

多端柔性直流电网保护关键技术

李 斌¹, 何佳伟¹, 冯亚东², 李 晔¹, 李 钢², 邱 宏¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211102)

摘要: 多端柔性直流电网直流故障后故障电流快速上升、无自然过零点等特点使得直流线路保护和故障处理技术成为柔性直流电网发展的关键技术难点。理论分析了多端柔性直流电网线路保护的的特殊性, 借鉴传统直流输电线路保护原理和点对点式柔性直流输电线路保护原理的研究现状, 对多端柔性直流电网线路保护的发展方向进行了探讨。同时, 全面分析了各类直流故障隔离方法的基本原理, 从故障隔离能力、经济性、控制保护耦合影响等多个方面阐述了其进一步的发展趋势。最后, 考虑到架空线路输电的应用前景, 设计提出了一种适用于点对点式柔性直流输电系统、具有低电流危害的新型故障重合闸判断方法, 较现有重合闸策略而言, 该方法重合于永久性故障时能够彻底避免对系统的二次过电流冲击。在此基础上, 讨论了多端柔性直流电网对重合闸策略的性能要求。

关键词: 多端柔性直流电网; 直流线路保护; 直流故障隔离; 重合闸策略

0 引言

在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》指导下, 国内在“大容量远距离直流输电和特高压交流输电”的技术和工程应用领域取得了突破性进展, 为国内能源资源的优化配置发挥了重要作用^[1-2]。然而, 基于传统电网换相换流器(LCC)的直流输电技术存在换相失败、需要吸收大量无功功率、无法向无源网络供电等缺点^[3]。

随着全控型开关器件的出现与成熟, 以电压源型换流器(VSC)为核心部件的柔性直流技术成为直流输电领域重要的发展方向^[4-6]; 从负荷需求和电源分布考虑, 实现多电源供电及多落点受电的柔性直流电网是电网发展的必然趋势^[7]; 从建设成本和经济性考虑, 多端柔性直流输电系统显然比并行多条点对点式直流输电线路更加有利于节约线路走廊, 降低投资和减小运行费用^[8]; 从电网供电可靠性和运行灵活性考虑, 多端直流电网可以提供更好的供电可靠性和系统冗余性, 以及适应性更强的供电模式、灵活和安全的潮流控制等^[6]; 从新能源自身间歇性和分散性的特点考虑, 多端柔性直流电网可以有效改善新能源对电网安全稳定运行的影响^[9]。

因此, 基于柔性直流技术的直流电网被认为能够带来未来电力系统发展的一次重要革命。直流电网是由大量直流端以直流形式互联组成的能量传输系统, 可以实现新能源的平滑接入、全局功率的调节互济、长距离大范围电能传输^[10]。在大规模分布式可再生能源接入、海洋群岛供电、海上风电场群集中送出、新型城市电网构建等方面, 直流电网被认为是最理想的组网方案, 也是未来智能电网发展的重要方向之一。

柔性直流电网的发展尚面临若干关键技术问题亟待解决。其中, 有别于传统交流电网和常规高压直流输电系统, 多端柔性直流电网特殊的故障暂态特征、复杂快速的换流器故障控制以及直流断路器等一次设备的性能制约对其继电保护赋予了新的挑战 and 任务。

1 柔性直流系统故障暂态特征

柔性直流系统直流故障暂态特征是直流保护研究的理论基础。而基于不同类型换流器的柔性直流系统故障特性存在明显的差异, 相应地对保护的要求也有所不同。针对目前最为典型的两种换流器拓扑结构, 该小节分别总结关键故障特征, 并分析各自对保护的要求。

1.1 两电平 VSC 型直流系统故障特征

两极短路故障是柔性直流系统中最为严重的故障类型。两电平 VSC 型直流系统的两极短路故障

收稿日期: 2016-06-01; 修回日期: 2016-08-08。

上网日期: 2016-09-05。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050101)。

仿真结果(仿真参数见附录 A 表 A1)如附录 A 图 A1 所示。

根据故障暂态发展过程,可以分成四个阶段^[11-13]。故障初期(t_1 至 t_2),直流故障电流主要由电容放电供给,交流侧仅为交流电抗续流。该阶段内直流电流快速上升,直流电压快速下降。随着直流电压下降, t_2 时刻以后,交流电压开始大于直流电压,因此交流侧电源开始馈入故障电流,但该阶段直流故障电流仍然主要由电容放电供给。至 t_3 时刻,电容电压下降到零,换流器内部所有续流二极管在短路电抗反电动势作用下同时导通。此时直流故障电流逐渐衰减;交流侧相当于三相短路,快速过流;换流器桥臂同时承受直流故障电流和交流三相短路电流的冲击,急剧过流。最后,故障过程将进入不控整流稳态阶段。

总结而言,两极短路故障以后,直流侧将承受电容放电产生的快速过流。而且由于直流电容直接并联于换流器直流出口,电容放电、故障电流上升均不受换流器动作控制,必须由保护快速动作于直流断路器切除故障。

而从保护交流侧设备和换流器角度出发,由于一旦直流电压过零,交流侧和换流器桥臂就会快速过流,因此希望保护能够在直流电压过零以前实现故障检测、故障识别(故障区段定位)以及故障隔离全套动作。本文仿真算例中故障发生至电压过零这一过程持续时间为 10 ms 左右,随着电压容量等级、线路参数、故障距离等参数的变化,该持续时间会有所不同,但总体而言在几毫秒至 10 ms 左右,因此对保护动作速度要求极高。

此外,从全网运行可靠性以及故障后的系统快速恢复考虑,电压跌落到零意味着系统的完全崩溃,且故障消失后需要长时间的恢复过程,事实上柔性直流电网对保护的動作速度要求将进一步提高;而且两电平 VSC 故障电流上升速度快且不受控的问题在柔性直流电网中将会由于多站叠加而加剧,因此在多端柔性直流电网中的应用存在一定的局限性。

