

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.59

中图分类号: TM351

文献标志码: A

低电压纹波单相电驱重构型车载充电机 研究

汪 治, 於 锋, 朱志豪
(南通大学电气工程学院, 南通 226019)

摘要: 针对单相充电系统输出侧存在的二次功率脉动问题, 提出1种低电压纹波单相电驱重构型车载充电机EDROC(electric drive reconstructed onboard charger)系统。该系统通过传统单相EDROC系统输出侧并联1个Buck/Boost型有源滤波器, 用于吸收或补偿二次功率脉动, 显著降低了充电系统的输出电压纹波。首先, 分析单相EDROC系统的拓扑结构、工作原理和输出侧二次功率脉动产生机理; 然后, 结合Buck/Boost型有源滤波器, 提出1种低电压纹波单相EDROC系统, 并对Buck/Boost型有源滤波器拓扑结构、工作原理以及电感和电容选型进行了详细分析; 接着, 对所提EDROC系统控制策略进行设计; 最后, 设计了1台200 W实验样机, 实验结果验证了所提充电机的可行性。

关键词: 电动汽车; 有源滤波器; 重构型车载充电机; 二次功率脉动

Single-phase Electric Drive Reconstructed Onboard Charger with Low Voltage Ripple

WANG Zhi, YU Feng, ZHU Zhihao
(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Single-phase charging systems usually face the problem of secondary power pulsation. To solve this problem, a single-phase electric drive reconstructed onboard charger (EDROC) system with low voltage ripple is proposed, in which a Buck/Boost active filter is placed in parallel on the output side of a traditional single-phase EDROC system to absorb or compensate the secondary power pulsation, thereby obviously reducing the output voltage ripple of the charging system. First, the topology, working principle and secondary power pulsation generation mechanism of the single-phase EDROC system are analyzed. Second, a single-phase EDROC system with low voltage ripple is put forward by combing the Buck/Boost active filter. Meanwhile, the topology, working principle, and selection of inductors and capacitors of the Buck/Boost active filter are analyzed in detail. Third, a control strategy for the proposed EDROC system is designed. Finally, a 200 W experimental prototype was designed, and experimental results verified the feasibility of the proposed charger.

Keywords: Electric vehicle; active filter; reconstructed onboard charger; secondary power pulsation

随着科技的进步及人们生活水平的提高, 汽车保有量逐年递增, 这加速了化石能源的消耗, 引发

了环境恶化。相比于传统燃油汽车, 电动汽车EV(electric vehicle)以电能为动力源, 不消耗化石能源, 清洁无污染, 是汽车产业未来发展的方向。作为EV的关键指标, 动力电池组的充电时间与续航里程是制约其发展的重要因素^[1]。虽然可以通过充电桩对EV进行快速充电, 但是充电桩存在区域建设密度低、建设土地资源紧缺、建设费用高昂等现实问题, 短期内难以普及^[2]。相比充电桩, 车载充

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-04-22; 网络首发日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177051); 南通市基础科学研究资助项目(JC2021106)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52177051; Basic Scientific Research Project of Nantong City under the grant JC2021106

电机可以在安装电网接口的区域对 EV 充电, 充电方式灵活, 但其仍然存在充电功率低、成本高、体积大等问题。而电驱重构型车载充电机 EDROC (electric drive reconstructed onboard charger) 系统通过重构、复用 EV 内存在的电机与逆变器等, 优化电路拓扑和控制策略以完成整流、DC-DC 变换、单位功率因数校正等, 在降低车载充电机成本与体积的同时实现了 EV 快速充电^[3]。

文献[3]提出了 1 种单相 EDROC, 通过复用三相永磁同步电机 PMSM(permanent magnet synchronous machine)绕组、大额定逆变器装置和控制电路, 能够分时执行电驱与单相充电这 2 种变流功能。但是, 在 EV 单相充电应用中, 直流母线端会存在二次功率脉动问题, 输出端存在二次功率脉动, 将会引起显著的电池充电电压纹波^[4-5], 这将导致充电过程中 EV 动力电池过热, 降低电池的使用寿命^[6-7], 进而影响 EV 充电效率^[8-12]。针对该问题, 通常采用有源滤波器抑制单相整流应用中直流母线存在的功率脉动^[13-16], 文献[17]采用了 1 种双向 Buck/Boost 型有源滤波器, 在降压模式下从直流母线吸收纹波能量, 在升压模式下将纹波能量补偿给直流母线, 适用于储能电容电压不允许超过直流母线的应用场合。在文献[17]的基础上, 文献[18]采用了另 1 种 Buck/Boost 型有源滤波器, 其辅助电容电压可以调节至高于或者低于母线电压, 即在同样的电容条件下能够存放更多的纹波能量, 可以拓宽其滤波范围。针对文献[3]研究存在的问题, 结合文献[18]所提有源滤波器, 本文提出了 1 种 EV 用低电压纹波单相 EDROC 系统, 通过系统输出侧并联的 Buck/Boost 型有源滤波器对输出侧的二次功率脉动进行吸收或补偿, 显著降低了单相 EDROC 系统输出电压纹波。

