

## 柔性直流输电系统新型故障重启方法

李 斌<sup>1</sup>, 何佳伟<sup>1</sup>, 李 晔<sup>1</sup>, 洪 潮<sup>2</sup>, 张 野<sup>2</sup>, 杨 健<sup>2</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510663)

**摘要:**换流器自清除技术的逐渐成熟使得基于架空线路输电成为柔性直流输电的发展趋势。架空线路输电时瞬时性故障概率较大,因此需配置有效的重启方法确定是否应该恢复系统的正常运行。传统的柔性直流输电系统重启方法因重启于永久性故障时会对系统造成二次过流、过压危害,不利于系统的安全可靠运行。提出了一种具有低电流、低电压危害的新型重启方法,在故障性质判断期间将换流器运行于不控整流方式,通过判断电流的有无,实现故障性质的判断。这种方法在重启于永久性故障时能够有效避免对系统的二次过流冲击,也不会产生二次过电压。最后,在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建了两端模块化多电平换流器型直流系统,通过仿真测试验证了所设计重启方法的可行性和优越性。

**关键词:**柔性直流输电; 架空线路; 重启策略; 故障性质判断

### 0 引言

柔性直流输电技术与传统交流输电相比,更加有利于新能源发电的大规模集中接入<sup>[1]</sup>,能够有效降低输电损耗,减少供电走廊<sup>[2]</sup>,且具备更高的供电可靠性<sup>[3]</sup>;而与传统直流输电技术相比,其在可靠换相、灵活控制、电能质量等方面优势明显<sup>[4]</sup>。因此,在电力系统领域具有极大的应用前景,尤其是基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的直流输电技术,更是由于在开关损耗、器件性能需求、谐波含量等方面的突出优势而成为近年来电力系统电力电子化进程中的一大研究、应用主题<sup>[5-6]</sup>。

目前,高压大容量直流断路器工程应用尚不成熟<sup>[7-9]</sup>,且传统基于半桥子模块(half-bridge submodule, HBSM)的MMC在直流故障以后无法实现故障电流的自清除,因此柔性直流输电工程中一般采用直流电缆代替架空线路作为输电线路以降低故障率<sup>[10]</sup>。但是,由于全桥子模块(full-bridge submodule, FBSM)、钳位双子模块(clamp double submodule, CDSM)、增强自阻型子模块(self-blocking sub-module, SBSM)等具有故障自清除能力的换流器子模块技术不断成熟<sup>[11-15]</sup>,故障难以快速清除的

技术壁垒得以解决,考虑到投资成本、输送容量等方面的优势,基于架空线路输电已成为下一代柔性直流输电技术的发展方向<sup>[16]</sup>。

架空线路发生瞬时性故障概率较大,因此需配置有效的重启方法,可靠判断故障性质,确定系统是否应该恢复正常运行。目前传统的架空线路型柔性直流输电系统故障重启方法一般是:在闭锁换流器清除故障电流并经历一段时间的去游离过程以后,重新解锁换流器,通过判断能否建立直流电压实现对故障性质的判断<sup>[10,17]</sup>。若能够建立直流电压,表明故障已经消失,为瞬时性故障,可以恢复系统的正常运行;若直流电压无法建立,则为永久性故障,应立即重新闭锁换流站<sup>[10]</sup>。这种重启方法能够可靠判断故障性质,但是重启于永久性故障时会对系统造成二次危害,不利于系统的安全、可靠运行。

以目前较为常见的伪双极直流输电系统为例,当上述重启方法重启于永久性两极短路故障时,在重启判断期间,由于子模块电容的再次投入放电,会产生对系统的二次过流冲击;当重启于永久性单极接地故障时,伪双极直流输电系统中一般不会出现明显的过电流<sup>[18]</sup>,但是却会由于定电压控制策略导致的电压偏置而产生二次过电压危害,同样不利于系统的安全运行<sup>[18]</sup>。针对上述问题,采取使换流站按逐步升压方式重启能够在一定程度上减小二次冲击。但由文献<sup>[19]</sup>可知,这种方式在重启判断时由于并不能完全避免子模块电容的投入,因此在永久性故障时仍会产生一定的二次过电流。而且,逐步

收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-05-07。

上网日期: 2017-05-12。

国家自然科学基金资助项目(51677126);中国南方电网有限责任公司重点科技项目(CSGTRC-K163001)。

升压方式下通过电压建立与否判定故障性质时的判据定值整定仍有待研究。文献[20]通过在重启判断期间调整反极性投入的电容电压值,实现了一种低电流危害的重启策略,具有很好的借鉴意义,也为如何避免重启期间的二次冲击提供了一个可行的研究思路。

本文针对具有故障自清除能力的换流器子模块拓扑结构特点,定义了子模块的类半桥闭锁状态,并由此构造换流站不控整流运行方式。在故障性质判断期间,利用换流站不控整流运行方式在故障点存在和消失两种情况下体现出的线路电流特征差异,设计了一种具有低电流、低电压危害的新型重启方法。并通过大量的仿真算例验证了所设计方法的可行性和优越性。