1.2 MMC 型直流系统故障特征

随着直流电网电压等级、系统容量的逐渐提高,基于子模块级联的模块化多电平换流器(MMC)在器件均压、谐波抑制、故障电流限制等方面的技术优势开始凸显^[14]。MMC 型直流系统两极短路故障仿真结果(相应的系统仿真参数见附录 A 表 A2)如附录 A 图 A2 所示^[15-16]。故障发生以后,处于投入状态的子模块电容经换流器桥臂向故障点放电,因此直流电流和桥臂电流快速上升,直流电压快速下降。

过流、欠压判据检测到故障发生以后立即闭锁换流站(t_2 以后),子模块电容被旁路。换流站闭锁后初期阶段,直流电流主要由桥臂电抗续流提供,逐渐衰减。此时,在桥臂电抗续电流作用下,续流二极管对交流电源不体现单向导通性。因此,对交流侧电源而言,换流器是一个三相对称支路,相当于在换流器处发生三相短路,交流侧出现过电流^[15-16]。桥臂电流则是电抗器续电流和交流三相短路电流之和。最后,与两电平 VSC 型直流系统类似,故障稳态过程将进入不控整流运行状态。

MMC 型直流系统发生故障后,直流故障过电流峰值大小主要由换流器闭锁时刻决定,因此故障后换流器的快速闭锁能够有利于降低故障过电流水平,并减小故障隔离的难度。目前,实际工程中能够做到直流故障以后 1~2 ms 甚至几百微秒级的快速故障检测、闭锁,有效避免了子模块电容的大幅度放电,有利于系统快速恢复,同时有效限制了直流线路故障电流。但是,闭锁以后系统仍将承受不控整流形式的过电流危害,因此需要后续保护快速切除故障。

与两电平 VSC 相比,MMC 直流故障后过流水平、电容放电均受控,从系统安全性和快速恢复等角度考虑更适合于构建多端柔性直流电网。但是,有别于点对点式直流系统,构建直流电网以后,为了保证系统的供电可靠性,直流故障以后并不希望换流站快速闭锁。因此,通过故障限流等措施提高直流电网的故障穿越能力将是理论与工程应用的关键点之一。

目前国内外关于柔性直流系统故障暂态特征的研究工作多集中于对换流站的故障出力分析,而随着未来新能源发电的大规模接入,需重点考虑光伏、风机等间歇性电源对故障出力的影响;此外,计及诸如故障限流、故障清除等故障穿越控制策略的多端柔性直流电网故障演化过程及暂态特征同样值得关注。

2 多端柔性直流电网线路保护

直流故障发生后可靠识别故障区间,保证剩余网络的正常运行是保障柔性直流电网供电可靠性的关键技术。相较于传统交流系统保护,柔性直流电网保护选择性的实现难度大大提高,是柔性直流电网继电保护的核心技术难点之一。

2.1 传统保护原理在柔性直流系统中的适用性

过电流保护依靠保护的動作时间级差和可靠的断路器跳闸实现保护动作的选择性,柔性直流电网中相邻直流线路保护动作的低离散性和直流断路器

自身性能不完善的现状使得电流保护难以实现保护的选择性^[17]。因此虽然现有柔性直流系统工程中一般配置过电流保护^[18],但与传统交流系统中电流保护能够同时兼顾保护四性要求不同,其在柔性直流线路保护中一般只能起到故障检测作用。

距离保护应用于柔性直流系统时面临的关键问题在于快速而精确的阻抗测量。文献[19]等对快速距离保护算法进行了研究,由于应用场合多为交流系统,因此阻抗计算往往需要较长的数据窗(如 1/2 工频周期)。文献[20]探讨了最小二乘算法对提高距离保护阻抗测量精度的作用,文献[21]将该方法应用于变频系统的阻抗测量,可以扩展为直流输电线路的距离保护。但为了保证计算精度,基于最小二乘的阻抗计算方法仍然需要约 10 ms 甚至更大的数据窗,不满足柔性直流电网对保护动作速度的要求。

电流差动保护从原理上能够实现直流线路的故障识别(故障区段定位),因此目前实际柔直工程中一般配置线路差动保护实现故障的可靠识别^[18]。但由于容易受到线路分布电容电流的影响,需要通过延时来防止误动,其动作速动性很难被柔性直流电网接受^[22]。基于贝瑞隆线路模型、频变参数模型的电流差动保护原理能够消除分布电容电流的影响,但是会导致算法复杂度的增加,此外数据同步、通道延时等问题亦会对硬件成本、保护动作速度产生不利影响^[23],在直流系统中一般只作为后备保护^[24]。而且,结合 MMC 型直流系统故障特性可知,通过接地方式的合理配置,直流电网发生单极接地故障时并不会出现明显的故障电流^[18]。因此,电流差动保护在单极接地故障时很难检测到差流,无法可靠动作。

总体而言,传统保护原理很难满足柔性直流电网对保护速动性、选择性的要求。亟须研究适用于柔性直流电网的线路保护新原理。

2.2 常规高压直流输电线路保护原理的借鉴与思考

常规高压直流输电线路采用行波保护、微分欠压保护作为直流线路主保护,具有较好的运行经验,但存在定值整定困难、高阻故障灵敏性差等固有缺陷^[25]。文献[26]利用高压直流系统换流站出口装设的平波电抗器、直流滤波器等元件对高频分量的阻隔作用,提出了一种基于边界高频能量差异特性的单端量线路保护方案,实现区内外故障的可靠区分。文献[27]利用平波电抗器对区外故障时高频电流分量的阻滞作用,通过滤波器中流经的高频电流大小来区分区内外故障。文献[28]利用直流滤波器

对特定次谐波的吸收作用,通过识别特定次谐波的存在与否判断区内外故障。文献[29]通过比较边界元件两侧暂态能量比值提出高压直流系统线路纵联保护方案。总结而言,高压直流输电系统中,利用如图 1(a)所示的平波电抗器、直流滤波器等边界元件导致的区内外故障暂态特征差异作为区内外故障可靠识别的根本依据,能够构造满足选择性要求的保护原理。该思想亦可应用于点对点式的柔性直流系统。

