DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250849

基于功率方向的特高压直流输电线路电压突变量保护研究

杨建明[1]，赵伟杰[2,3]，黄剑湘[2,3]，杨慧霞[4]，江 一[2,3]，李海波[3,5]，李凌飞[3,6]，耿要强[4]

(1. 南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211102；2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局，云南 昆明 650217；3. 云南省特高压直流智能运检与安全运行工程研究中心，云南 昆明 650217；4. 许昌开普电气研究院有限公司，河南 许昌 461000；5. 清华四川能源互联网研究院，四川 成都 610042；6. 南方电网科学研究院有限责任公司，广东 广州 510663)

摘要：直流线路电压突变量保护通过直流线路电流的极性识别换流站内极母线接地故障和直流线路接地故障。这种方法能有效地检测直流输电线路直接接地的故障，但是在检测同极性雷击导致线路绝缘击穿的接地故障时存在可靠性不足的问题。为解决这个问题，深度研究了同极性雷击故障和接地故障时的变化量功率方向。然后，指出了故障直流线路的变化量功率方向在同极性雷击导致线路绝缘击穿的过程中始终保持不变。并利用变化量功率方向具有很高的抗雷击干扰能力的特性，提出了新的特高压直流输电线路电压突变量保护。最后，基于实时数字仿真系统构建了特高压三端柔性直流输电模型。仿真结果验证了所提直流线路电压突变量保护的可行性。

关键词：直流线路电压突变量保护；极性；同极性雷击；可靠性；变化量功率方向

Research on power-direction-based voltage derivative protection for UHVDC transmission lines

YANG Jianming[1], ZHAO Weijie[2, 3], HUANG Jianxiang[2, 3], YANG Huixia[4], JIANG Yi[2, 3], LI Haibo[3, 5], LI Lingfei[3, 6], GENG Yaoqiang[4]

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Kunming Bureau of CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China; 3. Yunnan Provincial UHVDC Smart O&M and Safe Operation Engineering Research Center, Kunming 650217, China; 4. Xuchang Ketop Electrical Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 5. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610042, China; 6. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The DC line voltage derivative protection identifies ground faults on the pole bus of the converter station or on the DC line by detecting the polarity of the DC line current. This strategy can effectively detect direct ground faults on DC transmission line, but its reliability is insufficient when dealing with ground faults caused by same-polarity lightning strikes that lead to line insulation breakdown. To solve this problem, this paper conducts a deep research on the behavior of variation power direction during same-polarity lightning strikes and ground faults. Then, it reveals that the variation power direction of the faulty DC line remains constant throughout the process of the same-polarity lightning strikes which cause the line insulation breakdown. In addition, a novel voltage derivative protection is proposed for UHVDC transmission lines, utilizing variation power direction to achieve high immunity to lightning-induced disturbances. Finally, a three-terminal flexible UHVDC transmission model is constructed by using real-time digital simulation system. Simulation results verify the feasibility of the proposed DC line voltage derivative protection.

This work is supported by the Science and Technology Project for Key Areas in Yunnan Province in 2025 (No. 202503AA080001).

Key words: DC line voltage derivative protection; polarity; same-polarity lightning strikes; reliability; variation power direction

基金项目：云南省2025年重点领域科技计划项目资助(202503AA080001)

0　引言

特高压直流输电技术能满足我国西电东送、北电南送的调度需求，因此在国内取得了蓬勃的发展[1]。最近几年以来，为解决沙戈荒等新能源孤岛送出和逆变侧换相失败的问题，特高压柔性直流输电技术被逐渐应用到实际工程。为满足多点汇集、多点消纳的需求，工程师们开始探索特高压多端直流输电技术的工程应用，比如目前已投运的乌东德特高压多端混合直流输电工程，国家发展改革委已经批准实施的藏粤四端特高压柔性直流输电工程。送端孤岛运行，多点汇集、多点消纳的需求对特高压直流输电线路保护的可靠性提出了更高的要求[2-4]。

现有的特高压直流输电线路保护仍是以行波和电压突变量保护为主保护[5-6]，行波保护考虑了反向行波的幅值、共模分量的极性等行波特性，因而具有很高的可靠性。电压突变量保护只是以单端电压的变化速率和单端电流的方向作为检测直流输电线路接地故障的主判据，虽然能可靠地检测直接接地的特高压直流输电线路故障，但是容易受到外部的干扰而导致保护误动或者拒动，尤其是遭受同极性雷击后绝缘击穿的情况。同极性雷击直流输电线路后直流输电线路电压会维持原来的极性急剧增大，雷击电流从雷击点流向直流输电线路的两端，当直流电压超过直流输电线路的绝缘水平，直流输电线路电压快速跌落，故障电流从直流输电线路的两端流向绝缘击穿点，在这一过程中，直流输电线路的电流极性发生了反转。因为电压突变量保护动作时间只有几毫秒，所以同极性雷击直流输电线路很容易导致电压突变量保护因电流方向判别错误而拒动或误动。

