

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

夏晨阳^{1,2}, 陈国平^{1,2}, 任思源^{1,2}, 雷 轲¹, 张 杨¹, 孙彦景^{1,2}

(1. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室(中国矿业大学), 江苏省徐州市 221008;

2. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏省徐州市 221008)

摘要: 针对传统 LC 谐振拓扑无线电能传输(WPT)系统在负载动态变化时,无法实现负载恒流供电及系统工作频率失谐问题,提出一种新型一次侧 LCL、二次侧 LCC 复合谐振网络无线电能传输系统。首先,在基波条件下,依据漏感模型建立了磁路机构等效电路,得到了谐振频率和输出电流表达式;然后,通过系统参数优化设计,进一步推导出了复合谐振网络中实现负载恒流供电以及系统谐振工作频率稳定的条件。仿真结果表明,基于参数优化设计的新型复合谐振网络无线电能传输系统,能够实现负载无线恒流供电,并且系统工作频率稳定。实验结果验证了理论分析和仿真分析的正确性和有效性。

关键词: 无线电能传输;复合谐振网络;漏感模型;恒流源;频率稳定

0 引言

随着科技水平的不断进步,电气设备供电的智能化、自动化已成为一种新兴技术需求。无线电能传输(WPT)技术因代替了传统电缆线手动插拔有线供电方式,可实现电能的无线传输而受到广泛关注。由于其采用原、副边分离的磁路机构,通过高频磁场的耦合传输电能,因而具有使用安全、方便、无机械磨损、环境适应能力强等优点,被美国评选为 21 世纪最具有应用前景的科学技术之一^[1-3]。

由于 WPT 系统磁路机构气隙的存在,使得该系统磁路机构具有漏感大、励磁电感小、耦合系数低等问题,为实现大气隙磁路条件下的高密度和高效能量传输,需要采用谐振网络以补偿漏感和励磁电感以降低系统的伏安容量,并实现系统高品质能量传输。在 WPT 系统中,由电感 L 与电容 C 构成的简单串联谐振或并联谐振是产生正弦波能量的基本拓扑结构。LC 串联谐振能够有效地阻隔发射线圈中的直流分量,降低开关管的电压应力,但直流滤波电容会承受较大的脉动电流;相比之下,并联谐振时滤波电容的电流脉动较小,但是并联谐振又不能阻隔直流^[4];同时,当系统的负载动态变化时,传统 LC

谐振拓扑 WPT 系统无法同时实现负载恒定电流供电及系统工作频率稳定等问题,对于发光二极管(LED)灯及电池恒流充电等需要负载恒流供电的应用场合,具有较大的局限性。

为克服传统 LC 谐振网络的上述缺点,实现 WPT 系统负载恒流供电,并保证系统谐振工作频率的恒定性,国内外对此的研究主要集中在针对不同的控制目标分别引入闭环负反馈控制。如为了保证系统输出给负载的电流恒定,文献[5]提出在整流环节后串接 DC-DC 变换器,实现对输出电流的恒定控制。为了保证系统原边谐振电流恒定,文献[6]提出能量注入的控制方法,通过控制注入谐振网络能量的多少来控制原边谐振电流的幅值大小;文献[7]通过在逆变器的输入端串入 DC-DC 环节,调节逆变器母线电压,改变原边谐振电流;文献[8]提出采用移相控制策略,通过检测实际谐振电流有效值与参考电流有效值之间的偏差,调节开关管脉冲移相角来控制原边谐振电流。为了保证系统始终工作于完全谐振状态,文献[9]提出基于开关电容的谐振参数在线调整方法,通过控制电容的导通时间,以实现系统谐振工作频率恒定;与此类似,文献[10]提出了基于相控电感的谐振参数在线调整策略,通过实时调整相控电感的导通角,改变并联在谐振网络上的等效电感值,从而维持系统谐振工作频率的恒定。

综上所述,闭环控制可以很好地实现上述各控制目标,且控制精度较高。但是,若为了同时实现上述目标,引入多个闭环负反馈控制,则会导致系统过

收稿日期:2016-04-06;修回日期:2016-06-21。

上网日期:2016-09-21。

国家自然科学基金资助项目(51307173);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130188);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(SJLX15_0695)。

