

直流微电网的故障电流控制器研究

林聪, 李湘峰, 郭芳[✉]

(佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528000)

摘要: [目的] 随着交直流配电网及分布式发电技术的快速发展, 直流微电网在配电网中的作用愈发重要, 将成为未来配电网中的重要组成部分。由于直流微电网覆盖面积小, 线路阻抗小, 当发生极间短路故障时, 故障电流上升速度快, 幅值大, 可达到额定工作电流的 10 倍以上。这使得直流微网保护整定困难, 设备选型要求高, 制约了直流微电网的快速发展。[方法] 针对上述问题, 文章以直流微电网为研究对象, 从直流微电网的极间故障的工作原理出发, 分析直流微电网直流侧的故障特征, 针对现有主要限流方法的不足, 提出利用一种电压可控的故障电流控制器, 来实现对故障电流的精确控制并搭建了直流微电网和故障电流控制器的仿真模型进行仿真验证。[结果] 仿真结果显示, 该故障电流控制器可大幅降低故障电流, 并可实现精确控制故障电流, 使得故障前后系统均处于可控状态而不会闭锁保护。在稳态运行时, 故障电流控制器还可辅助 VSC (Voltage Source Converter, VSC) 进一步稳定直流母线电压。[结论] 为配合继电保护装置正常动作, 同时避免 VSC 触发过流保护闭锁, 建议故障电流控制范围设置为 1~2 pu。

关键词: 直流微网; 故障电流; 故障电流控制器; 反向电压源; 故障电流控制范围

中图分类号: TM7; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0050-07

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Fault Current Controller of DC Microgrid

LIN Cong, LI Xiangfeng, GUO Fang[✉]

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: [Introduction] With the rapid development of AC/DC distribution networks and distributed generation technology, the role of DC microgrids in distribution networks is becoming increasingly important and will become an important component of future distribution networks. Due to the small coverage area and low line impedance of the DC microgrid, when an inter pole short circuit fault occurs, the fault current increases rapidly and has a large amplitude, which can reach more than 10 times the rated working current. This makes it difficult to set the protection of DC microgrids and requires high equipment selection, which restricts the rapid development of DC microgrids. [Method] In response to the above issues, taking the DC microgrid as the research object, starting from the working principle of inter pole faults in the DC microgrid, the fault characteristics on the DC side of the DC microgrid were analyzed. In response to the shortcomings of existing main current limiting methods, a voltage controllable fault current controller was proposed to achieve precise control of fault current. The simulation model of DC microgrid and fault current controller was built for simulation verification. [Result] The simulation results show that the fault current controller can significantly reduce the fault current and achieve precise control of the fault current, making the system controllable before and after the fault without locking the protection. During steady-state operation, the fault current controller can also assist the VSC (Voltage Source Converter) in further stabilizing the DC bus voltage. [Conclusion] To cooperate with the normal operation of the relay protection device and avoid VSC triggering overcurrent protection blocking, it is recommended to set the fault current control range between 1~2 pu.

Key words: DC microgrid; fault current; fault current controller; reverse voltage source; control range of the fault current

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-08-24 修回日期: 2022-11-19

基金项目: 直流输电技术国家重点实验室开放基金项目研究“含多种分布式电源的直流微网过电流控制技术”(SKLHVDC-2021-KF-15); 广东普通高校创新团队项目“面向碳中和的智能源关键技术及应用创新团队”(2021KCXTD027)