为提高现有特高压直流输电线路主保护的可靠性，学者们不断地提出了新的保护原理和新的保护算法。文献[7]提出了匹配误差与匹配波形特征相结合的柔性直流输电线路单端量保护；文献[8]提出了一种基于 1 模电压电流近似熵变化量判据的混合直流输电线路纵联保护方案；这两个方案虽然在某些性能上要优于工程实际应用的电压突变量保护，但是实现难度大、速动性较差。文献[9]根据级联多端特高压直流的特点提出了相匹配的保护配置，但是都没有改变电压突变量保护的核心判据及方向判据；文献[10]提出了一种基于电压-电流采样轨迹的直流输电线路保护方案，通过区内/外故障时的电压-电流线性度差异来构建保护方案，这种方案需要故障行波通过两倍线路全长所需的时间作为时间窗口，当线路达到 1000 km 以上时，保护的动作时间远远大于现有工程实际应用的电压突变量保护，且很难适应电缆与架空线路混合的直流输电线路；文献[11]阐述了一种新型的行波保护方案，受端保护利用第二个电流波头特征和断路器跳闸后的线路电压水平识别短路与断线故障，送端保护利用电流首行波极性识别短路与断线故障，保护的动作时间也较长。文献[12]提取行波高频阻抗特征，并利用分布式电容高频特征构成差异，提出了基于高频阻抗曲线匹配的混合直流输电线路纵联保护，方案实现困难且缺少同极性雷击故障的研究。文献[13]利用直流滤波器在换流器侧故障与直流输电线路侧故障体现不同的阻抗频率构建了直流滤波器单端电流保护，但同极性雷击产生的不同于接地故障的阻抗特性影响了其可靠性。文献[14]提出了将电压共模量作为识别故障极的电压突变量保护，但是其电流方向判据仍采用现有工程应用的判据。

综上所述，特高压直流输电线路保护涌现了很多新的原理和算法，但是这些新的原理和算法在快速性、可实现性等特性上不如现有的电压突变量保护，在较短的时间内很难被应用于实际的工程，且都没有分析同极性雷击故障对保护的影响，采用电流方向判据的新保护原理没有解决同极性雷击等复杂故障导致的保护误动或拒动问题。本文在充分研究同极性雷击故障发展而形成的接地故障特性基础上，提出了将直流变化量功率方向作为电压突变量保护方向判据的策略，并仿真验证了所提保护策略能有效地检测直接接地故障和同极性雷击而形成的绝缘击穿接地故障。

1　故障电流方向及保护方向判据适应性

1.1　电压突变量保护原理

特高压直流输电工程应用的电压突变量保护以直流线路电压的变化速率低于定值作为识别直流线路末端区内故障和直流线路另一端换流站极母线接地故障的判据；以直流线路电流从换流站内流向直流输电线路作为识别直流输电线路接地故障和保护所在的换流站极母线接地故障的判据；另外，还以直流线路电压低于定值作为接地故障判据。具体如式(1)[15-17]所示。

$$\begin{cases} \text{极一：}\dfrac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} < U_{\Delta\mathrm{set}}\text{；}\quad \text{极二：}\dfrac{\mathrm{d}(-U)}{\mathrm{d}t} < U_{\Delta\mathrm{set}} \\ \text{极一：}U < U_{\mathrm{set}}\text{；}\quad \text{极二：}-U < U_{\mathrm{set}} \\ \text{极一：}I_{\mathrm{d}} > 0\text{；}\quad \text{极二：}I_{\mathrm{d}} < 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：U、$U_{\Delta\mathrm{set}}$、U_{set}、I_{d} 分别为保护装置采集的

直流线路电压、电压突变量保护的电压变化速率定值、低电压定值、直流线路电流的方向，并定义 $I_d>0$ 表示直流输电线路故障电流从换流站流向直流输电线路。

1.2 故障电流方向及保护适应性分析

以图 1 所示的特高压三端直流输电系统为例，换流站 1 采用直流电压 U_{1s}、直流电流 I_{1s} 配置直流输电线路 1 的电压突变量保护；换流站 2 采用直流电压 U_{1m}、直流电流 I_{1m} 配置直流输电线路 1 的电压突变量保护，并采用直流电压 U_{2s}、直流电流 I_{2s} 配置直流输电线路 2 的电压突变量保护；换流站 3 采用直流电压 U_{2m}、直流电流 I_{2m} 配置直流输电线路 2 的电压突变量保护；图中箭头表示各直流电流的极性。

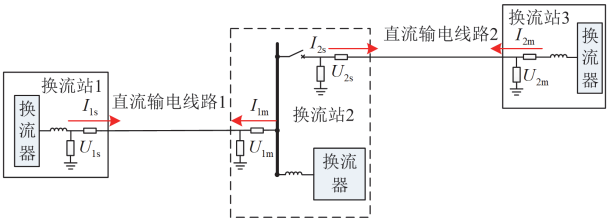

图 1 特高压三端直流输电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of three-terminal UHVDC system

当直流输电线路 1 或者直流输电线路 2 发生接地故障时，换流站 1、换流站 2、换流站 3 的直流电流都会从换流站流向故障点。图 2 给出了极一直流输电线路 1 发生接地故障时各换流站直流电流的方向。

