



吴振军,冯凯,窦智峰,等. 磁场耦合谐振式无线电能传输补偿拓扑结构效率特性分析[J]. 轻工学报,2021, 36(2):83-91.

WU Z J, FENG K, DOU Z F, et al. Analysis of efficiency characteristics of compensation topology structure in magnetic coupled resonance wireless power transfer[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(2):83-91. DOI:10.12187/2021.02.011

中图分类号:TM15 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)02-0083-09

磁场耦合谐振式无线电能传输补偿拓扑结构效率特性分析

Analysis of efficiency characteristics of compensation topology structure in magnetic coupled resonance wireless power transfer

吴振军,冯凯,窦智峰,高鹏飞,金楠,武洁

WU Zhenjun, FENG Kai, DOU Zhifeng, GAO Pengfei, JIN Nan, WU Jie

郑州轻工业大学 电气信息工程学院,河南 郑州 450002

College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

关键词:

无线电能传输;谐振;
等效电路;系统效率

Key words:

wireless power transfer;
resonance;
equivalent circuit;
system efficiency

摘要:构建磁场耦合谐振式无线电能传输系统4种谐振补偿拓扑结构(原边串联副边串联型、原边串联副边并联型、原边并联副边串联型和原边并联副边并联型)的等效电路模型,分析磁场耦合谐振式无线电能传输系统的效率特性,研究耦合系数和品质因数对系统效率的影响.仿真结果表明,副边谐振补偿拓扑结构对系统效率影响较大,系统效率对耦合系数和品质因数的变化较为敏感,与副边采用串联补偿拓扑结构方式相比,副边采用并联补偿拓扑结构时,系统有更宽的高传输效率范围.实验结果验证了仿真结果的正确性.

收稿日期:2021-02-15

基金项目:河南省科技攻关项目(202102210090,202102210304)

作者简介:吴振军(1971—),男,河南省偃师市人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为电气工程.

Abstract: Four resonance compensation topologies equivalent circuit models for magnetic field coupling resonance wireless power transfer system (primary side series and secondary side series type, primary side series secondary side parallel type, primary side parallel secondary side series type and primary side parallel secondary side parallel type) was constructed. The efficiency characteristics of magnetic field coupling resonance wireless power transfer system was analyzed. The influence of coupling coefficient and quality factor on system efficiency was studied. The simulation results showed that the secondary side resonance compensation topology had a greater impact on the system efficiency, and the system efficiency was more sensitive to changes in the coupling coefficient and quality factors. Compared with the secondary side using the series compensation topology, the system had a wider range of high transfer efficiency when the secondary side used the parallel compensation topology. The experimental results verified the correctness of the simulation results.

0 引言

作为一种新型电能传输技术,无线电能传输技术可实现电能的非接触传输,摆脱导线的束缚,使电能的接入更加灵活、安全、方便,在移动机器人、便携式移动设备、植入式医疗设备等方面具有广阔的应用前景^[1-3]。

无线电能传输方式主要有电磁感应式、电磁辐射式和耦合谐振式3种^[4-7]。电磁感应式无线电能传输通过磁耦合方式传输能量,采用分离变压器在传输空间产生高频交变磁场,完成电能的非接触传输。但该传输方式中磁芯容易饱和,线圈热损耗较大,只适用于短距离无线电能传输^[8]。电磁辐射式无线电能传输先将电能转换为电磁波进行传输,再由天线接收,通过转换器将电磁波转换为电能。该传输方式传输距离较远,但传输效率较低且传输辐射较大^[9-10]。耦合谐振包括电场耦合和磁场耦合两种形式。在电场耦合式无线电能传输中,电源侧的金属平板和负载侧的金属平板形成电容,利用电容的电场进行电能传输,这种传输方式的应用较少^[11-12]。磁场耦合式无线电能传输主要利用共振和电磁感应原理,将电能通过磁场传递到接收侧,使其在中等距离传输时,仍能获得较高效率,并且电能传输不受空间非磁性障碍物的影响^[14]。根据补偿电容位置不同,磁场耦

合式无线电能传输系统的补偿拓扑结构可分为原边串联副边串联(SS)型补偿拓扑结构、原边串联副边并联(SP)型补偿拓扑结构、原边并联副边串联(PS)型补偿拓扑结构和原边并联副边并联(PP)型补偿拓扑结构。与电磁辐射式相比,磁场耦合式无线电能传输方式对电磁环境影响较小,且功率较大;与电场耦合式相比,该方式传输距离较远,因此磁场耦合式无线电能传输得到广泛应用^[15-16]。

