

具有快速动态响应的大功率脉冲负载电源设计与实现

朱泽宇, 杨平, 曹璘, 刘晔瑞, 吴松荣

(磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 西南交通大学, 四川 成都 611756)

摘要: 电流型脉冲负载一般呈宽频段、脉冲变化特性,该特性对供电系统的稳定性提出了更高的要求。当脉冲负载直接接入供电母线后,其负载瞬时功率与负载电流一样呈现脉冲特性,会引起母线电流波动过大的问题。为了平衡瞬时功率差,本文提出采用双向变换器来补偿由脉冲负载特性造成的母线电流波动过大的问题,解决脉冲负载与供电电源的适应性问题。提出一种基于电容电压谷值检测的自适应电流反馈控制方法,该方法适用于脉冲负载的频率和功率任意变化。通过建立其动力学模型,分析了参数设计对于变换器稳定性的影响。最后,制作一台实验样机,验证了所提出方案的可行性。

关键词: 电流型脉冲负载; 双向变换器; 自适应电流反馈; 动力学模型

DOI: 10.12067/ATEEE1903002 **文章编号:** 1003-3076(2019)05-0013-08 **中图分类号:** TM72

1 引言

随着民用设备以及军工装备的发展,越来越多的设备或装备呈现出脉冲负载特性,这对开关电源的性能提出了更高的要求^[1]。例如在军工供电系统中,以脉冲负载为代表的电子对抗设备相较于传统负载,其负载功率会在短时间内呈现周期性变化,通常变化频率在几十赫兹到几百赫兹之间^[2,3]。当电子对抗设备的脉冲变化功率容量与发电机输出功率容量的占比超过40%,且脉冲变化频率与发电机闭环调节频率一致时,会引起发电机输出电压幅值不稳定,调制系数超过GJB181标准的规定要求,进而影响电子对抗设备的稳定和正常工作^[2]。

为了解决上述问题,文献[4]提出在供电系统增加储能电容来消除脉冲负载对供电电源的不利影响,但受储能电容体积、重量等因素限制,其容量无法满足日益增长的系统需求容量,因此不能根本解决脉冲负载引起发电机输出不稳定、调制系数超标的问题。文献[5]提出在供电系统中增加电阻和开关管构成脉冲匹配电路,在轻载状态下,通过电阻吸收多余的功率保证母线电流稳定,然而采用电阻吸收功率会导致多余的功率被耗散掉无法利用,电路

效率低,且发热量大。文献[6]提出增大发电机的惯性时间常数,一方面可以削弱因脉冲负载功率突变瞬间增大定子电流而造成的电枢磁饱和影响,另一方面可提高功率裕角和增强系统抵御负载功率变化的能力,然而这一方案仅能减弱脉冲负载对母线造成的影响,并不能完全消除。文献[7-11]提出了多种针对负载脉冲变化的线性控制方法,虽然该类方法简单有效,但在大信号扰动下的使用仍然受限。文献[12,13]通过加入补偿装置来抵消脉冲负载带来的电流电压扰动,但是采用线性开关器件补偿负载突变引起波动的效果有限,且线性器件存在功率损耗较大的问题,因此该措施仅适用于小功率的场合。文献[14]采用在电路中加入电流泵模块的方法,在负载突变时电流泵投入工作,并在输出侧注入或吸收电流,由此提高变换器的动态性能,缩短负载响应过程,这一方法无论在负载突增或是负载突降时都能起到抑制波动的作用。文献[15]提出可控辅助钳位电路的方法,在变换器输出侧并联电流注入或电流吸收辅助电路,直接补偿因负载突变造成的电流波动,该方法虽然可以实现输出端电压电流稳定,但是并不能有效改善母线电流的波动^[16]。

为有效解决负载脉冲特性影响母线波动这一问

收稿日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601378)、四川省科技计划项目(2019YJ0237)

作者简介: 朱泽宇(1994-),男,江苏籍,硕士研究生,主要从事脉冲负载电源的研究;

