DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.211 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

LVC-LCC 型 IPT 系统恒流恒压及充电策略研究

徐晓帅[1]，周晓鸣[1]，吴小波[1]，刘云海[2]，陆 昊[2]
(1.国网浙江省电力有限公司宁波供电公司，宁波 315000；2.国网浙江省电力有限公司舟山供电公司，舟山 316000)

摘要：无线电能传输技术常用于为负载自带电池充电。首先，为延长电池使用寿命，基于双边 LCC 补偿网络提出一种兼具恒流输出特性和恒压输出特性的新型补偿网络，其仅在一次侧采用 1 个可变电容就能实现感应式电能传输 IPT (introduction power transfer)系统在恒流输出模式和恒压输出模式之间的转换，减少了元器件和交流开关的数量。其次，基于安全充电策略提出相应的补偿参数设计原则，以保障在切换时负载功率和功率因数角波动率在安全阈值内，提高系统充电安全性。最后，搭建了 30.0 W 的实验样机，恒定输出电压为 20.21 V，恒定输出电流为 1.14 A，验证了该新型补偿网络具备恒流输出模式和恒压输出模式的输出特性。在输出模式切换时，恒流模式状态下负载输出功率为 19.8 W，功率因数角为 73.17°；恒压模式状态下负载输出功率为 26.1 W，功率因数角为 76.57°，验证了补偿参数设计原则分析的正确性。

关键词：无线充电；恒流输出；恒压输出；补偿参数设计；电池充电

Constant-current Constant-voltage and Charging Strategies for LVC-LCC IPT System

XU Xiaoshuai[1], ZHOU Xiaoming[1], WU Xiaobo[1], LIU Yunhai[2], LU Hao[2]
(1. Ningbo Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 2. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 316000, China)

Abstract: The wireless power transfer technology is usually employed to charge batteries that come with the load. First, to prolong the battery life, a novel compensation network with constant-current and constant-voltage output characteristics based on a bilateral LCC compensation network is proposed, which can achieve the switching of an introduction power transfer (IPT) system between a constant-current output mode and a constant-voltage output mode by using only one variable capacitor on the primary side, thereby reducing the number of components and AC switches. Second, the corresponding compensation parameter design principles are put forward based on the safe charging strategy, so as to guarantee that the fluctuation rates of load power and power factor angle are within the safety threshold during switching, which improves the charging safety of the system. Finally, a 30.0 W experimental prototype was constructed with constant output voltage of 20.21 V and constant output current of 1.14 A, thus verifying that the novel compensation network has characteristics in constant-current and constant-voltage output modes. During the switching between the output modes, the output power was 19.8 W with a power factor angle of 73.17° in the constant-current mode, and the output power was 26.1 W with a power factor angle of 76.57° in the constant-voltage mode. Therefore, the analysis of the compensation parameter design principle was verified.

Keywords: Wireless charging; constant-current output; constant-voltage output; compensation parameter design; battery charging

收稿日期：2024-09-02；**修回日期**：2024-11-07，2024-12-11；
录用日期：2024-12-23；**网络首发日期**：2025-01-03

随着 6G 时代的布局，万物互联作为未来行业的发展趋势使得传统依靠人工插拔的有线供电技

术已不再适用于未来科技设备[1-2]。以电磁波作为能量传输媒介的感应式电能传输 IPT (introduction power transfer)技术具有更高的安全性和灵活性，被广泛应用于人体、无人驾驶飞行器 UAV(unmanned aerial vehicle)、电动汽车 EV(electric vehicle)等领域。为避免影响设备正常工作，现阶段的供能策略通常是 IPT 技术为电池充电、电池直接为设备供能。锂离子电池充电过程通常包括 2 个阶段[3]：恒流充电和恒压充电。在完整充电过程中，电池的等效直流内阻不断变大[3-4]，这意味着 IPT 系统需要兼具恒流和恒压 2 种工作模式，依据负载电量实现输出模式的自切换，并保障切换过程中的充电安全性。

现阶段无线电能传输领域中常用于满足电池充电需求的方法大致可分为 3 类。

(1)传统电力电子器件[4-5]：主要通过在一、二次侧加入 DC-DC 变换电路直接调节电压，进而实现负载输出模式的切换。二次侧方案较为成熟，但较大的体积和质量不满足负载设备轻量化的要求；一次侧方案满足负载轻量化需求，但母线侧与负载端需要构成闭环控制，使其严重依赖于通信系统的可靠性。

(2)分频改变系统输出[6-7]：通过控制逆变器的工作频率，实现不同频段、不同负载的输出模式。该方案不需要添加额外装置且控制方式简单，但分频频率可能会影响 IPT 系统的电磁兼容特性，且对器件要求较高。

(3)拓扑网络切换[8-9]：基于恒定输出特性的拓扑网络结合交流开关实现拓扑网络切换，进而切换负载输出特性。与上述 2 种控制方案相比，拓扑网络切换不需要增加额外的电力电子器件，具有更广阔的发展潜力[10]。