1 单相电驱重构型车载充电机

1.1 电路拓扑及原理

如图 1 所示, 单相 EDROC 系统主要由不控整流桥、PMSM、三相逆变器和电池组成。当接触器

K 断开时, 系统工作在电驱状态, 此时电池通过逆变器将直流电转化为交流电驱动 PMSM 运行; 当接触器 K 闭合时, PMSM 的中性点与整流器的正极输出端相连, 系统工作在充电状态。此时, PMSM 绕组及其连接的逆变器被重构为 1 个三通道 Boost 变换器, 其中 PMSM 的三相绕组复用为三通道 Boost 电路的升压电感, 三相逆变器的上桥臂 S_1 、 S_3 、 S_5 仅利用其续流二极管, 开关管保持断开状态, 下桥臂 S_2 、 S_4 、 S_6 作为开关管对其进行控制。单相电源经过整流桥整流后, 在通过三通道 Boost 变换器实现单位功率因数运行的同时, 对 EV 充电。

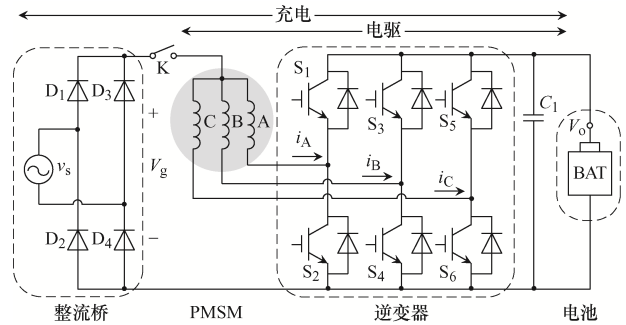


图 1 单相 EDROC 系统电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of single-phase EDROC system

1.2 二次功率脉动分析

假设 EDROC 系统单位功率因数运行, 则输入侧电压、电流可以表示为

$$v_s(t) = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: V_s 和 I_s 分别为输入电压有效值和输入电流有效值; ω 为电网角频率。基于此, EDROC 系统瞬时输入功率可表示为

$$P_{in}(t) = v_s(t)i_s(t) = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2}I_s \sin(\omega t) = V_s I_s - V_s I_s \cos(2\omega t) \quad (3)$$

式中: $V_s I_s$ 为 EDROC 系统输入功率直流分量; $V_s I_s \cos(2\omega t)$ 为 EDROC 系统输入功率二次功率脉动。因此, EDROC 系统输入功率 $P_{in}(t)$ 可以分为 2 个部分, 即

$$\begin{cases} P_{in}(t) = P_o - P_r(t) \\ P_o = V_s I_s \\ P_r(t) = V_s I_s \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_o 为输入功率直流分量; $P_r(t)$ 为输入功率二次功率脉动。在 EV 充电过程中, 二次功率脉动将导致充电电压剧烈脉动^[15], 这不仅会引起电池发热, 还会降低系统充电效率。

2 低电压纹波单相 EDROC

2.1 拓扑结构及模态分析

为了降低二次功率脉动对系统性能的影响, 减小充电电压纹波, 本文在原有单相 EDROC 系统的基础上, 通过在系统输出侧并联 1 个 Buck/Boost 型有源滤波器, 提出 1 种低电压纹波单相 EDROC 系统, 如图 2 所示。增加的 Buck/Boost 型有源滤波器主要由 2 个开关管 Q_1 和 Q_2 、1 个储能电感 L_a 和 1 个储能电容 C_a 组成。当二次功率脉动分量 $P_r(t) < 0$ 时, 储能电容 C_a 处于充电状态, 此时脉动能量被存储在电容中; 当二次功率脉动分量 $P_r(t) > 0$ 时, 储能电容 C_a 处于放电状态, 此时电容中存储的纹波能量对二次功率脉动进行补偿。该有源滤波器通过对二次功率脉动吸收和补偿, 进而抑制了输出电压纹波。

