

车载动力电池模拟电源的准 PR 控制策略及仿真

陈松伯, 易吉良, 张 晋, 李中启

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对车载动力电池工况变化剧烈难以精确模拟的问题, 采用准 PR (比例谐振) 控制策略, 对动力电池模拟电源的前端双向 PWM 整流模块实现精确稳定控制, 给出准 PR 控制器参数与模拟电源系统参数匹配设计的步骤, 分析了 PWM 模块前端电感和后端电容对模拟电源响应速度和稳定性的影响, 结合双向 DC/DC 变换器模块, 建立模拟电源的整体模型。仿真实验结果表明, 模拟电源能够精确模拟车载动力电池在不同工况下的充放电特性, 满足车载测试平台宽范围动态测试要求, 对电网冲击较小。

关键词: 动力电池; 准 PR; SOC; 模拟电源

中图分类号: TM91

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)02-0049-06

引文格式: 陈松伯, 易吉良, 张 晋, 等. 车载动力电池模拟电源的准 PR 控制策略及仿真 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(2): 49-54.

Quasi-PR Control Strategy with Its Simulation of Vehicle Power Battery Analog Power Supply

CHEN Songbo, YI Jiliang, ZHANG Jin, LI Zhongqi

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the difficulty found in an accurate simulation of the change of working conditions of vehicle power battery, the quasi-PR (proportional resonance) control strategy has been adopted to realize the precise and stable control of the two-way PWM rectifier module at the front end of the power battery simulation power supply. With the matching design steps of the parameters of the quasi-PR controller and the parameters of the simulation power supply system given, an analysis has thus been made of the response speed of the front-end inductance and back-end capacitance of the PWM module to the simulation power supply, combined with the influence of the stability and the bi-directional DC/DC converter module, thus establishing the overall model of analog power supply. The simulation results show that the simulation power supply can accurately simulate the charging and discharging characteristics of the vehicle power battery under different working conditions, and meet the requirements of the vehicle test platform for a wide range of dynamic testing platform with little impact on the power grid.

Keywords: power battery; quasi PR; SOC; analog power supply

收稿日期: 2019-03-31

基金项目: 湖南省自然科学省市联合基金资助项目 (2019JJ60055)

作者简介: 陈松伯 (1994-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术, E-mail: 384668025@qq.com

通信作者: 李中启 (1985-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事电力电子技术在新能源领域的应用和电动汽车无线供电技术方面的教学与研究, E-mail: my3eee@126.com

0 引言

近年来,能源紧缺和环境污染问题日益突显,而人们对汽车的需求日益增加,因此,电动汽车凭借其“零排放”的优点逐渐成为当前各大汽车生产商的主要研究对象。在研制电动汽车的过程中,使用动力电池进行试验具有成本高、效率低、控制难度大和易污染等缺点,所以车载动力电池模拟电源的研究是企业产品开发和高校实验室研究的重点^[1-4]。

目前,国内外都在研究绿色电源,其中脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)整流技术可以实现无电网污染和功率因数调整^[5-6],已经成为理想的用电设备或电网与其它电气设备的接口^[7-8]。在传统比例积分(proportional integral, PI)三相 PWM 整流器的控制中,需要进行 Clark、Park 变换、前馈解耦和坐标反变换,计算复杂且只能实现对直流量的无静差调节,因此在动力电池的建模中已然不能满足多工况下对电压的快速跟踪。许多文献提出采用比例谐振(proportional resonance, PR)控制策略^[9-10],其思想是在两相静止坐标系下,分别对 α 轴、 β 轴进行单独控制,消除电流 d 、 q 轴分量之间的耦合关系,有效降低受电网电压波动的影响,提升系统的稳定性。在实际系统中,由于模拟系统参数精度和数字系统精

度的限制,PR 控制器不易实现;且基频处增益无限大,非基频处增益非常小,电网一旦发生偏移,系统无法有效抑制电网谐波。所以,在实际系统中一些文献采用准 PR 控制器,既可以保持 PR 控制器的高增益,又可以减小电网偏移对系统电路的影响^[11-12]。