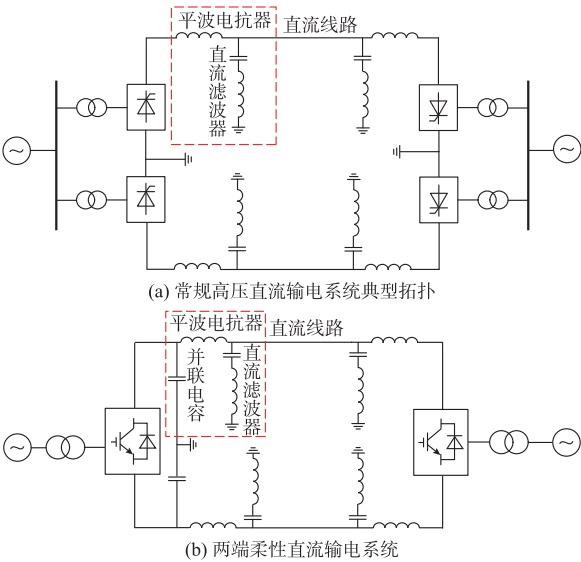


图 1 常规高压直流输电系统与
柔性直流输电系统典型拓扑结构
Fig.1 Typical topologies of LCC-based and VSC-based
high voltage direct current transmission systems

例如,针对如图 1(b)所示的两端柔性直流输电系统,文献[30]利用两电平式 VSC 直流侧存在的并联大电容对高频暂态电流的吸收作用,通过高低频电流的幅值比来实现柔性直流输电线路区内外故障的识别。借鉴文献[28]的思想,文献[31]通过对特定次谐波的识别,进行区内外故障的区分。文献[32]以换流器作为边界元件,通过小波变换提取区内外故障的小波熵差异实现故障识别。

2.3 多端柔性直流电网线路保护的的特殊性与研究展望

传统直流输电并未构成电网运行,保护原理及配置方法远不能满足多端柔性直流电网对保护性能的要求。目前柔性直流线路保护原理的研究大多是针对两电平式 VSC 型、点对点式柔性直流输电线路,真正意义上的多端柔性直流电网线路保护原理研究仍面临诸多难点。

1)换流器类型对保护的影响

MMC 以其低开关频率与损耗、高输出电能质

量、灵活调制控制、故障电流限制等优良性能成为柔性直流电网发展的主流趋势。与传统直流和两电平 VSC 相比,MMC 型柔性直流输电系统不仅在换流器设备和控制技术方面有所不同,而且也不再需要滤波器、直流侧大电容等元件,这一特点使得可供保护识别的边界元件及其特性大大减少,边界保护思想在 MMC 型直流系统中的适用性有待进一步分析论证。

而且与两电平 VSC 不同,直流侧并联大电容被 MMC 的模块化电容级联所取代,柔性直流系统发生故障时直流线路、故障支路与换流器形成独特的故障回路,因此基于 MMC 的柔性直流系统故障过程及其暂态特征明显不同,目前常规直流线路、两电平 VSC 型直流线路保护方法在柔性直流电网中的适用性需要进一步分析验证。此外,MMC 型柔性直流系统中直流故障处理与线路保护动作在时间尺度上高度耦合,一次设备与直流电网保护等二次设备在故障处理方面的任务分解与相互协调需要加以明确。

2)多端柔性直流电网线路保护的独特性

新能源发电的大规模集中接入、区域电网的互联等实际需求使得多端柔性直流电网成为未来电力系统的发展趋势之一^[33]。理论研究 with 工程示范的实施逐步明确了柔性直流电网的发展方向:早期的多端柔性直流系统是以换流器为线路两端边界设备,在交流母线形成互联^[18,33]。这种方式仍然是点对点的结构形式,控制保护难度相对较低。针对线路保护,仍可借鉴上文中提及的边界保护思想实现故障的可靠识别。

然而,点对点式的多端直流供电可靠性较低、投资成本很大,因此真正的多端直流电网将是如图 2 所示的、直流线路直接在直流场经直流母线互联、一点对多点的拓扑结构形式。且为提高供电可靠性,一般会存在网孔结构^[18]。该拓扑结构有利于降低投资成本、提高系统供电可靠性,是未来多端柔性直流电网的发展趋势。

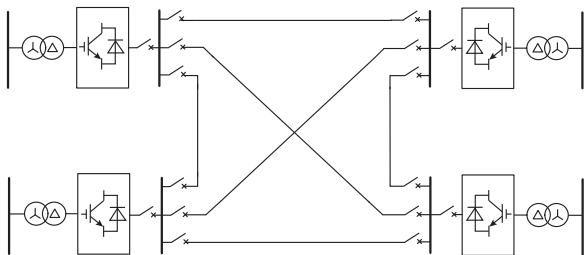


图 2 多端柔性直流电网

Fig.2 Multi-terminal flexible direct current grid

但是,图 2 所示的多端柔性直流电网拓扑形式将会导致线路保护难度大大增加。由于直流线路直接在直流场互连,而结合现有工程实际可知直流电抗器等一次设备一般装设于换流站出口^[34],这一特点导致直流线路之间不再存在任何边界元件。因此,点对点式直流系统中的边界保护思想在多端柔性直流电网中只能区分交、直流场的故障,而无法实现相邻线路故障的可靠识别。

3)多端柔性直流电网线路保护的研究展望

多端柔性直流电网“一点对多点”的结构特点使得线路保护难度大大增加。因此,结合工程实际,可以考虑通过一次设备装设方式的调整来构造线路边界。例如,文献[35]提出在每条线路两端安装直流电抗器,利用电抗器构成的边界,基于单端量实现区内外故障的快速可靠区分。事实上,在线路两端安装直流电抗器将有利于降低故障过电流危害、加强系统的故障生存能力^[36],是一种可行的研究思路,但是电抗器数量的增加对系统控制响应速度和稳定性的影响也必须加以考虑。

