

# 基于故障电流控制的直流微网过电流保护研究

劳志烜<sup>1</sup>, 郑炳耀<sup>2,✉</sup>, 郭芳<sup>3</sup>, 梅洪灯<sup>2</sup>, 朱文峰<sup>2</sup>, 王瑞阳<sup>3</sup>, 方俊杰<sup>3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000; 2. 华润新能源(连州)风能有限公司, 广东 清远 511500;  
3. 佛山科学技术学院机电工程及其自动化学院, 广东 佛山 528000)

**摘要:** [目的] 随着分布式电源以及电动汽车等新型负荷的发展, 直流微网相较于交流微网有着换流环节少, 系统损耗低等优点, 成为目前的研究热点。直流微网覆盖范围小, 且接入了大量的分布式电源, 因此发生极间短路故障时, 故障电流上升速度快, 幅值大, 使得传统交流配电网采用的过流保护难以实现级差配合, 给故障定位造成了极大的困难。[方法] 对此, 针对直流微网故障电流的特点, 提出限流与保护相融合, 基于故障电流精确控制值设计过流保护整定值的方法, 结合各支路合理的容量设计, 可轻松实现级差配合, 准确定位故障。[结果] 文章在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建相应的直流微网模型, 对所提保护方案进行了仿真验证, 结果表明该方案能正确定位故障点并迅速切除故障。[结论] 所提的保护方案保证了过电流的选择性。这验证了所提保护方案的合理性。

**关键词:** 限流与保护融合; 整定原则; 级差配合; 短路故障; 直流微网

中图分类号: TM7; TM771

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0065-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Protection Scheme of DC Microgrid Integrated with Fault Current Limiting Control Technology

LAO Zhixuan<sup>1</sup>, ZHENG Bingyao<sup>2,✉</sup>, GUO Fang<sup>3</sup>, MEI Hongdeng<sup>2</sup>, ZHU Wenfeng<sup>2</sup>, WANG Ruiyang<sup>3</sup>, FANG Junjie<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;  
2. China Resources New Energy (Lianzhou) Wind Energy Co., Ltd., Qingyuan 511500, Guangdong, China;  
3. School of Mechatronics Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] With the development of new loads, such as distributed power sources and electric vehicles, DC(Direct Current) microgrids have the advantages of fewer commutation links and lower system losses than AC(Alternating Current) microgrids, and have become the current research hotspot. Due to the small coverage of the DC microgrid and access to a large amount of distributed power sources, the fault current rises quickly with a large amplitude when inter-pole short-circuit fault occurs, making it difficult to achieve differential coordination with traditional overcurrent protection used in AC distribution networks and posing a great challenge to fault localization. [Method] Therefore, in response to the characteristics of fault current in DC microgrids, the method for designing overcurrent protection setting value based on the precise control value of fault current through the integration of current limiting and protection was proposed. Combined with the reasonable capacity design of each branch, it can easily achieve differential coordination and accurately locate faults. [Result] A corresponding DC microgrid model is built on the PSCAD/EMTDC simulation platform. The proposed protection scheme is simulated and verified, and the result shows that the scheme can correctly locate the fault point and quickly remove the fault. [Conclusion] The proposed protection scheme can ensure the selectivity of overcurrent, which verifies the rationality of the scheme.

**Key words:** integration of current limiting and protection; setting principles; differential coordination; short circuit fault; DC microgrid

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: 2023-04-30 修回日期: 2023-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“接地网故障预警与智能诊断方法研究”(52177132); 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研究”(SKLHVDC-2021-KF-15)

## 0 引言

在化石能源日益枯竭和环境污染问题愈加严重的背景下,清洁能源的开发和利用越来越受到人们的关注。而清洁能源接入配电网将对整个配电网潮流流向产生较大影响,最终影响继电保护装置的性能<sup>[1-2]</sup>。直流微网具有可省去换流环节,降低成本和损耗,负荷不受电压调整等影响的优势,成为国内外学者的研究热点<sup>[3-4]</sup>。然而,直流微网覆盖面积小,线路长度短,容量小,电压等级低,传统保护技术不能很好地适用。且直流微网在故障下存在电容快速放电、电力电子器件脆弱、保护整定困难等问题,传统的低压配网过流保护级差配合难以实现,很难保证保护的选择性,并不完全适用于直流微网<sup>[5]</sup>,保护技术的滞后使得直流微网的推广和发展受到了限制。

