

柔性直流配电网保护策略综述

郑超文^{1,2}, 吴浩^{1,2}

(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 自贡 643000;

2. 人工智能四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000)

摘要:随着新能源的日益兴起,越来越多的分布式电源和储能器件集成到配电网中,推动了新兴直流系统的发展,也给传统交流配电系统的保护方案带来挑战。柔性直流配电系统安全稳定运行的关键在于如何对故障进行正确识别与快速隔离。针对几种柔性直流配电系统的典型拓扑结构,对常见的故障识别与保护方法进行了总结分析,并对柔性直流配电系统故障保护的未来发展提出了展望。

关键词:柔性直流配电网; 故障定位; 故障隔离

中图分类号: TM 721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)04-0065-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240410

Overview of Protection Strategies for Flexible DC Distribution Network

ZHENG Chaowen^{1,2}, WU Hao^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering,

Zigong 643000, Sichuan, China; 2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province,

Yibin 643000, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing rise of new energy, more and more distributed generation (DG) and energy storage devices are integrated into distribution network, which promotes the development of emerging DC systems and poses challenges to the protection schemes of traditional AC distribution systems. The key to safe and stable operation of flexible DC distribution systems lies in how to correctly identify and quickly isolate faults. Aiming at several typical topological structures of flexible DC distribution systems, the identification and protection method for common faults are summarized and analyzed. And then, the prospects for future development of fault protection in flexible DC distribution systems are proposed.

Key words: flexible DC distribution network; fault location; fault isolation

0 引言

为应对能源危机以及环境问题,发展新能源成为一种必然趋势^[1-2]。相较传统发电厂,如风能发电系统、光伏发电等可再生能源发电系统占地更小、地理分布更广,在电力中的应用正在逐年增加^[3-4]。近年来,越来越多的分布式电源(distributed generation,

DG)并入配电网中,但传统配电网是一个无源系统^[5],这意味着交流配电网面临着电能质量以及成本增加等问题^[6]。相比之下,直流配电网依靠供电可靠性好、电能质量高、分布式发电系统易于接入、供电损耗低等优势成为城市配电网的发展新方向^[7-8]。直流配电网是一个集发电、配电、用电为一体的有源网络。

柔性直流配电系统的稳定运行对故障的正确识别、定位与快速隔离有着较高的要求。配电网络与输电线路功能相似^[9],因此现有柔性直流配电系统保护思路大多沿用于直流输电系统或交流配电系统,而针对直流配电系统特点的保护有所欠缺,没能

基金项目:四川轻化工大学研究生创新基金项目(Y2023279);四川省科技厅项目(2021YFG0313, 2022YFS0518, 2022ZHCG0035);人工智能四川省重点实验室项目(2019RYY01);四川轻化工大学人才引进项目(2021RC12);自贡市科技局项目(2019YYJC02, 2020YGJC16)

形成完整成熟的柔性直流配电系统保护体系^[10]。

下面在了解柔性直流配电系统拓扑结构的基础上,系统分析了柔性直流配电网的故障识别、精准定位以及快速隔离的研究现状,探讨了当前研究所面临的问题并提出了展望。

1 柔性直流配电网的拓扑结构

柔性直流配电网主要有辐射型、双端型和多端型 3 种拓扑结构^[11]。

辐射型(又称为单端型、链式型)网络拓扑结构是柔性直流配电网的最基本结构,只含有一个主供电源,在高压直流母线处完成负荷供电及分布式电源并网,如图 1 所示,网络呈放射状延伸。这种网络拓扑结构简单、造价低,且保护难度低;但供电可靠性低,仅适用于供电可靠性要求低、输电距离短的情况。

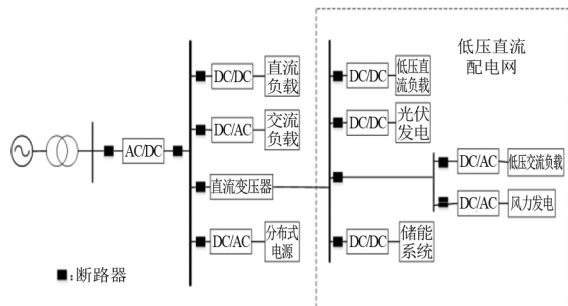


图 1 辐射型柔性直流配电网网络拓扑结构

双端型(又称为手拉手型)柔性直流配电网网络拓扑结构如图 2 所示,两个换流站的应用减轻了供电负担。双端型网络拓扑结构相较于辐射型,供电更加安全可靠且运行模式多样,当一端故障时另一端可以继续给负荷供电,不易造成长期大面积停电;但其造价和保护难度也有所增加。这种拓扑结构适用于供电可靠性要求较高的情况。