于复杂,设计难度大且稳定性低。文献[11]提出了一系列高阶补偿拓扑,并给出了系统的设计流程,通过简单的参数设计就可以实现系统输出电流恒定或者电压恒定以及单位功率因数、软开关等其他优良特性,取得了较好的成果。文献[12]提出了一种基于恒流源补偿网络的 LED 驱动电路,恒流源补偿网络使得 WPT 系统输出恒流,解耦电流与负载阻抗的关系,通过提出的变压器参数和补偿参数设计方法,采用定频占空比控制,可以直接输出 LED 所需的电流,避免使用后级变换器,避免了频率控制带来的频率分叉问题。文献[13]基于二端口 A 参数理论,提出了 LCC/CCL 谐振补偿网络,并通过一定的参数设计使其具有输出电流增益负载无关性和单位功率因数输入特性。然而文献[11-13]并未实现原边线圈电流的恒定输出,使得该系统无法形成稳定的交变磁场,不利于能量的稳定传输^[7-8],而且,对于多负载的应用场合也具有一定的局限性。

为了在实现上述目标的同时又不使系统结构过于复杂,最好是通过简化系统拓扑结构以及参数优化的方法来自然满足上述各控制目标。据此,本文提出了一种 LCL/LCC 复合谐振型 WPT 系统,并通过一定的系统参数优化设计,较好地实现了系统输出电流恒定、原边谐振电流恒定以及系统谐振工作频率稳定的控制目标。该新型复合谐振网络 WPT 系统的研究成果对于 LED 电源及电池恒流充电等需要负载恒流供电的场合具有较好的设计指导意义。

1 LCL/LCC 型 WPT 系统拓扑及原理分析

1.1 新型补偿拓扑的提出

基于非接触变压器互感耦合等效模型的 LCL/LCC 型 WPT 系统拓扑结构如图 1 所示。

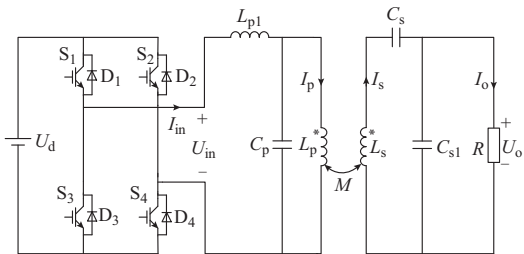


图 1 LCL/LCC 型 WPT 系统互感等效模型
Fig.1 Mutual inductance equivalent model of WPT system with LCL/LCC resonant tank

图 1 中: U_d 为直流供电电压; S_1 至 S_4 为绝缘栅双极型晶体管(IGBT); D_1 至 D_4 为反并联二极管; L_p 和 L_s 分别为发射线圈与接收线圈的自感; M 为两线圈的互感; L_{p1} , L_p , C_p 一同构成原边 LCL 复合

谐振变换器; L_s , C_s , C_{s1} 一同构成副边 LCC 复合谐振变换器; R 为电阻负载,其输出电流为 I_o ,输出电压为 U_o 。

经研究发现^[14-15],复合谐振变换器兼具串联谐振和并联谐振变换器各自的优点:①具有比单级 LC 谐振变换器更大的谐振容量;②谐振回路的输入功率因数接近为 1,具有比 LC 谐振更小的频率漂移;③在相同功率等级下,开关器件的电压、电流应力更小。从而能降低开关损耗,提高传输效率,下面将对 LCL/LCC 型 WPT 系统的恒频恒流特性进行研究。

1.2 LCL/LCC 工作原理分析

当 WPT 系统工作在谐振状态时,复合谐振网络对高次谐波有很大的抑制作用,因此,在对电路进行分析时,仅考虑 U_{in} 的基波分量对电路的作用。在高频状态下,线圈的品质因数很高,故可以忽略线圈等效内阻,并且分析时将负载等效为线性电阻。

