

引用格式:王业,任旭超,杜云龙,等.基于改进CUSUM算法的混合级联直流输电系统低电压保护优化策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):58-66.

Citation: WANG Ye, REN Xuchao, DU Yunlong, et al. Improved CUSUM algorithm for low voltage protection strategy of hybrid cascade HVDC transmission system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 58-66.

# 基于改进 CUSUM 算法的混合级联直流输电系统低电压保护优化策略

王 业, 任旭超, 杜云龙, 崔 玉

(国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘 要:**为提高混合级联直流输电系统直流输电线路低电压保护的速动性和可靠性,提出了一种基于改进累积和(cumulative sum control chart, CUSUM)算法的新型高压直流线路低电压保护策略。当 $\pm 800$  kV 混合级联直流输电系统的不同位置发生故障时,保护安装处所测得电气量呈现出一定的差异性。由于传统低电压保护缺乏整定依据,并有着误动风险,本文引入CUSUM算法提取不同故障时电气量差异特征,以此保证保护的可靠性。同时为了提高保护的速动性,借助分形理论,对CUSUM算法窗口进行改进,使得窗口具有自适应性,从而提高保护的速动性。利用PSCAD/EMTDC建立混合级联直流输电模型,并借助MATLAB验证所提新保护策略。仿真结果表明:所提方案能够快速可靠动作,有着良好的快速性和可靠性;可以耐受较高过渡电阻,有良好的耐受过渡电阻能力;判据依托于单端电气量,避免了通信中噪声和数据异常等干扰,可以快速识别区内、区外故障,并可可靠动作。

**关 键 词:**混合级联直流系统;低电压保护;CUSUM;分形理论

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.007

中图分类号: TM863

文章编号: 1673-9140(2024)03-0058-09

## Improved CUSUM algorithm for low voltage protection strategy of hybrid cascade HVDC transmission system

WANG Ye, REN Xuchao, DU Yunlong, CUI Yu

(State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** To enhance the speed and reliability of low-voltage protection for DC transmission lines in hybrid multi-terminal HVDC systems, a novel low-voltage protection strategy based on an improved cumulative sum (CUSUM) algorithm is proposed. When faults occur at different locations in a  $\pm 800$  kV hybrid multi-terminal HVDC system, the electrical quantities measured at the protection installation exhibit certain differences. Traditional low-voltage protection lacks a setting basis and has the risk of maloperation. This paper introduces the CUSUM algorithm to extract the characteristics of electrical quantity differences during different faults, thereby ensuring the reliability of protection. At the same time, to improve the speed of protection, the CUSUM algorithm window is improved with fractal theory, making the window adaptive and enhancing the speed of protection. A hybrid multi-terminal HVDC model is established using PSCAD/EMTDC, and the proposed new protection strategy is verified with MATLAB. Simulation results show that the proposed scheme can operate quickly and reliably, with good speed and reliability; it can withstand higher transition resistance and has good tolerance to transition resistance; the criterion relies on single-ended electrical quantities, avoiding interference from noise and data anomalies in communication, and can quickly identify internal and external faults and operate reliably.

**Key words:** hybrid cascade HVDC transmission system; low voltage protection; CUSUM; fractal theory

收稿日期: 2023-02-17; 修回日期: 2023-11-13

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022015)

通信作者: 王 业(1984—),男,博士,高级工程师,主要从事高压直流输电保护研究; E-mail: wangyepaper@126.com

目前,高压直流输电技术大多使用电网换相换流器(line-commutated converter, LCC),但逆变侧LCC有换相失败的风险。LCC-模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)混合直流输电技术在送端LCC故障时不会断流,受端MMC在逆变侧LCC换相失败时还能持续传输功率,解决了受端逆变侧换相失败的问题。但是由于MMC容量有限,且制造成本高,考虑工程质量和经济性相结合,在LCC-MMC混合直流输电基础上,受端逆变器则是运用了LCC-MMC混合级联技术,在降低成本的同时保证了供电质量可靠性。在 $\pm 800$  kV白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统中,整流站运用了LCC,受端逆变站则运用的是LCC和MMC组串联在一起,其中MMC组是由很多台MMC并联组成的。由于这种LCC和MMC耦合的情况,导致系统的故障特性发生变化。为了保证白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统运行的安全可靠,需要对其故障特性进行研究,并分析传统保护对其的适应性,以提高保护的可靠性。

混合直流输电技术能有效提高传统直流输电技术的稳定性并克服传统直流输电的部分缺陷。基于混合直流输电技术的诸多优越性,其在目前已运行直流输电系统工程中占据了很大一部分比例<sup>[1-3]</sup>。当下大部分已经投运的柔性直流输电工程中,非常成熟的传统直流继电保护更容易运用到直流侧的线路保护中,行波保护和低电压保护经常运用在输电线路的主保护中,电流差动保护和低电压保护则会运用在输电线路的后备保护里<sup>[4-8]</sup>。基于文献[9-11]的模拟仿真状况可以看出,接入直流系统以后会导致在区内故障时逆变侧的交流路线电流差动保护拒动,因此,有必要研究传统交流保护在交直流互联系统中的适应能力,并在此基础上提出相应的改进<sup>[12-13]</sup>。

