## 换流站阀侧交流接地故障电流快速抑制方案

束洪春,任 敏,单节杉,田鑫萃,薄志谦 (昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650051)

摘要:换流站阀侧交流接地故障下,故障点通过接地极与下桥臂组成故障回路,其故障冲击电流大,不能通过 断路器切除。分析表明,接地极在对称运行时基本没有电流流过,并在单极架空线路故障和换流站阀侧交流 接地故障中提供了故障回路。因此,接地极引入故障限流装置不仅对系统的正常运行没有影响,且能有效抑 制单极故障电流和阀侧交流接地故障电流,降低对直流线路保护及换流站保护的要求。分析了阀侧交流接 地故障下的故障电流组成,从供电可靠性、故障限流效果等方面分析了故障限流器引入接地极所具有的优 势,提出了故障限流器分散组合式安装方法,利用电容器组与故障限流电感的组合投入,实现对回路中能量 的吸收和故障电流上升率及峰值抑制的新型故障限流器拓扑结构。利用 PSCAD / EMTDC 平台搭建了双端 柔性直流输电系统,仿真结果验证了接地极安装位置的优越性,并证明了新型故障限流器的有效性。 关键词:架空柔性直流电网;阀侧交流接地故障;故障电流特性;接地极;故障限流

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202203031

#### 0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流输电 (MMC-HVDC)谐波水平低、控制灵活且没有换相失 败、无功补偿问题,得到了广泛的关注与迅速的发 展<sup>[1-3]</sup>。柔性直流输电电压等级和容量不断提高,而 电缆输电存在输送容量有限、发生故障时故障排除 时间长、维修困难、造价高等一系列缺点,难以适应 高电压和大容量输电场景。柔性直流输电系统故障 中,绝大部分为架空输电线路接地故障,故障电流上 升极快<sup>[46]</sup>。

对直流系统故障特性的分析是保护、控制及直流电网安全稳定的基础。目前的研究主要是针对直流侧故障的解析,如文献[7]研究真双极系统直流侧的故障特性,推导出不同接地电阻下的故障点等效电路。针对交流侧故障的研究主要聚焦于直流侧对交流系统短路电流的影响,如文献[8-9]从电网运行的角度分析直流侧提供短路电流的特征及短路电流计算的原则。换流站阀侧交流接地故障是较少发生的故障类型,主要由穿墙套管绝缘老化、雷击闪络等引起,如:某年某月某日16时44分,某±800 kV直流换流站穿墙套管故障引起极 I 高端换流器差动保护 II 段动作、极 I 极差动保护 II 段动作。该故障引起的冲击电流巨大,导致套管防爆膜完全炸裂脱落,套管内部有熏黑痕迹,伞裙存在缺口;某年某月某日

收稿日期:2021-09-11;修回日期:2022-01-27

在线出版日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52167011,52037003); 云南省重大科技专项计划项目(202002AF080001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52167011,52037003) and the Key Science and Technology Project of Yunnan Province(202002AF080001) 19时38分31秒,某±800kV直流换流站穿墙套管故障,引起极 II的3套极母线差动保护动作,极 II闭锁,现场发现极 II 高端穿墙套管裙边出现大量裂片并散落在套管下方<sup>[10]</sup>。由于阀侧故障接地点与直流侧接地点构成故障电流的流通通路,换流器闭锁前的冲击电流大,甚至比直流线路故障更严重,而该故障位于交流保护区,不能通过直流断路器切除,极易对换流站造成损害,同时由于现有的限流电抗位于直流母线出口,这种情况下不能对故障电流进行抑制。

目前较多文献针对抑制直流侧故障电流提出 了故障限流方案,考虑抑制阀侧交流接地故障电流 的文献较少。文献[11]提出采用LR并联接地方式 抑制阀侧交流接地故障电流,但该方法不能使接地 极提供真实的接地点,单极故障下该方案会对健全 极造成长时间的电压振荡。文献[12-14]根据检测 到的直流电流变化率,在直流侧故障下通过降低直 流电压指令值减少子模块的投入数,从而限制故障 电流的上升速率和幅值。这类方案在半桥型模块化 多电平换流器(MMC)或混合型MMC 拓扑结构下均 适用,由于控制系统响应速度理论上达到微秒级,具 有良好的速动性,且不需要引入额外的硬件类故障 限流设备即可抑制电流上升率。文献[15]提出在直 流线路出口串入辅助故障限流器,等效为故障下增 大平波电抗器电感值。文献[16]提出在上下桥臂间 设置一条由晶闸管和电阻串联构成的桥臂旁路,发 生故障时导通晶闸管可以减小故障电流,但该方法 会导致旁路电阻产生极大的热量,对MMC造成威 胁。文献[17]在直流断路器中引入故障限流阻抗支 路,提出一种具有故障限流功能的直流断路器。

本文在分析换流站阀侧交流接地故障特性的基础上,得出接地极在正常运行时基本没有电流流过,

并在高概率的架空线路单极故障和换流站阀侧交流 接地故障中参与了故障回路。因此,接地极引入故 障限流装置不仅对于系统的正常运行没有影响,还 能有效抑制阀侧交流接地故障电流,同时能抑制高 概率的单极接地故障电流。着眼于以上特点,本文 对故障限流装置安装于不同位置的效果进行了详细 的讨论,进而提出了分散组合式安装方法和一种新 型故障限流技术,并分析了故障限流装置的拓扑结 构和故障限流原理。最后在PSCAD / EMTDC 搭建 仿真模型,验证了阀侧交流接地故障电流理论推导 的正确性和故障限流方案的有效性。