相对来说，较少的补偿元件和简单的控制方式使得单边侧拓扑网络成为研究热点[11-17]。西南交通大学学者提出可在二次侧[13]、一次侧[14]增加额外的补偿电容和交流开关，进而实现恒流和恒压切换输出；基于 LCL 高阶补偿网络，东南大学学者分别提出 LCL/S 与串串 SS(series-series)复合型拓扑结构[15]、LCL/P 与串并 SP(series-parallel)复合型拓扑结构[16]维持负载恒定输出特性；中国科学院电工研究所学者提出 LCC/LCC 与 LCC/S 的复合型网络拓扑[12]，在满足负载恒定输出的条件下，研究了负载充电过程中的鲁棒性，即在输出模式切换时，负载电压不发生跳变；在此基础上，文献[17]深入分析了该复合型拓扑网络的切换策略，提出了异常工况下的系统自保护机制，提高了该拓扑的实用性。综上所述，二次侧单侧拓扑切换策略通过对复合型补偿网络进行设计，并结合拓扑切换技术实现了负载端恒流输出及恒压输出特性。相比于传统电力电子器件或分频控制改变系统输出，拓扑网络切换更具可操作性。该单侧拓扑切换策略通过复合型补偿网络设计实现系统输出与负载解耦，并可根据电池的充电需求实现恒流/恒压的切换输出，因此受到广泛关注和青睐[10-19]。然而，过多元器件和交流开关的使用导致该种控制策略仍有不足[20-21]。此外，当补偿网络参数设计不合理时，在系统由恒流输出转化为恒压输出时，系统的负载功率和功率因数角也会发生较大波动，这不利于电池的长期安全使用[22-23]。因此，如何设计一种补偿网络并给出配套参数整定方案，使其能够以较少的元器件和交流开关满足负载设备恒流和恒压的充电需求，并确保输出切换过程中的充电安全性，仍是亟待解决的技术难题。

因此，针对锂离子电池恒流和恒压充电需求及输出切换过程中的充电安全性，本文基于双边 LCC 型补偿网络提出了 LVC-LCC 的新型补偿网络结构，并基于安全充电策略的需求提出了相应的补偿参数设计方案。具体来说，为满足负载轻量化需求，并减少补偿元件及交流开关的数量，该新型补偿网络仅在一次侧采用 1 个可变电容就使得 IPT 系统具备恒流输出和恒压输出特性，且在输出切换过程中仍能保障系统功率因数角和负载功率的波动率在安全阈值内。通过搭建具有所提补偿网络的 IPT 系统，验证了分析的正确性。

1 LVC-LCC 补偿网络拓扑特性分析

图 1 为本文所提的配备 LVC-LCC 补偿网络的 IPT 系统的电路结构。为简化分析系统负载输出模式，忽略电感和电容等元件的寄生参数。图中：$\dot{U}_{\text{in}}$ 为逆变电路输出的高频方波电压；$\dot{I}_{\text{in}}$ 为逆变器输

出的高频电流；Z_{in} 为该系统的等效输入阻抗；C_{fl} 为并联可控补偿电容，通过改变电力电子器件 S_{11} 和 S_{12} 的初始相位可改变 C_{fl}，进而分别实现负载端的恒流输出和恒压输出；C_{s1} 和 C_{s2} 均为容值为 C 的电容；$\dot{I}_{\text{T}}$、$\dot{I}_{\text{R}}$ 分别为流经发射线圈和接收线圈的电流；L_{T} 和 L_{R} 分别为发射线圈和接收线圈的自感；M 为发射线圈和接收线圈间的互感；R_{eq} 为配备所提补偿网络的系统等效交流负载；R_{L} 为可充电电池的等效内阻；$\dot{I}_{\text{L}}$ 和 $\dot{U}_{\text{S}}$ 分别为二次侧整流前的电流和电压；$\dot{I}_{\text{o}}$ 和 $\dot{U}_{\text{o}}$ 分别为二次侧整流后的输出电流和输出电压。串联补偿电感 L_{fl}、并联可控补偿电容 C_{fl}、串联补偿电容 C_{T} 构成一次侧 LVC 型补偿网络；串联补偿电感 L_{f2}、串联补偿电容 C_{R}、并联补偿电容 C_{f2} 构成二次侧 LCC 型补偿网络。基于电荷守恒定律可计算得出 C_{fl} 的等效容值[24]为

$$C_{\text{eq}}=\frac{\Delta Q_{C_{\text{s1}}}}{Q_{C_{\text{s1}}}}C_{\text{s1}}+\frac{\Delta Q_{C_{\text{s2}}}}{Q_{C_{\text{s2}}}}C_{\text{s2}}=\left[1-\cos\left(\frac{1}{2}\pi+\frac{\varphi}{2}\right)\right]C \tag{1}$$

式中：$Q_{C_{\text{s1}}}$ 和 $Q_{C_{\text{s2}}}$ 分别为 C_{s1} 和 C_{s2} 的电荷量；$\Delta Q_{C_{\text{s1}}}$ 和 $\Delta Q_{C_{\text{s2}}}$ 分别为 C_{s1} 和 C_{s2} 在移相控制过程中的电荷变化量；φ 为 S_{11} 和 S_{12} 驱动信号之间的移相角。