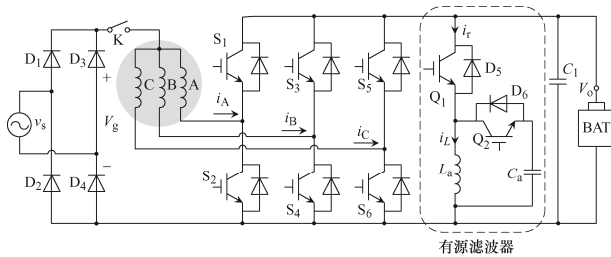


图 2 低电压纹波型单相 EDROC 电路拓扑

Fig. 2 Circuit topology of single-phase EDROC system with low voltage ripple

由于该 Buck/Boost 型有源滤波器有 2 个开关管, 因此其存在 4 种工作模式, 如图 3 所示。当二次功率脉动分量 $P_r(t) < 0$ 时, 脉动能量通过 L_a 由输出侧存储至 C_a 中。如图 3(a)所示, Q_1 闭合, Q_2 打开, 滤波器工作在模式 I, 电感 L_a 充电, 脉动能量被存储至 L_a 中; 如图 3(b)所示, Q_1 和 Q_2 打开, 滤波器工作在模式 II, 电感 L_a 中的能量经过 Q_2 的反并联二极管存储至 C_a 中。当二次功率脉动分量 $P_r(t) > 0$ 时, 存储在 C_a 中的脉动能量通过 L_a 补偿至

输出侧。如图 3(c)所示, Q_2 闭合, Q_1 打开, 滤波器工作在模式 III, 电感 L_a 充电, 脉动能量从 C_a 转移到 L_a 中; 如图 3(d)所示, Q_1 和 Q_2 打开, 滤波器工作在模式 IV, 电感 L_a 中存储的能量经过 Q_1 的反并联二极管补偿至输出侧。

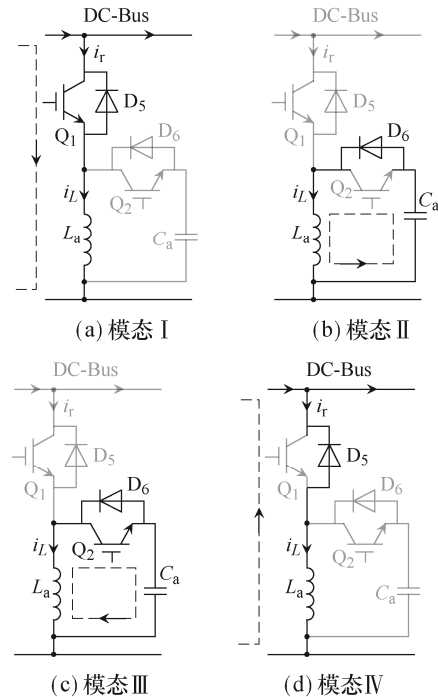


图 3 有源滤波器的 4 种运行模式

Fig. 3 Four operating modes of active filter

2.2 储能电容计算

由于单相 EDROC 输出侧二次功率脉动能量最终要存储在有源滤波器的储能电容 C_a 中, 因此 C_a 的选型对系统性能提升至关重要。存储在电容 C_a 中的二次功率脉动能量可以通过对式(4)中的 $P_r(t)$ 积分得到, 即

$$\begin{cases} E_r = \int_{\theta_a}^{\theta_b} P_r(t) dt = \int_{\theta_a}^{\theta_b} V_s I_s \cos(2\omega t) dt = \frac{V_s I_s}{\omega} \\ \theta_a = \frac{3}{4}\pi + k\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \theta_b = \frac{5}{4}\pi + k\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_r 为脉动能量; θ_a 为功率脉动大于 0 对应的电网相角位置; θ_b 为功率脉动小于 0 对应的电网相角位置。Buck/Boost 型有源滤波器中的储能电容 C_a 在 θ_a 位置开始充电, 在 θ_b 位置结束充电, 由于储能电容 C_a 需要存储这部分能量, 因此 E_r 应小于