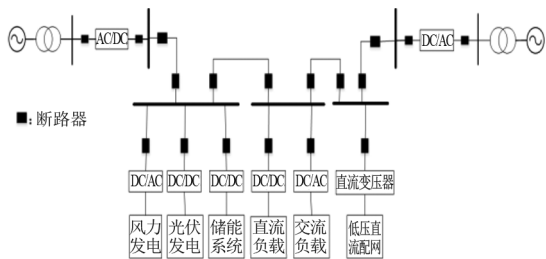


图 2 双端型柔性直流配电网网络拓扑结构

多端型(又称为环状)柔性直流配电网是一个多端口的复杂网络,拓扑结构如图 3 所示。多端型配电网的供电可靠性最高,冗余的输电线路和多个

备用电源使其运行方式极为灵活,且当多端系统某处故障时,在快速隔离故障点后其余线路仍能正常供电,不易造成大面积停电。但该网络的故障暂态特性复杂,保护配置的难度上升。在供电可靠性要求高的情况下,多端柔性直流配电系统应用更多。

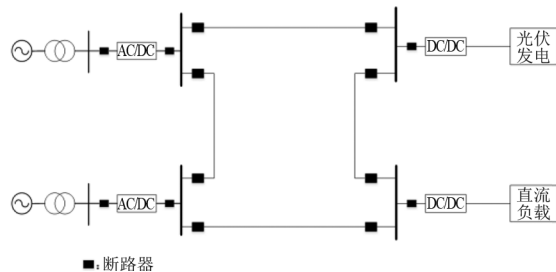


图 3 环状柔性直流配电网网络拓扑结构

目前,中国已有深圳 ± 10 kV 双端柔性直流配电网^[12]、贵州 ± 10 kV 五端柔性直流配电网^[13]、苏州 ± 10 kV 双端柔性直流配电网^[14]等示范工程投入使用。综合经济性、可靠性等各方面考虑,多端型柔性直流配电网的拓扑结构应用更为广泛,同时也是未来的发展方向。

2 柔性直流配电系统保护技术

2.1 柔性直流配电系统故障分析与保护分类

与交流配电网不同,柔性直流配电网呈弱惯性,不存在自然过零点,故障发展极快,如果不及时切除故障,可能导致整个直流电网的波动^[15]。因此,柔性直流配电系统的发展关键在于能否在极短时间内完成故障的诊断识别与隔离。直流配电网保护有不同的分类方法,如表 1 所示。

以多端柔性直流配电网为例,其直流侧故障最为频繁,主要有单极接地故障、双极短路故障以及断线故障 3 种类型。其中,单极接地故障发生频率最高,而危害最大的是双极短路故障^[16]。

单极接地故障发生后,系统在短时间内仍能维持较为正常的运行,故障特性与采用的换流器拓扑结构有关;而双极短路故障时不同换流器拓扑结构下的故障特性相似。双极短路故障发生后,故障电流在极短时间内迅速上升,极易造成器件的损坏^[17]。现有柔性直流配电网保护研究中,大多只分析一种接地方式下的故障特性,且没有考虑到不同接地方式以及过渡电阻对故障的影响。

表1 直流配电网保护方法分类

分类依据	类型
故障区域	交流侧保护
	直流侧保护
	换流站及换流阀保护
	负荷保护
故障信息采集来源	单端信息保护
	双端通信保护
故障判别原理	行波法保护
	故障分析法保护

