

水下机器人储能装置控制技术的研究

张皓¹,段玉兵¹,姚金霞¹,苏建军^{1,2},胡晓黎¹,辜超¹,周超¹,张强³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250001;

2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 3. 哈尔滨

工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:水下机器人在水下作业时需要储能装置作为供电电源或者后备电源,因此储能装置的能量管理直接影响了水下机器人的工作能效。以水下机器人的用电需求为目标,设计出水下机器人的电能管理控制技术。该电能管理控制技术由均流控制策略和剩余容量匹配控制策略构成,以确保在不同运行工况下的安全、可靠供电。仿真和实验表明,所设计的电能管理控制技术既可以保障储能装置运行的安全性,又能够有效地提高储能装置所存储能量的利用效率,进而延长水下作业时间,最终提升水下机器人的综合工作能效。

关键词:储能装置;能量管理;均流控制;剩余容量匹配

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20218

Research on Control Technology of Energy Storage Device for Underwater Robot

ZHANG Hao¹, DUAN Yubing¹, YAO Jinxia¹, SU Jianjun^{1,2}, HU Xiaoli¹, GU Chao¹, ZHOU Chao¹, ZHANG Qiang³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250001, Shandong, China; 2. State

Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, Shandong, China; 3. Automation

College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: Underwater robot need energy storage devices as power supply or backup power supply when working underwater, so the energy management of energy storage devices directly affects the energy efficiency of underwater robot. Aiming at the power demand of the underwater robot, the power management and control technology of the underwater robot was designed. The power management and control technology was consisted of current sharing control strategy and residual capacity matching control strategy to ensure safe and reliable power supply under different operating conditions. The simulation and experiment show that the power management and control technology designed can not only ensure the safety of the energy storage device, but also effectively improve the energy utilization efficiency of the energy storage device, thus to prolong the underwater operation time, and ultimately enhance the comprehensive work energy efficiency of the underwater robot.

Key words: energy storage device; energy management; current sharing control; residual capacity matching

近年来,随着水下机器人技术的开发和完善,水下机器人被广泛地应用于各行各业中,从事海洋勘探、水下作业等工作。

水下机器人上安装有众多的用电设备,例如水下推进器、照明设备、摄像机等,为了保证这些用电设备的正常工作,必须为其提供稳定的电能。目前水下机器人可分为无缆型和系缆型两种,其中无缆型完全依靠自身携带的储能装置提供电力,系缆型正常工作时是通过脐带电缆获得

电力供应,但是为了应对突发的意外情况,系缆型水下机器人也会装备储能装置作为后备电源。

考虑到体积、重量、成本等诸多因素的限制,无论是无缆型还是系缆型水下机器人都只能携带容量有限的储能装置容量,如何充分、有效地利用这些有限的能量来提升水下机器人的工作效能是文章所要解决的关键问题。

蓄电池类的储能装置都是由多个储能单元通过串并联而构成的,而目前针对并联运行的储

基金项目:国家电网公司科技项目(5206001700AP)

作者简介:张皓(1986—),男,硕士,高级工程师,Email:sdqzhh@163.com

能单元多采用均流控制^[11-11]、效率优化控制^[12,13]、主从控制^[14-15]等控制策略。其中均流控制具有原理简单、易于实现、控制效果好等特点,并且可以提高储能装置运行的安全性和可靠性,因此被广泛使用。但是在实际使用过程中,由于放电特性间存在的差异,各个储能单元的剩余容量会不尽相同,当剩余容量差异较大时,在均流控制模式下,剩余容量少的储能单元放电完毕后,受到安全运行等条件的限制,剩余储能单元往往也无法正常工作,致使这些储能单元中的剩余能量无法释放,降低了整个储能装置的能量利用效率。

因此论文以满足海底电缆打捞机器人研制项目中的能量管理需求为目标,针对如何通过能量管理来提高装储能装置能量利用效率的技术进行了深入研究。

1 负荷分配控制方案设计

以2个储能单元并联运行为例,论文设计出的储能装置能量管理系统的硬件结构框图如图1a所示。每一个储能单元都与水下机器人的主控制器进行数据通讯,同时又都通过各自的负荷分配控制电路与1条公共信息母线连接。其中负荷分配电路如图1b所示。负荷分配电路的输入为模拟信号 S_{LD} ,公共信息母线上的信号为 S_{Bus} 。