图 1 所示 LCL/LCC 补偿 WPT 系统漏感等效模型如附录 A 图 A1 所示。其中: $L_{\sigma 1}$ 和 $L_{\sigma 2}$ 分别为原边和副边漏感; L_m 为励磁电感; $1:n$ 为原、副边线圈匝数比; U_{in} 和 I_{in} 分别为逆变器输出电压和电流; I_p 为原边谐振电流。

非接触变压器互感模型与其漏感模型中磁路机构参数的关系为:

$$\begin{cases} L_p = L_m + L_{\sigma 1} \\ L_s = n^2 L_m + L_{\sigma 2} \\ M = n L_m \end{cases} \quad (1)$$

为消除系统中的无功功率,降低电源容量,提高系统效率,采用电容补偿的方式对非接触变压器中的原、副边漏感和励磁电感进行补偿。当非接触变压器副边漏感 $L_{\sigma 2}$ 和励磁电感 L_m 分别被 C_s 和 C_{s1} 完全补偿掉时,附录 A 图 A1 可简化成附录 A 图 A2,可以看出,若控制原边谐振电流 I_p 为定值,则系统输出电流 I_o 也为定值,即系统具有恒流输出特性。

另外,由下一节的分析可知,通过一定的系统参数设计可使 LCL 复合谐振网络具有输入单位功率因数特性和输出恒流特性。此时,逆变器输出端后级系统总阻抗呈纯阻性,即系统谐振工作频率不会随负载 R 而改变,系统谐振工作频率恒定。并且随着 LCL 复合谐振网络输出电流 I_p 的恒定,系统输出电流 I_o 也将恒定。

由上述分析可知,对于 LCL/LCC 型 WPT 系统,通过一定的系统参数设计,可同时实现系统输出电流恒定、原边谐振电流恒定以及系统谐振工作频率恒定。

2 LCL/LCC 型 WPT 系统参数优化设计

2.1 负载输出电流恒定参数设计

由附录 A 图 A1 可知,当非接触变压器副边漏感 $L_{\sigma 2}$ 与补偿电容 C_s 发生串联谐振,即系统工作角频率 ω_0 满足式(2)所示关系时, $L_{\sigma 2}$ 与 C_s 串联部分相当于短路,同时,将 C_{s1} 折算到理想变压器原边得到等效电容 C_r ,此时附录 A 图 A1 可以简化成图 2。

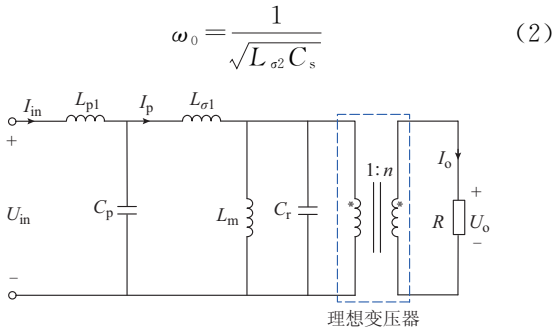


图 2 LCL/LCC 补偿系统初步简化图
Fig.2 Preliminary-simplified diagram of LCL/LCC resonant tank

其中, C_r 与 C_{s1} 的关系如下:

$$C_r = n^2 C_{s1} \quad (3)$$

若系统工作频率 ω_0 同时满足:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_m C_r}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\sigma 2} C_s}} \quad (4)$$

即 C_r 与 L_m 发生并联谐振时, C_r 与 L_m 并联部分相当于开路,此时,系统进一步简化为如附录 A 图 A2 所示结构。于是,系统输出电流 I_o 与原边线圈电流 I_p 有如下关系:

$$I_o = \frac{1}{n} I_p \quad (5)$$

由式(5)可知,对于原副边线圈匝数比 $1:n$ 固定的非接触变压器,系统输出电流 I_o 与原边线圈电流 I_p 呈固定比例关系,而与负载 R 无关。

2.2 原边谐振电流恒定参数设计

由式(5)可知,若想在负载上得到幅值不变的正弦电流,即 I_o 为常量,还需要使系统原边发射线圈的电流具有电流源特性。

根据理想变压器的阻抗变换原理,对附录 A 图 A2 进行简化,将负载 R 折算到理想变压器原边得到等效负载 R_r ,简化图如附录 A 图 A3 所示。其中, R_r 与 R 的关系如下:

$$R_r = \frac{1}{n^2} R \quad (6)$$

根据诺顿等效原理,附录 A 图 A3 所示电路的诺顿等效电路如附录 A 图 A4 所示。由图可知,若

要使原边发射线圈的电流具有电流源特性,即 I_p 为常量,则图中 L_{p1} 与 C_p 在系统工作频率下应发生并联谐振,即电路参数应满足:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{p1} C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_m C_r}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\sigma 2} C_s}} \quad (7)$$

并联谐振部分等效于开路,所以发射线圈电流与附录 A 图 A4 中的电流源电流相等,即

$$I_p = \frac{U_{in}}{\omega_0 L_{p1}} \quad (8)$$

由式(8)可知,原边线圈电流 I_p 与负载 R 无关,即原边线圈具有恒流特性。对于恒定的原边线圈电流,可以产生稳定的交变磁场,这对能量的无线传输具有极大的好处。

结合式(5)和式(8)可得,该新型拓扑结构 WPT 系统的最终负载输出电流为:

$$I_o = \frac{1}{n} \frac{U_{in}}{\omega_0 L_{p1}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,系统输出电流 I_o 的大小仅与逆变器输出电压 U_{in} 、电感 L_{p1} 以及原副边线圈匝数比有关,而与负载电阻 R 无关,表现出负载无关性。

2.3 系统谐振工作频率稳定参数设计

系统总阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{R_r + j\omega_0 L_{\sigma 1}} + j\omega_0 C_p} + j\omega_0 L_{p1} = \frac{(\omega_0 L_{\sigma 1})^2}{R_r} \frac{j\sqrt{\frac{L_{p1}}{L_{\sigma 1}}}}{\frac{\omega_0 L_{\sigma 1}}{R_r} \left(1 - \frac{L_{\sigma 1}}{L_{p1}}\right) + j\sqrt{\frac{L_{\sigma 1}}{L_{p1}}}} \quad (10)$$

为减小逆变器开关损耗,提高系统能量传输效率, U_{in} 与 I_{in} 必须保持同相位,即系统总阻抗 Z_{in} 的虚部为 0。由式(10)可知,当式(11)成立时,系统总阻抗 Z_{in} 的虚部为 0。

$$L_{p1} = L_{\sigma 1} \quad (11)$$

结合式(6)和式(11),式(10)可简化为:

$$Z_{in} = \frac{(n\omega_0 L_{\sigma 1})^2}{R} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,系统总阻抗 Z_{in} 呈现纯阻性,即系统具有稳频特性。

总结以上参数设计分析,可得到系统参数设计方案如附录 A 图 A5 所示。

3 仿真分析

基于以上分析,应用 MATLAB/Simulink 系统

仿真软件对 LCL/LCC 型 WPT 系统进行仿真分析,系统中各元件参数如下:逆变器直流输入电压 $U_d = 30$ V,逆变器工作频率 $f_0 = 20$ kHz, $L_{\sigma 1} = 91.78$ μ H, $L_{\sigma 2} = 91.78$ μ H, $L_m = 21.11$ μ H, $L_{p1} = 91.78$ μ H, $C_p = 0.69$ μ F, $C_s = 0.69$ μ F, $C_{s1} = 3$ μ F, 负载突变前电阻 $R_1 = 50$ Ω , 负载突变后电阻 $R_2 = 100$ Ω , 为分析方便,取 n 为 1。

