DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.4006

兼具有源滤波功能的单相车载充电机研究

黄鹏宇，罗朝旭

（湖南工业大学 交通与电气工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：基于传统单相 OBC 拓扑结构，在不增加额外硬件的前提下，通过功率器件复用和控制策略优化，实现了充电（G2V）、放电（V2G）及公共耦合点谐波与无功补偿的统一运行。同时，建立了系统的等效连续模型，设计了基于 SOGI-FLL 的谐波与无功检测方法，并结合双分数阶快速重复控制实现了多频点高精度电流补偿。仿真结果表明，所提方案能够在保证双向能量交互的同时，有效抑制 5~15 次谐波电流、降低 THD 值并改善电压稳定性，为“源网荷储”一体化运行提供了一种高效的电力电子接口形式。

关键词：“源网荷储”协同；车载充电机；有源滤波；功能复用；分数阶重复控制

中图分类号：TP273　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)04−0040−06

引文格式：黄鹏宇，罗朝旭 . 兼具有源滤波功能的单相车载充电机研究 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(4)：40−45.

Research on Single-Phase On-Board Chargers with Integrated Active Filtering Function

HUANG Pengyu，LUO Zhaoxu

（School of Transportation and Electrical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Based on the traditional single-phase OBC topology, a unified operation has been achieved of charging (G2V), discharging (V2G), and harmonic and reactive power compensation at the point of common coupling, through power device reuse and control strategy optimization without adding additional hardware. An equivalent continuous model of the system is established, with a harmonic and reactive power detection method designed based on SOGI-FLL. Furthermore, multi-frequency high-precision current compensation can be achieved with dual fractional-order fast repetitive control combined. Simulation results demonstrate that the proposed scheme can effectively suppress 5th to 15th harmonic currents, reduce THD, and improve voltage stability while ensuring bidirectional energy interaction, thus providing an efficient power electronic interface form for the integrated operation of “source-grid-load-storage” (SGLS).

Keywords：source-grid-load-storage coordination；on-board charger (OBC)；active power filter；functional reuse；fractional-order repetitive control

0　引言

随着新能源的高比例接入和电动汽车的大规模应用，电力系统正加速向“清洁低碳、安全高效”的新型格局演进。在这一背景下，“源网荷储”的协同运行已成为保障电力系统安全、提升灵活性与优化电能质量的重要手段。电动汽车作为分布式储能单元，其车载充电机（on-board charger，OBC）不仅是能量交换接口，更被赋予电网友好性和电能质量支撑的潜在价值。

收稿日期：2025−09−10

作者简介：黄鹏宇，男，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为电源技术与电能质量，E-mail：1051283520@qq.com

通信作者：罗朝旭，男，湖南工业大学副教授，主要研究方向为电力电子变换器建模与控制，先进电能质量控制等，E-mail：553171087@qq.com

传统有源电力滤波器（active power filter，APF）能够有效抑制谐波、改善电能质量，但独立部署会带来额外成本和系统复杂度[1−9]。近年来，研究者们尝试将滤波功能嵌入已有的能量转换设备中，实现功能复用与一体化运行。如文献 [10] 基于三相光伏并网逆变器控制，将 APF 功能嵌入控制层，实现了并网发电与谐波补偿的统一控制。文献 [11] 针对单相光伏系统，引入参考电流重构机制，使最大功率点跟踪（maximum power point tracking，MPPT）与谐波治理兼容运行。文献 [12] 在三相四开关逆变器拓扑的基础上融入滤波控制逻辑，在降低成本的同时获得了良好的谐波抑制效果。文献 [13] 将储能单元与 APF 功能融合，通过并联拓扑实现电池充放电与谐波补偿的协调控制。这些探索表明[14−18]，将电能质量治理与能量交换统一至同一接口，不仅能够提高设备利用率，还能增强配电网在源网荷储一体化场景下的运行灵活性。