杨平(1983-),女,重庆籍,副教授,硕导,博士,主要从事开关变换器及其控制技术的研究(通讯作者)。

题,本文采用并联双向变换器的方法,通过对电容器充放电来平衡瞬时功率与脉冲负载平均功率之间的差异。其次,提出基于电容电压谷值检测的自适应电流反馈控制,该控制可实现参考电流跟随负载变化进行自动调节,且有效防止电容电压过低时电路无法正常工作。利用动力学建模分析变换器参数设计对脉冲负载电源(Pulsed Load Power Supply, PLPS)稳定性的影响。最后,通过搭建实验样机验证理论分析的可行性。

2 脉冲负载电源原理分析

PLPS 拓扑结构如图 1 所示,其中, S_1 、 S_2 为开关管, C_b 为储能电容, V_p 为母线电压, I_{in} 为母线电流, i_p 为负载电流, i_L 为流过电感 L 的电流。电源匹配网络的作用是将前级供电电源转换为脉冲负载所需直流电压。当脉冲负载处于轻载状态时,所需功率小于供电平均功率,此时多余供电功率通过双向变换器为电容 C_b 充电;当脉冲负载处于重载状态时,所需功率大于供电平均功率,电容 C_b 放电补充供电功率^[17,18]。通过电容的充放电可保证在负载功率变化时,母线提供的功率一直保持恒定,即电压电流均保持恒定值。其主要工作波形如图 2 所示,其中 I_{av} 为负载平均电流, V_b 为电容电压, V_{valley} 为电容谷值电压。

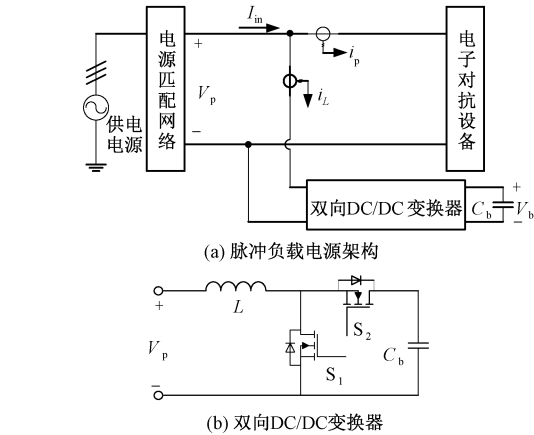


图 1 PLPS 拓扑结构
Fig. 1 Topology of PLPS

2.1 轻/重载切换工作分析

当脉冲负载切换为轻载,PLPS 的直流母线同时供给功率给负载以及电容 C_b , C_b 储存能量。此过程中的主要波形如图 3 所示。此后, S_1 保持恒导通状态, S_2 保持恒关断状态,直至电感电流上升到预设值;当脉冲负载切换为重载,直流母线与电容 C_b 共

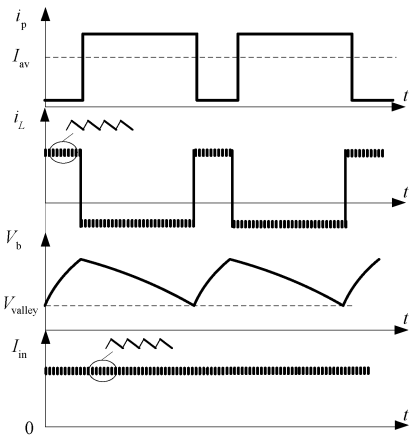


图 2 PLPS 的主要波形
Fig. 2 Key waveforms of PLPS

同给负载供电, C_b 释放能量^[19,20]。此过程中的主要波形如图 4 所示。此后, S_1 保持恒关断,而 S_2 保持恒导通,直至电感电流下降到预设值。

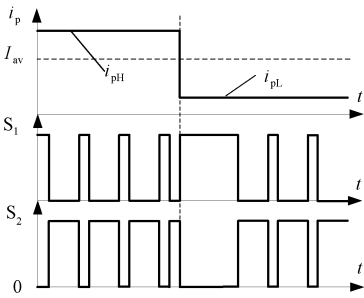


图 3 重载变轻载过程的主要波形
Fig. 3 Key waveforms from heavy load to light load

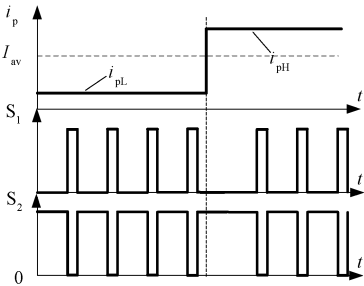


图 4 轻载变重载过程的主要波形
Fig. 4 Key waveforms from light load to heavy load

2.2 恒功率与脉冲状态切换工作分析

负载处于恒功率时负载功率仅由直流母线提供,双向变换器不再工作,此时开关管 S_1 关断, S_2 导通, C_b 电压 V_b 与母线电压相同。当负载进入脉冲状态时,电路工作状态与 2.1 节分析相同。图 5 为恒功率模式切换为脉冲模式时开关管波形图。图 6 为脉冲模式切换为恒功率模式时开关管波形。

