

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230042

不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案

陈田田, 赵振廷, 李银红

(华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 现阶段柔性直流电网线路保护大多依赖边界元件, 不适用于线路间无明显边界的“网孔结构”柔性直流电网。针对此类电网在远距离输电场景下的线路保护问题, 提出了一套不依赖于边界元件的反时限过流保护配置方案。首先, 通过分析故障电流的暂态特性, 确定了不同故障位置下保护配置的思路。然后, 基于保护要求, 利用故障电流的波头特征, 构造电阻补偿系数保证方案的耐过渡电阻能力, 建立了适用于柔性直流电网故障特性的反时限过流保护动作方程, 并确定了延时的计算和整定原则。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了该方案的有效性和适用性。结果表明, 所提方案能够准确、可靠地识别故障, 具有较强的耐过渡电阻能力。

关键词: 柔性直流电网; 边界元件; 反时限过流保护; 电阻补偿系数

Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power grid independent of boundary components

CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinghong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, the line protection of a flexible DC grid mostly depends on boundary components. This is not suitable for a "mesh structure" flexible DC grid with no obvious boundary between lines. Given the problem of line protection in long-distance transmission, an inverse time overcurrent protection configuration scheme independent of boundary components is proposed. First, by analyzing the transient characteristics of fault current, the requirements of protection configuration in different fault locations are determined. Then, based on protection requirements and using the wave head characteristics of fault current, the resistance compensation coefficient is constructed to ensure the resistance to transition resistance of the scheme. The action equation of inverse time overcurrent protection suitable for the fault characteristics of a flexible DC grid is established, and the calculation and setting principle of time delay are determined. Finally, the effectiveness and applicability of the scheme are verified based on the PSCAD/EMTDC simulation platform. The results show that the proposed scheme can accurately and reliably identify faults and has strong resistance to transition resistance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207107).

Key words: flexible DC grid; boundary components; inverse time overcurrent protection; resistance compensation coefficient

0 引言

近一个世纪以来, 二氧化碳等温室气体的过量排放引发的气候变暖、海平面上升等环境问题日益突出。我国作为碳排放的主要来源国之一, 推动能源消费清洁低碳化是实现“碳达峰、碳中和”目标

的重要举措^[1-2]。电力占据着能源体系的主导地位, 构建以新能源为主体的新型电力系统是我国电力系统转型升级的重要方向。为提高电力系统对新能源的消纳能力, 柔性直流电网技术应运而生^[3-5]。

然而, 柔性直流电网技术目前尚未完全成熟, 仍面临着许多技术难题^[6]。与交流电网故障特性不同, 柔性直流电网为低惯性网络, 故障时电流上升速度快、幅值大, 而换流站内的电力电子器件承受电流能力有限, 故保护动作时间要求在毫秒级, 现

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207107); 广西电网公司科技项目资助(046000KK52222012)

有交流保护方案难以直接应用于柔性直流电网。因此, 线路保护成为亟待解决的难题之一^[7-9]。

不同于多端柔性直流系统, 直流电网是具有“网孔结构”的输电系统, 即换流器之间有多回联络线路, 直流线路拥有冗余回路^[10], 保护设计除考虑速动性外, 还须更多地考虑选择性。现有柔性直流工程多在线路两端加装限流电抗器, 限制短路电流的同时也在相邻线路间构造了边界, 为保护选择性的实现提供了突破口^[11-13]。基于该边界特征, 国内外学者提出了一系列具有良好性能的边界保护原理^[14-18]。但随着电网规模的不断扩大, 若在每条线路两端都加装限流电抗器, 则不利于电网的经济性^[19], 而将限流电抗器集中布置于换流站出口的方式能有效平衡限流需求和经济性之间的矛盾。然而, 线路边界元件的缺失也对保护提出了新挑战, 即在不依赖边界元件的前提下实现保护选择性。

文献[20]借助 Hausdorff 距离算法, 利用故障与非故障线路两侧同名行波及异名行波图形学的匹配差异性, 实现了一种不依赖同步对时的差动保护; 文献[21]提出一种基于正向行波与反向行波幅值积分比的纵联保护方案, 线路两侧通过交换逻辑信号识别区内故障; 文献[22]利用线模行波传播时衰减分量和初始量的比值构造距离保护判据, 并与纵联保护配合识别远端故障。以上文献借助纵联保护较好地解决了保护对边界元件的依赖问题。然而, 纵联保护的速动性受线路长度限制, 对通信系统可靠性的要求也较高。文献[23]基于零-线模行波的波速差提出了一种就地测距式保护方法, 通过近故障端向对侧发送加速信号的方式解决保护死区问题, 无须等待对侧信号, 与纵联保护相比缩短了通信延时, 但仍依赖通信系统的可靠性。

本文以限流电抗器集中布置于换流站出口的柔性直流电网为研究对象, 基于行波理论推导其故障电流暂态特性, 分析了不同故障位置下保护配置思路: 近端故障以速动性为主, 远端故障以选择性为主; 通过构造电阻补偿系数提高保护的耐过渡电阻能力, 结合电压加速判据, 完成了不同于交流保护、适用于柔性直流电网故障特性的反时限过流保护配置方案, 并给出了延时的计算原则与整定原则。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了该方案的有效性, 并与有边界元件的网络进行对比, 分析了保护的适用性。

1 直流线路故障等值电路及行波理论

限流电抗器集中布置于换流站出口处的柔性直

流电网拓扑结构如图 1 所示。换流站采用双极结构, 每条线路两端均设有直流断路器。图中, R_{ab} 为线路 $a-b$ 的直流断路器和继电保护装置; F_{ab} 为线路 $a-b$ 故障; F_a 为母线 a 故障。以 R_{12} 为例, F_{12} 为区内故障, R_{12} 应动作; F_2 、 F_{23} 为区外正向故障, F_1 和 F_{13} 为反向故障, R_{12} 不应动作。

