线圈等效电阻 R 、负载电阻 R_L 、输入电压 V 、品质因数 Q 和耦合系数 k 有关;传输效率 η 与接收线圈等效电阻 R 、负载电阻 R_L 、品质因数 Q 和耦合系数 k 有关。对于固定的系统,线圈等效电阻 R 、负载电阻 R_L 、输入电压 V 一定,仅有耦合系数 k 和品质因数 Q 可变,因此系统的输出功率 P_L 和传输效率 η 都仅与耦合系数 k 和品质因数 Q 有关。

从电路理论的另一个角度对系统进行分析,可得到图1所示的谐振磁耦合电能传输系统的耦

合等效电路模型,如图 2 所示. 图中,发射线圈和接收 L_p 、 L_s 的等效电容分别为 C_1 、 C_2 ,二者分别与两线圈外加电容之和记为 C_p 、 C_s ,且有 $C_p = C_s = C$. i_p 、 i_s 分别为流过发射和接收线圈的电流,平均值为 I_p 、 I_s , R_L 为负载的等效电阻.

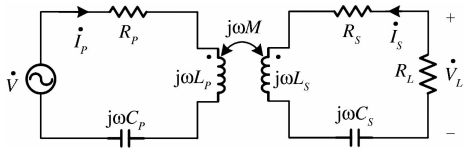


图 2 传输系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the transfer system

由文献[9]可知,利用等效电路法对系统建模分析,可得图 2 所示电路的相量方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+j(\omega L-1/(\omega C)) & j\omega M \\ j\omega M & R+j(\omega L-1/(\omega C)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_s \end{bmatrix}$$

(10)

式中: V 为高频交流电源电压; V_L 为负载端电压.

通过分析推导出系统输出功率 P_L 和传输效率 η 的表达式分别为

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{V_p^2 R_L}{R(R+R_L)} \frac{k^2 Q^2}{(1+k^2 Q^2)^2};$$

(11)

$$\eta = \frac{P_L}{P_T} = \frac{\frac{1}{2} |I_s|^2 R_L}{\frac{1}{2} |I_p|^2 \cdot R + \frac{1}{2} |I_s|^2 (R+R_L)}$$
$$= \frac{R_L}{R+R_L} \frac{k^2 Q^2}{1+k^2 Q^2}.$$

(12)

由式(8)、(9)和式(11)、(12)对比可知:分别利用耦合模理论、等效电路法得到的系统输出功率和传输效率完全相同,从理论上验证了两类建模分析方法在该层面的一致性结论.

2 最大输出功率分析

由于在忽略辐射电阻损耗的情况下耦合模理论和等效电路建模分析方法导出的系统输出功率相同,笔者取式(8)或(11)对系统的最大输出功率进行分析. 下面以式(8)为例,对系统最大输出功率进行分析. 若想得到系统的最大输出功率 $P_{L\max}$,则系统输出功率 P_L 与耦合系数 k 、品质因数 Q 需满足

$$\frac{\partial P_L}{\partial k} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial P_L}{\partial Q} = 0.$$

(13)

对式(13)求解得耦合系数与品质因数之间满足 $kQ = 1$ 时,得到输出功率最大值 $P_{L\max}$,且表

达式为

$$P_{L\max} = \frac{1}{8} \frac{R_L V_p^2}{R(R+R_L)}.$$

(14)

由上面分析可知:在某一固定的耦合系数 k 或品质因数 Q 值时,可得到系统输出功率最大值 $P_{L\max}$;系统传输效率 η 与耦合系数 k 、品质因数 Q 成正比,且当 k 、 Q 值趋近无穷时,可得系统最大传输效率 η .

下面的工作是通过理论计算和实验结果分析系统输出功率 P_L 和传输效率 η 与耦合系数 k 和品质因数 Q 的关系. 由于系统的耦合系数 k 与线圈传输距离 D 的三次方成反比^[7],即 $k \propto (R_1 R_2 / D)^3$;品质因数 Q 与系统工作频率 f 近似成正比 ($Q = 2\pi f L / R$),因此可以通过改变传输距离 D 和工作频率 f 对输出功率 P_L 和传输效率 η 的影响来间接验证耦合系数 k 和品质因数 Q 对输出功率 P_L 和传输效率 η 的影响.

3 实验研究分析

为了验证系统输出功率 P_L 和传输效率 η 与耦合系数 k 和品质因数 Q 之间的关系,设计了一台实验样机,且系统处于最佳工作状态如图 3 所示. 图中,高频交流驱动电源由 E 类谐振逆变电路产生,其输入电压值范围为 12 ~ 24 V,逆变出的高频电源频率为 1 MHz. 为了确保线圈谐振工作频率与驱动源工作频率相同,两传输线圈 L_p 、 L_s 分别加 680 pF 电容. 系统参数如表 1 所示.

