

# 基于频率切换的 S/LCL 补偿恒流恒压型 WPT 系统研究

杨林<sup>1</sup>, 邵帅<sup>1</sup>, 余文彦<sup>1</sup>, 周学斌<sup>2</sup>

(1.河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007;2.湖南科技学院 智能制造学院,湖南 永州 425199)

**摘要:**由于传统的插入式系统结构繁杂且频繁插拔容易发生电火花等危险,因此无线电能传输(wireless power transfer, WPT)系统凭借其固有的优势得到了广泛的研究,逐渐融入各种工业应用中.为了确保电池的性能及使用寿命,有效地为电池提供所需的恒定充电电流和恒定充电电压是非常必要的.然而在充电过程中,电池的等效电阻会发生显著变化从而导致系统很难在近似零相位角(zero phase angle, ZPA)运行下同时实现与负载无关的恒流输出和恒压输出.鉴于此,提出 1 种基于 S/LCL 补偿的 WPT 系统,该系统可以在 2 个固定频率下实现具有 ZPA 运行的恒流和恒压输出.最后,搭建了 1 台恒流充电为 3 A 和恒压充电为 80 V 的验证性实验样机,验证了所设计的 WPT 系统的正确性和可行性.

**关键词:**无线电能传输;S/LCL;零相位角;恒流输出;恒压输出

**中图分类号:**TM724

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2367(2024)03-0017-08

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)能够通过终端线圈之间的电磁耦合实现电力传输,与传统的插入式充电系统相比, WPT 系统可以实现远距离、零接触的电力传输,具备安全、灵活以及能够在恶劣环境中工作等优点.因此, WPT 系统备受关注,并已广泛应用于各种工业领域.如便携式电子设备<sup>[1]</sup>、发光二极管(LED)照明应用<sup>[2]</sup>、生物医学植入物<sup>[3]</sup>,电动汽车的无线充电<sup>[4]</sup>、水下应用<sup>[5]</sup>等.

由于锂离子电池具有循环寿命长、能量密度高、自放电率低、安全可靠等优点<sup>[6]</sup>,因此被广泛用作储能装置.在高效的充电应用中,锂电池的等效负载是非恒定的,并随着充电时间不断地增加.因此,为了保证电池性能,延长电池使用寿命,应根据电池充电规律设计具有稳定可靠的恒流和恒压混合输出的 WPT 系统.

为了设计在 ZPA 条件下具有恒流和恒压输出特性的 WPT 系统,近年来,学者们进行了不断创新.一般来说,根据电感和电容的连接方式不同, WPT 系统具有 4 种基本的拓扑结构,即串联-串联(series-series, SS)、串联-并联(series-parallel, SP)、并联-串联(parallel-series, PS)和并联-并联(parallel-parallel, PP)<sup>[7]</sup>.已经证明,在特定参数下, SS 和 PS 可以实现独立于负载的恒流输出特性,而 SP 和 PP 可以实现独立于负载的恒压输出特性<sup>[8-9]</sup>.为了设计具有恒流和恒压混合输出特性的 WPT 系统,文献[7]对上述 4 种基本拓扑结构进行混合,提出 SS 和 SP 协同工作的混合拓扑结构以及 PS 和 PP 协同工作的混合拓扑结构.此外,文献[10]也通过设计合理的混合拓扑结构实现了恒流和恒压混合输出的特性.然而,文献[7, 10]中设计的拓扑结构在实现恒流和恒压输出时需要在 2 个拓扑之间切换,这不仅使系统的控制电路变得复杂,而且增加系统的成本和不确定性.以 SS/SP 混合拓扑为例,从 SS 拓扑到 SP 拓扑的过渡需要利用 3 个高频交流开关,控制接收线

**收稿日期:**2023-07-18; **修回日期:**2023-10-18.

**基金项目:**河南省科技攻关计划项目(232102240057);湖南省教育厅科学研究项目(22B0803);永州市 2022 年度指导性科技计划项目(2022-YZKJZD-010),教育部高校学生司第二期供需对接就业育人项目(20230106677).

**作者简介:**杨林(1991-),男,河南新乡人,河南师范大学讲师,博士,研究方向为无线电能传输技术、新型电力系统运行控制等, E-mail: yang\_lin@whu.edu.cn.

**通信作者:**周学斌, E-mail: zhouxuebin821025@huse.edu.cn.

**引用本文:**杨林,邵帅,余文彦,等.基于频率切换的 S/LCL 补偿恒流恒压型 WPT 系统研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(3):17-24.(Yang Lin, Shao Shuai, Yu Wenyan, et al. Research on S/LCL compensated constant current and constant voltage WPT system based on frequency switching[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2024, 52(3): 17-24. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.07.18.0003.)

