

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.003

直流微网中关键技术的研究

王义军¹, 郑晴予¹, 李殿文²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 国网辽宁省电力有限公司鞍山供电公司, 辽宁 鞍山 114000)

摘要: 随着时代的发展,直流微电网已在很多方面得到了广泛的应用。相对于交流微电网而言,直流微电网具有无需跟踪频率以及电压相位、抗扰性更好、降低线路损耗、在基础设施的投资上较低等诸多优点,可见其未来的发展将不可估量。文中首先以直流微网的结构框架为基础,针对具体模块的关键技术等方面提出实现方案;同时设计了一种可以实现零电流关断的智能直流断路器的拓扑结构,并对该模块做了仿真设计验证;最后简单分析了该智能直流断路器的应用及发展。

关键词: 直流微电网; 直流母线电压; 智能直流断路器

Study of Key Technologies in DC Micro-grid

WANG Yijun¹, ZHENG Qingyu¹, LI Dianwen²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Anshan Electric Power Supply Company, Liaoning Anshan 114000, China)

Abstract: With the development of the times, DC micro-grid has been widely used in many ways. With respect to the exchange of micro-grid is concerned, DC microgrid has no need to track the frequency and voltage phase; better immunity; reduce line losses; less investment in infrastructure, and many other advantages. It seems its future development will be immeasurable. Firstly, the structural framework of DC micro-grid based, proposing implementation based on the specific module of key technologies. Then, a topology is designed which can achieve zero current turn-off DC circuit breaker intelligent and verified the module. Finally, the application and development of the intelligent DC circuit breaker is analyzed.

Key words: DC micro-grid; DC bus voltage; intelligent DC breaker

0 引言

为了协调大电网与分布式发电之间的矛盾,充分利用分布式发电的优势,并促进其大规模的整合与应用,学者们提出了微网(Microgrid)的概念。尽管对微网的定义各不相同,但国际上基本认为:微电网是由各种分布式电源/微电源、储能单元、负荷以及监控、保护装置组成的集合;具有灵活的运行方式和调度性能,即能在并网运行和孤岛运行两种模式间切换^[1]。

现阶段,对于交流微电网的研究较为深入,国内的王成山教授等人近年来在交流微电网的结构、控

制和稳定性分析方面发表多篇文章^[2],国外的 Josep M. Guerrero 等人不仅对交流微电网的结构和控制策略等方面做了深入研究,近期他们开始对于直流微网的结构、控制等方面进行了研究^[3-5]。相比交流微电网,直流微电网具有无需跟踪频率以及电压相位、抗扰性更好、降低线路损耗、在基础设施的投资上较低等优点。目前,直流微电网在现代建筑、汽车充电系统、军事应用等方面已得到了广泛的应用,可见其未来的发展将不可估量。文中以直流微网结构为基础,分析了基于直流母线电压的信号控制策略,重点提出了一种智能直流断路器,并对其进行了仿真设计验证。

收稿日期:2016-01-20; 修回日期:2016-03-27

1 直流微网的结构

目前对于直流微电网的总体框架结构, 各研究学者已经有了相对统一的结论, 即与交流微网相似, 负载和源都挂接在一条与大电网隔离的直流母线上, 并通过一个公共接入点(PCC)与大电网并联或者孤岛运行。直流微网的基本结构见图 1。