目前直流微网应用较为广泛的保护方式为单端量保护和基于通信的保护<sup>[6]</sup>。单端量保护对于故障的检测和定位可能存在困难,很难保证保护的选择性,对直流微网而言误动的可能性较大<sup>[7-9]</sup>;基于通信的保护则应用大量的传感器和通信设备<sup>[10-11]</sup>,增加了系统的复杂性和成本<sup>[12-13]</sup>。文献[14]首次提出将限流手段与直流保护相融合的控保协同思想,并将此思想应用于环形直流微网测距式保护,通过对端电流的精确求解实现单端精准故障定位,但该方案仅适用于环形直流微网。文献[15]在文献[14]的基础上将控保协同方案按执行时间先后顺序分为了故障控制、故障定位以及故障隔离3个阶段,通过对各支路换流器进行改造,使其故障电流得到有效的抑制,为后续配置低压直流微网故障隔离方案提供应用基础,但该文献缺少系统性的保护整定值设置原则,适用范围并不明确。文献[16]基于控保协同思想提出一种海底观测网供电系统保护方案并详细介绍了各支路的保护整定值配置原则,但不适用于直流微网。

综上所述,将控保协同思想应用于直流微网保护吸引了众多学者的目光,但对于限流效果的要求以及如何与保护配合仍缺乏系统的论证。文章在现有的限流技术基础上,提出一种与故障限流相融合的过流保护方法,通过故障电流控制目标与过流保护的整定值相协同来实现极差配合,使得传统三段式过流保护可以很好地应用于直流微网的保护。

## 1 直流微网的故障特性分析

### 1.1 交流配电网保护方法

过流保护具备简单、可靠的优点,在一般情况下能满足快速切除故障的要求,广泛应用在 35 kV 及以下的中低压交流配电系统中。

典型的阶段式电流保护的配合和实际动作时间如图 1 所示。对于电网最末端的负荷,保护 1 一般采用瞬时速断保护即可满足保护要求,其整定值按躲过最大运行方式下的负荷电流设置,电网中的其他保护,在定值和时限上需要与保护 1 配合,可增设限时电流速断保护<sup>[17-18]</sup>。当越靠近电源端,过电流幅值越大,过流保护的动作时限越长,因此靠近电源端的保护一般需要装设三段式保护。

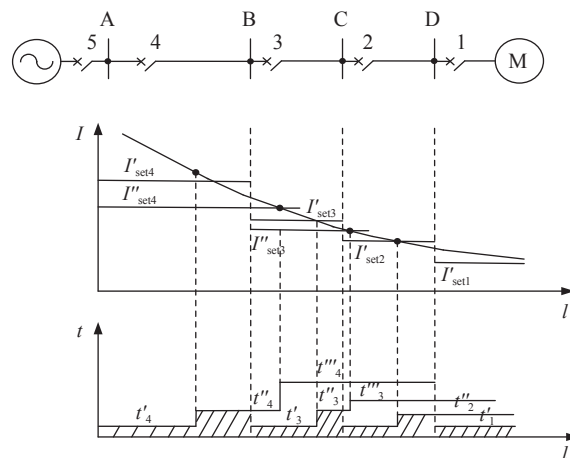


图 1 阶段式电流保护的配合和实际动作时间

Fig. 1 Coordination and actual operation time of stage current protection

### 1.2 直流微网短路故障分析

对于图 2 所示的典型直流微网,该网络中电源模块包括交直流接入模块、光伏发电模块、风力发电模块、储能模块,负荷模块包括充电桩和纯阻性负荷。以充电桩支路发生短路故障为例进行分析,故障前后各支路电流如图 3 所示。

可见,直流微网在发生极间故障瞬间,会产生极大的冲击电流;由于电源端多,并且线路短,阻抗小,故障电流上升速度快,故障后 5 ms 内即有多条支路上升至正常运行时的 10 倍以上。因此,对于直流微网,若仍然采用上节所述的过流保护,将难以实现极差配合,导致选择保护性较差。