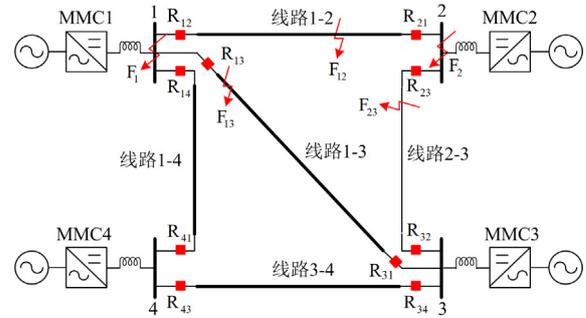


图 1 柔性直流电网拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of VSC-HVDC

1.1 线路故障等值电路

对于双极结构的直流输电线路, 正、负极线路间存在耦合, 可通过相模变换进行解耦, 得到 1 模分量和 0 模分量。解耦后输电线路模域结构与单极系统结构相同。本文主要基于受线路分布参数影响小的 1 模分量进行讨论。以正极接地故障为例, 解耦后故障边界条件的模域表达式如式(1)所示, 对应的模域等值电路见附录 A 图 A1, 由此可解得故障端口初始电压、电流幅值, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_{f1} + U_{f0} = -\sqrt{2}U_f + 2I_{f1}R_f \\ I_{f1} = I_{f0} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{f1} = \frac{-\sqrt{2}U_f}{Z_{C1} + Z_{C0} + 4R_f} \\ I_{f1} = \frac{2\sqrt{2}U_f}{Z_{C1} + Z_{C0} + 4R_f} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{f1} 、 I_{f1} 分别为故障端口的 1 模电压、电流; U_{f0} 、 I_{f0} 分别为故障端口的 0 模电压、电流; U_f 为故障前线路额定电压; R_f 为过渡电阻; Z_{C1} 、 Z_{C0} 分别为 1 模、0 模波阻抗。

1.2 故障行波理论

输电线路某一点发生故障时, 可等效为在该点叠加一故障电压源, 其产生的故障行波由故障点向线路两侧传播。故障行波在故障点和线路端口发生折、反射, 如图 2 所示, 各节点折、反射系数可用彼得逊等效电路进行计算, 图中 i_+ 为彼得逊等效电

流源幅值, i 、 i_R 为支路电流, 结果如式(3)和式(4)所示。

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{i_R}{i_+} = \frac{Z_{C0} + 4R_f}{Z_{C0} + Z_{C1} + 4R_f} \\ \beta_f = 1 - \frac{i}{i_+} = -\frac{Z_{C1}}{Z_{C0} + Z_{C1} + 4R_f} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{i}{i_+} = \frac{2[(k-1)Z_s + Z_{C1}]}{kZ_s + Z_{C1}} \\ \beta_1 = 1 - \alpha_1 = -\frac{(k-2)Z_s + Z_{C1}}{kZ_s + Z_{C1}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_f 、 β_f 分别为发生单极接地故障时故障点处的折射系数、反射系数; α_1 、 β_1 分别为线路边界的折射系数、反射系数; k 为换流站出线数; $Z_s = sL_{dc} + Z_m$, s 为拉普拉斯算子, L_{dc} 为限流电抗器电感值, Z_m 为换流站等效阻抗。

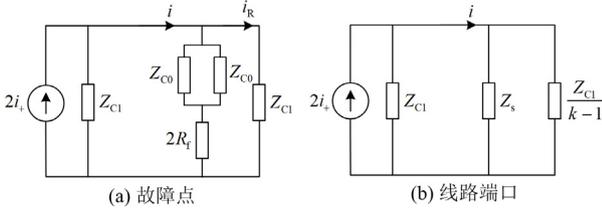


图2 彼得逊等效电路

Fig. 2 Peterson equivalent circuit

2 区内外故障电流特性及保护配置思路

对于限流电抗器装设于换流站出口的“网孔结构”柔性直流电网而言, 边界元件的缺失使得线路两端故障行波的反射效应减弱、透射效应增强, 电流增长不再呈现规律的“阶梯式”。同时, 受换流站结构高度非线性的影响, 也难以对故障电流进行长时间的精确求解。因此, 本节主要基于行波理论对故障电流的整体发展趋势进行分析。

2.1 区内故障

如图3所示, 线路1-2长 l , 以端口1的保护 R_{12} 为例, 故障距离为 L_f , 行波初始幅值为 I_0 , 传播速度为 v , 则故障电流波由故障点到达线路两端的时间分别为: $\tau_1 = L_f/v$, $\tau_2 = (l-L_f)/v$ 。线路两端的折、反射系数分别为 α_{11} 、 β_{11} 和 α_{12} 、 β_{12} 。基于第1节的推导, 图中故障行波均为1模分量。

设故障在0 ms时刻发生, 对于线路任意一端, 其端口实际电流主要为本侧故障首行波与对侧折射波发生多次折、反射的叠加。由于故障首行波近似阶跃波, 忽略波形畸变, 故障后端口1的电流 $i_1(t)$ 可表示为式(5)。

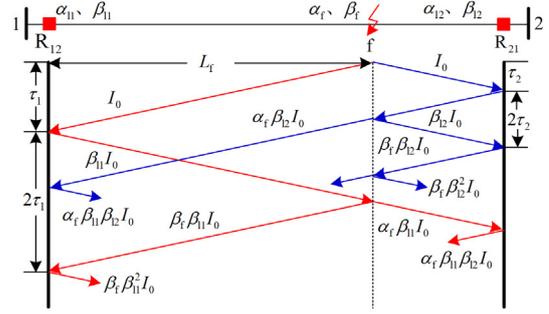


图3 故障电流波折、反射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fault current refraction and reflection

$$i_1(t) = i_{1q}(t) + i_{2a}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_{11} (\beta_f \beta_{11})^j I_0 \varepsilon[t - (2j+1)\tau_1] + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_f \beta_{12} \alpha_{11} (\beta_f \beta_{11})^j I_0 \varepsilon[t - 2m\tau_2 - (2j+1)\tau_1] \quad (5)$$

式中: $i_{1q}(t)$ 为端口1侧故障首行波及其折、反射波之和; $i_{2a}(t)$ 为端口2侧折射波及其折、反射波之和; j 为到达端口1的本侧故障行波序列号; m 为到达端口1的对侧故障行波序列号; $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数。

1) 近端故障($L_f \leq 0.5l$)