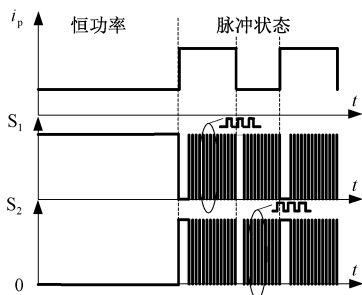


图5 恒功率变脉冲功率过程的主要波形

Fig. 5 Key waveforms from constant power to pulse mode

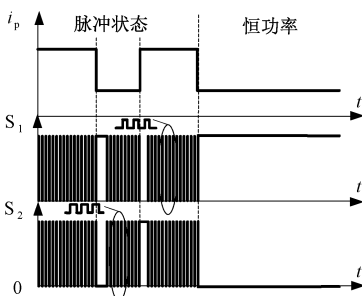


图6 脉冲功率变恒功率过程的主要波形

Fig. 6 Key waveforms from pulse mode to constant power

3 PLPS 控制与建模

3.1 PLPS 控制策略

为保证在不同脉冲负载条件下电路均能正常工作,本文提出基于电容电压谷值检测的自适应电流反馈控制,控制环路如图7所示。该控制环路由谷值检测电路、二阶滤波、电压PI调节器、电流PI调节器、加法器以及比较器组成。

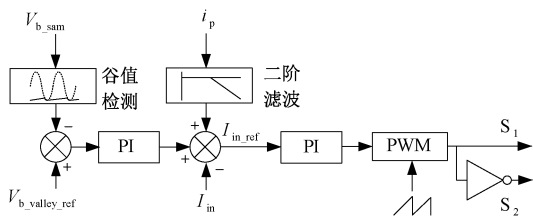


图7 PLPS 控制环路

Fig. 7 Control loop of PLPS

由于负载处于高功率时,母线电压 V_p 与电容 C_b 同时向负载供电;负载处于低功率时, V_p 向负载以及电容 C_b 供电,所以直流母线只提供平均功率,即母线电流为负载平均电流。因此, I_{in} 的电流参考值可由负载电流 i_p 经二阶滤波电路后得到。当负载发生改变时,参考电流 I_{in_ref} 跟随负载电流改变,因此电流反馈环路可以根据不同的负载自动调节参

考电流值,达到自适应的效果。

此外,为了确保变换器始终能够正常工作,则需保证电容 C_b 电压始终高于 V_p 。由于电路中存在损耗,若仅通过电流反馈控制而不考虑电容电压,则电容放电时电压会降到母线电压以下,变换器无法正常工作,所以在自适应电流反馈的基础上增加谷值电压环^[21,22]。其工作原理为设定电容谷值电压值为两倍的母线电压,实时检测电容谷值电压值 V_{b_valley} ,当 V_{b_valley} 低于两倍母线电压时,谷值电压环工作,直流母线通过双向变换器给电容充电直至电容电压抬升到 $2V_p$ 。除此以外,当谷值电压环路输出值趋近于0,可视为仅有电流环工作。

3.2 PLPS 建模分析

当变换器工作在 Boost 模式时, V_p 作为输入端,负载为电容 C_b ;当变换器工作在 Buck 模式时, C_b 作为输入端,负载可视为恒压源。为简化分析,假设电容 C_b 的容值足够大。可将 Buck、Boost 离散时间映射视为一阶系统^[23],此时,输出电压为常量,将双向变换器中电感电流作为状态变量,对变换器的2个工作状态分别列写状态方程,用连续代入法即可得到其一阶显式离散时间映射^[24]。