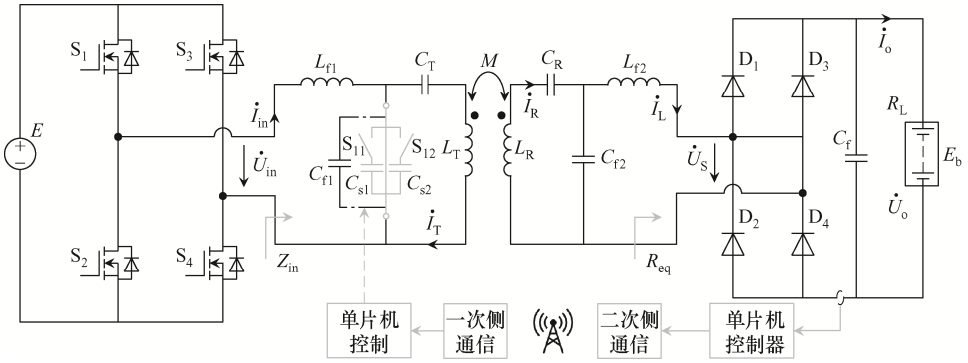


图 1　配备 LVC-LCC 补偿网络的 IPT 系统的电路结构

Fig. 1 Circuit structure of IPT system with LVC-LCC compensation network

基于网孔电流法列写该系统功率回路的基尔霍夫电压定律方程为

$$\begin{cases}\dot{U}_{\text{in}}=Z_{L_{\text{fl}}}\dot{I}_{\text{in}}+Z_{C_{\text{fl}}}(\dot{I}_{\text{in}}-\dot{I}_{\text{T}})\\ 0=(\dot{I}_{\text{T}}+\dot{I}_{\text{R}})Z_M+(\dot{I}_{\text{R}}+\dot{I}_{\text{L}})Z_{C_{\text{f2}}}+\\ \qquad(Z_{C_{\text{f2}}}-Z_M+Z_{C_2})\dot{I}_{\text{R}}\\ 0=(\dot{I}_{\text{R}}+\dot{I}_{\text{L}})Z_{C_{\text{f2}}}+Z_{L_{\text{f2}}}\dot{I}_{\text{L}}+E_{\text{b}}\\ 0=(\dot{I}_{\text{T}}-\dot{I}_{\text{in}})Z_{C_{\text{fl}}}+(\dot{I}_{\text{R}}+\dot{I}_{\text{T}})Z_M+\\ \qquad(Z_{L_{\text{T}}}-Z_M+Z_{C_{\text{T}}})\dot{I}_{\text{R}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：E_{b} 为充电过程中电池的反电动势，基于电路学关系可知 $E_{\text{b}}=R_{\text{L}}\dot{I}_{\text{o}}$；$Z_M$ 为互感阻抗，Z_M=jωM，ω 为系统工作频率 f 对应的角频率；Z_i 为电路元件的阻抗，其中 i 为补偿网络中任意电路元件的名称下标，Z_i 的计算公式为

$$\begin{cases}Z_i=\begin{cases}\text{j}\omega L_i\\ 1/\text{j}\omega C_i\end{cases}\\ \omega=2\pi f\end{cases} \tag{3}$$

传统双边 LCC 补偿网络仅具备与负载无关的恒流输出特性，且缺少一、二次侧补偿电感参数的设计策略。因此，基于电池充电过程中恒流及恒压充电模式的需求，在恒流输出和恒压输出切换过程中，为了满足负载功率 P_{out} 和功率因数角 ϕ 发生较大波动时的安全充电需求，本文提出的参数设计为

$$\begin{cases}Z_{L_{\text{fl}}}=(Z_{L_{\text{T}}}+Z_{C_{\text{T}}})/a\\ Z_{C_{\text{T}}}=b\times Z_{L_{\text{T}}}\\ Z_{L_{\text{f2}}}=c\times Z_{L_{\text{R}}}\end{cases} \tag{4}$$

式中，a、b、c 为调节系数。

如此可确保 LVC-LCC 补偿网络具备恒流及恒压输出特性，同时为该补偿网络结构提供相应的参数设计原则。

1.1 恒流输出特性

求解式(1)可得 $\dot{I}_{\text{L}}$ 的表达式为

$$\dot{I}_{\mathrm{L}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{in}}Z_{C_{\mathrm{f2}}}Z_{M}Z_{C_{\mathrm{f1}}}}{[aZ_{L_{\mathrm{f1}}}^{2}+Z_{C_{\mathrm{f1}}}(Z_{C_{\mathrm{f1}}}+aZ_{L_{\mathrm{f1}}})]A_{\mathrm{CC}}-(Z_{L_{\mathrm{f1}}}+Z_{C_{\mathrm{f1}}})B_{\mathrm{CC}}} \tag{5}$$

式中，A_{CC}和B_{CC}分别为

$$\begin{cases}A_{\mathrm{CC}}=(Z_{C_{\mathrm{R}}}+Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{R}}})(R_{\mathrm{eq}}+Z_{L_{\mathrm{f2}}})+\\ \qquad Z_{C_{\mathrm{f2}}}(Z_{C_{\mathrm{R}}}+Z_{L_{\mathrm{R}}})\\ B_{\mathrm{CC}}=(R_{\mathrm{eq}}+Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{f2}}})Z_{M}^{2}\end{cases} \tag{6}$$

恒流输出特性反映到电路关系中，即负载电流表达式与R_{eq}无关。进一步，仅当式(6)满足

$$\begin{cases}Z_{C_{\mathrm{R}}}+Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{R}}}=0\\ Z_{L_{\mathrm{f1}}}+Z_{C_{\mathrm{f1}}}=0\end{cases} \tag{7}$$

