

基于双激励双拾取的无线电能传输系统

贾晋^{1,2*}, 赖志达², 戴欣³

(1. 重庆理工大学车辆工程学院 重庆 巴南区 400054; 2. 中国汽车工程研究院股份有限公司 重庆 北部新区 401147;
3. 重庆大学自动化学院 重庆 沙坪坝区 400030)

【摘要】传统的无线电能传输系统(WPT)多由单个激励线圈与单个拾取线圈组成,由于系统的耦合机构多为松散的耦合形式,且受到功率器件容量的限制,因此难以获得较大的传输功率。为了提高WPT系统的传输功率,该文构建了双激励双拾取线圈的无线电能传输系统,在原WPT系统的基础上,增加了一组激励线圈和一组拾取线圈,利用耦合理论和电路原理的相关知识对该系统进行分析。通过Matlab仿真及实验验证了该方案的可靠性和有效性,并在负载为5 Ω时,双激励双拾取线圈的WPT系统相比较于WPT系统,其功率提升了3.1倍,效率提高了9%。

关键词 双激励双拾取线圈; 效率; 大功率; 输出控制无线电能传输

中图分类号 TM15

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.04.011

WPT Systems Based on Double Primary Coils and Double Pick-Up Coils

JIA Jin^{1,2*}, LAI Zhi-da², and DAI Xin³

(1. Vehicle Engineering Institute, Chongqing University of Technology Banan Chongqing 400054;
2. China Automotive Engineering Research Institute Beibuxinqu Chongqing 401147;
3. School of Automation, Chongqing University Shapingba Chongqing 400030)

Abstract The traditional wireless power transfer (WPT) system usually comprises single primary coil and single pick-up coil, which is difficult to obtain larger transmission power due to its loosely-coupled structure and capacity limitation of the power device. In order to improve the transmission power of WPT system, this paper builds a WPT system with double primary coils and double pick-up coils. Based on the original WPT system (single primary coil and single pick-up coil), a pair of primary coil and pick-up coil are added, the system is analyzed by using the knowledge of coupling theory and circuit principle, and then the reliability and validity of the proposed strategy are validated through the Matlab simulations and experiments. Finally, the conclusion is drawn that when the load is 5 Ω, the transmission power of the WPT system with double primary and double pickup coil increases by 3.1 times and the efficiency increases by 9%, compared with the WPT system with single primary coil and single pick-up coil.

Key words double primary coils and double pick-up coils; efficiency; power; wireless power transfer (WPT)

随着社会的发展和科技的进步,无线电能传输技术越来越受到人们的关注,并且逐渐被广泛地应用于诸多领域^[1-4]。WPT技术是一项基于电磁感应原理的新型电能传输技术,它利用初级线圈中的交变电流在空间中产生交变磁场,次级线圈捕获空间中的交变磁场并产生交变电压,从而实现电能的非接触式传输^[5-8]。WPT技术作为一种新型的供电模式,可以满足某些特殊环境(潮湿、高温)的需求,避免因导线磨损导致的漏电、开路等安全隐患和传统接

触式电能传输的一些问题(如接触火花),具有适应环境能力强、安全环保等诸多优势^[9-11]。

目前,WPT技术已经逐步从小功率的日常家用设备扩展到中大功率的电动汽车^[12]、轨道机车^[13],当WPT系统为大功率用电设备提供电能时,要求实现电能的大功率传输^[14]。理论上,可以通过提高初、次级线圈间的耦合系数以及提高系统的频率来达到提高WPT系统的传输功率的目的。然而,在实际应用中,初级线圈与次级线圈之间的耦合系数较小,

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61203230); 重庆市基础研究与前沿探索项目(csct2018jcyjAX0621)

作者简介: 贾晋(1985-),男,高级工程师,主要从事汽车电磁兼容性能开发工程技术等方面的研究。E-mail: 282239102@qq.com

如果要提高初、次级线圈的自感, 会增加线圈匝数, 增大其串联的等效电阻, 从而使系统损耗增大, 提高输出功率的同时也会带来电压电流应力的急剧增加, 受到电路中功率器件容量的限制, 难以较大幅度的提高^[15]输出功率, 因此亟需对无线电能传输系统多对多的传输拓扑进行研究。

