

基于MMC与DCCB协调配合的直流电网快速重合闸策略

叶海

(国家电网有限公司华东分部,上海 200001)

摘要:柔性直流电网是多类型可再生能源高效外送的重要途径,如何设计高效的重合闸策略使其具备故障后快速恢复能力,是提高整个交直流电网稳定性需要解决的关键性问题。根据直流断路器以及换流器的工作机理,提出一种断路器-换流器协调配合的重合闸控制策略及逻辑流程。为验证所提出的方法,在Matlab平台中搭建了3端500 kV柔性电网模型以及直流断路器模型进行仿真验证,此外还搭建了8开关组的断路器实验样机,与Matlab中的柔性直流电网进行数字物理混合实验验证,证明了所提出的重合闸策略的可行性以及工程适用性。

关键词:直流电网;直流断路器;重合闸;控制策略;实验样机

中图分类号:TM76 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22919

Fast Reclosing Strategy of DC Network Based on MMC and DCCB Coordination

YE Hai

(East China branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200001, China)

Abstract: Flexible DC power grid is an important way for efficient transmission of various types of renewable energy. How to design an efficient reclosing strategy to make it have the ability of rapid recovery after fault is a key problem to improve the stability of the whole AC/DC power grid. According to the working mechanism of DC circuit breaker and converter, a reclosing control strategy and logic flow of circuit breaker & converter coordination was proposed. In order to verify the proposed method, a three terminal 500 kV flexible power grid model and a DC circuit breaker model were built in Matlab platform for simulation verification. In addition, a circuit breaker experimental prototype of 8 switch groups was built, and the digital physical hybrid experiment with the flexible DC power grid in Matlab was carried out to verify the feasibility and engineering applicability of the proposed reclosing strategy.

Key words: DC grid; DC circuit breaker; reclosing; control strategy; experimental prototype

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)凭借低谐波、高拓展等优势,成为柔性直流输电技术发展的重点方向,基于MMC的柔性直流电网亦成为了可再生能源外送的重要途径^[1-3]。目前我国已有如厦门双端直流工程^[4]、南澳三端直流工程^[5]、舟山五端直流工程^[6]、张北四端直流工程^[7]等诸多MMC柔性直流输电示范性工程。输电模式由海底电缆向内陆架空线转型,但架空线受环境因素影响较大,较易发生故障,直流断路器(DC circuit breakers, DCCB)^[8-9]成为其必备的关键设备。DCCB开断故障电流

后,为保证整个交直流电网的快速恢复,提升系统稳定性,必须对快速重合闸策略进行深入研究。

文献[10]基于附加电容的放电特性,提出了一种柔性直流输电线路的自适应重合闸策略,有助于降低重合闸失败的电气冲击,但附加电容的预充电电源并不容易获取。文献[11]提出了一种重合闸电阻的计算方法,用以限制桥臂电流,进而降低重合闸失败后DCCB的电气应力,但如何快速投入重合闸电阻需要进一步设计。文献[12]提出了柔性直流电网换流器与DCCB的快速重合

闸协调控制策略,以实现功率的快速恢复。文献[13]针对全桥子模块的MMC换流器,采用注入特征信号的方式来判别直流故障的性质,用以解决HVDC无法选择性重启的问题,但其没有依托直流故障抑制装备,使用MMC换流器直接切断故障电流,扩大了故障影响范围。文献[14]针对直流电网提出了一种区分瞬时故障和永久故障的方法,提高了重合闸的成功率。

目前已有的研究大多仅局限于DCCB单独重合闸或MMC单独重合闸,本文充分利用直流电网MMC的工作特点和DCCB的运行原理,提出一种MMC与DCCB相配合的快速重合闸策略,并搭建了500 kV的3端柔性直流电网以及8开关组直流断路器实验样机,使用数字仿真以及数字物理混合实验^[15]两种方法进行验证,以证明所提出的方法具有工程适用性。