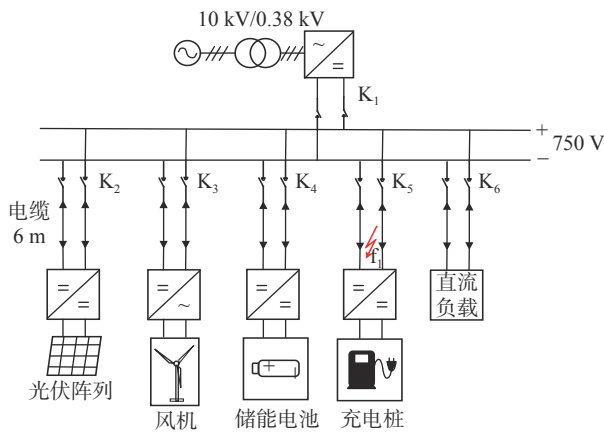


图 2 典型直流微网充电桩支路故障

Fig. 2 Typical DC microgrid charging station branch fault

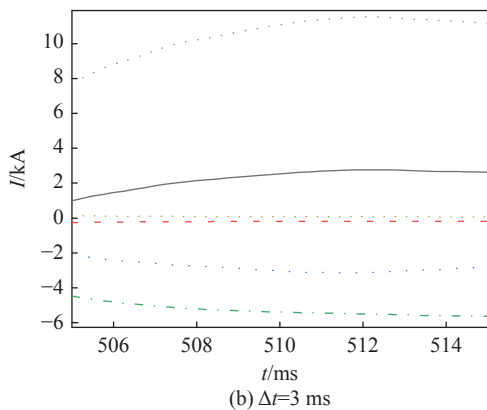
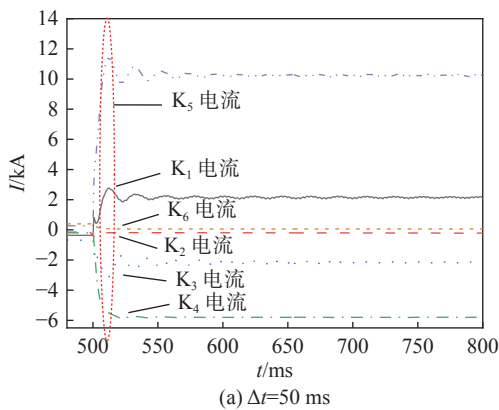


图 3 直流微网充电桩支路故障下各支路电流波形

Fig. 3 Current waveform of each branch under branch fault of DC microgrid Charging station

## 2 与故障限流融合的过流保护研究

### 2.1 故障电流控制目标

目前故障电流控制技术主要分为两类,一类是通过合理的系统设计和配置,能够在故障发生时,使得故障电流在可接受的范围内;另一类则是在故障

发生后,通过一些设备或技术手段,精确控制故障电流的大小。为方便保护整定值的设定,文章推荐采用故障电流控制技术,精准控制各个分布式电源支路提供的故障电流。考虑到各分布式电源一般都采用电力电子装置实现故障电流控制,因此,文章设定各支路故障电流控制目标不大于 2 pu。

### 2.2 三段式过流保护配合原则

对于含有多个电源支路的直流微网,故障支路流过的故障电流由多个电源共同提供,必定会大于任意单一支路的故障电流控制值。因此,各支路的 I 段保护整定值设置为 2 pu 或略小,大于故障电流控制值,小于支路中电力电子装置闭锁保护值即可。当母线侧故障时,流过各支路断路器的故障电流均为支路电流,可见此时各支路电流 I 段保护不会动作。为此,对于电源支路,可设定 II 段保护整定值略小于支路故障电流控制值,使得母线侧故障时,各电源支路均可以通过 II 段保护跳闸。对于 III 段保护,可借鉴交流配电网,整定值设置为略大于正常运行的最大负荷电流。

### 2.3 对于特殊情况考虑

上述整定方法可实现大多数直流微网的保护整定,但仍有一些特殊情况需要特别考虑,比如仅含有两个电源的情况,以及其中一个电源容量特别大的情况。

#### 1) 仅含有两个电源的情况

当直流微网只存在两个电压源时,如图 4 所示。若电源 2 容量大于电源 1 容量,当电源 2 支路发生短路故障,流过断路器  $k_2$  的电流由电源 1 所提供,小于断路器  $k_2$  的 I 段保护整定值,也可能小于其 II 段保护值,导致  $k_2$  不跳而  $k_1$  的 II 段保护跳闸,使得保护失去选择性。为避免这种情况发生,在直流微网设计中,可利用电源出口处断路器跳开电源 2。但故障依然不能切除,电源 1 的 II 段保护依然会跳闸。