Buck 模式时,设第 n 个周期结束后,电感电流值为 i_{Ln} 。由 Buck 拓扑结构可知,开关导通时,电感电流上升,经 $d_n T$ 时间后,电感电流的上升值为:

$$\Delta i_{L1} = \frac{(V_b - V_p) d_n T}{L} \quad (1)$$

式中, d_n 为第 n 次迭代开关管占空比。

当开关关断时,电感电流下降,其下降值为:

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_p (1 - d_n) T}{L} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,第 $n+1$ 个周期与第 n 个周期电感电流离散时间映射式为:

$$i_{n+1} = i_n + \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} = i_n + \frac{(V_b d_n - V_p) T}{L} \quad (3)$$

同理对于 Boost 模式,可得出第 $n+1$ 个周期与第 n 个周期电感电流离散时间映射式为:

$$i_{n+1} = i_n + \frac{(2 - d_n) V_p - (1 - d_n) V_b}{L} T \quad (4)$$

根据离散迭代映射模型式(1)~式(4),采用数值仿真对峰值电流控制 Boost 变换器的分岔行为进行仿真分析。选取电路参数 $L = 500 \mu\text{H}$, $T = 10 \mu\text{s}$ 。在 Boost 模式下,选取 V_p 为分岔参数,变化范围为 $40 \sim 200 \text{V}$, V_b 为恒定 110V ;在 Buck 模式下,选取 V_b

为分岔参数,变化范围为 20~80V, V_p 为恒定 50V。仿真得到分岔图如图 8 所示。

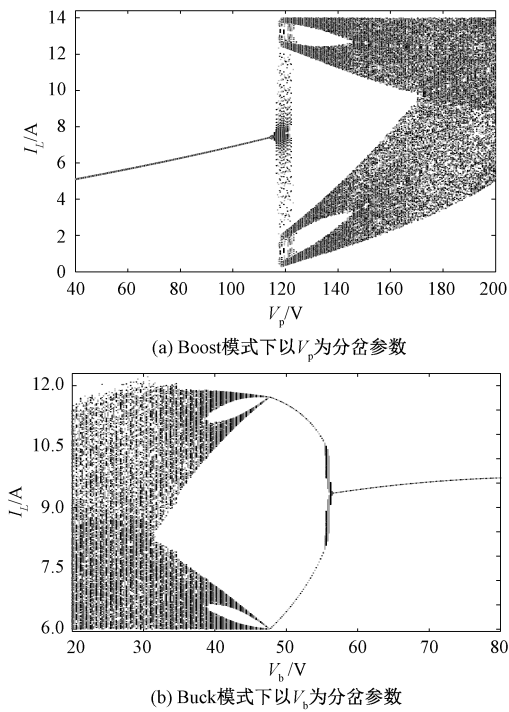


图 8 分岔图

Fig. 8 Bifurcation diagram

从图 8 可以看出,在 Boost 模式下,当 V_p 较小时,变换器处于稳定状态,直至 $V_p = 108\text{V}$ 时,系统发生倍周期分岔失稳。随着电压的继续增大,系统进入混沌状态。在 Buck 模式下,电压 V_b 较大时变换器处于稳定状态,而倍周期分岔点处在 $V_b = 57\text{V}$ 时, V_b 继续下降后,系统进入混沌状态。

4 仿真结果与实验验证

为验证理论分析的可行性,本文以表 1 所示的电路参数对脉冲负载电源进行仿真及实验。实验平台如图 9 所示。

表 1 主电路参数

Tab. 1 Key circuit parameters	
参数	数值
母线电压值 V_{in}/V	50
储能电容容值 C_b	470 $\mu\text{F}/450\text{V}$
电感值 $L/\mu\text{H}$	500
开关频率 f_s/kHz	100
重载功率 P_H/W	500
轻载功率 P_L/W	100

图 10 为不同负载占空比(高功率脉冲与低功率脉冲之比)所对应的波形。由图 10 可知,脉冲负

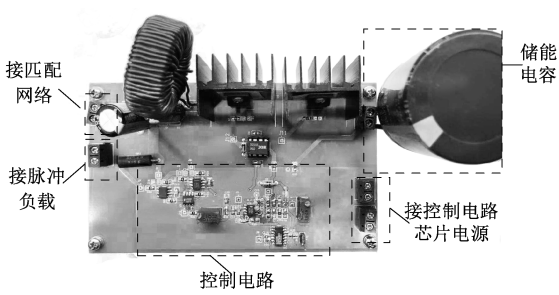


图 9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform

载在不同负载占空比下电路均可以实现自适应调节,且母线电流均稳定在理论值。 I_{im} 在轻/重载模式切换时会产生峰峰值为 8A 左右的尖峰,其原因在于电感电流不能突变,所以在负载电流突然变化时,电感电流无法及时响应负载电流的变化,导致前级输出电流产生尖峰。