时，$\dot{I}_{\mathrm{L}}$的表达式与负载无关。此时，恒流模式下的等效交流负载电流表达式为

$$\dot{I}_{\mathrm{I,CC}}=-\frac{\dot{U}_{\mathrm{in}}Z_{M}}{Z_{L_{\mathrm{f1}}}Z_{C_{\mathrm{f2}}}} \tag{8}$$

此时，系统的输入和输出功率分别为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{in,CC}}=\dfrac{a^{2}Z_{M}^{2}R_{\mathrm{eq}}U_{\mathrm{in}}^{2}}{(1+b)^{2}c^{2}Z_{L_{\mathrm{T}}}^{2}Z_{L_{\mathrm{R}}}^{2}}+\mathrm{j}\dfrac{(1-a)aU_{\mathrm{in}}^{2}}{(1+b)\omega L_{\mathrm{T}}}\\ P_{\mathrm{out,CC}}=\dfrac{a^{2}Z_{M}^{2}R_{\mathrm{eq}}U_{\mathrm{in}}^{2}}{(1+b)^{2}c^{2}Z_{L_{\mathrm{T}}}^{2}Z_{L_{\mathrm{R}}}^{2}}\end{cases} \tag{9}$$

1.2 恒压输出特性

根据电路关系和式(5)可得

$$\dot{U}_{\mathrm{S}}=\dot{I}_{\mathrm{L}}R_{\mathrm{eq}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{in}}Z_{C_{\mathrm{f2}}}Z_{M}Z_{C_{\mathrm{f1}}}}{e_{\mathrm{eq1}}+e_{\mathrm{eq2}}} \tag{10}$$

式中，e_{eq1}和e_{eq2}为中间变量，其计算公式为

$$\begin{cases}e_{\mathrm{eq1}}=[aZ_{L_{\mathrm{f1}}}^{2}+Z_{C_{\mathrm{f1}}}(Z_{C_{\mathrm{f1}}}+aZ_{L_{\mathrm{f1}}})]A_{\mathrm{CC}}R_{\mathrm{eq}}^{-1}\\ e_{\mathrm{eq2}}=-(Z_{L_{\mathrm{f1}}}+Z_{C_{\mathrm{f1}}})B_{\mathrm{CC}}R_{\mathrm{eq}}^{-1}\end{cases} \tag{11}$$

同样地，恒压输出特性的电路学描述为：负载电压表达式与R_{eq}无关，即恒压输出特性要求R_{eq}项系数为0，且e_{eq1}和e_{eq2}不能同时为0。因此，仅能得到一组补偿网络参数调整方案，具体为

$$\begin{cases}Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{f2}}}=0\\ Z_{C_{\mathrm{R}}}+Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{R}}}=0\\ aZ_{L_{\mathrm{f1}}}+(a+1)Z_{C_{\mathrm{f1}}}=0\end{cases} \tag{12}$$

此时负载电压表达式为

$$\dot{U}_{\mathrm{S,CV}}=\frac{ac\dot{U}_{\mathrm{in}}Z_{L_{\mathrm{R}}}^{2}}{\mathrm{j}Z_{M}^{2}} \tag{13}$$

系统的输入和输出功率分别为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{in,CV}}=\dfrac{a^{2}c^{2}Z_{L_{\mathrm{R}}}^{2}U_{\mathrm{in}}^{2}}{Z_{M}^{2}R_{\mathrm{eq}}}-\mathrm{j}\dfrac{(1+a)aU_{\mathrm{in}}^{2}}{(1+b)\omega L_{\mathrm{T}}}\\ P_{\mathrm{out,CV}}=\dfrac{a^{2}c^{2}Z_{L_{\mathrm{R}}}^{2}U_{\mathrm{in}}^{2}}{Z_{M}^{2}R_{\mathrm{eq}}}\end{cases} \tag{14}$$

综上，为实现无线充电系统负载侧的轻量化充电，由式(7)和式(12)可知，具有恒流、恒压2种输出模式的LVC-LCC新型补偿网络的一、二次侧谐振条件分别为

$$\begin{cases}aZ_{L_{\mathrm{f1}}}+(a+1)Z_{C_{\mathrm{f1}}}=0 & \text{(恒压)}\\ Z_{L_{\mathrm{f1}}}+Z_{C_{\mathrm{f1}}}=0 & \text{(恒流)}\end{cases} \tag{15}$$

由于二次侧LCC补偿网络参数在2种输出模式下保持不变，因此其谐振条件可统一表示为

$$\begin{cases}Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{f2}}}=0\\ Z_{C_{\mathrm{R}}}+Z_{C_{\mathrm{f2}}}+Z_{L_{\mathrm{R}}}=0\end{cases} \tag{16}$$

2 LVC-LCC 补偿网络参数设计原则

基于用户安全考虑，锂离子电池在充电过程中需要具有较好的鲁棒性，因此必须保证整个充电过程中输出功率波动在安全阈值内。然而，由式(8)和式(13)可知，所提的具有恒流和恒压2种充电模式的新型补偿网络的负载功率并不相同。这就表明在锂离子电池由恒流充电转变为恒压充电时，IPT系统的输出功率将发生波动，影响电池的使用寿命。此外，IPT系统功率因数角的波动也会对直流母线、逆变器器件、补偿元件等造成影响。因此，为提高IPT系统的鲁棒性，在拓扑切换前、后，系统的输出功率和功率因数角的波动程度需要在可接收范围内。为更好地衡量其波动性，本文分别提出负载功率的相对变化率$\Delta\lambda$和功率因数角的相对变化率$\Delta\phi$，可分别表示为

$$\begin{cases}\Delta\lambda=\dfrac{P_{\mathrm{out,CV}}-P_{\mathrm{out,CC}}}{P_{\mathrm{out,CC}}}\\ \Delta\phi=\dfrac{\phi_{\mathrm{CV}}-\phi_{\mathrm{CC}}}{\phi_{\mathrm{CC}}}\end{cases} \tag{17}$$