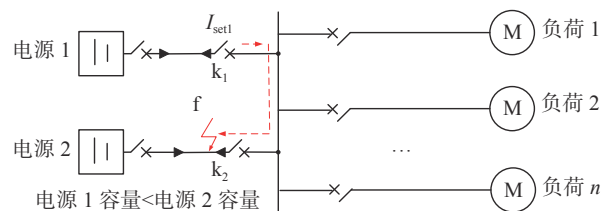


图 4 容量大的电源端故障情况

Fig. 4 High capacity power supply terminal failure situation

若电源 2 出口处断路器与断路器  $k_2$  实现联动,则可切除故障,确保电源 1 不会被切除,这同时也要求电源 2 的二段整定时延小于电源 1 的二段整定时延。当电源 1 支路故障时,断路器  $k_1$  流过电源 2 提供的故障电流,断路器  $k_1$  的 I 段保护动作跳闸。

2) 其中某个电源容量特别大的情况

图 5 为多电源直流微网中容量最大电源(电源 1)支路故障,此时断路器  $k_1$  上流过的电流由电源 2 与电源 3 提供。若电源 1 容量远远大于电源 2 与电源 3 容量之和,则会出现流过  $k_1$  的电流无法达到该支路瞬时保护整定值,无法准确实现故障定位。因此,在直流微网设计中,应避免其中一个电源的容量大于其他电源容量之和。

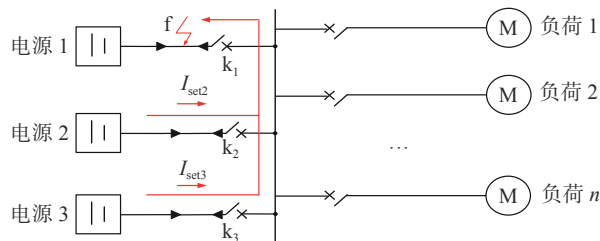


图 5 容量最大的电源端故障情况

Fig. 5 Maximum capacity power supply terminal failure situation

### 3 仿真验证

文章采用电力暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,对图 6 所示的典型多电源直流微网进行建模仿真分析,系统参数如表 1 所示。仿真中采用故障电流自主控制技术<sup>[19-20]</sup>,使各支路电源在短路故障下所输出的故障电流略小于 2 pu。由于光伏发电模块可等

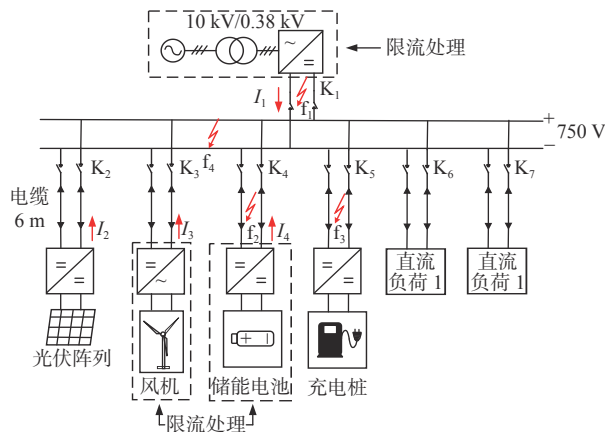


图 6 典型的多电源直流微网结构

Fig. 6 typical multi power DC microgrid structure

效为电流源,在不增加限流的情况下,所输出的故障电流较小,对系统影响较小,不需要对此支路进行限流。仿真中采用机械式断路器,分断时间为 20 ms,各支路额定电流如表 2 所示。

表 1 典型的多电源端直流微网系统参数

Tab. 1 Typical parameters of DC microgrid systems with multiple power sources

系统	系统参数	数值
母线	额定电压/V	750
交直流接入系统	系统容量/kW	500
光伏发电系统	系统容量/kW	150
风力发电系统	系统容量/kW	300
储能系统	系统容量/kW	200
充电桩	额定功率/kW	200
直流负荷1、2	额定功率/kW	300

