

文章编号: 1004-4353(2021)03-0238-06

多路 Buck 变换器并联均流技术的特性分析

李玉彤, 姜锐函, 徐红梅*

(延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为提高并联 DC/DC 变换器的稳定性,研究了多路 Buck 变换器并联均流的动态响应. 首先,搭建了一个单个 Buck 变换器的双闭环控制系统,并通过负载扰动验证了该系统具有抗干扰性能. 其次,利用状态空间平均法推导出了主从均流控制下的并联 Buck 变换器模型,并通过 Simulink 仿真验证了两路、三路并联 Buck 变换器系统均流效果的稳定性. 最后,利用仿真实验显示基于主从均流法的多路 Buck 变换器不仅可以实现低压大电流的供电,而且还可以实现电流在各模块中自动均衡. 因此,本文研究验证了主从均流控制对多路并联 Buck 变换器的可行性.

关键词: 并联 Buck 控制器; 双闭环控制; 负载扰动; 均流技术

中图分类号: TK448.21

文献标识码: A

Technical characteristics of multi-channel Buck converter parallel current sharing technology

LI Yutong, JIANG Ruihan, XU Hongmei*

(College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: In order to improve the stability of parallel DC/DC converters, the dynamic response of parallel current sharing of multiple Buck converters is studied. First, a double closed-loop control system of a single Buck converter is built, and the anti-jamming performance of the system is verified by load disturbance; secondly, the parallel Buck converter model under the master-slave current sharing control is derived by using the state space averaging method. Simulink simulation verifies the stability of the current sharing effect of the two-way and three-way parallel Buck converter system. Finally, the simulation experiment shows that the multi-channel Buck converter based on the master-slave current sharing method can not only realize the power supply of low voltage and high current, but also realize the automatic current balance among the modules. Therefore, the research in this paper verifies the feasibility of master-slave current sharing control for multi-path parallel Buck converters.

Keywords: parallel Buck controller; double closed-loop control; load current sharing; current sharing technology

0 引言

由于并联电源系统具有容量大、效率和可靠性高、成本低等优点,因此其被广泛应用于各种大功率负载系统中. 目前,分布式电源并联供电系统已逐步取代单模块供电系统,该系统不仅可避免

供电系统在高功率、大电流输出时对电子元件所产生的影响,同时还可解决直接并联开关变换器体积过大、成本较高等问题^[1]. 但由于分布式电源并联供电系统中的开关电源模块并联时其特性和参数会受到生产工艺和系统误差的影响^[2],因此

收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 吉林省教育厅科研项目(JJKH20210589KJ);吉林省高等教育学会科研项目(JGJX2020D48)

* 通信作者: 徐红梅(1975—),女,博士,副教授,研究方向为非线性动力学.

会使得各模块的输出特性发生变化,并产生高输出电压模块为低输出电压模块供电的现象^[3],进而影响系统的稳定性。

目前控制并联 Buck 变换器的常用方法主要有下垂法、自主均流法、主从均流法^[5]。其中,主从并联均流技术因可使电路具有良好的动态响应能力和能够避免模块电流过大而导致的电路损耗而受到学者的广泛关注^[6]。目前,对并联 Buck 变换器均流效果的研究大多是以两路并联进行的^[7],而对于三路及多路 Buck 变换器并联的均流效果研究得较少^[8];为此,本文对由双闭环控制的 Buck 变换器的稳定性进行研究,并利用 Matlab/Simulink 建立的仿真模型分析了两路、三路并联 Buck 变换器双闭环控制系统的均流效果。

1 Buck 变换器的数学模型

Buck 变换器的工作原理如图 1 所示。图 1 中 V_g 、 V_D 、 V_{be} 分别为输出电压、二极管、开关管, C 、 L 、 R 分别为电容、电感及负载电阻。Buck 变换器的工作方式为:在区间 $[0, t_1]$ 内,当导通开关管 V_{be} 时,输入电压 V_g 通过开关管 V_{be} 流到二极管 V_D 两端,此时二极管 V_D 截止;当电流流过电感 L 时,由于电容 C 保持不变,因此此时电感 L 两端的电压为正向电压,且此时电感电流 i_L 在到达 t_1 时刻前线性增加到最大值。