等于储能电容 C_a 允许存储的能量最大值。 C_a 允许存储能量大小与其两端电压和容值之间的关系为

$$\frac{1}{2}C'\left(V_{a0}^* + \frac{1}{2}\Delta V_a\right)^2 - \frac{1}{2}C'\left(V_{a0}^* - \frac{1}{2}\Delta V_a\right)^2 = C'V_{a0}^*\Delta V_a \quad (6)$$

式中： C' 为储能电容 C_a 的容值； V_{a0}^* 为储能电容 C_a 电压的给定值； ΔV_a 为储能电容 C_a 的电压纹波。

由式(6)可以看出， C_a 允许存储能量随着 V_{a0}^* 、 C' 、 ΔV_a 的增大而增大。因此，当 C_a 允许存储能量恒定时，增大 V_{a0}^* 可以使 C' 或者电压纹波减小。令 $C'V_{a0}^*\Delta V_a = E_r$ ，只要确定 V_{a0}^* ，就可以根据储能电容 C_a 两端电压纹波的要求来确定储能电容 C_a 的大小。在实验中， $V_{a0}^* = 200 \text{ V}$ ， $E_r = V_s I_s / \omega = 0.812 \text{ J}$ ， $\Delta V_a = 10 \text{ V}$ ， $C' = 0.000 406 \text{ F}$ ，由于储能电容需要存放的最小纹波能量为 E_r ，则储能电容 C_a 最小值为 0.406 mF ，本文选取 $C_a = 0.47 \text{ mF}$ 。

2.3 占空比与储能电感计算

图 4 为有源滤波器电感电流计算示意。

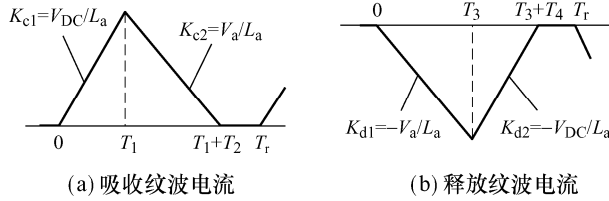


图 4 有源滤波器电感电流计算示意

Fig. 4 Schematic of active filter inductor current calculation

如图 4(a)所示，当二次功率脉动分量 $P_r(t) < 0$ 时，假设有源滤波器开关管 Q_1 的占空比 $D_c = T_1/T_r$ ，其中 T_1 为 Q_1 的导通时间， T_r 为 Q_1 和 Q_2 的开关周期。当 Q_1 打开时，有源滤波器的储能电感 L_a 两端的电压为 V_{DC} ，此时电感 L_a 的电流变化率为

$$K_{c1} = \frac{V_{DC}}{L_a} \quad (7)$$

当 Q_1 闭合时，储能电感 L_a 与电容 C_a 并联，此时电感 L_a 电流的变化率为

$$K_{c2} = -\frac{V_a}{L_a} \quad (8)$$

式中， V_a 为电容 C_a 的电压。在 $0 \sim T_1$ 时段，储能电感充电，脉动能量从输出侧传输至储能电感 L_a ，电

感电流上升。此时，假设在 1 个开关周期内输出侧电压 V_{DC} 恒定，为了完全吸收脉动能量，输出侧脉动电流参考值可表示为

$$i_r^* T_r = \frac{1}{2} K_{c2} T_1^2 \quad (9)$$

式中， i_r^* 为输出侧脉动电流参考值。因此 Q_1 的占空比 D_c 为

$$D_c = \sqrt{\frac{2i_r^* f_r L_a}{V_{DC}}} \quad (10)$$

式中， f_r 为 Q_1 和 Q_2 的开关频率。由式(10)可以看出， D_c 随着 i_r^* 的增大而增大。此外，因为储能电感 L_a 工作在断续状态， Q_1 的导通与关断时间满足

$$K_{c1} T_1 = -K_{c2} T_2 \quad (11)$$

因此，储能电感 L_a 电流下降的时间 T_2 可以表示为

$$T_2 = \frac{D_c T_r K_{c1}}{-K_{c2}} = \frac{D_c V_{DC}}{f_r V_a} \quad (12)$$

如图 4(b)所示，当二次功率脉动分量 $P_r(t) > 0$ 时，假设有源滤波器开关管 Q_2 的占空比 $D_d = T_3/T_r$ ，其中 T_3 为 Q_2 的导通时间，同理可得 Q_2 的占空比 D_d 、储能电感 L_a 电流的下降时间 T_3 和上升时间 T_4 ，可表示为