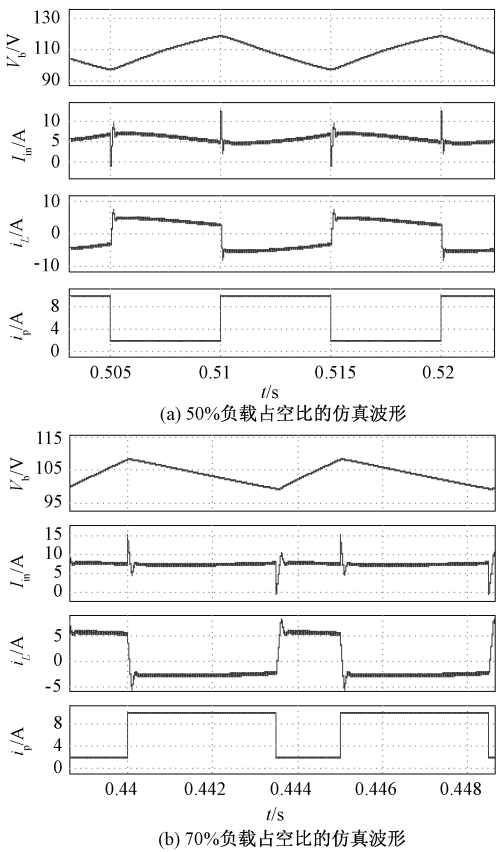


图 10 不同负载占空比的仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of different duties

图 11 为恒功率与脉冲状态切换的仿真波形。由图 11 可知,当电路进行模式切换时,需要 100~200ms 的调节时间,然后电路重新进入到新的稳态。

图 12 为不同负载占空比的实验波形。由图 12

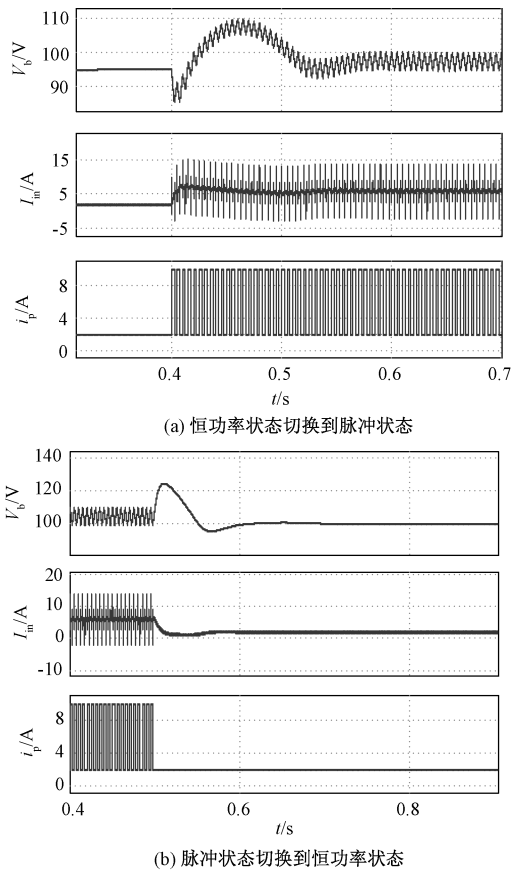


图 11 恒功率与脉冲状态切换仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms between pulse mode and constant power