1 MMC及DCCB工作机理

模块化多电平换流器和直流断路器是构建直流电网的两种关键设备,MMC负责传递其两侧交直流系统的有功功率,DCCB负责在故障后6 ms内快速切断故障电流^[9, 16],防止MMC闭锁,扩大故障影响面积。

1.1 MMC工作机理

目前的柔性直流工程大多采用半桥型子模块(half bridge sub-module, HBSM)构建6桥臂换流器,其拓扑结构如图1所示。

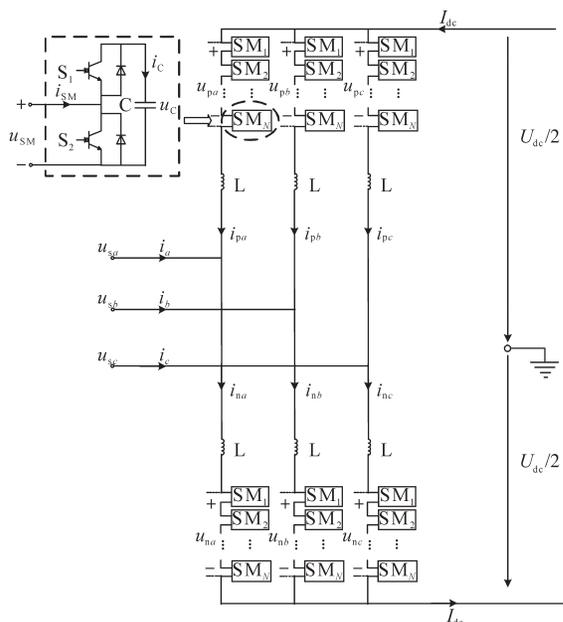


图1 MMC主电路

Fig.1 Main circuit of MMC

图1中,每个桥臂包含 N 个HBSM以及一个桥臂电抗器 L ,通过控制HBSM的IGBT导通和关断的状态,可以实现对HBSM的电容 C 是否接入电路进行控制,进而在三相交流端口拟合出正弦交流电压,即MMC的各桥臂可被视为受控电压源。

图1中: x 相($x \in \{a, b, c\}$)的电压和电流分别由 u_{sx} 和 i_x 来表示; x 相上、下桥臂电流分别由 i_{px} 和 i_{nx} 来表示; x 相上、下桥臂电压分别由 u_{px} 和 u_{nx} 来表示;直流电压及电流分别由 U_{dc} 和 I_{dc} 来表示;HBSM电容电压以及电容注入电流分别由 u_c 和 i_c 来表示;HBSM端口电压以及端口注入电流分别由 u_{sm} 和 i_{sm} 来表示。

换流器的控制系统通过实时采集的交流数据计算各个桥臂应该投入和切除的子模块个数,实现功率的传输,控制策略对重合闸的影响将在后文详述。

1.2 DCCB工作机理

ABB公司于2012年在世界范围内率先研制并投运的混合式直流断路器是目前直流系统的主要应用设备,其拓扑结构如图2所示。该设备额定电压及电流分别为320 kV和2 kA,并且能够在5 ms时间段内开断8.5 kA的故障电流,实现MMC与故障点的物理隔离。该技术被评为2012年度科技里程碑^[17]。

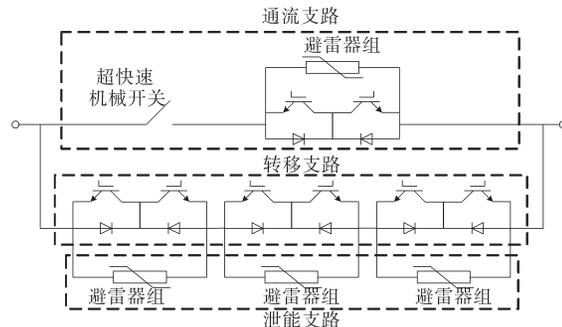


图2 ABB混合式直流断路器

Fig.2 Hybrid DC breaker of ABB

通流支路、转移支路以及泄能支路是构成上述DCCB的主要能力流通过程。当系统未发生故障时,通流支路的超快速机械开关处于闭合状态,各个IGBT器件处于导通状态,功率从通流支路流过。一旦系统发生故障后,控制保护系统立即命令转移支路的IGBT导通,同时关断通流支路的IGBT,待通流支路的电流降低至0后,跳开超快速机械开关,待开关完全断开后,关断转移支路的IGBT,剩余能量通过泄能支路的避雷器组进行释放。