仿真过程中,在 0.7 s 时,负载由 R_1 突变为 R_2 , 系统输出电流 i_o 。与原边线圈电流 i_p 的波形分别如图 3(a)和(b)所示。

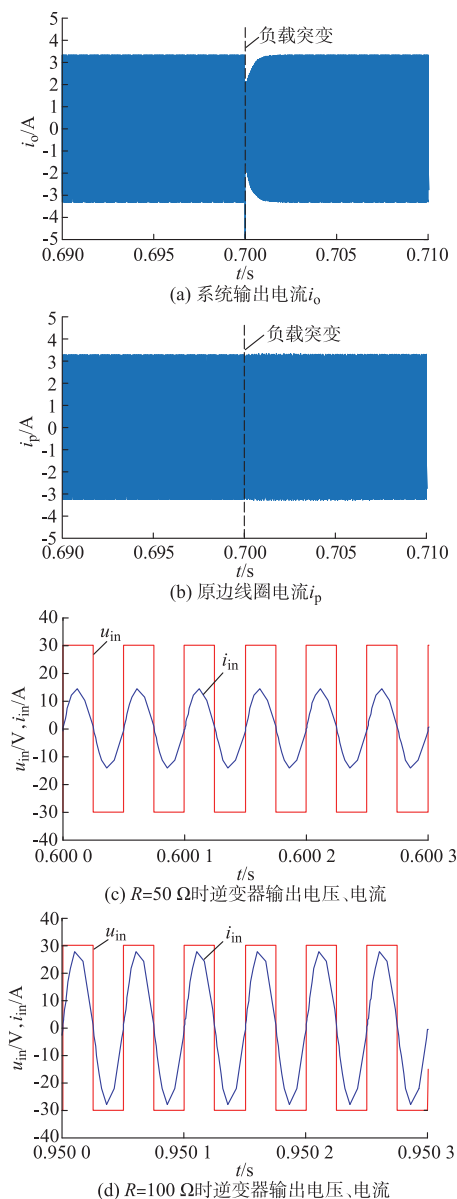


图 3 仿真结果
Fig.3 Simulation results

由图 3(a)中仿真结果可以看出,当负载发生突变时,LCL/LCC 型 WPT 系统输出电流 i_o 的幅值

不会发生改变,即系统具有较好的恒流输出特性。

由图 3(b)仿真结果可以看出,负载突变也并未引起原边线圈电流 i_p 的改变,即原边线圈也具有恒流特性,且稳定效果较好,有利于形成稳定的交变磁场。

逆变器输出电压 u_{in} 、电流 i_{in} 仿真波形分别如图 3(c)和(d)所示,可以看出,负载突变前后, u_{in} 和 i_{in} 几乎同相位,即系统始终处于完全谐振状态,具有较好的系统谐振工作频率稳定性。

通过 MATLAB/Simulink 仿真软件中的 Active&Reactive Power 模块测量系统工作过程中的逆变器输出有功功率 P_{in} 和无功功率 Q_{in} , 波形如附录 A 图 A6 所示。由该图可以看出,在负载突变之前,系统输入无功功率为 0,系统输入有功功率为 280 W。负载突变后,系统输入有功功率变为 560 W,而系统输入无功功率经过一个暂态调整之后依然为 0,仿真结果同时验证了系统的恒流输出特性以及稳频特性。

4 系统特性分析

为了进一步分析系统在接近实际工作状态时的特性,有必要对其位置偏移特性、频率特性以及效率特性进行研究。

4.1 互感 M 对系统输出电流的影响

为了观察互感 M 和负载 R 大小对系统输出电流 I_o 的影响,画出 I_o 随 M 和 R 变化的曲面如附录 A 图 A7 所示。由该图可以看出,在定互感 M 的情况下,负载 R 的变化不会影响系统输出电流 I_o 的大小;但在定负载 R 的情况下,随着互感 M 的改变,系统输出电流 I_o 将发生改变,即系统虽然具有较好的恒流特性,但其位置偏移特性较差,所以该拓扑结构及其参数设计方法主要适用于固定磁路机构的 WPT 系统。

在实际应用中要求 WPT 系统具有一定的位置偏移特性,磁路机构^[16-17]和补偿网络^[18]设计已证明能有效地提升系统对线圈偏移的容忍度,针对本系统可以采用磁路机构设计的方法来满足其在实际应用中的需要。文献[16]提出一种副边采用正交线圈的磁路机构,文献[17]提出一种原边采用 DD 型线圈、副边采用 DDQ 型线圈的磁路机构,两种磁路机构均可以在一定程度上提升系统的位置偏移特性,这对于本系统的实际应用具有一定的指导意义。