当 L_f 较小时, 在端口2的折射波到达本端口前, 端口电流 $i_1(t)$ 主要受本侧故障首行波及其折、反射波的影响。故障位置越接近端口, 折、反射间隔越短, 即 $\tau_1 \rightarrow 0$, $\tau_2 \gg \tau_1$ 。在故障后一定的时间内, 端口1的电流表达式可简化为

$$i_1(t) \approx i_{1q}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_{11} (\beta_f \beta_{11})^j I_0 \varepsilon[t - (2j+1)\tau_1] = \alpha_{11} I_0 \frac{1 - (\beta_f \beta_{11})^j}{1 - \beta_f \beta_{11}} \varepsilon(t) \quad (6)$$

由于短时间内可发生多次折、反射, j 较大, 且 $|\beta_f|$ 、 $|\beta_{11}|$ 均小于1, 式(6)还可进一步简化为

$$i_1(t) \approx \alpha_{11} I_0 \frac{\varepsilon(t)}{1 - \beta_f \beta_{11}} \approx KI_0 \varepsilon(t) \quad (7)$$

式中, K 为斜率。

2) 远端故障($L_f > 0.5l$)

故障发生后, 本侧故障首行波在 τ_1 时刻到达, 对侧故障行波在 $(\tau_1 + 2\tau_2)$ 时刻到达, 则在对侧故障行波到达前, 本侧首行波波头 $I_{1q0} = \alpha_{11} I_0 \varepsilon(t)$, 持续时间为 $2\tau_2$, 波形近似为阶跃波。之后, 本侧行波 $i_{1q}(t)$ 继续在端口1和故障点之间传播并发生, 间隔 $2\tau_1$ 回到端口1。由附录A图A2可得, 限流电抗器

集中布置于换流站出口时, $\alpha_{11} \geq 1$ 、 $\beta_{11} \leq 0$, 线路边界的透射效应明显, 而反射效应较弱。因此, 除故障首行波外, 受反射系数 $(\beta_f \beta_{11})^j$ 的影响, 电流增量逐渐减小, 并不再有明显的阶跃现象。

同时, 对侧行波 $i_{2a}(t)$ 以 $2\tau_2$ 的时间间隔到达端口 1。由式(3)可得, $\alpha_f > 0$ 、 $\beta_f < 0$, 因此 $i_{iq}(t) > 0$, $i_{2a}(t) < 0$, 对侧行波抑制电流上升。随着 x 的增加, τ_1 增大, 本侧行波发生折、反射的时间间隔越长, $i_{iq}(t)$ 增长越缓慢; 而 τ_2 减小, $2\tau_1$ 内叠加的对侧行波越多, 抑制作用增强。因此, 故障距离越远, 电流增长越缓慢, 故障电流斜率越小。

3) 过渡电阻

由式(2)、式(3)可知, I_0 、 β_f 随过渡电阻增大而减小, α_f 随过渡电阻增大而增大。对 $i_{iq}(t)$ 而言, 过渡电阻的增加使得其幅值下降; 对 $i_{2a}(t)$ 而言, 由于 α_f 增大, 相对 $i_{iq}(t)$ 的抑制作用增强。因此, 端口电流 $i_1(t)$ 的幅值和上升斜率随过渡电阻增大而下降。

综上所述, 发生不同位置的区内故障时, 故障电流的增长特性如图 4 所示, 其中红、绿色虚线为电流上升时的近似斜率。可以看出, 近端故障下电流近似以斜率 K 直线上升, 随故障距离增加电流斜率逐渐减小, 受 $i_{2a}(t)$ 影响, 远端高阻故障下电流斜率可能小于 0。

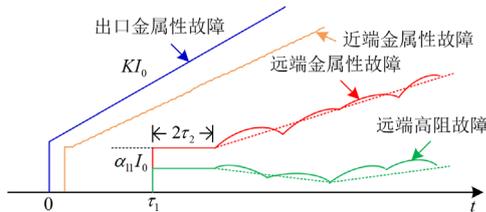


图 4 故障电流增长特性

Fig. 4 Fault current growth characteristics

2.2 区外故障

如图 5(a)所示, 当线路两端无边界元件时, 对保护 R_{12} 而言, 线路末端故障 F_{12} 、母线故障 F_2 以及正向区外故障 F_{23} 在电气上近似为同一点, 故障突变量小, 故障特征无明显差异, 难以区别。

但是, 故障 F_2 、 F_{23} 可通过母线保护、线路保护 R_{23} 迅速切除。以 F_{23} 为例, 如果 R_{12} 能够在时间上晚于母线保护、线路保护 R_{23} 动作, 则在故障切除后, 根据叠加原理, 相当于有一幅值为负的故障行波传播至 R_{12} , 如图 5(b)所示, R_{12} 处的故障电流将下降并反向, 基于此变化可使 R_{12} 返回。因此,

在线路无明显边界的情况下, 可以考虑通过保护间的配合实现区外故障的有效识别。

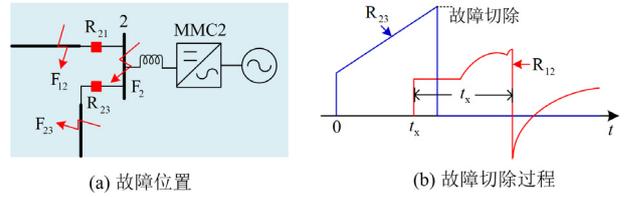


图 5 故障位置及故障切除示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fault location and fault removal

2.3 保护配置思路

由上述分析可得, 线路两端无边界元件时, 区内故障下, 电流增长过程阶跃性减弱, 且故障电流上升速率随故障距离增加呈单调下降的特性。而且, 仅测量单侧信息时, 区内末端故障和区外首端故障具有故障特性连续的特点, 识别难度大。

但是, 从电网安全运行的角度来看, 发生区内近端故障时, 故障电流上升速度快、幅值大, 换流器易闭锁, 须快速切除以免造成功率丢失; 发生区内末端故障时, 电流上升速率较慢, 换流器闭锁时间长, 切除速度可适当放缓。换流器闭锁时间与短路电流的关系见附录 A 式(A2)。考虑到区外首端故障对于相邻线路首端保护来说, 是区内近端故障, 相邻线路保护总是能够快速识别并切除故障。这就给有效区别区内末端故障和区外首端故障提供了空间。