2.2 柔性直流配电系统故障检测与定位

如何实现柔性直流电网快速、精准的故障定位是保护的重难点。常见的保护方法有电气量保护、测距式保护、纵联保护、行波保护以及边界保护^[9]。

1) 电气量保护包括电气量幅值保护以及电气量微分保护。电气量幅值保护是通过故障时电压或电流的幅值变化来进行故障判别,通过设定电压或电流阈值配合断路器的动作完成故障切除。但柔性直流配电网的拓扑结构复杂,故障特性由多种因素造成,导致电气量幅值保护选择性不足,常用作故障识别。电气量微分保护依靠故障时电压或电流迅速突变使其微分差异明显的特征来判别故障。直流配电网的故障电流、故障电压变化迅速,因此相较于电气量保护而言,微分保护的速动性提升,但微分保护易受雷电、噪声等影响,其耐受能力还需提升^[18-19]。针对辐射状柔性直流配电系统,文献[20]提出了一种包括过流保护、变流保护、瞬时差动电流保护在内的保护方案,具备较好的选择性、速动性,但也没有对保护的耐受能力提出研究。

2) 测距式保护,即距离保护,利用电网相关参数计算分析故障暂态特性,估算出测量点到故障点的距离,实现故障精准定位。但柔性直流配电网发生故障时,故障暂态参数难以识别且计算时间长,导致速动性不足,不能很好地实现柔性直流配电网的保护要求^[21-22]。文献[23]利用电网初始参数及故障特性,分析得到故障距离仅与故障初始时刻电流变化率有关,借此实现故障精准定位,但该方法在故障靠近端口处且过渡电阻较大时测距误差较大。文献[24]借鉴交流保护方法,针对直流线路双极故障采用了直流低电压过电流保护,与快速线路差动保护配合完成故障线路定位,有一定的抗噪能力和耐过渡电阻能力,但算法复杂,存在保护灵敏性较低、

保护整定较为复杂等问题。

3) 纵联保护是一种双端通信保护,通过线路两端电气量的特定关系,如线路两端电流方向或微分等故障特征,实现故障线路的识别。基于双端信息的纵联保护利用了线路两端的信息,可靠性更高,但同时也存在着信息延时的问题急待解决^[25-26]。文献[27]通过分析暂态高频功率,利用相关系数构建保护判据,提出一种适用于多种网络拓扑结构和运行场景且保护阈值整定简单的纵联保护方案,该方案可同时用于故障识别与选极,对数据同步性要求低,具有较好的速动性、选择性和可靠性,有一定的耐过渡电阻能力,但对噪声的影响缺乏研究。文献[28]基于最小二乘法,提出一种基于线路两端故障电流拟合曲线斜率的纵联保护方案,该方案算法简单、数据窗短且对数据精度的要求不高,受通信延时和同步误差的影响小,速动性、灵敏性和保护性均较好。

4) 行波保护是通过配电网故障时产生的电压电流行波在故障点与监测点间来回反射的相关信息(如反射时间)来判别故障。行波保护依赖行波波头的相关信息实现故障精准定位,但柔性直流配电网的行波较弱、波头识别困难,且要求高采样频率,这极大地制约了行波保护在柔性直流配电网中的发展。因此,行波保护目前在输电系统中应用广泛,但在配电系统中不太适用^[29-30]。文献[17]基于小波变换原理,利用由初始行波波头得到的模极大值的极性方向比较构建保护判据,具有一定的耐过渡电阻能力,但是否适用于多种网络拓扑结构有待考证。

5) 边界保护是柔性直流配电系统特有的保护方法,通过加设电抗器等边界元件人为构造边界,在配电网出现故障时,通过边界内外的电气量特征差异来实现故障区间的判别,具有较好的故障穿越能力,能够限制故障电流,但易受配电网参数、边界设置等因素的影响^[31-32]。文献[33]以线路两端直流电抗器为边界元件,利用单元数据窗口中故障电流的积分和故障电流变化率识别故障区段,并根据故障电流方向判别故障类型与故障极;该方法数据窗短、速动性好,有一定的耐过渡电阻能力,但未考虑噪声的影响。文献[34]通过小波变换获取电流高频暂态能量,以此构造保护判据,该方法速动性强、无需通信、耐过渡电阻能力较好,但其整定值设置较为麻烦。