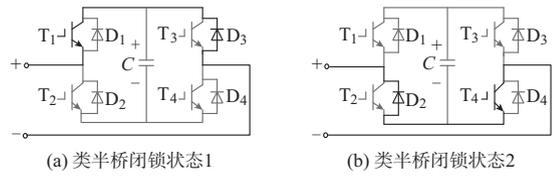
## 1 新型故障重启方法

在基于架空线路输电时,利用 FBSM 和 CDSM 等具有直流故障自清除能力的子模块构造换流器是较为理想的选择<sup>[10]</sup>。考虑到 FBSM 技术相对较为成熟<sup>[21]</sup>,本文以基于 FBSM 的 MMC(FBSM-based MMC, F-MMC)为背景,设计提出一种具有低电流、低电压危害的故障重启方法,该方法同样适用于其他具有自清除能力的 MMC。

### 1.1 F-MMC 的不控整流运行方式

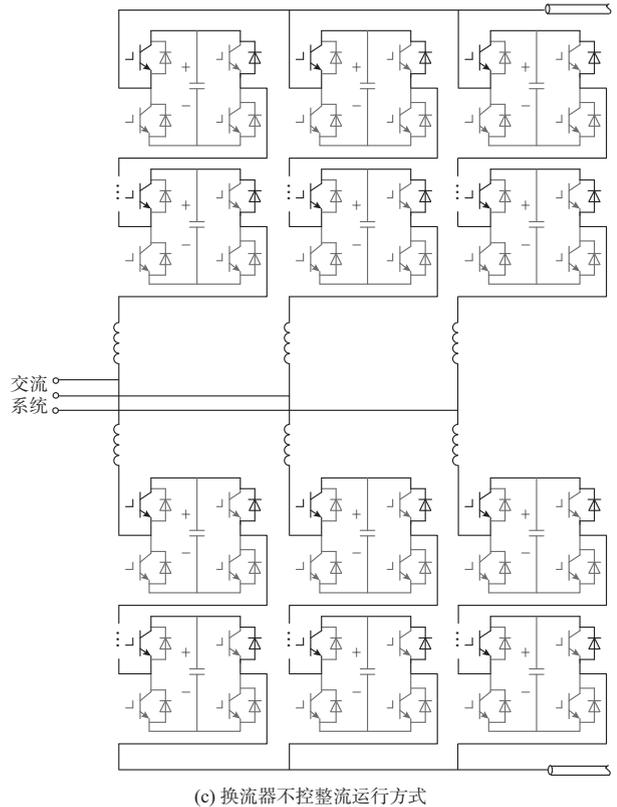
一般情况下, FBSM 有三种运行状态:投入、切除和闭锁<sup>[10]</sup>。投入、切除状态主要用于实现正常运行控制期间交流输出电压的阶梯波调制,而闭锁状态则主要出现在系统启动预充电期间和直流故障后的故障电流清除期间。

为防止重启过程对换流器、直流线路以及交流系统的二次危害,本文提出一种 F-MMC 的新型运行方式——F-MMC 不控整流运行方式。首先,定义一种子模块新型运行状态,针对 FBSM,该运行状态有两种具体实现方式。如图 1(a)所示,导通 FBSM 中的  $T_1$ ,而  $T_2, T_3, T_4$  保持闭锁状态,此时电流只可能经续流二极管  $D_3$  及  $T_1$  流通,其物理特性与闭锁状态下的 HBSM 相同,因此命名为类半桥闭锁状态。同理,如图 1(b)中所示,导通 FBSM 中的  $T_4$ ,而  $T_1, T_2, T_3$  保持闭锁状态,此时电流只可能经续流二极管  $D_2$  及  $T_4$  流通,物理特性亦与闭锁状态下的 HBSM 相同,是 FBSM 类半桥闭锁状态的另一种实现方式。如图 1(c)所示,将所有 FBSM 运行于类半桥闭锁状态,即可实现 F-MMC 的不控整流运行。图中: $T_1$  至  $T_4$  为绝缘栅双极型晶体管(IGBT)。



(a) 类半桥闭锁状态1

(b) 类半桥闭锁状态2



(c) 换流器不控整流运行方式

图 1 FBSM 类半桥闭锁状态及 F-MMC 不控整流运行方式

Fig.1 Half-bridge-like blocking mode of FBSM and uncontrolled rectifier operation of F-MMC

### 1.2 F-MMC 不控整流运行方式下的线路电流特征

直流故障发生以后,闭锁 F-MMC 可实现对故障电流的快速清除,经过一段时间的去游离过程以后(确保瞬时性故障情况下绝缘的可靠恢复),将换流站运行于不控整流方式。在不同故障性质下将出现不同的线路电流特征。

针对两极短路故障,将 F-MMC 运行于全波不控整流方式(即换流器内上、下 6 个桥臂所有 FBSM 均处于类半桥闭锁状态)。如图 2(a)所示,如果此时故障点仍存在,则交流侧电源将经过换流器以全波不控整流形式向故障点重新馈入电流。