可知,其实验波形与仿真波形相符。系统在不同负载占空比均可实现电流 I_{in} 自适应调节。

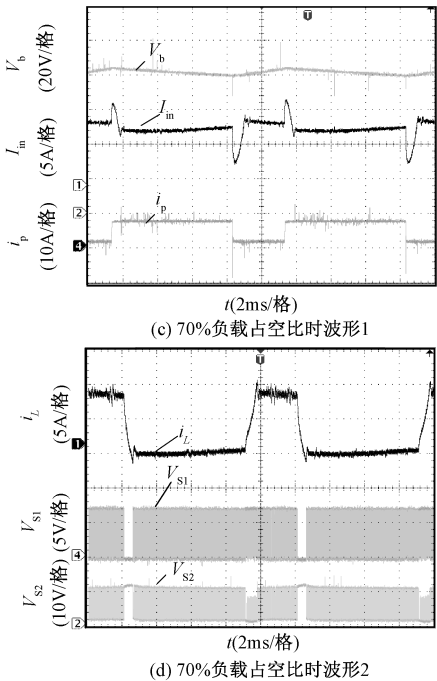
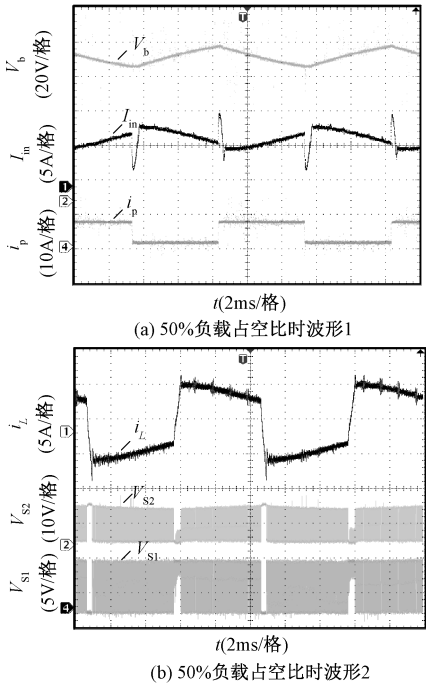


图 12 不同负载占空比的实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of different duties

图 13 为负载为恒功率与脉冲状态切换时的实验波形。由图 13 可知,实验波形与仿真相符合。在电路进行模式切换时,需要经过约 550ms 后重新进入到新的稳态。

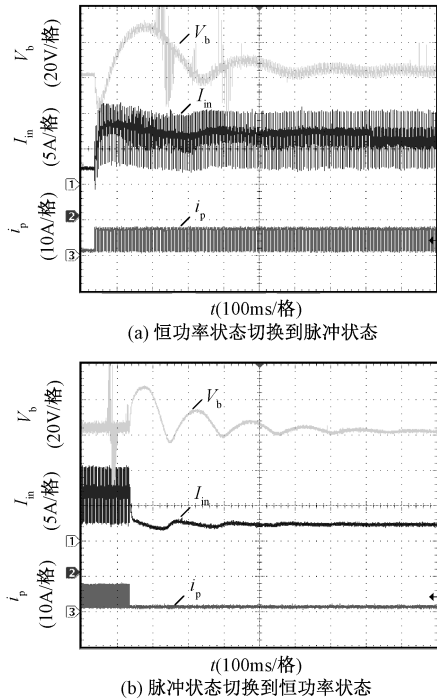


图 13 恒功率与脉冲状态切换实验波形

Fig. 13 Experimental waveforms between pulse mode and constant power

图 14 为极端情况下的实验波形。由图 14 可知,在 Buck 模式,负载功率处于重载,当 V_b 低于 57V 时,电路进入混沌状态,电路无法稳定工作;在 Boost 模式,负载功率处于轻载,当 V_p 高于 108V 时,电路进入混沌状态,电路无法正常稳定工作,与图 8 结果一致。