本文引入准 PR 控制器应用于动力电池模拟电源的双向 PWM 整流模块,网侧与电网连接,直流侧连接搭建的双向 DC/DC^[13-15],结合标准电池数据,采用负载工作点跟踪的方法,模拟电池充放电特性和功率输出与能量回馈,并建立仿真模型,验证基于准 PR 控制器的动力电池模拟电源的有效性^[16-17]。

1 动力电池模拟电源原理

1.1 系统结构

车载动力电池模拟电源系统结构如图 1 所示,交流侧接电网电压,网侧电感用于滤除开关管动作而引起的高次谐波电流。双向 PWM 模块采用三相 IGBT 开关管实现整流和逆变控制,为后端双向 DC/DC 提供稳定的直流电压 V_{dc} 。模拟电源采集双向 DC/DC 输出端口电流和给定荷电状态(state of charge, SOC)初始值,根据标准模型确定负载工作点,控制双向 DC/DC 模块输出符合动力电池特性的端口电压。

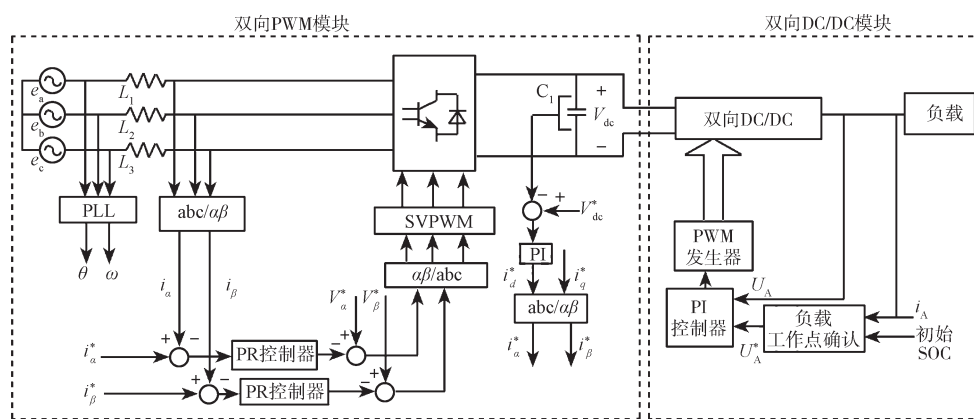


图 1 动力电池模拟电源系统框架结构图

Fig. 1 Block diagram of power battery analog power supply system

1.2 双向 PWM 整流器的 PR 控制策略

根据图 1 所示的系统原理框图,建立系统电流内环控制模型用于分析 PR 控制器对系统的作用,如图 2 所示。开关频率(10 kHz)远远大于电网频率,为便于分析,忽略开关动作对系统的影响,图 2 中 $G(s)$ 为系统控制器的传递函数,并且将 PWM 单元近似为系统增益环节 K_{PWM} , R 为电感 L 的串联等效电阻, V_a 为电网电压, i_a^* 是与电网电压同频同相的电流参考信号。

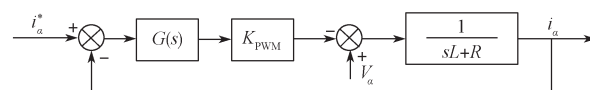


图 2 PWM 整流器模型

Fig. 2 PWM rectifier model

根据系统模型得出电流内环控制器传递函数为

$$G(s) = \frac{V_a - i_a(sL + R)}{K_{PWM}(i_a^* - i_a)} \quad (1)$$

式(1)可变形为

$$i_\alpha = \frac{1}{1 - \frac{sL+R}{K_{\text{PWM}}G(s)}} i_\alpha^* - \frac{1}{K_{\text{PWM}}G(s) - (sL+R)} V_\alpha = \varepsilon_1(s) i_\alpha^* - \varepsilon_2(s) V_\alpha, \quad (2)$$

式中 ε_1 与 ε_2 表达式为

$$\varepsilon_1 = [1 - (sL+R)/K_{\text{PWM}}G(s)]^{-1}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = [K_{\text{PWM}}G(s) - (sL+R)]^{-1}. \quad (4)$$