目前磁场耦合式无线电能传输的研究主要集中在传输距离、带负载能力等方面^[17-21],由于磁场耦合谐振式无线电能系统本身固有的特点,系统磁路耦合机构的漏磁现象较严重,系统中的无功功率较大,限制了系统的传输效率和能力。针对这个问题,目前普遍采用谐振补偿方式进行无功功率补偿,但磁场耦合谐振式无线电能传输系统的传输效率^[22]、品质因数和耦合系数对不同谐振补偿结构的影响等问题^[23]尚未得到有效解决。文献[24]利用负载阻抗模型,分析原、副边采用不同补偿拓扑时对初、次级绕组电压电流的影响,但补偿结构对效率特性的影响尚不明确。文献[25]采用新型LCL谐振补偿结构降低了系统损耗,提高了系统传输效率,但增加了系统控制复杂度。文献[26]通过改变谐振补偿结构的电感值,使系统始终保持谐振状态,但结构相对复杂,实现

较困难.

鉴于此,本文拟针对磁场耦合式无线电能传输系统,建立4种谐振补偿拓扑结构的等效电路模型,推导系统效率表达式,研究耦合系数和品质因数对系统传输效率的影响,以期明确不同补偿拓扑结构的效率特性,为实际应用场景选择不同补偿拓扑结构提供理论参考.

1 磁场耦合谐振式无线电能传输系统结构

磁场耦合谐振式无线电能传输系统由直流电压源供电,逆变后产生高频交流电,原边与副边线圈通过磁场耦合的方式传输电能,将交流电传输至副边整流后供负载使用. 本文从等效电路的角度建立无线电能传输模型,构建等效电路并设置其具体参数,对系统的传输效率和传输功率进行计算、推导和分析. 为了简化分析,将副边整流部分去掉,副边剩余部分直接连接负载,在研究不同副边拓扑结构时只需等效折算即可.

系统结构原理如图1所示,其中 V_{in} 为原边输入电压;MOSFET全控开关管 Q_1 — Q_4 组成原边逆变电路; L_p 、 L_s 、 R_p 、 R_s 、 C_p 、 C_s 分别为原边和副边的线圈自感值、电阻、补偿电容; V_o 为负载电压值; I_o 为负载电流; V_p 为交流电压源; I_p 为逆变器输出电流; R_L 为负载电阻; M 为初级绕组

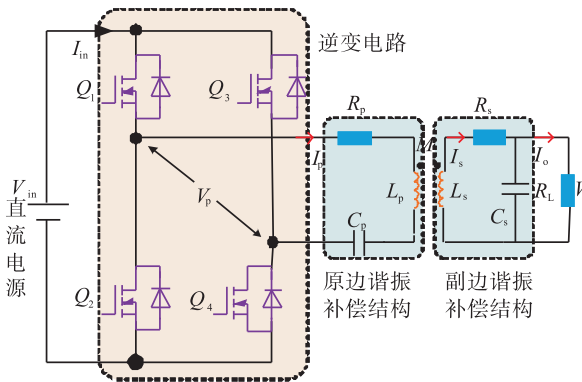


图1 系统结构原理图

Fig. 1 System structure schematic diagram

与次级绕组之间的互感值,其大小主要取决于线圈.

本文SS型和SP型补偿拓扑结构组成的无线电能传输系统,输入电压的有效值恒定,输入电流随负载变化而改变,被称为电压型磁场耦合谐振式系统;PS型和PP型无线电能传输系统输入电流的有效值恒定,输入电压随负载变化而改变,被称为电流型磁场耦合谐振式系统.