相反,若此时故障点已经消失,则根据图 2(c)所示的潜在馈流通路可知(经对端换流站形成通路),只要满足式(1)即可保证线路上不会再出现二次馈流。

$$2NU_c > u_{L-L1} - u_{L-L2} \quad (1)$$

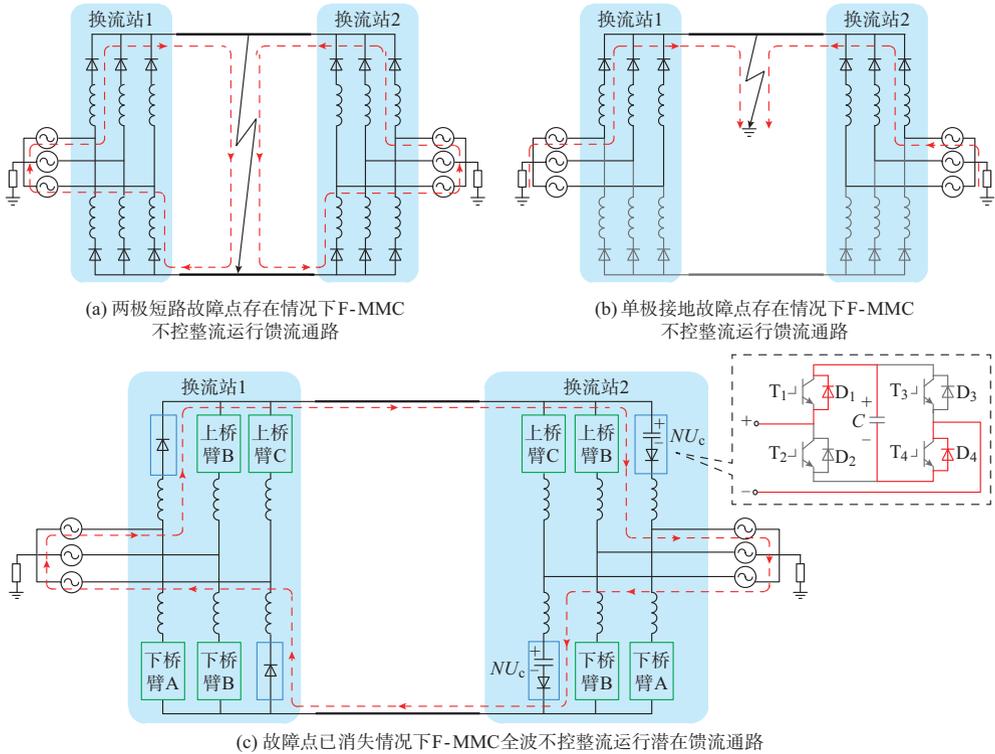


图 2 F-MMC 不控整流运行方式下线路电流特征  
Fig.2 Line current characteristic under uncontrolled rectifier operation mode of F-MMC

式中:  $N$  为 MMC 每个桥臂内子模块数量;  $U_c$  为子模块电容电压;  $u_{L-1,1}$  和  $u_{L-1,2}$  分别为两侧交流系统线电压。

考虑最严重情况, 即两侧交流系统相位相反情况下, 子模块电容电压需满足:

$$2NU_c > \frac{\sqrt{3}}{2}U_{dcN}M_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{dcN}M_2 \quad (2)$$

即

$$U_c > \frac{\sqrt{3}}{4}(M_1 + M_2)U_{cN} \quad (3)$$

式中:  $U_{dcN}$  为额定直流电压;  $U_{cN}$  为额定子模块电容电压;  $M_1$  和  $M_2$  分别为换流站 1 和换流站 2 的调制比, 定义为  $U_m/0.5U_{dcN}$ , 其中  $U_m$  为交流相电压幅值。

直流故障发生以后, F-MMC 内的子模块电容将经历快速放电和反向充电两个过程, 但由于故障前桥臂电抗存储的能量、故障后子模块电容释放能量和交流系统馈能中除了一小部分被故障回路电阻消耗以外, 剩余部分均将在换流器闭锁期间回馈到子模块电容。因此, 可认为在清除故障电流以后的不控整流运行期间, 子模块电容电压  $U_c$  能够恢复到额定电压  $U_{cN}$ , 甚至略高<sup>[22]</sup>, 即  $U_c \geq U_{cN}$ 。又由于  $0 < M_1 < 1, 0 < M_2 < 1$ , 即  $0 < M_1 + M_2 < 2$ , 因此

式(3)必然成立。也就是说如果此时故障点已经消失, 直流线路上一定不会再出现电流。

对于单极接地故障而言, 清除故障电流并经历一段时间的去游离过程以后, 将 F-MMC 中故障极所对应三个桥臂内的 FBSM 投入类半桥闭锁状态, 而非故障极对应的三个桥臂内子模块仍然保持闭锁。此时如图 2(b) 所示, 若故障点仍然存在, 则交流侧电源将以三相半波不控整流桥形式向故障点馈入电流。相反, 若故障点已经消失, 与 F-MMC 处于全波不控整流运行方式时类似, 直流线路上不会再出现电流。

### 1.3 新型故障重启方法

根据上述分析可知, 清除故障电流以后, 若换流器以不控整流方式运行于故障点仍存在的情况, 直流线路将立即再次出现电流; 相反, 如果换流器以不控整流方式运行于故障点消失的情况, 则直流线路不会再出现电流。根据线路有无电流这一特征, 本文设计提出一种如附录 A 图 A1 所示的具有低电流、低电压危害的故障重启方法。图 A1 中:  $I_{dc}$  为直流线路电流(单极故障时为故障极电流);  $I_{set}$  为直流电流整定值, 由于只需判别是否再次出现电流, 因此该整定值可以选取一个较小的值, 仅需避免测量误差、装置精度和保护分辨率等原因导致的误判;  $t$  为计时器计时时刻。

