

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240442

基于暂态电压 Pearson 相关系数的柔性直流配电网 纵联保护方法

何东¹, 甘贝贝¹, 袁英硕², 曾进辉¹, 兰征¹

(1. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 2. 国网山东曹县供电公司, 山东 菏泽 274400)

摘要: 柔性直流配电网故障特征复杂, 快速可靠的故障保护方法是柔性直流配电网亟需突破的关键技术。基于此提出了一种基于直流线路限流电抗器暂态电压皮尔逊(Pearson)相关系数的直流配电网纵联保护方法。首先, 分析了区内外不同故障类型下直流线路两端限流电抗器暂态电压的特征差异。其次, 利用正、负极线路电压的变化率构成保护启动判据, 通过直流线路两端限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数识别区内、外故障, 并利用直流线路正负极电压变化率间的正负关系设计故障选极判据。最后, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建柔性直流配电网仿真模型验证所提保护方法的可行性。结果表明所提保护方法能满足柔性直流配电网保护速动性和选择性的要求, 且耐过渡电阻能力强, 受通信延迟影响小, 具有一定的抗干扰能力。

关键词: 柔性直流配电网; 限流电抗器; Pearson 相关系数; 故障特征; 纵联保护

Longitudinal protection method of flexible DC distribution network based on transient voltage Pearson correlation coefficient

HE Dong¹, GAN Beibei¹, YUAN Yingshuo², ZENG Jinhui¹, LAN Zheng¹

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. State Grid Shandong Cao County Power Supply Company, Heze 274400, China)

Abstract: The fault characteristics of the flexible DC distribution network are complex, and the rapid and reliable protection of faults is a key breakthrough technology urgently needed for flexible DC distribution networks. Based on this, a longitudinal protection method for DC distribution networks based on the transient voltage Pearson correlation coefficient of DC line current-limiting reactors is proposed. First, the differential characteristics of transient voltages of current-limiting reactors at both ends of DC lines under different fault types inside and outside the region are analyzed. Secondly, the rate of change of the positive and negative line voltages is used as a criterion for protection initiation. The Pearson correlation coefficient of transient voltages of current-limiting reactors at both ends of DC lines is used to identify faults inside and outside the region, and the positive and negative relationships between the rates of change of positive and negative DC line voltages are utilized to design fault polarity selection criteria. Finally, a simulation model of a flexible DC distribution network is built in Matlab/Simulink to verify the feasibility of the proposed protection method. The results show that the proposed protection method can meet the requirements of rapid action and selectivity for the protection of flexible DC distribution networks, with strong transient resistance capability, minimal impact from communication delays, and a certain degree of anti-interference ability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377185).

Key words: flexible DC distribution network; current-limiting reactor; Pearson correlation coefficient; fault characteristics; longitudinal protection

0 引言

随着新能源和电力电子技术的快速发展, 柔性

直流配电网因其电能质量高、控制灵活、损耗低、易于分布式能源消纳等优点, 受到了国内外学者广泛重视^[1-2]。然而, 当柔性直流配电网直流侧发生短路故障时, 故障电流上升速率快, 且峰值高, 其暂态过程会影响整个配电网的安全运行^[3-5]。而柔性直流配电网中电力电子装置耐受暂态冲击电流的能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377185); 湖南省教育厅科研项目资助(23B0553)

力相对较弱, 对系统故障保护方案提出了更高要求。同时, 故障发生后保护方法需在极短时间内快速准确地识别故障区域并动作, 保护动作时间应为毫秒级, 且充分考虑过渡电阻、线路分布式电容、同步误差以及噪声等因素对保护方法的干扰及影响^[6]。因此, 快速准确的故障保护方法是实现柔性直流配电网工程化应用的关键因素之一。

目前, 柔性直流配电网故障保护尚处于初步研究阶段。当传统故障保护方法如过流保护、微分保护等被直接应用于柔性直流配电网时, 可能存在区内、外故障识别不准确, 速动性和选择性无法兼顾, 相邻线路配合困难等问题^[7-8]。在直流线路中配置限流电抗器为解决目前的保护难题提供了一种有效的解决思路^[9-10]。现阶段, 已有学者利用故障后限流电抗器的边界特性差异开展故障识别及保护方法的研究^[11-13]。如文献[11]利用单端限流电抗器的电压变化率识别故障, 此方案原理简单, 但易受噪声干扰。文献[12]在多端柔性直流配电网线路发生故障时, 利用故障线路和非故障线路中限流电抗器暂态电压的大小和方向特征差异构造故障判据, 以识别故障和判极, 该方法无需通信且对硬件要求低, 但当过渡电阻较高时, 可靠性和灵敏性降低。文献[13]利用限流电抗器暂态初始电压的差异来识别区内、外故障, 此方法具有较好的抗噪声能力, 但过渡电阻较大时会影响故障识别的精度。近年来, 部分学者开展了基于故障暂态电气量相关系数的直流保护方法相关研究^[14-17]。文献[14]利用暂态故障电流波形相似性原理构成柔性直流配电网故障保护判据, 实现直流故障区域的快速准确识别, 但当出现较大的异常数据时, 暂态电流波形相似性会大幅降低, 存在保护误判风险。文献[15]提出基于线路电流 Spearman 秩相关系数的故障识别方法, 该方法具备较强的耐受过渡电阻和抗噪声能力。文献[16]利用直流配电网正负极线路暂态电压的 Pearson 系数构成直流线路区内、外故障识别判据, 但该方法仅能识别直流单极接地故障。文献[17]利用 Pearson 相关系数综合描述柔性直流配电网故障后线路两侧正负极电流极性及波形突变特征, 并据此识别区内、外故障及故障类型, 具有抗干扰能力强等优势。