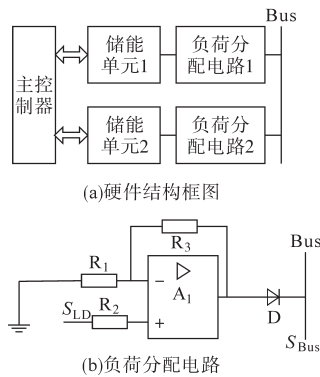


图1 能量管理系统结构图

Fig. 1 System architecture of the energy management

能量管理系统具体运行过程为:首先各个储能单元对自身的剩余容量和输出电流进行检测,并将检测结果传送至水下机器人的主控制器;其次主控制器根据当前各个储能单元的状态参数和机器人的运行工况,决定负荷分配控制策略是采用均流控制还是剩余容量匹配控制,并将决策反馈给各个储能单元;最后储能单元依据主控器的决策,利用负荷分配电路和公共信息母线自

主完成负荷分配控制。项目设计完成的均流控制和剩余容量匹配控制如下文所述。

1.1 均流控制

当多个储能单元的剩余容量都很充足,能够满足当前负荷的长时间运行需求时,可采用均流控制来保证运行的安全性。均流控制时,每一个储能单元都将自身的输出电流 I_o 作为负荷分配电路的输入信号 S_{LD} ,该信号经过放大后通过二极管 D 送至公共信息母线。由于所有的储能单元都将自身的输出电流信号送至公共信息母线,根据二极管的单向导通特性可知,最终公共信息母线上的信号 S_{Bus} 必然是所有储能单元输出电流的最大值 I_{Omax} 。各个储能单元根据检测到的 I_{Omax} 信号和自身的输出电流 I_o 信号,利用现有的最大电流均流法完成最终的均流控制。

1.2 剩余容量匹配控制

当储能单元的剩余容量差异较大,依靠均流控制无法满足负载运行对能量需求的情况下,可采用剩余容量匹配控制,提高能量的利用效率,尽最大可能满足水下机器人的运行需求,延长其工作时间。

在论文设计的剩余容量匹配控制中,采用了负荷系数 k_L 来描述储能单元输出电流与剩余容量之间的关系,其定义如下式所示:

$$k_L = \frac{I_o}{SOC} \tag{1}$$

式中: I_o 为输出电流; SOC 为储能单元的剩余容量。

每一个储能单元都将计算出的自身负荷系数 k_L 作为负荷分配电路的输入信号 S_{LD} ,同理可知公共信息母线上的信号 S_{Bus} 必然是所有储能单元负荷系数的最大值 k_{Lmax} 。各个储能单元利用检测到的最大负荷系数 k_{Lmax} 和自身的负荷系数 k_L 的差值 Δk 对输出电流进行调节,最终所有储能单元的负荷系数会趋近于一致,即实现了与剩余容量大小相匹配的负荷分配控制目标。

由均流控制和剩余容量匹配控制构成的负荷分配控制策略的控制框图如图2所示。图2中的VC为电压环控制器,CC为电流环控制器,LDC为负荷分配控制器, U_{ref} 为储能单元的输出电压给定值, U_o 为输出电压反馈值, I_L 为电感电流反馈值,PWM为触发信号生成电路,Buck Circuit为充放电主电路。 ΔU 为负荷分配控制器输出的电压调节信号,该电压调节信号与输出电压