此外,针对常规高压直流输电系统,文献[37]提出的基于无功功率的方向纵联保护思想无需依赖线路边界,而且也无需数据同步,对硬件要求较低。尽管其动作速度无法满足柔性直流电网的要求,但是为多端柔性直流电网线路保护提供了一个研究方向;可以通过构造快速的方向判据,利用方向纵联实现故障的可靠识别。这一思想的关键在于寻求一种满足直流电网动作速度要求的快速故障方向判断方法。虽然其仍然受限于通道延时,但此类方法无需数据同步,不失为一种理想的后备保护方案。

3 直流故障隔离技术

直流故障情况下的系统生存能力是决定多端柔性直流电网运行可靠性的关键指标。尤其是在架空线构成的柔性直流电网中发生故障不可避免。目前工程实际中基于交流断路器跳闸的直流故障隔离方法在供电可靠性、动作速度等方面远远无法满足柔性直流电网的要求^[38]。因此研究快速的故障隔离方法是柔性直流电网发展的另一核心问题。根据故障隔离的核心设备区分,适用于柔性直流电网的故障隔离方法主要可以分成直流断路器隔离和换流器自清除两种类型^[39]。

3.1 直流断路器技术

1)直流断路器研究现状

从提高直流电网供电可靠性的角度而言,利用直流断路器进行故障隔离能够实现最小范围、有选择性的故障切除,是最理想的直流故障隔离手段。

从技术角度出发,直流断路器主要可以分成三种类型:机械式断路器、固态断路器和混合式断路器^[40-45]。机械式断路器电流分断能力有限,且动作速度较慢;固态断路器切除容量和动作速度较机械式断路器而言有明显提升,但是大量电力电子器件串联导致通态损耗过大;混合式断路器结合固态断路器和机械式断路器的优点,在保证动作速度和切除容量的前提下,通态损耗大为减小,是最具前景的直流断路器类型^[43]。

如图 3(a)所示是一种由 ABB 公司提出的典型混合式直流断路器拓扑结构^[46-47]。正常运行时,由于旁路支路通态电阻远小于主断路器,因此负荷电流主要流经旁路支路,进而有效降低通态损耗。故障发生以后,由电力电子器件组成的辅助断路器由于断路器内设的过电流判据而立即跳开,将故障电流转移至主断路器,如图 3(b)中由蓝色曲线转至红色曲线所示;此后跳开快速隔离开关,消除后续动作中可能横跨于辅助断路器上的过电压;快速隔离开关断开后,当断路器接收到外部跳闸信号后立即跳开主断路器,避雷器动作,在保护电力电子器件的同时快速消耗故障能量,如图 3(b)红色曲线所示;最后很小的残余电流就可以由一个小容量直流断路器进行切除。该断路器应用于 320 kV 直流系统能够在 5 ms 之内快速分断 9 kA 故障电流,是目前已公开的最大电压等级、最高容量的混合式直流断路器^[43]。

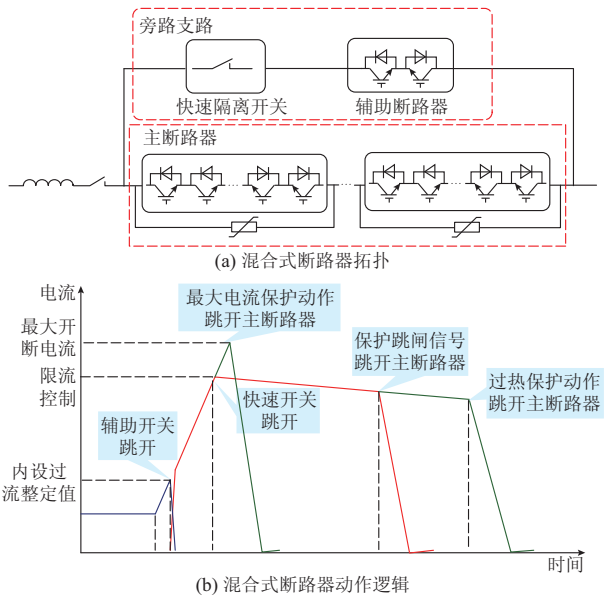


图 3 混合式直流断路器
Fig.3 Hybrid direct current circuit breaker

2)直流断路器相关技术发展趋势

整体上而言,由于直流故障时故障电流无自然

过零点,导致直流断路器动作时存在熄弧困难的问题,因此具有快速分断较大故障电流能力的高压直流断路器尚未完全成熟。根据 2013 年国际大电网工作组向 Siemens,ABB 和 ALSTOM 等研发单位进行的关于直流断路器研发情况的调研结果可知,分别需要大约 10 年和 15 年左右的时间才能完成对 500 kV 和 800 kV 的直流断路器的研制工作^[42]。鉴于直流断路器的发展瓶颈,通过相关技术的配合降低对直流断路器动作速度和切除容量的要求,成为直流故障隔离的关键和趋势。

在直流电网中装设限流设备降低故障电流上升速度和过电流水平能够有效降低对直流断路器的动作速度和切除容量要求。例如舟山五端柔性直流输电工程中在每个换流站出口均会装设一个 20 mH 左右的直流电抗器,其本质上讲就是一个故障限流器。但是,考虑到系统稳定性、动态响应速度等因素,直流电网中无法装设限流阻抗过大的限流电抗器,限流能力有限。

超导限流器由于在正常运行时不体现阻抗值,对系统无影响;而在故障后能够快速失超,有效限制故障电流,具有很好的应用前景。文献[11,48]分析了电阻型超导限流器在两电平 VSC 型直流配电网中的适用性,但其也指出,由于在投资成本、设备体积、均匀失超等方面的问题,超导限流器在高压大容量系统中的应用有待于进一步研究。而且柔性直流电网中故障保护、处理各个环节在时间尺度上高度耦合,必须研究超导限流器与直流断路器之间的相互影响,实现高效配合。