PR 控制器的传递函数为

$$G_{\text{PR}}(s) = K_p + 2K_r s / (s^2 + \omega_0^2), \quad (5)$$

式中 K_p 为比例参数; K_r 为谐振参数; ω_0 为谐振角频率。

PR 控制器在谐振点电网电压频率处幅值增益非常大, 经过计算得到 $\varepsilon_1=1$, $\varepsilon_2=0$, 代入式 (2) 中, 计算得 $i_\alpha=i_\alpha^*$ 。理论证明比例谐振控制器可以使输出电流无稳态误差地跟随给定电流。

1.3 准 PR 控制策略

PR 控制器的实现存在两点问题: 1) 受到元器件参数精度限制, PR 控制器不易实现; 2) PR 控制器非基频处的增益特别小, 无法有效抑制电网频率偏移而引起的谐波。因此, 引入准 PR 控制器, 该控制器可以有效抑制电网波动对系统的影响, 并且保持谐振控制器的高增益, 下面给出准谐振控制器表达式, 为

$$G_{\text{QPR}} = K_p + \frac{2\omega_c K_r s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}, \quad (6)$$

式中 ω_c 为截止频率。

将 $S=j\omega_0$ 代入式 (5) 和式 (6) 中, 可得

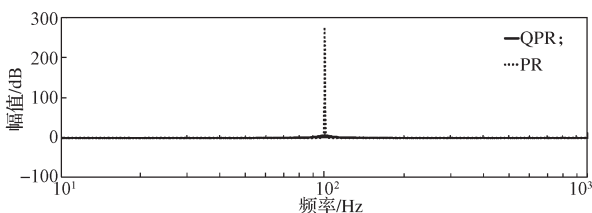
$$G_{\text{PR}} = K_p + \frac{2jK_r\omega}{(j\omega)^2 + \omega^2} = \infty, \quad (7)$$

$$G_{\text{QPR}} = K_p + \frac{2j\omega_c K_r \omega_0}{(j\omega)^2 + 2j\omega_0\omega_c + \omega_0^2} = K_p + K_r. \quad (8)$$

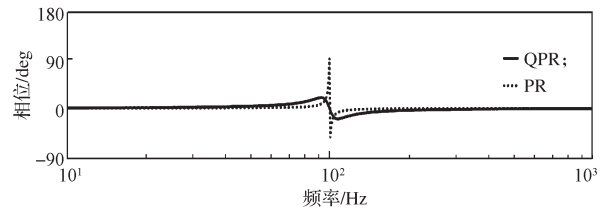
由式 (7) 和 (8) 可知, PR 控制器在基波频率处增益无穷大, 而准 PR 控制器则可以通过调节参数来进行控制。

PR 与准 PR 环节的伯德图比较如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 准 PR 控制器避免了在基波频率处的无限大增益, 从而避免了由无限大增益而引起的稳定性问题。



a) 幅值图



b) 相位图

图 3 PR 与准 PR 控制器的伯德图

Fig. 3 Byrd diagram of PR and quasi-PR controllers

2 系统参数

2.1 交流侧电感的参数选取

在模型设计中, 交流侧电感不仅影响电流环的动、静态响应, 还制约着系统的输出功率、功率因数和直流电压。在系统中起到的作用如下: 1) 隔离电路缓冲; 2) 滤除网侧高次谐波; 3) 使电压型 PWM 整流器具有 Boost 升压变换型。根据系统控制框图, 满足跟踪性能而推导出 L 的上限取值范围公式为

$$L \leq \frac{2U_{\text{dc}}}{3I_m\omega}, \quad (9)$$

式中 I_m 为交流侧相电流最大值。

为了满足电路的跟踪性能, 需要设定直流侧输出电压和交流侧电流两个变量, 本研究设定额定负载功率是 10 kW, 直流侧输出电压设定为 800 V, 交流侧电流为 20 A, 电网频率为 50 Hz, 则电感上限值

$$L \leq 8.49 \text{ mH}. \quad (10)$$

电感值过低会导致抗扰动性效果差, 过高会导致跟踪性能降低, 所以本文折中快速性与抗扰动性, 选择电感值 L 为 5 mH。

2.2 直流侧电容的参数选取

直流侧电容对后端双向 DC/DC 连接处能量转换起到缓冲作用, 并能抑制 PWM 整流器直流侧电压的脉动和直流侧电压谐波。直流侧电容选取的表达式为

$$C \leq t_r \left(R_L \ln \frac{I_{\text{dm}} R_L - U_{\text{d0}}}{I_{\text{dm}} R_L - U_{\text{dc}}} \right)^{-1}, \quad (11)$$