给定值叠加,通过电压、电流双闭环控制,最终实现对输出电流的调节。

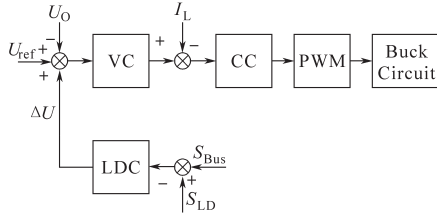


图2 负荷分配控制策略控制框图

Fig. 2 Control block diagram of load distribution control strategy

2 仿真验证与分析

针对设计出的基于均流控制和剩余容量匹配控制的负荷分配控制方案,论文在Matlab软件中搭建了仿真模型,仿真模型如图3所示。

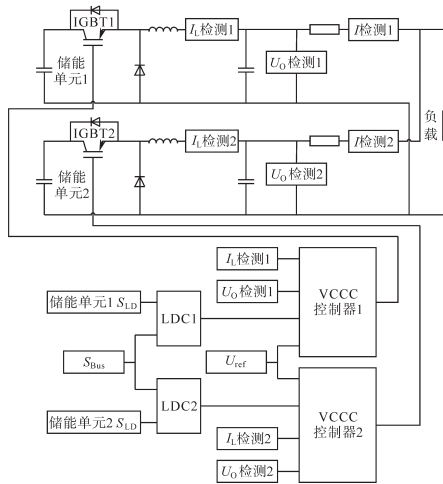


图3 仿真模型框图

Fig.3 The block diagram of the simulation model

具体仿真工作设计如下:1)其中采用卡尔曼滤波算法对储能装置的剩余容量进行检测。2)储能装置为由两个额定容量相同的储能单元并联构成,设储能单元1的输出电流为 I_1 ,剩余容量为 SOC_1 ,储能单元2的输出电流为 I_2 ,剩余容量为 SOC_2 。3)两个储能单元的内部等效参数不同,剩余容量比为2:3。4)储能单元的充放电电路均为双向Buck型电路。

在图3所示的仿真模型中,电压环控制器和电流环控制器均采用PI控制器予以设计实现。为了简化仿真模型,电压环控制器和电流环控制器共同集成在图中的VCC模块内部。而在负荷分配控制器的设计中,由于信号 S_{LD} 的幅值始终小于或等于 S_{Bus} ,因此负荷分配控制器只能采用比例控制器。图4为启动和由均流控制切换至

剩余容量匹配控制的仿真波形。为了防止启动过程中出现储能单元输出电流越限的情况,在启动过程中采用了均流控制来提高储能单元运行的安全性在均流控制策略的控制下,两个储能单元的输出电流基本一致。当均流运行进入稳态工况后,为了验证剩余容量匹配控制的可行性以及两种控制策略切换过程的动态性能,在 $t=0.3\text{ s}$ 时刻,人为将控制策略切换为剩余容量匹配控制,两个储能单元的输出电流在切换过程中变化平稳,稳态后的比值为2:3,与剩余容量比值相同。切换过程中,负荷处电压平稳,无明显波动。

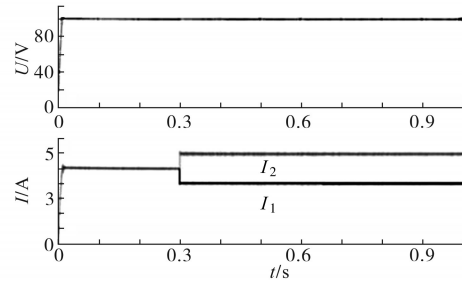
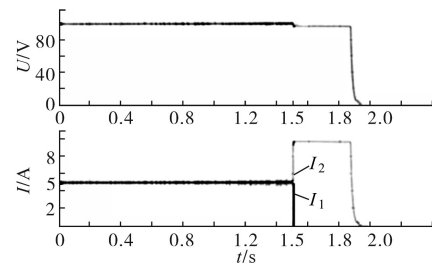


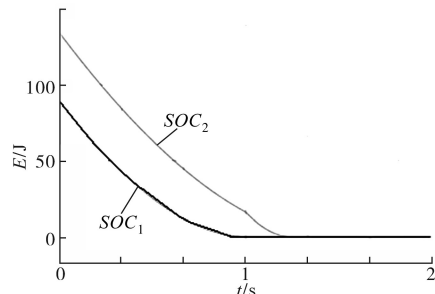
图4 控制策略及其切换过程仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms of the control strategy switching process

图5为当剩余容量较小时,单独采用均流控制得到的仿真结果。



(a)电压和电流波形



(b)剩余容量变化波形

图5 均流控制仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of current sharing control

图5a为负荷处电压及两个储能单元输出电流波形,图5b为两个储能单元剩余容量变化曲线。在均流策略的控制下,两个储能单元的输出电流均为5A,其放电速率相同,由图5a可知,剩

余容量小的储能单元1首先在 $t=1.5\text{ s}$ 放电完毕,储能单元2虽然可以单独放电为负载提供能量直至 $t=1.9\text{ s}$ 左右,但是由于 1.5 s 后储能单元2的剩余容量已经很小,并且放电速率大幅增加,致使负荷处电压发生了较大偏差。特别是在实际中考虑到输出电流最大值的限制,储能单元2可能无法单独工作,即在 $t=1.5\text{ s}$ 时刻整个储能装置就不得不停止运行,致使储能单元2中的剩余能量无法被利用,降低了能量的利用效率。