表 2 各支路电流额定值

Tab. 2 Rated current of each branch

断路器	I/kA
$K_1$	0.667
$K_2$	0.200
$K_3$	0.400
$K_4$	0.267
$K_5$	0.267
$K_6, K_7$	0.400

结合表 2,设置各电源支路的故障电流控制目标不大于 2 pu。仿真中设置交流电源支路故障电流控制目标为 1.1 kA,风力发电支路故障电流控制目标为 0.7 kA,储能电池支路故障电流控制目标为 0.45 kA。

根据 2.2 节中的保护配合原则,设置各电源支路的 I 段保护整定值略小于 2 pu,且大于故障电流控制目标值; II 段保护整定值略小于支路故障电流控制值; III 段保护整定值略大于正常运行的最大负荷电流;设置各负荷支路 I 段保护整定值为 2 倍额定电流, II 段保护整定值为 1.5 倍额定电流, III 段保护整定值为 1.1 倍额定电流;光伏发电支路等同于负荷支路处理。直流微网各支路的保护整定值如表 3 所示,其中  $K_1$  为交直流接入系统支路断路器,  $K_2$  为光伏发电系统支路断路器,  $K_3$  为风力发电系统支路断路器,  $K_4$  为储能系统支路断路器,  $K_5$  为充电桩支路断路器,  $K_6, K_7$  为直流负荷支路断路器。

表 3 典型的双电源端直流微网各支路保护整定值

Tab. 3 Typical setting values for protection of each branch of dual power supply DC microgrid

断路器	Ⅲ段(100 ms)	Ⅱ段(30 ms)	Ⅰ段
K <sub>1</sub>	0.73	1.00	1.30
K <sub>2</sub>	0.22	0.30	0.40
K <sub>3</sub>	0.44	0.60	0.80
K <sub>4</sub>	0.29	0.40	0.53
K <sub>5</sub>	0.29	0.40	0.53
K <sub>6</sub> 、K <sub>7</sub>	0.44	0.60	0.80

文章以典型支路故障为例,对图 5 中交流接入支路故障 f<sub>1</sub>、储能支路故障 f<sub>2</sub>、充电桩支路故障 f<sub>3</sub> 和母线故障 f<sub>4</sub> 进行仿真验证,设置故障发生时刻为 500 ms。图 7 为不同故障下各支路电流变化情况。

根据仿真结果可知, f<sub>1</sub> 处故障时, K<sub>1</sub> 在故障发生后 0.1 ms 达到 I 段保护整定值,随后迅速切断,其他

支路断路器不动作; f<sub>2</sub> 处故障时, K<sub>4</sub> 在故障发生后 0.1 ms 达到 I 段保护整定值,随后迅速切断, K<sub>2</sub> 在故障后 0.2 ms 触发 I 段保护,随着电流的下降,保护返回,其他支路断路器不动作; f<sub>3</sub> 处故障时, K<sub>5</sub> 在故障发生后 0.1 ms 达到 I 段保护整定值,随后迅速切断, K<sub>2</sub> 在故障后 0.3 ms 触发 I 段保护,随着电流的下降,保护返回,其他支路断路器不动作。

母线故障时, K<sub>1</sub> 在故障发生后 5.9 ms 达到 II 段保护整定值,在故障后 35.9 ms 断开;由于流过 K<sub>2</sub> 电流会短时间内上升,会触发 I 段保护,随着电流迅速下降,保护返回, K<sub>2</sub> 在故障后 102.7 ms 后由 III 段保护断开; K<sub>3</sub> 在故障发生后 3.2 ms 达到 II 段保护整定值,在故障后 33.2 ms 断开;随着故障初始时刻电流短时刻上升, K<sub>4</sub> 触发 I 段保护,随后保护返回,在故障后 31 ms 断开, K<sub>5</sub>、K<sub>6</sub>、K<sub>7</sub> 不动作。