直流线路保护研究是高压直流输电系统安全稳定运行的关键。直流输电线路故障的保护方式主要有单端保护和双端保护<sup>[14-16]</sup>。单端保护是通过在保护对象一端安装测量保护装置而不需要通信的保护方式,双端保护是在保护对象两侧均按照保护测量装置并通过通信来确定故障情况的保护方式,由于通信的时延,双端保护在线路长度过长时,会有相对明显的动作延迟。

直流电抗器工作电压变化率检测方式属于单端保护,具有高灵敏度,是高压直流输电配电系统故障检测常见方法<sup>[17-19]</sup>。直流系统所使用的微分差动

欠压保护基本上是由生产厂家推荐的,运作部门在投入使用前都会依据运作经验来适当调节整定值<sup>[20-23]</sup>。在微分欠压保护中,参数的计算依据及保护判据受控制方式的影响缺乏深层次研究。文献[24]对于当前低电压保护整定值是固定值的问题进行了改进,对低电压保护在不同负荷情况下进行分析,在负荷过高时,保护的范围会变小,且容易发生误动,可靠性下降,并对固定整定值提出了优化,但是由于面向特定工程,导致该方法普适性存在问题,且该方法使用双端电气量进行保护判定,不能保证速动性。因此其普适性存在问题,且无法克服选择性和速动性差的问题。

本文针对作为后备保护的低电压保护所存在的可靠性差、容易发生误动、拒动等问题,对故障特性进行分析并在此基础上分析传统低电压保护的适应性,提高低电压保护在交直流混合级联工程中的可靠性和速动性,并通过MATLAB和PSCAD/EMTDC平台进行联合仿真,验证所提方案的有效性。

## 1 故障特性分析

以 $\pm 800$  kV白鹤滩—江苏特高压混合级联直流输电工程为研究对象分析故障特征,其拓扑结构如图1所示。

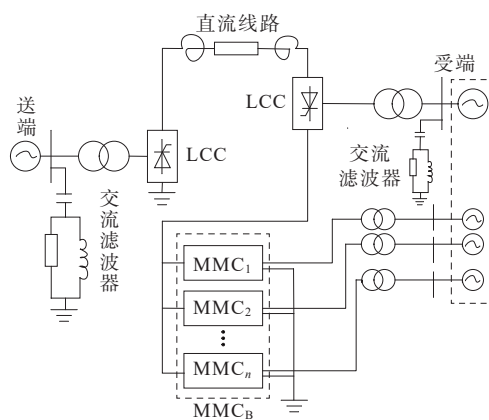


图1 白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统工程拓扑结构图

Figure 1 Topology of Baihetan-Jiangsu hybrid cascade UHVDC system

对于直流线路保护,交流系统故障是外部故障,直流线路故障是区内故障。线路保护应当能有效准确判定故障是区内故障还是区外故障,区内发生故障时保证要保护可靠动作,区外故障时要保证保护不误动。

整流侧交流系统发生短路故障后,整流站换流母线电压降低,整流侧直流电压降低,导致直流电流降低。送端LCC具备一定的故障控制能力,当故障发生时,直流电压上升,控制方式开始发生作用,触发角会减小,进而控制直流侧电压和电流的跌落。逆变侧交流系统发生短路故障后,逆变站母线的电压会降低,导致直流电压下降,直流电流上升。受端MMC直流侧发生故障或直流线路发生接地故障时,直流电压会迅速跌落,直流电流一般会自然减小到零。各侧故障时仿真波形图如图2~6所示。

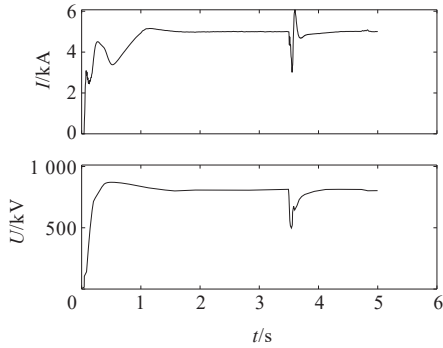


图2 送端LCC故障时M侧电流、电压

Figure 2 M-side current and voltage waveforms under fault occurrence at LCC sending end

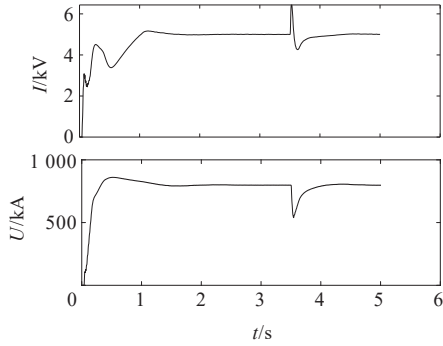


图3 受端LCC故障时M侧电流、电压

Figure 3 M-side current and voltage waveforms under fault occurrence at LCC receiving end