圈在 2 个不同值的补偿电容器串联和并联之间切换<sup>[11]</sup>.PS/PP 混合拓扑及其他混合拓扑与其相似.因此,混合拓扑切换方案不是实现系统恒流和恒压输出的最优方案.鉴于此,文献[12]推论验证了 LCC-S 补偿 WPT 系统能够在 2 个频率点实现具有 ZPA 输入的恒流和恒压输出.尽管 LCC 型拓扑具有较高的参数设计自由度以及在大功率传输下实现高效率传输等优良特性<sup>[13]</sup>,然而,LCC-S 型拓扑引入了大量的补偿元件,这毫无疑问地增加了系统的设计难度及成本.此外,在文献[14]中,作者提出了 1 种新型三线圈参数设计方法,以通过改变频率实现具有 ZPA 输入的恒流和恒压输出.同样地,TRAN 等人在文献[15]中系统分析了四线圈 WPT 系统,并通过设计合理的参数实现了 2 个 ZPA 频率点下的恒流和恒压输出.然而,文献[14]和文献[15]中的 WPT 系统有着十分严格的互感关系,这无疑增加了系统的设计难度和不稳定性.鉴于此,本文提出了 1 种基于 S/LCL 补偿的 WPT 系统,该系统通过合理的参数设计可以在 2 个 ZPA 工作频率点实现稳定的恒流输出和恒压输出.此外,该系统具有较少的补偿元件,且无需复杂的控制电路,具有易于控制、结构简单、低成本等优点.

第 1 节对 S/LCL 补偿 WPT 系统的电路模型进行了全面的分析.第 2 节给出了系统参数的整定方法.并利用电磁场分析软件 Maxwell 建立松耦合变压器(loosely couple transformer, LCT)的结构模型.然后,在 MATLAB 中建立等效模型对 WPT 系统进行初步验证.在第 3 节中进行系统恒流输出和恒压输出切换的设计.第 4 节通过搭建实验样机,验证了系统的合理性及可行性.第 5 节进行了总结.

## 1 S/LCL 补偿 WPT 系统的电路模型及原理分析

### 1.1 S/LCL 拓扑电路模型

图 1 所示为 S/LCL 补偿 WPT 系统的整体电路架构图. $L_1, L_p$  和  $L_s$  分别是补偿电感、发射线圈和接收线圈. $R_1, R_p, R_s$  为对应的寄生电阻.由于  $R_1, R_p, R_s$  的值较小,为了简化,在分析时将其忽略. $M$  表示发射线圈和接收线圈之间的互感.系统的发射侧包括 1 个恒定的直流电源  $U_d$ 、由 4 个 MOSFET( $Q_1 \sim Q_4$ )组成的高频逆变器(high-frequency inverter, HFI)、补偿电容  $C_1$  和发射线圈  $L_p$ ;接收侧包括接收线圈  $L_s$ 、并联补偿电容  $C_2$ 、补偿电感  $L_1$ 、全桥整流器和滤波电容  $C_F$ .全桥整流器输出直流电为电池负载  $R_L$  供电.图 2 所示为拓扑简化电路图,其中高频逆变器驱动的方波电压  $U_{in}$  的方均根  $U_{in} = 2\sqrt{2}U_d/\pi$ ;等效交流负载电阻  $R_{ac}$  的值可表示为: $R_{ac} = 8R_L/\pi^2$ .

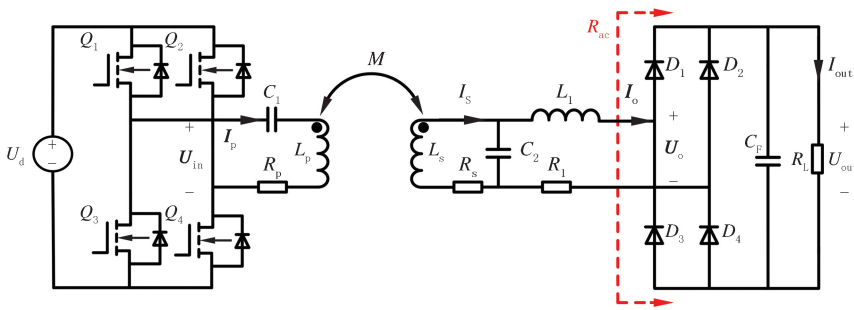


图1 S/LCL补偿WPT系统架构图

Fig.1 Architecture diagram of S/LCL compensated WPT system

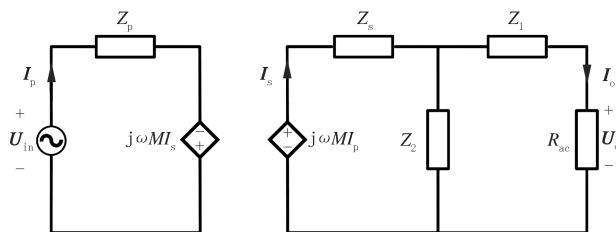


图2 S/LCL补偿WPT系统简化电路图

Fig.2 Simplified circuit of S/LCL compensated WPT system

根据图2,系统的回路方程满足

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & -j\omega M & 0 \\ -j\omega M & Z_2 + Z_s & -Z_2 \\ 0 & -Z_2 & Z_1 + Z_2 + R_{ac} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_o \end{bmatrix},$$