2 直流电网重合闸策略

直流电网的大部分故障均为瞬时故障,快速重合闸能够保证整个电网的快速恢复。为充分提升重合闸的速度,需要对操作时长和恢复时长这两个方面进行研究。

2.1 DCCB重合闸操作

DCCB完成能量泄放后100~200 ms,直流线路需完成去游离,控制保护装置向DCCB下发重合闸指令。若直流电流呈可控态势平稳上升,则表明故障为瞬时故障,重合闸成功;若直流电流快速上升超过额定值,则表明故障为永久故障,重合闸失败。由于DCCB的支路较多,重合闸时具体采用哪条支路还需进一步分析。

在DCCB开断故障电流后,为保证与故障点的物理隔离,超快速机械开关需要始终处于开断状态,所以若使用图2通流支路进行重合闸,还需等待2 ms左右的机械开关闭合时间,且如果重合闸失败,仍要重复进行故障电流转移及开断。故为保证重合闸时间,采用转移支路进行重合闸更为合理,即控制保护系统下发重合闸指令后,故障线路两侧的DCCB迅速导通转移支路,若重合闸成功,则在功率逐步上升的同时,闭合超快速机械开关,然后导通通流支路的IGBT,最后断开转移支路的IGBT,将工作电流换流至通流支路。若重合闸失败,则直接开断转移支路,切断故障电流。

该过程的优势在于,转移支路向通流支路换流的过程不会降低功率上升的速率,能够提高重合闸速度,并且一旦重合闸失败,仅需要断开转移支路,操作流程简单,速度快,需开断的故障电流较低,转移支路受到的冲击电压较小。

但配置DCCB的目的就是保证MMC在故障时间内正常运行,防止故障影响面积扩大,即故障后至重合闸阶段直流电网的各个MMC仍为受控状态,若控制器仍沿用系统正常运行时的控制策略,可能导致故障点两侧电压不均衡,进而导致重合闸时刻出现冲击电流,这种冲击电流有可能会使控制保护系统误认为故障是永久故障,致使重合闸失败。

2.2 MMC重合闸控制策略

为保证直流电压与有功功率的平衡,直流电网的MMC通常采用下垂控制策略,当直流电压下降时,整流站增加 d 轴电流分量参考值,逆变站

降低 d 轴电流分量参考值,以功率的形式维持直流电压,反之亦然。经典的下垂控制功率—电压关系如图3所示。

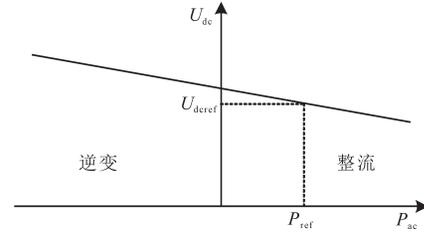


图3 下垂控制功率—电压关系

Fig.3 Droop control power—voltage relationship

图3中 P_{ac} 和 U_{dc} 分别是实际测量的交流有功功率和换流器直流端口电压, P_{ref} 和 $U_{dc,ref}$ 分别是有功功率和直流电压的参考值。

当直流线路被DCCB开断后,短时间内整流站将出现功率盈余,下垂控制策略将这部分盈余能量以电压的形式储存于子模块电容中,故障线路整流侧端口呈现过电压状态;反之,故障线路逆变侧端口呈现过电压状态。若在此时进行DC-CB重合闸操作,必定会有较大的电流冲击,可能导致重合闸失败。故本文将直流电网故障开断后MMC外环控制策略改变为定直流电压控制,以保证重合闸时刻故障点两侧电压均衡,控制流程如图4所示。