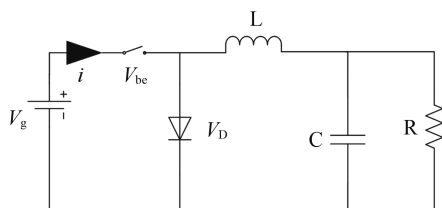


图 1 Buck 变换器的工作原理图

在 $[0, t_1]$ 区间内, i_L 的增量可表示为:

$$\Delta i_{L(+)} = \int_{t_0}^{t_1} \frac{U_{in} - U_{out}}{L} dt = \frac{U_{in} - U_{out}}{L} (t_1 - t_0) = \frac{U_{in} - U_{out}}{L} DT. \quad (1)$$

式(1)中: T 为开关周期, $T = f_s$; D 为占空比, $D = t_1/T$ ($0 < D < 1$)。

在 $[t_0, t_1]$ 区间内, 开关管 V_{be} 关断, 二极管 V_D 续流, 电感 L 两端电压 $U_L = -U_{out}$, 电流 i_L 为

负向(直到 T 时刻瞬间到最小值)。在该区间内, i_L 的减小量为:

$$\Delta i_{L(-)} = \int_{t_0}^T \frac{-U_{out}}{L} dt = -\frac{U_{out}}{L} (T - t_0) = \frac{U_{out}}{L} (1 - D)T. \quad (2)$$

在稳态工作下 i_L 的波形因呈周期性重复, 因此 $\Delta i_{L(+)} = \Delta i_{L(-)}$, 即:

$$\frac{U_{in} - U_{out}}{L} DT = \frac{U_{out}}{L} (1 - D)T, \quad D = \frac{U_{out}}{U_{in}} = M, \quad (3)$$

其中 M 为电压增益。由公式(3)可知, 电压增益 M 由占空比 D 决定。

2 双闭环模式的 Buck 变换器

双闭环系统是由内环(以电流作为反馈信号)和外环(以电压作为反馈信号)组成的反馈控制系统。由于并联的 Buck 变换器系统具有内环均流、外环追踪电压误差的能力^[9], 因此其比单闭环控制系统能够得到更多的反馈信息, 即比单闭环控制系统具有更好的控制效果。

2.1 电流内环和电压外环的设计

双闭环的控制系统如图 2 所示。该系统中, 负载电压为主控对象, 它在电压传感器和模数转换模块的共同作用下将电压值和参考电压值的差值输入到电压 PID 控制器中^[10]。电感电流为副控对象, 它通过电流传感器进入到模数转换模块, 并与电流参考值做差。电压环的 PID 和电流环的 PID 根据做差得到的差值调节输入的电流后, 将最终得到的电流值输入到 PWM 模块, 由此形成双闭环控制。

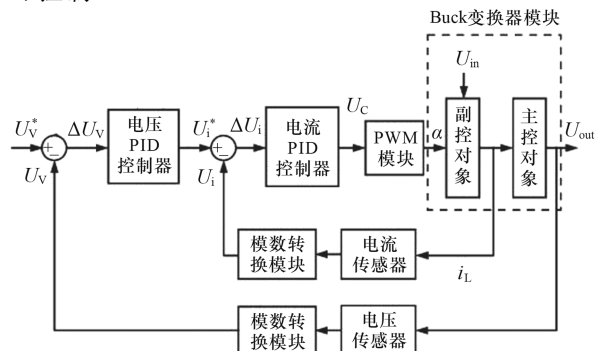


图 2 双闭环的 PID 控制系统

利用状态空间法推导双闭环控制的传递函数如图 3 所示. 图 3 中, G_1 为电流环 PI 控制器的传递函数, G_2 为去除电感电流误差的传递函数, G_3 为双闭环控制的传递函数.

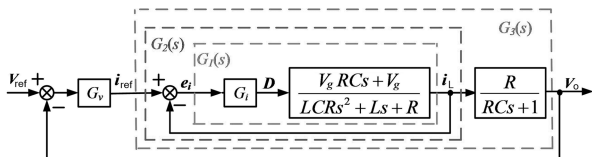


图 3 双闭环控制的传递函数

为验证双闭环控制的可行性, 利用 Matlab 对 Buck 电路进行仿真分析. 由于系统采用的是离散方式运行, 因此本文采用双线性变换设计法对并联 Buck 变换器进行变换处理. 经过补偿网络设计与仿真调节, 得到了系统的电流补偿网络 $G_{id}(S)$ 和电压补偿网络 $G_{vd}(S)$:

$$G_{id}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_g(RCs + 1)}{LCRs^2 + Ls + R}, \quad (4)$$

$$G_{vd}(s) = \frac{V_o(s)}{d(s)} = \frac{V_g R}{LCRs^2 + Ls + R}. \quad (5)$$

2.2 双闭环控制的并联 Buck 电路模型

在开关 1(s_1) 和开关 2(s_2) 均为闭合时, 并联 Buck 变换器的状态方程可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{X} + \mathbf{B}_1 \mathbf{E}. \quad (6)$$