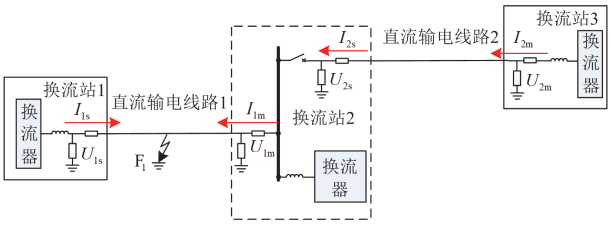

图 2 极一直流输电线路 1 接地故障时直流电流方向

Fig. 2 DC current direction when ground faults on the DC line 1 of pole 1

由图 2 可知，换流站 2 配置的直流输电线路 2 的电压突变量保护电流方向 $I_d<0$，所以保护不动作；而虽然换流站 3 配置的电压突变量保护电流方向 $I_d>0$，但通过合理整定式(1)中的电压变化速率定值 $U_{\Delta set}$ 也可确保换流站 3 的电压突变量保护不动作。即直流输电线路 1 发生接地故障时，只有换流站 1 配置的电压突变量保护和换流站 2 配置的直流输电线路 1 的电压突变量保护动作。同理，当直流输电线路 2 发生接地故障时，只有换流站 2 配置的直流输电线路 2 的电压突变量保护和换流站 3 的电压突变量保护动作。

自然界雷击电力线路一般都是以异极性的雷击为主[18-21]，但是在少数情况下也会发生同极性的雷击电力线路故障，比如 2022 年 6 月 22 日，国内某特高压多端混合直流输电工程就发生一起同极性雷击直流输电线路并造成绝缘击穿的事件。

异极性的雷击造成线路绝缘击穿时，直流线路电压和直流线路电流变化的特征与直流线路直接接地时类似，直流电流的方向与直接接地时电流的方向相同，再通过合理整定电压变化速率定值 $U_{\Delta set}$ 也可确保各直流线路的电压突变量保护准确动作。

同极性雷击直流输电线路时，直流线路的电压先升高，直流输电线路电流方向从雷击点流向直流输电线路的两端。以图 3 所示的同极性雷击极一直流输电线路 1 为例，换流站 1 和换流站 3 的电流方向 $I_d<0$；换流站 2 的直流输电线路 1 的电流方向 $I_d<0$，但是其直流输电线路 2 的电流方向 $I_d>0$。当同极性雷击故障导致直流输电线路绝缘击穿之后，各换流站直流输电线路的电流方向突然反转，与图 2 所示的方向完全相同，同时直流电压 U_{1s}、U_{1m}、U_{2s} 的变化速率都小于式(1)中的电压变化速率定值 $U_{\Delta set}$，并且它们的瞬时值也都小于低电压定值 U_{set}。因为在直流输电线路绝缘击穿之前，同极性雷击故障已经导致式(1)所示的电压突变量保护电流方向判据错误地识别了故障线路，所以在直流输电线路绝缘击穿导致直流输电线路电压快速跌落以后，电压突变量保护会误动或者拒动。

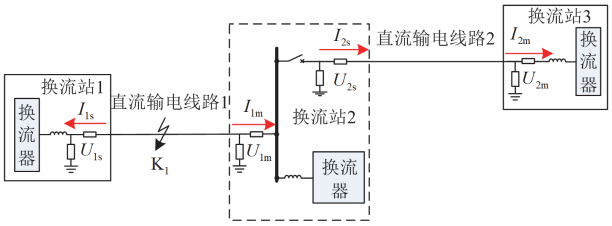

图 3 同极性雷击极一直流输电线路 1 时直流电流方向

Fig. 3 DC current direction when the same polarity lightning strike on the DC line 1 of pole 1

根据图 3 的电流方向可知，换流站 1 的电流方向 $I_d<0$；换流站 2 的直流输电线路 1 的电流方向 $I_d<0$，但是直流输电线路 2 的电流方向 $I_d>0$。因此，换流站 1 配置的电压突变量保护和换流站 2 配置的直流输电线路 1 的电压突变量保护会拒动；而换流站 2 配置的直流输电线路 2 的电压突变量保护会误动。同理，同极性雷击直流输电线路 2 时，换流站 2 配置的直流输电线路 2 的电压突变量保护

和换流站 3 的电压突变量保护因为电流方向 $I_d<0$ 而拒动，换流站 2 配置的直流输电线路 1 的电压突变量保护因为电流方向 $I_d>0$ 而误动。

2　基于功率方向的电压突变量保护

2.1 直流输电线路典型故障及特性

图 4 给出了特高压三端直流输电线路的典型故障，其中 F_1、F_2、F_3 分别为直流输电线路 1、直流输电线路 2、换流站 2 母线的接地故障；K_1、K_2、K_3 分别为直流输电线路 1、直流输电线路 2、换流站 2 母线的同极性雷击故障。

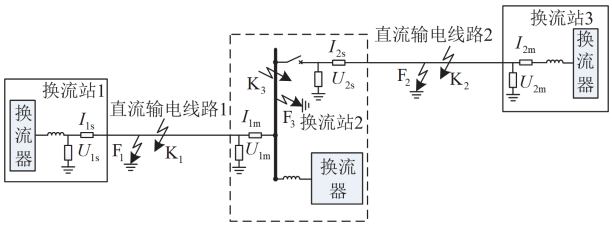

图 4 特高压三端直流输电系统直流线路典型故障

Fig. 4 Typical line faults of three-terminal UHVDC system

极一正常运行时直流电压为 800 kV，接地故障导致其直流线路电压减小、变化极性小于 0；同极性雷击直流线路造成直流线路电压增大、变化极性大于 0。再按照 1.2 节的分析，得到特高压三端直流输电系统在典型故障下各换流站极一直流线路电压和电流的变化极性如表 1 所示。

表 1 特高压三端极一直流线路故障时电压及电流极性

Table 1 Voltage and current polarity when faults on the line 1 of three-terminal UHVDC system