4.2 系统工作频率 f 对系统输出电流的影响

同时,为了观察系统工作频率 f 和负载 R 的大

小对系统输出电流 I_o 的影响,画出 I_o 随 f 和 R 变化的曲面如附录 A 图 A8 所示。由该图可以看出,当系统工作在谐振频率时,输出电流较大且具有很好的恒流特性。当系统工作频率偏移系统谐振频率时,输出电流急剧减小,且不再具有恒流特性。由此可见,此系统适用于定频控制系统。

4.3 系统输出功率与效率分析

前文分析系统特性时采用的是理想化电路模型,但在实际工作中 WPT 系统是一个受多参数影响的磁电一体化系统,元器件寄生电阻等参数对系统传输功率及效率等特性会产生影响。在考虑互感线圈内阻及电感内阻条件下,系统的实际等效电路模型如附录 A 图 A9 所示。对于附录 A 图 A9 所示等效电路,谐振状态下系统输出功率 P_{out} 以及传输网络总损耗 P_{loss} 分别为:

$$P_{out} = I_o^2 R = \frac{(\omega M U_{in})^2 R}{Z_{in}^2 Z_2^2 [1 + j\omega C_p (j\omega L_p + R_p + Z_r)]^2 (j\omega C_{sl} R + 1)^2}$$
 (13)

$$P_{loss} = I_{in}^2 R_1 + I_p^2 R_p + I_s^2 R_s$$
 (14)

式中: $Z_2 = 1/(1/R + j\omega C_{sl}) + 1/(j\omega C_s) + j\omega L_s + R_s$; $Z_r = (\omega M)^2 / Z_2$; $Z_{in} = j\omega L_{p1} + R_1 + 1/[j\omega C_p + 1/(j\omega L_p + R_p + Z_r)]$; $I_{in} = U_{in} / Z_{in}$; $I_p = U_{in} / [Z_{in} + j\omega C_p Z_{in} (j\omega L_p + R_p + Z_r)]$; $I_s = j\omega M U_{in} / [Z_{in} Z_2 + j\omega C_p Z_{in} Z_2 (j\omega L_p + R_p + Z_r)]$ 。

于是,系统传输效率 η 为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}$$
 (15)

根据式(15)画出 η 随 R 的变化曲线如图 4 所示。可以看出,随着负载 R 的增大,系统效率也在提升。通过分析可知,负载 R 越大时系统输出功率越大,即此系统在大功率条件下效率更高。