#### 1 换流站阀侧交流接地故障电流解析

对于伪双极直流输电系统,其接地方式不同于 真双极,在单极接地或阀侧交流接地故障下,故障回 路阻尼极大,因此故障电流小。对于大容量、高电压 的柔性直流输电系统,通常采用真双极的输电形式, 在上述2类故障下的故障电流大,易损坏换流器等 一次设备。2类输电方式的典型拓扑结构如图1所 示。图中:L<sub>de</sub>为平波电抗器的电感值;DCCB为直流 断路器;L<sub>p</sub>、L<sub>a</sub>分别为正、负极架空线路;R<sub>g</sub>为接地极 等效电阻;R<sub>s</sub>为接地大电阻。





现场实际存在由于穿墙套管绝缘老化、雷击闪 络等引起的阀侧交流接地故障,某±800 kV变压器 穿墙套管如附录A图A1所示。故障引起的巨大冲 击电流导致套管防爆膜完全炸裂脱落,套管内部有 熏黑痕迹,伞裙存在缺口,如附录A图A2所示。

从近端换流站看,故障点与下桥臂、接地极构成 电容放电回路,并通过"上桥臂→直流线路→远端换 流站→远端换流站接地极→故障点"构成故障回 路<sup>[18]</sup>,分别如图2和图3所示。图中,IDL和IDEE分别 为极线母线出口和接地极线路母线出口的电流测点。



#### 图2 △侧接地故障下故障点、下桥臂和接地极 构成的电容放电回路

Fig.2 Capacitor discharge circuit composed of fault point, lower bridge arm and grounding electrode under grounding fault at  $\triangle$  side



#### 图3 △侧接地故障下故障点、上桥臂、直流线路与 对端换流站的电流流通通路

Fig.3 Current flow path of fault point, upper bridge arm, DC transmission line and opposite converter station under grounding fault at  $\triangle$  side

考虑到下桥臂子模块投切与控制系统密切相 关,精确求取下桥臂故障电流较为复杂,而由于MMC 闭锁前电容放电过程极短,约为1~2ms,因此本文忽 略控制投切的影响,以故障临界时刻的桥臂电压、电 流为初始条件,求解闭锁前换流站提供的故障电流。 为简化分析,以图1(b)中整流侧换流站阀侧交流发 生三相接地故障为例进行分析,将图2所示的电容放 电回路转换成运算电路模型,如附录A图A3所示。

假设交流调制比为1,由于上下桥臂同一交流 分量差180°,可知*j*相阀侧交流电压*u<sub>vj</sub>(t*)和下桥臂 电流*i<sub>vi</sub>(t*)分别为<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} u_{vj}(t)=0.5U_{dc}(0)-U_{smj}\sin(\omega t+\varphi_j)\\ i_{nj}(t)=\frac{i_{dc}(0)}{3}-\frac{I_{smj}\sin(\omega t+\varphi_j-\varphi')}{2} \quad j=a, b, c \quad (1) \end{cases}$$

式中:U<sub>smj</sub>为j相交流侧线电压幅值;I<sub>smj</sub>为j相交流

62

电流幅值; $U_{de}(0)$ 为输电系统稳态下的直流电压;  $i_{de}(0)$ 为稳态运行下线路上的直流电流; $\varphi_j$ 为j相交 流电压初相角; $\varphi'$ 为交流系统稳态运行下的负载阻 抗角; $\omega$ 为交流侧角频率。

对下桥臂组成的故障回路列写基尔霍夫电压 定律(KVL)方程,如式(2)所示。

$$L_0 \frac{\operatorname{di}_{nj}(t)}{\operatorname{d}t} + u_{nj}(t) = u_{vj}(t) \quad j = \mathrm{a, b, c}$$
(2)

式中: $L_0$ 为桥臂电感; $u_{ij}(t)$ 为t时刻j相下桥臂等效 电容电压。

由此可知,故障时刻 j 相下桥臂投入的子模块 总个数 N<sub>ij</sub>=u<sub>ij</sub>(0)/u<sub>c</sub>(0),其中u<sub>c</sub>(0)为子模块平均电 容电压,可根据 U<sub>dc</sub>(0)和稳态时上下桥臂投入的子 模块个数之和 N获取。

根据图 A3 可得 a 相下桥臂提供的故障电流  $I_{deg.a}(s)$ 为:

$$I_{\rm deg,a}(s) = \frac{u_{\rm na}(0)/s + L_0 i_{\rm na}(0)}{N_{\rm na}/(2C_0 s) + L_0 s + R_0 + R_{\rm g}}$$
(3)

式中: $u_{na}(0)$ 为故障时刻a相下桥臂等效电容电压;  $i_{na}(0)$ 为故障时刻a相下桥臂瞬时电流; $R_0$ 为桥臂等 效电阻; $C_0$ 为子模块电容值。