本文设计的重启方法基本步骤如下。

1) 直流故障情况下通过闭锁换流器实现故障电流的快速清除, 并经历足够时间的去游离过程以后, 将换流器运行于不控整流方式, 判断线路电流大小。

2) 如果直流线路电流  $I_{dc}$  大于整定值  $I_{set}$ , 则表明故障点仍存在, 判断为永久性故障, 立即重新闭锁换流站。

3) 如果换流器运行于不控整流方式后线路电流在  $\Delta t_1$  时段内一直小于  $I_{set}$ , 则表明故障已经消失。经  $\Delta t_2$  延时以后, 可开始恢复换流站的正常运行, 即恢复系统正常运行。此处  $\Delta t_1$  设定的主要依据在于使永久性故障情况下线路电流能够在该时段内上升到阈值以上, 从而确保故障性质的可靠判断。因此其设定与线路参数等因素有关, 例如, 线路越长, 所需的  $\Delta t_1$  就越大。工程实际中, 可以适当增大  $\Delta t_1$ , 以确保永久性故障情况下线路电流能够在该时段内上升到阈值以上。此外, 在判断出故障消失以后, 经  $\Delta t_2$  延时后才允许开始恢复换流站正常运行的目的在于保证对端换流站已经判断出故障点消失。由于与故障点距离不同, 不同换流站重启动时刻会有所不同, 若对端换流站尚未判断出故障点消失这一结果, 而该站已经恢复正常运行, 可能导致线路上开始出现电流, 进而致使对端换流站的误判。一般情况下, 不同站之间的动作时间级差为几毫秒<sup>[23]</sup>,  $\Delta t_2$  的选取只需躲过该时间级差即可。

与传统直接解锁换流器、基于电压建立与否判断故障点是否消失的重启方法相比, 该方法通过判断电流存在与否实现故障性质判断。若电流不存在, 则故障已经消失, 可恢复系统正常运行; 若出现电流, 则故障仍存在, 为永久性故障, 应立即再次闭锁换流站。

针对两极短路故障场景, 该方法在故障性质判断期间, 子模块电容仍然处于旁路状态, 因此在重启于永久性故障时避免了电容放电, 能够大幅度降低直流电流的上升速度; 而且由于只需通过判断电流存在与否即可实现故障性质的判断, 所以永久性故障情况下, 可以在线路电流仍很小的时候就判断出故障性质, 快速重新闭锁换流器, 避免重启过程对系统造成二次过流冲击。

对于单极接地故障情况, 故障性质判断期间仅将换流器以半波不控整流方式投入, 非故障极对应三个桥臂子模块仍然闭锁, 该方式下系统不会出现过电压问题。有效避免了传统重启方法重启于永久性单极接地故障时, 定电压控制导致电压偏置, 从而对系统产生的二次过电压危害。

## 2 混合式 MMC 型直流系统中的适用性分析

### 2.1 所设计重启方法应用于混合式 MMC 时的区别

与传统半桥式 MMC 相比, 利用 FBSM 构造 MMC 时所需的电力电子开关器件将会增加两倍, 因此投资成本和功率损耗也会大幅增加<sup>[24]</sup>。如图 3 所示, 由 FBSM 和 HBSM 组合构成的混合式 MMC 拓扑由于能够在保证隔离能力的前提下有效降低投资成本和功率损耗, 因而成为应用研究的重点内容<sup>[25-26]</sup>。

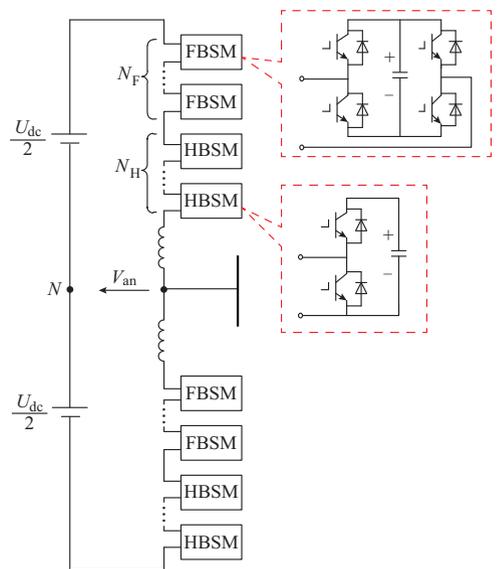


图 3 混合式 MMC 拓扑结构  
Fig.3 Topology structure of hybrid MMC

如前文中所述, 本文所设计的重启方法判断故障性质的主要依据在于换流器不控整流运行于故障点存在情况时线路上将再次出现电流, 而运行于故障点消失情况时线路上不会再出现电流。针对如图 3 所示的混合式 MMC (本文将其称为 F-HMMC), 显然当其不控整流运行于故障点存在情况时, 线路上将会出现电流。

但是, 混合式 MMC 中只有 FBSM 内的电容经历闭锁后反向充电过程, 因此能确保在重启时子模块电容电压已恢复到额定值左右; 而混合式 MMC 中 HBSM 内的电容只经历故障初期的放电, 却不经历反向充电, 其在故障性质判断时的电压并未恢复到额定值。因此混合式 MMC 不控整流运行于故障点消失情况时, 经对端换流站馈流的可能性增大, 必须对避免经对端馈流的条件进行分析, 并论证本文提出的重启方法在混合式 MMC 中的适用性。

## 2.2 所设计重启方法在混合式 MMC 直流系统中的适用条件

考虑到单极接地故障情况下重启策略仅将换流器中故障极对应的三个桥臂运行于半波不控整流,而非故障极对应的三个桥臂仍然闭锁,其馈流可能性小于全波不控整流方式。故本文仍以如图 2(a)所示的两极短路情况下换流器运行于全波不控整流方式为例进行分析说明。对于 F-MMC,前文已经证明对端馈流的情况不会出现。但是对于混合式拓扑,如图 2(c)中所示投入的反极性电容电压包含了 FBSM 和 HBSM 的电容电压。此时若希望该馈流方式不存在,则需满足式(4)成立。

$$2(N_F U_{cF} + N_H U_{cH}) > \frac{\sqrt{3}}{2} U_{dcN} M_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{dcN} M_2 \quad (4)$$