式中：ϕ_{CV} 为恒压模式下的功率因数角；ϕ_{CC} 为恒流模式下的功率因数角。

将式(9)和式(14)代入式(17)并化简可得

$$\begin{cases}\Delta\lambda=-1+\dfrac{[(1+b)^2c^4Z_{L_T}^2Z_{L_R}^4]}{R_{eq}^2Z_M^4}\\ \Delta\phi=-1+\arctan\left[\dfrac{(1-a)k^2R_{eq}}{a(1+b)c^2L_R\omega^3}\right]\Big/\\ \qquad\arctan\left[\dfrac{(1-a)(1+b)c^2L_R\omega}{ak^2R_{eq}}\right]\end{cases}\tag{18}$$

式中，k 为耦合系数。

基于实际工况可知，在整个充电过程中，由于传能参数等固定，系统自感、互感、补偿网络等均保持不变。本文提出通过改变 a、b 和 c 以尽量保证 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\phi$ 综合评价最小，参数设计流程如图 2 所示。为更好地评价不同输出模式间的传输性能，系统的磁耦合机构参数见表 1。其中，R_{seq} 为 IPT 系统输出模式切换时的负载等效电阻。此外，需要提及的是传输效率未被关注，它与互感有关。本文所提的仿真参数仅是为了验证所提补偿网络具有恒压、恒流输出特性，并保证切换过程中无线充电的安全。

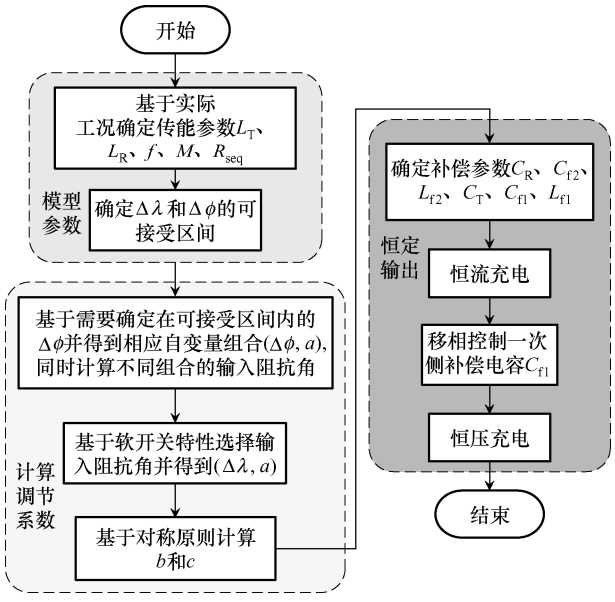


图 2　参数设计流程

Fig. 2 Flow chart of parameter design

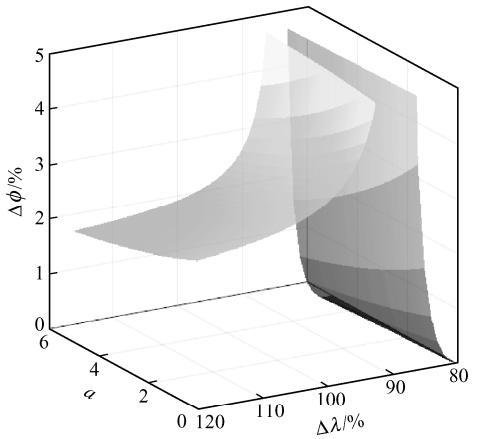
理想情况下，通过改变 a、b 和 c，可以使 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\phi$ 均为 0，进而有利于提高负载无线充电的鲁棒性。然而，由式(18)可知，$\Delta\lambda$ 和 $\Delta\phi$ 不能同时满足。因此，本文适当调节这 2 个参数，以提高系统整体稳定性。基于安全考虑，在充电模式切换时，$\Delta\lambda\leqslant20\%$、$\Delta\phi\leqslant5\%$。

表 1　配备 LVC-LCC 型 IPT 系统的磁耦合机构参数

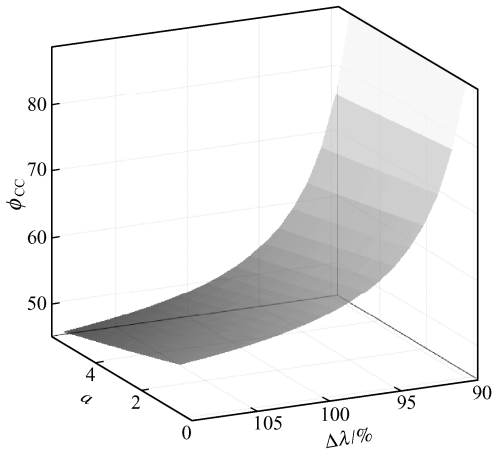
Tab. 1 Parameters of magnetic coupling mechanism in LVC-LCC IPT system