故障位置	U_{1s}	I_{1s}	U_{1m}	I_{1m}	U_{2s}	I_{2s}	U_{2m}	I_{2m}
F_1	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
F_2	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑
F_3	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑
K_1	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↓
K_2	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↓
K_3	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓

由表 1 可知，极一直流输电线路发生直接接地故障或者遭遇同极性雷击故障时，故障线路的直流电压极性、直流电流极性朝相反的方向变化；而非故障线路靠近故障线路的一端，其直流电压极性、直流电流极性朝相同的方向变化；非故障线路远离故障线路的一端，其直流电压极性、直流电流极性朝相反的方向变化。因此，通过直流功率的变化方向能可靠识别故障是否处于保护安装的正方向。

极二正常运行时直流电压为−800 kV，接地故障导致其直流线路电压增大、变化极性大于零；同极性雷击直流线路造成直流线路电压减小、变化极性小于 0；电流的极性也与第 1.2 节的分析相反。因此，极二直流输电线路发生图 4 所示的各种典型故障时，其直流输电线路电压的极性和直流输电线路电流的极性与表 1 所示的极性全部相反，但是直流输电线路电压和直流输电线路电流朝相反方向变化的特性不改变。

综上所述，直流输电线路发生直接接地故障或者同极性雷击故障，直流输电线路功率的变化方向完全相同，即同极性雷击故障造成直流输电线路绝缘击穿时直流功率的变化方向不会像电流方向那样发生极性反转。

2.2 基于功率方向的电压突变量保护原理

2.2.1 设计思想

基于功率方向的电压突变量保护的设计思想为：针对图 4 所示的各种故障，换流站 2 通过直流功率的变化方向识别是直流输电线路 1 故障还是直流输电线路 2 故障；换流站 1 和换流站 3 在以上各种故障发生时，直流功率的变化方向都完全相同，需通过整定合适的直流电压变化速率定值来识别区内、区外故障；再结合低电压判据，给出保护判据如式(2)所示。

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}U_j}{\mathrm{d}t}<U_{\Delta\mathrm{set}_j}\\ U_j<U_{\mathrm{set}_j}\\ P_{\mathrm{d}_j}<0\end{cases}\tag{2}$$

式中：U_j、$U_{\Delta\mathrm{set}_j}$、U_{set_j}、P_{d_j} 分别为换流站 j 的保护装置采集的直流线路电压、电压突变量保护的电压变化速率定值、低电压定值、直流功率方向。另外，当换流站 2 的直流输电线路出口处未安装电抗器时，换流站 1 和换流站 3 仅依靠直流电压的变化速率不能区分具体的故障直流线路，需再接收换流站 2 的直流功率方向，文献[22]为了避免电压突变量保护全部依赖站间通信，提出了将电压突变量保护分为两段的策略，本文不再详述。

2.2.2 功率方向判据的实现

图 5 给出了特高压直流输电线路遭受同极性雷击故障的波形，其中：U_{DL} 为直流输电线路电压；I_{DL} 为直流输电线路电流；P_{DC} 为直流功率。

由图 5 可知，故障后直流输电线路电压与直流输电线路电流是反向变化的，两者乘积后的直流功率不断地振荡，按式(3)计算的直流功率变化方向不稳定。

$$\Delta P_k=P_k-P_{k-1}=U_kI_k-U_{k-1}I_{k-1}\tag{3}$$

式中：ΔP_k 是 k 时刻采样点的直流功率变化量，P_k、U_k、I_k 分别是 k 时刻采样点的直流功率、直流输电线路电压、直流输电线路电流。因此，直流功率的方向判别不宜采取式(3)所示的当前采样点直流功率与上一个采样点直流功率直接差分的方法。

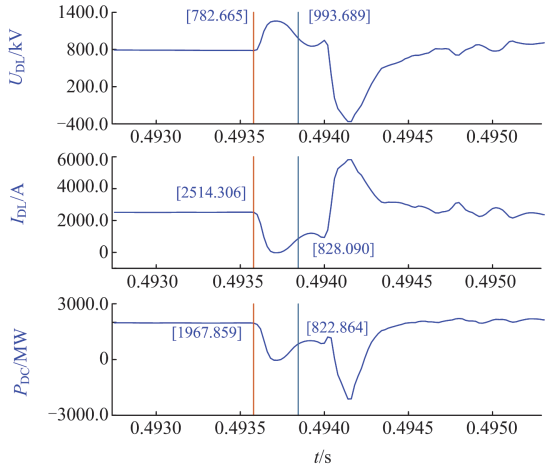

图 5 特高压直流输电线路同极性雷击故障波形

Fig. 5 Same polarity lightning faults waveforms of UHVDC system line

本文定义直流输电线路电压的变化量与直流输电线路电流的变化量之积为直流变化量功率，并提出以特定时间窗口 T 内的直流变化量功率累积量作为识别直流功率方向的特征量，具体定义为

$$P_{\Delta}=\sum_{k=1}^{n}P_{\Delta k}=\sum_{k=1}^{n}(U_k-U_{k\text{-}T_{\mathrm{m}}})\times(I_k-I_{k\text{-}T_{\mathrm{m}}}) \tag{4}$$