其中,等效阻抗  $Z_1 = j\omega L_1$ ,  $Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$ ,  $Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_1}$ ,  $Z_s = j\omega L_s$ .

根据式(2)可以计算出3个回路的电流向量

$$\begin{cases} \mathbf{I}_p = \frac{(Z_2 Z_s + R_{ac} + Z_s + R_{ac} Z_2 + Z_1 Z_s + Z_1 Z_2) \mathbf{U}_{in}}{A + BR_{ac}}, \\ \mathbf{I}_s = \frac{j\omega M (R_{ac} + Z_1 + Z_2) \mathbf{U}_{in}}{A + BR_{ac}}, \\ \mathbf{I}_o = \frac{j\omega M Z_2 \mathbf{U}_{in}}{A + BR_{ac}}, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\begin{cases} A = Z_1 Z_p Z_s + Z_2 Z_p Z_s + Z_1 Z_2 Z_p + \omega^2 M^2 Z_1 + \omega^2 M^2 Z_2, \\ B = Z_2 Z_p + Z_p Z_s + \omega^2 M^2. \end{cases}$

### 1.2 S/LCL系统恒流特性以及ZPA操作原理分析

基于以上分析,当输出电流  $\mathbf{I}_o$  独立于  $R_{ac}$  时,即可实现恒流输出.根据式(1),令  $B=0$ ,则输出电流  $\mathbf{I}_o$  独立于负载  $R_{ac}$ ,即:  $Z_2 Z_p + Z_p Z_s + \omega_{cc}^2 M^2 = 0$ .

此时,系统输入阻抗  $Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_p} = \frac{\omega_{cc}^2 M^2 Z_2 + Z_2 Z_p Z_s}{Z_2 Z_s + Z_1 Z_s + Z_1 Z_2 + Z_s R_{ac} + Z_2 R_{ac}}$ .当  $Z_2 Z_s + Z_1 Z_s + Z_1 Z_2 = 0$  成立时,  $Z_{in}$  为纯阻性,系统可以实现ZPA输入,确保高效性.此时,同时满足恒流输出特性及ZPA运行的条件为

$$\begin{cases} Z_2 Z_p + Z_p Z_s + \omega_{cc}^2 M^2 = 0, \\ Z_2 Z_s + Z_1 Z_s + Z_1 Z_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

根据上式,系统的等效输入阻抗  $Z_{in}$  及跨导增益  $G$  (输出电流与输入电压的比)可以被简化为

$$\begin{cases} Z_{in} = \frac{\omega_{cc}^2 M^2 Z_2 + Z_2 Z_p Z_s}{(Z_s + Z_2) R_{ac}}, \\ G = \frac{I_o}{U_{in}} = \left| j \frac{Z_2}{\omega_{cc} M (Z_1 + Z_2)} \right|. \end{cases}$$

$Z_{in}$  只与等效负载  $R_{ac}$  有关,因此系统输入阻抗是纯阻性的,可以在不同负载下实现ZPA输入.此外,跨导增益  $G$  与等效负载  $R_{ac}$  无关,因此系统可以实现负载无关的恒流输出.

### 1.3 S/LCL系统恒压特性以及ZPA操作原理分析

与上节分析相似,由式(1)可得  $U_o = I_o R_{ac} = \frac{j\omega_{cv} M Z_2 U_{in} R_{ac}}{A + BR_{ac}} = \frac{j\omega_{cv} M Z_2 U_{in}}{(A/R_{ac}) + B}$ .当满足  $A=0$  时,输出电压  $U_o$  独立于等效负载  $R_{ac}$ ,系统可以实现恒压输出,即  $Z_1 Z_p Z_s + Z_2 Z_p Z_s + Z_1 Z_2 Z_p + \omega_{cv}^2 M^2 Z_1 + \omega_{cv}^2 M^2 Z_2 = 0$ .