此外,由如图 3(b)所示的混合式直流断路器工作逻辑可知,虽然主断路器在接收到保护的跳闸信号以后才实施跳闸动作,但是如果其在故障电流到达最大切除电流或避雷器过热保护动作之前未接收到保护跳闸信号,断路器也会快速跳开主断路器^[46],如图 3(b)中绿色曲线所示。因此,若线路保护无法快速识别故障、确定跳闸断路器,非故障线路上的断路器就会因为故障电流到达最大切除电流或避雷器过热保护动作而误跳闸,此时就无法再实现故障的选择性切除,对多端柔性直流电网的供电可靠性产生不利影响。因此不同于交流系统中保护与断路器工作相互独立的传统思想,多端柔性直流电网中必须考虑保护与直流断路器之间的相互影响与需求。

3.2 换流器自清除型隔离技术

基于换流器自清除的柔性直流系统直流故障隔离方法具有无需机械开关动作、系统恢复速度快等优点^[49]。根据故障隔离机理的不同,主要可以分成

两种方法;第一种方法通过对换流器子模块拓扑结构的改进,利用二极管的单向导通性,将子模块电容电压反极性投入到故障电流通路径中,从而实现直流故障电流的快速清除和交流源的阻断^[50],本文将其定义为“电容电压钳位型”隔离方法;第二种方法在直流故障后人为构造交流系统三相对称短路回路,从而将直流故障转化成交流故障,实现直流故障点与交流系统的隔离,使直流线路的故障电流能够自然衰减到零^[51-53],本文将其定义为“故障转移型”隔离方法。

1)“电容电压钳位型”隔离原理与发展趋势

“电容电压钳位型”隔离方法包含的各种具体实现方式在拓扑结构和控制策略上有所差异:以桥臂交替导通多电平换流器(AAMC)和混合级联多电平换流器(HCMC)为代表的拓扑结构通过导通开关和整形电路的协调配合实现稳态控制目标^[54-55];以全桥子模块、钳位双子模块等为代表的拓扑结构则可完全复制传统半桥子模块式 MMC 的控制策略,只需对调制方式略作调制,工程应用技术条件更加成熟^[56-60]。

以全桥子模块型 MMC 为例,该类型故障隔离方法在发生直流故障后闭锁所有子模块,由于二极管的单向导通性使得子模块电容电压反极性投入到故障电流通路径中。这就使得:①故障电流向电容充电,从而快速清除直流线路故障电流,如图 4(a)所示,图中浅色部分表示无电流流通,下同;②反向闭锁交流侧电源向故障点馈入故障电流。为实现交流源的完全阻断,投入的反极性电容电压必须大于交流侧线电压幅值,从而防止出现如图 4(b)所示的交流源馈流现象。

相较于传统半桥式 MMC 而言,投资成本是其工程实际应用的一大阻力^[61-62]。文献[63-66]提出混合式 MMC 的思想,在保证直流故障隔离能力的前提下能够有效降低投资成本和功率损耗。但是目前混合式拓扑结构中各类子模块数量的配置原则尚不明确。需综合考虑故障彻底抑制、低电压过调制运行等因素设计合理的子模块数量混合配置原则^[66]。

2)“故障转移型”隔离原理与发展趋势

“故障转移型”隔离方法以文献[52-53]提出的双晶闸管法(DTSS)为典型代表,如图 5 所示。该方法由工程实际中应用的单晶闸管法(STSS)演化而来。在发生直流故障后利用并联在每个子模块上的一组反并联晶闸管构造交流三相对称短路,直流故障电流失去交流侧馈流后能够实现自然衰减,直至故障清除。

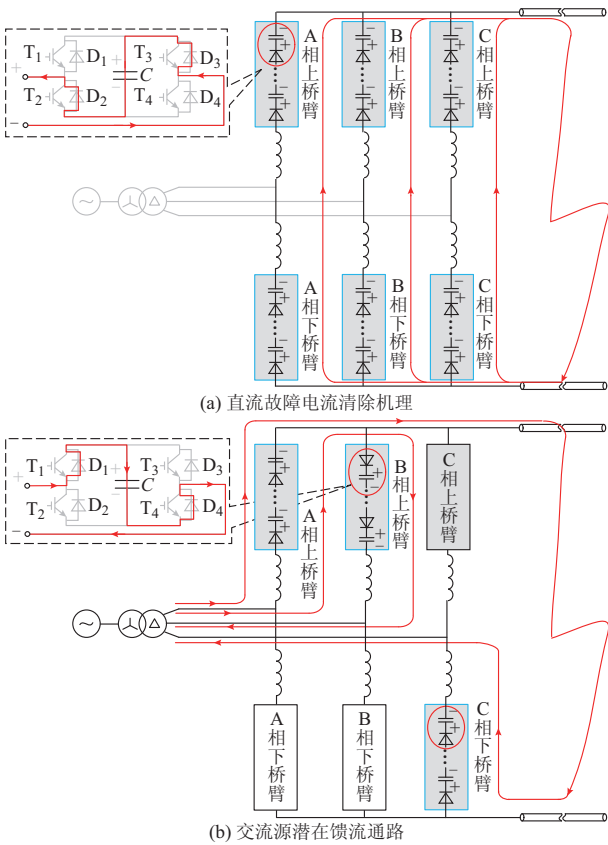


图 4 全桥子模块型 MMC 故障隔离机理
Fig.4 Fault isolating principle of full-bridge sub-module based MMC

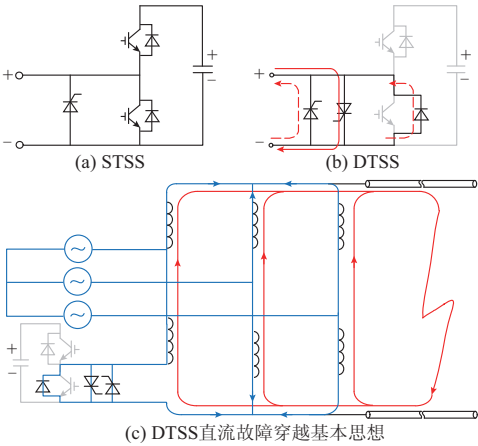


图 5 DTSS 故障隔离原理
Fig.5 Fault isolating principle of DTSS

考虑到现有 MMC 型柔性直流系统工程中一般采用 STSS 保护续流二极管过流,因此在应用 DTSS 实现直流故障清除时只需在现有基础上对每个子模块增加一个晶闸管。这一特点使其与“电容电压钳位型”隔离方法相比,在工程实际应用中具有较为明显的经济性优势^[52]。然而,DTSS 应用于工程实际时仍存在一定的问題亟须解决。