式中：P_{Δ} 是时间窗口 T 内的直流变化量功率的累积量；$P_{\Delta k}$ 是时间窗口 T 内第 k 个采样点的直流变化量功率；$U_{k\text{-}T_{\mathrm{m}}}$、$I_{k\text{-}T_{\mathrm{m}}}$ 分别是超前时间窗口 T 内第 k 个采样点超前时间 T_{m} 的直流电压、直流电流，另外，总采样点数 n 与时间窗口 T、采样周期 T_{S} 满足式(5)所示的关系。

$$n=\frac{T}{T_{\mathrm{S}}} \tag{5}$$

以图 6 为例，假设 $t+T$ 处为当前时刻，则取从时间 t 到时间 $t+T$ 内所有采样点的直流变化量功率之和为时间窗口 T 内的直流变化量功率的累积量 P_{Δ}，而时间 $t+T$ 处的直流电压变化量、直流电流变化量分别等于时间 $t+T$ 处的直流电压、直流电流减去 $t+T-T_{\mathrm{m}}$ 处的直流电压、直流电流。

根据 2.1 节的分析，直流输电线路发生同极性雷击故障或接地故障时，直流输电线路电压变化量和直流输电线路电流变化量都呈现极性相反的特征，即直流变化量功率的累积量都小于 0。因此，式(2)的第 3 个判据可转化为式(6)。

$$P_{\Delta}=\sum_{k=1}^{n}P_{\Delta k}=\sum_{k=1}^{n}(U_k-U_{k\text{-}T_{\mathrm{m}}})\times(I_k-I_{k\text{-}T_{\mathrm{m}}})<P_{\Delta_\mathrm{set}} \tag{6}$$

式中：P_{Δ_set} 为判定直流输电线路故障正方向的直流变化量功率门槛值。

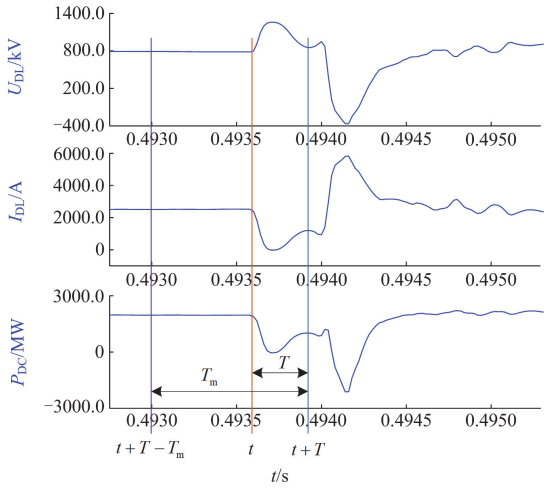

图 6 直流功率方向计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of DC power direction calculation

2.2.3 功率方向判据参数的整定

式(6)所示的直流线路故障正方向的判据需要确定 3 个关键参数：时间窗口 T、超前采样点 k 之前的时间 T_{m}、直流变化量功率门槛值 P_{Δ_set}。

故障开始后的暂态阶段是直流变化量功率变化最剧烈的时间，所以时间窗口 T 应小于同极性雷击故障持续的时间和线路接地故障发生后故障行波波头持续的时间。根据图 6 及搜集的实际特高压直流输电线路故障波形，同极性雷击故障持续的时间或线路接地故障发生后故障行波波头持续的时间通常小于 1 ms，推荐时间窗口 T 为 500 μs。

超前采样点 k 之前的时间 T_{m} 应大于电压突变量保护的时间定值，以确保故障后时间窗口 T 内各采样点的直流电压、直流电流分别与故障前的直流电压、直流电流相减。目前，特高压直流输电工程实际应用的直流线路电压突变量保护的时间定值最长可达 10 ms，考虑冗余后 T_{m} 可取 15 ms。

电压突变量保护的直流功率方向判据应避免直流功率阶跃变化时误判方向，所以直流变化量功率门槛值 P_{Δ_set} 的绝对值应大于经过超前时间 T_{m} 直流功率能达到的最大阶跃量 ΔP_{sm} 与时间窗口 T 内采样点数 n 的乘积。考虑可靠系数 K，直流变化量功率门槛值 P_{Δ_set} 可按式(7)计算。

$$P_{\Delta_\mathrm{set}}=(-1)\times\left|\Delta P_{\mathrm{sm}}\right|\times K\times n \tag{7}$$

根据相关标准，特高压直流输电工程直流功率须在 80 ms 内达到阶跃量的 90%，考虑一极 0.1 倍额定直流功率、另一极额定直流功率，并且一次设备具备过负荷能力的极端工况[23-24]，当额定直流功率的极发生故障时，另一极最大的直流功率阶跃量等于额定直流功率[25-26]。在超过时间 T_m 内直流功率能达到的最大阶跃量 ΔP_{sm} 可按式(8)计算。

$$\Delta P_{sm}=\frac{T_m}{80}\times\Delta P_s\times 90\% \tag{8}$$

式中：ΔP_s 为最大的直流功率阶跃量，即额定直流功率。

3　仿真验证

本文在 RTDS 上构建了如图 4 所示的±800 kV 特高压三端混合直流输电系统模型，相关的参数如表 2 所示，基于此模型并按照国标《GB/T 14285-2023 继电保护和安全自动装置技术规程》第 6.2.5.3 款的要求，验证所提基于功率方向的特高压直流输电线路电压突变量保护检测直流输电线路金属性接地故障和同极性雷击导致绝缘击穿故障的动作准确性。