由式(3)可以得到 $I_{dcg,a}(s)$ 的时域表达式为:

$$i_{dcg,a}(t) = B_1 e^{\theta_1 t} + B_2 e^{\theta_2 t}$$
 (4)

$$\theta_{1} = \frac{-(R_{0} + R_{g}) + \sqrt{(R_{0} + R_{g})^{2} - NL_{0}/C_{0}}}{2L_{0}}$$
(5)

$$\left| \theta_{2} = \frac{-(R_{0} + R_{g}) - \sqrt{(R_{0} + R_{g})^{2} - NL_{0}/C_{0}}}{2L_{0}} \right| \\
\left\{ B_{1} = \frac{L_{0}i_{na}(0)\theta_{1} + u_{na}(0)}{2L_{0}\theta_{1} + R_{0} + R_{g}} \right\}$$
(6)

$$B_{2} = \frac{L_{0}t_{na}(0)t_{2} + t_{na}(0)}{2L_{0}\theta_{2} + R_{0} + R_{g}}$$

同理可得到 $b_{c}$ 相下桥臂提供的故障电流的表达式,则换流站下桥臂提供的电流之和 $i_{deg,\Sigma}(t)$ 为:

$$i_{\text{deg},\Sigma}(t) = \sum i_{\text{deg},j}(t) \quad j = a, b, c$$
 (7)

将图3所示的故障回路转换为运算电路模型,如 附录A图A4所示。由叠加定理,将对端MMC与近 故障点的MMC各上桥臂视为两部分激励,因此令:

$$\begin{cases} I_{dc1}(s) = \sum \frac{\frac{U_{dc}(0)}{s} - \frac{2}{3} L_0 i_{dc}(0) - (2L_{dc} + L_{dc1}) i_{dc}(0)}{\frac{N_{pj}}{2C_0 s} + L_{\Sigma} s + R_{\Sigma}} \\ I_{dc2}(s) = -\sum \frac{\frac{u_{pj}(0)}{s} + L_0 i_{pj}(0)}{\frac{3N_{pj} + N}{6C_0 s} + L_{\Sigma} s + R_{\Sigma}} \end{cases}$$

j=a, b, c (8)

式中:u<sub>vi</sub>(0)为故障时刻 j 相上桥臂等效电容电压;

 $i_{jj}(0)$ 为故障时刻 *j* 相上桥臂瞬时电流;  $L_{del}$ 为线路 等效电感值;  $R_{\Sigma} = R_0 + R_g + R_{del}$ ,  $R_{del}$ 为线路等效阻值;  $L_{\Sigma} = 2L_{de} + L_{del} + \frac{5}{3}L_0$ ;  $N_{jj}$ 为故障时刻 *j* 相上桥臂子模 块投入总个数,  $N_{jj} = N - N_{ijo}$ 

求取
$$I_{del}(s)$$
的时域形式,可以得到:  
 $i_{del}(t) = \sum (K_1 e^{p_y t} + K_2 e^{p_z t}) \quad j=a, b, c$  (9)

$$K_{1} = \frac{-R_{\Sigma} + \sqrt{R_{\Sigma}^{2} - L_{\Sigma} \frac{2N_{pj}}{C_{0}}}}{2L_{\Sigma}}$$
(10)  
$$K_{1} = \frac{-\left[\frac{2}{3}L_{0} + (2L_{dc} + L_{dc1})\right]i_{dc}(0)p_{1j} + U_{dc}(0)}{2L_{\Sigma}}$$

$$\begin{cases} 2L_{\Sigma} p_{1j} + R_{\Sigma} \\ K_{2} = \frac{-\left[\frac{2}{3}L_{0} + (2L_{de} + L_{de1})\right]i_{de}(0)p_{2j} + U_{de}(0)}{2L_{\Sigma} p_{2j} + R_{\Sigma}} \end{cases}$$
(11)

求取 $I_{dc2}(s)$ 的时域形式,可以得到:

$$i_{dc2}(t) = \sum (Q_1 e^{q_{1j}t} + Q_2 e^{q_{2j}t}) \quad j = a, b, c$$
 (12)

$$q_{1j} = \frac{-R_{\Sigma} + \sqrt{R_{\Sigma}^{2} - L_{\Sigma} \frac{6N_{pj} + 2N}{3C_{0}s}}}{2L_{\Sigma}}$$

$$q_{2j} = \frac{-R_{\Sigma} - \sqrt{R_{\Sigma}^{2} - L_{\Sigma} \frac{6N_{pj} + 2N}{3C_{0}s}}}{2L_{\Sigma}}$$
(13)

$$\begin{cases} Q_{1} = \frac{L_{0} u_{pj}(0) q_{1j} + u_{pj}(0)}{2L_{\Sigma} q_{1j} + R_{\Sigma}} \\ Q_{2} = \frac{L_{0} i_{pj}(0) q_{2j} + u_{pj}(0)}{2L_{\Sigma} q_{2j} + R_{\Sigma}} \end{cases}$$
(14)

由此可得上桥臂提供的故障电流 I<sub>de</sub>(s) 为:

$$I_{de}(s) = I_{de1}(s) + I_{de2}(s)$$
 (15)  
式(15)的时域表达式为:

$$i_{dc}(t) = i_{dc1}(t) + i_{dc2}(t)$$
 (16)

目前对于换流器阀侧的研究较少,根据上述分 析可知,换流站阀侧交流接地故障下,对于图3所示 故障回路,由于近故障点换流器上桥臂电容初始电 压与故障电流方向相反,且故障回路存在平波电抗 器等故障限流器件,故直流线路故障电流较小,但由 于阀侧交流出口处电位被箝制为0,因此上桥臂的 子模块电容将产生极大的过电压,导致子模块电容 击穿,通过断开近端直流断路器可有效解决该问题。 而对于图2所示电容放电回路,下桥臂流过的故障 电流迅速增大,且无法通过断路器切断换流站与故 障点的联系,因此采取可靠的故障限流措施能有效 避免阀侧交流接地故障对换流站等一次设备造成严 重伤害,并降低对此类故障的保护要求。