0 引言

随着化石能源的日渐消耗、环境问题的日益严峻,通过开发和利用风电、光伏等可再生能源来调整能源结构的方法,被越来越多科研机构和团体的研究和应用。但是风电、光伏等大量的分布式电源(Distributed Energy Resource, DER)具有随机性和波动性,若采取直接并网的方式,对于电网调峰和系统的安全运行将造成显著的影响^[1],因而DER目前的并网方式一般是通过微网并入主网,降低分布式电源对主网的影响^[2]。不同于交流微网中跟踪电压的相位和频率,直流微网一般通过定直流电压控制的方法,提高了可控性和可靠性,减少DER和负载之间的电压波动,使得负载能得到稳定的用电电压^[3-4]。并且分布式电源多为直流电源,如光伏、储能等,接入直流电网可以简化能量转换环节,提高效率。然而,包含多个分布式电源的直流微网一旦发生极间故障,各分布式电源都将向故障点注入短路电流^[5]。由于微网覆盖面积小,供电线路短,线路阻抗小,多个分布式电源的共同作用下,直流微网短路电流上升速度快,幅值大,会对系统造成严重的冲击^[6-7]。为保证系统的安全运行,在直流微网设计阶段,应尽可能考虑简单廉价的过电流抑制方法,保证设备安全运行。

目前,抑制直流微网中的过电流主要有两种方法:(1)采用快速切除技术,在故障电流上升到较大幅值之前切除故障或阻断电源^[8],如采用固态断路器^[9-10]、混合式断路器^[11-12],或采用全控器件代换流器中的反并联二极管^[13-14]; (2)采用限流技术,降低故障电流的上升率和幅值,如各种超导限流器^[15-16]、固态开关并联电阻或电抗限流、串联限流电抗器^[17]等。上述方法均可取得一定的限流效果,但仍做不到故障电流大小精准可控,使得故障定位、保护整定、极差配合难度较大。文章以基于两电平电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC)的简化直流微网为例,分析了极间故障时,经VSC接入的交流配网提供的故障电流的特点,提出了采用基于反向电压源的故障电流控制器的思路,并给出了该控制器的电路结构和控制策略。仿真结果显示,此电流控制器可精确控制该电源支路提供的故障电流,并且在故障消失后可自动转换为正常运行模式。

1 故障电流控制器的基本原理

1.1 工作原理

直流微网中含有多种直流电源,有些表现为电压源特性,如基于电压源型换流器接入的交流配网系统、储能系统等,有些表现为电流源特性,如光伏系统^[18-19]。直流微网的故障电流主要由电源端提供,其中又以电压源特性的电源提供的故障电流为主。考虑到多数直流微网发生单极故障时故障电流较小,对设备危害较小,故障发生后还可以继续运行一段时间,文章设计的故障电流控制器仅针对极间故障。以基于电压源型换流器接入的交流配网系统为例,在直流侧,交流配网可等效为可调直流电压源,如图1所示。

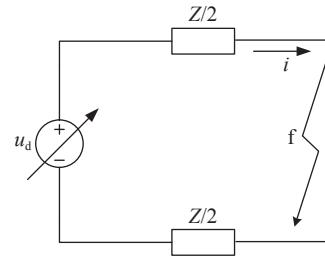


图1 电压源型换流器直流侧等效电路

Fig. 1 DC side equivalent circuit of voltage source converter

当发生极间故障时,由交流配网提供的故障电流可用下式表示:

$$i = u_d / (Z + R_f) \quad (1)$$

式中:

i ——电压源型换流器直流侧出口输出电流(kA);

u_d ——交流配网在直流侧的等效电压(kV);

Z ——故障点至电压源型换流器之间的阻抗(Ω);

R_f ——故障过渡电阻(Ω)。

可见,故障电流主要取决于等效电压 u_d 的大小。

由电压源型换流器的原理可得到以下关系式:

$$U_d = U_{ac} / m \quad (2)$$

式中:

U_d ——VSC直流侧平均电压(kV);