表 2　±800 kV 特高压三端混合直流输电系统参数

Table 2 Parameters of ±800 kV hybrid three-terminal UHVDC system

U_e/kV	I_e/A	T_s/μs	T_m/ms	T/μs	K
800	5000	100	15	500	1.2

根据表 2 的参数及第 2.2.3 节的分析，基于功率方向的特高压直流输电线路电压突变量保护定值如表 3 所示。

表 3　电压突变量保护定值

Table 3 Settings of voltage derivative protection

ΔP_s/MW	ΔP_{sm}/MW	P_{Δ_set}/MW	ΔU_{set_j}/(p.u./ms)	U_{set_j}/p.u.
4000	675	−4050	−1.4	0.5

3.1　实际工程同极性雷击故障波形回放验证

在构建的 RTDS 模型中回放发生于国内某特高压三端直流输电工程极二同极性雷击故障 K_2 的事故波形。模型输出换流站 2 采集的直流输电线路 2 的电压和电流接入换流站 2 的直流输电线路 2 保护装置，输出换流站 2 采集的直流输电线路 1 的电压和电流接入换流站 2 的直流输电线路 1 保护装置。

同极性雷击故障 K_2 的波形回放试验，故障前极一以 800 kV、2500 A，极二以−400 kV、2500 A 的工况运行。故障后换流站 2 的直流输电线路 2、直流输电线路 1 的基于功率方向的电压突变量保护动作情况分别如图 7、图 8 所示。图中：P_{B2s} 为换流站 2 直流输电线路 2 的实时直流变化量功率；P_{B1m} 为换流站 2 直流输电线路 1 的实时直流变化量功率；P_{INC} 为式(6)是否成立的信号；DUDT_TRIP 为基于功率方向的电压突变量保护动作信号；DUDT_FUL 为电压变化速率满足电压变化速率定值的信号；UV_FUL 为电压瞬时值满足低电压定值的信号；第 4 幅子图粗线条表示对应的开关量信号为真，细线条表示对应的开关量信号为假。

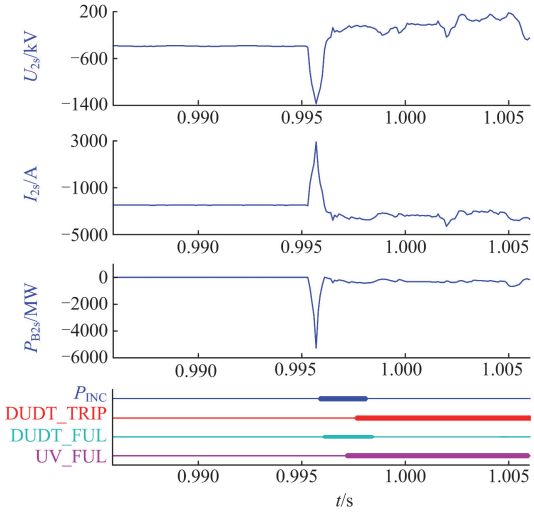

图 7　直流输电线路 2 电压突变量保护波形

Fig.7 Voltage derivative protection waveforms of DC line 2

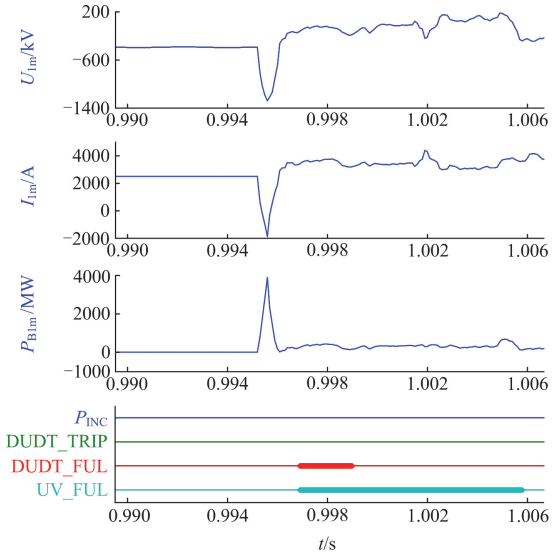

图 8　直流输电线路 1 电压突变量保护波形

Fig. 8 Voltage derivative protection waves of DC line 1

由图 7 可知，在同极性雷击直流输电线路 2 的瞬间，虽然直流电流从−2500 A 变化至 3000 A(正常运行时电流从直流输电线路 2 流向换流站 2)、不满

足式(1)的电流方向条件，但是直流变化量功率从 0 减小至−5000 MW，立即判定直流输电线路 2 发生了故障，当电压变化速率判据和低电压判据都满足后，基于功率方向的电压突变量保护正确动作。

由图 8 可知，在同极性雷击直流输电线路 1 的瞬间，虽然直流电流从 2500 A 变化至−2000 A(正常运行时电流从换流站 2 流向直流输电线路 1)，满足式(1)的电流方向条件，但是直流变化量功率从 0 增大至 4000 MW，判定直流输电线路 1 没有发生故障，后续虽然电压变化速率判据和低电压判据都满足，但是直流输电线路 1 的基于功率方向的电压突变量保护可靠不动作。

3.2 接地故障仿真验证

图 9 为直流输电线路 1 发生接地故障 F_1 时换流站 2 的直流输电线路 1 的电压突变量保护动作波形。故障发生后，直流输电线路电压下降、直流输电线路电流上升(正常运行时电流极性与图 1 中定义的极性相反)，直流变化量功率从 0 开始逐步减小至−5000 MW，因此电压突变量保护判定为直流输电线路 1 方向发生故障，在电压变化速率和低电压判据都满足后电压突变量保护正确动作。