综上,短路故障发生时,采用与限流结合的过流保护方法,在支路故障下能迅速判断故障点并切除,

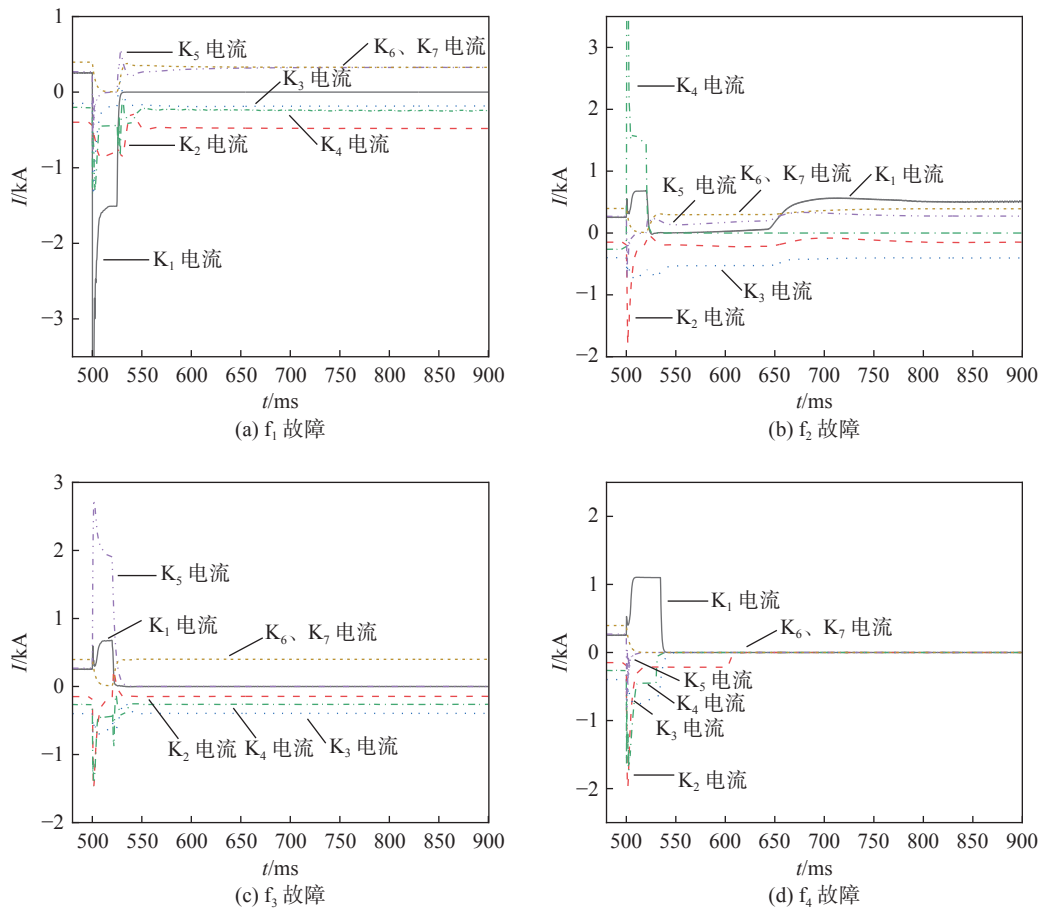


图 7 不同故障下各支路的电流波形

Fig. 7 Current waveform of each branch under different faults

故障切除后系统能迅速恢复并正常运行;在母线故障下,光伏发电支路断路器经长延时断开,其他电源支路断路器经短延时断开。

## 4 结论

文章根据直流微网的故障电流特性,分析了传统的过流保护难以直接应用于直流微网的原因,提出了基于故障电流控制的过电流保护方法,通过与故障电流控制值相配合的方法,设定过电流保护的整定值,从而实现极差配合,使得过电流保护在直流微网中具备良好的选择性。在故障电流精确控制的前提下,保护整定原则如下:

1)电压源支路:Ⅰ段保护整定值略小于 2 pu,且大于故障电流控制目标值;Ⅱ段保护整定值略小于支路故障电流控制值;Ⅲ段保护整定值略大于正常运行的最大负荷电流。

2)负荷支路:Ⅰ段保护整定值为 2 倍额定电流,Ⅱ段保护整定值为 1.5 倍额定电流,Ⅲ段保护整定值为 1.1 倍额定电流。

3)建议在微网设计过程对各电源的容量配置进行一定的考虑,避免特殊情况的发生。

文章用仿真分析的方法验证了所提保护方法的有效性,研究成果可为工程设计提供一定的参考。

### 参考文献:

- [1] 王鲍雅琼,陈皓.含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J].*电力系统保护与控制*,2017,45(12):146-154. DOI: 10.7667/PSPC160926.  
WANG B Y Q, CHEN H. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation [J]. *Power system protection and control*, 2017, 45(12): 146-154. DOI: 10.7667/PSPC160926.
- [2] SARANGI S, SAHU B K, ROUT P K. A comprehensive review of distribution generation integrated DC microgrid protection: issues, strategies, and future direction [J]. *International journal of energy research*, 2021, 45(4): 5006-5031. DOI: 10.1002/ER.6245.
- [3] HIRSCH A, PARAG Y, GUERRERO J. Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018, 90: 402-411. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.
- [4] 高海力,谭建成.直流微网技术及发展动态[J].*电气开关*,2018,56(4):8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2018.04.003.  
GAO H L, TAN J C. DC micro grid technology and future trends [J]. *Electric switcher*, 2018, 56(4): 8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2018.04.003.
- [5] CHANDRA A, SINGH G K, PANT V. Protection techniques for DC microgrid- a review [J]. *Electric power systems research*, 2020, 187: 106439. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106439.
- [6] 李俊洁,刘毅力,沈志雨,等.一种适用于直流微网的电流差动保护[J].*电力科学与技术学报*,2022,37(1):55-63. DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.007.  
LI J J, LIU Y L, SHEN Z Y, et al. Research on a current differential protection suitable for DC microgrid [J]. *Journal of electric power science and technology*, 2022, 37(1): 55-63. DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.007.
- [7] 李勃,张孝军,徐宇新,等.基于本地信息的有限选择性直流微电网保护方案[J].*智慧电力*,2021,49(1):48-55. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2021.01.008.  
LI B, ZHANG X J, XU Y X, et al. Protection scheme with limited selectivity for DC microgrid based on local measurement [J]. *Smart power*, 2021, 49(1): 48-55. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2021.01.008.
- [8] 周嘉阳,李凤婷,陈伟伟,等.基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(8):42-48. DOI: 10.7667/PSPC180580.  
ZHOU J Y, LI F T, CHEN W W, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge [J]. *Power system protection and control*, 2019, 47(8): 42-48. DOI: 10.7667/PSPC180580.
- [9] 李斌,何佳伟,冯亚东,等.多端柔性直流电网保护关键技术[J].*电力系统自动化*,2016,40(21):2-12. DOI: 10.7500/AEPS20160601011.  
LI B, HE J W, FENG Y D, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid [J]. *Automation of electric power systems*, 2016, 40(21): 2-12. DOI: 10.7500/AEPS20160601011.
- [10] FLETCHER S D A, NORMAN P J, FONG K, et al. High-speed differential protection for smart DC distribution systems [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2014, 5(5): 2610-2617. DOI: 10.1109/tsg.2014.2306064.
- [11] 张林,邵能灵,刘剑,等.直流微电网方向纵联保护方法研究[J].*电测与仪表*,2018,55(20):1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2018.20.001.  
ZHANG L, TAI N L, LIU J, et al. Analysis of directional pilot protection method for DC microgrid [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2018, 55(20): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2018.20.001.
- [12] 龙滕周.直流微网能量控制和故障保护策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001617.  
LONG T Z. Research on energy control and fault protection strategy of DC microgrid [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001617.
- [13] EMHEMED A A S, FONG K, FLETCHER S, et al. Validation of fast and selective protection scheme for an LVDC distribution network [J]. *IEEE transactions on power delivery*, 2017, 32(3): 1432-1440. DOI: 10.1109/tpwrd.2016.2593941.