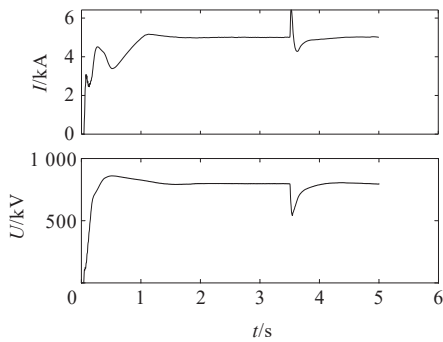


图4 MMC交流侧故障时M侧电流、电压

Figure 4 M-side current and voltage waveforms under fault occurrence at MMC AC side

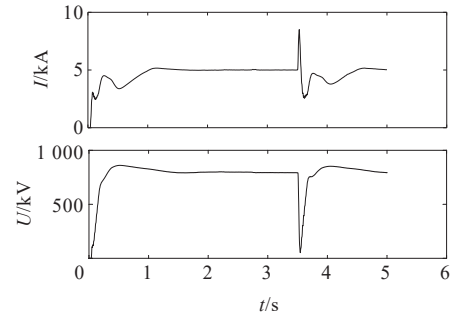


图5 MMC直流侧故障时M侧电流、电压

Figure 5 M-side current and voltage waveforms under fault occurrence at MMC DC side

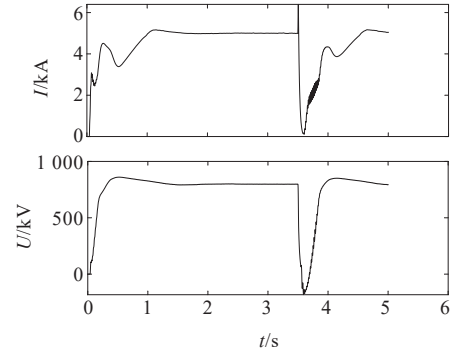


图6 直流故障时M侧电流、电压

Figure 6 M-side current and voltage waveforms under DC fault occurrence

由图2~6的仿真结果可知,当MMC直流侧故障,M侧电压出现大幅度跌落,极易造成低电压保护的误动。因此,本文对传统的低电压保护进行改进,通过算法提取不同故障时M侧故障电流特征,构建新判据,以此确保低电压保护可靠性。

## 2 传统保护适应性分析

传统低电压保护动作判据为

$$U_{dc} < D \quad (1)$$

式中, $U_{dc}$ 为整流侧直流线路电压。此判据的整定原理是:当直流线路发生故障,直流电压难以保持原有水平,若通过检测发现直流电压降低且持续一定时间未恢复,交流系统没有发生故障,换相也没有失败,即判断为直流线路故障。故障等值线路如图7所示。

对于图7(a),由电路基本原理可知:

$$\begin{cases} \Delta i_M = -C_{M1} \frac{d\Delta u_M}{dt} \\ \Delta i_N = -C_{N1} \frac{d\Delta u_N}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $C_{M1}$ 为整流侧等效电容; $C_{N1}$ 为逆变侧等效电容; $\Delta i_M$ 、 $\Delta u_M$ 分别为整流侧电流、电压; $\Delta i_N$ 、 $\Delta u_N$ 分别为逆变侧电流电压。

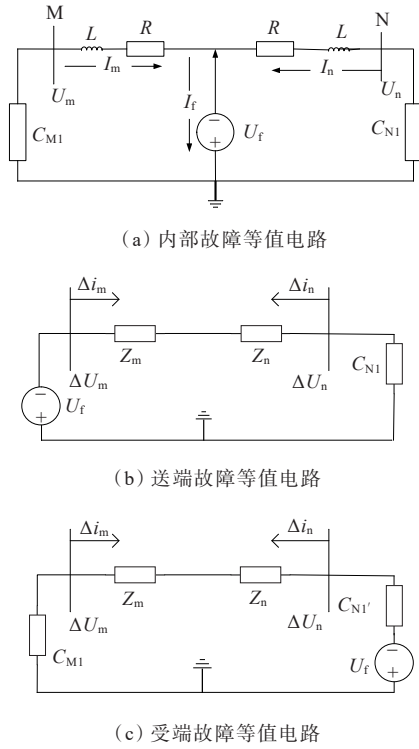


图7 故障等值电路

Figure 7 Equivalent circuit for fault

从而可得到:

$$\begin{cases} C_{Mj} = -\frac{\Delta i_M}{\frac{d\Delta u_M}{dt}} = C_{M1} \\ C_{Nj} = -\frac{\Delta i_N}{\frac{d\Delta u_N}{dt}} = C_{N1} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $C_{Mj}$  和  $C_{Nj}$  分别为 M 端和 N 端计算得到的电容值。电压变化量如下:

$$\Delta u_M = R\Delta i_M + L \frac{d\Delta i_M}{dt} + \frac{1}{C_{Nj}} \int \Delta i_M dt \quad (4)$$