2 4种补偿拓扑结构等效电路模型

2.1 SS型补偿拓扑结构

SS型无线电能传输系统等效电路如图2所示,根据基尔霍夫定律(KVL)可列出方程:

$$\begin{cases} V_p = \left(R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} \right) I_p - j\omega M I_s \\ j\omega M I_p = \left(R_s + R_L + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \right) I_s \end{cases}$$

其中, ω 为变换器激励角频率. 令系统发射端和接收端电抗值 X_p 和 X_s 分别为

$$X_p = \omega L_p - \frac{1}{\omega C_p}$$

$$X_s = \omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}$$

则系统输出功率 P_{load} 和输入功率 P_{in} 分别为

$$P_{load} = \text{Re} \{ V_o I_o^* \} = \frac{R_L [(\omega M V_p B)^2 + (\omega M V_p A)^2]}{[(\omega^2 M^2 + R_p R_s + R_p R_L - X_p X_s)^2 + (R_p X_s + X_p R_s - X_p R_L)^2]^2}$$

$$P_{in} = \text{Re} \{ V_p I_p^* \} = \frac{V_p^2 (A R_s + A R_L + B X_s)}{(\omega^2 M^2 + R_p R_s + R_p R_L - X_p X_s)^2 + (R_p X_s + X_p R_s - X_p R_L)^2}$$

其中, I_o^* 为共轭输出电流, I_p^* 为共轭输入电流. 令

$$A = \omega^2 M^2 + R_p R_s + R_p R_L - X_p X_s$$

$$B = R_p X_s + X_p R_L + X_p R_s$$

则系统传输效率 η 为

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{A R_s + A R_L + B X_s}$$

系统传输效率公式包含过多参数,直接进

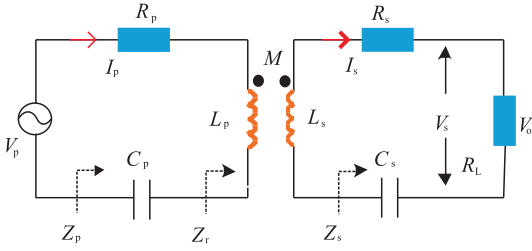


图2 SS型无线电能传输系统等效电路
Fig.2 SS model equivalent circuit of wireless power transfer

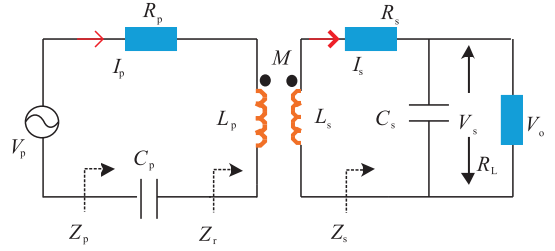


图3 SP型无线电能传输系统等效电路
Fig.3 SP model equivalent circuit of wireless power transfer

行分析较为复杂,通过标么化的方法可简化电路参数.令

$$\omega_r = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\alpha^2 = \frac{L_p}{L_s} = \frac{R_p}{R_s}$$

$$X_s = (\omega_r - \frac{1}{\omega_r}) R_L Q_0$$

$$X_p = (\omega_r - \frac{1}{\omega_r}) R_L Q_0 \alpha^2$$

其中, ω 为变换器激励角频率, ω_r 为系统工作频率对副边固有谐振频率的相对值, α 为副边自感与原边自感的比例系数, Q_0 为副边结构品质因数,联立上述方程解得传输效率表达式为

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{B_{ss}}{B_{ss} \left(\frac{B_s}{B_L} + 1 \right) + A_{ss}}$$

其中

$$A_{ss} = \frac{R_s}{R_L} \left(\frac{R_s}{R_L} + 1 \right)^2 + \frac{R_s}{R_L} Q_0^2 \left(\omega_r - \frac{1}{\omega_r} \right)^2$$

$$B_{ss} = K^2 \omega_r^2 Q_0^2$$

这里, K 为系统耦合系数.

2.2 SP型补偿拓扑结构

SP型无线电能传输系统等效电路如图3所示,根据KVL可列出方程:

$$\begin{cases} V_p = (R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p}) I_p - j\omega M I_s \\ j\omega M I_p = (R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + 1/R_L}) I_s \end{cases}$$

SP型无线电能传输系统中的输入功率、输出功率和系统效率计算方法与SS型无线电能传输系统类似.因此,SP型系统传输效率表达式为

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{C_{sp}}{C_{sp} \left(\frac{R_s}{R_L} + 1 \right) + A_{sp} + B_{sp}}$$