文献[16]提出了一种双初级线圈并绕的无线电能传输模式, 该方法不仅能使各逆变器工作在谐振状态, 而且还可以有效分配两逆变器的输出功率, 达到合理分配输出容量的目的, 但该方式并不能有效提高系统的传输功率。文献[17]构建了一种基于双拾取线圈的无线电能传输系统, 该系统能显著提高重载时WPT系统的输出功率和工作效率, 但是该方式只是相较于不考虑副边之间互感时, 如果考虑副边之间互感, 并不能真正达到提高输出功率和工作效率的目的。文献[18]分析了多个WPT系统共同运行时的情况, 线圈间的互感会影响系统的输出功率和工作效率。

本文在以上研究的基础上构建了一种双激励双拾取线圈的无线电能传输系统, 并详细分析了其结构与工作原理。考虑双激励双拾取线圈之间的交叉耦合, 通过选取合适的补偿电容, 使系统工作在谐振状态, 保证其最大功率传输。

1 双激励双拾取线圈的WPT系统的结构设计和理论分析

1.1 双激励双拾取线圈的WPT系统

双激励双拾取线圈的WPT系统结构示意图如图1所示, 图中 C_{p1} 与 C_{p2} 为原边的补偿电容, C_{s1} 与 C_{s2} 为副边的补偿电容; L_{p1} 与 L_{p2} 为原边自感, L_{s1} 与 L_{s2}

为副边自感; R_{p1} 与 R_{p2} 为原边电感的内阻, R_{s1} 与 R_{s2} 为副边电感的内阻; U_{p1} 与 U_{p2} 为原边谐振网络的电压, I_{p1} 与 I_{p2} 为原边谐振电流, U_{s1} 与 U_{s2} 为副边谐振网络的电压, I_{s1} 与 I_{s2} 为副边谐振电流; R_{11} 与 R_{12} 为接入负载, 其电压为 U_{R1} 与 U_{R2} ; M_{11} 为两原边电感之间的互感, M_{22} 为两副边电感之间的互感, M_{p1} 为原边1与副边1之间的互感, M_{p2} 为原边2与副边2之间的互感, M_1 为原边1与副边2之间的互感, M_2 为原边2与副边1之间的互感。

串联谐振补偿电路中整流桥前的交流电阻与整流桥后的直流电阻间的等效关系为:

$$R_1 = \frac{8}{\pi^2} R_{11} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{8}{\pi^2} R_{12} \quad (2)$$

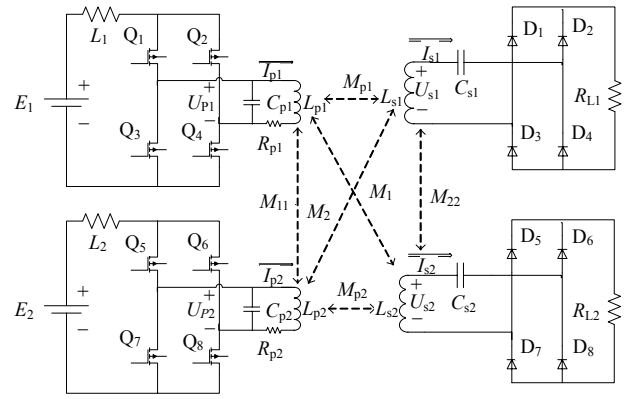


图1 基于双激励双拾取线圈的WPT系统结构图

1.2 系统分析

根据互感耦合原理和KVL定律, 电压电流关系的相量矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{p1} \\ \dot{U}_{p2} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_{p1} + R_{p1} & j\omega M_{11} & j\omega M_{p1} & j\omega M_1 \\ j\omega M_{11} & j\omega L_{p2} + R_{p2} & j\omega M_2 & j\omega M_{p2} \\ j\omega M_{p1} & j\omega M_2 & R_{s1} + j\omega L_{s1} + \frac{1}{j\omega C_{s1}} + R_1 & -j\omega M_{22} \\ j\omega M_1 & j\omega M_{p2} & -j\omega M_{22} & R_{s2} + j\omega L_{s2} + \frac{1}{j\omega C_{s2}} + R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p1} \\ \dot{I}_{p2} \\ \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于双激励双拾取线圈, 有下列假设:

- 1) $L_{p1} = L_{p2} = L_p$; 2) $L_{s1} = L_{s2} = L_s$; 3) $M_{p1} = M_{p2} = M_p$; 4) $M_1 = M_2 = M$; 5) $U_{p1} = U_{p2} = U_p$;
- 6) $U_{s1} = U_{s2} = U_s$; 7) $I_{p1} = I_{p2} = I_p$; 8) $I_{s1} = I_{s2} = I_s$; 9) $R_1 = R_2 = R$; 10) 不计初级线圈及拾取线圈的内阻, 即 $R_{p1} = R_{p2} = R_{s1} = R_{s2} = 0$ 。