式中,  $R$ 、 $L$  分别为直流线路全长等效电阻和电感。

当送、受端发生故障时,等值电路图分别如图 7(b)、(c)所示。以送端故障为例,电压变化率如下:

$$\Delta u_M = R\Delta i_M + L \frac{d\Delta i_M}{dt} \quad (5)$$

经过 PSCAD/EMTDC 仿真验证原有保护在当前系统的适应性,仿真结果如图 8 所示。

通过理论分析和仿真结果可以得知,故障期间故障分量会急剧变化并会致使保护误动。

为避免传统低电压保护的误动,提高其可靠性,引入累积和(cumulative sum control chart, CUSUM)算法并改进该算法来完成对传统低电压保护的适应性提升。

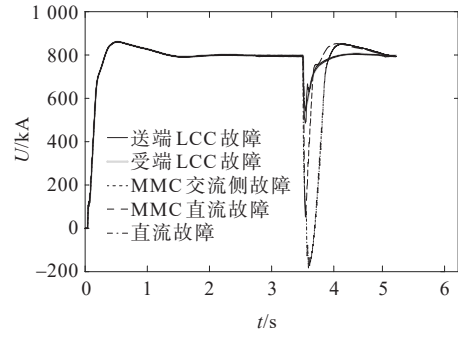


图8 各侧故障时保护处电压情况

Figure 8 Voltage at the protection place during fault on each side

### 3 CUSUM 算法

CUSUM 可将采集信号与期望值的偏差进行累计,并通过阈值设定滤除一定的噪声干扰。其可以通过累计和来反映较小波动对整体信号的影响。观测值可以选择是单个测量值,也可以选择是子组均值<sup>[25]</sup>。

在电流瞬时值(简称电流)时间序列  $I = \{i(j)\}_j = 1^\infty$  内设定 2 个连续的滑窗,分别为信号均值计算窗口  $W_a$  和瞬时信号检查窗口  $W_d$ ,窗口长度分别设定为  $m$ 、 $n$ 。2 个窗口内电流均值  $M_a$  和  $M_d$  定义如下:

$$M_a = \frac{1}{m} \sum_{j=k_1}^{k_1+m-1} i(j) \quad (6)$$

$$M_d = \frac{1}{n} \sum_{j=k_1+m}^{k_1+m+n-1} i(j) \quad (7)$$

式(6)、(7)中,  $k_1$  为信号均值计算窗口的首个采样点。为检测故障发生情况,定义故障导致的电流上、下波动的累积和为  $g_j^+$ 、 $g_j^-$ ,具体计算方法如下:

$$g_j^+ = \max\{0, g_{j-1}^+ + M_d - (M_a + \beta)\}, g_0^+ = 0 \quad (8)$$

$$g_j^- = \max\{0, g_{j-1}^- - M_d + (M_a - \beta)\}, g_0^- = 0 \quad (9)$$

式(8)、(9)中,  $\beta$  为信号中的噪声影响,表示稳定状态时电流的时序信号的波动水平。

首先,设置一个  $H$  值作为判断是否发生故障的依据,  $H$  可以通过经验值或者训练的方法得到。将累计和  $g_j^+$  初始值置零,当下一个检测窗口信号均值 ( $M_d$ ) 大于上一个已检测窗口信号均值与噪声和 ( $M_a + \beta$ ) 时,  $g_j^+$  则开始进行累加。在  $0 < g_j^+ < H$  时,认为系统可能发生了故障,但不判定为故障,此时加入时间延迟因子  $d$ ,初始值置为 0,令  $d = d + 1$ ,继续对  $g_{j+d}^+$  进行计算,直到  $g_{j+d}^+ > H$  时,此时确定故障的发生,且确定故障的开始时刻为第  $j$  个点。且为



了避免由于序列振荡而导致发生误检测,延迟因子 $d$ 每次累加时对 $g_{j+d}^+$ 和 $g_{j+d-1}^+$ 进行比较,若 $g_{j+d}^+ \leq g_{j+d-1}^+$ 则判定为一次电流波动而非故障,并使 $g_{j+d}^+ = 0, d = 0$ ,以避免小波动导致的误诊断。只有当 $g_{j+d}^+ \geq g_{j+d-1}^+$ 时,才判定为故障发生,进行累加。 $g^-$ 的累加与之相反。

## 4 保护判据优化

### 4.1 CUSUM算法自适应窗口改进

由于滑窗长度的变化和滑窗位置的更新方式会影响突变点检测的精度和速度。窗口大有利于计算,可靠性高,但易受到干扰,并导致数据局部差异变得难以区分,检测准确度下降;窗口小有利于及时跟踪,但单个窗口内数据过少,没有很好的可靠性,且窗口位置更新次数上升,计算量增大;并且,若待检测实变点正好处在窗口边界或邻近边界时,可能会发生忽略或跳过待检查点的情况,降低检测的准确度。为了克服上述窗口过大或者过小对数据分析的影响,引入一种新的自适应窗口。

分形理论是从时间序列数据中研究复杂非线性问题,可以反映所测信号的无序程度和变化大小。针对噪声信号,分形维数越大则说明这个信号复杂程度和非平稳性越高,越小则说明信号越单一而且具有规律性<sup>[26]</sup>。本处分形维数采用半方差法来计算,如下:

$$r(\Delta t) = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (z(t) - z(t + \Delta t))^2 \quad (10)$$