此时,系统输入阻抗  $Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_p} = \frac{(Z_2 Z_p + Z_p Z_s + \omega_{cv}^2 M^2) R_{ac}}{Z_2 Z_s + R_{ac} Z_s + R_{ac} Z_2 + Z_1 Z_s + Z_1 Z_2}$ .为了实现ZPA操作,需要让  $Z_{in}$  为纯阻性,不含虚部,即  $Z_2 + Z_s = 0$ .此时,同时满足恒压输出特性和ZPA输入的条件

$$\begin{cases} Z_1 Z_p Z_s + Z_2 Z_p Z_s + Z_1 Z_2 Z_p + \omega_{cv}^2 M^2 Z_1 + \omega_{cv}^2 M^2 Z_2 = 0, \\ Z_2 + Z_s = 0. \end{cases} \quad (3)$$

系统的等效输入阻抗  $Z_{in}$  及电压增益  $E$  (输出电压与输入电压的比)可以简化为

$$\begin{cases} Z_{in} = \omega_{cv}^2 M^2 R_{ac} / (Z_2 Z_s), \\ E = U_s / U_{in} = \left| j Z_2 / (\omega_{cv} M) \right|. \end{cases}$$

$Z_{in}$  只与等效负载  $R_{ac}$  有关,因此系统输入阻抗是纯阻性的,可以在不同负载下实现 ZPA 运行.此外,电压增益  $E$  与等效负载  $R_{ac}$  无关,因此系统可以实现负载无关的恒压输出.

#### 1.4 补偿电容值的确定

基于以上分析,当补偿电容值满足式(2)时,系统可以实现恒流输出和 ZPA 运行,当补偿电容值满足式(3)时,系统可以实现恒压输出和 ZPA 运行.因此,为了能够实现具有 ZPA 输入的恒流和恒压输出,补偿电容  $C_1$  和  $C_2$  必须同时满足式(2)和式(3).因此,结合式(2)和式(3)可以得到补偿电容

$$\begin{cases} C_1 = (\omega_{cc}^2 - \omega_{cv}^2)^3 L_1 / (2\omega_{cc}^2 \omega_{cv}^6 M^2), \\ C_2 = ((\omega_{cc}^2 - \omega_{cv}^2) L_1)^{-1}. \end{cases} \quad (4)$$

## 2 S/LCL 补偿 WPT 系统参数的设计及验证

第 1 节的理论分析表明,S/LCL 补偿 WPT 系统可以分别在 2 个固定工作频率下实现具有 ZPA 运行的恒流和恒压输出特性.本节将进行 LCT 的结构设计,并提供严格的系统参数设计流程.此外,通过在 MATLAB/SIMULINK 中搭建等效模型对上述理论分析进行初步验证.

### 2.1 LCT 结构设计

LCT 一般被设计为圆形或方形结构.方形线圈与同直径的圆形线圈相比具有更大的自感及互感.此外,在发生水平偏移时,方形线圈之间的互感更稳定.然而由于集肤效应和邻近效应,方形线圈在拐角处的电流通常不均匀<sup>[16]</sup>.若将方形线圈的拐角设计成圆角,即可避免拐角对电流的影响,减少损耗.因此,本研究的线圈将设计为方形圆角结构.线圈  $L_p$  和  $L_s$  的具体参数如表 1 所示.

表 1 LCT 的尺寸参数

Tab. 1 Size parameters of LCT

参数	发射线圈 $L_p$	接收线圈 $L_s$	参数	发射线圈 $L_p$	接收线圈 $L_s$
外径/mm	230	210	匝数	13	7
内径/mm	152	168	利兹线股数	400	400

### 2.2 参数设计

本节将根据上述理论分析进行 S/LCL 补偿 WPT 系统的参数设计.首先,根据具体应用场合,确定系统在工作频率  $\omega_{cc}$  和  $\omega_{cv}$  下的跨导增益  $G$  和电压增益  $E$ .紧接着,确定线圈  $L_p$  和  $L_s$  的尺寸及匝数并使用电磁场分析软件 Maxwell 计算  $L_p$ 、 $L_s$  的自感值和它们之间的互感值  $M$ .然后将仿真得到的参数值代入式(4),计算补偿电容  $C_1$  和  $C_2$  的值.根据补偿电容的计算值判断式(2)和式(3)是否成立,若式(2)和式(3)成立,则说明参数合理.否则,需要重新执行上述程序,直到式(2)和式(3)成立.最后,系统参数的理论值总结在表 2 中.

表 2 S/LCL 补偿 WPT 系统的理论值

Tab. 2 Theoretical values of S/LCL compensated WPT system

参数	$L_1/\mu\text{H}$	$L_p/\mu\text{H}$	$L_s/\mu\text{H}$	$M/\mu\text{H}$	$C_1/\text{nF}$	$C_2/\text{nF}$
理论值	40	94.48	30.06	22	54.89	182.18

### 2.3 初步验证

为了初步验证上述理论分析,本节在 MATLAB/SIMULINK 中建立了 S/LCL 补偿 WPT 系统在恒流和恒压模式下的等效模型.基于表 2 中的数据,结合所建立的等效模型,可以得到不同负载下系统输入阻抗以及跨导增益、电压增益随频率变化的关系曲线.总的来说,通过对等效模型的仿真分析,图 3 验证了在频率分别为 90 kHz 和 68 kHz 处,系统可以实现具有 ZPA 运行的恒流和恒压输出特性.