根据假设, 化简式(3)得:

$$\begin{cases} \dot{U}_p = j\omega(L_p + M_{11})\dot{I}_p + j\omega(M_p + M)\dot{I}_s \\ \mathbf{0} = j\omega(M_p + M)\dot{I}_p + j\omega\left(L_s - M_{22} - \frac{1}{\omega^2 C_s}\right)\dot{I}_s + \dot{I}_s R \end{cases} \quad (4)$$

令副边的谐振补偿电容补偿自感及副边之间的互感, 即:

$$L_s - M_{22} - \frac{1}{\omega^2 C_s} = 0 \quad (5)$$

计算得其副边谐振补偿电容为:

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 (L_s - M_{22})} \quad (6)$$

将式(5)代入式(4)中, 则式(4)可化简为:

$$\begin{cases} \dot{U}_p = j\omega(L_p + M_{11})\dot{I}_p + j\omega(M_p + M)\dot{I}_s \\ \mathbf{0} = j\omega(M_p + M)\dot{I}_p + \dot{I}_s R \end{cases} \quad (7)$$

解该向量矩阵可得到电流为:

$$\begin{cases} I_{p1} = I_{p2} = I_p = \frac{U_p}{\frac{\omega^2 (M_p + M)^2}{R} + j\omega(L_p + M_{11})} \\ I_s = -\frac{j\omega(M_p + M)}{R} I_p \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8), 可以推导出原边谐振回路电感支路的阻抗为:

$$Z_{rs} = Z_{rs1} = Z_{rs2} = \frac{\omega^2 (M_p + M)^2}{R} + j\omega(L_p + M_{11}) \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 双激励双拾取线圈的WPT系统原边谐振回路的电感支路的等效阻抗是一个纯电阻和一个感性阻抗的和, 且该感性阻抗的值是 $j\omega(L_p + M_{11})$, 由原边电感线圈本身和它与另一原边线圈之间的互感值决定。根据谐振匹配公式:

$$\omega^2 L_p C_p = 1 \quad (10)$$

及前文可知此时由于交叉互感存在的原因, 此时 $L'_R = L_p M_{11}$ 。此时原边线圈并联谐振网络的阻抗为:

$$Z_p = Z_{p1} = Z_{p2} = \left(\frac{\omega^2 (M_p + M)^2}{R} + j\omega(L_p + M_{11}) \right) // \frac{1}{j\omega C_p} \quad (11)$$

为了使系统能够获得最大的传输功率, 可以通过原边补偿电容 C_p 使系统工作在谐振状态, 使式(11)虚部等于零, 因此计算可得 C_p 为:

$$C_p = \frac{L_p + M_{11}}{\left(\frac{\omega^2 (M_p + M)^2}{R} \right)^2 + \omega^2 (L_p + M_{11})^2} \quad (12)$$

此时系统每个副边的输出的最大功率容量为:

$$P_{\max} = P_{1\max} = P_{2\max} = I_s^2 R = \frac{\omega^2 (M_p + M)^2}{R} I_p^2 \quad (13)$$

双激励双拾取线圈的WPT系统原边谐振网络的损耗 P_1 是两组原边谐振网络损耗的叠加, 而两组原边谐振电流值相等, 因此有:

$$P_1 = 2I_p^2 R_p \quad (14)$$

副边谐振网络的损耗 P_2 则主要是两组副边电感内阻的损耗, 有:

$$P_2 = 2I_s^2 R_s = 2 \left(\frac{\omega(M_p + M)I_p}{R_s + R} \right)^2 R_s \quad (15)$$

设 P_0 为负载输出功率, 当考虑副边电感内阻时, 其值为:

$$P_0 = 2I_s^2 R = 2 \left(\frac{\omega(M_p + M)I_p}{R_s + R} \right)^2 R \quad (16)$$

η 为系统的总体效率。根据WPT系统的传输功率和效率特性, 效率表达式为输出功率与系统总输出功率之比, 即:

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + (P_1 + P_2)} \quad (17)$$

将式(12)~(14)代入式(15)中, 可得:

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + (P_1 + P_2)} = \frac{\omega^2 (M_p + M)^2 R}{\omega^2 (M_p + M)^2 (R + R_s) + R_p (R + R_s)^2} \quad (18)$$

WPT系统负载等效电阻一般远大于副边电感的等效内阻, 即 $R \gg R_s$, 则式(18)可化简为:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{RR_p}{\omega^2 (M_p + M)^2}} \quad (19)$$