### 2 换流站阀侧及直流线路故障电流限制方案 分析

故障限流器对输电系统造成的影响与其安装位 置有着不可分割的关系,在保证直流系统发生短路故 障时,故障限流器能有效地起到故障限流作用的前提 下,要满足对输电系统正常运行造成的影响最小或 者不造成影响。以图1(b)所示的双极 MMC-HVDC 系统故障为例,故障限流器安装位置可以分为直流 母线出口处、中性线路和接地极母线出口处,如图4 所示。图中:*i*<sub>CND</sub>为接地极电流,定义电流由母线流 向线路为正。本节将从各个方面详细分析这3处安 装位置的利弊,并给出最优安装方案。



□ 故障限流器

图 4 故障限流器安装位置示意图 Fig.4 Schematic diagram of installation position of fault current limiter

2.1 故障限流器安装于直流线路出口与中性线路处

故障限流器安装于直流母线出口与中性线路 上,这2处的故障限流器处于同一输电回路中,因此 对直流输电系统的影响无较大差别,传统的直流输 电工程也是在这2处配置平波电抗器。

当图4中f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>处发生短路故障时,由于两极参数对称,与单相接地故障相比,在忽略接地电阻的情况下,双极短路故障电流大小与单极接地故障下基本相同,可知当故障限流器安装在直流线路出口和中性线路时,对于单极接地故障和双极短路故障都能起到抑制故障电流的效果。当图4中f<sub>3</sub>处,即换流站阀侧发生交流接地故障时,不同于安装在中性线路处的故障限流装置,直流母线出口处的故障限流器不参与故障回路,无法抑制故障电流。考虑到在上述安装位置下,故障限流器与一次系统直接相连,将给输电系统正常运行带来额外的风险,从而降低供电的可靠性。另一方面,类似平波电抗器这类直接串入输电线路的故障限流装置,若其电感取值过大,则将导致系统响应速度变慢,甚至直流系统失稳,故其取值不能过大,故障限流效果受限。

#### 2.2 故障限流器安装于接地极母线出口处

接地极是真双极直流输电系统中不可或缺的重要组成部分,接地极线路一般为同塔架设的架空线路,在直流系统双极平衡运行时,接地极起箝制换流器中性点电位的作用。在双极不对称和单极大地回线运行方式下,接地极不但起箝制换流器中性点电位的作用,还为直流电流提供通路,接地极线路如附录A图A5所示。

当图4中f,处发生接地故障时,可知接地极与 故障点和换流站组成放电回路。当图4中f,处发生 双极故障时,故障电流并不流经接地极线路,故障限 流器在双极故障下失去作用。而考虑到直流系统双 极平衡运行时,理论上流过接地极的电流值为0,可 知引入接地极的故障限流器对直流系统的正常运行 基本没有影响,其抑制故障电流上升率的电感取值 可更大,对于单极接地故障的故障限流效果更好。 另一方面,对于直流架空输电线路而言,发生接地故 障的概率比极间短路故障高得多,加之正、负两极输 电线路相隔甚远,实际工程中可达到几十米,进一步 降低了双极故障的可能性[20-21]。若发生极间短路故 障,换流站一般闭锁停运并断开与交流系统的联系, 中断功率输送。当图4中f,处发生故障时,由第2节 的分析可知,下桥臂流过的故障电流上升快、幅值 大,而接地极参与构成故障回路,安装于接地极的故 障限流器能有效抑制该故障下的故障电流。由上述 分析可知,接地极线路引入限流器对大概率的单极故 障和换流站阀侧交流接地故障具有更好的限流效果, 且基本不对正常运行时的直流输电系统造成影响。

根据上述分析,故障限流设备集中安装在接地 极,安装成本少、对绝大部分故障都有较好的限流效 果,但故障限流器的安装方式不能忽略故障概率低 的故障类型,其应满足所有类型故障下对电流上升 率抑制的要求,因此本文推荐分散组合式安装方式, 即在正、负极母线出口和接地极线路均引入故障限 流设备。设接地极母线出口限流设备的容量为a, 直流母线出口限流设备容量为b,根据图4所示的故 障回路可知:a应满足阀侧交流接地故障、换流器内 部接地故障对电流上升率的要求,以防止过冲电流 损坏换流站等一次设备;a+b应满足单极故障对电 流上升率的要求;b应满足双极故障对电流上升率的 要求。虽然这种安装方式增加了故障限流设备的安 装成本,提高了故障限流设备控制的协同性要求,但 能满足输电系统对阀侧交流接地故障和直流侧故障 电流上升率的要求。