基于此，本研究基于传统单相 OBC 架构，利用功率器件复用与控制策略优化，实现了充电、放电与谐波补偿功能的统一运行。设计了一种基于二阶广义积分器－锁频环（second-order generalized integrator–frequency locked loop，SOGI-FLL）的谐波与无功检测方法，并采用双分数阶快速重复控制器保证多频点电流的高精度跟踪，使得 OBC 能够兼顾用户侧能量需求与电网侧电能质量优化，提升整体系统运行的灵活性与稳定性。

1　系统拓扑结构及数学模型

1.1　系统拓扑结构

图 1 为典型单相车载充电机采用的两级拓扑结构，由前级整流 PFC（power factor corrcetion）模块和后级隔离型双向 DC-DC 变换器构成。其中，整流级采用单相图腾柱 PFC 结构，具备高功率因数控制能力和电流谐波抑制能力，能够将电网电能整流升压至直流母线；隔离级则采用双向 CLLC 谐振变换器，可根据需要实现恒压 / 恒流充电或电池向母线的反向放电，为能量的双向传递功能提供接口支持。

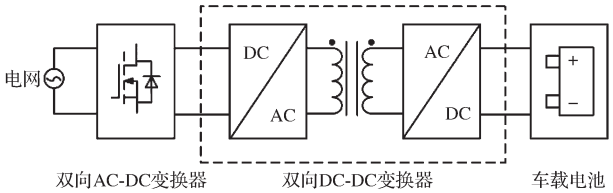


图 1　两级式车载充电机结构示意图

Fig. 1　Two-stage on-board charger structure

如图 2 所示，源网荷储协调优化系统架构涵盖微型燃气轮机、光伏、风力等分布式电源，以及储能设备与电动汽车。各类电源经由微网侧统一接入公共耦合点（PCC），实现对用户侧负荷和大电网的双向能量交互。然而，由于分布式电源逆变器、电动汽车充电设备及部分非线性负荷并网运行，系统电流中往往含有谐波和无功分量，可能导致电能质量下降，甚至引发电压畸变与设备损耗增加。储能单元与电动汽车除具备能量调节能力外，其车载充电机（OBC）通过前级变换器的功能复用，可在能量交互的同时承担有源滤波任务，实现谐波抑制和无功补偿，从而提升系统整体的电能质量与运行稳定性。

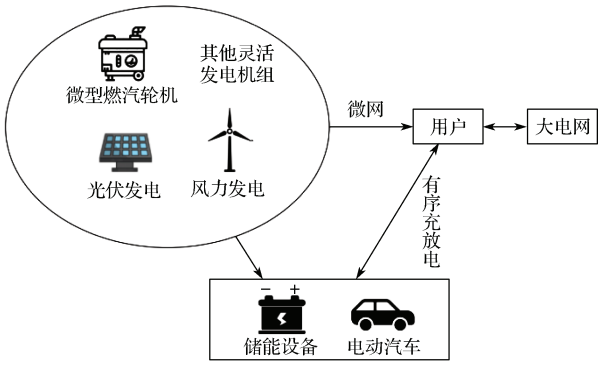


图 2　“源网荷储”协调优化系统架构

Fig. 2　System architecture under source-grid-load-storage coordinated optimization

OBC 前级变换器在控制作用下可被等效为一频率选择性导纳支路。在谐波频段，OBC 通过构建低阻抗通道，将 PCC 点谐波电压 $u_h(s)$ 所激发的谐波电流吸引至自身回路，其频域等效关系可表示为

$$i_h(s)=Y_{\mathrm{OBC}}(s)u_h(s)\ 。$$

式中：$i_h(s)$ 为谐波补偿电流；$Y_{\mathrm{OBC}}(s)$ 为 OBC 在各谐波频率下的等效虚拟导纳，其大小由电流控制器的频率响应塑形决定。