除上述5种常见的保护方法之外,近年来,零模

电流检测特征法^[35-36]、基于人工智能算法^[37-38]等保护方法也更加受到重视。特别是随着硬件的发展,基于人工智能算法的故障诊断与保护因更加灵敏便捷,将成为未来电网保护的重要发展方向。文献[39]分别针对故障后阶段及故障重启阶段,提出了以电流模量突变的极性为判据和多时间尺度、多准则融合的保护方案;该方案时间窗口短,具备较好的快速性和准确性。文献[40]提出了一种基于颜色关系分类器的高阻抗故障识别方法,能够在不使用大量故障信号的情况下实现对各种工况的识别,但该方法在接地电阻低时识别率下降。文献[41]提出了一种基于连续小波变换和卷积神经网络的谐振接地配电系统馈线故障检测方法,对暂态零序电流信号进行连续小波变换处理得到时频灰度图像,并通过大量灰度图像训练卷积神经网络,自适应地提取灰度图像的特征,实现同时特征提取和故障馈线检测,并验证了在不同网络结构、两点接地故障等情况下该方案仍具有可靠性和鲁棒性。

2.3 柔性直流配电网故障隔离

对柔性直流配电系统故障进行快速识别和精准定位之后,如何实现故障的隔离成为配电网保护的关键。

在交流系统中,电流有一个自然的过零点使断路器能够安全断开;而在直流系统中没有这样的自然过零点,迫使故障电流在非常高的值中断,电源转换器被迫通过快速关闭来保护自己^[42],因此基于交流断路器的故障隔离策略不适用于直流配电网^[43]。在柔性直流配电系统发生故障后,为了运行安全和电源可靠性,柔性直流配电网中的直流故障应在几毫秒内以高选择性检测和中断^[44]。基于目前现有研究,柔性直流配电网的故障隔离主要有两种方式:一种是基于故障自清除换流器的故障隔离方式;另一种是基于直流断路器的故障隔离方式。

基于故障自清除换流器的故障隔离方式需加装直流隔离开关,这种方法通过产生反向电流或换流器闭锁实现保护^[45]。而隔离开关不具备故障清除能力,需要在换流器将故障电流清除后,再利用隔离开关隔离故障区域。含故障自清除能力的换流器只能阻断本站直流侧故障,若换流站均闭锁,则会导致全站停电,该方式的保护选择性不足^[46]。文献[47]针对基于全桥型子模块的模块化多电平换流器(modular multilevel converter based on the full-bridge

submodule, FBSM-MMC)提出一种改进的极间短路快速恢复策略。该方法在识别故障并闭锁换流器后,判断故障是否为永久性,若是,则利用 FBSM-MMC 闭锁后的故障自清除能力配合系统完成重启;若不是,则系统恢复。该方法利用换流器重新锁实现快速恢复功率的输送,可靠性好,但其采用低压过流的保护判据,耐过渡电阻能力不足。

基于直流断路器的故障隔离方式是在对故障处快速精准定位后,跳开两端直流断路器来实现保护。相较于基于故障自清除换流器的故障隔离策略,这种方法无需换流器闭锁,可靠性更高。但高电压、大容量的直流断路器技术发展不够成熟,未能大量投入实际应用^[48-49]。文献[50]针对基于电压源换流器的柔性直流配电网极间故障,采用保护控制一体化装置配合直流断路器快速重合闸完成故障隔离及恢复,且过程中不会发生过压过流现象,但非故障区域的直流线路会感应到过电流,导致故障范围扩大。文献[51]针对 FBSM-MMC 提出了一种基于直流断路器和快速机械开关协同合作的故障隔离方法,通过切换 MMC 限流控制方式以及线路两端电流过零特征来判断故障线路,再利用 MMC 控制方式的切换来配合直流断路器与快速机械开关完成故障隔离,避免了换流器闭锁引起的全网短时停电。

此外,由于交流断路器的成本优势,使其在柔性直流配电系统的故障隔离中仍被大量采用^[52]。文献[53]针对交流断路器和快速直流开关提出了用握手手法对故障直流线路进行定位和隔离,在无通信的情况下恢复系统,在保证可靠性的同时缩减了成本。

3 结 论

随着分布式电源的发展,柔性直流配电系统逐渐成为未来的重要发展趋势,其中,多端柔性直流配电系统供电能力最强、可靠性最高,是未来的重要发展方向。柔性直流配电系统保护的关键在于如何快速识别、精准定位并准确隔离故障。上面从网络拓扑结构、故障识别与定位以及故障隔离几个方面介绍了柔性直流配电系统的现有保护策略,阐述了几种常见保护方法的优劣之处。