式中: $N_F$ 和 $N_H$ 分别为每个桥臂中 FBSM 和 HBSM 的数量,满足 $N_H + N_F = N$ ;  $U_{cF}$ 和 $U_{cH}$ 分别为 FBSM 和 HBSM 电容电压。

如前文中所述,可以认为 FBSM 中的电容电压在经历闭锁前放电和闭锁后充电以后能恢复到额定电压<sup>[22]</sup>。但是 HBSM 中的电容电压仅经历闭锁前放电,却没有反充电过程,因此需考察在故障性质判断期间其电容电压能否保证满足式(4)。假设 $U_{cF} = U_{cN}$ ,则有:

$$U_{cH} > \frac{\frac{\sqrt{3}}{4} N (M_1 + M_2) - N_F}{N_H} U_{cN} \quad (5)$$

显然, $N_F$ 越大,即混合式拓扑中 FBSM 所占数量越多,则对 HBSM 中电容电压要求水平就越低。根据相关研究可知,混合式拓扑结构中 FBSM 与 HBSM 的数量配置需考虑直流故障抑制、低电压过调制运行和 HBSM 电容电压平衡等多种约束条件<sup>[21]</sup>。为简便分析,本文仅以直流故障完全抑制作为配置考虑因素,则每个桥臂中 $N_F$ 和 $N_H$ 的数量应分别为<sup>[21,27]</sup>:

$$\begin{cases} N_F = \frac{\sqrt{3}}{4} M_2 N \\ N_H = \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{4} M_2\right) N \end{cases} \quad (6)$$

考虑最严重情况,即调制比均为 1。将式(6)代入式(5),可以求得 HBSM 电容电压需满足:

$$U_{cH} > 0.76 U_{cN} \quad (7)$$

即故障性质判断时,HBSM 中的电容电压水平必须大于 $0.76 U_{cN}$ 才能保证重启于故障点消失情况时直流线路上不会再出现电流。显然,随着约束条件的

增加,混合式拓扑结构中 FBSM 所占数量将大于式(6)中所示的数量<sup>[21]</sup>,此时对 HBSM 中电容电压的要求将会低于式(7)中所要求的电压水平。因此,只需保证 HBSM 电容电压满足式(7),即可确保混合式 MMC 不控整流运行于故障点消失的情况时线路上不会再出现电流,从而使得本文所设计重启方法在混合式拓扑应用场景下仍然能够可靠区分永久性故障与瞬时性故障。

## 2.3 HBSM 电容电压评估

如前文中所述,故障性质判断期间,混合式 MMC 中 HBSM 的电容电压水平若满足式(7)就能保证本文提出的重启方法的可行性。而故障性质判断时,HBSM 中的子模块电容电压水平主要由故障初期(闭锁换流器以前)的电容放电程度决定。在故障初期,HBSM 和 FBSM 中的子模块电容同时放电,等效电路如图 4 所示<sup>[22,26]</sup>。

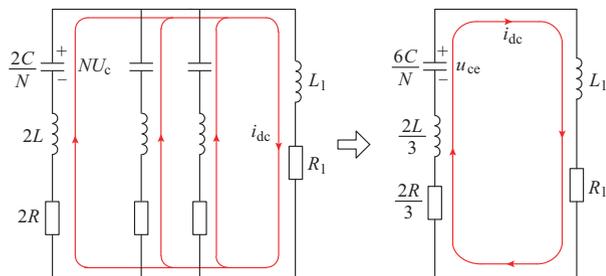


图 4 换流器闭锁前故障等效电路  
Fig.4 Equivalent circuit of DC fault before blocking converter

根据图 4 所示的等效电路可以得到相应的状态方程为:

$$L_e C_e \frac{d^2 u_{ce}}{dt^2} + R_e C_e \frac{du_{ce}}{dt} + u_{ce} = 0 \quad (8)$$

式中: $L_e = 2L/3 + L_1$ ,其中 $L$ 和 $L_1$ 分别桥臂电感和故障线路等效电感; $R_e = 2R/3 + R_1$ ,其中 $R$ 和 $R_1$ 分别为桥臂电阻和故障线路等效电阻; $C_e = 6C/N$ ,其中 $C$ 为子模块电容值; $u_{ce}$ 为电容等效电压。

假设故障瞬间直流电压、电流初始值分别为 $U_0$ 和 $I_0$ ,由于一般情况下 $R_e < 2\sqrt{(L_e/C_e)}$ ,因此可求得该阶段的暂态解为<sup>[28]</sup>:

$$\begin{cases} u_{ce} = A e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta) \\ i_{dc} = A \sqrt{\frac{C_e}{L_e}} e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta - \beta) \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{R_e}{2L_e} \\ \omega &= \sqrt{\left(\frac{R_e}{2L_e}\right)^2 - \frac{1}{L_e C_e}} \end{aligned}$$

$$A = \sqrt{U_0^2 + \left( \frac{U_0 \sigma}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C_e} \right)^2}$$

$$\theta = \arcsin \left( \frac{U_0}{A} \right)$$

$$\theta - \beta = \arcsin \left( \frac{I_0}{A \sqrt{\frac{C_e}{L_e}}} \right)$$

根据故障初期的暂态响应特性即可评估 HBSM 的电容电压水平。评估的基本依据为:根据直流故障检测的过电流判据中直流电流整定值(目前工程实际中该整定值一般设为 1.5~2 倍额定电流)<sup>[29-30]</sup>,并考虑一定的动作延时确定换流器闭锁时刻,由此计算 HBSM 在换流器闭锁瞬间的电容电压值,即为故障性质判断时的电压水平。