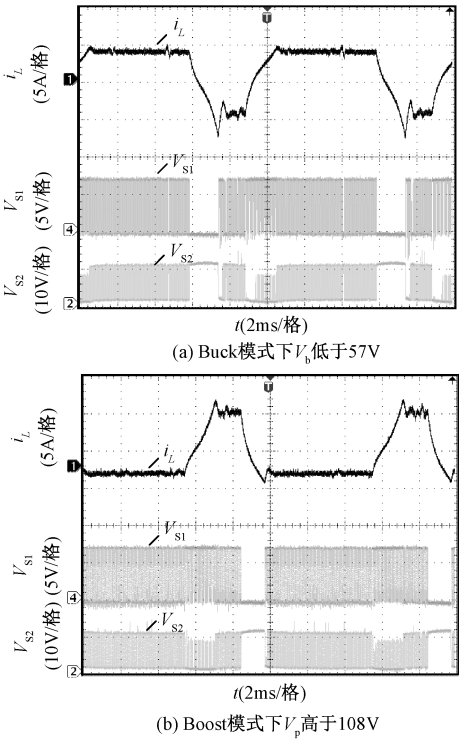


图 14 稳定性实验波形
Fig. 14 Waveforms of stability

由式(4)可知,电感电流离散时间映射与电感值 L 、电容电压 V_b 、开关周期 T 相关。在固定开关频率的情况下,可选择增大电感值或减小电容电压值,即降低预设的谷值电压值或增大电容 C_b 值来减小混沌区域,改善变换器稳定性。

5 结论

本文提出一种具有快速动态响应的大功率脉冲负载电源。根据脉冲负载的特性,采用双向 Buck/Boost 变换器与电容相结合的方法,解决了脉冲负载设备与供电电源的电源适应性问题。该电源既在供电功率大于脉冲功率时吸收多余的功率,又可在供电功率小于脉冲功率时补充不足的功率,而且当脉冲负载处于待机状态时,多余的供电功率并没有通过其他途径消耗掉,而是利用电容存储起来以备脉冲负载工作时使用,提高了供电电源的利用率。其

次,本文提出基于电容电压谷值检测的自适应电流反馈控制,该控制可以随着负载占空比不同而改变前级输出电流参考值,实现了供电系统在宽负载范围内均可正常工作。同时,对电路进行了动力学建模分析,研究表明,在电容充电时,电源电压高于 108V,以及电容放电时,电容电压低于 57V 均会造成系统不稳定现象,可通过增大电感与电容改善稳定性。仿真与实验验证了理论分析的可行性。此外,从仿真与实验中均可看出母线电流在轻/重载模式切换时会产生超调/跌落现象,下一步工作将研究如何消除电流超调/跌落现象。

参考文献 (References):

[1] 范原 (Fan Yuan). 脉冲负载直流变换器输出动态响应的研究 (Research on output dynamic response of DC/DC converter with impulse load) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2015.

[2] Xu X D, Ning J H. Research on the matching of switching power load and AC generator [J]. Communication Power Technology, 2014, 31 (4): 28-30.

[3] 吕闯 (Lv Chuang). 脉冲性负载研究现状与展望 (Research status and prospect of pulsed load) [J]. 飞航导弹 (Winged Missiles Journal), 2017, 1 (9): 70-73.

[4] 戴咏喜, 徐冲, 刘以建 (Dai Yongxi, Xu Chong, Liu Yijian). 应用于脉冲负载的蓄电池和超级电容器混合储能的研究 (Research on hybrid energy storage for pulse-loaded batteries and supercapacitors) [J]. 通信电源技术 (Telecom Power Technologies), 2011, 28 (4): 12-14.

[5] 周维维, 吴宁, 郑步文, 等 (Zhou Luowei, Wu Ning, Zheng Buwen, et al.). 一种适用于大功率脉冲负载的开关电源 (A switching power supply suitable for high power pulse load) [J]. 电工技术杂志 (Electrotechnical Journal), 1998, (3): 18-20.

[6] 李岳 (Li Yue). 基于虚拟同步发电机的微电网控制策略的研究 (Research on microgrid control strategy based on virtual synchronous generator) [D]. 合肥: 安徽理工大学 (Hefei: Anhui University of Science and Technology), 2014.

[7] 丁明, 吴建峰, 朱承治, 等 (Ding Ming, Wu Jianfeng, Zhu Chengzhi, et al.). 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略 (Real-time smooth control strategy for energy storage system with SOC function) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE),