在 s_1 闭合、 s_2 关断时, 并联 Buck 变换器的状态方程可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{E}. \quad (7)$$

在 s_1 关断、 s_2 闭合时, 并联 Buck 变换器的状态方程可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_3 \mathbf{X} + \mathbf{B}_3 \mathbf{E}. \quad (8)$$

式中: E 为输入电压; \mathbf{X} 为变化向量, 其计算公式为

$$\mathbf{X} = [v \quad i_1 \quad i_2]^T. \quad (9)$$

双并联 Buck 变换器的 \mathbf{A}_s 和 \mathbf{B}_s 可表示为:

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{C(R+r_c)} & \frac{R}{C(R+r_c)} & \frac{R}{C(R+r_c)} \\ \frac{R}{L_1(R+r_c)} & \frac{1}{L_1} \left(\frac{r_c R}{R+r_c} + r_{l1} \right) & \frac{1}{L_1} \left(\frac{r_c R}{R+r_c} \right) \\ \frac{R}{L_{12}(R+r_c)} & \frac{R}{L_2(R+r_c)} & \frac{1}{L_2} \left(\frac{r_c R}{R+r_c} + r_{l2} \right) \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{14} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

2.3 主从均流法的多路并联 Buck 变换器的设计

主从均流法的主要特点是在并联系统中当外设特性不一致时其仍具备较好的控制效果. 主从均流法的基本原理是在多个电源模块中, 人为地规定一个主模块(Master), 并将其余模块规定为从模块(Slaves), 同时将主模块的电流值作为其他模块的参考值. 主从均流法的控制框图如图 4 所示.

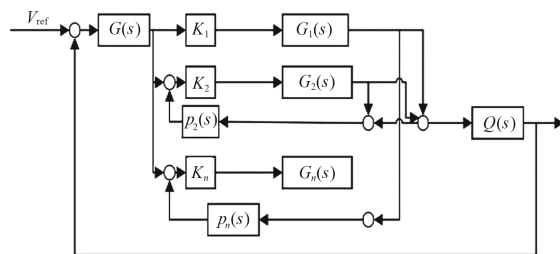


图 4 主从均流法的控制框图

3 仿真实验

3.1 双闭环控制的 Buck 变换器的仿真

为验证 Buck 变换器的双闭环控制效果, 采用 Matlab/Simulink 进行建模仿真. 图 5 为双闭环控制下的 Buck 电路的 Matlab 仿真模型. 仿真参数为: $V_g = 10 \text{ V}$, $L = 0.08 \text{ H}$, $C = 470 \mu\text{F}$, $D = 0.5$, $R = 10 \Omega$.

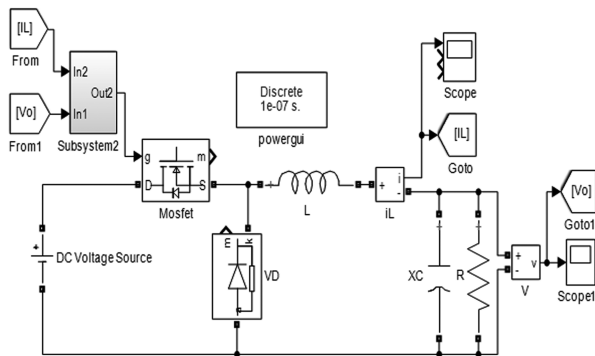


图 5 双闭环控制的 Buck 电路模型

仿真时间为 $0 \sim 0.2$ s 的仿真结果如图 6 所示,图 7 为仿真时间在 $0.04 \sim 0.075$ s 时的放大图.由图 7 可知,当输入电压为 10 V 时,输出电压稳定在 $4.95 \sim 5.05$ V 范围内.由此可知,当系统稳定后,输出电压的误差仅为 0.05 V.