- [14] 薛士敏, 刘存甲, 李蒸, 等. 基于控保协同的环形直流微网测距式保护 [J]. *高压技术*, 2019, 45(10): 3059-3067. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20190924004](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20190924004).  
XUE S M, LIU C J, LI Z, et al. Ranging protection of ring DC microgrid system based on control and protection cooperation [J]. *High voltage engineering*, 2019, 45(10): 3059-3067. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20190924004](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20190924004).
- [15] 武旭光. 基于控保协同的低压直流微网故障隔离技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020. DOI: [10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.002382](https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.002382).  
WU X G. Research on fault isolation technology of low voltage DC microgrid [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. DOI: [10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.002382](https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.002382).
- [16] 褚旭, 刘琦, 吕昊泽, 等. 基于控保协同海底观测网供电系统保护方案 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38(7): 1780-1792. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210965](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210965).  
CHU X, LIU Q, LÜ H Z, et al. Protection scheme for subsea observatory power supply system based on control and protection coordination [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2023, 38(7): 1780-1792. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210965](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210965).
- [17] MOKHBERDORAN A, CARVALHO A, LEITE H, et al. A review on HVDC circuit breakers [C]//3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014), Naples, Italy, September 24-25, 2014. Hertfordshire, UK: IET, 2014: 1-6. DOI: [10.1049/CP.2014.0859](https://doi.org/10.1049/CP.2014.0859).
- [18] 张宏燿. 机电混合式直流断路器关键技术研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨理工大学, 2020. DOI: [10.27063/d.cnki.ghlgu.2020.000522](https://doi.org/10.27063/d.cnki.ghlgu.2020.000522).  
ZHANG H Y. Research on critical technologies of electromechanical hybrid DC circuit breakers [D]. Heilongjiang: Harbin University of Science and Technology, 2020. DOI: [10.27063/d.cnki.ghlgu.2020.000522](https://doi.org/10.27063/d.cnki.ghlgu.2020.000522).
- [19] ZHENG B Y, GUO F, WEN A, et al. Research on DC microgrid protection scheme based on fault current controller [C]//2021 4th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology, Nanjing, China, December 3-5, 2021. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2022: 143-150. DOI: [10.1145/3508297.3508321](https://doi.org/10.1145/3508297.3508321).
- [20] WEI T L, LI W W, GUO F, et al. Research on fault current control method of DC microgrid battery energy storage system [J]. 2023. DOI: [10.21203/rs.3.rs-2464907/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2464907/v1).

## 作者简介:



劳志烜

劳志烜 (第一作者)

1983-, 男, 工程师, 主要从事继保自动化设备运行维护等工作(e-mail)kakyusei6@yeah.net。



郑炳耀

郑炳耀 (通信作者)

1997-, 男, 助理工程师, 电子信息硕士, 主要研究方向为直流微网保护技术(e-mail)1052399304@qq.com。

## 项目简介:

**项目名称** 接地网故障预警与智能诊断方法研究 (52177132)**项目类型** 国家自然科学基金**承担单位** 佛山科学技术学院**项目概述** 本项目拟分析包括地网极化电阻、地表电位、接触电压、热稳定性、跨步电压、故障电流分布等在内的能反映接地网故障的多元信号特征及其传播规律, 在揭示噪音影响故障信号提取和传播的机理的基础上, 提出无线传感器网络构建接地网故障智能在线诊断模型, 提高接地网故障诊断的准确率, 保障电力系统的安全可靠的运行, 减少电网设备损失和经济损失, 推动电力系统智能化发展。**主要创新点** (1) 针对接地网多元故障信号提取问题和传播难题, 拟采用深度循环网络研究信号的分离提取方法, 并研究大数据和基于深度置信网络的故障信号增强传播方法。(2) 针对多传感器监控网络的搭建难题, 设计基于图论和深度自学习的监控网络搭建及优化配置方法。(3) 研究基于深度降维网络的故障信息在线监控系统, 实现多元故障信息的融合推理和接地网故障在线诊断。**项目名称** 含多种分布式电源的直流微网过电流控制技术研究 (SKLHVDC-2021-KF-15)**项目类型** 直流输电技术国家重点实验室开放基金项目研究**承担单位** 佛山科学技术学院**项目概述** 项目拟通过研究分布式电源的故障电流自控制技术, 研究一套直流微网故障电流控制方法, 实现直流微网正常运行、故障状态全过程的可控和透明, 并与直流保护技术相配合, 以此降低直流微网对保护技术和直流设备的性能要求, 降低工程造价, 为直流微网工程广泛推广奠定理论基础。**主要创新点** (1) 结合现有低压直流设备的现状, 提出基于限流措施的常规配网保护方法, 与目前主流研究的快速保护思路有较大区别;(2) 提出了基于改进储能接入方式的故障电流限制方法, 使用较低的成本实现故障电流的精准控制;(3) 提出了分布式电源与储能一体化的结构, 在不增加设备成本的基础上, 实现故障电流的精准控制;(4) 结合本项目所提储能系统接入方式, 提出了更改直流微网及网点的故障电流限制方法, 在不影响系统正常运行、不增加成本的前提下实现故障电流的精准控制。

(编辑 叶筠英)