其中

$$A_{sp} = 2 \frac{R_s^2}{R_L^2} + \frac{R_s}{R_L} \left(\frac{R_s^2}{R_L^2} + 1 \right)^2 + \omega_r^4 \frac{R_s}{R_L} (1 + K^2)$$

$$B_{sp} = \frac{R_s}{R_L} \omega_r^2 Q_0^2 + \frac{R_s^3}{R_L^3} \omega_r^2 - \frac{1}{Q_0^2} - \omega_r^2 \frac{R_s}{R_L}$$

$$C_{sp} = K^2 \omega_r^2 Q_0^2$$

2.3 PS型补偿拓扑结构

PS型无线电能传输系统等效电路如图4所示,根据KVL可列出方程:

$$\begin{cases} V_p = (R_p + j\omega L_p) I_p - j\omega M I_s \\ j\omega M I_p = (R_s + R_L + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}) I_s \end{cases}$$

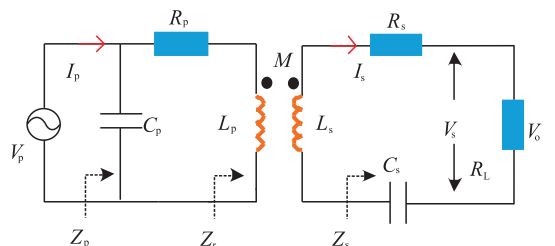


图4 PS型无线电能传输系统等效电路
Fig.4 PS model equivalent circuit of wireless power transfer

与SS型系统分析方法类似,PS型系统传输效率表达式为

$$\eta = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{in}}} = \frac{C_{\text{sp}}}{A_{\text{ps}} + B_{\text{ps}}}$$

其中

$$A_{\text{ps}} = 3 \frac{R_s^2}{R_L^2} + \frac{R_s}{R_L} + K^2 \omega_r^2 Q_0^2 \left(\frac{R_s}{R_L} + 1 \right)$$

$$B_{\text{ps}} = \left(\omega_r - \frac{1}{\omega_r} \right)^2 Q_0^2 \frac{R_s}{R_L}$$

$$C_{\text{ps}} = K^2 \omega_r^2 Q_0^2$$

2.4 PP型补偿拓扑结构

PP型无线电能传输系统等效电路如图5所示,根据KVL可列出方程:

$$\begin{cases} V_p = (R_p + j\omega L_p) I_p - j\omega M I_s \\ j\omega M I_p = (R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + 1/R_L}) I_s \end{cases}$$

与SS型系统分析方法类似,PP型系统传输效率表达式为

$$\eta = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{in}}} = \frac{C_{\text{pp}}}{C_{\text{pp}} \left(\frac{R_s}{R_L} + 1 \right) + A_{\text{pp}} + B_{\text{pp}}}$$

其中

$$A_{\text{sp}} = \frac{R_s^2}{R_L^2} \left(\frac{R_s}{R_L} + 1 \right) + \frac{R_s}{R_L} \left(\frac{R_s}{R_L} + 1 \right) - 2\omega_r^2 \frac{R_s}{R_L}$$

$$B_{\text{pp}} = \frac{R_s}{R_L} \omega_r^4 (K^2 + 1) + \frac{R_s^3}{R_L^3} \omega_r^2 \frac{1}{Q_0^2} + \omega_r^2 Q_0^2 \frac{R_s}{R_L}$$

$$C_{\text{pp}} = K^2 \omega_r^2 Q_0^2$$

从4种补偿拓扑结构无线电能传输系统效率公式可以看出,系统传输效率与系统副边品

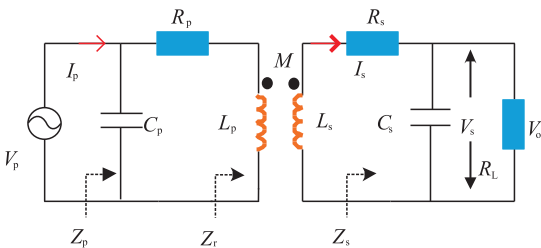


图5 PP型无线电能传输系统等效电路

Fig. 5 PP model equivalent circuit of wireless power transfer

质因数 Q_0 和系统耦合系数 K 有关.但系统传输效率公式较为复杂,需进行仿真进一步分析其变化趋势.

3 仿真结果与分析

为进一步分析耦合系数和品质因数变化时系统传输效率的变化趋势,在Matlab软件中搭建4种谐振补偿拓扑结构的仿真模型,仿真参数如表1所示,仿真结果如图6—7所示.