从交流侧看,如图 5(c)蓝线所示,直流故障电流清除期间交流系统处于三相短路状态,在直流故障无法快速切除的情况下可能导致交流保护误动作。从直流侧看,如图 5(c)红线所示,直流线路故障电流仅依靠线路自身电阻实现缓慢衰减,线路近端金属性故障情况下故障电流持续时间可能很长,导致隔离速度不能满足要求。从换流器角度看,DTSS 在直流故障清除以后通过移除所有晶闸管门信号实现对所构造的三相交流短路故障的清除。但是,由于故障以后各相桥臂之间会出现环流,在桥臂电抗直流偏置作用下,可能造成桥臂电流长期不过零,进而导致晶闸管关断失败。显然,这将使得交流侧故障长期存在,导致交流侧保护误动,且对直流电网剩余网络的快速恢复造成不利影响。针对上述问题,文献[67]通过增设阻尼模块进行了有效的解决,但具体阻尼电阻选值等问题尚需结合工程实际进行进一步优化。

总体而言,基于换流器自清除的故障隔离方法能够实现毫秒级的直流故障快速隔离,就动作速度而言能够满足柔性直流系统要求。在点对点式柔性直流系统中,由于仅需故障线路两端换流站动作即可实现故障清除,因此具有较好的适用性。但是上述方法在应用于多端柔性直流电网(直流线路在直流场内直接互连)时均会面临全网短暂停电的问题,对电网供电可靠性及互联交流系统稳定性的影响有待进一步评估、研究。

4 架空线柔性直流输电的故障重合闸策略

由于直流故障隔离技术尚不成熟,为降低故障率,目前柔性直流输电工程均基于直流电缆输电。但是,为降低投资成本、提高输电容量,基于架空线路输电将成为下一代柔性直流技术发展的核心问题^[68]。架空线路输电场景下,直流故障发生概率大大提高,基于换流器自清除的故障隔离技术能够实现故障电流的快速清除,因此具有很好的应用前景。但是,考虑到架空线路瞬时性故障概率较大,必须配置有效的故障重合闸方法用以判断故障性质。

在点对点式架空线柔性直流输电系统中,具备故障自清除能力的 MMC 具有很好的适用性。以全桥子模块型 MMC 系统为例,直流故障发生以后可以通过闭锁换流站实现故障电流的快速清除,无需依赖直流断路器。

在上述应用场景下,目前采取的故障重合闸方法主要是在清除故障电流、并保持换流站闭锁状态

一段时间以后(保证故障线路充分去游离,恢复绝缘性能一般为一百到几百毫秒),在零功率模式下解锁换流站,通过判断是否能够建立直流电压实现对故障点存在与否的判读^[14,69]。然而,这种方法以电压建立与否作为判据,若重合于永久性故障,会由于电容二次放电而快速过流,对系统造成二次危害^[70]。

针对点对点式柔性直流输电系统,本文提出一种具有低电流危害的新型重合闸方法。通过开通全桥子模块中的 T_1 或 T_4 ,同时闭锁子模块中的其他所有绝缘栅双极型晶体管(IGBT),可以使其运行状态与全闭锁的半桥子模块完全相同,本文将全桥子模块的该种运行状态命名为类半桥闭锁模式,如附录 A 图 A3(a)(b)所示。将全桥子模块型 MMC 内所有全桥子模块投入到类半桥闭锁模式,即可构造换流器的不控整流运行方式,如附录 A 图 A3(c)所示。

本文提出的重合闸方法在利用换流器清除直流故障电流并经历一段时间的去游离过程后,将换流器运行于不控整流桥方式。若故障仍然存在,交流侧电源将立即向故障点以不控整流运行方式馈入故障电流;相反如果故障已经消失,那么交流侧电源将无法形成馈流通路,因此直流线路上不会出现电流。所以,可以通过判断直流线路是否再次出现电流来判断故障是否已经消失;若直流线路不再出现电流,则故障已经消失,为瞬时性故障,可重启换流站;若再次出现电流,则故障仍然存在,判定为永久性故障,立即重新闭锁换流站。相应的重合闸判断逻辑如附录 A 图 A4 所示。

与传统直接解锁换流器,基于电压建立与否的重合闸方法相比,这种方法在重合于永久性故障时避免了电容放电,有效降低了二次过流上升速度;而且由于只需判断电流存在与否,因此可以在很小的线路电流情况下快速重新闭锁换流器,能够彻底避免重合闸对系统造成的二次过流冲击。同时,对于半桥 MMC 型直流系统,本文所设计的方法同样具有适用性。半桥 MMC 自身不具备故障清除能力,需要配置直流断路器实现故障隔离。直流故障发生后快速闭锁换流站防止故障危害加剧,然后利用直流断路器切除故障。此后,经过一段时间的去游离过程以后重合直流断路器。此时半桥 MMC 换流站仍处于闭锁状态,就相当于不控整流器,因此通过判断电流有无同样可以实现故障性质的判断。

在多端柔性直流电网中,最理想的故障隔离方法是利用直流断路器选择性切除故障线路。即使是

通过换流器实现故障自清除,为了保证剩余网络的快速恢复运行,也需要利用直流开关在故障电流清除以后快速切除故障线路,此后立即重启换流站,恢复剩余网络的正常运行。本文所设计的方法要求重合闸判断时换流站运行于不控整流方式,应用于直流电网时会对剩余网络的持续供电造成不利影响。因此,结合直流电网的故障处理特点,研究具有故障性质预判能力、不会对剩余网络持续运行产生不利影响的自适应重合闸方法将是架空线路应用于直流电网的关键。