式中, $j$ 为测量点序号; $\Delta t$ 为步长。 $\Delta t$ 与 $r(\Delta t)$ 有 $r(\Delta t) \propto \Delta t^p$ 关系, $p$ 为幂指数,同归在双对数曲线中对 $\Delta t$ 和 $r(\Delta t)$ 回归,斜率为 $p$ 。所以,分形维数值为

$$D = \frac{4-p}{2} \quad (11)$$

通过分形维数的定义可以看出,当所测信号的波动程度变大时, $D$ 上升。因此可以借助 $D$ 值的升降来作为判断所检测信号是否发生突变的依据, $D$ 值大小的变化情况可以表征信号实时的波动情况。

以 $D$ 值为判据设计改进窗长函数为

$$W(t+1) = \begin{cases} \alpha_1, & W(t) < \alpha_1 \\ W(t) - R(D(t) - \bar{D}), & \alpha_1 \leq W(t) \leq \alpha_2 \\ \alpha_2, & W(t) > \alpha_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2$ 为常数,且 $\alpha_2 > \alpha_1$ ,其取值依据需参考实际工程时信号的长度和突变状况; $\bar{D}$ 为 $D(t)$ 的稳态

均值,激活函数 $R$ 可表示为

$$R(x) = \begin{cases} x, & x \leq 0 \\ px, & x > 0 \end{cases} \quad (13)$$

以保护可靠性为前提,设定了一个最小窗口值 $W_{\min}$ 。为提高保护的速动性,利用修改后的窗长函数,可以保证在信号突变程度发生改变时,窗口长度可以实时进行变化。当所采集电气量数据发生突变时,窗口也会随之缩小,进而利用更短时间完成故障判别,即故障越严重,窗口越小,判别时间越短。

### 4.2 保护新方案形成

通过分形理论对检测窗口进行自适应改进,使得检测在信号平稳时能保持更好的平稳性,不发生误判。在线路发生故障,信号发生突变时,自适应减小窗口长度,减小检出的时间延迟,且故障越严重时,检出延迟越小,更好地保证了保护的速动性。

改进后的保护方案依旧只使用M侧单侧电气量进行保护动作的判定,无须通过通信系统获取对侧电气量,由于无通信延迟,因此很好地保证了保护的速动性。引入M侧电流作为改进后的CUSUM算法的输入量,对故障进行判断,进而改进原有的保护方案。

优化后的算法如下:

$$\begin{cases} M_{ar} = \frac{1}{\omega(t+1)} \sum i(j) \\ M_{dr} = \frac{1}{\omega(t)} \sum i(j) \end{cases} \quad (14)$$

$$g_{jr}^+ = \max \{0, g_{ir}^+ + M_{dr} - (M_{ar} + \beta)\}, g_0^+ = 0 \quad (15)$$

$$g_{jr}^- = \max \{0, g_{ir}^- + M_{dr} - (M_{ar} + \beta)\}, g_0^- = 0 \quad (16)$$

式(14)~(16)中, $M_{ar}, M_{dr}$ 为改进后窗口电流均值; $g_{jr}^+, g_{jr}^-$ 分别为算法正向值、反向值。

改进后判据:

$$\begin{cases} U_{dl} < D \\ g_{j+d}^+ > H \end{cases} \quad (17)$$

式中, $U_{dl}$ 为直流电路电压值。

改进后的保护方案通过引入改进的CUSUM算法,可靠地识别出故障类型,避免了保护的拒动和误动。同时,为了保证保护的速动性,新保护方案依旧依托单端电气量进行保护的判断,并在此基础上,引入了新的自适应窗口,进一步保证了新方案能够在最短的时间内识别故障,快速动作,保证

保护的速动性。综上,新方案可以快速准确地识别区内故障并可可靠动作。

## 5 仿真验证

为验证所提出保护策略的可靠性,本文采用PSCAD/EMTDC和MATLAB软件搭建图1所示的 $\pm 800$  kV白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统工程模型并进行仿真验证。其中,送端采用12脉冲LCC换流站,受端采用12脉冲LCC换流站级联3组MMC组,采样频率设置为0.5 kHz。由于模型在1.5 s后数据趋于稳定,因此数据自1.5 s开始分析。在该模型中的3.5 s时设置故障,故障持续时间500 ms,在MATLAB与PSCAD/EMTDC中进行联合仿真,通过动作情况验证所提保护新方案的速动性和可靠性。

### 5.1 传统保护仿真验证

传统线路低电压保护通常用来检测直流线路上的金属性接地故障和高阻接地故障,工程上动作整定值通常为0.5 p.u。

为分析传统低电压保护动作的适应性,分别在直流侧、受端LCC交流侧、受端MMC交流侧和受端MMC直流侧设计故障并进行仿真验证。

由图9仿真结果可知,在交直流混合级联情况下,传统低电压保护的适应性出现问题,可靠性降低,保护发生误动的隐患大大增加,尤其是在MMC直流侧故障时传统低电压保护极易误动,因此提高低电压保护的适应性有其必要性。