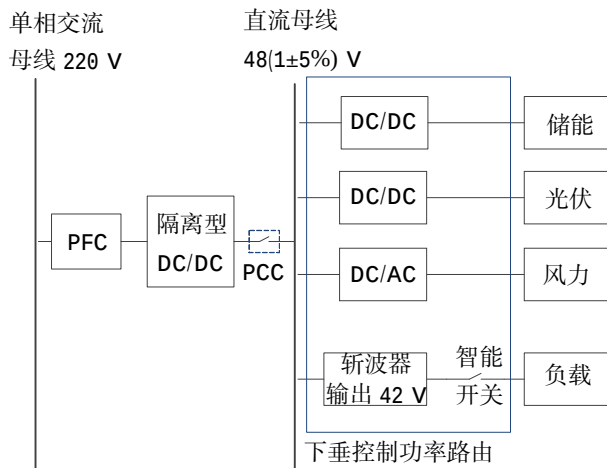


图 1 直流微网的基本结构图

Fig. 1 Basic structure of DC micro-grid

直流微网经过一级 PFC 和一个双向高频 DC/DC 变换器与交流大电网连接。其中, 分布式直流源有光伏电池、燃料电池等, 分布式交流源有风机、微汽轮机等。微电源和负载通过变流器 DC/AC 和 DC/DC 连接到直流母线上, 其中连接储能系统的 DC/DC 变流器是双向的^[6]。PFC 即通过 AC/DC 电路将输入电流校正成与输入电压相同相位的正弦波, 以提高功率因数接近 1^[7]。直流微网总控制器的主要作用是并网和孤岛模式的确定; 应对调度员的需求; 平衡整个直流微网能量的供求; 保证微网内部电能质量; 调节直流微网稳定点^[8]。

2 直流微网的关键技术

直流微电网的研究尚有很多空间可以发掘, 但其中涉及的关键技术主要包含在控制策略、能量管理以及通信中^[9-10]。该节简要介绍基于母线电压的控制方法, 重点提出了一种智能直流断路器, 并对其进行仿真分析。

2.1 基于直流母线电压的控制策略

直流微网控制策略主要分为集中控制、分散控制和分布控制 3 种, 其中分散控制不考虑直流母线变化使得各分布电源间的信息无法交互不予采用, 集中控制由于需要一个传输速度较快的通信架构, 目前实现较为困难, 所以大部分直流微网的控制策略都选用分布控制, 即基于直流母线电压的控制策

略(DC bus signal control)^[11-15]。直流母线电压的选取, 依据文[16]中对不同直流电压对负载和线路损耗的分析, 得出选择直流母线电压为 48 V 较为合适。直流微网作为电源输出时 DBS 的具体实现方式, 变换器的 U-I 下垂控制线见图 2, 原理框图见图 3, 变换器通过将母线电压幅值与自身工作状态阈值电压比较, 进而决定工作模式。

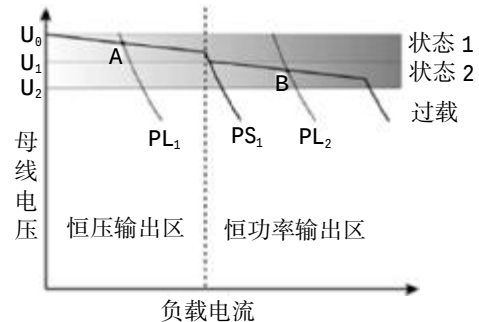


图 2 新能源放电时的控制器 U-I 下垂线

Fig. 2 U-I droop curve of controller in the new energy discharge

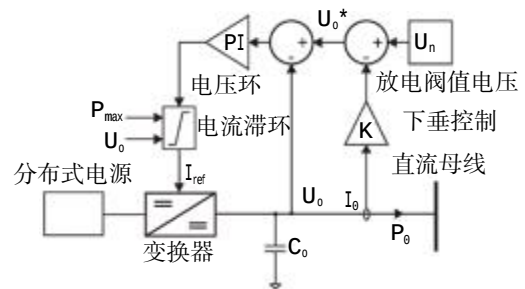


图 3 新能源放电时变换器控制框图

Fig. 3 Block diagram of the controller in the new energy discharge

直流系统中包含 3 类电能单元: 新能源、储能装置和负载单元^[17]。首先, 直流母线电压的幅值作为信号, 分为不同控制区域。当系统直流母线电压处于状态 1 时, 仅将新能源并入直流母线, 状态 2 中储能装置也被加入。其中新能源的放电阈值为 U_0 , 储能装置的放电阈值为 U_1 。当负载小于新能源最大功率点 (曲线 PS_1) 时, 新能源的变换器与直流母线交互, 使得仅新能源并网, 并且变换器工作在恒压输出状态, 调制母线电压至其放电阈值。当负载电流增大, 母线电压由于下垂线的控制逐渐降低, 所以, 当带负载 PL_1 时, 系统工作点在 A 点处。当负载超过新能源最大功率点, 新能源变换器检测到该状态后, 改变其工作状态至恒功率输出模式, 限制其输出功率为 PS_1 。由于按 PS_1 曲线增长, 电压会跌落较多, 所以为了保持母线电压在一定范围内稳定, 当电压跌落至 U_1 以下, 储能装置并入, 提高整个系统的工作电压, 当带负载 PL_2 时, 系统工作点在 B 点处。