当前柔性直流配电系统的保护策略逐渐形成体系,但还不够完善,未来可以从以下方面进一步发展:

1) 考虑保护策略在不同接地方式、过渡电阻及

噪声下的适用性。当前保护策略大多只考虑一种接地方式,但不同的接地方式、过渡电阻及噪声对故障的影响不同,可能导致保护误动作。

2) 柔性直流配电系统保护可以引进限流装置,降低故障危害,提高故障穿越能力。

3) 考虑针对高电压、大容量直流断路器的保护技术。相较于交流断路器故障隔离时间长、故障自清除换流器停电范围广的故障隔离策略,基于直流断路器的故障隔离方式将成为未来发展趋势,然而当前高电压、大容量的直流断路器技术还不够成熟。

参考文献

- [1] 温鑫姚,文莹,何圣川,等.分布式光伏接入对系统电能质量的影响分析与应对措施[J].机电信息,2022(23):22-24.
- [2] 孙亚娟,焦镜泽.户用分布式光伏-储能系统经济性分析[J].农村电气化,2022(7):75-78.
- [3] BORGES C L T. An overview of reliability models and methods for distribution systems with renewable energy distributed generation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6):4008-4015.
- [4] JUSTO J J, MWASILU F, LEE J, et al. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24:387-405.
- [5] MARVASTI A K, FU Y, DORMOHAMMADI S, et al. Optimal operation of active distribution grids: A system of systems framework [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3):1228-1237.
- [6] 季路.多端柔性直流配电网保护方案研究[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [7] JING G X, ZHANG A M, ZHANG H. Review on DC distribution network protection technology with distributed power supply [C]//2018 Chinese Automation Congress (CAC), November 30-December 02, 2018, Xi'an, China. IEEE, 2018:3583-3586.
- [8] XIN S G, QIN W P, WANG C, et al. Protection scheme of multi-terminal flexible DC distribution network based on current-limiting inductor voltage [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2019, 267(4):042035.
- [9] 马望.多端柔性直流配电网的后备保护方案研究[D].淮南:安徽理工大学,2020.
- [10] 张章,胡源,罗涛,等.中压直流配电系统保护技术研究综述[J].电测与仪表,2020,57(23):109-118.
- [11] 曾嘉思.柔性直流配电网可靠性评价方法研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [12] 刘国伟,赵宇明,袁志昌,等.深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J].南方电网技术,2016,10(4):1-7.
- [13] 彭小俊,郝宝泉,张海涛,等.贵州配电网柔性直流输电示范工程[J].电气技术,2014(10):36-41.
- [14] 苏麟,朱鹏飞,闫安心,等.苏州中压直流配电工程设计方案及仿真验证[J].中国电力,2021,54(1):78-88.
- [15] 李玉.多端柔性直流配电网故障特性分析[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [16] 王成.直流配电网故障分析及保护方案研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [17] 曾钰,邹贵彬,孙辰军,等.一种柔性直流配电网直流侧故障保护方法[J].电力信息与通信技术,2018,16(7):80-86.
- [18] 李永刚,韩冰.低压直流配电系统保护研究综述[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(1):17-23.
- [19] 周琳.多端环状柔性直流配电线路保护方法研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [20] JIAO Zaibin, WANG Zhao, WANG Xiaobing, et al. Protection schemes for distribution lines in DC power grid [C]//IEEE Innovative on Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIAo), November 3-6, 2015, Bangkok, Thailand. IEEE, 2015:1-6.
- [21] 李猛,贾科,毕天姝,等.适用于直流配电网的测距式保护[J].电网技术,2016,40(3):719-724.
- [22] JIA K, ZHAO Q J, FENG T, et al. Distance protection scheme for DC distribution systems based on the high-frequency characteristics of faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1):234-243.
- [23] 薛艳静,徐岩,程姝.基于电流变化的环状直流配电网故障定位方法[J].智慧电力,2021,49(2):76-82.
- [24] 孙刚,时伯年,赵宇明,等.基于MMC的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):127-133.
- [25] WEI X Y, ZOU G B, ZHANG S, et al. Frequency domain impedance based protection for flexible DC distribution grid [J]. IEEE Access, 2022, 10:114203-114213.
- [26] LI B, HE J W, LI Y, et al. High-speed directional pilot protection for MVDC distribution systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 121:106141.
- [27] 陈少宇,黄文焘,邵能灵,等.多端柔性直流配电网高频功率相关性纵联保护方法[J].电力系统自动化,2020,44(19):150-159.
- [28] 张鑫宇,樊艳芳,马健,等.基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电线路纵联保护方法[J].电力系统保护