图6为相同情况下,剩余容量匹配控制仿真结果。在剩余容量匹配控制策略的控制下,两个储能单元的输出电流并不相等,其中 $I_1=4\text{ A}$, $I_2=6\text{ A}$,储能单元2的放电速率要快于储能单元1的放电速率,但却同时在 $t=1.9\text{ s}$ 左右放电终止,由于控制上的误差,储能单元1的放电终止时间略提前于储能单元2,致使储能单元2的输出电流在最后时刻出现了尖峰波动。在实际应用中,可通过合理设置退出运行的剩余容量值阀门值来避免这一现象的产生。与均流控制相比,在近似于 1.9 s 的时长内,两个储能单元都能够安全运行,共同承担负荷,有效延长了储能装置的安全运行时间,所存储能量的利用效率接近了100%。

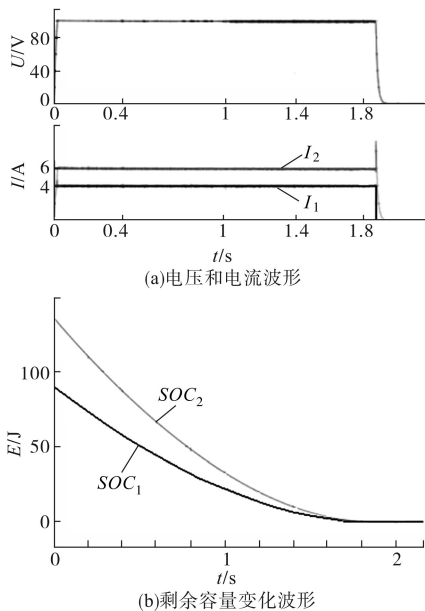


图6 剩余容量匹配控制仿真

Fig.6 Simulation of residual capacity matching control

3 实验验证与分析

在仿真验证的基础上,利用DSP28335作为各个储能单元的控制核心,搭建了硬件实验平台,并编写了控制程序,储能单元的控制流程图

如图7所示。其中:数据采集对象包括储能单元的输出电压、输出电流、剩余容量等信息;数据通讯是将采集到的数据通过串行总线发送至上一级的主控制器,并接收主控制器发送过来的控制模式指令,根据指令内容选择执行均流控制或剩余容量匹配控制;若执行均流控制,则令 S_{LD} 等于自身的输出电流信号;若执行剩余容量匹配控制,则计算自身的当前负荷系数 k_L ,并令 $S_{LD}=k_L$;依据图2所示的控制策略实现框图进行相关计算,最终形成控制信号。

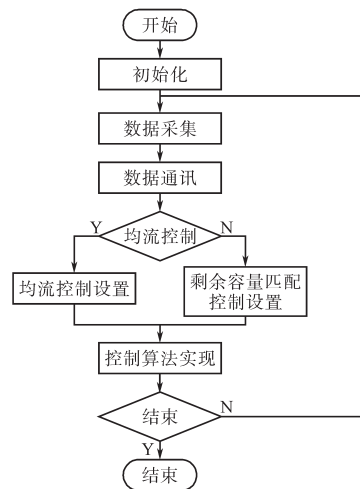


图7 控制流程图

Fig. 7 Control flow chart

在实际运行过程中什么时候进行控制策略切换并没有固定标准,需要根据任务的性质,例如工作时长、用电量的需求,和检测到的各个储能单元剩余容量的大小等因素进行综合分析,才能形成判断。在文章资助项目的具体设计中,主控制器根据当前的负载功率和检测到的SOC值,估算出在负载不变的情况下,分别采用两种控制策略时储能装置的剩余工作时长,并将计算结果反馈至控制终端,最终由操作人员根据后续工作计划进行人为的控制策略切换。

实验平台是依据原有的硬件电路,通过必要的参数调整搭建而成。充放电主电路选用的是双向Buck电路,工作母线额定电压为 100 V ,电感值 $L=10\text{ mH}$,电容值 $C=1\ 100\ \mu\text{F}$,IGBT模块为BSM100GB120-DN2,驱动芯片为2SD106A。储能单元的控制器的DSP28335,主控制器选用的是工控机(仅用于实验室验证阶段)。