式中 I_{dm} 为直流侧最大电流; R_L 是额定直流负载电阻; U_{d0} 为整流器以最低值跳变成额定值时的直流电压; U_{dc} 是直流侧设定的参考电压; t_r 是电压从最低值 U_{d0} 跃升到额定参考电压 U_{dc} 的时间。

直流侧输出电压是 800 V, 负载 R_L 为 15 Ω , U_{d0} 为 540 V, I_{dm} 设定为 40 A, 上升周期设定 3 个电网周期, 即 0.06 s, 将设定值带入计算可知:

$$C \leq 0.770 \mu\text{F}. \quad (12)$$

考虑到实际的系统参数指标, 平衡系统快速性与抗干扰性, 经过测试, 最终选取电容值为 2 000 μF 。

2.3 准PR控制器的参数分析

准PR控制器3个参数 K_r 、 K_p 、 ω_c 决定了控制器的性能,通过固定其中两个参数,改变第三个参数的方式探究每个参数对系统的影响,所得结果如图4所示。

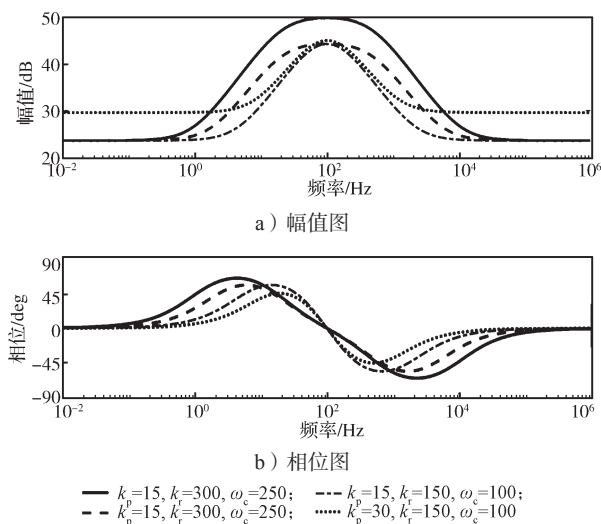


图4 K_r 、 K_p 、 ω_c 取不同值时对系统的影响

Fig. 4 Influence of different values of K_r , K_p and ω_c on the system

由图4的伯德图可知,准PR控制器参数 K_r 决定基波频率处的幅值增益, K_r 越大增益越大,但是当 K_r 增大的同时,同样会放大一些无用的谐波信号,影响系统的稳定性。 K_p 会影响低频及高频处的幅值增益与相位裕度, K_p 越大增益越大,系统的动态响应也越高。 ω_c 值用于协调系统带宽,提高基频处的稳态误差。由于每个参数变量之间的影响很小,所以可以根据系统需求分别调节。

本文系统实现双向PWM整流与DC/DC控制,不仅适用于静态试验也能够应用于动态工况测试,所以选取了较大的带宽 $\omega_c=200$ 以满足系统的频率波动,高增益 K_r 取值100。动力电池模拟电源动态变化会产生多次谐波,增加 K_p 能够提升系统抗干扰性,同时考虑到系统的快速跟踪性,故取值20。

3 实验结果

3.1 模拟电源仿真模型

采用Matlab/Simulink搭建动力电池模拟电源仿真模型,并结合实际动力电池和Matlab中的模拟锂电池模型,设置如表1所示的仿真模型参数。

利用表1中参数,采用锂电池模型进行放电试验,得出不同放电电流下,负载侧电压响应曲线,如图5所示。在相同的初始电池电量下,放电电流越大,耗电速度越快,电池放电时间越短。