图3控制模块是标准双环控制,电流内环响应速度快,电压外环通过PI调节保证电压稳定。在恒压工作模式中,PI控制器使得直流母线电压调制到其放电阈值电压,电流按照内环输出额定值。同时,设置了控制器的下垂曲线保证了不同新能源和储能装置能通过变换器实现功率均分。下垂曲线公式为

$$U_0^* = U_n - kI_0 \quad (1)$$

式(1)中: U_n 为变换器放电阈值; I_0 为输出电流; k 为下垂系数。恒功率运行时,新能源的变换器跟踪新能源的最大功率点运行,储能装置在母线电压达到放电阈值后,按下垂控制支撑母线电压。

以上介绍了新能源模块放电方式的控制策略,对于整个系统,储能装置作为一个能量缓冲器,其控制器根据直流母线电压的不同分为充电控制和放电控制两部分,具体储能变换器的控制框图见图4。

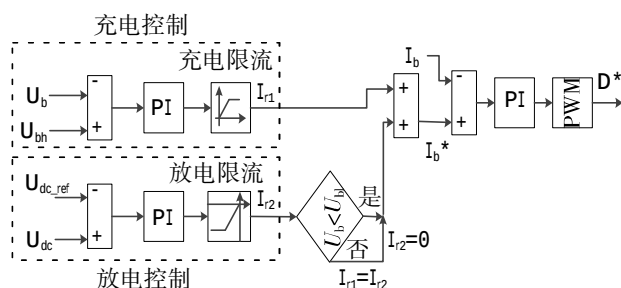


图4 储能变换器总体控制框图

Fig. 4 Overall control diagram of stored energy converter

图4中: U_b 为检测到的蓄电池电压; U_{bh} 为相对于剩余容量95%时的电压; U_{bl} 为相对于剩余容量40%时的电压,充放电电流最大值都有相应限制; I_0^* 为储能变换器的参考电流; I_0 为变换器实际输出电流; D^* 为变换器的占空比; U_{dc} 为直流母线电压测量值; U_{dc_ref} 为给定参考值。

将 U_{dc} 和 U_{dc_ref} 比较后通过PI调节及限流环节得到电流控制环的输入参考值 I_{r2} ,若 U_b 小于 U_{bl} ,则 $I_{r2}=0$,此时蓄电池为充电状态,参考电流为 I_{r1} ;若 U_b 大于 U_{bl} ,则参考电流为 I_{r2} ,此时蓄电池为放电状态。其中,充电状态时,将 U_b 和 U_{bh} 比较后通过PI调节和限流环节,得到参考电流 $I_{b1}=I_0^*$ 。通过 I_0^* 的大小决定电池工作状态,当其大于0,变换器工作在放电状态,小于零则充电状态。 U_{bh} 和 U_{bl} 的设置实现了储能的过冲过放保护。

2.2 智能直流断路器

2.2.1 智能直流断路器的设计及仿真

家用开关通常因为拉断一个带感性负载而产生局部击穿放电,对于直流开关,同样存在负载续流问题。根据软开关和谐振开关技术中提出的能量转移和建立续流回路这两条思路^[18-20],文中提出了一种