实验测得的输出电流、负荷处电压波形如图8所示。

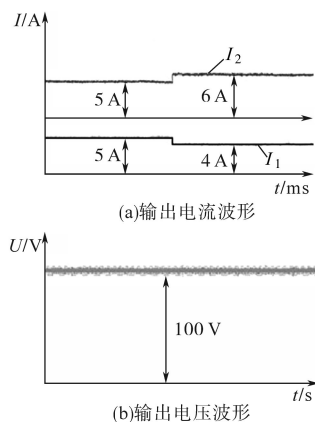


图8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

在实验过程中,首先采取均流控制,两个储能单元输出电流均为5 A左右。由于实验运行时间有限,储能单元的剩余容量变化较小,因此在某一时刻人为将均流控制切换为剩余容量匹配控制,且储能单元1与储能单元2的剩余容量之比为2:3。由图8a可知,控制策略切换后,经过负荷的重新分配、调整,储能单元1的输出电流下降至4 A左右,而储能单元2的输出电流上升为6 A左右,即两个储能单元的输出电流之比与剩余容量之比近似相等。

图8b所示的电压波形表明,在控制策略切换过程中,负荷处电压平稳。根据图2的控制策略实现框图可知,储能单元2只能通过提升输出电压幅值的方法来维持较大的输出电流,致使负荷处电压略高于额定电压(100 V),实测平均值为102.3 V。并且由于负荷分配控制器采用的是比例控制器,所以负荷分配控制会一直处于动态的调节过程中,进而增加了输出电压的纹波含量,实测纹波的最大幅值为1.9 V。即电压的超调量和纹波含量均小于5%。并且通过对各环节控制器的控制参数进行优化,还可以进一步提高负荷处电压质量。

4 结论

论文结合海底电缆打捞机器人项目的实际需求所设计出的水下机器人储能装置的负荷分配控制技术具备以下特点:

1) 根据各个储能单元剩余容量的大小以及水下作业任务的需求,可灵活采取均流控制和剩余容量匹配控制来实现多个储能单元并联运行的负荷分配控制。

2) 定义出用于描述输出电流与剩余容量关系的负荷系数,为剩余容量匹配控制策略的实现提供了控制依据。

3) 剩余容量匹配控制策略的实施,可以有效延长整个储能装置的工作时间,提高其所存储能量的利用率。

4) 采用剩余容量匹配控制时,各个储能单元的输出电流大小不一,当某一储能单元的输出电流达到其上限,且工作时间较长时,可能会影响到运行的安全性。而采用均流控制时,各个储能单元的输出电流大小相同,可避免上述现象的出现,进而提高各个储能单元运行的安全性和可靠性。

5) 均流控制和剩余容量匹配控制所采用的电路结构完全相同,只需改变负荷分配电路的输入信号,即可灵活地实现不同控制策略的切换,且切换过程中输出电流和电压都没有明显的冲击,可实现平稳过渡。

参考文献

- [1] Suyong Chae. Digital Current Sharing Method of Parallel Interleaved DC-DC Converters Using Input Ripple Voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3277-3291.
- [2] 王明玥,温金鑫,于洪泽,等.一种高频开关电源系统的并联均流控制方法[J]. 电气传动, 2019, 49(1): 68-71, 82.
- [3] 孟秋艳,童亦斌,梁建钢.基于电池单体电压和SOC的储能优化控制策略[J]. 电气传动, 2018, 48(5): 63-67.
- [4] 陈亚爱,王赛,周京华,等.轨道交通储能系统控制策略综述[J]. 电气传动, 2018, 48(12): 49-54.
- [5] 吴铁洲,薛竹山,向富超,等.基于遗传算法的电动汽车HESS功率优化分配[J]. 电气传动, 2019, 49(2): 49-55.
- [6] 张强,姚绪梁,张敬南.大功率直流电源并联运行的均流控制[J]. 电力电子技术, 2012, 36(21): 108-112, 117.
- [7] CAI Jiuqing, CHEN Changsong, LIU Peng, et al. Centralized Control of Parallel Connected Power Conditioning System in Electric Vehicle Charge-discharge and Storage Integration Station[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(2): 269-276.
- [8] XIAO Wenxun, ZHANG Bo, QIU Dongyuan. Improved Automatic Current-sharing Control Based on Average Current Mode for Parallel Boost Converters[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(13): 64-69.
- [9] CHEN Wu, RUAN Xinbo, YAN Hong. Control Strategy for DC/DC Multiple Series-parallel Combined System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 93-102.
- [10] ZHANG Junming, XIE Xiaogao, WU Xinke, et al. Research on Active Current-sharing Methods for DC/DC Converters[J].

(下转第112页)

参考文献

[1] 尹培培,洪峰,王成华,等. 无源无损软开关双降压式全桥逆变器[J]. 电工技术学报,2014,29(6):40-48.