通过在典型次谐波（如 5, 7, 11 次等）处构建高增益特性，OBC 能实现多阶谐波的主动抑制。在基波频率 ω_0 下，OBC 还可通过调节电流正交分量实现无功功率补偿。其基波电流可分解为

$$i(t)=i_p(t)+i_q(t)\ ,$$

式中：$i_p(t)$ 为与电压同相的有功分量；$i_q(t)$ 为与电压正交的无功分量。

通过控制器实时调节 $i_q(t)$，OBC 等效地提供或吸收无功功率 Q，其表达式为

$$Q=U_1 I_q\ ,$$

式中：U_1 为基波电压幅值；I_q 为电流正交分量的有效值。

由此可得 OBC 在频域下的统一等效虚拟导纳为

$$Y_{\mathrm{OBC}}(\mathrm{j}\omega)=\begin{cases}Y_h(\mathrm{j}\omega),\omega=h\omega_0,h=5,7,11,\cdots;\\ \mathrm{j}Q/U_1^2,\omega=\omega_0。\end{cases}$$

1.2 系统数学模型

图 3 为单相车载充电机等效电路，系统由前级 PFC 变换器、直流母线电容、隔离型双向 DC/DC 电路及动力电池组成。

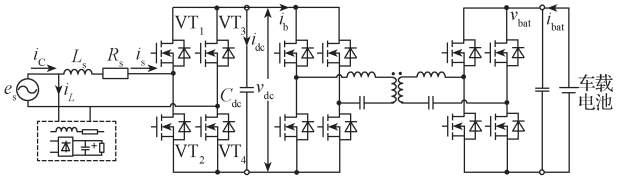


图 3 单相车载充电机等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of single-phase on-board charger

图 3 中，e_s 为电网电压，L_s 为并网滤波电感，R_s 为等效电阻，i_s 为并网电流；v_{dc} 为母线电压，i_b 为母线侧受控电流源，用于表征电池侧充放电功率需求，C_{dc} 为平波电容；后级 DC/DC 电路实现电气隔离与电池电压调节，v_{bat} 为电池端电压，i_{bat} 为电池电流。

对前级采用 PWM 平均化，等效为受控电压源 $v_{inv}(t)=m(t)v_{dc}(t)$，其中 $m(t)$ 为调制比。

滤波电感与母线电容的动态方程如下：

$$\begin{cases}L\dfrac{\mathrm{d}i_s}{\mathrm{d}t}+Ri_s=e_s(t)-m(t)v_{dc}(t),\\ C\dfrac{\mathrm{d}v_{dc}}{\mathrm{d}t}=m(t)i_s(t)-i_b(t)。\end{cases}$$

式中：L、R、C 分别为滤波电感、电阻与母线电容；$i_b(t)$ 为后级 DC/DC 等效电流，代表电池充放电功率需求。

在稳态工作点（i_{s0}，v_{dc0}，m_0，i_{b0}）附近，引入小扰动量并在拉普拉斯域下表示，定义为

$$A(s)=Ls+R,B(s)=Cs,\Delta(s)=A(s)B(s)+m_0^2。$$

经过线性化与代数消元，可得传递函数为

$$G_{i,m}(s)=I_s(s)/\tilde{M}(s)=-\left(v_{dc0}B(s)+m_0i_{s0}\right)/\Delta(s),$$

$$G_{v,m}(s)=\tilde{V}_{dc}(s)/\tilde{M}(s)=A(s)i_{s0}-m_0v_{dc0}/\Delta(s),$$

$$G_{i,i_b}(s)=\tilde{I}_s(s)/\tilde{I}_b(s)=m_0/\Delta(s),$$

$$G_{v,i_b}(s)=\tilde{V}_{dc}(s)/\tilde{I}_b(s)=-A(s)/\Delta(s)。$$

由此，调制比 $m(t)$ 作为控制器的统一驱动变量，既作用于电流通道，也作用于电压通道；后级等效电流 i_b 受电池特性与电池荷电状态（state of charge，SOC）约束，决定系统能量交互的幅度和持续性。