针对以上电流特性, 可借鉴交流保护中反时限过流保护的動作特性进行保护配置: 大电流下延时短, 保护快速动作; 小电流下延时长, 保护切除速度适当放缓; 本侧保护与对侧相邻线路首端保护通过延时进行配合, 保证区外故障切除的选择性。

3 反时限过流保护配置方案

3.1 反时限过流保护动作方程

反时限过电流保护作为一种简单且常见的过电流保护, 基于短路电流的大小调节保护的動作时限, 以达到近端故障快速切除, 远端故障选择性切除的效果^[24]。然而, 目前国内外常用的反时限保护均基于交流系统故障特性, 動作方程和整定计算原则则完全无法满足柔性直流电网的保护需求。交流保护通用的反时限数学模型如式(8)所示。

$$T_{op}(I_f) = \frac{A}{(I_f / I_p)^r - 1} \quad (8)$$

式中: T_{op} 为保护動作延时; I_f 为故障电流; A 为时间常数; I_p 为保护启动电流; r 为决定反时限動作曲线陡度的系数, 取值通常为 0~2。

由式(8)可得,传统交流保护中采用稳态故障电流 I_f 作为反时限方程变量。而在柔性直流电网中,基于速动性要求,保护在故障暂态过程中就要动作。因此,在直流保护中,应选用故障电流暂态分量代替稳态故障电流,此外为保证故障分量为 0 时延时无限大,式(8)可改写为

$$T_{op}(I_{f1}) = \frac{A}{(\Delta I_{f1}/I_b)^r} \quad (9)$$

式中: I_b 为正常工况下的 1 模电流; 1 模故障电流分量 $\Delta I_{f1} = I_{f1} - I_b$ 。

3.2 电阻补偿系数

除故障位置外,过渡电阻也是影响短路电流大小的重要因素。在同一故障位置,过渡电阻越大, ΔI_{f1} 越小,保护的延时越长,不利于故障的快速切除。由于 1 模分量色散程度小、波形稳定,在传播过程中的衰减很小,因此首行波幅值主要由过渡电阻决定,如式(2)所示。为补偿过渡电阻造成的故障电流幅值衰减的部分,定义电阻补偿系数 K_R 为

$$K_R = K_c \frac{\Delta I_{f1}^{(0)}}{\Delta I_{f1}} \Big|_{t=t_0} \quad (10)$$

式中: K_c 为误差系数,取值范围为 1.0~1.3; t_0 为行波到达时刻; $\Delta I_{f1}^{(0)}$ 为线路发生金属性短路时 t_0 时刻的故障电流分量。

考虑电阻补偿系数后,反时限过电流保护的動作方程最终的表达式如式(11)所示。

$$T_{op}(I_{f1}) = \frac{A}{[K_R \Delta I_{f1}/I_b]^r} \quad (11)$$

3.3 延时的计算与整定

1) 计算原则

与基于故障稳态电流的反时限保护不同,暂态过程中延时随故障分量的变化而变化。为提高保护速动性和计算效率,本方案采取等间隔计算的方式,以保证延时最短。由 2.1 节的分析可知,对于远端非金属性故障,本侧电流上升斜率可能小于 0。为避免电流的短时下降造成延时反向增大,提高速动性并减少计算结果的波动,延时的计算选取方法与保护动作原则如下。

(1) 将保护检测到启动信号的时刻标定为行波到达的初始时刻 t_0 , 计算此时的 K_R 。采样频率以实际工程中常用的 10 kHz 为参考标准,并考虑整体的计算量以及每次计算后的比较、重设过程,以两次采样间隔为一次计算间隔,即按照 $\Delta t = 0.2$ ms 的时间窗依次计算当前时刻的延时。

(2) 将第 n 次的计算结果 $T_{op}^{(n)}$ 与第 $n-1$ 次的计

算结果 $T_{op}^{(n-1)}$ 进行比较,取最小值。

(3) 若 $T_{op}^{(n)} < n\Delta t$, 则保护直接动作; 若 $n\Delta t < T_{op}^{(n)} < (n+1)\Delta t$, 停止计算,保护在 $t = t_0 + T_{op}^{(n)}$ 时刻动作。等待延时期间,若故障被切除,本线路故障电流将下降并反向,即 $\Delta I_{f1} < 0$, 保护返回并闭锁。

2) 整定原则

由于极间故障和单极接地故障的短路电流幅值差异较大,且极间故障下过渡电阻一般较小。若仅按一种故障类型进行整定,则难以完全满足另一种故障类型下的保护需求。因此,本方案针对不同故障类型采用不同的整定值,基于极间故障无 0 模电流,故障类型的判别式如式(12)所示。

$$\Delta I_{f0} > \varepsilon_{set} \quad (12)$$

式中: ΔI_{f0} 为故障时 0 模电流的增量; ε_{set} 为 0 模电流变化量整定值,小于正常工况下电流波动量。

对于区外最严重故障,即相邻线路首端发生金属性故障,故障线路首端保护可立即出口,直流断路器动作时间可取典型值 2.5 ms,则本线路正向保护在该故障下的最短延时须大于 3 ms; 对于区内故障,最长延时对应的电流幅值为故障电流首行波波头幅值 I_{1q0} 。一般而言,当流经电力电子器件的电流瞬时值达到器件额定电流的两倍时,换流器将闭锁。对于长线故障,故障电流相对较小且换流站出口限流电抗器较大时,换流器闭锁时间可延长至 8~10 ms^[25],本文保护最大延时取 6 ms。

综上,反时限过电流保护完整判据为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{动作: } t \geq t_0 + T_{op}^{(n)} \Big|_{[t_0, t]: \Delta I_{f1} > 0} \\ \text{计算: } T_{op}^{(n)} = \min \left\{ T_{op}^{(n-1)}, \frac{A}{[K_R \Delta I_{f1}^{(n)}/I_b]^r} \right\} \\ \text{整定: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{A}{[K_R \Delta I_{f1.out}^{(type)}/I_b]^r} \Big|_{t=t_0+3} \geq 3 \\ \frac{A}{[K_R I_{1q0}^{(type)}/I_b]^r} \leq 6 \leq T_{lock} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (13)$$