表1 WPT系统与双激励双拾取线圈的WPT系统关键参数对比

参数	WPT系统	双激励双拾取线圈的WPT系统
原边谐振电流 I_p	$\frac{U_p}{\sqrt{\left(\frac{\omega M}{R}\right)^2 + (\omega L_p)^2}}$	$\frac{U_p}{\sqrt{\left(\frac{\omega^2 (M_p + M)^2}{R}\right)^2 + (\omega(L_p + M_{11}))^2}}$
副边感应电流 I_s	$\frac{\omega M I'_p}{R}$	$\frac{\omega(M_p + M)I_p}{R}$
输出功率 P	$\frac{(\omega M I'_p)^2}{R}$	$\frac{(\omega(M_p + M)I_p)^2}{R}$
系统效率 η	$\frac{1}{1 + \frac{RR_p}{\omega^2 M^2}}$	$\frac{1}{1 + \frac{RR_p}{\omega^2 (M_p + M)^2}}$

从式(18)可以看出, 与WPT系统一样, 双激励双拾取线圈的WPT系统的效率值是由系统副边与两个原边的互感耦合值 M_p 和 M 、原边线圈的内阻 R_p 、系统原边工作频率 ω 和输出负载 R 共同影响的, 与原边两输入线圈之间的互感值 M_{11} 无关。

表1是对WPT系统和双激励双拾取线圈的WPT系统的关键参数的对比。通过对比可以发现, 相较于WPT系统, 双激励双拾取线圈的WPT系统的功率提高显著, 其效率值也有了一定的提高。

2 仿真分析及实验验证

2.1 仿真分析

WPT系统和双激励双拾取线圈的WPT系统分别采用表2和表3所示的系统参数进行Matlab仿真。

表2 WPT系统的Matlab参数设置

参数	取值	参数	取值
$L_p/\mu\text{H}$	116	$L_s/\mu\text{H}$	210
R_p/Ω	0.13	R_s/Ω	0.2
R_{dc}/Ω	0.15	L_{dc}/mH	1
E/V	30	$M/\mu\text{H}$	17

表3 双激励双拾取线圈的WPT系统的Matlab参数设置

参数	取值	参数	取值
$L_p/\mu\text{H}$	116	$L_s/\mu\text{H}$	210
R_p/Ω	0.13	R_s/Ω	0.2
R_{dc}/Ω	0.15	L_{dc}/mH	1
$M_{11}/\mu\text{H}$	3	$M/\mu\text{H}$	17
E/V	30	$M_{22}/\mu\text{H}$	3
$M_p/\mu\text{H}$	17		

由Matlab仿真, 分别得出其输出功率关于负载和频率变化的仿真示意图以及其效率关于负载和频率变化的仿真示意图, 如图2~图5所示。

由图2可以看出, 当系统频率为30 kHz, 负载电阻由0 Ω 变化到20 Ω 时, 两个系统的功率关于负载都是先增大后减小, 当负载电阻小于1.5 Ω 时, WPT系统的功率略大, 但是随着负载的继续增大, WPT系统的输出功率迅速衰减, 而双激励双拾取线圈的WPT系统的输出功率衰减较慢, 且每个副边的输出功率为WPT系统的3~4倍。可以看出, 双激励双拾取线圈的WPT系统在负载较大的情况下, 其功率提升更加明显。由图3可以看出, 当负载电阻为10 Ω 时, 系统频率由20 kHz变化到40 kHz时, WPT系统的输出功率维持在2.4 W, 双激励双拾取线圈的WPT系统每个副边的输出功率由8.9 W下降到8.2 W, 双激励双拾取线圈的WPT系统每个副边的输出功率是WPT系统的3~4倍。综合图2及图3可以看出, 两者对于频率变化不敏感, 相较于WPT系统, 双激励双拾取线圈的WPT系统的输出功率在较大负载时提升明显。

由图4可以看出, 当系统频率为30 kHz, 负载电阻由5 Ω 变化到20 Ω 时, WPT系统的效率由95%降低到83%, 双激励双拾取线圈的WPT系统的效率由99%降低到95%, 双激励双拾取线圈的WPT系统的效率始终大于WPT系统, 且衰减速度较慢。由图5可以看出, 当负载电阻为10 Ω 时, 系统频率由20 kHz

变化到40 kHz时, WPT系统的效率由81.5%提高到94.5%, 双激励双拾取线圈的WPT系统的效率由94.5%提高到98.5%, 且双激励双拾取线圈的WPT系统的效率始终大于WPT系统, 综合图4及图5可以看出, 不管负载与频率如何变化, 双激励双拾取线圈的WPT系统对于效率都有明显的提升作用。