2 系统工作模式与统一控制

图 4 为 OBC 与有源滤波统一控制器的具体控制策略。当车载充电机处于充 / 放电运行状态时，开关 S 置于端子 2，前级变换器在执行电池充电（grid to vehicle，G2V）或放电（vehicle to grid，V2G）任务的同时，叠加谐波与无功补偿，实现双向能量交互与电能质量治理的统一控制；当电池暂不参与能量交互时，开关 S 置于端子 1，前级变换器单独运行于有源滤波模式，以改善并网点电能质量。下面分别介绍两种运行模式的工作原理。

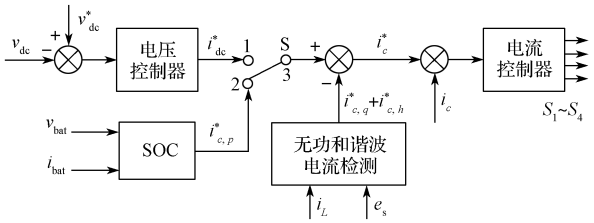


图 4 系统统一控制策略

Fig. 4 Unified control strategy of the system

2.1 单一有源滤波模式

当 OBC 暂不充 / 放电时，电池端与直流母线隔离，前级变换器在电压控制器作用下稳定直流母线电压。此时谐波检测单元提取并网电流中的谐波分量，电流控制器根据补偿指令驱动变换器，使 OBC 等效为单相有源电力滤波器，实现谐波抑制与电能质量改善。

2.2 双向充放电与有源滤波统一控制模式

在充电（G2V）或放电（V2G）运行时，外环根据电池需求生成基波有功电流参考，谐波检测单元提供谐波 / 无功分量，二者叠加形成综合电流指令。OBC 在完成能量双向交互的同时注入补偿电流，实现滤波与充放电的统一控制。系统可根据 SOC 和电能质量指标在两种模式间自动切换，从而兼顾能量管理与电能质量优化。

2.3 谐波和无功电流检测

单相电流中通常含有基波有功、无功以及高次谐波等分量。为了实现车载充电机的无功补偿与有源滤波功能，本文采用 SOGI-FLL 检测方法。该方法能够在电网频率波动条件下生成稳定的正交信号，从而完成电流分解与补偿参考信号的生成。

设电网电压为 u_s，经 SOGI 环节得到正交分量 u_α、u_β，其状态方程为

$$\begin{cases}\dot{u}_\alpha=-k\hat{\omega}(u_\alpha-u_s)-\hat{\omega}u_\beta,\\ \dot{u}_\beta=\hat{\omega}u_\alpha。\end{cases}$$

式中：$\hat{\omega}$ 为由功率锁相环估计得到的电网基波角频率；k 为阻尼系数，决定系统的带宽与动态性能。

类似地，将电流 i_s 输入同样结构，可得到其正交分量 i_α、i_β。

频率锁定环通过正交分量间的误差信号修正频

率，更新律为 $\dot{\hat{\omega}}=-\gamma u_\alpha u_\beta$，式中 γ 为调节系数。

通过该机制，$\hat{\omega}$ 能实时跟踪电网实际频率，从而保证正交分量保持 90° 相移关系。基于电压、电流正交分量，可定义瞬时有功功率 p 与无功功率 q 为

$$p=u_\alpha i_\alpha+u_\beta i_\beta,\quad q=u_\alpha i_\beta-u_\beta i_\alpha\ ,$$

进而得到基波有功电流 i_p 和无功电流 i_q 分别为

$$i_p=\frac{p}{u_\alpha^2+u_\beta^2}u_\alpha,\quad i_q=\frac{q}{u_\alpha^2+u_\beta^2}u_\beta\ 。$$

总电流中去除基波分量后的部分为谐波电流 i_h，其表达式为 $i_h=i_\mathrm{s}-\left(i_p+i_q\right)$，

若要同时实现无功补偿与谐波抑制，则补偿参考电流 i_{comp}^* 为 $i_{\mathrm{comp}}^*=-\left(i_q+i_h\right)$。