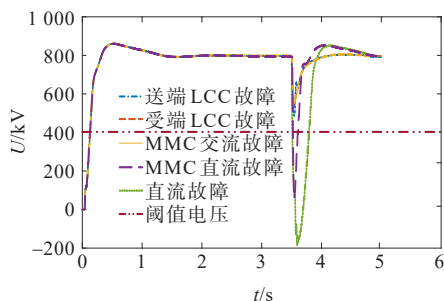


图9 各侧故障时传统低电压保护判断情况

Figure 9 Judgment results of traditional low voltage protection under each side failure

### 5.2 改进后各侧发生故障时保护仿真验证

为验证改进后保护的可靠性,分别在直流侧、受端LCC交流侧、受端MMC交流侧和受端MMC直流侧设计故障,故障发生时间为3.5 s,持续时间为0.05 s,并借助M端的单端电气量作为保护判据

进而分析改进后的保护是否成功动作,以保证其可靠性和速动性,仿真结果如图10所示。

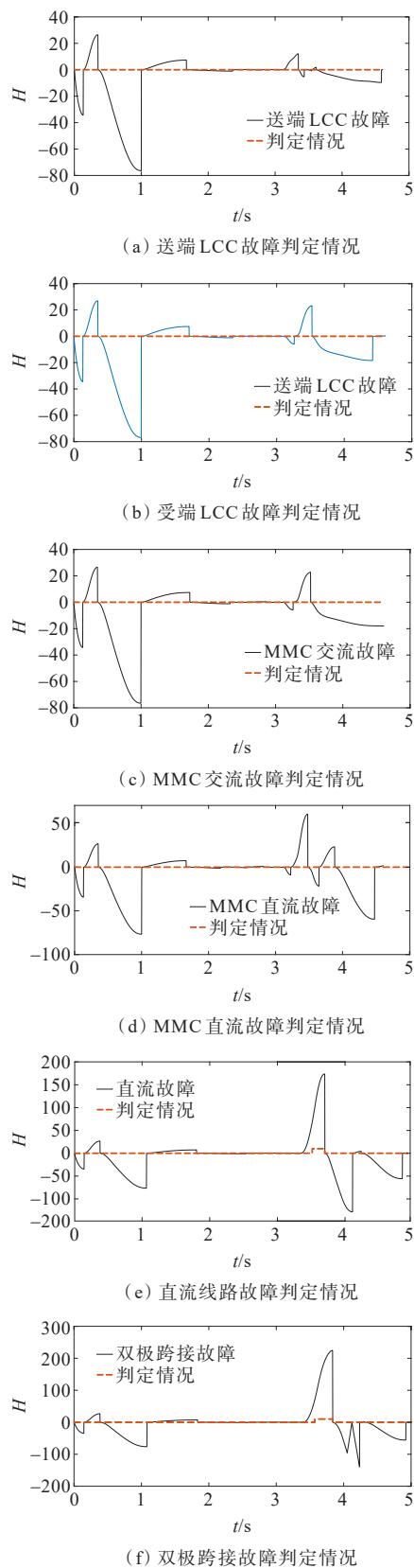


图10 各侧发生故障时判定情况

Figure 10 Judgement results under each side failure occurrence

通过图10仿真结果可知,改进后的保护大约在故障发生7 ms后动作,并能保证在区外故障时不误动,区内故障时能够快速识别故障,并准确可靠地动作,保证了改进后保护的速动性和可靠性。