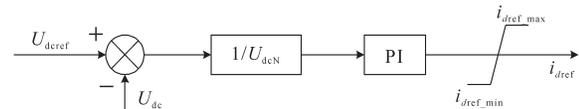


图4 外环控制器下垂控制策略

Fig.4 Droop control strategy of outer loop controller

图4中, U_{dcN} 为直流电压的额定值; i_{dref} 为外环控制器输出的 d 轴电流参考值,为防止过调制现象出现, i_{dref} 需要经过限幅环节才能输入值内环电流控制器, $i_{dref,max}$ 和 $i_{dref,min}$ 分别为其限幅的上限和下限。

2.3 DCCB和MMC配合重合闸逻辑

为保证直流电网快速恢复,所以含DCCB的直流电网重合闸过程应分两步走。第一步:在DCCB第一次切断故障电流后,将故障线路两侧的MMC控制策略迅速转变为定直流电压控制,维持线路电压恒定。第二步:故障线路两侧的DCCB接收到重合闸指令后,迅速导通转移支路的IGBT开关,依据前文所述判断是否重合闸成功,并进行换路或再次开断等操作。

自故障隔离至重合闸结束这段时间的具体操作流程如图5所示。

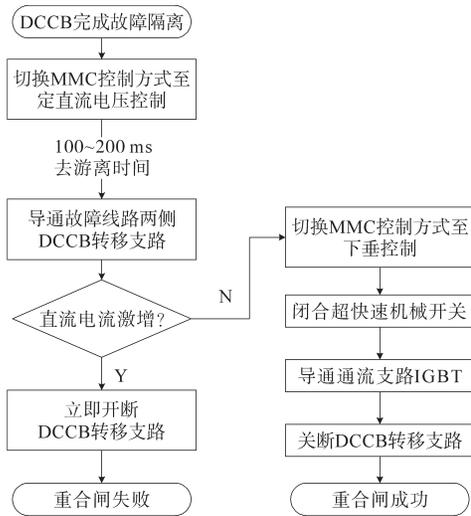


图5 重合闸流程图

Fig.5 Reclosing flow chart

3 仿真与实验

3.1 软件仿真

为验证所提出的DCCB与MMC的协调快速重合闸策略,在Matlab仿真软件中搭建了3端500 kV柔性直流电网,各个换流站的中性线经接地金属回线相连接,直流电网架构及DCCB配置情况如图6所示,相关参数如表1所示。

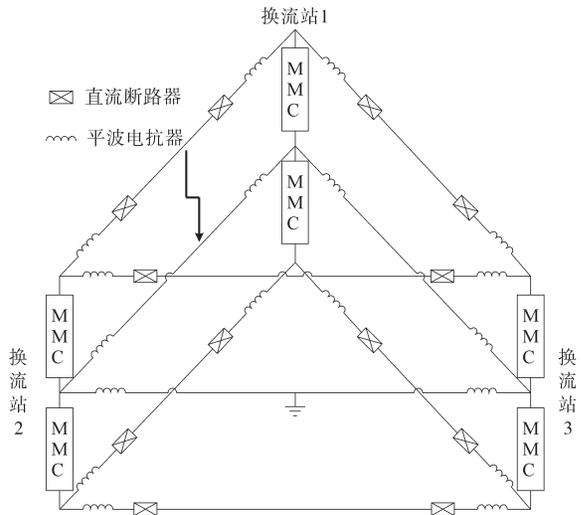


图6 三端直流系统正极接线

Fig.6 Three terminal DC system positive connection

表1 四端直流系统参数

Tab.1 Parameters of four terminal DC system

参数名称	换流站1	换流站2	换流站3
额定传输功率/MW	3 000	3 000	3 000
子模块电容/mF	15	15	15
子模块数/个	264	264	264
直流电压/kV	±500	±500	±500
桥臂电感/mH	75	75	75
正负极电感/mH	150	150	150
中性线电感/mH	300	300	300
变压器变比/kV	525/263	525/263	525/263