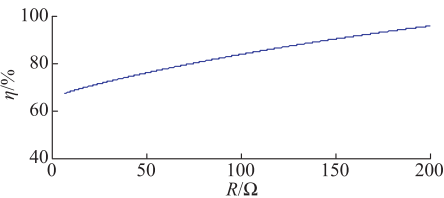


图 4 效率与负载的关系
Fig.4 Relation between efficiency and load resistance

5 实验分析

为了验证理论分析与仿真分析的正确性,根据图 1、各元件参数以及式(1)搭建如附录 A 图 A10 所示实验平台。实验测得系统输出电流 i_o 以及原

边线圈电流 i_p 的波形分别如图 5(a)和(b)所示。

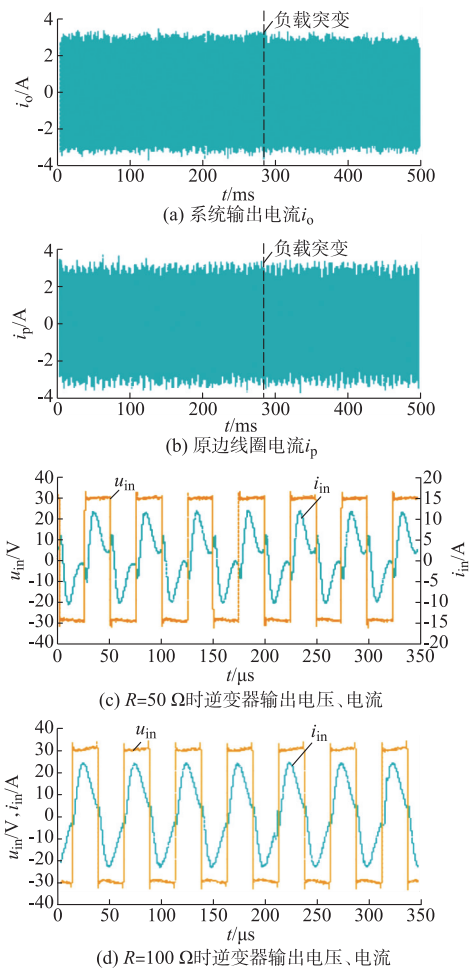


图 5 实验结果
Fig.5 Experiment results

通过图 5(a)和(b)可以看出,在负载突变前后, i_o 与 i_p 的幅值基本不发生变化,实验波形与仿真波形相吻合,验证了系统的恒流输出特性与原边线圈恒流特性。其中,实验波形中系统输出电流 i_o 的幅值在负载突变前后略微发生改变,这是由于在实际实验中元器件参数存在误差以及原、副边线圈存在微小内阻导致的。针对此问题,可采用定频占空比控制,通过调节开关管 S_1 至 S_4 的占空比,可实现 I_o 的恒定输出,该方法控制简单且易实现^[12]。

图 5(c)和(d)分别为 R 在 50 Ω 和 100 Ω 时,实验测得的逆变器输出电压和电流波形。可以看出,在负载分别为 50 Ω 和 100 Ω 时,逆变器输出电压、电流波形基本同相位,验证了系统的稳频特性。其中,逆变器输出电流波形存在畸变,这是由逆变器输出电压的 3 次及以上的高次谐波导致的。但是,随着逆变器输出电流的增大,电流波形畸变程度减弱,即此系统在重载情况下逆变器输出电流波形更好。

而抑制轻载模式下的电流畸变将是下一步研究的重点。

使用 Aino 公司的 AN87500 多通道功率分析仪对实验平台的效率进行测试,将结果绘制成折线,如图 6 所示。由此图可以看出,此新型复合谐振网络 WPT 系统始终具有较高的传输效率,当系统重载时效率可达 90% 以上,与理论分析相吻合。

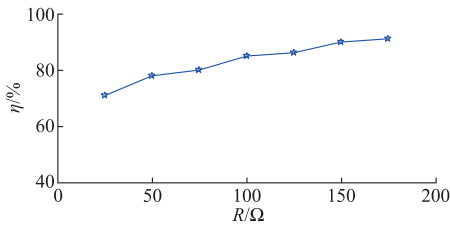


图 6 实验平台效率

Fig.6 Efficiency of the experiment platform

6 结语

本文提出了一种新型复合谐振网络 WPT 系统,同时,进行了理论推导、仿真分析以及实验验证。结果表明,此系统同时具有恒流输出特性、原边线圈恒流特性以及稳频特性,其研究成果对于 LED 及电池等需要恒流供电的场合有较好的设计指导意义。然而,在系统轻载时逆变器输出电流波形存在畸变,这是本文的不足之处,也将是下一步研究工作的重点。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] DUKJU A, SONGCHEOL H. A study on magnetic field repeater in wireless power transfer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 360-371.
- [2] 宋显锦,刘国强,张超,等.不同频率和脉宽的方波激励下 WPT 效果分析[J].电力系统自动化,2015,39(16):103-106. DOI: 10.7500/AEPS20140422013.
- [3] 陈文献,陈乾宏,张惠娟.电磁共振式无线电能传输系统距离特性的分析[J].电力系统自动化,2015,39(8):98-104. DOI: 10.7500/AEPS20140618004.
- [4] 周雯琪,马皓,何湘宁.感应耦合电能传输系统不同补偿拓扑的研究[J].电工技术学报,2009,24(1):133-139.
- [5] 杨民生.非接触感应耦合电能传输与控制技术及其应用研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [6] 戴欣,孙跃.感应电能传输系统能量注入控制方法研究[J].电子科技大学学报,2011,40(1):69-72.
- [7] 戴欣,孙跃,苏玉刚,等.感应电能传输系统参数辨识与恒流控制[J].重庆大学学报,2011,34(6):98-104.
- [8] 孙跃,陈国东,戴欣,等.非接触电能传输系统恒流控制策略[J].重庆大学学报(自然科学版),2008,31(7):766-769.
- [9] SI P, HU A P, MALPAS S, et al. A frequency control method for regulating wireless power to implantable devices[J]. IEEE Trans on Biomedical Circuits and Systems, 2008, 31(7): 766-769.
- [10] 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.
- [11] QU Xiaohui, JING Yanyan, HAN Hongdou, et al. Higher order compensation for inductive-power-transfer converters with constant-voltage or constant-current output combating transformer parameter constraints[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2017, 32(1): 394-405.
- [12] 韩洪豆,曲小慧, WONG S, 等.基于恒流源补偿网络的电磁感应式非接触能量传输的 LED 驱动电路[J].中国电机工程学报, 2015,35(20):5286-5292.
- [13] 董纪清,杨上苹,黄天祥,等.用于磁耦合谐振式无线电能传输