[2] 张强,林维明. 一种最小应力的无源无损软开关方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4999-5008.

[3] 孙铁成,郭超,娜仁图亚,等. 具有移相控制的 ZVS 全桥 DC-DC 斩波变换器[J]. 电工技术学报,2014,29(12):72-78.

[4] 陈桂鹏,陈鑫,陶勇,等. 基于耦合电感的零电压开关同步 Buck 变换器[J]. 电工技术学报,2016,31(S1):102-110.

[5] Eberle W, Zhang Zhiliang, Liu Yanfei, *et al.* A Practical Switching Loss Model for Buck Voltage Regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(3):700-713.

[6] Jose Eduardo Baggio, Helio Leses Hey, Hilton Abilio Grun- dlinge, *et al.* Isolated Interleaved-phase-shift-PWM DC-DC ZVS Converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applica- tion,2003,39(6):1795-1802.

[7] 张卫平,张晓强,陈振更,等. 一种新型软开关BUCK变换器 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):112-117.

[8] Zhao Chuanhong, Round S D, Kolar J W. An Isolated Three- port Bidirectional DC-DC Converter with Decoupled Power Flow Management[J]. IEEE Transactions on Power Electron- ics,2008,23(5):2443-2453.

[9] 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.

[10] Liu Danwei, Li Hui. A ZVS Bi-directional DC-DC Converter for Multiple Energy Storage Elements[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2006,21(5):1513-1517.

[11] Jayashree E, Uma G. Design and Implementation of Zero-volt- age-switching Quasi-resonant Positive-output Luo Converter

Using Analog Resonant Controller UC3861[J]. IET Power Electronics,2011,4(1):81-88.

[12] Park, JH, Cho, BH. The Zero Voltage Switching (ZVS) Criti- cal Conduction Mode(CRM) Buck Converter with Tapped-in- ductor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 20 (4):1077-1081.

[13] Park Chong-Yun, Lim Ki-Seung, Sin Dong-Seok. Dual Buck half-bridge Inverter with Zero Voltage Switching[J]. Transac- tions of the Korean Institute of Electrical Engineers ,2009, 58 (4):756-762762.

[14] Kim Jae-Kuk, Lee Jae-Bum, Moon Gun-Woo. Zero-voltage Switching Multioutput Flyback Converter with Integrated Auxiliary Buck Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(6):3001-3010.

[15] Liu K H, Lee F C Y. Zero-voltage Switching Technique in DC/ DC Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990,5(3):293-304.

[16] Alexander Charles K, Sadiku Matthew N O. 电路基础[M]. 段哲明,周巍,李宏,等译. 北京:机械工业出版社,2016.

[17] 陈世杰,顾亦磊,吕征宇. Buck 电路的一种软开关实现方法 [J]. 电力电子技术,2004,38(1):33-35.

[18] 贾贵玺,张春雁,肖有文,等. 新型 Buck 软开关电路的设计 与仿真[J]. 电工技术学报,2012,27(2):33-37.

[19] Ryu S H, Lee D Y, Yoo S B, *et al.* Novel ZVZCS PWM DC- DC Converters Using One Auxiliary Switch[C]//APEC March '99, 1999:185-193.

[20] Hua Guichao, Yang E X, Jiang Yimin, *et al.* Novel Zero-cur- rent-transition PWM Converters[C]//Power Electronics Spe- cialist Conference, 1993:538-544.

收稿日期:2018-09-06

修改稿日期:2018-12-12

=====
(上接第 95 页)

Proceeding of the CSEE,2005,25(19):31-36.

[11] 张强,张敬南,姚绪梁,等. 双均流母线的均流电路及其控制 方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014,35(2):202-207.

[12] 张强,王言畅,王锐. 多电源并联运行的效率优化控制方法 [J]. 电力系统自动化,2018,42(17):96-105.

[13] Renaudineau H, Houari A, Shahin A, *et al.* Efficiency Optimi- zation Through Current-sharing for Paralleled DC-DC Boost Converters with Parameter Estimation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,29(2):759-767.

[14] Lee Seung-Woon, Cho Bo-Hyung. Master-slave Based Hier-

archical Control for a Small Power DC-distributed Mi- crogrid System with a Storage Device[J]. Energies, 2016, 9 (12):1-14.

[15] Caldognetto Tommaso, Tenti Paolo. Microgrids Operation Based on Master-slave Cooperative Control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):1081-1088.

收稿日期:2019-05-05

修改稿日期:2019-06-03