适用于直流断路器的零电流关断拓扑结构。这类开关的控制完全由电信号触发辅助开关管实现,而机械开关通过检测电流和延迟控制,自动零电流断开。拓扑设计图见图5。

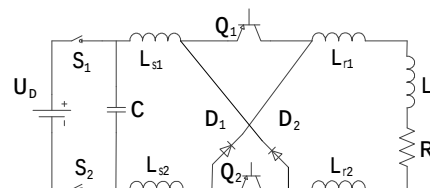


图5 智能直流断路器拓扑结构的设计

Fig. 5 Design of intelligent DC circuit breaker topology

系统正常运行时,机械开关 S_1 、 S_2 闭合,使得负载产生续流回路,并在该回路中产生谐振,MOSFET主开关管 Q_1 、 Q_2 过零点时自动导通;当系统故障时 Q_1 、 Q_2 产生关断信号,反向并入的两个二极管,使得负载电流可以通过 D_1 、 D_2 续流至直流电源。虽然直流线路中的线路电感较小(采用双绞线输电,不同电流方向的线路紧密相绕,对外总电流几乎为零,电感值较小),但是考虑到对于电感 L_{s1} 和 L_{s2} 其在续流阶段仍有电流的突变,所以在靠近电力电子开关侧并入一个适当的电容 C 吸收其电流变化的冲击,同时电容上的谐振电压幅值也不能过高,谐振时间要合适。最后,当线路电流为零后(可通过检测或延迟固定时间),再拉开机械开关 S_1 、 S_2 。

通过综合分析以上因素得到该拓扑结构,并在MATLAB中对其建模,验证设计原理可靠性。Simulink仿真原理图见图6。

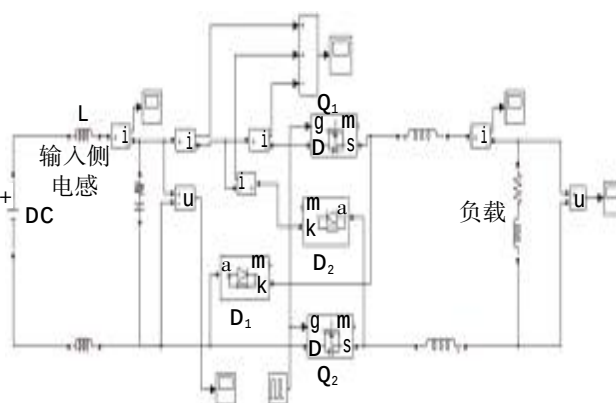


图6 直流断路器仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of DC circuit breaker

由于上文对于直流微电网电压等级设定中已选用了48V,所以仿真时设定直流电源为50V,负载为1Ω和1mH的阻抗,考虑直流采用双绞线且电压等级较低,线路电感取为1nH,电容取为470μF,电容串联的限流电阻为1mΩ。开关管的触发脉冲由一个脉宽触发器产生,0.5s时产生关断信号。仿真结果见图7-10。