式中: $\Delta I_{f1}^{(n)}$ 为 $t = t_0 + n\Delta t$ 时刻计算得到的延时和 1 模故障电流增量, $n = 0, 1, 2, \dots, 30$; $\Delta I_{f1.out}^{(type)}$ 为相邻线路首端发生金属性故障时的故障电流分量; $I_{1q0}^{(type)}$ 为线路发生金属性故障时 t_0 时刻的波头幅值, type 为故障类型; T_{lock} 为换流站闭锁时间。

3.4 启动判据和电压速断判据

发生故障时,线路端口电压急剧跌落,端口电

压变化量可作为保护启动的判据。在 10 kHz 的采样频率下, 经过两次采样即可检测到启动信号。同时, 通过计算电流变化率, 可判别故障是否为正向故障。对于较为严重的故障, 利用电压变化率即可迅速识别故障, 无须等待延时。由于电压变化量为负, 保护启动判据与电压速断判据如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{cases} \Delta U_1 < \Delta U_{set} \\ \frac{di_1}{dt} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{du_1}{dt} < \delta_{set} = K_{rel} \frac{du_{out}}{dt} \quad (15)$$

式中: ΔU_1 为端口电压变化量, $\Delta U_1 = u(t) - u(t_0)$; ΔU_{set} 为电压变化量整定值, $\Delta U_{set} < 0$ 且小于正常工况下电压波动量; di_1/dt 、 du_1/dt 为端口电流、电压变化率; δ_{set} 为电压变化率整定值; K_{rel} 为可靠系数, 本文取 1.1; du_{out}/dt 为相邻线路首端发生金属性故障的最大电压变化率。

3.5 保护流程

综上所述, 保护方案的实现流程如图 6 所示。

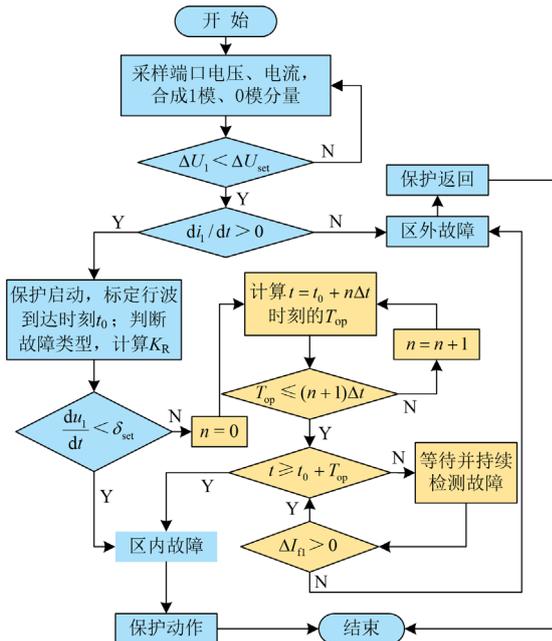


图 6 保护方案实现流程

Fig. 6 Implementation flow chart of protection scheme

4 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建如图 1 所示的柔性直流电网模型, 模型主要参数见表 1, 所有换流站均采用半桥型模块化多电平换流器, 每个换流站出口集中配置 200 mH 限流电抗器。输电线

路均采用频变参数模型, 本节主要以线路 1-2 为例进行仿真验证, 正常工况下的稳态电流为 0.3 kA, 采样频率为 10 kHz。

表 1 电网模型主要参数

Table 1 Main parameters of power grid model

参数	换流站				
	站 1	站 2	站 3	站 4	
子模块电容/mF	15	5	15	10	
桥臂电感/mH	20	58	20	30	
有功功率/MW	-1500	-400	1200	700	
直流电压/kV	±400				
子模块数/个	200				
参数	直流线路				
	L12	L13	L14	L23	L34
线路长度/km	600	550	500	500	400

4.1 故障特性验证及整定

1) 区内故障

以正极接地故障为例, 故障时刻设为 3 s, 区内不同故障位置、不同过渡电阻下保护 R_{12} 测得的故障分量如图 7 所示, L_f 为故障距离。为便于对比, 图 7(a)中行波到达时刻统一平移至 3 s。

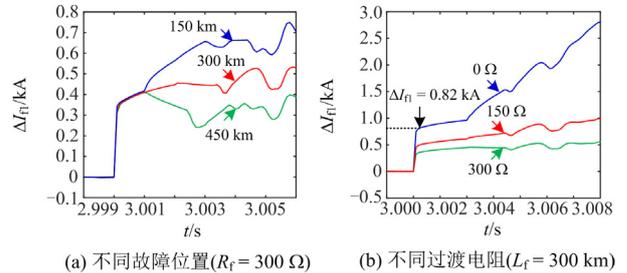


图 7 区内故障

Fig. 7 Internal fault

由图 7 可得, 仅改变故障位置时, 故障首行波的波头幅值基本不变, 直到有新的折、反射波到达。对于近端故障(150 km), 本侧故障首行波在故障点发生反射后首先到达; 对于远端故障(450 km), 对侧故障首行波经故障点折射后首先到达。两种行波到达的时间间隔均为 1 ms 左右, 但与近端故障相比, 远端故障受对侧行波的影响, 上升斜率出现小于 0 的现象。中点故障(300 km)下本侧反射波和对侧折射波均于 2 ms 后到达, 因此没有明显的上升和下降。仅改变过渡电阻时, 波头幅值随过渡电阻增大明显减小, 上升速率也因此下降, 需要通过 K_R 进行补偿。以线路中点故障时的波头幅值为各故障距离下波头的平均幅值, 则 $\Delta I_{f1}^{(0)}$ 取 0.82 kA。

2) 区外故障

在线路 2-3 首端设置金属性极间故障 F_{23} ，故障时刻设为 3 s，保护 R_{12} 、 R_{23} 处测得的故障分量如图 8 所示。从图 8 中可以看出，发生正向区外故障时，故障线路保护 R_{23} 处的电压急剧跌落，其电压变化率达 -5761.5 kV/ms ，保护 R_{23} 断路器立即动作并于 3 ms 后完全切除故障。对于本线路保护 R_{12} 而言，故障发生时，端口电压变化率为 -1858.2 kV/ms ；故障切除时，故障电流分量 ΔI_{f1} 为 2.54 kA，在故障切除后迅速下降并反向。