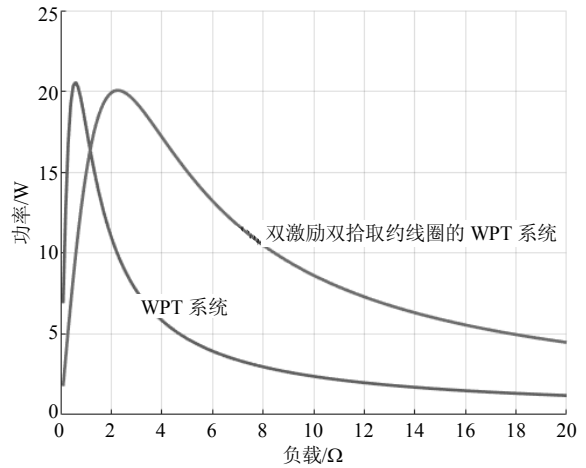


图2 两系统输出功率随负载变化的关系

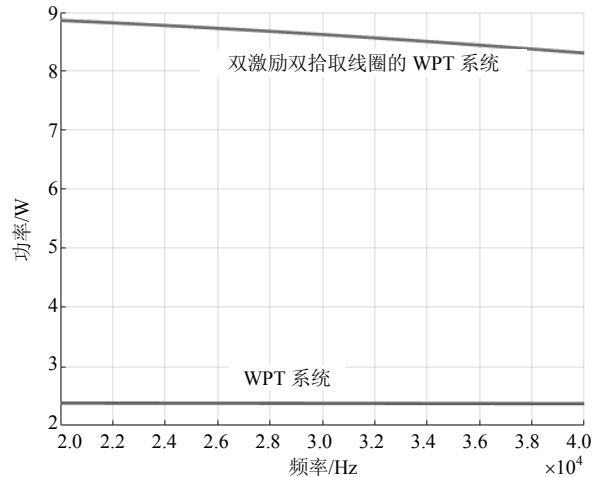


图3 两系统输出功率随频率变化的关系

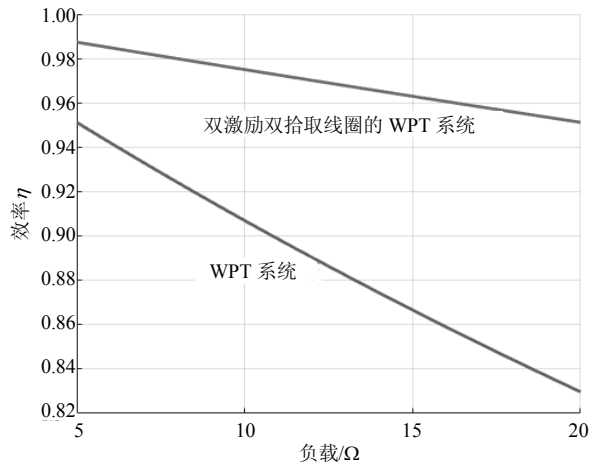


图4 两系统效率随负载变化的关系

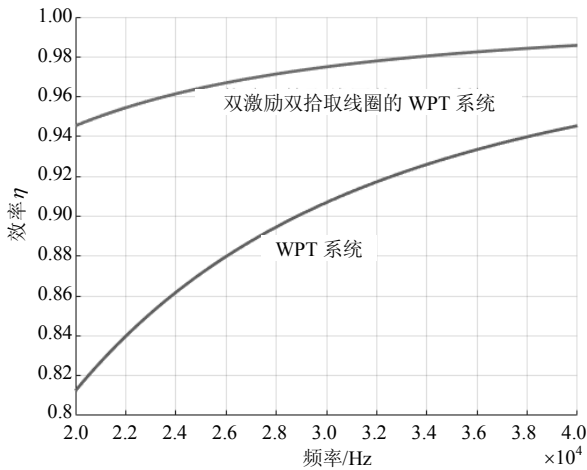
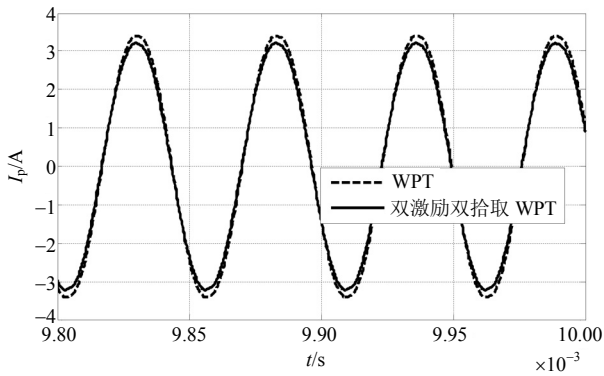
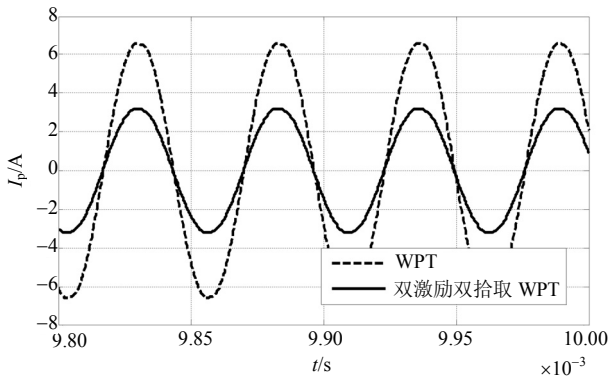