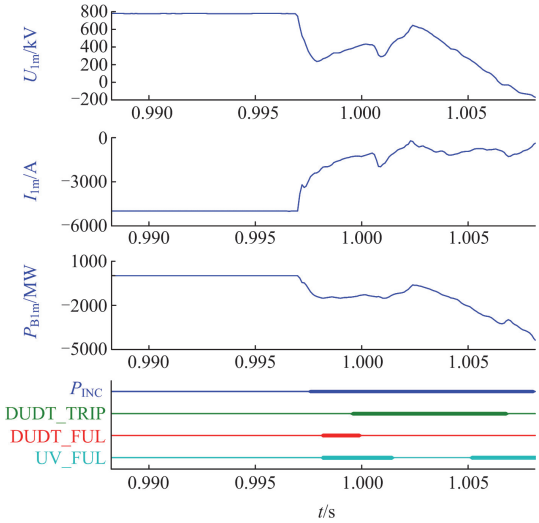

图 9 直流输电线路 1 发生接地故障时换流站 2 波形

Fig. 9 Converter station 2 waveforms when ground fault occurs on DC line 1

图 10 为直流输电线路 2 发生接地故障 F_2 时换流站 2 的直流输电线路 2 的电压突变量保护动作波形。故障发生后，直流输电线路电压下降、直流输电线路电流上升(正常运行时电流极性与图 1 中定义的极性相同)，直流变化量功率从 0 开始逐步减小至−5000 MW，因此电压突变量保护判定为直流输电线路 2 方向发生故障，在电压变化速率和低电压判据都满足后电压突变量保护正确动作。

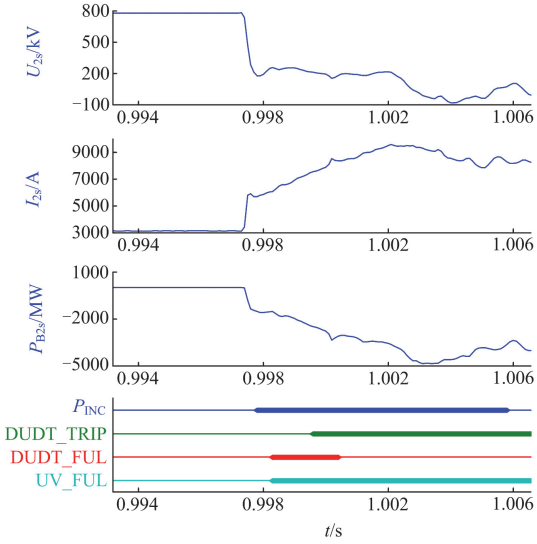

图 10 直流输电线路 2 发生接地故障时换流站 2 波形

Fig. 10 Converter station 2 waveforms when ground fault occurs on DC line 2

4 结论

本文针对特高压直流输电线路电压突变量保护在同极性雷击直流输电线路并导致绝缘击穿时的误动或拒动问题，分析了特高压直流输电线路在接地故障和同极性雷击故障时的电流极性和电压极性，在此基础上指出工程应用的电流方向判据在同极性雷击直流输电线路故障时会导致电压突变量保护误动或拒动，并进一步提出了基于功率方向的电压突变量保护，通过分析及仿真验证，得出结论如下：

1) 特高压直流输电线路遭受同极性雷击故障或者直接接地故障时，直流变化量功率的方向能准确识别故障线路，并且故障线路的直流变化量功率极性为负，非故障线路的直流变化量功率极性为正。

2) 故障后的实时直流电压、实时直流电流分别与故障前的稳态直流电压、稳态直流电流作差运算，充分利用了故障导致的直流电压、直流电流特性，方法准确可靠并且容易实现。

3) 特高压多端直流输电线路相比特高压两端直流输电线路更容易遭受雷击故障，配置的电压突变量保护也更容易误动或拒动，本文所提的基于功率方向的特高压直流输电线路电压突变量保护相比目前工程实际应用的电压突变量保护，其可靠性得到了较大提升，更适合应用于特高压多端直流输电系统。

另外，文中提出的方案虽然解决了电压突变量保护在同极性雷击直流输电线路并导致绝缘击穿时可靠性低的问题，符合国标《GB/T 14285-2023 继

电保护和安全自动装置技术规程》第 6.2.5.3 款的要求，但是其没有解决耐过渡电阻不高的缺陷，后续需要进一步研究。

参考文献

[1] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 经柔性高压直流输电并网的海上风电送出线路拟功率和、差波形比较式纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 62-69.
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Quasi-power sum and differential waveform comparison type pilot protection for VSC-HVDC grid-connected offshore wind power outgoing line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 62-69.

[2] 邓楠, 郝亮亮, 和敬涵, 等. 受端混联型多端直流输电系统逆变侧交流故障特性分析及协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 54-64.
DENG Nan, HAO Liangliang, HE Jinghan, et al. AC fault characteristics analysis and coordinated control strategy on the inverter side of a receiving-end hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 54-64.

[3] LI Ye, JIA Na, HE Jiawei, et al. Non-unit protection scheme based on cooperation with control strategy for multiterminal hybrid HVDC system without line boundary[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(5): 41-55.

[4] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 混合多端直流输电系统线路保护方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2617-2622.
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Research on protection scheme of hybrid multi-terminal DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2617-2622.

[5] 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.

[6] 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): 1753-1761.
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): 1753-1761.