## 3 WPT 系统恒流和恒压模式转换结构设计

综上所述,拟议的 S/LCL 补偿 WPT 系统无需多余的交流开关(ACS)及闭环控制器,通过合适的参数设计可以在 2 个不同的 ZPA 工作频率( $f_{cc}$ ,  $f_{cv}$ )下实现恒流恒压输出.图 4 所示是系统从恒流模式到恒压模式的切换策略.根据图 4,在 WPT 系统开始工作后,通过电压电流传感器同步采集电池的电压  $U_{ref}$  和电流

$I_{ref}$ ,并将数值发送至控制器.当  $U_{ref} < 80\text{ V}$  时,控制器选择以频率  $f_{cc}$  进行恒流充电,随着电压的不断升高,当  $U_{ref} \geq 80\text{ V}$  时,控制器选择以频率  $f_{cv}$  进行恒压充电.当检测到充电电流  $I_{ref} < 0.3\text{ A}$  时,WPT 系统停止工作,充电结束.

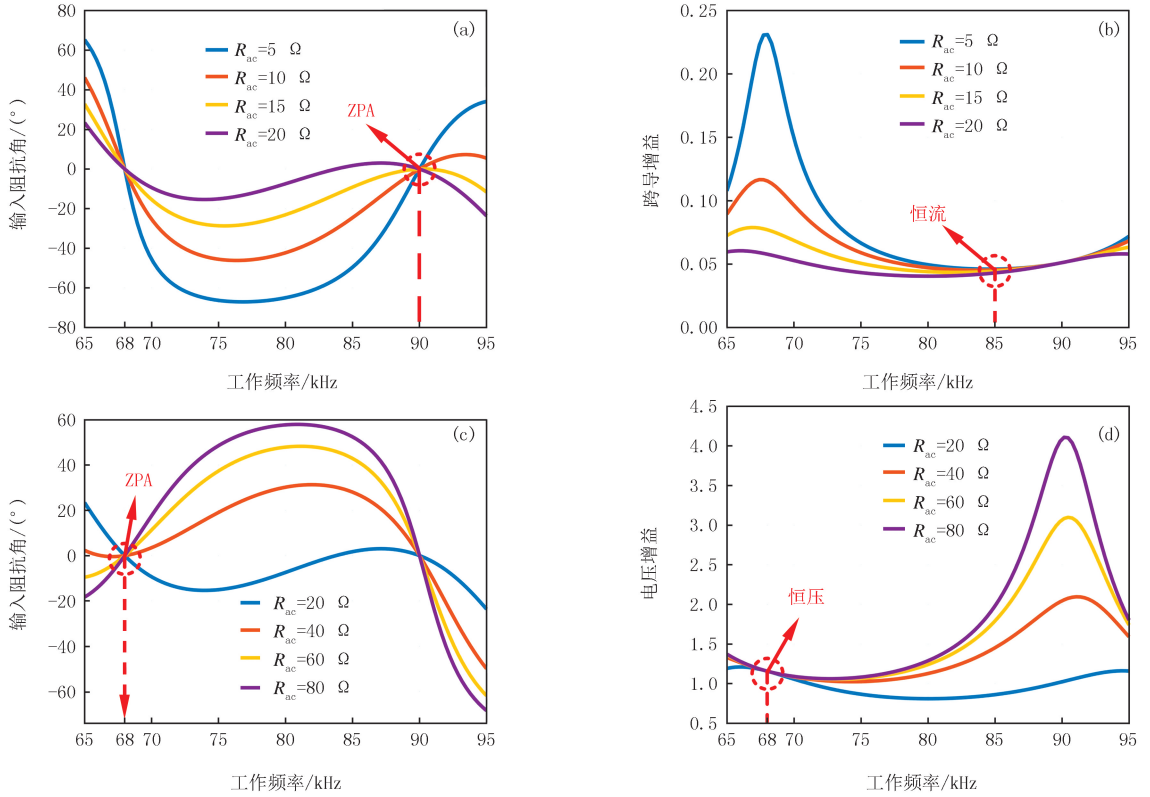


图3 不同频率下负载电阻与跨导增益、电压增益、输入阻抗角之间的关系曲线

Fig.3 Curves of relationships among load resistance, transconductance gain, voltage gain, and input impedance angle at different frequencies