图5 两系统效率随频率变化的关系



a. 两系统同输入电压谐振电流关系



b. 两系统同功率输出谐振电流关系

图6 两系统电流应力比较关系

图6a为两系统在相同输入电压30 V及同负载同频率20 kHz情况下的原边谐振电流波形,由前文可知此时输出功率可提升3倍多,同时双激励双拾取WPT系统可以保证原边谐振电流的应力下降了10%左右。这是因为对于该系统,其副边对原边的反射阻抗几乎为传统WPT系统反射阻抗的两倍。图6b为相同输出功率情况下的原边线圈谐振电流的波形,可以看出双激励双拾取WPT系统的电流应力几乎下降了50%,针对大功率的充电系统,双激励双拾取WPT系统提供一种多级线圈综合利用的方法减少线

圈的电流应力以及开关管上的应力,相比利用矩阵变换器减少应力的方法减少了开关管和成本。

图7为双激励双拾取系统在互感变化下的效率分析,其中 k_1 、 k_2 分别为系统主要的感应参数 M_{p1} 、 M_{p2} 的耦合系数(耦合系数 $k = M / \sqrt{L_p L_s}$)。由图可知,对于双激励双拾取WPT系统,在充电过程中相较于传统WPT系统有更好的抗偏移性以保持较高的传输效率。

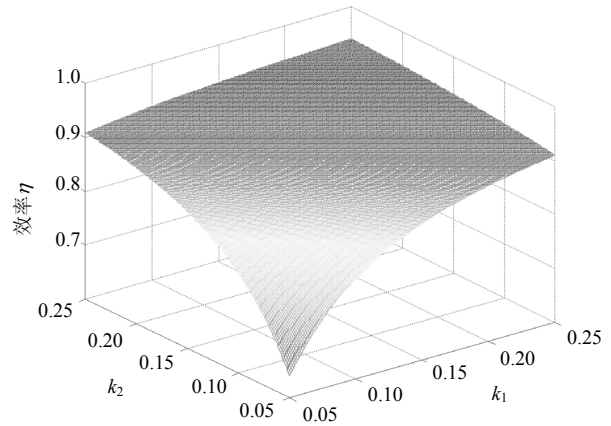


图7 双激励双拾取系统在互感变化下的效率分析

2.2 实验分析

根据图1所示原理搭建图8所示的实验模型,原边线圈和副边线圈如图9所示,采用表4和表5作为WPT系统和双激励双拾取线圈的WPT系统的实验参数,其中频率为20 kHz,输入电压为30 V。经过实验,最终得到如图10~图13所示的波形图。