U_{ac} ——VSC交流侧电压线电压幅值(kV);

m ——调制比,且有 $0 < m < 1$ 。

可见,电压源型换流器直流侧电压的调节范围

在交流配网线电压幅值往上^[20-21]。因此,仅靠调节电压源型换流器的直流侧输出电压,并不能有效控制故障电流。

倘若将一个反向可控电压源,串联在电压源型换流器的出口处,如图 2 所示。在正常运行时,控制可控电压源输出电压为 0,可不影响微网正常运行;极间故障时,由交流配网提供的故障电流变为如下式(3)。

$$i = (u_d - u_1) / (Z + R_f) \quad (3)$$

式中:

u_1 ——反向电压源的输出电压(kV)。

由此可见,控制故障时可控电压源的输出电压 u_1 的大小,即可任意控制故障电流的大小。

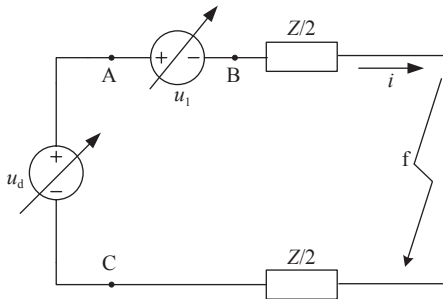


图 2 故障电流控制器的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of fault current controller

1.2 基本结构

由 1.1 节分析可见,正常运行时,可控电压源 u_1 的输出电压应接近 0 以减小串联电压源对直流微网正常运行的影响;故障时,可控电压源 u_1 的输出电压应适当增加。当 $u_1 = u_d$ 时,交流电网对故障点提供的故障电流降为 0。因此,可控电压源 u_1 的输出电压应

在连续可调的范围 $0 \sim u$ 之间($u < u_d$)。考虑到微电网的功率双向流动特性,可控电压源 u_1 还应具备电流双向流动能力。

图 3 所示的 buck-boost 电路即可满足上述要求。

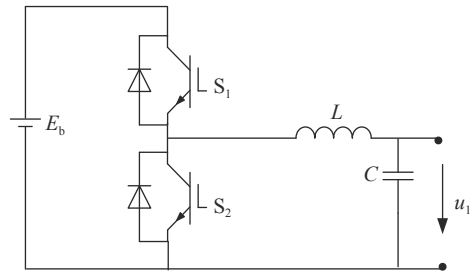


图 3 故障电流控制器结构图

Fig. 3 Structure diagram of fault current controller

图 3 中, E_b 为储能元件的端电压。当直流微网正常运行时,开关管 S_1 常开, S_2 常闭,可控电压源 u_1 的输出电压约为开关管的导通压降,对正常运行影响较小,电感 L 还可起到降低直流电流纹波的作用。当直流微网发生极间故障时,控制开关管 S_1 和开关管 S_2 的导通占空比,即可调节输出电压 u_1 的大小,从而任意控制故障电流的大小。

基于电压源型换流器接入直流微网的交流配网系统,串联图 3 所示的故障电流控制器后,其电路结构如图 4 所示。在图 4 所示中, VSC 的直流侧满足以下关系式:

$$U_2 = U_d - U_1 \quad (4)$$

式中:

U_2 ——直流母线电压(kV);

U_d ——直流侧输出电压平均值(kV);