表1 模拟电源参数

Table 1 Parameters of analog power supply

参 数	取 值	参 数	取 值
额定容量 / (A·h)	50	额定电流 / A	21.7
额定电压 / V	384	电池内阻 / Ω	0.076 8
关断电压 / V	288	额定电压下的容量 / (A·h)	45.22
满电下的电池电压 / V	447		

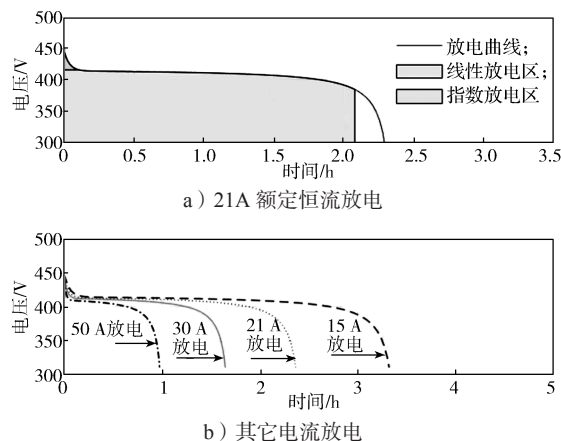


图5 不同放电电流下的电压响应曲线

Fig. 5 Voltage response curves under different discharge current

3.2 仿真结果分析

当系统选用参数 $\omega_c=200$ 、 $K_p=20$ 、 $K_r=100$ 的准PR控制器在额定工况下运行时,网侧交流电流如图6a所示。图6b中总谐波畸变率 $THD=1.46$,远低于IEEE要求的 $THD < 5\%$ 电网标准,由于后端DC/DC模块的控制策略需要对标准电池数据进行负载工作点跟踪,所以系统启动需要0.2s进行调整后达到稳态。

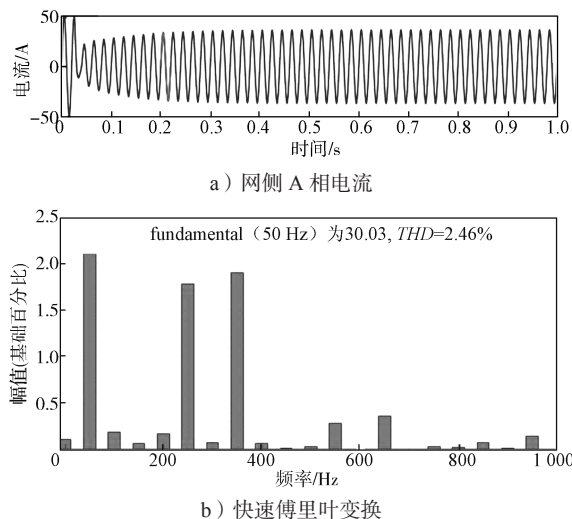


图6 电网侧A相电流快速傅里叶变换分析

Fig. 6 Fast Fourier transform analysis of A-phase current on grid side

在汽车行驶过程中,动力电池存在充电与放电两种情况,模拟电源与标准电池放电时剩余电量SOC的变化如图7所示,图7a中给定初始电池容量SOC

为 80%，系统正常运行后 SOC 逐渐降低，如在 5 s 时突加负载，耗电量加大，SOC 曲线变陡；图 7b 是电池在充电时的 SOC 变化曲线，可以看出充电状态下，SOC 逐渐上升，由于标准电源的模拟电源模型的电化学结构有区别，导致初始值不同，但相同时间内 SOC 的变化是相同的。因此可得出，模拟电源可以很好地跟踪标准电源曲线。