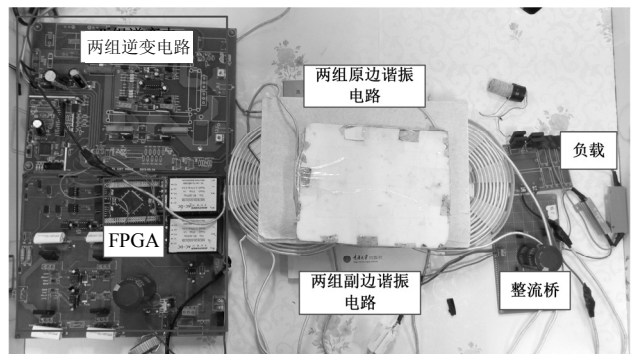


图8 实验装置图

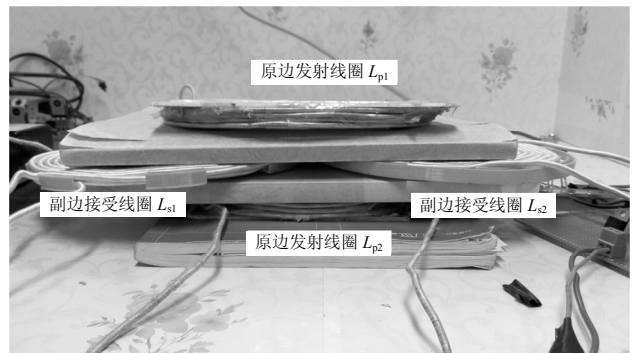


图9 原边线圈和副边线圈

表4 WPT系统的参数设置

参数	取值	参数	取值
$L_p/\mu\text{H}$	116	$L_s/\mu\text{H}$	210
R_p/Ω	0.13	R_s/Ω	0.2
$C_p/\mu\text{F}$	0.54	$C_s/\mu\text{F}$	0.3
R_{dc}/Ω	0.15	L_{dc}/mH	1
E/V	30	R_l/Ω	5
$M/\mu\text{H}$	17		

表5 双激励双拾取线圈的WPT系统参数设置

参数	取值	参数	取值
$L_p/\mu\text{H}$	116	$L_s/\mu\text{H}$	210
R_p/Ω	0.13	R_s/Ω	0.2
$C_p/\mu\text{F}$	0.52	$C_s/\mu\text{F}$	0.3
R_{dc}/Ω	0.15	L_{dc}/mH	1
$M_{11}/\mu\text{H}$	3	$M/\mu\text{H}$	17
E/V	30	R_l/Ω	5
$M_p/\mu\text{H}$	17	$M_{22}/\mu\text{H}$	3

谐振电流为2.18 A, 副边整流后的电流均为1.65 A, 系统的输入电压为30 V, 输入电流为965 mA, 则系统每个副边的输出功率为13.61 W, 系统的效率为94%, 综合以上分析可以看出, 相较于WPT系统, 双激励双拾取线圈的WPT系统的功率提升了3.1倍, 效率提高了9%。

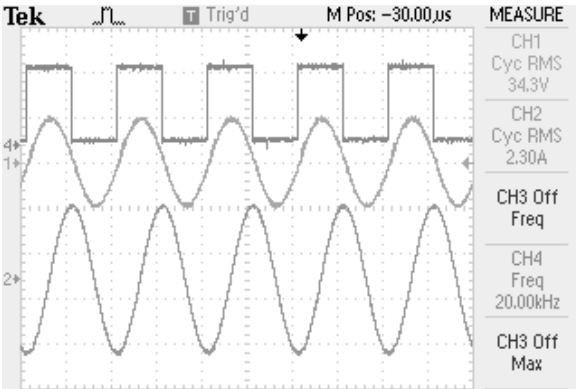


图10 WPT系统原边谐振网络电压和电流

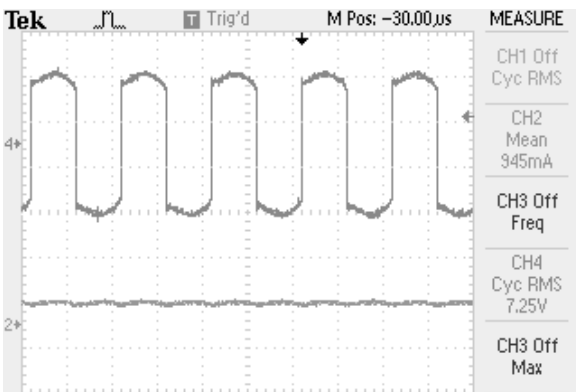


图11 WPT系统副边拾取电压和电流

由图10及图11可看出, WPT系统原边谐振电压的有效值为34.3 V, 谐振电流的有效值为2.3 A, 副边整流后的电流为945 mA, 系统的输入电压为30 V, 输入电流为175 mA, 则系统的输出功率为4.47 W, 效率为85%。由图12及图13可以看出, 双激励双拾取线圈的WPT系统两个原边的谐振电压为31.1 V,