如图6所示,故障为换流站1与换流站2之间的正极直流电路与中性线发生短路,故障后至故障隔离阶段的直流电流及DCCB转移支路冲击电压如图7所示。

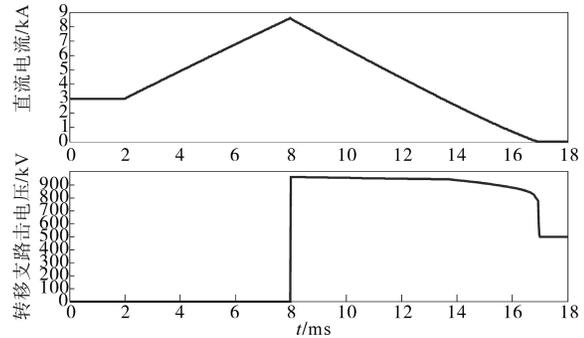


图7 故障电流及冲击电压

Fig.7 Fault current and impulse voltage

可以看出,系统于稳定运行2 ms后发生故障,故障电流峰值约为8.5 kA,DCCB开断故障电流所受的冲击电压约为960 kV,故障后6 ms直流断路器完成开断动作,故障后15 ms左右泄能支路将剩余能量释放完毕,故障电流彻底被切断,实现故障隔离。

故障隔离后,直流线路需要100~200 ms的去游离时间,待控制保护系统下发重合闸命令后,故障线路两侧的DCCB立即导通转移支路,重合闸前后的直流电压及电流如图8所示。

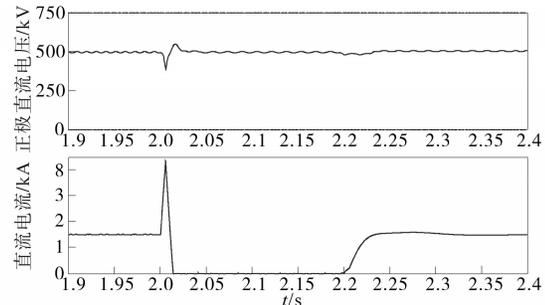


图8 重合闸前后直流电压及电流

Fig.8 DC voltage and current before and after reclosing

由图8可知,系统于2 s时刻发生故障,DCCB在2.006 s时刻完成动作,2.2 s时刻进行重合闸,直流电流平稳上升至额定值,电流上升阶段,直流电压略有降低,随即恢复额定值,整个系统处于可控状态,重合闸成功。所提出的协调快速重合闸策略通过了仿真验证,具有一定的合理性,可应用于柔性直流电网。

3.2 样机实验

为进一步验证所提出的协调快速重合闸策略的工程适用性,构建了一套转移支路有8开关组、通流支路有2开关组的低压直流断路器样机,

样机架构及实验接线如图9所示,由于实验过程中的电压、电流较低,以及样机构建成本限制,样机使用IRF530A作为电力电子开关来代替工程中的IGBT,IRF530A能够承受100 V的电压以及14 A的电流。直流电网仍采用3.1节给出的参数在Matlab软件中构建,直流电网模型运行于RT-LAB实时仿真器中,通过功率放大器与DCCB样机相连接,进行数字物理混合实验。



图9 直流断路器样机

Fig.9 DC circuit breaker prototype

实验过程中的直流电流波形如图10所示,直流电网正常运行电流通过功率放大器等比例降低后,在直流断路器样机流过3 A实际电流,发生故障后,直流电流激增至9 A左右,该电流能够被DCCB迅速开断,重合闸后,直流电流呈现可控态势上升,最终稳定于3 A,重合闸成功。所提出的协调快速重合闸策略通过了样机实验的检测,具有一定的工程适用性。