系统的新型恒流补偿网络[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4468-4476.

DONG Jiqing, YANG Shangping, HUANG Tianxiang, et al. A novel constant current compensation network for magnetically-coupled resonant wireless power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4468-4476.

[14] 戴欣,余奎,孙跃.CLC谐振型感应电能传输系统的 $H\infty$ 控制[J].中国电机工程学报,2010,30(30):47-54.

DAI Xin, YU Kui, SUN Yue. Study on $H\infty$ control method for CLC resonant inductive power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 47-54.

[15] 吕潇,孙跃,王智慧,等.复合谐振型感应电能传输系统分析及参数优化[J].电力系统自动化,2013,37(4):119-124.

LÜ Xiao, SUN Yue, WANG Zhihui, et al. Analysis and parameter optimization of composite resonant inductive power transfer system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 119-124.

[16] RAABE S, J ELLIOTT G A, COVIC G A, et al. A quadrature pickup for inductive power transfer systems[C]// 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and

Applications, May 23-25, 2007, Harbin, China: 68-73.

[17] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.

[18] VILLA J L, SALLÁN J, SANZ OSORIO J F, et al. High-misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 945-951.

夏晨阳(1982—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:无线电能传输技术、自动控制技术、开关电源技术、电磁兼容技术。E-mail: bluesky198210@163.com

陈国平(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:无线电能传输技术。E-mail: 253766475@qq.com

任思源(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:无线电能传输技术。E-mail: 752038438@qq.com

(编辑 蔡静雯)

Wireless Power Transfer System Using Composite Resonant Network for
Constant-current Power Supply of Load

XIA Chenyang^{1,2}, CHEN Guoping^{1,2}, REN Siyuan^{1,2}, LEI Ke¹, ZHANG Yang¹, SUN Yanjing^{1,2}

- (1. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining (China University of Mining and Technology), Xuzhou 221008, China;
2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: As the wireless power transfer (WPT) system based on the conventional LC resonant topology can not realize constant-current power supply to load when it is varied dynamically and bypass the problem of system operating frequency detuning, a WPT system with a novel composite resonant network is proposed in which the primary side is LCL resonant topology and the secondary side is LCC resonant topology. Firstly, the equivalent circuit of the magnetic circuit agencies is established according to the leakage inductance model, and equations of the resonant frequency and the output current are obtained. Then, the requirements of constant-current power supply and stable operating frequency of WPT system are obtained by system parameter optimization. Finally, the simulation results verify that the parameter optimization based WPT system with the novel composite resonant network is able to realize constant-current power supply and stable operating frequency. The experimental results show the correctness and effectiveness of the theoretical and simulation analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307173) Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No. BK20130188), and Graduate Research and Innovation Project of Jiangsu Province (No. SJLX15_0695).

Key words: wireless power transfer (WPT); composite resonant network; leakage inductance model; constant current source; frequency stabilization