参数	值
M/μH	9.6
f/kHz	85
L_T/μH	234.96
L_R/μH	62.31
R_{seq}/Ω	15

为简化分析 a、b 和 c 对 $\Delta\phi$ 的影响，图 3 采用 $\Delta\lambda$ 代替 b、c。软开关工作状态[4]有利于提高 IPT



(a) $\Delta\phi$和a、$\Delta\lambda$之间的关系



(b) ϕ_{CC}与a、$\Delta\lambda$之间的关系

图 3　功率因数角和调节系数之间的关系

Fig. 3 Relationship between power factor angle and regulation factor

系统的整体充电效率。因此，基于图 3(a)中满足安全需求的参数，本文结合恒流充电功率角 ϕ_{CC} 的变化规律(图 3(b))，设定充电模式切换时，a 和 $\Delta\lambda$ 的取值分别为 0.25 和 20%，以保证在充电安全的基础上实现软开关的工作特性，并提升系统整体充电效率。

进一步，基于加工难度和对称原则(即 $Z_{C_R}/Z_{L_R}=Z_{C_T}/Z_{L_T}$)，联合求得 b 和 c，其余相关参数见表 2。其中，为了更贴合实际充电过程中电池等效电阻的变化情况，本文采用 $R_{eq,CC1}$ 和 $R_{eq,CC2}$ 分别代表系统处于恒流输出模式时电池的等效内阻；$R_{eq,CV1}$ 和 $R_{eq,CV2}$ 分别代表系统处于恒压输出模式时电池的等效内阻。输出模式切换时系统的输出性能见表 3。

表 2 配备 LVC-LCC 型 IPT 系统的补偿网络相关参数

Tab. 2 Related parameters of compensation network for LVC-LCC IPT system

参数	取值
a	0.250 0
b	−0.856 2
c	0.143 8
R_{seq}/Ω	15
$R_{eq,CC1}$/Ω	10
$R_{eq,CC2}$/Ω	15
$R_{eq,CV1}$/Ω	15
$R_{eq,CV2}$/Ω	20
L_{f1}/μH	135.180
L_{f2}/μH	8.963
C_T/nF	17.428
C_R/nF	62.720
$C_{f1,CV}$/nF	129.670
$C_{f1,CC}$/nF	25.940
C_{f2}/nF	391.170
U_{in}/V	100

表 3 输出模式切换时系统的输出性能

Tab. 3 Output performance of system during switching between output modes

参数	取值
ϕ_{CC}/(°)	73.64
$P_{out,CC}$/W	24.61
ϕ_{CV}/(°)	76.91
$P_{out,CV}$/W	29.47
$\Delta\phi$/%	4.4
$\Delta\lambda$/%	20

3 实验样机设计与验证

本节依据表 1 所列传能线圈的自、互感及电阻参数分别绕制了作为 IPT 系统磁耦合结构的发射线圈和接收线圈；基于表 2 制作相应的补偿元件。为方便观察，在实验中采用不同阻抗的电阻负载代替电池充电过程中的等效电阻。具体来说，在恒流输出模式下，电池的等效电阻被分别设置为 10 Ω 和 15 Ω，以验证配备所提补偿网络的无线电能传输系统具备恒流输出特性；在恒压输出模式下，电池的等效电阻被分别设置为 15 Ω 和 20 Ω，以验证配备所提补偿网络的无线电能传输系统具备恒压输出特性；在输出模式切换时，电池的等效电阻被设置为 15 Ω，以验证在输出模式切换时输出功率和功率因数角的波动率在安全阈值范围内。实验平台如图 4 所示。

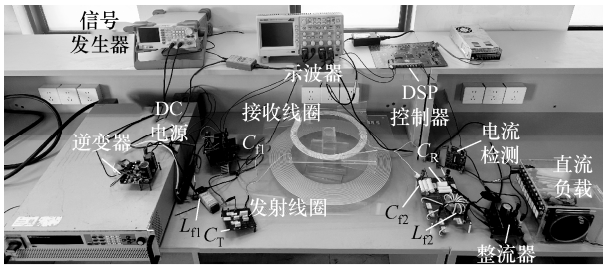
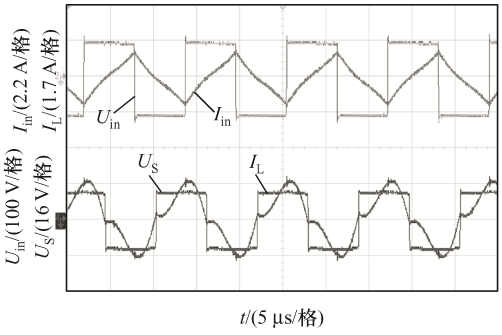


图 4 加载所提补偿网络结构实验平台实物图

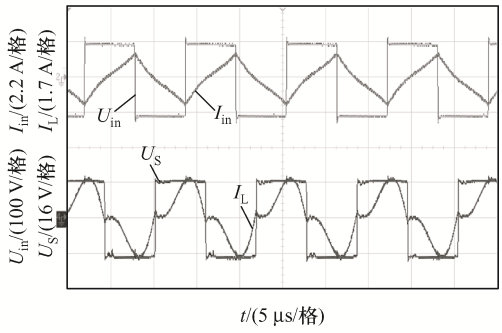
Fig. 4 Physical photograph of experimental platform for system with proposed compensation network structure