- 与控制,2021,49(18):128-136.
- [29] 徐辰翔. 多端柔性直流配电网故障仿真和保护技术研究[D].南京:南京邮电大学,2021.
- [30] WILCHES-BERNAL F, BIDRAM A, RENO M J, et al. A survey of traveling wave protection schemes in electric power systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 72949-72969.
- [31] 李盈含,高亮,陈蒙蒙. 柔性直流配电系统控制策略及保护技术研究综述[J].电测与仪表,2020,57(9):8-16.
- [32] JIA K, SHI Z M, WANG C B, et al. Active converter injection-based protection for a photovoltaic DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(6):5911-5921.
- [33] LIU L, KANG X N, ZHENG M Y, et al. A fast protection scheme using fault current characteristics in multi-terminal flexible DC distribution network [C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 21-24, 2019, Xi'an, China. IEEE, 2019:317-321.
- [34] 李斌,何佳伟,李晔,等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749.
- [35] 戴志辉,黄敏,苏怀波,等. 环状柔直配电网线路的单端量保护原理[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6825-6836.
- [36] 左鹏飞,秦文萍,夏福良,等. 基于零模电流相关性的直流配电网单极接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(13):86-96.
- [37] 汪光远,杨德先,林湘宁,等. 基于深度置信网络的柔性直流配电网高灵敏故障辨识策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(17):180-188.
- [38] 韦延方,吴郑磊,王鹏,等. 基于 CNN 与 DCGAN 的柔性直流配电网故障检测[J]. 煤炭学报,2021,46(S2):1201-1208.
- [39] LI Z N, DUAN J D, LU W C, et al. A fast pilot protection for DC distribution networks considering the whole fault process [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4):3121-3132.
- [40] WEI Y F, WANG Z J, LIU K Z, et al. Fault detection method of flexible DC distribution network based on color relation analysis classifier[J]. Electrical Engineering, 2022,104(6):4543-4556.
- [41] GUO M F, ZENG X D, CHEN D Y, et al. Deep-learning-based earth fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3):1291-1300.
- [42] MUAZU H, THOMAS S. Overview of solid state circuit breaker technology and some recent experiment prototypes [C]//2017 13th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), November 28-29, 2017, Abuja, Nigeria. IEEE, 2017:1-4.
- [43] 李斌,何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):87-95.
- [44] LI B, HE J W, LI Y, et al. A novel solid-state circuit breaker with self-adapt fault current limiting capability for LVDC distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4):3516-3529.
- [45] 罗永捷,李耀华,王平,等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(10):2588-2599.
- [46] 吴婧,姚良忠,王志冰,等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2681-2694.
- [47] 吕家乐,吴在军,窦晓波,等. 基于 MMC 的中压直流配电网极间短路故障保护策略[J]. 电力工程技术,2019,38(4):2-9.
- [48] 屈鲁,余占清,陈政宇,等. 三端口混合式直流断路器的工程应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):141-146.
- [49] SHAH S I A, BATOOL M, KHALIQ A, et al. DC fault protection strategy for medium voltage integrated power system; Development and assessment [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(6):2859-2872.
- [50] 时伯年,李岩,孙刚,等. 基于快速重合闸的多端直流配电网极间故障隔离恢复策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(8):88-95.
- [51] ZHENG T, LYU W X, WU Q, et al. An integrated control and protection scheme based on FBSM-MMC active current limiting strategy for DC distribution network [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3):2632-2642.
- [52] MONADI M, KOCH-CIOBOTARU C, LUAN A, et al. Multi-terminal medium voltage DC grids fault location and isolation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14):3517-3528.
- [53] TANG L X, OOI B-T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems [J]. IEEE transactions on power delivery, 2007, 22(3):1877-1884.

作者简介:

郑超文(2001),女,硕士研究生,研究方向为柔性直流配电网故障保护;

吴浩(1980),男,博士,教授,主要研究方向为智能信息处理、电力系统及智能控制。

(收稿日期:2023-11-08)