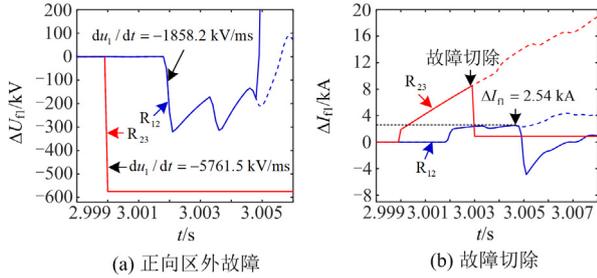


图 8 正向区外故障

Fig. 8 Forward external fault

3) 整定结果

基于仿真可得整定数据，如表 2 所示。各判据整定结果如下： $\Delta U_{set} = -10 \text{ kV}$ ；极间故障时， $\delta_{set} = -2044.1 \text{ kV/ms}$ ，单极故障时， $\delta_{set} = -853.8 \text{ kV/ms}$ 。正常工况下 I_b 取 0.3 kA，线路 1-2 的反时限过流保护动作方程如式(16)所示。

$$\begin{cases} T_{op}(I_{f1}) = \frac{80}{[K_R \Delta I_{f1} / 0.3]^{1.5}}, & \text{极间故障} \\ T_{op}(I_{f1}) = \frac{69}{[K_R \Delta I_{f1} / 0.3]^2}, & \text{单极接地} \end{cases} \quad (16)$$

式中： ΔI_{f1} 的单位为 kA； T_{op} 的单位为 ms。

表 2 整定数据

Table 2 Setting data

故障类型	ε_{set} / A	$(du_{out} / dt) / (kV / ms)$	K_c	$I_{lq0}^{(type)} / kA$	$\Delta I_{f1.out}^{(type)} / kA$
单极故障	5	-776.2	1.25	0.82	1.14
极间故障	5	-1858.2	1.05	2.05	2.54

4.2 适用性分析

1) 故障场景

为验证方案的有效性，以保护 R_{12} 为例，设置不同位置、类型、过渡电阻的故障进行检验，保护的動作情况如表 3 所示， R_1 为母线 1 上的保护，“/”表示保护不动作。由表 1 可得，在不同场景故障下保护均可正确动作。

表 3 不同故障下保护动作情况

Table 3 Protection action under different faults

位置	L_f / km	R_f / Ω	是否启动	类型	$(du_1 / dt) / (kV / ms)$	T_{op} / ms	动作元件
F_{12}	0	0	否	/	/	/	R_1
		150	是		-2345.1	/	
		300	是		-1122.4	/	
	50	600	是		-739.3	1.56	
		0	是		-436.7	2.07	
		150	是		-1435.8	/	
	150	300	是		-871.8	/	
		600	是		-678.2	1.81	
		0	是		-402.9	2.27	
	300	0	是		-1385.3	/	
		150	是		-839.8	1.99	
		300	是		-666.8	2.15	
600		是		-382.9	2.51		
0		是		-1308.2	/		
150		是		-791.3	2.98		
450	300	是	正	-566.8	3.62	R_{12}	
	600	是	极	-360.8	3.83		
	0	是	接	-1239.4	/		
	150	是	地	-751.3	3.73		
	300	是	故障	-539.2	4.48		
	600	是		-348.1	4.65		
550	0	是		-931.4	/		
	150	是		-564.5	4.86		
	300	是		-405.1	5.06		
	600	是		-212.2	6.00		
	0	是		-776.2	3.06		
	150	是		-441.6	5.43		
600	300	是		-308.9	5.68		
	600	是		-175.2	6.00		
	0	是		-776.2	3.06	R_{23}	
F_{13}	0	0	否	/	/	/	R_{13}
		150	是		-3454.9	/	
	150	600	是		-1316.7	0.78	
		0	是	极	-3255.6	/	
	300	600	是	间	-1246.2	2.01	R_{12}
		0	是	故障	-3087.1	/	
450	600	是		-1181.3	2.51		
	0	是		-2474.3	/		
550	600	是		-712.8	3.15		
	600	是		-1858.2	3.24	R_{23}	

基于上述仿真结果，除末端故障外，严重金属性故障均能由电压加速判据快速识别，但电压判据的耐过渡电阻能力十分有限，而反时限判据可根据故障的严重程度调节延时，近端故障快于远端故障，

低阻故障快于高阻故障。各判据在不同故障下动作情况分布如图 9 所示。

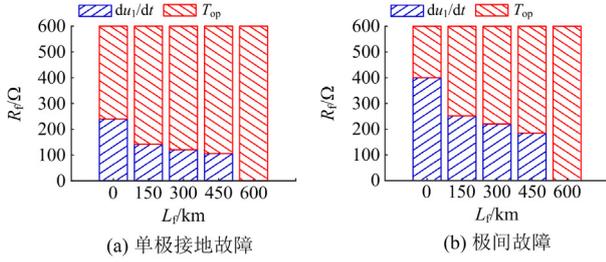


图 9 不同故障下判据启动情况

Fig. 9 Criterion startup under different faults

针对耐过渡电阻的问题, 由于故障分量受过渡电阻影响幅值波动明显, 加之反时限保护的动作方程为指数型, 其波动将进一步放大。图 10 为利用 K_R 补偿前后延时的计算结果, 可以看出补偿后延时在不同过渡电阻下的波动显著减小, 本方案有较强的耐过渡电阻能力。

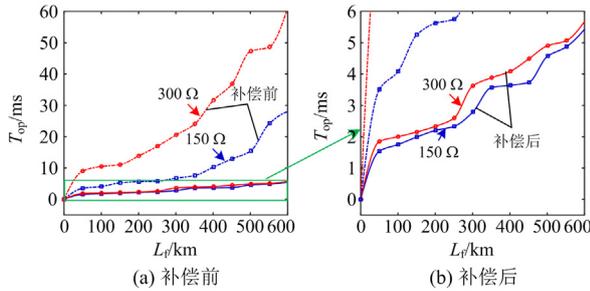


图 10 不同过渡电阻下的延时计算结果

Fig. 10 Time delay calculation results under different transition resistance

2) 网络结构及环流影响

本文所研究的网络为限流电抗器集中布置于换流站出口的形式, 由于相邻线路之间无边界元件, 发生本线路末端故障(F_{12})、母线故障(F_2)、相邻线路首端故障(F_{23})时的电气特性基本相同, 如图 11 中虚线所示。对于线路两侧均装设限流电抗器的边界结构, 限流电抗器的平波作用使得这 3 类故障下的电气特性出现明显差异, 如图 11 中实线所示。在该边界结构下, 相邻线路首端故障的电流小于末端故障, 根据式(13)整定时 $\Delta I_{fl.out}^{(type)}$ 取值变小, 反时限动作曲线相对左移, 如图 12 所示, 保护仍适用。