#### 3 新型故障限流器拓扑及其限流原理

理想的故障限流装置应在系统稳定运行下,具 有电流双向流动、通态损耗低等特点,而直流侧故障 下,为了保证速动性,故障限流装置一般完全由电力 电子器件控制。由第2节的分析可知,安装于接地 极处的故障限流装置能兼顾抑制正、负单极故障下 的电流上升率,有较好的经济性,且对系统稳态运行 影响小,但在单极故障下不可避免地会使中性点电 压偏移,造成健全极过电压。鉴于上述分析,本文提 出一种适用于一次回路及接地极线路的新型故障限 流器,使健全极承受的过电压在工程合理范围内。 新型故障限流器的拓扑如图5所示,其主要由2条支 路组成:支路1为由n个IGBT与二极管反并联的电 力电子器件组成的通流支路,LCS表示电流转移开 关;支路2由1对反并联的晶闸管T<sub>a</sub>和T<sub>b</sub>、限流电感  $L_r$ 及由k个电容器组串联等效的电容 $C_{eq}$ 和避雷器 (MOV)组成。



图 5 新型故障限流器拓扑示意图 Fig.5 Schematic diagram of novel fault current limiter topology

#### 3.1 故障限流原理

大量文献已针对故障限流器安装于直流母线出口处进行了分析。因此本文结合第2节的分析,将 新型故障限流器安装于接地极母线出口处,对其故 障限流原理进行讨论和分析。

新型故障限流器的工作模式分为正常模式、故 障模式、解锁模式,如表1所示。表中开关状态1、0分 别表示器件导通、关断。

表1	新型故障限流器在不同运行模式下的开关状态

Table1 Switch status of novel fault current limiter under different operation modes

		-		
运行博士		开关状态		
<b>运</b> 11 侯氏	LCS	T <sub>a</sub>	$T_{b}$	$\iota_{\rm GND}$
工告	1	0	0	>0
止市	1	0	0	<0
壮陸	0	0	1	>0
<b>以</b> 陧	0	1	0	<0
<i>佑民 左</i> 尚	1	0	0	>0
肝切	1	0	0	<0

将图5所示的新型故障限流器安装于接地极母 线出口处,其在3种运行模式下的示意图如图6所 示。图中:*i*<sub>h</sub>、*i*<sub>r</sub>分别为不平衡电流、故障电流。

正常运行时,故障限流器处于正常模式,LCS不动作,*i*<sub>b</sub>流过通流支路1,如图6(a)所示。发生正极接地短路故障后,当流过LCS的不平衡电流*i*<sub>b</sub>的幅



Fig.6 Schematic diagram of novel fault current limiter under three operation modes

值超过其临界值时,故障限流器转为故障模式,LCS 闭锁,与此同时,给T<sub>b</sub>施加导通信号,T<sub>b</sub>承受正向电 压将立即导通,电流转移到故障限流支路上,如图6 (b)所示,限流电感L<sub>f</sub>能有效抑制故障电流*i*<sub>f</sub>的上升 率,同时电容器组C<sub>eq</sub>吸收直流回路中的能量,使得 箝制点电位发生偏移,换流站出口对地电压迅速减 小,从而降低故障电流。当故障限流支路上的电压 增大到一定程度时,MOV将导通以耗散故障回路的 能量,避免故障限流支路过电压。断路器切除故障 后,流过故障限流支路的电流将降为0,故障限流器 转为解锁模式,如图6(c)所示,LCS解锁恢复导通, 将中性点电位箝制为0,以免造成健全极长时间过 电压。此时T<sub>b</sub>因承受反向电压而关断,电容器组储 存的故障能量继续通过MOV损耗。由上述分析可 知,故障限流支路能有效抑制回路故障电流的大小 和上升率,降低断路器两端的电压,减小断路器吸收 的能量,从而降低了对断路器的要求,有利于断路器 的迅速动作。

#### 3.2 带故障限流器的阀侧交流接地故障电流特性 分析

为分析带限流器的换流站阀侧交流故障电流, 以图4中f<sub>3</sub>处发生三相接地故障为例,带故障限流 器的简化运算电路如附录A图A6所示。由于IGBT 承受过流的能力有限,为了保证IGBT不被烧毁,一 般在故障电流大于IGBT额定电流的2倍时闭锁。 LCS闭锁电流*I*<sub>blim</sub>的取值一般大于正常负荷电流的 最大值,并保证有一定的裕度,可见*I*<sub>blim</sub>不会太大,为 了简化分析,近似认为每相下桥臂的等效激励与故 障时刻相同。由图A6可得到a相下桥臂为故障点 提供的故障电流*I*'<sub>dega</sub>(s)为:

$$I'_{\rm deg, a}(s) = \frac{\frac{u_{\rm na}(0)}{s} + L_0 i_{\rm na}(0)}{\frac{N_{\rm na}}{2C_0 s} + \frac{1}{C_{\rm eq} s} + (L_{\rm f} + L_0)s + R_0 + R_{\rm g}}$$
(17)

求解得式(17)的时域表达式为:

$$i'_{\rm deg,a}(t) = B'_1 e^{\theta'_1 t} + B'_2 e^{\theta'_2 t}$$
(18)

$$\begin{cases} \theta_{1}^{\prime} = \frac{-(R_{0} + R_{g}) + \sqrt{(R_{0} + R_{g})^{2} - 4\left(\frac{N_{na}}{2C_{0}s} + \frac{1}{C_{eq}s}\right)(L_{0} + L_{f})}}{2(L_{0} + L_{f})} \\ \theta_{2}^{\prime} = \frac{-(R_{0} + R_{g}) - \sqrt{(R_{0} + R_{g})^{2} - 4\left(\frac{N_{na}}{2C_{0}s} + \frac{1}{C_{eq}s}\right)(L_{0} + L_{f})}}{2(L_{0} + L_{f})} \end{cases}$$

$$(19)$$

$$B_{1}' = \frac{L_{0}i_{na}(0)\theta_{1}' + u_{na}(0)}{2(L_{f} + L_{0})\theta_{1}' + R_{0} + R_{g}}$$

$$L_{0}i_{na}(0)\theta_{2}' + u_{na}(0)$$
(20)

$$\begin{bmatrix} 2 & 2(L_{\rm f} + L_0)\theta_2' + R_0 + R_{\rm g} \\ - R_{\rm g} & - R_{\rm g} \end{bmatrix}$$