表1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

参数	取值
原、副边串联电容 C_p, C_s	0.25 μF
线圈寄生电阻 R_p, R_s	0.15 Ω
线圈自感值 L_p, L_s	124 μH
电能传输频率 f	28.6 kHz
输入电压 U_{in}	15 V
线圈互感 M	36 μH
线圈距离	5.5 cm

当系统副边品质因数 $Q_0 = 20$ 时,不同谐振拓扑耦合系数与效率关系曲线如图6所示.由图6可知,4种谐振补偿拓扑结构的最高效率点均出现在谐振点 $\omega_r = 1.00$ 附近.由图6a)和b)可知,对于副边串联补偿结构,耦合系数 K 越低,系统效率对谐振频率变化越敏感,即保证系统工作在高传输效率的频率范围越窄.当 $\omega_r < 1.00$ 时,系统效率随谐振频率的增大而升高,耦合系数较大时,系统在低频段效率随耦合系数的增大而升高;当 $\omega_r > 1.00$ 时,系统效率随谐振频率的增大而降低,耦合系数较小时,系统效率对谐振频率变化较敏感,即 K 值的微小增加会引起效率明显下降.

由图6c)和d)可知,对于副边并联补偿拓扑结构,当 $\omega_r < 1.00$ 时,系统效率随谐振频率的增大而升高,耦合系数较大时,系统效率对谐振频率的变化较敏感,即 K 值的微小增加会引起效率明显上升,且在其他条件相同的情况下,

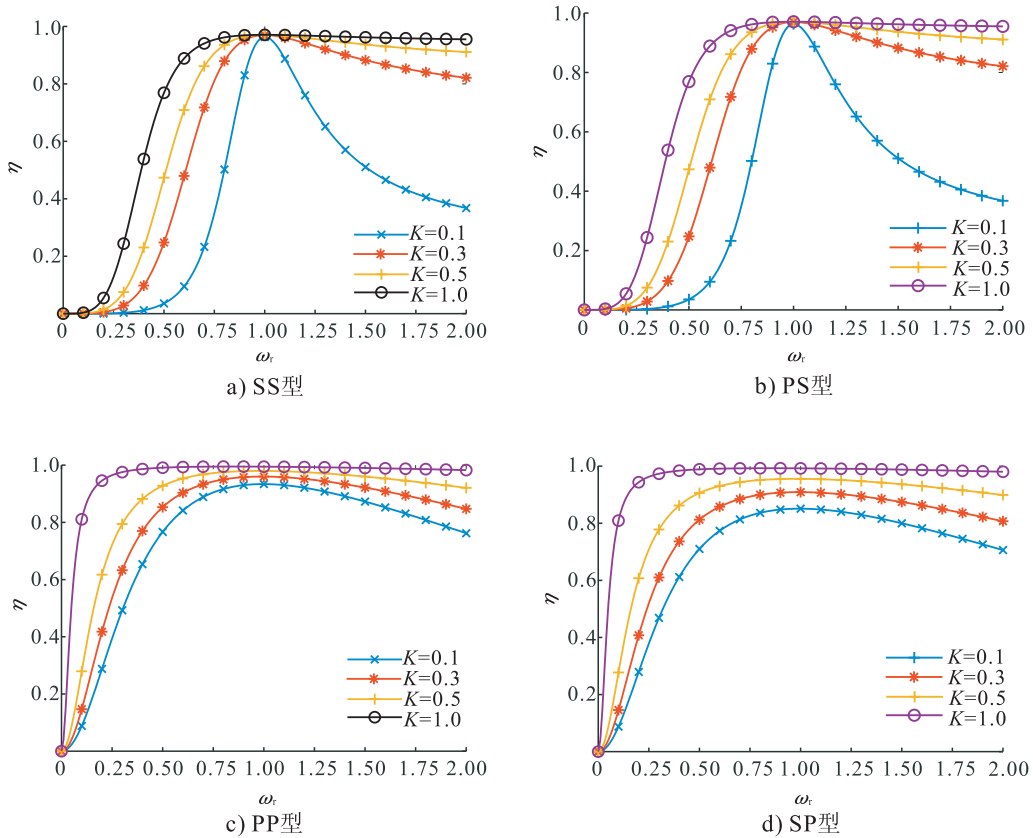


图6 不同谐振拓扑结构的耦合系数与效率关系曲线

Fig. 6 Relation curve of coupling coefficient and efficiency under different resonant topology structure

耦合系数越大,系统传输效率越高;当 $\omega_r > 1.00$ 时,系统效率随谐振频率的增大而降低,耦合系数较小时,系统效率对谐振频率变化较敏感.对比副边串联结构与副边并联结构的效率曲线可知,副边采用并联补偿拓扑结构时,系统工作在高传输效率的范围比串联补偿拓扑结构更宽.