在近距离输电场景下(网络拓扑参数见附录 A 图 A3), 由于输电线路长度较短, 行波折、反射间隔时间较短, 电流上升速度很快, 近似远距离输电线路的近端故障电流特性, 如图 13 所示。图中, 故障距离(L_f/km)及过渡电阻(R_f/Ω)以 $[L_f, R_f]$ 的形式在图例中标注。受断路器动作时间的影响, 利用单

端量对延时进行整定, 末端故障下可能出现延时过长的情况。在该情况下, 本方案可作为线路后备保护。

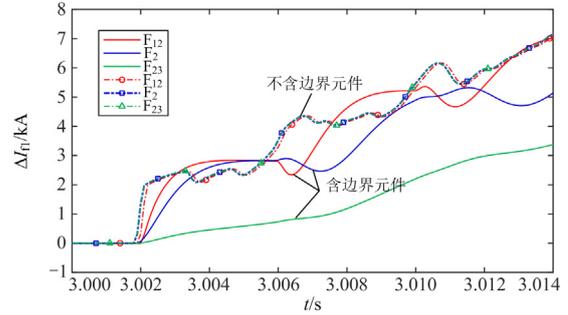


图 11 不同限流电抗器配置下的故障电流

Fig. 11 Fault current under different DC reactor configuration

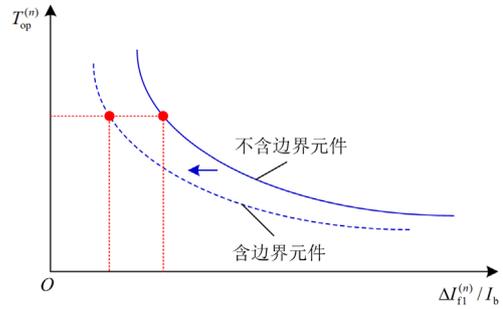


图 12 限流器配置对保护的影响

Fig. 12 Influence of reactor configuration on protection

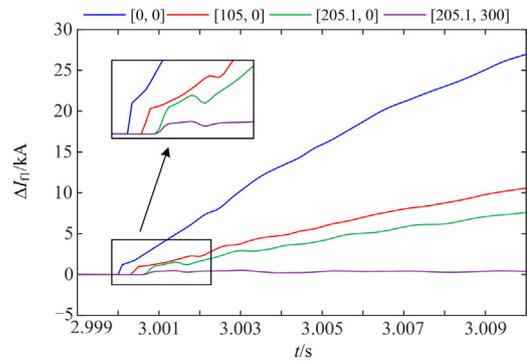


图 13 近距离输电场景下故障电流仿真结果

Fig. 13 Simulation results of fault current in short distance transmission scenario

此外, 线路无边界元件时, 长延时过程中可能存在环流干扰。由于保护延时与故障电流大小成反比, 发生区内高阻故障和相邻线路近端高阻故障时, 较小的故障电流会造成较长的延时。但相邻线路故障可由相邻线路保护及时切除, 本线路保护可提前返回。而区内末端高阻故障下, 若环流为正, 则对原始故障电流起助增作用, 有利于缩短延时、加速

切除故障。若环流为负，则对原始电流有短时削弱作用，图 11 中无边界元件电流曲线在故障发生 1 ms 后波头产生了波动，这是沿线路 2-3、线路 1-3 的反向环流造成的，须利用 3.3 节计算原则第二条，避免电流短时下降导致的延时增加。

3) 采样频率

对采样点进行差分计算时，如电压变化率的计算结果与单点数据的取值相关性较强。采样间隔越长，越难捕捉到电压极值，计算结果的波动也越大。但电流变化量反映的是一段时间内的数据采样情况，采样数据的不确定性远小于电压变化率。因此，本方案对采样频率的整体要求较低。但适当提高采样频率，有利于提高电压速断判据的灵敏性。

4) 抗干扰能力

保护中的干扰一般分为雷击干扰和噪声干扰两大类，雷击干扰的持续时间在微秒级，突变量较大，两者信号能量均集中于高频部分，易对电压速断判据产生较大干扰，且难以通过整定门槛躲过。表 4 为不同信噪比下延时计算结果，受噪声影响，计算结果出现了小范围波动，但仍能正确识别故障。为提高保护的可靠性，可在测量环节加入惯性环节或利用分频法减小干扰。

表 4 不同信噪比下延时计算结果

Table 4 Time delay calculation results under different SNR

故障场景	L_f/km	信噪比/dB	T_{op}/ms
F_{12} $R_f = 300 \Omega$ 正极接地故障	0	20	1.74
		40	1.63
	300	20	3.73
		40	3.35
F_{23} 金属性极间故障	600	20	6.00
		40	5.87
	600	20	3.24
		40	3.10

5) 与现有方法对比

由表 3 和图 9 可得，传统行波保护中的电压变化率判据虽然有着良好的速动性，但为满足无边界元件线路的选择性需求，整定时无法保护线路全长，高阻故障下的灵敏性也不足；而文献[20, 23]所提出的不依赖边界元件的保护方案对采样频率的要求极高，达到了 200 kHz，而本文利用工程中常用的 10 kHz 即可满足保护需求。此外，文献[23]中的保护特征量基于线-零模波速差构造，由于行波波速受线路分布参数影响较大，易受环境因素的影响。本文保护不依赖线路参数，保护特征量测量简单，具有较高的可靠性和普适性。

5 结论

现有保护多依赖于边界元件，本文针对“网孔结构”的柔性直流电网，提出了一套不依赖于边界元件的反时限过流保护配置方案。该方案基于单端量，切合柔性直流电网故障特性，不依赖线路参数，耐过渡电阻能力强，可作为远距离输电线路的主保护；保护原理简单，对采样频率要求低，具有一定的工程实践价值。主要结论如下：