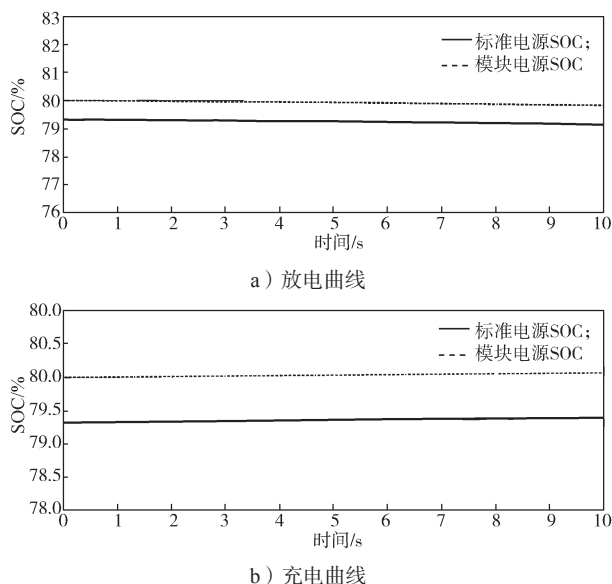
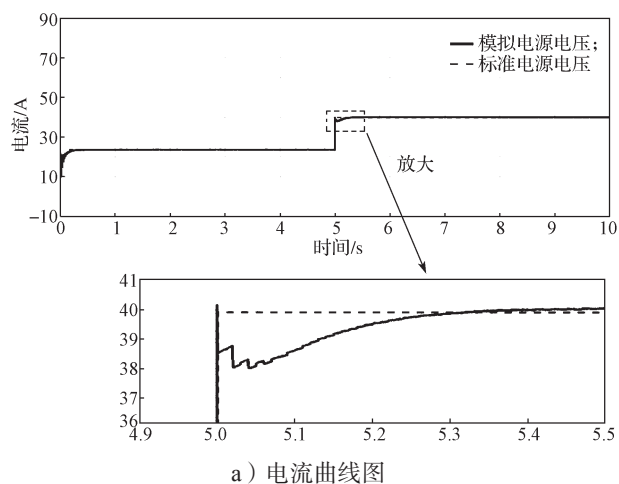


图 7 电源充放电时 SOC 变化曲线

Fig. 7 SOC curve of power supply under charging and discharging conditions

图 8 为系统运行时模拟电源与标准电池负载侧端口的电流与电压的变化曲线。图 8a 中，标准电池模型跳变时的调整时间忽略不计，模拟电源经过 0.2 s 调整后达到稳态，在 5 s 时，负载突变，模拟电源负载侧电流从 21 A 跃升到 40 A，后经过了 0.3 s 恢复稳定；图 8b 中，在 5 s 处电压跌落到 392 V，约经过 0.25 s 后恢复稳定，超调量为 5.31%。实验结果表明，模拟电源系统可以快速且准确地跟踪电池模型输出端电压与电流的变化。



a) 电流曲线图

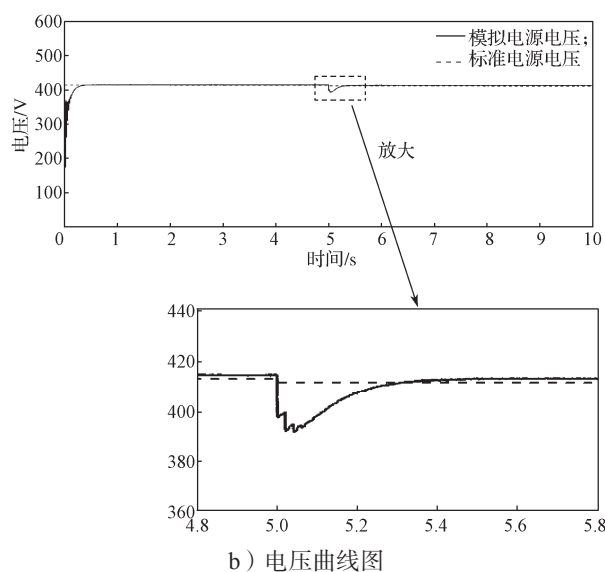


图 8 负载侧电流电压变化曲线

Fig. 8 Change curve of voltage and current at the load side

4 结语

本文建立了动力电池模拟电源模型，设计了基于准 PR 控制器的双向 PWM 控制策略，给出了系统参数设计过程。并通过仿真实验验证了采用了准 PR 控制器的模拟电源测试系统可以有效跟踪标准动力电池的电压电流变化，证明了设计的模拟电源系统能够快速且准确地模拟电池特性。

参考文献:

- [1] GENIKOMSAKIS K N, ANGULO GUTIERREZ I, THOMAS D, et al. Simulation and Design of Fast Charging Infrastructure for a University-Based e-Carsharing System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(9): 2923–2932.
- [2] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1–10, 20.
- [3] 李勇, 马飞, MEHRDAD K. 车载电源性能测试平台驱动电机调速系统控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3481–3487.