以附录 A 表 A1 中所述系统参数为例,进行 HBSM 电容电压评估,相应结果如图 5 所示。由图 5 可知,两极短路故障发生以后,由于故障检测的快速动作,在考虑传感器延时、开关器件动作速度等延时因素前提下(本文中假设延时为 1 ms),换流站能够在略大于 1 ms 以后快速闭锁。相应的,由于换流站的快速闭锁,HBSM 内电容电压水平能够保证不跌落到  $0.76U_{cN}$  ( $0.76 \times 4 \text{ kV} = 3.04 \text{ kV}$ ) 以下。事实上,在实际工程中,上述延时一般小于 1 ms<sup>[31]</sup>,即换流站闭锁会更快,显然能够确保 HBSM 电容电压水平保持在  $0.76U_{cN}$  以上。因此,本文设计的重启方法在混合式 MMC 应用场景中仍然具有很好的适用性。

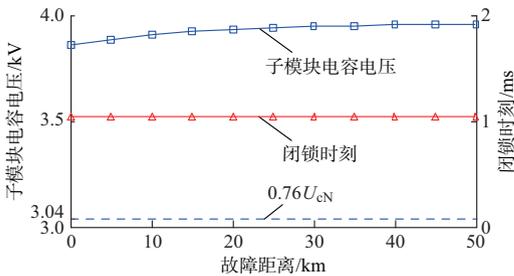


图5 换流站闭锁时刻 HBSM 电容电压值计算结果  
Fig.5 Calculation results of HBSM capacitor voltage at the moment blocking MMC

此外,为了更好地实现电压平衡,每个子模块电容旁一般会并联一个大电阻。该并联电阻的存在使子模块电容在闭锁以后以 RC 特性缓慢放电,因此须考虑其对故障性质判断可靠性的影响。在工程实际中,子模块电容并联的电阻值非常大,例如,3.3 kV 的子模块电容并联电阻值在 3 000  $\Omega$  以上。以本文附录 A 表 A1 中所示的系统参数为例,子模块电容电压额定值为 4 kV,因此其并联的电阻值也应该在数千欧姆左右,可以估计 RC 放电时的衰减

时间常数  $\tau = 29.25 \text{ s}$  (假设并联电阻值为 3 000  $\Omega$ )。而根据相关研究可知<sup>[10,15]</sup>,在闭锁换流站实现故障电流清除以后,去游离、故障性质判断所需的时间大概为 100~200 ms,因此在该过程中 RC 放电导致的电容电压下降幅度最大仅为 0.68% (对应 4 kV 电容电压,下降量为 0.027 2 kV)。结合 1.2, 2.2, 2.3 节的分析可知,如此小幅度的电压下降对故障性质判断的可靠性基本不会造成影响,可忽略不计。

### 3 仿真算例

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建两端 MMC 型直流输电系统仿真模型,其中具有故障清除能力的换流器子模块选择 FBSM,详细仿真参数见附录 A 表 A1。文章对两极短路、单极接地及混合式 MMC 应用场景均进行了仿真测试,同时将本文所设计的重启方法与传统基于电压建立与否的重启方法分别应用于故障性质判断,验证了本文所提出的重启方法的可行性及其优势。此外,在仿真试验中将本文重启判据中的  $I_{set}$  设为 0.1 kA,  $\Delta t_1$  取 1 ms,  $\Delta t_2$  取 10 ms。

需要注意的是,本文仿真中并未考虑线路电容充电电流对判据可靠性的影响。事实上,当线路长度达到百千米等级时,瞬时性故障情况下线路电容充电电流可能会导致重启判据的误判。针对该问题,可以参考交流系统重合闸中所采取的方法加以解决。例如,可以根据线路参数等效评估线路电容充电电流,从而在重合闸判据中对该电容电流进行人为补偿或者在定值整定时考虑躲过电容充电电流峰值。鉴于篇幅限制,本文不再对这一问题进行详细讨论。

#### 3.1 两极短路故障

##### 1) 重启于永久性故障

该算例假设在距换流站出口 10 km 处发生永久性两极短路故障,故障发生时刻为  $t = 1 \text{ s}$ 。传统重启方法和本文提出的重启方法分别应用于该故障场景,相应的仿真结果如附录 A 图 A2 和图 A3 所示。

如附录 A 图 A2 所示,故障发生以后,直流线路电流由于电容放电快速上升,故障检测快速动作闭锁换流器,实现对故障电流的快速清除。此后,在一段时间的去游离过程以后,传统的重启方法直接解锁换流站。如图 A2(a) 所示,由于直流运行电压无法重新建立,因此可判断出该故障为永久性故障,再次闭锁换流站。但是,如图 A2(b) 所示,在故障性质判断期间,由于重新解锁换流站,子模块电容向故障点再次放电,导致直流电流二次过流,对系统造成二次危害。