5 结语

针对线路保护原理和直流故障处理两大核心技术问题,本文详细介绍、分析了柔性直流系统继电保护领域的国内外研究、应用现状。结合直流故障暂态特征以及多端柔性直流电网中直流线路经直流母线直接互连的固有特性,研究分析了传统交流系统保护的适用性以及常规直流输电线路保护原理的借鉴意义,并据此探讨多端柔性直流电网线路保护的可行思路。同时,考虑故障隔离能力、投资成本、控制保护高度耦合等因素,阐述了直流故障隔离技术进一步的发展趋势。此外,由于架空线路输电故障率(尤其是瞬时性故障发生率)大大提高,本文设计提出了一种适用于点对点式直流系统、具有低电流危害的重合闸方法,能够有效降低对系统的二次过流危害;同时讨论了多端柔性直流电网中对重合闸策略的性能要求。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等.特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [2] 詹奕,尹项根.高压直流输电与特高压交流输电的比较研究[J].高电压技术,2001,27(4):44-46.
ZHAN Yi, YIN Xianggen. Comparative research on HVDC and UHV power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 44-46.
- [3] WANG Wenyuan, BAMES M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(4): 1721-1730.
- [4] OOI B T, WANG X. Voltage angle lock loop control of the boost type PWM converter for HVDC application[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1990, 5(2): 229-235.
- [5] OOI B T, WANG X. Boost type PWM HVDC transmission system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [6] LU W X, OOI B T. Multiterminal LVDC system for optimal acquisition of power in wind-farm using induction generators[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(4): 558-563.
- [7] BOULANGER A G, CHU A C, MAXX S, et al. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [8] LI Rui, XU Lie, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-360.
- [9] ACKERMANN T, ANDERSSON G, SODER L. Distributed generation: a definition[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(3): 195-204.
- [10] XUE Yinglin, XU Zheng, TANG Geng. Self-start control with grouping sequentially precharge for the C-MMC-based HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2014, 29(1): 187-198.
- [11] 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.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [12] YANG Jin, FLETCHER J E, O' REILLY J, et al. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [13] YANG Jin, FLETCHER J E, O' REILLY J, et al. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2316.
- [14] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [15] 王珊珊,周孝信,汤广福.模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过流分析[J].中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [16] 冯亚东,汪涛,卢羽,等.模块化多电平柔性直流换流器阀组本体保护的设计[J].电力系统自动化,2015,39(11):64-68.DOI: 10.7500/AEPS20141228004.
FENG Yadong, WANG Tao, LU Yu, et al. Valve protection design of modular multilevel converter for VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 64-68. DOI: 10.7500/AEPS20141228004.
- [17] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [18] 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.

SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.

[19] 徐沙能.精确匹配输电线路暂态模型的快速距离保护新原理[D].武汉:华中科技大学,2013.

[20] 张哲,陈德树.递推最小二乘法在微机距离保护中的应用研究[J].电力系统自动化,1991,15(4):31-40.

ZHANG Zhe, CHEN Deshu. Application of recursive least square algorithm in digital distance relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 15(4): 31-40.

[21] LI Bin, DUAN Zhiqian, WANG Xin, et al. Loss-of-excitation analysis and protection for pumped storage machines during starting[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 71-78.

[22] 刘剑,邵能灵,范春菊,等.柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J].电力系统自动化,2015,39(20):158-167.DOI: 10.7500/AEPS20150125002.

LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167. DOI: 10.7500/AEPS20150125002.

[23] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等.VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J].中国电机工程学报,2011,31(22): 105-111.

SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection of VSC-HVDC considering frequency-dependent principle characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.

[24] 周红阳,余江,黄佳胤,等.直流线路纵联差动保护的相关问题[J].南方电网技术,2008,2(3):17-21.

ZHOU Hongyang, YU Jiang, HUANG Jiayin, et al. Issues over DC line differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.

[25] 束洪春,刘可真,朱盛强,等.±800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J].中国电机工程学报,2010,30(31): 108-117.

SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ±800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.

[26] 张保会,张嵩,尤敏,等.高压直流线路单端暂态量保护研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(15):18-23.

ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.

[27] 宋国兵,褚旭,高淑萍,等.利用滤波器支路电流的高压直流输电线路全线速动保护[J].中国电机工程学报,2013,33(22): 120-126.

SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. A whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current of DC-filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 120-126.

[28] ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, THORP J S, et al. A transient harmonic current protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 27(4): 2278-2285.

[29] 杨亚宇,邵能灵,刘剑,等.利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5757-5767.

YANG Yayu, TAI Nengling, LIU Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.

[30] 宋国兵,冉孟兵,褚旭,等.利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J].电网技术,2014, 38(5):1042-1047.

SONG Guobing, RAN Mengbing, CHU Xu, et al. A new single-end current based whole-line quick-action protection for VSC-HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1042-1047.

[31] ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, WU Zhongyu, et al. Harmonic current protection scheme for voltage source converter-based high-voltage direct current transmission system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(9): 1509-1515.

[32] WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based fault detection approach for MMC-HVDC lines [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA: 6p.

[33] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.

TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

[34] 高强,林烨,黄立超.舟山多端柔性直流输电工程综述[J].电网与清洁能源,2015,31(2):33-38.

GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.

[35] DESCLOUX J, RAISON B, CURIS J B. Protection algorithm based on differential voltage measurement for MMC grids [C]// 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection, March 31-April 3, 2014, Copenhagen, Denmark: 5p.

[36] LI Rui, XU Lie, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-361.

[37] LUO Shuxin, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. A directional protection scheme for HVDC transmission lines based on reactive energy[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(2): 2278-2285.