2.4　电流和电压控制器设计

为实现车载充电机的充放电与电能质量治理的统一控制，本系统采用外电压环与内电流环的双闭环结构。外电压环负责保证直流母线电压稳定，并根据电池状态生成基波有功电流参考；内电流环负责使并网电流精确跟踪综合参考，实现基波有功控制、无功补偿及谐波抑制。内环的被控对象为传递函数 $G_{i,\,m}(s)$。为在基波及其低次谐波频点处实现零稳态误差，并提升对电网频率波动的鲁棒性，本文采用双分数阶快速重复控制。

控制器在 z 域的形式 $G_{\mathrm{DF}}(z)$ 为

$$G_{\mathrm{DF}}(z)=F_{\mathrm{lead}}(z)Q(z)z^{-N-\alpha}/\left[1-Q(z)z^{-N-\alpha}\right],$$

式中：N 为基波周期对应的采样点数，且 $N=f_\mathrm{s}/f_0$，其中 f_s 为采样频率，f_0 为电网频率；$\alpha\in(0,\ 1)$ 为分数阶延迟参数，用于补偿整数延时与实际频率间的偏差；$Q(z)$ 为低通滤波器，用于限定控制器的有效作用频带；$F_{\mathrm{lead}}(z)$ 为分数阶超前补偿器，用于提高相位裕度。

分数延时项 $z^{-N-\alpha}$ 通过拉格朗日插值近似：

$$z^{-N-\alpha}\approx\sum_{r=0}^{M}\ell_r(\alpha)z^{-N-r}\ ,$$

$$\ell_r(\alpha)=\prod_{j=0;\ j\neq r}^{M}\frac{\alpha-j}{r-j},\ r=0,\ 1,\ \cdots,M\ 。$$

分数阶超前补偿器采用并联若干 1 阶 /2 阶环节近似表示为 $F_{\mathrm{lead}}(z)\approx\sum_{p=0}^{P}w_p\frac{1+a_pz^{-1}}{1+b_pz^{-1}}z^{-p}$，式中系数 w_p、a_p、b_p 通过频域拟合确定，以保证在基波及谐波频点具有足够的相位提前。

直流母线电压环采用 PI 控制器，其传递函数为

$$I_\mathrm{P}^*(s)=K_{\mathrm{pv}}(V_{\mathrm{dc}}^*(s)-V_{\mathrm{dc}}(s))+K_{\mathrm{Iv}}\frac{1}{s}\left(V_{\mathrm{dc}}^*(s)-V_{\mathrm{dc}}(s)\right)\ ,$$

式中：K_{Pv}、K_{Iv} 分别为（proportional-integral，PI）控制器参数。

3　仿真实验与结果分析

3.1　仿真实验参数设置

为验证集成有源滤波功能的单相 OBC 的运行性能，基于 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型。前级单相全桥 AC/DC 变换器在双分数阶快速重复控制电流控制器与 PI 电压控制器作用下实现能量交换与电能质量治理；谐波与无功分量通过 SOGI-FLL 提取并叠加至电流参考。系统各模块关键参数如表 1 所示。

表 1　系统仿真参数

Table 1　System simulation parameters

模　块	参　数	参数值
电网电压	工频基波 + 5%, 7%, 11% 谐波	220 V RMS, 50 Hz
电网等效阻抗	电感 + 电阻	10 mH + 0.1 Ω
PFC 变换器	开关频率	20 kHz
控制器采样频率	f_s	10 kHz
控制器参数	重复周期 N，插值阶数 n	N=200, n=3