同理可得b、c相下桥臂为故障点提供的短路 电流。

从式(17)、(18)中可看出,L<sub>f</sub>值越大,C<sub>eq</sub>值越 小,对于故障电流的抑制效果越好,然而,一方面,过 大的电感值或过小的电容值会导致过电压的问题, 从而危及支路上的半导体器件,也会给系统造成安 全隐患;另一方面,冗余的设计造成了不必要的浪 费,降低了经济性。工程中对平波电抗器电感值的 选取是通过逐步优化性能价格来确定最优参数的过 程,平波电抗器的选取原则一般为:在满足主要性能 要求的前提下,希望平波电抗器电感越小越好。限 流阻抗参数受直流电压等级、网络拓扑结构、系统调 节速度、经济效益等多方面约束,选取原则不尽相 同。综合上述分析,本文从抑制阀侧交流接地故障与 直流侧故障下的电流上升率方面考虑,提出如下选 取原则:在将故障电流上升率抑制到满足直流断路 器切断容量的条件下,L<sub>t</sub>值尽量小、C<sub>eq</sub>值尽量大。

#### 4 仿真验证

利用 PSCAD / EMTDC 搭建如图 1(b)所示的 ±320 kV 双端直流输电系统仿真模型,其中 MMC<sub>1</sub>、 MMC<sub>2</sub>为定直流电压和定交流电压控制,MMC<sub>3</sub>、 MMC<sub>4</sub>为定有功功率和定交流电压控制。换流器采 用半桥子模块且参数一致,单个换流站主回路参数 如附录 A 表 A1 所示。直流故障电流上升快、幅值 大,考虑故障限流器时,保护需要在 1~3 ms 内出口 动作<sup>[2]</sup>,目前性能较好的混合式 DCCB 的动作时间约 为 3~5 ms,可认为清除故障电流的极限时间为 8 ms, 因此要保证该时间段内故障电流小于换流站闭锁 值。结合模型参数,取直流线路电流 *i*<sub>bik</sub>=12 kA 为换 流站闭锁电流。

#### 4.1 换流站阀侧交流接地故障特性分析

为验证前文理论分析的正确性,取L<sub>r</sub>=100 mH, C<sub>eq</sub>=0.4 mF,对5 ms时刻发生MMC<sub>1</sub>阀侧交流三相接 地故障进行仿真,结果如附录A图A7所示。由图可 见,仅依靠平波电抗器抑制故障电流时,MMC<sub>1</sub>下桥 臂放电提供的阀侧故障电流*i*<sub>deg</sub>上升速率快、幅值 大,在接地极母线出口处引入限流器后,电流峰值为 6 kA 左右,能有效地抑制换流站阀侧交流接地故障 所产生的冲击电流,并有利于加快换流站闭锁后故 障电流衰减,缩短换流站重启时间;故障电流的计 算曲线与仿真曲线基本吻合,验证了本文理论分析 的正确性。

#### 4.2 故障限流器不同安装位置处的故障限流效果 对比

1)故障限流器安装于直流线路出口。

为了验证本文故障限流器的效果,设故障发生 在直流母线出口处,根据正常运行时的负荷电流设 置 *I*<sub>blim</sub>=4 kA, MOV 动作电压设置为100 kV。结合 第4节的分析,分别选取2组参数进行对比:

1) $C_{eq}$ =0.4 mF, $L_{f}$ 分别取为50、100、150 mH;

2)L<sub>f</sub>=100 mH, C<sub>eq</sub>分别取为0.2、0.4、0.6 mF。

将本文故障限流器安装于直流母线出口处时, 上述2组参数下*i*<sub>de</sub>的仿真结果如附录A图A8所示。 图中,故障电流超过闭锁值的部分用虚线表示。由 图可见,仅依靠平波电抗器抑制故障电流时,故障极 电流在4ms时就达到了闭锁值。由此可知,仅依靠 平波电抗器来限制故障电流的上升率达不到理想的 效果,尤其对于高电压、大容量的输电系统,其短路 故障也更加严重,在直流断路器技术受限的情况下, 有必要采取有效可行的限流方法与断路器相配合。 当极线电流达到 I<sub>blim</sub>时,LCS中的 IGBT 闭锁,故障电流转移到限流支路上,随着限流电感 L<sub>i</sub>的增大,故障 电流的上升率越来越小; C<sub>eq</sub>值越小,故障电流的峰 值越小,其到达闭锁值的时间越长。可见本文的故 障限流装置能有效延长闭锁时间,降低了对断路器 动作时间的要求。