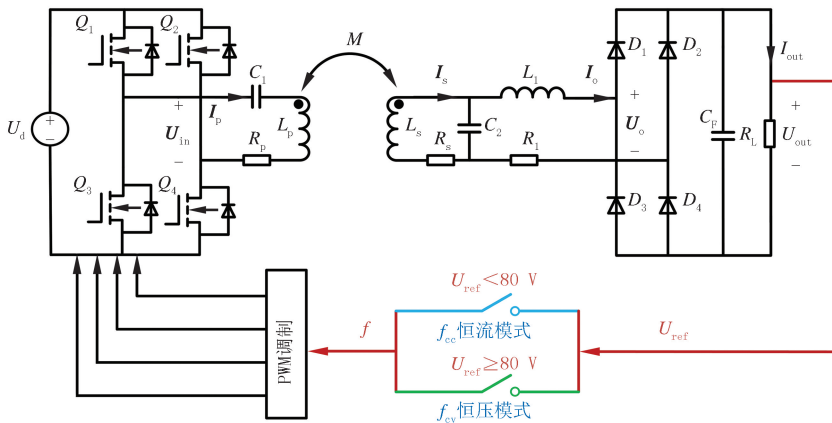


图4 S/LCL补偿WPT系统的切换策略

Fig.4 Switching strategy of the proposed S/LCL compensated WPT system

### 4 实验

为了验证所设计的 S/LCL 补偿 WPT 系统的可行性,构建了 1 台具有 3A/80V 输出的实验样机.实验样机的硬件由直流电压源、补偿电感  $L_1$ 、补偿电容  $C_1$ 、补偿电容  $C_2$ 、LCT、高频逆变器 HFI、整流器、电阻负载

和示波器组成.表 3 列出了用于实验的各硬件的测量值,与表 2 中的理论值略有出入.

表 3 S/LCL 补偿 WPT 系统的实验值

Tab. 3 Experimental values of S/LCL compensated WPT system

参数	$f_{cc}/\text{kHz}$	$f_{cv}/\text{kHz}$	$L_1/\mu\text{H}$	$L_p/\mu\text{H}$	$L_s/\mu\text{H}$	$M/\mu\text{H}$	$U_d/\text{V}$
实验值	90	68	40.60	93.08	30.52	22	62
参数	$C_1/\text{nF}$	$C_2/\text{nF}$	$R_1/\Omega$	$R_s/\Omega$	$R_p/\Omega$	$I_{out}/\text{A}$	$U_{out}/\text{V}$
实验值	55.72	179.49	0.1	0.1	0.16	3 A	80

图 5(a,b)所示是在工作频率为 90 kHz 时,系统的输入电压  $U_{in}$ 、输入电流  $I_p$  及输出电流  $I_{out}$  在负载分别为 5  $\Omega$  和 10  $\Omega$  时的实验波形图.由图 5(a,b)可以看出,在频率为 90 kHz 时,系统的输入电压和输入电流在不同负载下始终保持同相位,这直观地证明了系统 ZPA 运行的实现.此外,系统的输出电流始终为 3 A,不受负载变化的影响,这意味着所设计系统恒流输出的实现.图 5(c,d)所示是在工作频率为 68 kHz 时,系统的输入电压  $U_{in}$ 、输入电流  $I_p$  及输出电压  $U_{out}$  在负载分别为 30  $\Omega$  和 60  $\Omega$  时的实验波形图.与上述分析一致,根据图 5(c,d),系统的输入电压和输入电流在负载为 30  $\Omega$  和 60  $\Omega$  时始终保持同相位,此外,系统的输出电压始终为 80 V.这意味着在工作频率为 68 kHz 时,系统实现了具有 ZPA 运行的恒压输出.总的来说,通过上述实验,直观地验证了拟议 S/LCL 补偿 WPT 系统在 2 个固定的工作频率处,能够实现满足电池充电需求的恒流和恒压输出,并在整个充电过程中实现 ZPA 运行.