3.2　仿真结果分析

在单一有源滤波模式下，OBC 的电池侧与直流母线隔离，仅由前级整流器承担谐波与无功补偿功能。图 5 给出了未投入 OBC 时的单相电压电流波形。

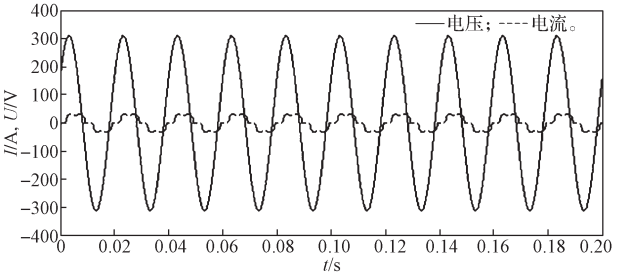


图 5　未投入 OBC 时单相电压和电流波形

Fig. 5　Waveforms of single-phase voltage and current without OBC operation

由图 5 可知，系统电流与电压存在明显相位差，且电流波形畸变严重。

对电流信号进行 FFT 分析，其频谱如图 6 所示，总谐波畸变率（total harmonic distortion，THD）高达 24.72%，超过国家规定的 5% 标准，且谐波成分主要集中在 5 次、7 次等特征频率，表明负载性质为典型非线性负载。

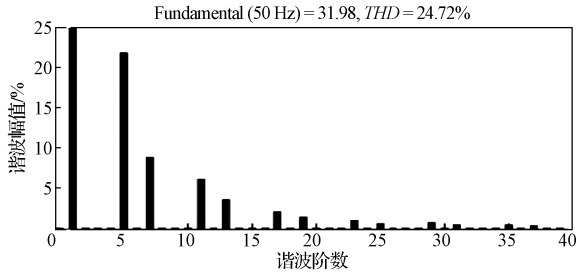


图 6 未投入 OBC 时单相电流频谱图

Fig. 6 Single-phase current distortion analysis without OBC operation

当 OBC 投入运行后，其等效为单相有源电力滤波器，能够主动注入谐波补偿电流。图 7 为补偿后的单相电流波形，电流明显趋于正弦，与电压相位保持一致。对应频谱如图 8 所示，主要特征谐波幅值显著衰减，此时电流 THD 值降至 3.12%，符合电能质量标准，验证了 OBC 在单一滤波模式下对谐波和无功电流的有效抑制与补偿作用。

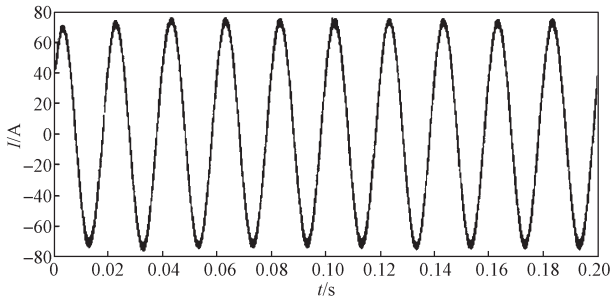


图 7 补偿后单相电流波形

Fig. 7 Single-phase current waveform after compensation

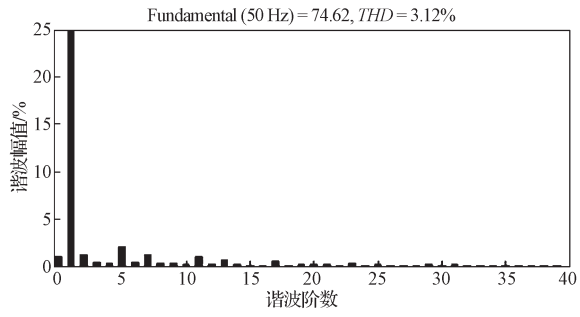


图 8 补偿后单相电流频谱图

Fig. 8 Single-phase current distortion analysis after compensation

进一步地，当系统进入双向充放电与滤波统一控制模式时，OBC 既需完成电池充放电能量交互（G2V/V2G），又需同时承担谐波与无功补偿任务。由图 9 可知，在 t = 0.04 s 时，OBC 由待机状态切换至运行状态，单相电流波形迅速由畸变形态转为正弦，并保持与电压同相，无明显的冲击或振荡现象，说明装置具有良好的动态响应特性。