[7] 贾科, 刘可歆, 毕天姝, 等. 基于波形匹配的柔性直流输电线路单端量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 13-26.
JIA Ke, LIU Kexin, BI Tianshu, et al. Research on single-ended protection of a flexible HVDC transmission line based on waveform matching[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 13-26.

[8] 王子江, 张兆毅, 樊友平, 等. 基于近似熵变化量判据的混合直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 1-12.
WANG Zijiang, ZHANG Zhaoyi, FAN Youping, et al. A pilot protection scheme for a hybrid HVDC transmission system based on an approximate entropy change criterion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 1-12.

[9] 张庆武, 徐莹, 沈天骄, 等. 级联多端特高压直流控制保护系统配置及策略[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1799-1807.
ZHANG Qingwu, XU Ying, SHEN Tianjiao, et al. Configuration and strategies of the control and protection system for CMT-UHVDC[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1799-1807.

[10] 戴志辉, 石旭. 基于电压-电流采样轨迹的混合直流输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2179-2188.
DAI Zhihui, SHI Xu. A pilot protection for hybrid HVDC transmission line based on voltage-current sampling trajectory[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2179-2188.

[11] 沈毅, 黄琛, 赵振廷, 等. 兼顾短路与断线故障识别的柔性直流电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 143-155.
SHEN Yi, HUANG Chen, ZHAO Zhenting, et al. A traveling wave protection scheme for flexible DC power grids considering both short-circuit and breakage fault identification[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 143-155.

[12] 陈淼, 贾科, 陈聪, 等. 基于高频阻抗曲线匹配的混合直流输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 119-125.
CHEN Miao, JIA Ke, CHEN Cong, et al. Pilot protection for hybrid DC transmission line based on high-frequency impedance curve matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 119-125.

[13] SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. A new whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 599-607.

[14] 杨建明, 张庆武, 王杨正, 等. 特高压直流输电线路电压突变量保护优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 102-109.
YANG Jianming, ZHANG Qingwu, WANG Yangzheng, et al. Optimization of voltage differential protection for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Engineering

Technology, 2022, 41(3): 102-109.

[15] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 团林换流站电压突变量保护研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 37-41.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. Research of undervoltage sensing protection at Tuanlin converter station[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 37-41.

[16] 滕予非, 李小鹏, 焦在滨, 等. 特高压直流分压器传变特性及其对电压突变量保护影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 122-130.
TENG Yufei, LI Xiaopeng, JIAO Zaibin, et al. Analysis of the transfer characteristic of DC voltage divider in UHVDC system and its effects on undervoltage sensing protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 122-130.

[17] 邢鲁华, 陈青, 付兆远, 等. 基于电压和电流突变量的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 61-66.
XING Luhua, CHEN Qing, FU Zhaoyuan, et al. Protection principle for HVDC transmission lines based on fault component of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 61-66.

[18] 黎鹏, 肖盼, 谌洪, 等. 地闪长连续电流对 500 kV 直流输电线路故障重启动特性的影响[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1596-1604.
LI Peng, XIAO Pan, SHEN Hong, et al. Influence of cloud-to-ground lightning with long continuous current on fault restart characteristic of 500 kV DC transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1596-1604.

[19] 雷梦飞, 王少华, 刘黎, 等. 特高压直流输电线路雷击故障特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 57-62.
LEI Mengfei, WANG Shaohua, LIU Li, et al. Analysis on lightning fault characteristics of UHVDC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 57-62.

[20] 刘家军, 李晨婧, 侯涛, 等. 500 kV 输电线路雷击故障仿真分析及类型识别方法[J]. 高压电器, 2025, 61(7): 222-233.
LIU Jiajun, LI Chenjing, HOU Tao, et al. Simulation analysis and type identification method for lightning strike faults on 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(7): 222-233.

[21] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形特征的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 31-44.

[22] 王杨正, 杨建明, 鲁江, 等. 配置HSS的并联多端高压直流输电线路保护选择性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 95-102.
WANG Yangzheng, YANG Jianming, LU Jiang, et al. Line protection selectivity of the parallel multi-terminal HVDC with HSS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 95-102.

[23] 杨光源, 李兴源, 胡永银, 等. 高压直流输电换流阀过负荷能力计算方法[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 33-37.
YANG Guangyuan, LI Xingyuan, HU Yongyin, et al. Overload capability calculation methods of HVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 33-37.

[24] 胡永银, 李兴源, 李宽, 等. 云广特高压直流输电工程换流阀过负荷能力分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 102-106.
HU Yongyin, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Analysis and calculation of converter valve overload capability in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 102-106.

[25] 俞翔, 王杨正, 张庆武, 等. 特高压并联型三端混合直流输电系统功率转带策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 150-156.
YU Xiang, WANG Yangzheng, ZHANG Qingwu, et al. Power transfer strategy of parallel three-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 150-156.

[26] 李超, 胡文旺, 唐志军, 等. 对称双极柔性直流输电系统功率转带控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2173-2180.
LI Chao, HU Wenwang, TANG Zhijun, et al. Control strategy of power transfer in bipolar HVDC flexible transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2173-2180.

收稿日期：2025-08-04；　　修回日期：2025-11-19

作者简介：

杨建明(1984—)，男，硕士，正高级工程师，研究方向为特高压直流输电系统控制保护；E-mail: yangjm@nrec.com

杨慧霞(1977—)，女，通信作者，硕士，正高级工程师，研究方向为电力系统保护与控制技术。E-mail: huixiay@dlwg.net

(编辑　周金梅)