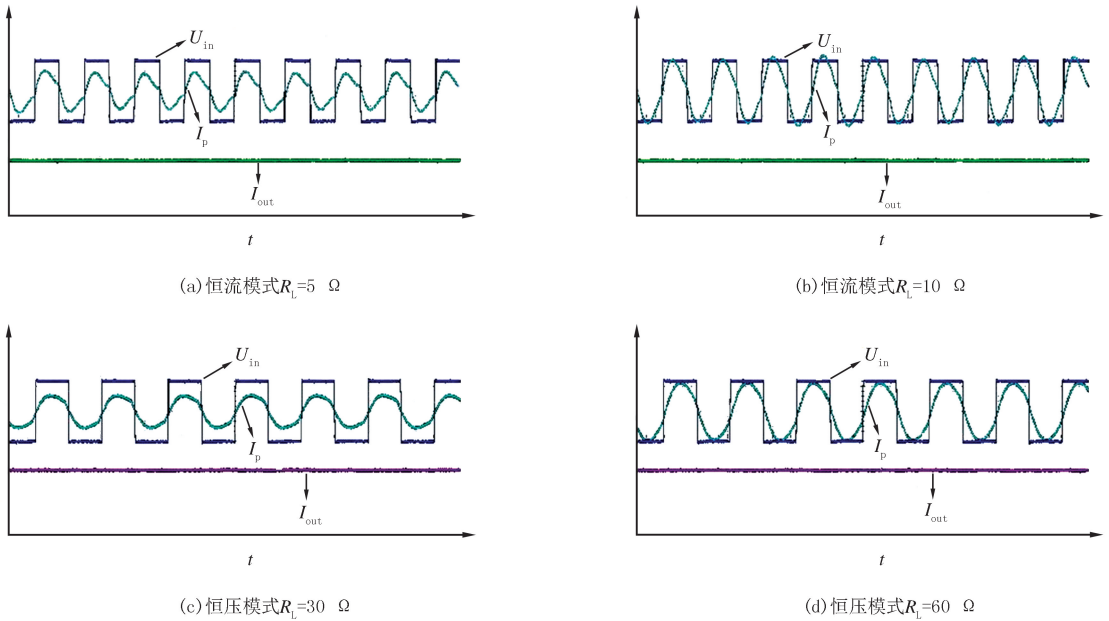


图5 WPT系统在恒流和恒压充电模式下的实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms of the WPT system under CC and CV charging modes

在充电过程中,图 6 描述了不同负载电阻的变化所对应的系统效率曲线.在恒流模式下,系统能量传递效率峰值为 93.4%;恒压模式下,能量传递效率峰值为 94.3%.在整个充电过程中,系统的能量传输效率始终保持在较高的水平,确保了所提出的 S/LCL 补偿 WPT 系统的高效性.值得注意的是,系统在恒流和恒压工作模式下的工作频率分别为 90 kHz 和 68 kHz,恒压频率低于恒流频率,使得恒压模式时的逆变器损耗低于恒流模式时的逆变器损耗,因此恒压工作模式下的效率将会略高于恒流工作模式下的效率.

## 5 结 论

本文提出了 1 种基于 S/LCL 补偿的 WPT 系统,以实现与负载无关的恒流和恒压输出.该系统能够在 2 个固定的工作频率下实现独立于负载的恒流输出和恒压输出.同时,系统能够实现全负载范围内的 ZPA 运

行,从而避免无功功率的注入,保证系统高效运行.此外,系统无需多余的交流开关及复杂的驱动电路,整体所需补偿元件数量少,确保了 WPT 系统的紧凑轻便,并降低了系统的制造成本.本文给出了 S/LCL 补偿 WPT 系统详细的电路分析及参数设计过程,并通过搭建 1 台具有 3 A 输出电流和 80 V 输出电压的实验样机验证了系统的合理性及实用性,实验结果与理论分析基本一致.

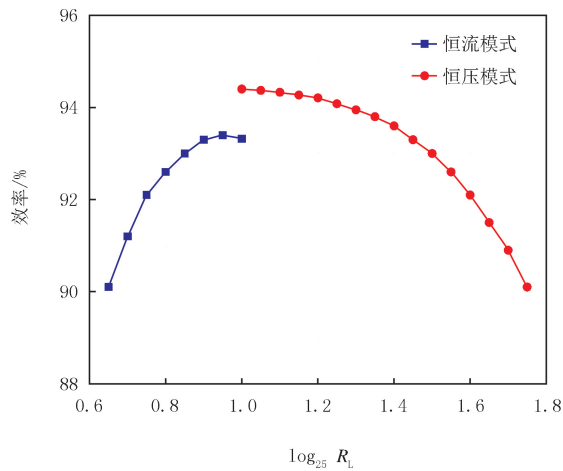


图6 S/LCL补偿WPT系统在整个充电过程中的效率

Fig.6 The efficiency of the proposed S/LCL compensated WPT system in the whole charging process