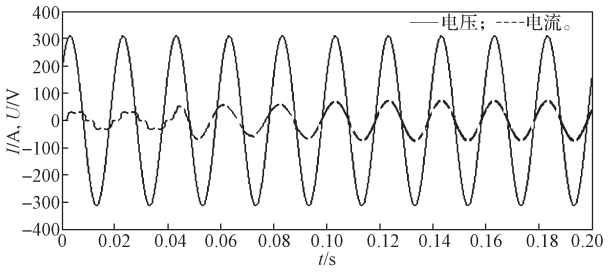


图 9 OBC 投入过程中单相电压和电流波形

Fig. 9 Waveforms of single-phase voltage and current during OBC operation

仿真结果表明，OBC 在复合模式下运行稳定可靠，能够实现电能质量改善与能量管理的协同。

4 结论

本文面向新型电力系统“源网荷储”协同运行需求，研究了一种集成功能复用的单相车载充电机，主要结论如下：

1）通过扩展单相 OBC 控制策略，在不增加额外功率器件的条件下，实现了充电、放电及有源电力滤波功能统一运行，提高了系统集成度与经济性。

2）建立了系统的连续时域等效模型，揭示了 OBC 在能量交互与电能质量治理过程中的耦合机理；结合 SOGI-FLL 的谐波与无功检测方法及双分数阶快速重复控制器，实现了多频点电流的高精度补偿。

3）仿真结果表明，所提方案能显著降低并网电流总谐波畸变率，实现无功补偿并保持直流母线电压稳定，表现出良好的运行鲁棒性与协调性。

综上，OBC 前级拓扑复用为有源电力滤波器及电动汽车参与“源网荷储”一体化运行提供了一种兼顾经济性与实用性的可行路径。

参考文献：

[1] 王晓姬，王道涵，王柄东，等 . 电动汽车驱动 / 充电一体化系统及其控制策略综述 [J]. 电工技术学报，2023，38(22)：5940−5958.
WANG Xiaoji，WANG Daohan，WANG Bingdong，et al. A Review of Drive-Charging Integrated Systems and Control Strategies for Electric Vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(22)：5940−5958.

[2] 于晶荣，粟 梅，孙 尧 . 有源电力滤波器的改进重复控制及其优化设计 [J]. 电工技术学报，2012，27(2)：235−242.
YU Jingrong，SU Mei，SUN Yao. Improved Repetitive Control and Its Optimization for Active Power Filter[J].

Transactions of China Electrotechnical Society，2012，27(2)：235−242.

[3] 周　娟，任国影，魏　琛，等 . 电动汽车交流充电桩谐波分析及谐波抑制研究 [J]. 电力系统保护与控制，2017，45(5)：18−25.
ZHOU Juan，REN Guoying，WEI Chen，et al. Harmonic Analysis of Electric Vehicle AC Charging Spot and Research on Harmonic Restriction[J]. Power System Protection and Control，2017，45(5)：18−25.

[4] 张　允，陆佳政，李　波 . 利用有源滤波功能的新型电动汽车交流充电桩 [J]. 高电压技术，2011，37(1)：150−156.
ZHANG Yun，LU Jiazheng，LI Bo. New Electric Vehicle AC Charge Spots Using Active Power Filter[J]. High Voltage Engineering，2011，37(1)：150−156.

[5] DING X F，SHI H J，WANG Y J，et al. Research on Harmonic Management of Single-Phase AC Charging Pile Based on Active Filtering[J]. Energies，2023，16(6)：2817.

[6] SETH A K，SINGH M. Modified Repetitive Control Design for Two Stage off Board Electric Vehicle Charger[J]. ISA Transactions，2022，128：343−356.

[7] CHALIA S，SETH A K，SINGH M. Frequency Adaptive Discrete Repetitive Controller Design for Electric Vehicle Charger[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics，2025，6(1)：72−81.