- 2013, 33 (1): 22-29.
- [8] 武伟, 谢少军 (Wu Wei, Xie Shaojun). 基于 MMC 双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计 (The control strategy analysis and design of ultracapacitor energy storage system based on MMC bi-directional DC-DC converter) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (27): 83-93.
- [9] 谢俊文, 陆继明, 毛承熊, 等 (Xie Junwen, Lu Jiming, Mao Chengxiong, et al.). 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法 (Optimization control method of battery energy storage system based on variable smoothing time constant) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (1): 96-102.
- [10] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等 (Li Fengbing, Xie Kaigui, Zhang Xuesong, et al.). 基于寿命量化的混合储能系统协调控制参数优化 (Optimization of coordinated control parameters for hybrid energy storage system based on lifetime quantization) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (1): 1-5.
- [11] 王坤林, 游亚戈, 张亚群 (Wang Kunlin, You Yage, Zhang Yaqun). 海岛可再生独立能源电站能量管理系统 (Island renewable independent energy power station energy management system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (14): 13-17.
- [12] Tse C K, Poon N K. Nullor-based design of compensators for fast transient recovery of switching regulators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1995, 42 (9): 667-675.
- [13] Poon F N K, Tse C K, Liu C P. Very fast transient voltage regulator based on load correction [A]. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. 1999. 1: 66-71.
- [14] Meyer E, Zhang Z, Liu Y F. Controlled auxiliary circuit with measured response for reduction of output voltage overshoot in Buck converters [A]. 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. 2009. 1367-1373.
- [15] Wen Y, Trescases O. DC-DC converter with digital adaptive slope control in auxiliary phase for optimal transient response and improved efficiency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (7): 3396-3409.
- [16] 佟德军 (Tong Dejun). 基于超级电容的双向变换能量存储系统的研究 (Research on bidirectional conversion energy storage system based on ultracapacitor) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2012.
- [17] 刘正春, 王勇, 尹志勇, 等 (Liu Zhengchun, Wang Yong, Yin Zhiyong, et al.). 有限容量系统脉冲性负荷建模与仿真 (Modeling and simulation of impulse loads in finite capacity systems) [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版) (Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)), 2014, 41 (1): 33-37.
- [18] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等 (Hou Shiying, Fang Yong, Sun Tao, et al.). 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用 (Application of hybrid energy storage system in power balance of independent photovoltaic power generation system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2011, 35 (5): 183-187.
- [19] 欧阳少迪, 刘进军 (Ouyang Shaodi, Liu Jinjun). 几种模块化多输出电力电子变压器拓扑的不平衡负载补偿能力比较 (Comparison of several modular multi-output power electronic transformer topologies on unbalanced load compensation capability) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 11-20.
- [20] 康凯, 徐伟东, 徐蓉, 等 (Kang Kai, Xu Weidong, Xu Rong, et al.). 不同初始温度下脉冲大电流直线电机驱动性能研究 (Study on driving performance of high current linear motor with different initial temperature) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 72-78.
- [21] Huang X Z, Ruan X B. High power and low voltage power supply for low frequency pulsed load [A]. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition [C]. 2017. 2859-2865.
- [22] Huang X Z, Ruan X B. A pulsed power supply adopting active capacitor converter for low-voltage and low-frequency pulsed load [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (11): 9219-9230.
- [23] 汪莉丽, 周宇飞, 陈军宁, 等 (Wang Lili, Zhou Yufei, Chen Junning, et al.). DC-DC 开关变换器的动力学模型及其分析方法研究 (Study on the dynamical model and analytical methods for DC-DC switching converters) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2006, 43 (5): 51-55.
- [24] Fossas E, Olivar G. Study of chaos in the Buck converter [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 1996, 43 (1): 13-25.

**Design and implementation of pulsed load power supply
with fast dynamic response**

ZHU Ze-yu, YANG Ping, CAO Jin, LIU Chao-rui, WU Song-rong

(Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The current pulse load is generally characterized by wide frequency band and pulse variation, which demands higher stability of the power supply system. After the pulse load is directly connected to the power supply bus, the instantaneous power of its load presents the pulse characteristic as the load current, which causes the bus current fluctuation to be too large. In order to balance the instantaneous power difference, this paper proposes a bi-directional converter to compensate for the excessive current fluctuation of the bus caused by the pulse load characteristic, and to solve the problem of adaptability of pulse load and power supply. This paper proposes an adaptive current feedback control with capacitance voltage valley detection. This method can be applied to the case where both the pulse frequency and power of the load change arbitrarily. The influence of parameter design on the stability of the converter is analyzed by establishing its dynamic model. Finally, an experimental prototype is built to verify the feasibility of the proposed scheme.

Key words: current pulsed load; bidirectional converter; adaptive current feedback; dynamical model