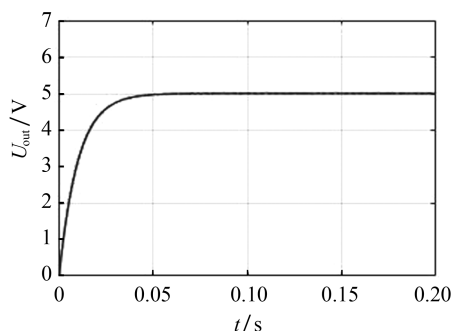


图 6 输出电压的仿真结果

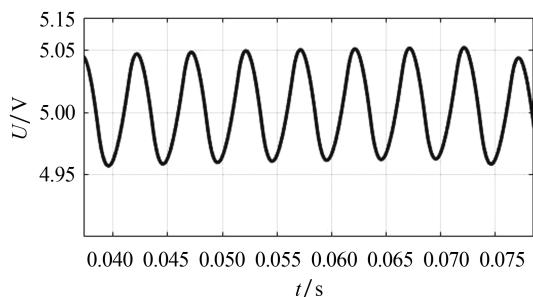


图 7 部分输出电压的仿真放大图

图 8 为 $t=0.15$ s 时的电阻突变仿真图(电阻由 10Ω 突变为 20Ω).由图 8 可以看出,电阻突变后输出的输出电压值虽发生了改变,但是在 $t=0.2$ s 时电压恢复到了 5.0 V 左右,并随后保持稳定.该结果表明,双闭环控制能够稳定由电

阻突变所引起的电压变化.

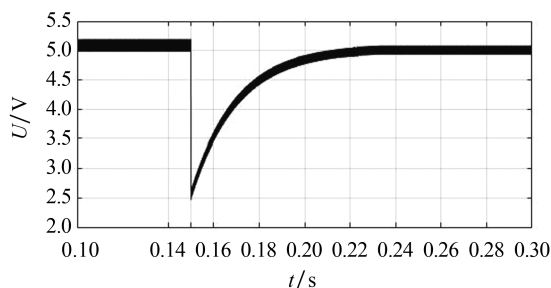


图 8 $t=0.15$ s 时电阻突变的仿真结果

3.2 主从均流法的两路并联 Buck 变换器的仿真

图 9 为主从均流法的两路并联 Buck 变换器的仿真模型.在该模型中,去除了从机的负载电阻和电压环控制,保留了主机的电压环控制,并将主机的电感电流的输出作为从机电流环的参考值,其中 $L_1=0.08$ H, $L_2=0.05$ H.

主从均流法的两路并联 Buck 变换器的仿真结果如图 10 所示.由图 10 可知,当输入电压保持一致时,两路并联 Buck 变换器的电感值虽有差异,但在每条支路上均可实现 2.5 A 的输出.

为进一步验证主从均流法的两路并联 Buck 变换器的稳定性,本文将图 5 中的 $R1$ 由 10Ω 突变为 15Ω ($t=2.0$ s),其仿真结果见图 11.由图可以看出,在 $t=2.0$ s 时主机和从机的电阻均发生突变,虽然主机与从机的电感值不同,但二者的电流值基本保持一致.以上表明,主从均流法的两路并联 Buck 变换器具备均流的能力,且动态响应效果较好.