[8] 徐群伟，吴　俊，吕文韬，等 . 基于双分数阶快速重复控制的有源电力滤波器电流控制策略 [J]. 电工技术学报，2019，34（增刊 1）：300−311.
XU Qunwei，WU Jun，LÜ Wentao，et al. Current Control Strategy of Active Power Filter Based on Double Fractional-Order Rapid Repetitive Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(S1)：300−311.

[9] 黄　鹏，戴　威，张　莹，等 . 兼具有源电力滤波器功能的多功能并网逆变器控制 [J]. 电力工程技术，2021，40(1)：107−114.
HUANG Peng，DAI Wei，ZHANG Ying，et al. Multi-Function Grid-Connected Inverter Control with APF Function[J]. Electric Power Engineering Technology，2021，40(1)：107−114.

[10] 杜春水，张承慧，刘鑫正，等 . 带有源电力滤波功能的三相光伏并网发电系统控制策略 [J]. 电工技术学报，2010，25(9)：163−169.
DU Chunshui，ZHANG Chenghui，LIU Xinzheng，et al. Control Strategy on the Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Generation System with Shunt Active Power Filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2010，25(9)：163−169.

[11] 吴春华，黄建明，陈卫民，等 . 单相光伏并网与有源滤波的统一控制 [J]. 电工技术学报，2011，26(10)：103−109，117.
WU Chunhua，HUANG Jianming，CHEN Weimin，et al. Unified Control of Single Phase Photovoltaic Grid-Connected and Active Power Filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2011，26(10)：103−109，117.

[12] 谭兴国，冯高明，王　辉，等 . 兼顾有源滤波的三相四开关光伏并网逆变器 [J]. 高电压技术，2014，40(11)：3590−3596.
TAN Xingguo，FENG Gaoming，WANG Hui，et al. Three-Phase Four-Switch Grid-Connected Photovoltaic Inverter Combined with Active Power Filter[J]. High Voltage Engineering，2014，40(11)：3590−3596.

[13] 李圣清，栗伟周，徐文祥，等 . 微电网储能单元与有源电力滤波器的组合研究 [J]. 电力系统保护与控制，2013，41(18)：56−60.
LI Shengqing，LI Weizhou，XU Wenxiang，et al. Combination Research of Micro-Grid Storage Unit and Active Power Filter[J]. Power System Protection and Control，2013，41(18)：56−60.

[14] MOJUMDER M R H，AHMED ANTARA F，HASANUZZAMAN M，et al. Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technologies：Impact on the Power Grid and Battery[J]. Sustainability，2022，14(21)：13856.

[15] NA T P，YUAN X，TANG J Q，et al. A Review of On-Board Integrated Electric Vehicles Charger and a New Single-Phase Integrated Charger[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications，2019，4(4)：288−298.

[16] 蒋颂晴，王海欣，黄海宏 . 一种基于改进滤波的单相谐波检测方法 [J]. 电力电子技术，2023，57(11)：16−18.
JIANG Songqing，WANG Haixin，HUANG Haihong. A Single-Phase Harmonic Detection Method Based on Improved Filtering[J]. Power Electronics，2023，57(11)：16−18.

[17] 黄海宏，杨佳能，吴　晓，等 . 改进单相谐波检测算法在三相四线制 APF 的应用 [J]. 电子测量与仪器学报，2016，30(1)：133−140.
HUANG Haihong，YANG Jianeng，WU Xiao，et al. Application of the Improved Single-Phase Harmonic Detection Algorithm in Three-Phase Four-Wire Active Power Filter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2016，30(1)：133−140.

[18] 张建忠，耿　治，徐　帅，等 . 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法 [J]. 电工技术学报，2019，34(20)：4323−4333.
ZHANG Jianzhong，GENG Zhi，XU Shuai，et al. An Improved Adaptive Harmonic Detection Algorithm for Active Power Filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(20)：4323−4333.

（责任编辑：姜利民）