U_1 ——故障电流控制器输出电压平均值(kV)。

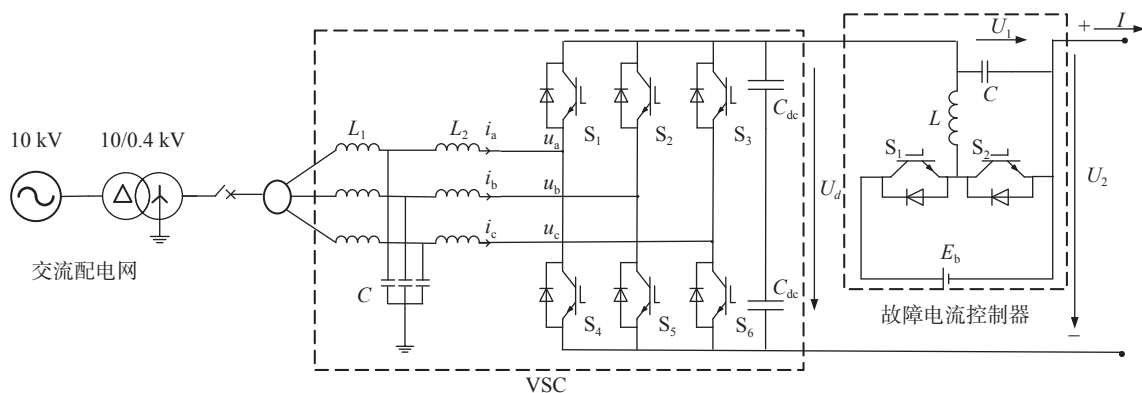


图 4 串联故障电流控制器的 VSC 电路结构

Fig. 4 VSC circuit structure of series fault current controller

2 故障电流控制器对微电网的影响分析

2.1 故障电流的控制范围分析

由上述分析可见,故障电流的控制原理是通过控制输出电压来实现的。因此,为实现故障电流的控制效果,应保证VSC及故障电流控制器均处于可控状态,也就是说VSC及故障电流控制器中的电力电子器件不可处于过流保护触发脉冲的状态。考虑到电力电子器件的过流保护一般整定为 $2 \sim 3$ pu,因此,故障电流的控制目标不宜大于 2 pu。

倘若故障电流的控制目标过小,如小于 1 pu,会使得故障电流过小而使得过流保护无法诊断出故障。因此,故障电流的最低控制目标应与故障诊断及保护整定配合考虑。

2.2 影响分析

故障电流控制器的使用应在充分发挥其效用的同时尽可能降低对系统的不良影响。因此,对于图4所示的故障电流控制器应用场景,正常运行时可控制直流母线电压 U_2 恒为直流微网系统额定电压,使得正常运行时,直流微网侧感受不到故障电流控制器的存在。另外,由式(4)可知,交流电网电压经两级调压(U_0, U_1)后建立微网直流母线电压。因此,当交流侧电网扰动造成直流电压 U_d 的波动时,经过故障电流控制器的二次调整后,微电网直流母线电压 U_2 的波动将显著降低。

由于额外增加了装置,将不可避免地产生额外损耗而使得系统总损耗有所增加。

3 仿真分析

文章仿真分析主要用于验证故障电流控制器的有效性,可采用如图5所示的简化微网结构建立仿真模型。该微电网主要由交流配电网、VSC、故障电流控制器及负载组成,其中,VSC及故障电流控制

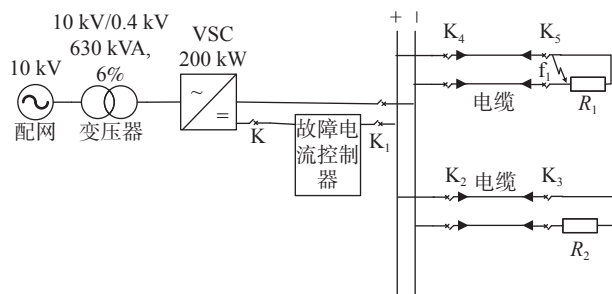


图5 仿真用简化直流微网结构图

Fig. 5 Simplified DC microgrid structure diagram for simulation

器的详细电路如图4所示。仿真中设定直流母线极间电压为 0.75 kV, R_1, R_2 均为 10Ω 。 0.1 s启动VSC及故障电流控制器的脉冲触发, 0.3 s发生极间故障 f_1 。其中,VSC换流器采用定直流电压控制。正常运行时故障电流控制器采用定直流侧母线电压控制,故障下采用定电流控制,控制目标为 2 倍的额定运行工况电流即 0.3 kA。