图7给出了当耦合系数 $K = 0.3$ 时,不同谐振拓扑品质因数与效率关系曲线.由图7a)和b)可知,对于副边串联补偿拓扑结构,在 Q_0 值较低时,系统效率随谐振频率的增加而逐渐升高;在 Q_0 值较高时,系统效率最高值在 $\omega_r = 1.00$ 附近,若谐振频率继续升高,系统效率略微下降;当 $\omega_r > 2.00$ 时,系统效率受品质因数影响较小,若谐振频率继续升高,不同品质因数下系统效率会趋于一个相对稳定的值.

由图7c)和d)可知,对于副边并联补偿拓

扑结构,系统效率最高值在 $\omega_r = 1.00$ 附近,当 $\omega_r < 1.00$ 时,系统效率随谐振频率增大而升高,品质因数 Q_0 较大时,系统效率对谐振频率变化较敏感,即 Q_0 值的微小增加会引起系统效率明显上升,且在其他条件相同的情况下,品质因数 Q_0 越高,系统效率越高;当 $\omega_r > 1.00$,系统品质因数 $Q_0 = 50$ 时,谐振频率的变化对系统效率几乎没有影响,随着 Q_0 值的减小,系统效率随谐振频率增大而降低,且 Q_0 值越小,系统效率对谐振变化越敏感,在低品质因数下,系统工作在高传输效率的频率范围较窄.

4 实验验证

为进一步验证仿真结果的正确性,搭建实验平台进行系统电能传输实验以验证系统传输效率与副边不同结构的影响,实验中原边系统采用串联补偿拓扑结构,副边系统分别采用串

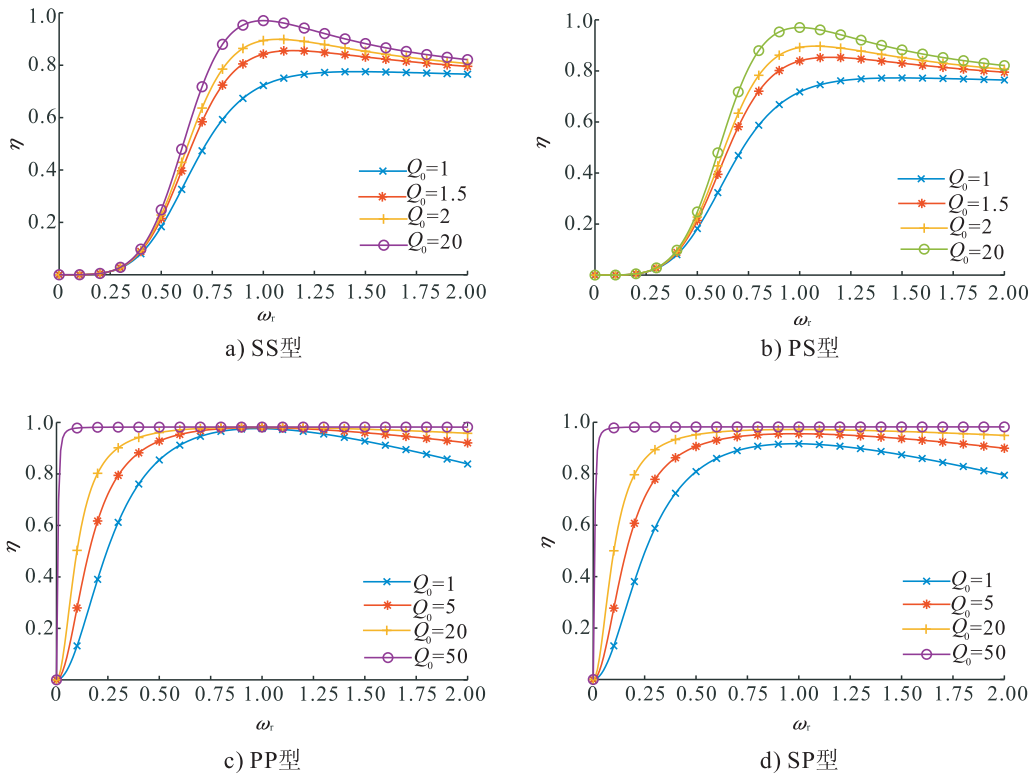


图7 不同谐振拓扑结构的品质因数与效率关系曲线

Fig.7 Relation curve of quality factor and efficiency under different resonant topology structure

联和并联补偿拓扑结构,直流电压源为 Myway APL-II,控制芯片选择为 TMS320F28335 DSP,功率开关管选择为 C2M0080120D,二极管选择为 C4D20120D,使用示波器 YOKOGAWA DLM4058 采集波形.实验平台参数与仿真参数一致.实验结果如图8—9所示.