## 参 考 文 献

- [1] 张剑韬,朱春波,陈清泉.应用于无尾家电的非接触式无线能量传输技术[J].电工技术学报,2014,29(9):33-37.  
ZHANG J T,ZHU C B,CHEN Q Q.Contactless wireless energy transfer technology applied to tail-free household appliances[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(9):33-37.
- [2] LI Y,HU J F,LI X F,et al.Analysis,design,and experimental verification of a mixed high-order compensations-based WPT system with constant current outputs for driving multistring LEDs[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(1):203-213.
- [3] 陈浩,丘东元,张波,等.植入式医疗设备无线供电技术综述[J/OL].电源学报:1-15[2022-12-20].<http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-DYXB20220615001.htm>.
- [4] LI Z Q,LI J,LI S Y,et al.Design and optimization of asymmetric and reverse series coil structure for obtaining quasi-constant mutual inductance in dynamic wireless charging system for electric vehicles[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,2022,71(3):2560-2572.
- [5] 苏玉刚,钱林俊,刘哲,等.水下具有旋转耦合机构的电场耦合无线电能传输系统及参数优化方法[J].电工技术学报,2022,37(10):2399-2410.  
SU Y G,QIAN L J,LIU Z,et al.Underwater electric-field coupled wireless power transfer system with rotary coupler and parameter optimization method[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(10):2399-2410.
- [6] 任碧莹,孙佳,孙向东,等.提高串联锂电池 SOC 在线估计快速性的简化二阶模型[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):110-118.  
REN B Y,SUN J,SUN X D,et al.A simplified second-order model for improving the speed of on-line state of charge estimation of series lithium-ion batteries[J].Power System Protection and Control,2022,50(22):110-118.
- [7] QU X H,HAN H D,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.
- [8] ZHANG W,WONG S C,TSE C K,et al.Load-independent duality of current and voltage outputs of a series-or parallel-compensated inductive power transfer converter with optimized efficiency[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2015,3(1):137-146.
- [9] ZHANG W,MI C C.Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,2016,65(6):4768-4778.
- [10] CHEN Y,LI M X,YANG B,et al.Variable-parameter T-circuit-based IPT system charging battery with constant current or constant voltage output[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(2):1672-1684.
- [11] AUVIGNE C,GERMANO P,LADAS D,et al.A dual-topology ICPT applied to an electric vehicle battery charger[C]//2012 XXth International Conference on Electrical Machines,September 2-5,2012,Marseille;IEEE,2012:2287-2292.

- [12] 邹静,徐耘英,彭娟娟,等.基于频率切换实现电池恒流和恒压充电的 LCC-S 补偿 WPT 系统研究[J].电源学报,2023,21(3):117-124.  
ZOU J,XU Y Y,PENG J J,et al.Research on LCC-S compensated WPT system based on frequency switching to realize CC and CV charging for battery[J].Journal of Power Supply,2023,21(3):117-124.
- [13] 蒋昭,赵晋斌,张俊伟,等.基于 DS-LCC 拓扑抗偏移性的建模与优化[J].电力系统保护与控制,2022,50(15):99-108.  
JIANG Z,ZHAO J B,ZHANG J W,et al.Modeling and optimization of anti-offset based on DS-LCC topology[J].Power System Protection and Control,2022,50(15):99-108.
- [14] YANG L,LI X M,LIU S,et al.Analysis and design of three-coil structure WPT system with constant output current and voltage for battery charging applications[J].IEEE Access,2019,7:87334-87344.
- [15] TRAN D H,VU V B,CHOI W.Design of a high-efficiency wireless power transfer system with intermediate coils for the on-board chargers of electric vehicles[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(1):175-187.
- [16] CAI C S,WANG J H,FANG Z J,et al.Design and optimization of load-independent magnetic resonant wireless charging system for electric vehicles[J].IEEE Access,2018,6:17264-17274.

## Research on S/LCL compensated constant current and constant voltage WPT system based on frequency switching

Yang Lin<sup>1</sup>, Shao Shuai<sup>1</sup>, Yu Wenyan<sup>1</sup>, Zhou Xuebin<sup>2</sup>

(1. College of Electronics and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. College of Intelligent Manufacturing, Hunan University of Science and Technology, Yongzhou 425199, China)

**Abstract:** Since the traditional plug-in system has a complicated structure and is prone to dangers such as electric sparks due to frequent plugging and unplugging, wireless power transfer(WPT) system has been extensively studied, and due to its inherent advantages has gradually been integrated into various industrial applications. In order to ensure battery performance and lifespan, it is essential to provide the required constant charging current and constant charging voltage effectively. However, during the charging process, the equivalent resistance of the battery undergoes significant changes, making it difficult for the system to simultaneously achieve load-independent constant current output and constant voltage output under approximately zero phase angle(ZPA) operation. In view of this, this paper proposes a S/LCL compensation-based WPT system that can achieve constant current and constant voltage output with ZPA operation at two fixed frequencies. Finally, a verification experimental prototype with a constant current charging of 3 A and a constant voltage charging of 80 V was built to verify the correctness and feasibility of the designed WPT system.

**Keywords:** WPT; S/LCL; ZPA; constant current output; constant voltage output

[责任编辑 杨浦 刘洋]