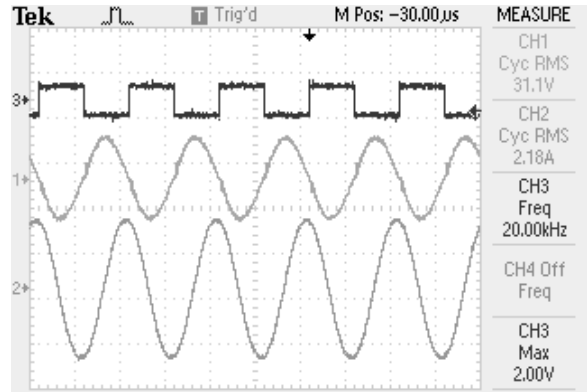


图12 双激励双拾取线圈的WPT系统原边谐振网络

电压和电流



图13 双激励双拾取线圈的WPT系统副边拾取电压和电流

3 结束语

本文构建了一种双激励双拾取线圈的WPT系统模型, 并对其进行了理论分析、Matlab仿真分析及实验验证。首先利用电磁感应理论和电路原理的相关知识建立了基于双激励双拾取线圈的WPT系统模型, 并利用原边及副边补偿电容使系统工作在完全谐振状态, 从而保证系统能以最大功率传输, 同时得到了系统的功率模型和效率模型, 然后通过公式推导、仿真分析以及实验验证对两种系统进行比较, 最后得出结论, 在负载为5 Ω时, 双激励双拾取线圈的WPT系统相比较于WPT系统, 其功率提升了3.1倍, 效率提高了9%。

参考文献

[1] 孙跃, 王智慧, 戴欣, 等. 非接触电能传输系统的频率稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 56-59.

- SUN Yue, WANG Zhi-hui, DAI Xin. et al. Study of frequency stability of contactless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 56-59.
- [2] 苏玉刚, 王智慧, 孙跃, 等. 非接触供电移相控制系统建模研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 92-97.
SU Yu-gang, WANG Zhi-hui, SUN Yue, et al. Modeling of contactless power transfer systems with a phase-shifted control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 92-97.
- [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.
FU Wen-zhen, ZHANG Bo, QIU Dong-yuan, et al. Maximum efficiency analysis and design of self-resonance coupling coils for wireless power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 21-26.
- [4] WANG C S, COVIC G A, STIELAU O H. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 148-157.
- [5] 蔡华, 史黎明, 李耀华. 感应耦合电能传输系统输出功率调节方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 215-220.
CAI Hua, SHI Li-ming, LI Ya-hua. Output power adjustment in inductively coupled power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 215-220.
- [6] 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.
ZHAO Zheng-ming, ZHANG Yi-ming, CHEN Kai-nan. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 1-13.
- [7] 周豪, 姚钢, 赵子玉, 等. 一种双初级线圈并绕的感应电能传输系统及其功率分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 9-16.
ZHOU Hao, YAO Gang, ZHAO Zi-yu, et al. LCL resonant inductively coupled power transfer systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33): 9-16.
- [8] 孙跃, 赵志斌, 王智慧, 等. 用于感应电能传输系统的新型软开关电路[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 128-134.
SUN Yue, ZHAO Zhi-bin, WANG Zhi-hui, et al. A new circuit of soft-switching inductive power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 128-134.
- [9] 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): 1-8.
YANG Qing-xin, ZHANG Peng-cheng, ZHU Li-hua, et al. Key fundamental problems and technical bottlenecks of the wireless power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 1-8.
- [10] 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.
HUANG Xue-liang, TAN Lin-lin, CHEN Zhong, et al. Review and research progress on wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 1-11.
- [11] 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): 2584-2600.
FAN Xing-ming, MO Xiao-yong, ZHANG Xin. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [12] CHOI S Y, GU B W, JEONG S Y, et al. Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 18-36.
- [13] KIM J H, LEE B S, LEE J H, et al. Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6242-6250.
- [14] COVIC G A, BOYS J T. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1): 28-41.
- [15] BOYS J T, COVIC G A, GREEN A W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems[J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2000, 147(1): 37-43.
- [16] 麦瑞坤, 马林森, 何正友. 一种双初级线圈并绕的感应电能传输系统及其功率分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4454-4460.
MAI Rui-kun, MA Lin-sen, He Zheng-you. Dual parallel wound primary coils based IPT systems and its power allocation technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4454-4460.
- [17] 麦瑞坤, 马林森. 基于双拾取线圈的感应电能传输系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5192-5199.
MAI Rui-kun, MA Lin-sen. Research on inductive power transfer systems with dual pick-up coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5192-5199.
- [18] 景无为, 黄学良, 陈琛, 等. 多组无线电能传输系统间效率影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 457-462.
JING Wu-wei, HUANG Xue-liang, CHEN Chen, et al. Study on impacts among wireless power transmission multi-system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 457-462.

编辑 漆蓉