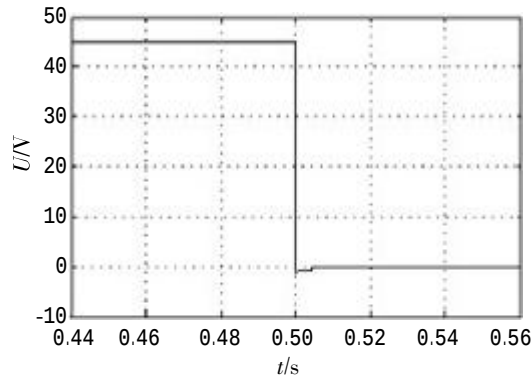


图 7 负载输出电压波形图

Fig. 7 Output voltage of the load

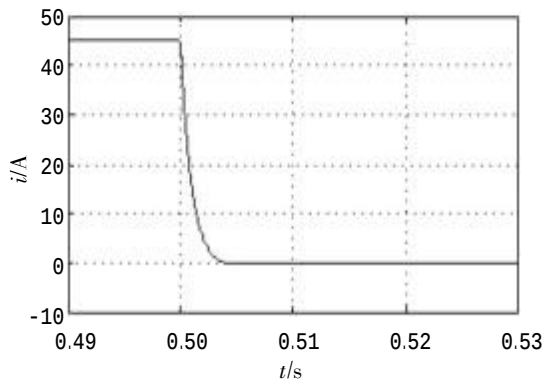


图 9 输出侧负载电流波形图

Fig. 9 Current of the load on output side

负载输出电压在开关断开后有一个小幅的跌落,说明电感电流在减小时产生一定的反压,从波形幅值看出反压在 1 V 之内,而负载工作电压在 48 V 左右,考虑到反压幅值小且作用时间仅在 4 ms 左右,所以认为在可以接受范围内。输入侧电容电压波形可以看到电容由于吸收了输入侧线路电感的电流导致了一个过阻尼谐振过程,通过调整电容值与电路电抗适配,使得输入侧谐振幅值和谐振时间都较小,幅值做大过调 0.25 V(50 V 稳定),谐振时间 0.2 ms,考虑到机械开关动作一次的时间也要在 ms 级,所以认为控制策略完全满足要求。输出侧负载电流 4 ms 后完全关断,输入侧电感由于谐振左右产生振荡,但同样在短时间内完成衰减至零。所以综合考虑输入输出侧的电压电流情况,认为这套拓扑结构适用于直流微网系统,可以作为一套智能开关实现安全切除负载的功能,并可以通过电信号完成前级与负载的交互。

2.2.2 智能直流断路器在直流微网中的应用

首先,这种直流断路器能起到最普通的开关作用,并且能保证开关动作不产生拉弧现象,保证了低压家用开关的安全性;同时,这类开关的控制完全由电信号触发辅助开关管实现,开关管的电信号可以作为通信传递接入或退出的状态。

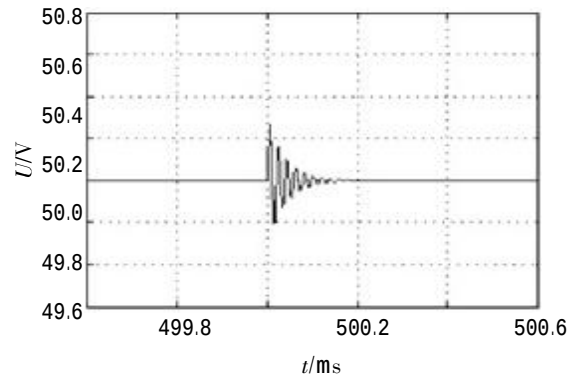


图 8 输入侧吸收电容的电压波形图

Fig. 8 Absorbing capacitor voltage on input side

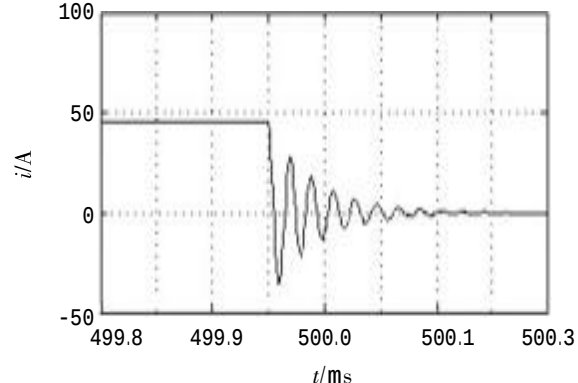


图 10 输入侧线路电感电流波形图

Fig. 10 Inductor current of the line on input side

目前,这种开关与斩波电路是分离的,进一步研究可以将这种开关拓扑模式嵌入到负载的前级斩波电路中,使得斩波电路不仅具有 DC/DC 变换功能,还可以自带短路保护、限流和一定的通信功能等。同样的电路,除了在低压直流微网中可以使用,预计在高压电路中也有一定的生存空间。目前预计的实现方法有两种,一是通过电子开关的串并联技术提高开关的开通关断的功率级别,并且增大固态开关侧的并联电容值,甚至改成大容量的储能电池或超级电容的接入,吸收开关瞬间的能量;二是通过续流二极管提供的续流回路降低开关上的电压,使得开关在拉开时的电路工况就不易产生拉弧。随着电力电子器件的发展,其在微电网系统中应用将得到继续的研究和发展。