### 5.3 改进后不同过渡电阻及噪声影响时的保护仿真验证

为了进一步验证改进后的保护方法的性能,再在线路首端处设置单相经过渡电阻接地故障,以此来分析优化后保护方案对过渡电阻影响的耐受能力。仿真结果如图11所示。

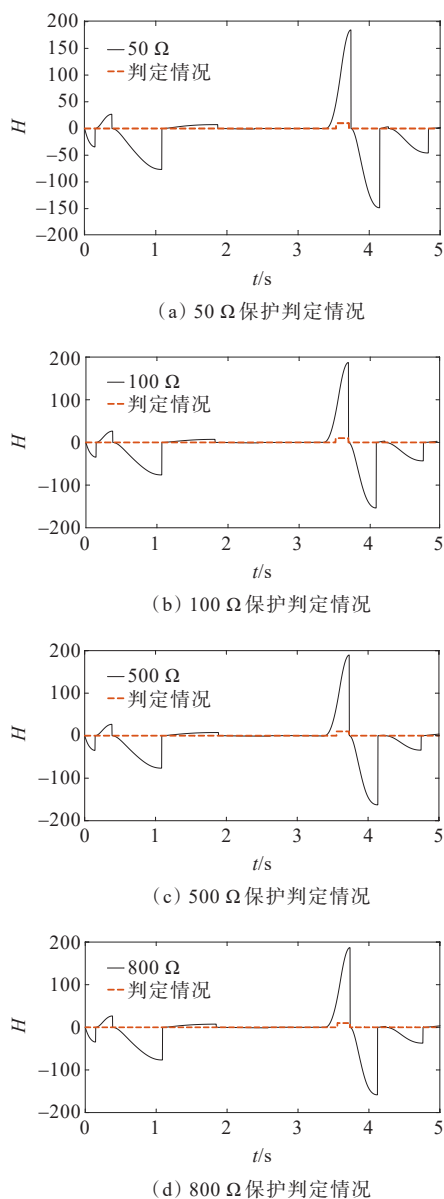


图11 不同过渡电阻时保护判定情况

Figure 11 Protection judgment results under different transition resistances

由图11仿真结果可知,在过渡电阻不同的情况下,改进后的保护均可以快速准确地识别故障,并

可以安全可靠地动作,不发生误动和拒动,改进后保护能较好地耐受过渡电阻,验证了改进后保护方案的可靠性。

由图12仿真结果可知,在噪声小扰动情况下,在相应滑窗中,噪声累积难以到达阈值要求,不会造成误动。

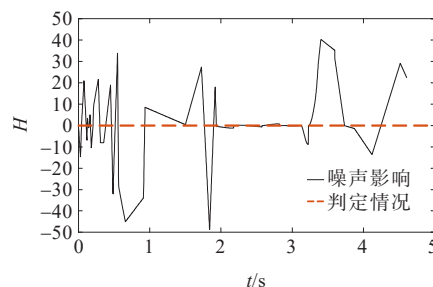


图12 噪声对判定结果影响

Figure 12 Influence of noise on judgement result

经图13仿真验证可知,应用自适应窗口前,保护判定时间为3.624 s,即保护动作时间为11.4 ms。在加入自适应窗口后,保护判定时间提前至3.573 ms,保护动作时间缩短了5.1 ms。

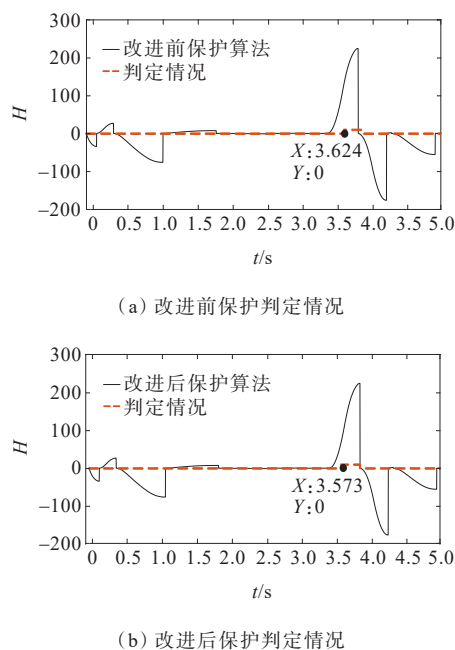


图13 改进前后保护速动性对比

Figure 13 Comparisons of protection speed before and after improvement

## 6 结语

直流线路低电压保护是直流系统重要的后备保护之一。提高其可靠性,保证速动性,对于直流系统安全稳定运行有着重要意义。本文以 $\pm 800$  kV

白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统工程为基础提出了一种新的低电压保护方案。

1) 该方案通过引入CUSUM算法改进低电压保护,保证保护的可靠性,不误动、不拒动。

2) 该方案以分形理论为基础,在原有算法上加入自适应窗口,同时设定一个最小窗口,在保证保护可靠性的基础上,提高了速动性,经仿真验证了保护能在7 ms左右可靠动作。