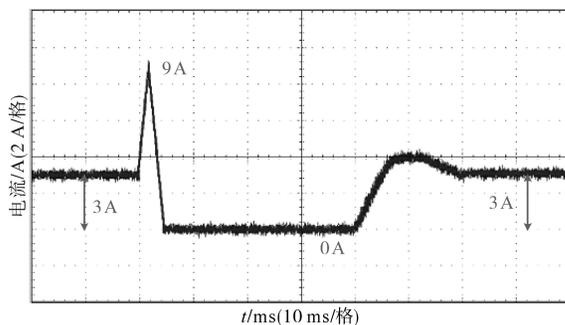


图10 直流电流实验波形

Fig.10 Experimental waveform of DC current

4 结论

本文首先分析了MMC以及DCCB的工作机理,其次对DCCB重合闸时各个支路导通顺序进行研究,确定了使用转移支路进行重合闸的基本流程。为保证直流电网顺利重合闸,对直流线路去游离阶段的MMC控制策略进行变换,实现了重合闸时刻故障线路两侧电压均衡,并设计了MMC与DCCB协调快速重合闸策略整体逻辑框架。最终通过3端500 kV柔性直流电网仿真以

及8开关组DCCB数字物理混合实验,证明了本文所提的重合闸策略具有一定的可行性与工程适用性。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
Xu Zheng.Flexible HVDC transmission system[M].Beijing:China Machine Press,2016.
- [2] 王渝红,阳莉汶,江伟,等. 直流电网设备与控制策略研究综述[J]. 电网技术,2018,42(1):12-24.
Wang Yuhong, Yang Liwen, Jiang Wei, et al. Review on equipment and control strategies of DC power grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 12-24.
- [3] 宋平岗,罗剑,游小辉,等. 基于MMC的多端柔性直流输电系统控制策略研究[J]. 现代电力,2017,34(1):55-61.
Song Pinggang, Luo Jian, You Xiaohui, et al. Research on control strategy of multi-terminal HVDC based on MMC[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 55-61.
- [4] 阳岳希,贺之渊,周杨,等. 厦门±320 kV柔性直流输电工程的控制方式和运行性能[J]. 智能电网,2016,4(3):229-234.
Yang Yuexi, He Zhiyuan, Zhou Yang, et al. Control mode and operating performance of Xiamen ±320 kV VSC-HVDC project [J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 229-234.
- [5] 魏伟,许树楷,李岩,等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J]. 南方电网技术,2015,9(1):73-77.
Wei Wei, Xu Shukai, Li Yan, et al. The system commissioning of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 73-77.
- [6] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术,2014,40(8):2490-2496.
Li Yanan, Jiang Weiyong, Yu Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.
- [7] 李英彪,卜广全,王姗姗,等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3391-3399.
Li Yingbiao, Bu Guangquan, Wang Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage caused by DC short-circuit fault in Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3391-3399.
- [8] Ritwik Majumder, Soubhik Auddy, Bertil Berggren, et al. An alternative method to build DC switchyard with hybrid DC breaker for DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 713-722.
- [9] 王威儒,贺之渊,李国庆,等. 一种电感耦合型高压直流限流断路器[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1731-1740.
Wang Weiru, He Zhiyuan, Li Guoqing, et al. An inductively coupled HVDC current limiting circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1731-1740.
- [10] 黄越,李凤婷,易鹏,等. 应用附加电容的柔性直流输电线路

(下转第57页)