图 5 为负载被设定在恒流输出模式下的不同等效电阻负载的输入、输出波形。其中图 5(a)的电池等效电阻为 10 Ω，图 5(b)的电池等效电阻为 15 Ω。由图可知，恒流模式下的系统输出电流维持在 1.14 A 附近且基本保持不变，验证了本文所提补偿网络具有的恒流输出特性。

图 6 为负载被设定在恒压输出模式下，不同等效电阻负载的输入、输出波形。其中图 6(a)的电池等效电阻为 15 Ω，图 6(b)的电池等效电阻为 20 Ω。由图可知，恒压模式下的系统输出电压维持在 20.21 V 附近且基本保持不变，验证了本文所提补偿网络具有的恒压输出特性。



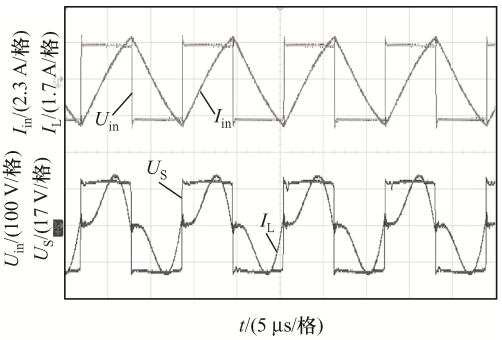
(a) 10 Ω等效负载的系统波形



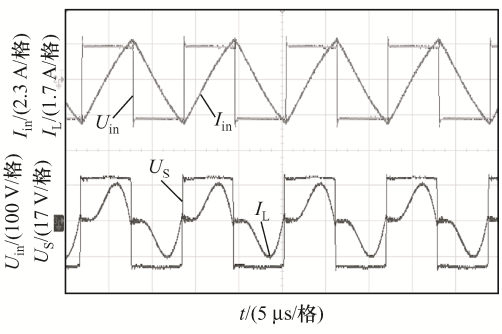
(b) 15 Ω等效负载的系统波形

图 5　恒流输出模式的波形

Fig. 5 Waveforms in constant-current output mode



(a) 15 Ω等效负载的系统波形



(b) 20 Ω等效负载的系统波形

图 6　恒压输出模式的波形

Fig. 6 Waveforms in constant-voltage output mode

此外，根据图 5(b)和图 6(a)，以及对应公式可计算得到：在所提 IPT 系统进行输出模式切换时，恒流状态下的输出功率 $P_{out,CC}$=19.8 W，功率因数角 ϕ_{CC}=73.17°；恒压状态下的输出功率为 $P_{out,CV}$=26.1 W，功率因数角 ϕ_{CV}= 76.57°。考虑到传能线圈及补偿元件的制作误差，负载功率及功率因数角波动率符合理论分析，验证了系统在输出模式切换时负载充电的稳定性。

4　结语

为满足锂离子电池恒流充电及恒压充电的需求，同时提高 IPT 系统在输出模式切换时负载充电的稳定性，首先本文基于仅具有恒流输出特性的双边 LCC 补偿网络，提出 LVC-LCC 的新型补偿网络结构。该补偿网络能够保证 IPT 系统具备恒流输出特性和恒压输出特性。具体来说，该新型补偿网络仅在一次侧采用 1 个可变电容即保证了系统具备恒流输出特性和恒压输出特性，极大地减少了元器件和交流开关的数量。接着本文提出了一种相应的补偿参数设计原则，以确保在输出模式切换时负载功率和功率因数角波动率在安全阈值范围内，提高系统充电的安全性。最后，通过一台 30.0 W 的实验样机对加载所提补偿网络的 IPT 系统的输出特性及充电安全性进行实验验证。结果表明，恒流模式下的负载等效电流稳定在 1.14 A 左右，恒压模式下的负载等效电压稳定在 20.21 V 左右，验证了所提补偿网络的恒流输出模式及恒压输出模式下的输出特性；同时，在输出模式切换点，恒流模式下的输出功率为 19.8 W、功率因数角为 73.17°，恒压模式下的输出功率为 26.1 W、功率因数角为 76.57°，验证了所提补偿网络在系统输出特性切换时，安全性分析的正确性。

参考文献：

[1] Wang Yijie, Sun Zhan, Guan Yueshi, et al. Overview of megahertz wireless power transfer [J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(5): 528-554.

[2] Zhang Zhen, Pang Hongliang, Georgiadis A, et al. Wire-

less power transfer—An overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.

[3] Rong Cancan, Chen Mengmeng, Duan Xiaoyu, et al. Optimized design of passive array coils for high-efficiency and anti-misalignment WPT system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 6504-6514.

[4] Psomas C, You Minglei, Liang Kai, et al. Design and analysis of SWIPT with safety constraints [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(1): 107-126.

[5] Purushothaman D, Narayanamoorthi R, Elrashidi A, et al. A comprehensive review on single-stage WPT converter topologies and power factor correction methodologies in EV charging [J]. IEEE Access, 2023, 11: 135529-135555.

[6] Huang Zhicong, Qin Tian, Li X L, et al. Synthesis of inductive power transfer converters with dual immittance networks for inherent CC-to-CV charging profiles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7766-7777.

[7] Yuan Hao, Wang Chunfang, Xia Dongwei. Research on input-parallel single-switch WPT system with load-independent constant voltage output [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1888-1896.