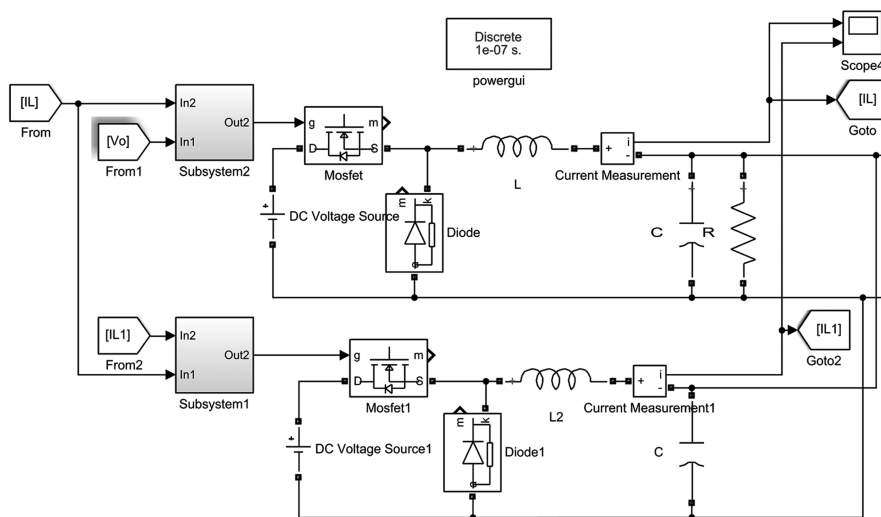


图 9 主从均流法的两路并联 Buck 变换器的仿真模型

3.3 主从均流法的三路并联 Buck 变换器的仿真

主从均流法的三路并联 Buck 变换器的 Matlab 仿真电路模型和仿真结果如图 12 和图 13 所示。由图 13 可以看出,主控制器和从控制器的电

感电流均能稳定在 5.0 A 左右,且总输出的电感电流可以稳定在 10 A。该结果表明,主从并联均流技术可以在多路并联 Buck 变换器系统中实现均流。

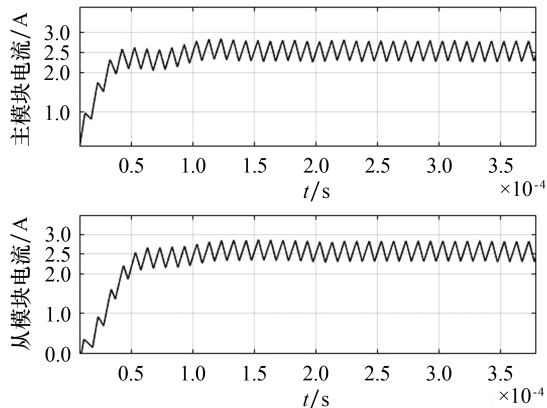


图 10 主从均流法的路并联 Buck 变换器的电感电流

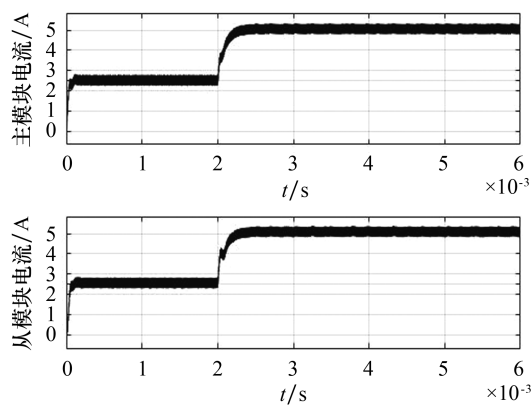


图 11 负载突变前后的仿真结果

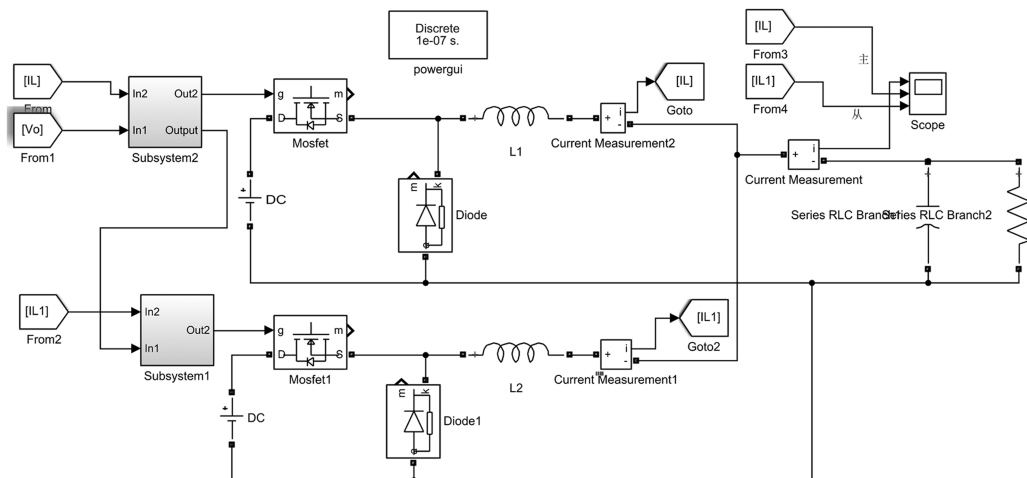


图 12 主从均流法的三路并联 Buck 变换器的仿真模型

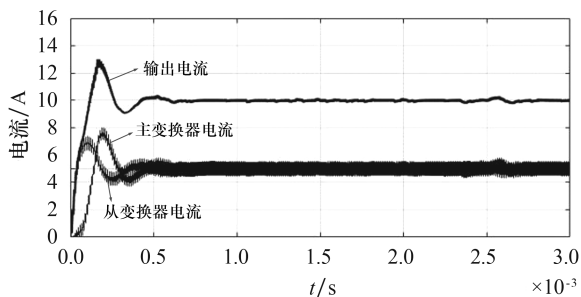


图 13 主从均流法的三路并联 Buck 变换器的仿真结果

4 结论

研究表明,本文提出的主从均流控制技术可有效控制多路 Buck 变换器中各模块的电感电

流,并可实现“低压大电流”的输出。本文研究结果可为分布式电源系统的大功率稳定输出提供控制策略。本文在研究中发现,主从均流法不易通过增加模块的数量来实现系统扩容,即该方法缺少灵活便捷性,因此在今后的研究中我们将对此问题做进一步研究。

参考文献:

- [1] 胡文浩,陈昌松,段善旭. 多相交错 Buck 变换器的解耦均流控制方法[J]. 电源学报,2021,19(1):7-14.
- [2] 丁啸,葛愿,蒋文良. 一种新型交错并联单输入高压 DC/DC 变换器设计[J]. 现代电子技术,2021,44(2):105-110.