- 2777-2786.
- [15] 韩赛赛,刘宝柱,艾欣,等.考虑绝缘老化和油色谱监测数据的变压器动态故障率模型[J].电网技术,2018,42(10):3275-3281.
Han Saisai, Liu Baozhu, Ai Xin, *et al.* Dynamic failure rate model for transformer considering insulation aging and oil chromatographic monitoring data[J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3275-3281.
- [16] Li Z, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, *et al.* Analyzing locally coordinated cyber-physical attacks for undetectable line outages[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 35-47.
- [17] Ma S, Chen B, Wang Z, *et al.* Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [18] 杨晨曦,高立艾,唐巍.基于贝叶斯网络时序模拟的气电耦合系统可靠性评估[J].电气传动,2021,51(11):75-80.
Yang Chenxi, Gao Li'ai, Tang Wei. Reliability evaluation of gas-electric coupling system based on bayesian network time series simulation[J]. Electric Drive, 2021, 51(11): 75-80.
- [19] 蔚德申,王景芹,王丽.低压成套开关设备的寿命预测[J].电气传动,2018,48(5):74-80.
Yu Deshen, Wang Jingqin, Wang Li. Life prediction of the low-voltage switchgear[J]. Electric Drive, 2018, 48(5): 74-80.
- [20] 王艳玲,梁立凯,韩学山,等.计及动态热定值的配电网可靠性分析[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1410-1416.
Wang Yanling, Liang Likai, Han Xueshan, *et al.* Distribution network reliability analysis considering dynamic thermal rating [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1410-1416.
- [21] 杨晓辉,尹玉君,寇晓适.基于风险评估的特高压受端电网输电设备检修策略研究[J].电力工程技术,2017,36(2):72-75,93.
Yang Xiaohui, Yin Yujun, Kou Xiaoshi. Research on the maintenance strategy of UHV receiving end power grid transmission equipment based on risk assessment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 72-75, 93.
- 收稿日期:2021-07-16
修改稿日期:2021-08-30
- *****
- (上接第49页)
- 自适应重合闸策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):30-36.
Huang Yue, Li Fengting, Yi Peng, *et al.* Adaptive reclosure scheme of MMC-HVDC transmission lines using additional capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23):30-36.
- [11] 李岩,龚雁峰.柔性直流电网重合闸过电流和过电压抑制[J].电力系统自动化,2019,43(5):107-113.
Li Yan, Gong Yanfeng. Suppression of reclosing overcurrent and overvoltage of flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 107-113.
- [12] 刘天琪,舒稷,王顺亮.基于混合式直流断路器的柔性直流电网快速重合闸策略[J].高电压技术,2020,46(8):2635-2642.
Liu Tianqi, Shu Ji, Wang Shunliang. Fast reclosing scheme for VSC-HVDC system based on hybrid DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2635-2642.
- [13] 宋国兵,王婷,张晨浩,等.利用全桥MMC注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J].电网技术,2019,43(1):149-156.
Song Guobing, Wang Ting, Zhang Chenhao, *et al.* Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injection with FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 149-156.
- [14] 薛士敏,廉杰,齐金龙,等.MMC-HVDC故障暂态特性及自适应重合闸技术[J].电网技术,2018,42(12):4015-4021.
Xue Shimin, Lian Jie, Qi Jinlong, *et al.* Fault transient characteristic and adaptive reclosing technique of MMC-HVDC network [J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4015-4021.
- [15] 辛业春,王威儒,李国庆,等.多端柔性直流输电系统数字物理混合仿真技术[J].电网技术,2018,42(12):3904-3909.
Xin Yechun, Wang Weiru, Li Guoqing, *et al.* Power hardware-in-loop simulation for MMC-MTDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3904-3909.
- [16] 王亮,王子才,张华,等.高压固态断路器设备均压技术研究[J].电气传动,2019,49(2):74-78.
Wang Liang, Wang Zicai, Zhang Hua, *et al.* Research on key technology of voltage balanced based on high-voltage solid-state breaker [J]. Electric Drive, 2019, 49(2): 74-78.
- [17] 贺之渊,王威儒,谷怀广,等.兼备故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3402-3417.
He Zhiyuan, Wang Weiru, Gu Huaiguang, *et al.* Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3402-3417.
- 收稿日期:2021-01-05
修改稿日期:2021-03-24