3.1 故障电流限制效果

根据图5的仿真结构及参数设定,可得到直流微网在加装故障电流控制器前后的故障电流的波形,如图6所示。

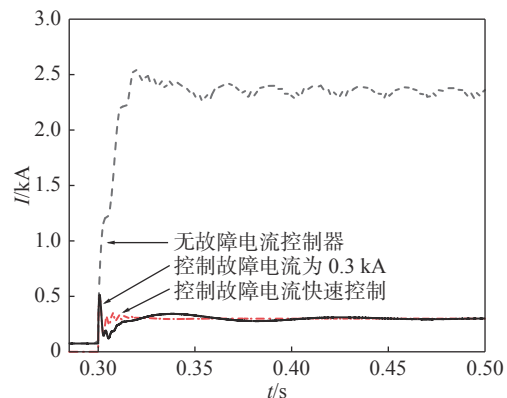


图6 故障电流控制效果对比图

Fig. 6 Comparison diagram of fault current control effect

在未添加故障电流控制器时, 0.3 s时刻发生 f_1 极间故障,故障电流约在 18.8 ms达到最大值 2.563 kA,此时VSC所有绝缘栅双极晶体管(Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT)器件均已触发过流保护,暂停发送触发脉冲。在加装故障电流控制器的作用下,故障电流约在故障后 0.7 ms达到峰值 0.513 kA,然后随着故障电流控制器的调节作用,最终将故障电流控制在 0.3 kA,与控制目标相符。

比较加装故障电流控制器前后的故障电流波形,可知加装故障电流控制器对故障电流的限制效果如下:

1)大幅降低故障电流的峰值和稳态值,本算例中故障电流峰值下降了 80% ,稳态值降低了 85% 。

2)大幅缩短较大的故障电流流过系统的时间,本算例中故障电流第一个波峰持续时间不超过 2 ms,不会造成断路器的意外跳闸,也不会对系统中的设备造成严重影响。

3)故障电流稳态值在设备可控范围内可调可控。

3.2 直流母线电压

根据图 5 的仿真结构及参数设定,可得到在加装故障电流控制器后的 VSC 直流侧输出电压波形及微网直流母线电压波形,如图 7 所示。

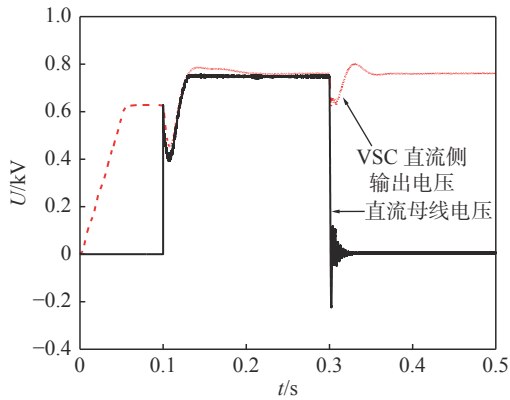


图 7 VSC 直流侧及直流母线电压波形图

Fig. 7 Voltage waveform diagram of VSC DC side and DC bus

图 7 给出加装故障电流控制器后, VSC 直流侧输出电压波形及微网直流母线电压波形。从 0 时刻起, VSC 直流端口电容开始充电, VSC 直流侧输出电压逐渐上升, 直到上升至不控整流输出电压值。0.1 s 时刻启动 VSC 脉冲触发, VSC 输出电压经过短暂调整后稳定至控制目标值。0.3 s 时刻发生极间短路, VSC 输出端受到故障影响产生短时电压波动, 随后稳定。

由于正常运行时要求故障电流控制器的输出电压接近于 0, 因此, 在故障电流控制器启动之前, 故障电流控制器的出口电容器不应充电至较高电压, 否则故障电流控制器启动时, 端口电容器放电将产生较大的放电电流。如图 3 中, 电容器通过电感、IGBT 器件 S_2 放电, 使得 S_2 中流过较大的冲击电流, 可能造成 S_2 损坏。为防止此现象, 仿真中假设在故障电流控制器启动前开关 K 断开。因此, 在启动触发脉冲前, 直流母线电压为 0。启动触发脉冲后, 故障电流控制器为电压控制模式, 在 VSC 输出电压的基础上进一步调节电压, 使得直流母线电压较 VSC 输出电压更快稳定至额定电压 0.75 kV。极间故障发生后, 故障电流控制器经过故障诊断后切换为电流控制模式, 故障电流控制器输出电压迅速上升, 直流母线电压迅速下降, 以实现故障电流的有效控制。