1) 基于行波理论，不同故障位置的暂态电流呈现不同增长趋势：近端故障下，电流上升速度快、幅值大，保护动作以速动性为主；远端故障下，区内、区外故障暂态特征差异小，电流上升趋势平缓，保护动作以选择性为主。

2) 利用故障行波波头特征构造电阻补偿系数，提高了保护的耐过渡电阻能力；与电压速断判据配合，同时保证了近端故障下保护的速动性和远端故障下保护的选择性。综合考虑柔性直流电网故障电流的暂态特性，确定了保护方案的计算原则和整定原则。

3) 目前直流电网的节点数相对较少，拓扑结构相对简单，所提反时限保护在更复杂直流电网中的配合应用有待进一步研究。

附录 A

图 A1 中的换流器等值阻抗 Z_m 表达式为

$$Z_m = R_{eq} + \frac{sL_{arm}}{3} + \frac{1}{6sC/y} \quad (A1)$$

式中： R_{eq} 为等效电阻； L_{arm} 为桥臂电感； C 为等效电容； y 为子模块数。

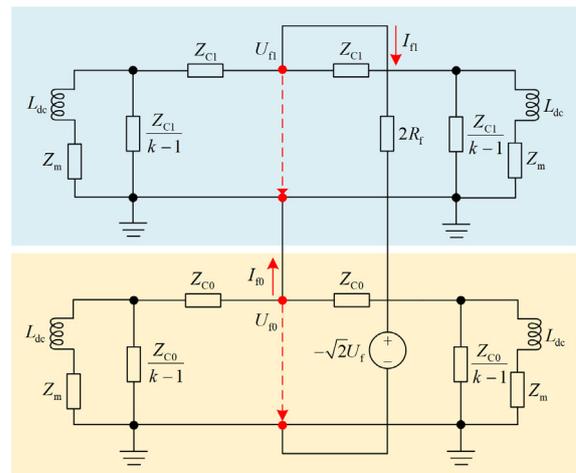


图 A1 模域等值电路

Fig. A1 Mode domain equivalent circuit

换流站闭锁的条件为故障后电流瞬时值达到换流阀两倍的额定电流, 闭锁前桥臂电流最大值 $i_{pa}(t)$ 简化表达式如式(A2)^[25]所示。

$$i_{pa}(t) = \frac{1}{3}i_{dc}(t) + \frac{1}{2}I_{s3m} \sin(\omega t) \quad (A2)$$

式中: $i_{dc}(t)$ 为直流侧线路短路电流; I_{s3m} 为桥臂电抗器虚拟等电位点上发生三相短路时的阀侧线电流幅值, 其幅值为固定值。

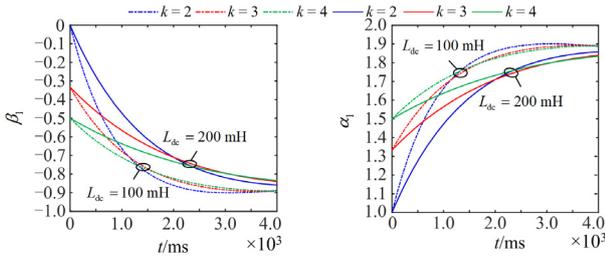


图 A2 边界折、反射系数阶跃响应结果

Fig. A2 Step response results of boundary refraction and reflection coefficients

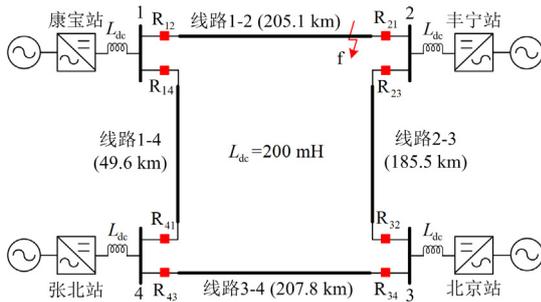


图 A3 限流电抗器加装在换流站出口的张北电网模型
Fig. A3 Zhangbei power grid model with current-limiting reactor installed at the outlet of converter station

参考文献

[1] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.
LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.

[2] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.

[3] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.

LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[4] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 13-19.
WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.

[5] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.

[6] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.
LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.

[7] LAN Tongkun, LI Yinong, DUAN Xianzhong. High fault-resistance tolerable traveling wave protection for multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 943-956.

[8] 薛士敏, 陈硕, 顾诚, 等. 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 45-53.
XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 45-53.

[9] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 128-136.
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 128-136.

[10] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.

[11] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.

- JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [12] 乔立华, 陶然, 宋国兵, 等. 直流线路边界特性保护综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 179-186.
QIAO Lihua, TAO Ran, SONG Guobing, et al. A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 179-186.
- [13] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48.
- [14] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 89-94.
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on DC reactor voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 89-94.
- [15] LI Rui, XU Lie, YAO Liangzhong. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1516-1526.
- [16] 周光阳, 李妍, 何大瑞, 等. 含限流器的多端柔直系统故障保护策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1432-1443.
ZHOU Guangyang, LI Yan, HE Darui, et al. Protection scheme for VSC-MTDC system with fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1432-1443.
- [17] LETERME W, BEERTEN J, VAN HERTEM D. Nonunit protection of HVDC grids with inductive DC cable termination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 820-828.
- [18] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [19] 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): 3463-3477.
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): 3463-3477.
- [20] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3833.
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3833.
- [21] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6593.
DAI Zhihui, LIU Ziqiang, YANG Mingyu, et al. Pilot protection for flexible DC grids based on amplitude integral of transient wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6578-6593.
- [22] YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. An improved DC fault protection scheme independent of boundary components for MMC based HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2520-2531.
- [23] 童宁, 林湘宁, 张雪松, 等. 不依赖于边界元件的架空型多端柔直电网就地测距式接地保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2049-2060.
TONG Ning, LIN Xiangning, ZHANG Xuesong, et al. Fault location based single-ended protection strategy for overhead VSC-MTDC independent on boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2049-2060.
- [24] 尹项根, 张保会. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [25] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-04-10

作者简介:

陈田田(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统保护与控制; E-mail: chentiantian@hust.edu.cn

赵振廷(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流线路故障分析及保护; E-mail: markzhao9999@outlook.com

李银红(1976—), 女, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统继电保护整定计算、直流保护故障特性分析与整定等。E-mail: liyinhong@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)