$$D_d = \frac{\sqrt{-2i_r^* f_r L_a V_{DC}}}{V_a} \quad (13)$$

$$T_3 = \frac{D_d V_a}{f_r V_{DC}} \quad (14)$$

$$T_4 = \frac{D_d V_a^2}{f_r V_{DC}^2} \quad (15)$$

由于储能电感 L_a 始终工作在断续导通状态，必须满足 $T_1 + T_2 \leq T_r$ 和 $T_3 + T_4 \leq T_r$ 。另外，当脉动电流达到最大脉动电流 I_{rm} 且电感电流达到最大峰值电流 I_{lp} 时，储能电感 L_a 工作在临界断续导通状态，此时结合式(7)~式(8)及式(10)~式(15)可以得到工作条件的不等式，即

$$2 \left(\frac{I_{rm}}{I_{lp}} \right)^2 \leq \frac{I_{rm} f_r L_a}{V_{DC}} \leq \frac{V_a^2}{2(V_a + V_{DC})^2} \quad (16)$$

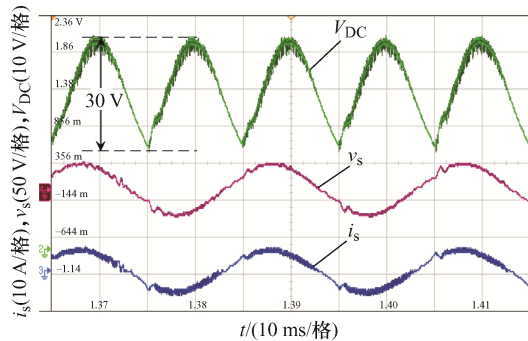
表 1 实验主要参数

Tab. 1 Main parameters of experiment

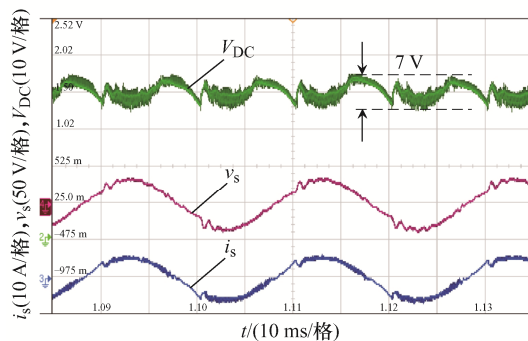
参数	数值
输入功率 P_{in}/W	200
输入交流电压幅值 V_s/V	25
输入电源频率 f/Hz	50
电机绕组电感 $L_A, L_B, L_C/mH$	5
有源滤波器储能电容 $C_a/\mu F$	470
有源滤波器储能电感 L_a/mH	0.055
输出滤波电容 $C_1/\mu F$	470
输出电压 V_{DC}/V	48
负载电阻/ Ω	13.3

图 6(a)为文献[3]所提单相 EDROC 系统实验波形, 可以看到网侧电压 v_s 和网侧电流 i_s 的相位基本一致, 满足单位功率因数运行的要求, 但是系统输出电压 V_{DC} 纹波高达 30 V; 图 6(b)为本文所提低电压纹波单相 EDROC 实验波形, 可以看到网侧电压、电流保持单位功率因数运行, 同时系统输出电压 V_{DC} 纹波由 30 V 降低至 7 V。实验结果表明, 本文所提 EDROC 可以显著降低系统输出侧电压纹波。