由此可见, 故障电流的峰值电流与故障诊断速度密切相关, 在故障电流控制器诊断出故障且进行

控制模式切换后, 才具备故障电流控制功能。

3.3 流过器件的电流

图 8 和图 9 给出了 VSC 及故障电流控制器中 IGBT 器件上流过的电流。其中, 故障电流的调节速度与故障电流控制器的控制参数等有关。故障电流调节快慢的效果对比见图 6 所示。快速调节时, 故障电流可快速稳定至控制目标 0.3 kA, 但结合图 8 和图 9 可见, 快速调节时, 故障电流控制器中的 IGBT 器件在电流调节初期流过的电流显著大于稳态时的电流。由此可见, 快速调节的故障电流控制器在器件选型时需留有更大的余量, 否则快速调节的故障电流控制器其电流控制范围应相应有所降低。对比图 8 和图 9 可见, 故障电流的调节速度对 VSC 的器件电流影响不大。且故障发生后, VSC 器件上流过的电流并未成倍增加, 不会触发器件过流保护。

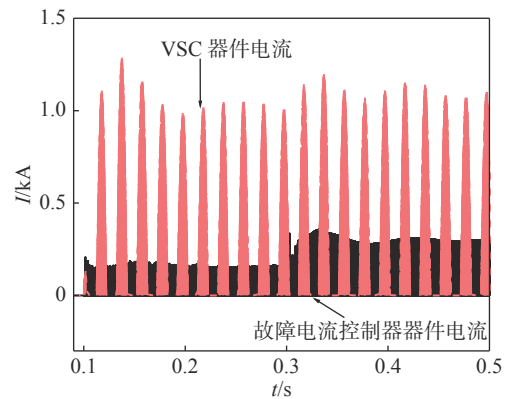


图 8 VSC 及故障电流控制器中 IGBT 器件上流过的电流(故障电流调节速度较慢)

Fig. 8 Current flowing on IGBT device in VSC and fault current controller (Fault current regulation speed is slow)

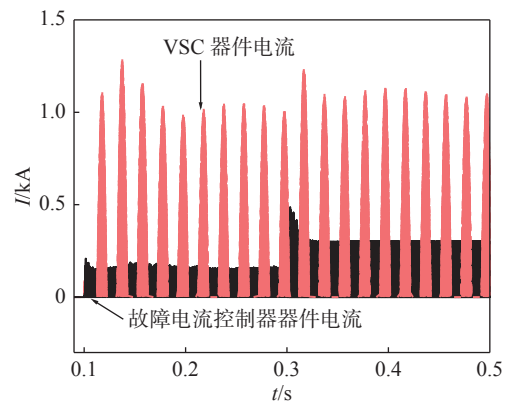


图 9 VSC 及故障电流控制器中 IGBT 器件上流过的电流(故障电流快速调节)

Fig. 9 Current flowing on IGBT device in VSC and fault current controller (Fast regulation of fault current)

4 结论

针对直流微网阻抗小、极间故障电流大的特点,文章提出了一种基于可控反向电压源精确控制故障电流的方法。首先对其工作原理和基本结构进行分析,其次对基于反向电压源的故障电流控制器对微网正常运行的影响进行分析,最后通过仿真验证,探讨了故障电流控制器的故障电流控制范围。仿真显示,文章提出的故障电流控制器可大幅降低故障电流,并可实现精确控制,使得故障前后系统均处于可控状态而不会闭锁保护。在稳态运行时,故障电流控制器还可辅助 VSC 起到进一步稳定直流母线电压的作用。为配合继电保护装置正常动作,同时避免 VSC 触发过流保护闭锁,建议故障电流控制范围设置在 1~2 pu 之间。

参考文献:

- [1] 薛士敏,齐金龙,刘冲. 直流微网保护综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(13): 3404-3412. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160148.
XUE S M, QI J L, LIU C. A research review of protection for DC microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(13): 3404-3412. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160148.
- [2] 薛士敏,齐金龙,刘冲,等. 直流微网接地方式及新型保护原理 [J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 48-55. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1409.
XUE S M, QI J L, LIU C, et al. A research of grounding mode and new protection principle for DC microgrids [J]. *Power system technology*, 2018, 42(1): 48-55. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1409.
- [3] 张宇涵,杜贵平,雷雁雄,等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(3): 177-187. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200461.
ZHANG Y H, DU G P, LEI Y X, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(3): 177-187. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200461.
- [4] DRAGIČEVIĆ T, LU X N, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids-part II: a review of power architectures, applications, and standardization issues [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2016, 31(5): 3528-3549. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2464277.
- [5] MONADI M, ZAMANI M A, IGNACIO CANDELA J, et al. Protection of AC and DC distribution systems embedding distributed energy resources: a comparative review and analysis [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 51: 1578-1593. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.013.
- [6] 于涛. 基于分布式电源的微电网控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2020.001247.
YU T. Research on microgrid control strategy based on distributed power supply [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2020.001247.
- [7] LIANG B M, KANG L, ZHANG Z Y, et al. Simulation analysis of grid-connected AC/DC hybrid microgrid [C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, China, May 31-June 2, 2018. New York, USA: IEEE, 2018: 969-974. DOI: 10.1109/ICIEA.2018.8397852.
- [8] 薛士敏,黄仁乐,高峰,等. 基于暂态电流突变量的直流配电系统快速纵联保护新原理 [J]. *供用电*, 2016, 33(8): 37-44. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2016.08.007.
XUE S M, HUANG R L, GAO F, et al. High-speed pilot protection principle for DC distribution system based on the difference of transient currents [J]. *Distribution & utilization*, 2016, 33(8): 37-44. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2016.08.007.
- [9] 焦皎,孟润泉,任春光,等. 交直流微电网AC/DC双向功率变流器控制策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(16): 84-92. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191124.
JIAO J, MENG R Q, REN C G, et al. Bidirectional AC/DC interlinking converter control strategy for an AC/DC microgrid [J]. *Power system protection and control*, 2020, 48(16): 84-92. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191124.
- [10] 周钰,张浩,陈锐,等. 直流微电网控制保护策略研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(4): 61-66. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.009.
ZHOU Y, ZHANG H, CHEN R, et al. Research on strategy of DC micro-grid control and protection [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(4): 61-66. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.009.
- [11] 王灿,杜船,徐杰雄. 中高压直流断路器拓扑综述 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(9): 187-199. DOI: 10.7500/AEPS20191021006.
WANG C, DU C, XU J X. Review of topologies for medium-and high-voltage DC circuit breaker [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(9): 187-199. DOI: 10.7500/AEPS20191021006.
- [12] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs [J]. *IEEE transactions on power delivery*, 2011, 26(2): 998-1007. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2095889.
- [13] 杨勇,王文杰,刘亚萍,等. 基于大规模风、光并网外送需求的高压直流混合式直流断路器研究 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(2): 237-244. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2021.02.015.
YANG Y, WANG W J, LIU Y P, et al. Hybrid HVDC breaker for HVDC based wind and photovoltaic power integration system [J]. *Renewable energy resources*, 2021, 39(2): 237-244. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2021.02.015.
- [14] TAN R, WANG Y, ZHANG S. Coordination scheme of SFCL

and SMES in the DC microgrid for fault current limiting and voltage stability [C]//2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), Tianjin, China, October 16-18, 2020. New York, USA: IEEE, 2020: 1-2. DOI: [10.1109/ASEMD49065.2020.9276114](https://doi.org/10.1109/ASEMD49065.2020.9276114).