2)故障限流器安装于接地极母线出口。

正常运行时,通流支路电流近似为0,这说明*I*<sub>blm</sub> 设定值可以更小,设安装于接地极母线出口处的故障 限流器的*I*<sub>blm</sub>=2kA,有利于故障限流器的快速动作。 将本文故障限流器安装于直流母线出口处时,上述 2组参数下*i*<sub>dc</sub>的仿真结果如附录A图A9所示。比较 图A8、A9可知,在故障限流器参数相同的情况下,2 种安装位置的故障限流仿真效果基本相同,这是因 为在单极接地故障下,2种安装位置的故障限流器 作用于相同的电流通路。考虑到单极接地故障切除 后,系统转变为单极运行模式,相应地,此时接地极 线路将流过单极运行模式下的负荷电流,此时安装 于接地极线路上的故障限流器与安装在直流线路上 的故障限流器的LCS闭锁值应一致,即*I*<sub>blm</sub>=4kA。

在发生单极接地故障时,引入接地极线路上的 故障限流器将导致中性点箝制电位偏移,不可避免 地对健全极造成过电压,但并不改变换流站出口与 中性点的电压差,即不改变桥臂电容电压,而短时间 的暂态过电压并不会对健全极及其他一次设备造成 危害。接地极母线出口处不同参数的故障限流器的 暂态过电压比较如附录A图A10所示。若确认故障 切除后,故障限流器由故障模式转变为解锁模式, 考虑断路器的极限切除时间,假设该过程不超过 20 ms,则从故障发生到恢复供电过程所造成的暂态 过电压不超过20 ms。从图中可以看出, Cen值越小, 限流两端电压越高,对中性点箝制电位产生的偏移 越大,因此故障极换流站出口对地电压越低,可有效 降低故障电流的峰值,并能有效维持故障极线路电 压,降低断路器两端的电压,保护了断路器中的电力 电子器件,降低了断路器对MOV设计参数的要求。

#### 5 结论

本文分析了换流站阀侧交流接地故障下,换流 站侧提供的故障电流分量,从供电可靠性和限流效 果等方面,提出了一种换流站阀侧交流接地故障电 流快速抑制方案,通过分析和仿真得到如下结论:

1)接地极在高概率的架空线路单极故障和换流 站阀侧交流接地故障中参与了故障回路,且在正常 运行时没有电流流过,不会影响系统的正常运行,故 提出将故障限流装置安装于接地极母线出口,从而 有效抑制单极线路故障和阀侧交流接地故障电流, 降低对直流线路保护及换流站保护的要求; 2)提出了在正、负极母线出口和接地极母线出口均引入故障限流器的分散组合式安装方式,实现 了直流侧各种短路故障及阀侧交流接地故障下的最 优限流效果;

3)在发生单极接地故障时,引入接地极线路上 的限流器,会造成中性母线电压和健全极存在短时 过电压,但不会造成电力电子器件过电压,因此,针 对此情况只需提高靠近换流站端线路的绝缘水平 即可。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1]汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J].智能电网,2016,4(2):116-123.
   TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy interconnection[J]. Smart Grid,2016,4(2):116-123.
- [2] 宋国兵,侯俊杰,郭冰,等. 计及主动故障限流策略的柔性直流 电网纵联保护[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):123-131,138.
   SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4): 123-131,138.
- [3] 刘海金,李斌,温伟杰,等.柔性直流系统的线路保护关键技术 与展望[J].电网技术,2021,45(9):3463-3480.
   LIU Haijin,LI Bin,WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology,2021,45(9):3463-3480.
- [4] 李斌. 柔性直流系统故障分析与保护[M]. 北京:科学出版社, 2019:1-9.
- [5] 安娜,東洪春,郭瑜,等. 基于感性模糊识别的 MMC 直流输电线路单极接地故障分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):71-77.
  AN Na,SHU Hongchun,GUO Yu, et al. Single pole-to-ground fault analysis of MMC DC transmission lines based on inductance fuzzy identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):71-77.
- [6] 贺之渊,陆晶晶,刘天琪,等. 柔性直流电网故障电流抑制关键 技术与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(2):173-183.
  HE Zhiyuan,LU Jingjing,LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45 (2):173-183.
- [7] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2017: 1-24.
- [8] 董新洲,汤涌,卜广全,等.大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3119.
  DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(11): 3107-3119.
- [9] LI Chengyu, GOLE A M, ZHAO Chengyong. A fast DC fault detection method using DC reactor voltages in HVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2254-2264.
- [10] 国网宁夏电力有限公司检修公司. 特高压直流保护原理与典型案例分析解析[M]. 北京:中国电力出版社,2019:261-264.
- [11] LI Gen, LIANG Jun, MA Fan, et al. Analysis of single-phase-

to-ground faults at the valve-side of HBMMCs in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3):2444-2453.

- [12] 张翀,邱清泉,张志丰,等. 直流混合型断路器与直流故障限流器的匹配研究[J]. 电工电能新技术,2016,35(9):21-28.
   ZHANG Chong, QIU Qingquan, ZHANG Zhifeng, et al. Study on coordination of DC hybrid circuit breaker and DC fault current limiter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2016,35(9):21-28.
- [13] NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. An adaptive fault current limiting control for MMC and its application in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 920-921.
- [14] LI Xiaoqian, LI Ziming, LI Ziming, et al. HVDC reactor reduction method based on virtual reactor fault current limiting control of MMC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12):9991-10000.
- [15] FU Zhengzheng, SIMA Wenxia, YANG Ming, et al. A mutualinductance-type fault current limiter in MMC-HVDC systems
   [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5):2403-2413.
- [16] 郭晓茜,崔翔,齐磊.架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J].中国电机工程学报,2017,37(8):2177-2185.
   GUO Xiaoqian,CUI Xiang,QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(8):2177-2185.
- [17] 王振浩,张力斌,成龙,等. 一种具备限流功能的混合式高压直流断路器[J]. 电网技术,2021,45(5):2042-2049.
  WANG Zhenhao, ZHANG Libin, CHENG Long, et al. Hybrid high voltage DC circuit breaker with current limiting function [J]. Power System Technology,2021,45(5):2042-2049.
- [18] 李浩原,周国梁,王刚,等. 柔直电网阀侧单相接地故障过电压 产生及影响因素研究[J]. 电力工程技术,2021,40(4):34-41.