图 7 为本文所提低电压纹波单相 EDROC 系统



(a) 文献[3]所提EDROC

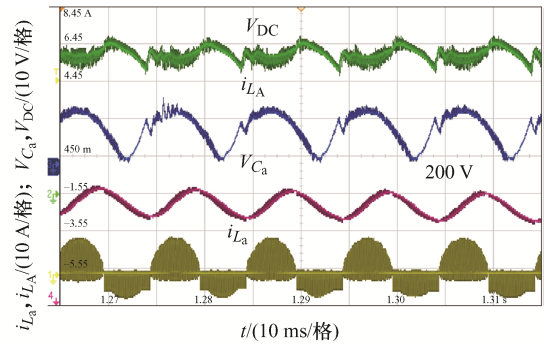


(b) 本文所提EDROC

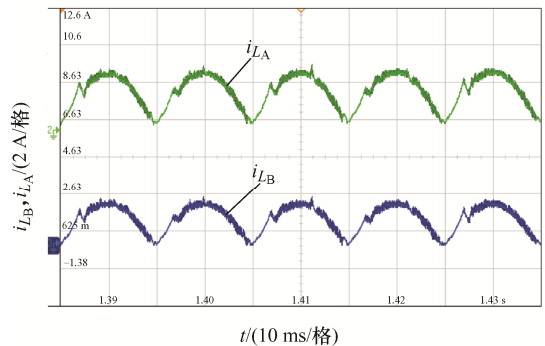
图 6 网侧电压、电流和输出电压实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of grid-side voltage, grid-side current and output voltage

的运行波形。如图 7(a)所示, 储能电容电压 V_a 的平均值跟随其给定值 200 V, 由储能电感电流 i_L 的波形可以看出脉动能量在有源滤波器和输出侧上反复传递, 以吸收输出侧二次功率脉动, 降低输出电压纹波; 图 7(b)中, 相电流波形与相位基本一致, 从而产生零电磁转矩, 确保了 EV 在充电过程中保持静止。



(a) 有源滤波器实验波形



(b) 三相永磁同步电机相电流

图 7 低电压纹波单相 EDROC 系统的运行波形

Fig. 7 Operation waveforms of single-phase EDROC system with low voltage ripple

4 结语

本文针对 EV, 结合 Buck/Boost 型有源滤波器, 提出了 1 种低电压纹波单相 EDROC 系统, 对其电路拓扑、工作原理及电感和电容选型进行了详细分析, 并对其控制策略进行了设计。在此基础上, 搭建了 1 台 200 W 实验样机。实验结果表明, 本文所提 EDROC 系统在保证电动汽车充电过程中处于静止状态的同时, 能显著降低输出侧电压纹波。原单相 EDROC 系统输出端用于滤波的电解电容体积较大, 使用寿命短, 在输出侧并联 Buck/Boost 型有源

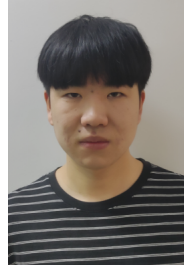
滤波器后, 母线上的功率脉动显著减小, 可以用更加稳定、耐用的薄膜电容替换电解电容。由于充电功率变得平稳, 充电过程中的电池发热量也会随之降低, 然而引入有源滤波器会导致系统硬件成本增加, 这是不可避免的。此外, 外加有源滤波器为系统增加了开关损耗与寄生损耗, 导致系统转换效率降低, 但是充电功率脉动的减小将提升充电效率, 并且会减小充电期间的发热量, 有利于延长电池的使用寿命。

参考文献:

- [1] 於锋, 张蔚, 刘春华, 等. 电动汽车用电驱重构型充电系统及其关键技术综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 16-24.
Yu Feng, Zhang Wei, Liu Chunhua, et al. Overview of electric-drive-reconstructed charger system for electric vehicle and its key technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 16-24. (in Chinese)
- [2] 佟明昊, 程明, 许芷源, 等. 电动汽车用车载集成式充电系统若干关键技术问题及解决方案[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5125-5142.
Tong Minghao, Cheng Ming, Xu Zhiyuan, et al. Key issues and solutions of integrated on-board chargers for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5125-5142. (in Chinese)
- [3] Yu Feng, Zhu Zhihao, Mao Jingfeng, et al. Performance evaluation of a permanent magnet electric-drive-reconfigured onboard charger with active power factor correction [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(1): 72-80.
- [4] 袁义生, 张育源, 钟青峰, 等. 两级式逆变器母线电压二次纹波分析及抑制[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 37-45.
Yuan Yisheng, Zhang Yuyuan, Zhong Qingfeng, et al. Secondary ripple analysis and suppression of the bus voltage in two-stage inverter [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 37-45. (in Chinese)
- [5] 袁义生, 张育源, 陈进, 等. 两级式逆变器中间母线电压低频纹波抑制[J]. 电源学报, 2016, 14(3): 38-46.
Yuan Yisheng, Zhang Yuyuan, Chen Jin, et al. Low frequency ripple rejection of middle bus voltage of two-stage inverter [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 38-46. (in Chinese)
- [6] Li Xiao, Zhang Wenping, Li Haijin, et al. Power management unit with its control for a three-phase fuel cell power system without large electrolytic capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3766-3777.
- [7] Baek J B, Choi W I, Cho B H. Digital adaptive frequency modulation for bidirectional DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(11): 5167-5176.
- [8] 张健彬, 康龙云, 胡竞文, 等. 抑制单相 PWM 整流器二次纹波的模型预测控制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5): 105-107.
Zhang Jianbin, Kang Longyun, Hu Jingwen, et al. A model predictive control method for suppressing secondary ripple of single-phase PWM rectifier [J]. Power Electronics, 2020, 54(5): 105-107. (in Chinese)
- [9] Hou Ruoyu, Emadi A. Applied integrated active filter auxiliary power module for electrified vehicles with single-phase onboard chargers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1860-1871.
- [10] Nguyen H V, To D D, Lee D C. Onboard battery chargers for plug-in electric vehicles with dual functional circuit for low-voltage battery charging and active power decoupling [J]. IEEE Access, 2018, 6: 70212-70222.
- [11] Wang Shu, Ruan Xinbo, Yao Kai, et al. A flicker-free electrolytic capacitor-less AC-DC LED driver [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4540-4548.
- [12] Yang Yang, Ruan Xinbo, Zhang Li, et al. Feed-forward scheme for an electrolytic capacitor-less AC/DC LED driver to reduce output current ripple [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5508-5517.
- [13] Zhang Li, Ruan Xinbo. Control schemes for reducing second harmonic current in two-stage single-phase converter: An overview from DC-bus port-impedance characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 10341-10358.
- [14] Nandi P, Adda R. Integration of boost-type active power decoupling topology with single-phase switched boost

- inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11965-11975.
- [15] Liu Yonglu, Sun Yao, Su Mei, et al. A single-phase PFC rectifier with wide output voltage and low-frequency ripple power decoupling [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5076-5086.
- [16] Zhang Yun, Fang Jian, Gao Fei, et al. Second-harmonic ripple voltage suppression of integrated single-phase pulse-width modulation rectifier charging system for EVs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3616-3626.
- [17] Wang Ruxi, Wang Fei, Boroyevich D, et al. A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1430-1443.
- [18] Cao Xin, Zhong Qingchang, Ming Wenlong. Ripple elim-

inator to smooth DC-bus voltage and reduce the total capacitance required [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2224-2235.



汪治

作者简介:

汪治(1999—),男,硕士。研究方向:电动汽车充电技术与电力电子技术在电动汽车中的应用。E-mail: 1820653411@qq.com。

於锋(1985—),男,通信作者,博士,副教授。研究方向:永磁电机变频调速及电力电子技术在电动汽车中的应用。E-mail: yufeng628@ntu.edu.cn。

朱志豪(1996—),男,硕士。研究方向:电动汽车充电技术与电力电子技术在电动汽车中的应用。E-mail: 1600152325@qq.com。

(责任编辑:李凤)

(上接第 20 页)

- verter for renewable energy DC grid [C]// 2021 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Chengdu, China, 2021: 89-94.
- [12] 王菲菲. 双向车载充电机中宽范围 CLLC 变换器的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Wang Feifei. Research and design of wide range CLLC converter in bidirectional on board charger [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [13] 葛佳蓓. 高效率 CLLC 谐振变换器研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Ge Jiabei. Design and research on high efficiency CLLC resonant converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [14] Zahid Z U, Dalala Z M, Chen Rui, et al. Design of bidirectional DC-DC resonant converter for vehicle-to-grid (V2G) applications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 232-244.
- [15] Deng Qinrui, He Yingjie, Lei Chao, et al. Research on CLLLC bi-directional resonant based on time-domain

analysis [C]// 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS). Ji'nan, China, 2020: 724-729.

- [16] Chang Haotang, Liang T J, Yang W C. Design and implementation of bidirectional DC-DC CLLC resonant converter [C]// 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA, 2018: 2712-2719.



王弘珺

作者简介:

王弘珺(1998—),男,硕士研究生。研究方向:双向直流变换器。E-mail: jeromeonmountain@nuaa.edu.cn。

郁专(1982—),男,博士,主任工程师。研究方向:功率电子变换技术。E-mail: Zhuan.yu@cn.abb.com。

谢少军(1968—),男,中国电源学会高级会员,通信作者,博士,教授。研究方向:功率电子变换技术。E-mail: eeac@nuaa.edu.cn。

(责任编辑:李凤)