- [15] XUE S M, GAO F, SUN W P, et al. Protection principle for a DC distribution system with a resistive superconductive fault current limiter [J]. *Energies*, 2015, 8(6): 4839-4852. DOI: [10.3390/en8064839](https://doi.org/10.3390/en8064839).
- [16] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(12): 3026-3036. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.12.013](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.12.013).
LI B, HE J W. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(12): 3026-3036. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.12.013](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.12.013).
- [17] 年珩, 孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述 [J]. *高电压技术*, 2020, 46(7): 2241-2254. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20200472](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200472).
NIAN H, KONG L. Review on fault protection technologies of DC microgrid [J]. *High voltage engineering*, 2020, 46(7): 2241-2254. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20200472](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200472).
- [18] MARTÍNEZ-PARRALES R, FUERTE-ESQUIVEL C R, ALCAIDE-MORENO B A, et al. A VSC-based model for power flow assessment of multi-terminal VSC-HVDC transmission systems [J]. *Journal of modern power systems and clean energy*, 2021, 9(6): 1363-1374. DOI: [10.35833/MPCE.2021.000104](https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000104).
- [19] 钟庆, 马新华, 王钢, 等. 电压源型换流器稳态等值电路模型 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(8): 2485-2489. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.2014.08.032](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2014.08.032).
ZHONG Q, MA X H, WANG G, et al. Static equivalent circuit models of voltage source converter [J]. *High voltage engineering*, 2014, 40(8): 2485-2489. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.2014.08.032](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2014.08.032).
- [20] 赵雨童, 高飞, 张博深. 基于交流电流下垂特性控制的VSC建模和稳定性分析 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 50-55. DOI: [10.16081/j.epae.202105034](https://doi.org/10.16081/j.epae.202105034).
ZHAO Y T, GAO F, ZHANG B S. Modeling and stability analysis of VSC with droop characteristic based on AC current [J]. *Electric power automation equipment*, 2021, 41(5): 50-55. DOI: [10.16081/j.epae.202105034](https://doi.org/10.16081/j.epae.202105034).
- [21] 魏承志, 李明, 李春华, 等. 基于两电平电压源型换流器的直流微网交直流侧接地方式 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(2): 116-123. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.02.015](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.02.015).
WEI C Z, LI M, LI C H, et al. Grounding modes at AC and DC side of DC microgrid with two-level voltage source converters [J]. *Southern power system technology*, 2021, 15(2): 116-123. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.02.015](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.02.015).

作者简介:



林聪

林聪 (第一作者)

1997-, 男, 硕士, 主要研究方向是直流微网及故障限流技术 (e-mail) l1419547151@163.com。



李湘峰

李湘峰

1983-, 男, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向是电力电子与电力传动等 (e-mail) lixiangfeng5@163.com。



郭芳

郭芳 (通信作者)

1983-, 女, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向是柔性直流配网、微网、新能源发电技术、储能技术等 (e-mail) fsu_guof@163.com。

项目简介:

项目名称 面向碳中和的智慧能源关键技术及应用创新团队项目 (2021KCXTD027)

项目类型 广东普通高校创新团队项目

承担单位 佛山科学技术学院

项目概述 项目围绕国家“双碳”战略目标, 研究面向新能源多点接入的直流微电网群关键技术及应用、含光储充的微电网多目标优化运行及故障诊断技术、电化学储能关键技术及应用、建筑一体化太阳能利用关键技术及应用。

主要创新点 (1) 针对直流微电网内部组网拓扑结构及微电网间的优化组网技术进行研究, 同时针对微电网群在不同运行方式下, 研究互联运行或独立运行的切换方法以及群间的协调控制方法; (2) 针对含光储充的微电网系统, 研究如何通过光储充的协作控制提高其运行效率和经济性, 同时为了保障其运行的可靠性和安全性, 研究光储充系统的智能故障诊断技术; (3) 主要以当前市场上广泛应用的磷酸铁锂电池为对象, 研究电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 技术、电芯分选测试与监测管理技术、储能系统的并网控制与保护技术; (4) 对岭南湿热地区一体化太阳能组件热物性与关键构造对其产性能、建筑冷负荷与热环境的影响机理, 及其适宜性关键技术开展研究。

(编辑 叶筠英)