相反,如附录 A 图 A3 所示,本文提出的重启方法在启动以后,将换流站运行于不控整流方式。通过判断是否出现电流来判断故障性质。如图 A3(b)所示,重启判据启动后,由于直流电流超过了阈值 0.1 kA,因此判断为永久性故障(图 A3(e)中重启判断结果为 0 时表示瞬时性故障,为 1 时表示永久性故障,-1 表示未给出判断结果)。快速重新闭锁换流器,清除线路电流。由于故障性质判断期间换流站处于不控整流运行方式,避免了子模块电容的二次放电。而且在很小的线路电流情况下即可判断出该故障为永久性故障,实现换流站的快速重新闭锁,有效避免了重启过程对系统造成二次过流冲击。

### 2)重启于瞬时性故障

该算例假设在距换流站出口 10 km 处发生瞬时性两极短路故障,故障时刻为  $t=1$  s,故障持续时间为 0.05 s,验证所设计重启方法在瞬时性故障下的动作可靠性,相应的仿真结果如附录 A 图 A4 所示。如图 A4 所示,重启判据启动以后,由于直流线路电流在设定时间  $\Delta t_1$  内一直远小于阈值 0.1 kA,因此快速判断为瞬时性故障。在延时  $\Delta t_2$  以后,开始恢复系统正常运行。

## 3.2 单极接地故障

### 1)重启于永久性故障

对于永久性单极接地故障(以正极接地为例),同样假设故障距离为换流站出口 10 km,故障时刻为  $t=1$  s。将传统重启方法与本文提出的方法分别应用于该故障场景,以验证所设计方法的优越性,相应的仿真结果如附录 A 图 A5 和图 A6 所示。

如附录 A 图 A5 所示,利用传统方法进行单极接地故障的故障性质判断时,由于故障极电压不能建立,因此可以可靠判断为永久性故障。而且,如图 A5(c)所示,单极接地故障时,故障性质判断期间的二次过流并不严重。但是,如图 A5(a)和(b)所示,由于定电压控制策略导致电压偏置现象<sup>[18]</sup>,直流侧非故障极以及交流系统会出现二次过电压危害,同样不利于系统的安全、可靠运行。

附录 A 图 A6 是应用本文设计重启方法时的仿真结果。如仿真结果所示,重启判据启动后,由于直流线路电流上升到整定值以上,因此立即判断为永久性故障,重新闭锁换流站。同时由图 A6(a)和(b)可知,利用本文方法进行重启时,直流线路、交流系统均不会再次出现过电压危害,避免了重启过程对系统造成的二次危害。

### 2)重启于瞬时性故障

该算例假设在距换流站出口 10 km 处发生瞬时性正极金属性接地故障,故障时刻为  $t=1$  s,故障持续时间为 0.05 s,验证所设计重启方法的动作可

靠性,仿真结果如附录 A 图 A7 所示。由仿真结果可知,重启判据启动以后,直流线路上电流一直远小于阈值,因此快速判断为瞬时性故障。在延时  $\Delta t_2$  以后,开始恢复系统正常运行。

## 3.3 混合式 MMC 中的适用性

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建 F-HMMC 型混合式 MMC 直流系统,系统参数同样如附录 A 表 A1 所示。同时,根据式(6)所示的子模块数量配置原则确定混合式 MMC 中每个桥臂内 FBSM 数量为 36 个,HBSM 数量为 64 个。在混合式 MMC 型直流系统中发生永久性故障后进行故障性质判断时,线路上显然会出现电流,能够判断出故障点仍然存在,本文不再赘述。本节着重仿真验证了重启于瞬时性故障(以两极短路故障为例)时的动作可靠性。考虑最严重情况,本算例中故障位置设为换流站出口,这一情况下子模块电容电压跌落速度是最快的。相应的仿真结果如附录 A 图 A8 所示。

仿真结果表明,故障性质判断期间,虽然 HBSM 内的电容电压由于故障初期的放电而有所下降,而且在故障电流清除期间也因为不被充电而没有回升。但是,HBSM 内电容电压在闭锁以后的电压水平仍然可靠保持在了 3.04 kV( $0.76 \times 4$  kV)以上,确保了直流线路上不出现电流,因此能够可靠判断出故障点已经消失,从而允许解锁换流站,恢复系统的正常运行。该算例表明,本文方法在混合式 MMC 型直流系统中仍具有较好的适用性。

## 3.4 工程应用可行性分析

### 1)延时的影响

上述仿真算例中未考虑传感器延时、采样延时、算法处理延时等因素导致换流站无法在电流超过阈值后瞬间闭锁对本文重启判断期间出现的过电流所造成的影响。在工程实际中,上述延时不可避免,以南澳柔性直流工程的直流故障闭锁为例,在相关电气量超过阈值以后仍需约 315  $\mu$ s 的延时(115  $\mu$ s 数据传输延时和 200  $\mu$ s 算法处理延时)才能实现换流站的闭锁<sup>[31]</sup>。

附录 A 图 A9(a)是考虑不同延时情况下,本文方法重启于永久性两极短路故障时的直流电流仿真结果。由仿真结果可知,由于本文方法在故障性质判断时将换流站由闭锁状态切换到不控整流运行方式,与前述直接解锁换流站的重启方法相比,避免了子模块电容的二次放电,直流电流上升速度大大降低。在 500  $\mu$ s 这一较为接近工程实际的换流站延时闭锁情况下,直流电流仍被有效控制在 0.7 kA 左右;即使考虑更为严重的延时 1 ms,也能够保证直

流电流仍在额定值附近(1.25 kA 左右)时就闭锁了换流站。因此,考虑可能出现的延时情况,本文方法也能保证避免二次过电流的出现。而且以上研究考虑的是最严重情况(桥臂电抗取值较小,且不加入直流电抗器),如果计及较大桥臂电抗以及直流限流电抗的限制作用,这一电流还将大大降低。