3 结语

基于以上仿真验证与分析,文中所设计的拓扑结构适用于直流微网系统,可以作为一套智能开关实现安全切除负载的功能,并可以通过电信号完成前级与负载的交互。对于直流微网的关键技术的展望如下:首先,基于 DBS 控制的直流微网的控制策略还需要在仿真和实验中进一步优化和验证,同时,智能直流断路器的拓扑可以在实验中实现,并通过

与线路电感相匹配,确定合适的输入侧电路的电容值,在实验中还可以针对该拓扑做出更多的细节优化,加入固态开关的串并联技术,并可以向高压侧推广。最后,将控制电路和能量变换电路结合,对于整个直流微网系统做整体规划实验,并且优化控制和结构拓扑,以实现其内部的协调控制。

参考文献:

- [1] 韦钢,吴伟力,胡丹云,等.分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术,2007,33(1):36-40.
WEI Gang, WU Weili, HU Danyun, et al. Distributed generation and effects of its parallel operation on power system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 36-40.
- [2] 王成山,肖朝霞,王守相.微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
WANG Chengshan, XIAO Chaoxia, WANG Shouxiang. Synthesical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [3] SUN Kai, LI Zhang, YAN Xing, et al. A distributed control strategy based on DC bussignaling for modular photovoltaic generationsystems with battery energy storage[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2011, 26(10): 3032-3045.
- [4] SCHONBERGERSCHONBERGER J, DUKE R, ROUND S D. DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1453-1460.
- [5] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional loadsharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2012, 28(4): 1900-1913.
- [6] 唐洪良,郑军,杨强.直流微型电网保护系统的研究现状与关键技术[J]. 电工电气,2014(10):1-6.
TANG Hongliang, ZHENG Jun, YANG Qiang. Present study status and key technology of protection system for direct current micro-grids[J]. Electrotechnics Electric, 2014 (10): 1-6.
- [7] 王山山.交错并联 Boost PFC 变换器的研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
WANG Shanshan. Research of the interleaved Boost PFC converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [8] 张国荣,徐宏.直流微网中的关键技术综述[J]. 低压电器,2012(15):1-5.
ZHANG Guorong, XU Hong. Survey of key technologies in DC microgrids[J]. Low Voltage Apparatus, 2012(15): 1-5.
- [9] 吴卫民,何远彬,耿攀,等.直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-106.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [10] 沈楚焱.直流微网的通讯与能量管理系统[D]. 扬州:扬州大学,2013.
SHEN Chuyan. Communication of DC micro-grid and it's energy management system[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.
- [11] 王毅,张丽荣,李和明,等.风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [12] 李圣清,徐天俊,张彬,等.光伏直流微网母线电压稳定控制[J]. 电气传动,2015,45(3):48-52.
LI Shengqing, XU Tianjun, ZHANG Bin, et al. Bus voltage stable control in the photovoltaic DC micro-grid[J]. Electric Drive, 2015, 45(3): 48-52.
- [13] 孟润泉,刘家赢,文波,等.直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术,2015,41(7):2186-2193.
MENG Runquan, LIU Jiaying, WEN Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186-2193.
- [14] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [15] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [16] LI Weixing, MOU Xiaoming, ZHOU Yuebin, et al. On voltage standards for DC home microgrids energized by distributed sources[C]//7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC). [S.l.]: IEEE, 2012: 2282-2286.
- [17] 张慧慧.直流微电网建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
ZHANG Huihui. Research on modeling and control strategy of DC micro-grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [18] 姚修远,金新民,周飞,等.零电压零电流转换软开关技术中二极管反向恢复的影响[J]. 中国电机工程学报,2015,35(4):944-952.
YAO Xiuyuan, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. The analysis of diode reverse recovery on the zero-voltage/zero-current transition soft-switching technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 944-952.
- [19] 于乐.DC-DC变换器软开关技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

(下转第28页)