根据系统参数设定,系统电能传输谐振频率为 28.6 kHz.由图8可知,系统副边为串联和并联补偿拓扑结构时,原、副边输出的电压和电流同相位,说明本文无线电能传输以磁场耦合谐振方式进行.由图9可知,系统副边采用串联和并联补偿拓扑结构时,系统效率的实验数据和仿真数据基本吻合,且副边为并联补偿拓扑结构时,系统的高传输效率范围更宽,该结果验证了仿真分析的正确性.

5 结语

本文针对无线电能传输系统,构建了4种

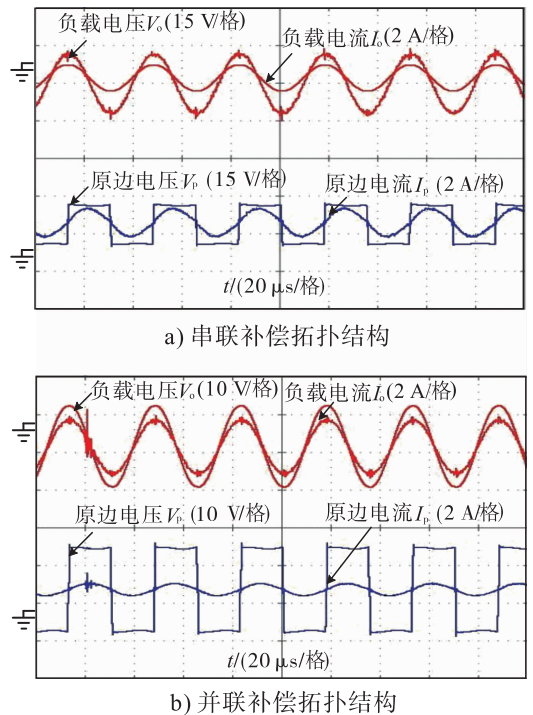
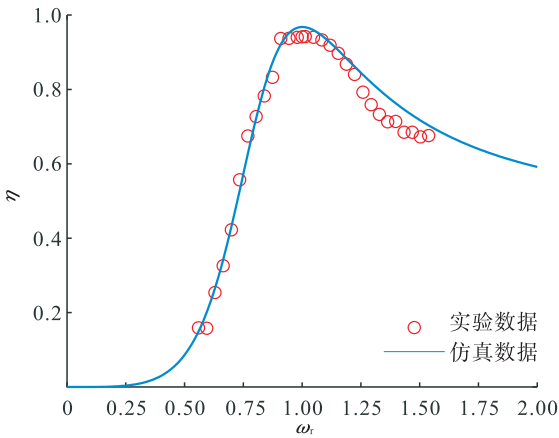
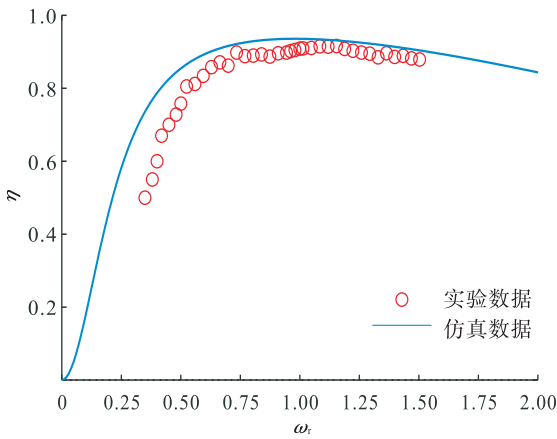


图8 副边为串联和并联补偿拓扑结构时的谐振波形
Fig.8 Resonant waveform when the secondary side is series and parallel compensation topology structure



a) 串联补偿拓扑结构



b) 并联补偿拓扑结构

图9 副边为串联和并联补偿拓扑结构时的效率特性曲线

Fig.9 The efficiency characteristic curve when the secondary side is a parallel and series compensation topology structure