#### 2)子模块电容电压二次充电问题

针对永久性故障,本文故障性质判断结束以后需要通过再次闭锁换流站清除直流线路上二次出现的电流,造成对子模块电容的二次充电。但这一过程是将换流器中所有子模块投入闭锁状态,因此每个子模块电容电压的反充并不严重。附录 A 图 A9(b)是考虑最严重情况时(延时 1 ms),子模块电容电压的二次反充情况。由仿真结果可知,本文重启方法导致的子模块电容电压反充幅度很小,本算例中该电压值不到额定电压的 1%,对相关器件的冲击基本可以忽略。

## 4 结语

柔性直流系统基于架空线路输电时,瞬时性故障发生的概率很高,因此需要配置有效的重启方法。然而,传统的重启方法在进行故障性质判断时直接解锁换流器,通过电压建立与否判断故障点是否存在。这种方法重启于永久性两极短路故障时会由于子模块电容的再次放电而产生二次过流;重启于永久性单极接地故障时则会由于控制策略的作用而产生二次过压,均会对系统安全运行造成不利影响。本文提出一种新型的故障重启方法,在故障性质判断时将换流器运行于不控整流方式,若故障点仍然存在,则直流线路上会再次出现电流;若故障点已经消失,则直流线路上不再出现电流。因此通过判断电流的有无即可实现故障性质的判断。该方法避免了电容的二次放电和控制策略的电压偏置作用,重启于永久性故障时能够避免二次过流、过压危害,消除了重启过程对系统安全性产生的不利影响。而且也能够适用于混合式 MMC 型直流系统。

本文研究工作尚未考虑装置精度、线路电容充电电流等因素对判据可靠性的影响,为提高工程实用性,可在本文方法基础上针对上述问题加以深入研究;此外,本文方法主要针对点对点式柔性直流系统,而针对多端直流电网,一般要求换流器在故障以后能够继续运行。通过换流器控制策略调整的重启方法可能会对系统的供电可靠性造成不利影响。因此,对剩余网络的继续运行不会造成过大影响且具有低危害特性的多端直流电网重启方法仍有待进一步研究。

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

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] OOI B T, WANG X. Boost type PWM HVDC transmission system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [3] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [4] 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.
- [5] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]// Proceedings of Power Technology Conference, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 23-26.
- [6] XUE Yinglin, XU Zheng, TU Qingrui. Modulation and control for a new hybrid cascaded multilevel converter with DC blocking capability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(4): 2227-2237.
- [7] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [8] GUNNAR A, KESTIN L, CARL B, et al. HVDC grid feasibility study[R]. Working Group B4-52, 2013.
- [9] 魏晓光,高冲,罗湘,等.柔性直流输电电网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.
- [10] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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):5271-5179.

- 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.
- [14] 赵鹏豪,王朝亮,许建中,等.一种具有直流故障穿越能力的 MMC 子模块拓扑[J].电网技术,2014,38(12):3441-3446.
- ZHAO Penghao, WANG Zhaoliang, XU Jianzhong, et al. A sub-module topology of MMC with DC fault ride-through capability[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3441-3446.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张建坡,赵成勇.MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J].电力自动化设备,2014,34(7):32-37.
- ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 32-37.
- [19] 吴亚楠,吕铮,贺之渊,等.基于架空线的直流电网保护方案研究[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3726-3733.
- WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733.
- [20] 王一,刘建政.用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新的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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] PETINO C, HEIDEMANN M, EICHHOFF D, et al. Application of multilevel full bridge converters in HVDC multiterminal systems [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 297-302.
- [24] 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.
- [25] 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): 1137-1146.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 罗永捷,李耀华,李子欣,等.全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J].中国电机工程学报,2016,36(7): 1933-1943.
- LUO Yongjie, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943.

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,博士研究生,主要研究方向:柔性直流电网控制保护。E-mail: hejiawei\_tju@126.com

李 晔(1993—),女,博士研究生,主要研究方向:柔性直流电网控制保护。E-mail: liye\_tju@126.com

(编辑 孔丽蓓)

(下转第 167 页 continued on page 167)

## Novel Restart Scheme of DC Fault for Flexible DC Transmission System

*LI Bin<sup>1</sup>, HE Jiawei<sup>1</sup>, LI Ye<sup>1</sup>, HONG Chao<sup>2</sup>, ZHANG Ye<sup>2</sup>, YANG Jian<sup>2</sup>*

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The overhead-line based DC transmission is becoming the developing trend of flexible DC transmission because of the breakthrough of the converter-based DC fault isolating technique. The probability of nonpermanent faults on the overhead line is very large, thus the restart scheme should be configured to increase the supply reliability. However, the conventional restart scheme will lead to the second overcurrent or overvoltage damages, which is detrimental to the safe operation of the system. This paper proposes a novel restart scheme, which makes the converter operate as an uncontrolled rectifier, then the fault property can be determined according to the current characteristic of the DC line. Compared with the conventional restart scheme, the overcurrent and overvoltage problems during the restarting period could be avoided effectively. Finally, cases in point are used via the PSCAD/EMTDC to verify the feasibility and superiority of the proposed restart scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677126) and China Southern Power Grid Company Limited (No. CSGTRC-K163001).

**Key words:** flexible DC transmission; overhead line; restart scheme; fault property determination