(下转第 259 页)

4 结语

本文基于 Petri 网和行为轮廓关系对高校网上预约报销流程进行了建模和优化. 实验表明, 本文提出的优化模型不仅可以保证每一名报销人员都能够顺利地完 成报销, 而且还可以提高财务部门的工作效率, 同时在报账过程中可以避免报销人员恶意多次获取号码的现象发生. 由于本文只是从模型的角度对预约报销流程进行优化, 所以该优化模型存在一定的局限性, 今后我们将结合更多的实际情况对流程做更进一步的分析和优化.

参考文献:

- [1] 王标, 胡强. 基于 Petri 网建模的云制造流程业务兼容性检测[J]. 电子技术, 2017, 46(4): 48-51.
- [2] 金红琳, 刘波. 分布式锁的 Petri 网建模及死锁检测[J]. 计算机科学, 2011, 38(8): 49-52.
- [3] 李勇, 王文奇, 史豪斌. 针对入侵检测分析的 Petri 网建模技术研究[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(11): 301-304.
- [4] 严顺, 方贤文, 刘祥伟. 优先权 Petri 网在电梯运行控制中的应用[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2017, 43(3): 242-246.
- [5] 王列伟, 吴朔, 胡俊华. 基于 Petri 网的道路交叉口建模方法及比较研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14): 211-216.
- [6] 叶剑, 李锦涛, 朱珍民, 等. 面向普适计算的分布式模糊推理 Petri 网建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1329-1335.
- [7] WEIDLICH M, MENDLING J, WESKE M. Efficient consistency measurement based on behavioral profiles of process models[J]. IEEE T Software Eng, 2011, 37(3): 410-429.
- [8] 章杰文, 姚俊生, 袁仁森. 作业成本法在高校网上预约报销系统的应用研究[J]. 商业会计, 2021(4): 106-110.
- [9] 吴哲辉. Petri 网理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 6-42.
- [10] 方贤文. Petri 网行为轮廓理论及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017: 1-16.

(上接第 242 页)

- [3] 刘鹏, 陈启宏, 全书海, 等. 基于电流双环控制的燃料电池 DC/DC 变换器[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1818-1821.
- [4] 黄远胜, 刘和平, 苗轶如, 等. 基于并联虚拟电阻的级联 DC-DC 变换器稳定控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3927-3937.
- [5] 高本友, 张卫平, 张晓强. 基于 Buck 电路的双闭环控制系统设计的仿真研究[J]. 电子世界, 2017(3): 125-127.
- [6] 杨航, 刘凌, 阎治安, 等. 双闭环 Buck 变换器系统模糊 PID 控制[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 35-40.
- [7] 金爱娟, 郝陈祥, 马忠雪, 等. 并联 Buck 变换器的均流控制技术[J]. 电子科技, 2016, 29(1): 87-90.
- [8] 蒋丛让. 并联 Buck 变换器均流控制算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [9] 张伟, 葛飞, 邓孝祥. 交错 Buck 并联均流技术的研究[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(5): 410-415.
- [10] REVATHI B S, MAHALINGAM P, GONZALEZ-LONGATT F. Interleaved high gain DC-DC converter for integrating solar PV source to DC bus[J]. Solar Energy, 2019, 188: 924-934.
- [11] 韩猛, 张元科, 孙贺, 等. 基于 Buck 变换器的并联均流系统研究[J]. 电动工具, 2019(4): 4-7.
- [12] 刘金晶, 葛艳华, 毕洪大, 等. 车载储能系统中并联 DC-DC 变换器的研制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(7): 121-123.
- [13] LEYVA-RAMOS J, MOTAVARONA R, ORTIA-LOPEZ M G, et al. Control strategy of a quadratic boost converter with voltage multiplier cell for high-voltage gain[J]. IEEE J Emerg Select Topics Power Electron, 2017, 5(4): 1761-1770.