- [4] 刘忠途, 伍庆龙, 宗志坚. 基于台架模拟的纯电动汽车能耗经济性研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2011, 50(1): 44-48, 52.
LIU Zhongtu, WU Qinglong, ZONG Zhijian. Study on the Energy Consumption Economy of Electric Vehicle Based on Test Bench Simulation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(1): 44-48, 52.
- [5] AFSHARIAN J, XU D W, WU B, et al. A New PWM and Commutation Scheme for one Phase Loss Operation of Three-Phase Isolated Buck Matrix-Type Rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9854-9865.
- [6] TAHA W, BEIG A R, BOIKO I. Quasi Optimum PI Controller Tuning Rules for a Grid-Connected Three Phase AC to DC PWM Rectifier[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 96: 74-85.
- [7] 卢闻州, 周克亮, 程 明, 等. PWM 并网变换器多内模并联结构重复控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 39-47.
LU Wenzhou, ZHOU Keliang, CHENG Ming, et al. Parallel Structure Repetitive Controller for PWM Grid-Connected Converters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 39-47.
- [8] 肖 雄, 张勇军, 王 京, 等. 基于系统级功率平衡的双 PWM 变频系统模型预测控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5909-5917, 6035.
XIAO Xiong, ZHANG Yongjun, WANG Jing, et al. Model Predictive Control Based on the System-Level Power Balance Model for Dual-PWM Converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5909-5917, 6035.
- [9] 张银锋, 聂子玲, 赵治华, 等. 鲁棒与 PR 控制器对比分析及在中频电源中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 61-67.
ZHANG Yinfeng, NIE Ziling, ZHAO Zhihua, et al. Comparative Analysis Between Robust Controller and PR Controller and Their Applications in Medium Frequency Power Supply[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 61-67.
- [10] 孟建辉, 石新春, 付 超, 等. 基于 PR 控制的光伏并网电流优化控制 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 42-47.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, FU Chao, et al. Optimal Control of Photovoltaic Grid-Connected Current Based on PR Control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 42-47.
- [11] 周 立, 郑丹花. 采用 LCL 滤波器的三相光伏并网逆变器准 PR 控制 [J]. 高压电器, 2017, 53(5): 75-81.
ZHOU Li, ZHENG Danhua. Quasi PR Control of Three Phase Photovoltaic Grid-Connected Inverter with LCL Filter[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 75-81.
- [12] LI S N, QI W L, TAN S C, et al. Integration of an Active Filter and a Single-Phase AC/DC Converter with Reduced Capacitance Requirement and Component Count[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4121-4137.
- [13] WU G, RUAN X B, YE Z H. High Step-Up DC-DC Converter Based on Switched Capacitor and Coupled Inductor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5572-5579.
- [14] 李红梅, 张恒果, 崔 超. 车载充电 PWM 软开关 DC-DC 变换器研究综述 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 59-70.
LI Hongmei, ZHANG Hengguo, CUI Chao. Review of PWM Soft-Switching DC-DC Converter for on-Board Chargers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 59-70.
- [15] AKAR F, TAVLASOGLU Y, UGUR E, et al. A Bidirectional Nonisolated Multi-Input DC-DC Converter for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 7944-7955.
- [16] 张宗龙, 李丽娟, 陈息坤. 电动车锂电池能量回馈并网双向 AC/DC 变换器 [J]. 电源技术, 2017, 41(4): 605-608.
ZHANG Zonglong, LI Lijuan, CHEN Xikun. Research on Energy Feedback Grid Connection Bidirectional AC/DC Converter of Electric Vehicle Lithium Battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(4): 605-608.
- [17] 何志超, 杨 耕, 卢兰光, 等. 一种动力电池动态特性建模 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 194-203.
HE Zhichao, YANG Geng, LU Languang, et al. A Modeling Method for Power Battery Dynamics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 194-203.

(责任编辑: 姜利民)