[8] Li Guanxi, Ma Hao. A hybrid IPT system with high-misalignment tolerance and inherent CC-CV output characteristics for EVs charging applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 3152-3160.

[9] Inserra D, Wan Leitian, Wen Ruiming, et al. High-efficiency wireless power transfer with tightly coupled antenna arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(8): 6867-6872.

[10] Yang Lin, Dong Kangshuai, Wang Yilin, et al. Analysis, design, and validation of a dual-channel high-power WPT system based on bilateral coil decoupling [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 4288-4295.

[11] Feng Yuchen, Chen Fengwei, Sun Yue, et al. Identification and control of LCC-S WPT systems using a linear parameter varying model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(9): 11862-11873.

[12] 吉莉, 王丽芳, 廖承林, 等. 副边自动切换充电模式的电动汽车无线充电系统设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 137-142.
Ji Li, Wang Lifang, Liao Chenglin, et al. Design of electric vehicle wireless charging system with automatic charging mode alteration at secondary side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 137-142. (in Chinese)

[13] 李乔, 李明轩, 杨斌, 等. 基于副边可变电容的 IPT 恒流恒压充电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5741-5749.
Li Qiao, Li Mingxuan, Yang Bin, et al. Secondary-side variable capacitor-based IPT system for constant current and constant voltage charging [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5741-5749. (in Chinese)

[14] Chen Yang, Yang Bin, Kou Zhihao, et al. Hybrid and reconfigurable IPT systems with high-misalignment tolerance for constant-current and constant-voltage battery charging [J]. IEEE Transactions on Power Elec- tronics, 2018, 33(10): 8259-8269.

[15] 韩洪豆, 景妍妍, 曲小慧, 等. 基于恒流-恒压复合拓扑的感应式充电系统[J]. 电源学报, 2019, 17(2): 132-138.
Han Hongdou, Jing Yanyan, Qu Xiaohui, et al. Inductive charger system based on constant-current and constant-voltage hybrid topology [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(2): 132-138. (in Chinese)

[16] Qu Xiaohui, Han Hongdou, Wong S C, et al. Hybrid IPT topologies with constant current or constant voltage output for battery charging applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6329-6337.

[17] 杨云虎, 贾维娜, 梁大壮, 等. LCC-LCC/S 自切换恒流-恒压复合型无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4823-4837, 4852.
Yang Yunhu, Jia Weina, Liang Dazhuang, et al. A self-switching wireless power transfer system based on hybrid topology of LCC-LCC/S with constant current and constant voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4823-4837, 4852. (in Chinese)

[18] Wang Yibo, Jiang C Q, Chen Chen, et al. Hybrid nanocrystalline ribbon core and flake ribbon for high-power

inductive power transfer applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 1898-1911.

[19] Lu Jianghua, Zhu Guorong, Wang Huai, et al. Sensitivity analysis of inductive power transfer systems with voltage-fed compensation topologies [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4502-4513.

[20] 张鹏飞, 龚立娇, 马欣欣, 等. 具有可变增益恒压特性的双线圈无线电能传输系统补偿网络设计与分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1256-1269, 1283.
Zhang Pengfei, Gong Lijiao, Ma Xinxin, et al. Analysis and design of compensation network for two-coil wireless power transfer system with variable constant voltage gain characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1256-1269, 1283. (in Chinese)

[21] 黄文聪, 饶天彪, 蒋煊焱, 等. 无线电能传输系统最大效率追踪及恒压输出复合控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3589-3601, 3615.
Huang Wencong, Rao Tianbiao, Jiang Xuanyan, et al. Maximum efficiency tracking and constant voltage output compound control method for wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3589-3601, 3615. (in Chinese)

[22] 张玉旺, 都义彬, 张岩, 等. 无线电能传输系统参数辨识技术研究综述[J]. 电源学报, 2026, 24(5): 265-274.
Zhang Yuwang, Du Yibin, Zhang Yan, et al. Review of the research on parameter identification technology for wireless power transfer systems [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(5): 265-274. (in Chinese)

[23] 魏曙光, 许非凡, 李嘉麒, 等. 基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化[J]. 电源学报, 2026, 24(5): 275-285.
Wei Shuguang, Xu Feifan, Li Jiaqi, et al. Parameter optimization of wireless power transfer system based on PSO algorithm for unmanned platforms [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(5): 275-285. (in Chinese)

[24] Liu Xu, Chao Jie, Rong Cancan, et al. Compatibility and performance improvement of the WPT systems based on Q-learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(8): 10582-10593.



徐晓帅

作者简介：

徐晓帅(1993—)，女，硕士，工程师。研究方向：变电检修，电机优化，继电保护，空气流柱放电特性。E-mail：xuxiaoshuai90@163.com。

周晓鸣(1993—)，男，通信作者，博士，工程师。研究方向：新型电力系统，电力需求响应，新型综合能源，无线电能传输技术。E-mail：TS22230004A31LD@cumt.edu.cn。

吴小波(1982—)，男，本科，高级工程师。研究方向：电机优化，继电保护。E-mail：1580241317@qq.com。

刘云海(1998—)，男，硕士。研究方向：无线电能传输。E-mail：liuyunhai@cumt.edu.cn。

陆昊(1998—)，男，硕士。研究方向：无线电能传输。E-mail：ts21130168p31@cumt.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)