[38] TANG L X, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery,

- 2007, 22(3): 1877-1884.
- [39] 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.
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [40] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [41] 刘路辉,庄劲武,江壮贤,等.混合型直流真空断路器触头技术——现状与发展[J].中国电机工程学报,2014,34(21): 3504-3511.
LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Present situation and prospect of contacts of hybrid DC vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3504-3511.
- [42] GUNNAR A, KESTIN L, CARL B, et al. HVDC grid feasibility study[R]. 2013.
- [43] 朱童,余占清,曾嵘,等.混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J].中国电机工程学报,2016,36(1):18-30.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Transient model and operation characteristics research on hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 18-30.
- [44] 魏晓光,高冲,罗湘,等.柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J].电力系统自动化,2013,37(15):95-102.
WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [45] 江道灼,张弛,郑欢,等.一种限流式混合直流断路器方案[J].电力系统自动化,2014,38(4): 65-71. DOI: 10.7500/AEPS20130624006.
JIANG Daozhuo, ZHANG Chi, ZHENG Huan, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 65-71. DOI: 10.7500/AEPS20130624006.
- [46] HAFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids[R]. 2011.
- [47] HASSANPOOR A, HAFNER J, JACOBSON B. Technical assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 30(10): 5393-5400.
- [48] LI Bin, HE Jiawei. Studies on the application of R-SFCL in the VSC-based DC distribution system[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 1-7.
- [49] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]// 8th International Conference on Power Electronics, May 30-June 3, 2011, Jeju, Korea: 7p.
- [50] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, et al. DC-side fault current management in extended multi-terminal HVDC grids [C]// 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, March 20-23, 2012, Chemnitz, Germany: 5p.
- [51] ELSEROUGI A A, ABDEL-KHALIK A A, MASSOUD A M, et al. A new protection scheme for HVDC converters against DC-side faults with current suppression capability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2014, 29(4): 1569-1577.
- [52] LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [53] 敬华兵,年晓红.新型的模块化多电平换流器子模块保护策略[J].电网技术,2013,37(7):1954-1958.
JING Huabing, NIAN Xiaohong. A novel protection strategy for sub-modules of modularized multi-level converter [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1954-1958.
- [54] MERLIN M M C, GREEN T C. The alternate arm converter: a new hybrid multilevel converter with DC-fault blocking capability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2014, 29(1): 1569-1577.
- [55] MERLIN M M C, GREEN T C, MTICHESON P D, et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C]// 9th IET International Conference on AC and DC power Transmission, October 19-21, 2010, London, UK: 5p.
- [56] 薛英林,徐政.C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J].中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.
XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-tough mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [57] LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability [C]// 39th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, November 10-13, 2013, Vienna, Austria: 7p.
- [58] 向往,林卫星,文劲宇,等.一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5171-5179.
XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-module with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5179.
- [59] 董云龙,汪楠楠,田杰,等.一种新型模块化多电平换流器[J].电力系统自动化,2016,40(1): 116-121. DOI: 10.7500/AEPS20150518016.
DONG Yunlong, WANG Nannan, TIAN Jie, et al. A novel modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 116-121. DOI: 10.7500/AEPS20150518016.
- [60] ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. The research of SM topology with DC fault tolerance in MMC-HVDC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2015, 30(3): 1561-1568.
- [61] 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.
WU Jing, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. The study

of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2681-2694.

[62] 李斌,李晔,何佳伟.具有直流故障清除能力的 MMC 子模块关键性能研究[J].中国电机工程学报,2016,36(8):2114-2122.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei. Research on the key properties of MMC sub-modules with DC fault eliminating capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2114-2122.

[63] LI Rui, FLETCHER J E, XU Lie, et al. A hybrid modular multilevel converter with novel three-level cells for DC fault blocking capability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2015, 30(4): 2017-2026.

[64] QIN Jiangchao, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2015, 30(1): 385-394.

[65] ZENG Rong, XU Lie, YAO Liangzhong, et al. Design and operation of a hybrid modular multilevel converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(3): 1377-1146.

[66] 李少华,王秀丽,李泰,等.混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1849-1858.
LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.

[67] 李斌,李晔,何佳伟.基于模块化多电平换流器的直流系统故障处理方案[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1944-1950.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei. DC fault handling scheme for the MMC-based DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1944-1950.

[68] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.

[69] 丁云芝,苏建徽,周建.基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J].电力系统自动化,2014,38(1):97-103.DOI: 10.7500/AEPS20130530010.
DING Yunzhi, SU Jianhui, ZHOU Jian. Analysis on fault current limitation and self-recovery of MMC based on clamp double sub-module[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-103. DOI: 10.7500/AEPS20130530010.

[70] 王一,刘建政.用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J].电网技术,2015,39(8):2312-2319.
WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for dc fault protection [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.

李 斌(1976—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与控制、柔性直流电网控制保护。E-mail: binli@tju.edu.cn

何佳伟(1991—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:柔性直流电网控制保护。E-mail: hejiawei_tju@126.com

冯亚东(1972—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:交直流控制保护技术、变电站一次设备智能化、柔性直流输电技术。E-mail: fengyd@nrec.com

(编辑 万志超)

Key Techniques for Protection of Multi-terminal Flexible DC Grid

LI Bin¹, HE Jiawei¹, FENG Yadong², LI Ye¹, LI Gang², QIU Hong¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;
2. NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Direct current (DC) line protection and fault handling technology are the key technical difficulties of the multi-terminal flexible DC grid due to the fault characteristics including high-speed rising of the fault current and the lack of natural zero crossing point. The particularity of the DC line protection in the multi-terminal flexible DC grid is analyzed. Considering the protection principle of the line commutated converter based DC system and the development of the protection for the point-to-point flexible DC system, this paper discusses the developing trend of the line protection for the multi-terminal flexible DC grid. Meanwhile, different kinds of the DC fault isolation are introduced, further developing direction is also discussed considering the fault isolation capability, investment and the coupling influence between the protection and control. Finally, a novel reclose strategy of the DC fault on overhead line for the point-to-point DC system is proposed, which does not lead to the second overcurrent damage during permanent faults. Afterwards, the performance requirements for the reclose strategy of the multi-terminal DC grid are discussed.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: multi-terminal flexible direct current grid; direct current line protection; direct current fault isolation; reclose strategy