- PENG Xiangyang, HUANG Zhiwei, DAI Zhiwei. Analysis on the cause of distribution line's damage during typhoon and counteract measures[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 99-102.
- [4] 陈永秋, 农少安, 杨 玺, 等. 沿海地区低压架空线路防风加固技术措施探讨[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 61-65.
- CHEN Yongqiu, NONG Shao'an, YANG Xi, et al. Discussions on technical measures taken for windproof strengthening low-voltage overhead lines in coastal areas[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2014, 30(5): 61-65.
- [5] 王昊昊, 罗建裕, 徐泰山, 等. 中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 5-10.
- WANG Haohao, LUO Jianyu, XU Taishan, et al. Questionnaire survey and analysis of natural disaster defense techniques of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 5-10.
- [6] 张 勇. 输电线路风灾防御的现状与对策[J]. 华东电力, 2006, 34(3): 28-31.
- ZHANG Yong. Status quo of wind hazard prevention for transmission lines and countermeasures[J]. East China Electric Power, 2006, 34(3): 28-31.
- [7] 唐斯庆, 张 弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7.
- TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on september 26th-causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7.
- [8] 庞 准, 李邦峰, 俞 悦, 等. 海南电网台风期间运行方式研究[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 46-50.
- PANG Zhun, LI Bangfeng, YU Yue, et al. Study on operating modes of Hainan power grid during typhoon periods [J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 46-50.
- [9] 张 勇, 赵 勇, 王景亮, 等. 台风对电网运行影响及应对措施[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 42-45.
- ZHANG Yong, ZHAO Yong, WANG Jingliang, et al. The influence of typhoon on the operation of power grid and countermeasures[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(1): 42-45.
- [10] 厉天威, 赵建华, 蔡彦枫, 等. 南方电网沿海地区输电线路设计风速分析[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 49-53.
- LI Tianwei, ZHAO Jianhua, CAI Yanfeng, et al. Analysis on design wind speed of transmission lines for coastal region of China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(6): 49-53.
- [11] 王忠岳, 林济铿, 胡世骏, 等. 输电线路大风停运概率计算方法[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 148-153.
- WANG Zhongyue, LIN Jikeng, HU Shijun, et al. Calculation method for gale outage probability of transmission lines[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 148-153.
- [12] 穆红文, 王国尚, 刘亚峰, 等. 750 kV 金昌—安西送电线路工程玉门段设计风速的计算分析[J]. 电力建设, 2010, 31(2): 44-47.
- MU Hongwen, WANG Guoshang, LIU Yafeng, et al. Computational analysis on wind-velocity design at yumen section of 750 kV Jinchang—Anxi transmission line[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(2): 44-47.
- [13] 王振华, 金晓华. 中国与美国输电塔风荷载技术标准比较与分析[J]. 电力建设, 2012, 33(8): 53-57.
- WANG Zhenhua, JIN Xiaohua. Comparison and analysis of wind load for transmission tower between China and America[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(8): 53-57.
- [14] 李兴凯, 王 尧, 丘海珊. 国际电力工程中不同标准的设计风速计算方法[J]. 电力建设, 2012, 33(8): 44-48.
- LI Xingkai, WANG Yao, QIU Haishan. Calculation method of design wind speed by different standards in international power engineering[J]. Power Construction, 2012, 33(8): 44-48.
- [15] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 2012.
- GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. 2012.
- [16] SDJ 3—79 架空送电线路设计技术规程[S]. 1979.
- SDJ 3—79 Technical code for designing overhead transmission line[S]. 1979.
- [17] DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 1999.
- DL/T 5092—1999 Technical code for designing 110~500 kV overhead transmission line[S]. 1999.
- [18] GB 50545—2010 110~750 kV 架空输电线路设计规范[S]. 2010.
- GB 50545—2010 Code for designing of 110~750 kV overhead transmission line[S]. 2010.

厉天威(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 从事高压交直流输电技术方面的研究。

(上接第22页)

- YU Le. The research on soft switching technology of DC/DC converter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [20] WANG Chienming. A novel ZCS-PWM power factor preregulator with reduced losses[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 689-701.

王义军(1969—), 男, 教授, 从事电力系统自动化技术研究工作。

郑晴予(1990—), 女, 硕士研究生, 从事电力系统自动化技术研究工作。