谐振补偿拓扑结构等效电路模型,分析了磁场耦合谐振式无线电能传输系统的效率特性,研究了耦合系数和品质因数对系统效率的影响.仿真结果表明,副边谐振补偿拓扑结构对系统效率影响较大,系统效率对耦合系数和品质因数的变化较敏感,当副边为串联补偿拓扑结构时,系统工作在高传输效率的范围较窄;当副边为并联补偿拓扑结构时,相比于串联结构系统有更宽的高传输效率范围.实验结果验证了理论分析的正确性.在无线电能单向传输的基础上,下一步工作将重点研究分析无线电能双向

传输,并加入信息传输部分以扩大实际应用领域.

参考文献:

[1] 范兴明,莫小勇,张鑫.无线电能传输技术的研究现状与应用[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2584.

[2] 苏玉刚,吴学颖,赵鱼名,等.互补对称式LCC谐振网络的电场耦合式无线电能传输系统参数优化[J].电工技术学报,2019,34(14):2874.

[3] 杨庆新,章鹏程,祝丽花,等.无线电能传输技术的关键基础与技术瓶颈问题[J].电工技术学报,2015,30(5):1.

[4] 黄学良,王维,谭林林.磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J].电力系统自动化,2017,41(2):2.

[5] GONG C, LIU D, MIAO Z, et al. A magnetic-balanced inductive link for the simultaneous up-link data and power telemetry [J]. Sensors, 2017,17(8):1768.

[6] JI L, WANG L, LIAO C, et al. Simultaneous wireless power and bidirectional information transmission with a single-coil, dual-resonant structure [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2019,66(5):4013.

[7] PENG K, TANG X, MAI S, et al. A simultaneous power and downlink data transfer system with pulse phase modulation[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs,2019,66(5):808.

[8] 张望,伍小杰,夏晨阳,等.补偿参数对串串补偿型无线电能传输系统特性的影响分析[J].电力系统自动化,2019,43(7):166.

[9] 刘方,陈凯楠,蒋焯,等.双向无线电能传输系统效率优化控制策略研究[J].电工技术学报,2019,34(5):891.

[10] YI X, CHEN X, ZHOU L, et al. A microwave

- power transmission experiment based on the near-field focused transmitter [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(6): 1105.
- [11] ABRAMOV E, PERETZ M M. Multi-loop control for power transfer regulation in capacitive wireless systems by means of variable matching networks[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2095.
- [12] 苏玉刚,侯信宇,戴欣. 磁耦合 WPT 系统异物检测技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13 [2021-02-05]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200807>.
- [13] ABRAMOV E, ZELTSER I, PERETZ M M. A network-based approach for modeling resonant capacitive wireless power transfer systems[J]. CPSS Trans Power Electronics and Applications, 2019, 4(1): 19.
- [14] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83.
- [15] NAM Y H, LEE J H. Efficient near-field beamforming using two-layer planar loop array for magnetic resonance wireless power transfer[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(8): 818.
- [16] SUN H, LIN H, ZHU F, et al. Magnetic resonant beamforming for secured wireless power transfer [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(8): 1173.
- [17] 麦瑞坤,刘野然,陈阳. 基于最优等效负载控制的感应电能传输系统效率优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6468.
- [18] KHAN N, MATSUMOTO H, TRESKASES O. Wireless electric vehicle charger with electromagnetic coil-based position correction using impedance and resonant frequency detection [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2020, 35(8): 7873.
- [19] 唐治德,杨帆,徐阳阳,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统功效同步研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 161.
- [20] ZHONG W X, HUI S Y R. Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015(7): 4025.
- [21] 薛明,杨庆新,章鹏程,等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J/OL]. 电工技术学报: 1-22 [2021-02-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200059>.
- [22] 李中启,黄守道,袁小芳. 线圈非同轴时磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 151.
- [23] 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.
- [24] 刘闯,郭赢,葛树坤,等. 基于双 LCL 谐振补偿的电动汽车无线充电系统特性分析与实验验证[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 127.
- [25] 夏晨阳,陈国平,任思源,等. 采用新型负载恒流供电复合谐振网络的无线电能传输系统[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 46.
- [26] 刘闯,郭赢,葛树坤,等. 基于双 LCL 谐振补偿的电动汽车无线充电系统特性分析与实验验证[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 127.