表 1 传输系统实验参数

Tab. 1 Experiment parameters of the transfer network

参数	数值	参数	数值
电感 $L_1 / \mu\text{H}$	68	电容 C_1 / nF	11
电感 $L_2 / \mu\text{H}$	1.65	电容 C_2 / nF	1
负载电阻/ Ω	12	线圈匝数	11
导线直径/mm	4.6	线圈半径/cm	10
线圈电感/ μH	35.2	线圈内阻/ Ω	1.5
谐振电容/pF	700	谐振频率/MHz	1

由 $kQ = 1$ 时可得系统最大输出功率可知:当固定系统工作频率 $f = 930 \text{ kHz}$,即品质因数 $Q = 14.8$,线圈传输距离 $D = 9 \text{ cm}$ 时,可得到系统的最大传输功率. 分别通过理论计算和实验测量得出线圈在不同传输距离 D 下的驱动源输出有功功率 P_T 和输出功率 P_L 值,可分别得到输出功率 P_L 、传输效率 η 与传输距离 D 间的关系曲线如图 4 所示. 由图 4 可知:当系统在传输距离 $D = 8 \text{ cm}$ 时得到最大的输出功率 P_L ,与理论分析结果基本

一致;系统的传输效率 η 与传输距离 D 成反比,系统输出功率 P_L 和传输效率 η 的实际测量值和理论计算结果基本吻合. 间接验证了 ECM 和 CMT 建模方法的有效性和理论分析结果的正确性,同时也证实了两类建模分析方法在输出功率和传输效率层面的一致性结论.

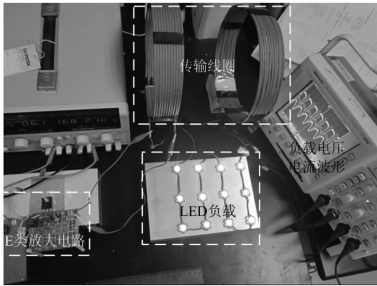


图 3 系统实验电路图

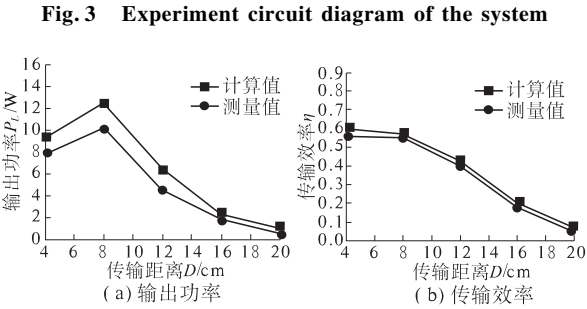


图 4 输出功率、传输效率与传输距离 D 间关系曲线

Fig. 4 Power& Efficiency as a function of transfer D

同理,由 $kQ=1$ 时可得系统最大输出功率可知:当固定线圈传输距离 $D=10\text{ cm}$,即互感 $M=2.16\text{ }\mu\text{H}$,系统工作频率为 995 kHz 时可得到系统的最大传输功率. 分别通过理论计算和实验测量得出不同工作频率 f 下的驱动源输出有功功率 P_T 和输出功率 P_L 值,得到输出功率 P_L 和传输效率 η 与工作频率 f 的关系曲线分别如图 5 所示. 由图 5 可知:系统输出功率 P_L 和传输效率 η 的实际测量值和理论计算值基本一致,并且在工作频率 $f=950\text{ kHz}$ 时得到最大的输出功率 P_L 和最优传输效率 η ;与理论分析结果基本吻合,进一步验证了理论分析结果的正确性和 ECM 和 CMT 建模方法的

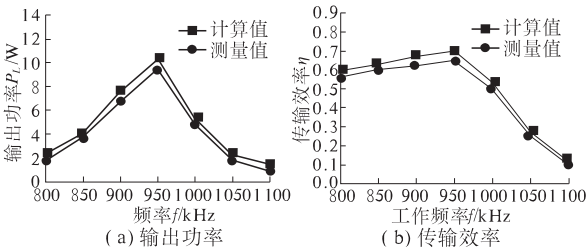


图 5 输出功率、传输效率与工作频率 f 间关系曲线

Fig. 5 Power& Efficiency as a function of frequency f

有效性结论.

4 结论

以磁谐振耦合无线电能传输系统为研究对象,利用耦合模理论思想构建了系统电路模型,结合电路理论知识导出了系统输出功率和传输效率表达式,通过与传统等效电路法导出结果的对比分析,得出两类建模方法在该层面的一致性结论. 最后通过理论计算和实验结果间接验证了两类建模方法的一致性.

参考文献:

[1] 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.

[2] CANNON B L, HOBURG J F, STANCIL D D, et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics [J]. 2009, 24(7): 1819 – 1825.

[3] 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.

[4] 王璐,陈敏,徐德鸿. 磁悬浮列车非接触紧急供电系统的工程化设计[J]. 中国电机工程学报,2007,27(18): 67 – 70.

[5] GUOXING W, WENTAI L, SIVAPRAKASAM M, et al. Design and analysis of an adaptive transcutaneous power telemetry for biomedical implants [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2005, 52(10): 2109 – 2117.

[6] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(83): 82 – 86.

[7] RAMRAKHYANI A K, MIRABBASI S, CHIAO M. 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.

[8] 翟渊,孙跃,戴欣,等. 磁共振模式无线电能传输系统建模与分析[J]. 中国电机工程学报,2012, 32(12): 155 – 160.

[9] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 167 – 172.