3) 此方法仅依托于单端电气量,不需要双端通信,因此避免了通信中噪声和数据异常等干扰,并避免了通信时延,保证了保护的速动性。

4) 经仿真验证,该保护方案能在8 ms内可靠动作,有一定的抗噪能力和耐受过渡电阻能力,能做到区内故障不拒动,区外故障不误动,有较好的可靠性及速动性。

#### 参考文献:

- [1] 何平港,牟大林,林圣. LCC-MMC混合级联型直流输电系统启动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(22):71-80.  
HE Pinggang, MU Dalin, LIN Sheng. Start-up control strategy for an LCC-MMC hybrid cascade HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 71-80.
- [2] 郭春义,吕乃航,张加卿. 提高LCC-HVDC在弱交流系统下的稳定性和动态性能的控制参数优化方法[J]. 电工技术学报,2023,38(7):1751-1764+1779.  
GUO Chunyi, LÜ Naihang, ZHANG Jiaqing. Optimization of control parameters to enhance stability and dynamic performance of LCC-HVDC under weak AC condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1751-1764+1779.
- [3] 傅闯,叶运铭,汪娟娟,等. 基于D分割法的LCC-HVDC系统控制器参数整定方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(13):139-150.  
FU Chuang, YE Yunming, WANG Juanjuan, et al. D-partition method based controller parameter setting method for LCC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 139-150.
- [4] 邓本飞. 天广高压直流输电线路保护系统综述[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(19):71-74+80.  
DENG Benfei. HVDC line protection summary of Tian-Guang Project[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 71-74+80.
- [5] 徐文哲,张哲任,徐政. 适用于大规模纯新能源发电基地送出的混合式直流输电系统[J]. 中国电力,2023,56(4):16-27.  
XU Wenzhe, ZHANG Zheren, XU Zheng. A hybrid HVDC topology suitable for large-scale pure clean energy power base transmission[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 16-27.
- [6] SWETAPADMA A, AGARWAL S, ABDELAZIZ A Y, et al. A novel primary and backup relaying scheme considering internal and external faults in HVDC transmission lines[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 1003169.
- [7] 杨舟,杨仁炘,施刚,等. 一种用于多端直流输电系统交流故障穿越的新型控制策略[J]. 发电技术,2022,43(2):268-277.  
YANG Zhou, YANG Renxin, SHI Gang, et al. A novel control strategy for AC fault ride through in multi-terminal DC system[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 268-277.
- [8] 束洪春,田鑫萃,董俊,等.  $\pm 800$  kV云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):179-188.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Simulation and analyses for Yun-Guang 800 kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 179-188.
- [9] 张文峰. 交直流互联受端电网故障特征变异分析[M]. 北京:中国电力出版社,2015.  
ZHANG Wenfeng. Variation analysis of fault characteristics of AC-DC interconnected receiving power grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [10] 李妮,焦在滨,齐杉. 基于直流断路器动作响应的环状柔性直流配电网后备保护方案[J]. 中国电机工程学报,2023,43(15):5785-5797.  
LI Ni, JIAO Zaibin, QI Shan. A backup protection scheme based on the response of the DC circuit breaker tripping for the meshed DC distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5785-5797.
- [11] BANAFER M, MOHANTY S R. A travelling wave based primary and backup protection for MMC-MTDC transmission system using morphological un-decimated wavelet scheme[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108367.
- [12] 郑业爽,李世春,鲁玲. 基于多策略ISOA优化SVM的变压器故障诊断研究[J]. 智慧电力,2023,51(2):38-44.  
ZHENG Yeshuang, LI Shichun, LU Ling. Transformer fault diagnosis based on multi-strategy ISOA optimized SVM[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 38-44.
- [13] 陈名,朱童,黎小林,等. 柔性直流系统断路器保护配合研究[J]. 高压电器,2015,51(11):33-40.  
CHEN Ming, ZHU Tong, LI Xiaolin, et al. Research on protection coordination between flexible DC system and breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 33-40.
- [14] 薛成,曹戈,王争冕,等. 基于鲸鱼群算法的交直流混联系统无功电压控制方法研究[J]. 电网与清洁能源,2023,



- 39(9):67-73.
- XUE Cheng, CAO Ge, WANG Zhengmian, et al. Research on the reactive power and voltage control method for AC-DC hybrid systems based on the whale swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9):67-73.
- [15] 李志, 韩颖, 李岩松, 等. 换相失败下直流送端 SVC 无功反调机理分析及控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9):153-159.
- LI Zhi, HAN Ying, LI Yansong, et al. Mechanism analysis and control strategy research of SVC reactive power inversion of DC transmission system due to commutation failure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9):153-159.
- [16] JAHN I, JOHANNESSON N, NORRGA S. Survey of methods for selective DC fault detection in MTDC grids [C]//13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017). Manchester, UK. London:IET, 2017:1-7.
- [17] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):973-981.
- [18] LI C Y, GOLE A M, ZHAO C Y. A fast DC fault detection method using DC reactor voltages in HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2254-2264.
- [19] LI R, XU L, YAO L Z. 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.
- [20] 李国庆, 张斌, 肖桂莲, 等. 基于多尺度特征集的高占比新能源电网连锁故障数据驱动辨识方法[J]. 电力建设, 2023, 44(6):91-100.
- LI Guoqing, ZHANG Bin, XIAO Guilian, et al. Data-driven cascading failure prediction method for high-proportion renewable energy systems based on multi-scale topological features[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6):91-100.
- [21] 冉启胜. 直流配电网故障特性分析及保护原理研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2022.
- RAN Qisheng. Research on fault characteristics and protection principle of DC distribution network[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [22] 朱韬析, 候元文, 王超, 等. 直流输电系统单极金属回线运行方式下线路接地故障及保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20):133-138.
- ZHU Taoxi, HOU Yuanwen, WANG Chao, et al. Research on the line faults and its protection of HVDC transmission system in metallic return operation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20):133-138.
- [23] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17):45-49.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17):45-49.
- [24] 陈锡磊, 朱韬析, 周浩. 高压直流线路低电压保护判据定值调整研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9):125-130.
- CHEN Xilei, ZHU Taoxi, ZHOU Hao. Research on adjustment of criterion settings of DC line under-voltage protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9):125-130.
- [25] 刘可, 杨嘉, 邓其军, 等. 基于CUSUM滑动窗的二维离散模糊数电力负荷检测方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(9):810-817.
- LIU Ke, YANG Jia, DENG Qijun, et al. A two-dimensional discrete fuzzy number power load detection method based on CUSUM moving window[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(9):810-817.
- [26] 李永清. 非侵入式电力负荷识别研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2020.
- LI Yongqing. The research on non-intrusive power load identification[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.