LI Haoyuan, ZHOU Guoliang, WANG Gang, et al. Analysis of single-phase-to-ground fault overvoltage at the valve-side of HB-MMCs in bipolar HVDC systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 34-41.

[19] 茆书睿,徐政,杨健,等. 交流系统短路故障下 MMC 对短路电 流的影响及抑制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(12): 134-142.

MAO Shurui, XU Zheng, YANG Jian, et al. Influence analysis and control strategy of MMC on AC short circuit current under short circuit fault of AC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):134-142.

- [20] 杨赛昭,向往,文劲宇.架空柔性直流电网线路故障保护综述
   [J].中国电机工程学报,2019,39(22):6600-6617.
   YANG Saizhao,XIANG Wang,WEN Jinyu. Research on DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6600-6617.
- [21] 董新洲,汤兰西,施慎行,等.柔性直流输电网线路保护配置方案[J]. 电网技术,2018,42(6):1752-1759.
   DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology,2018,42(6):1752-1759.

#### 作者简介:



束洪春(1961—),男,教授,博士研究 生导师,主要研究方向为电力系统新型继电 保护与故障测距、故障录波、数字信号处理 应用等(E-mail:kmshc@sina.com);

单节杉(1979—), 男, 副教授, 博士研究生, 通信作者, 主要研究方向为电力系统 新型继电保护与控制(E-mail: 736495310@qq. com)。

束洪春

(编辑 任思思)

# Fast suppression scheme of AC valve side grounding fault current in converter station

SHU Hongchun, REN Min, SHAN Jieshan, TIAN Xincui, BO Zhiqian

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Under the AC valve side grounding fault in the converter station, the fault point forms a fault circuit with the lower bridge arm through the grounding electrode. The fault impulse current is too large to be removed through the circuit breaker. The analysis shows that when the grounding electrode runs symmetrically there is basically no current flowing through it, and provide a fault circuit in the single-pole overhead line fault and the AC valve side grounding fault in the converter station. Therefore, introducing fault current limiting device into grounding electrode not only has no impact on the normal operation of the system, but also can effectively suppress the single-pole fault current and AC valve side grounding fault current, and reduce the requirements for DC line protection and converter station protection. The composition of fault current under AC valve side grounding fault is analyzed. The advantages of introducing current limiter into grounding electrode are analyzed from the aspects of power supply reliability and current limiting effect. A decentralized combined installation method of current limiter is proposed, which uses the combined input of capacitor bank and current limiting inductor to realize a novel topology of fault current limiter to absorb energy in the circuit and suppress the rise rate and peak value of fault current. A two terminal flexible DC transmission system is built on PSCAD / EMTDC platform. The simulative results verify the superiority of the installation position of grounding electrode and the effectiveness of the novel current limiter.

Key words: overhead flexible DC power grid; AC valve side grounding fault; fault current characteristics; grounding electrode; fault current limiting

## 附录 A



图 A1 ±800kV 变压器穿墙套管 Fig.A1 ±800kV transformer through wall bushing



图 A2 套管防爆膜脱落实物图 Fig.A2 Physical diagram of casing explosion proof film falling off



 $R_0$ 一桥臂等效电阻,  $L_0$ 一桥臂电感,  $C_0$ 一子模块电容值,  $N_{nj}$  (j=a, b, c)一故障时 j 相下桥臂投入的子模块总个数

  $u_{nj}$  (0) (j=a, b, c) 一故障时刻 j 相下桥臂等效电容电压,  $i_{nj}$  (0) (j=a, b, c) 一故障时刻 j 相下桥臂瞬时电流,  $R_g$ 一接地极等效电阻

 图 A3 △侧接地故障下桥臂、接地极与故障点的等效电路

Fig.A3 Equivalent circuit of bridge arm, grounding electrode and fault point under  $\triangle$  side grounding fault







图 A5 接地极线路 Fig.A5 Grounding electrode circuit



	-	
	数值	
换流器额	1500	
网侧	175	
	320	
	额定容量/ (MV・A)	900
法拉杰厅盟	电压比	230/175
廷按文述奋	短路阻抗%	10.5
子植	8.5	
单个	76	
子	5.1	
;	50	
ㅋ	100	

表 A1 换流站主回路参数 TableA1 Main circuit parameters of converter station



Fig.A7 Theory and simulation verification results of AC valve side fault current  $i_{deg}$ 



Fig.A8 Comparison of current limiting effects among different parameters under single-pole grounding fault



Fig.A9 Comparison of current limiting effect of different parameters of current limiting device located on grounding electrode bus



Fig.A10 Comparison of transient overvoltage of current limiter with different parameters at outlet of grounding electrode bus