综上所述, 柔性直流配电网故障保护方法主要面临如下挑战: (1) 受电力电子装置中电力电子器件耐受冲击能力弱的限制, 对系统故障保护的速动性要求高; (2) 故障发生后短时间内提取可用于构造保护判据的有效数据难, 且易受其他因素干扰; (3) 直流纵联保护方法虽具有较好的选择性优势, 但对线

路两端信息同步性要求较高。现有保护方法通常采取提高采集频率、扩大数据窗口长度来解决信息同步误差的问题, 但往往牺牲了保护方法的速动性。

基于此, 利用限流电抗器暂态电压特征和 Pearson 相关系数原理, 提出了一种适用于柔性直流配电网的纵联保护方法。以直流线路两端限流电抗器为边界分析直流线路发生双极短路或单极接地故障时其限流电抗器暂态电压的变化特征。利用直流线路正负极电压变化率的绝对值构成保护启动判据, 并根据线路两端限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数进行区内、外故障识别。最后利用故障时直流线路正负极电压的变化率判断故障极。Matlab/Simulink 仿真结果表明该保护方法与传统的基于幅值或正负极性构成的保护方法相比, 其受过渡电阻和白噪声的影响小, 且不需要严格的通信同步, 对实现柔性直流配电网的安全可靠运行具有重要意义。

1 柔性直流配电网典型故障特性分析

1.1 柔性直流配电网拓扑结构

柔性直流配电网拓扑主要分为辐射型、双端型和环形 3 种典型结构。本文以双端型柔性直流配电网为研究对象, 拓扑结构如图 1 所示。该柔性直流配电网利用电压源型换流器(voltage source converter, VSC)实现交直流配电网之间的电能变换, 其直流母线电压为 ± 10 kV。光伏发电系统和风力发电系统分别通过 DC/DC 和 AC/DC 换流器接入柔性直流配电网。 $L_1 - L_6$ 表示直流线路两端所安装的限流电抗器等效电感, 限流电抗器具有滤波及限制故障电流的功能, 可为直流故障快速识别赢取时间^[18]。假设直流线路 1 为被保护线路, 并以线路两端限流电抗器为保护边界, 分别在 F_1 、 F_2 和 F_3 处设置单极接地故障和双极短路故障进行分析研究。

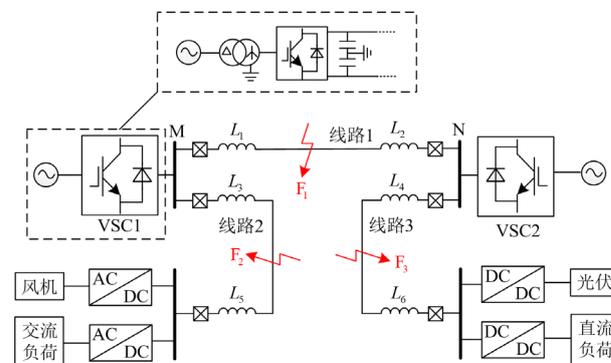


图 1 双端型柔性直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Double-ended flexible DC distribution network topology

1.2 区内故障特性分析

以故障 F_1 为例, 当直流线路 1 发生区内双极短路故障时, 其故障回路如图 2(a)所示。图中 M、N 为线路两侧的直流母线; u_{Lp1} 、 u_{Lp2} 、 u_{Ln1} 、 u_{Ln2} 分别为正负极限流电抗器 L_{p1} 、 L_{p2} 、 L_{n1} 、 L_{n2} 的暂态电压; U_p 、 U_n 分别为正极和负极母线的电压; Δi_{Mp} 、 Δi_{Np} 分别为流过正极线路两端的电流突变量; Δi_{En} 、 Δi_{Fn} 分别为流过负极线路两端的电流突变量; 假设正极线路电流的正方向为母线流向线路, 负极线路的正方向为线路流向母线。

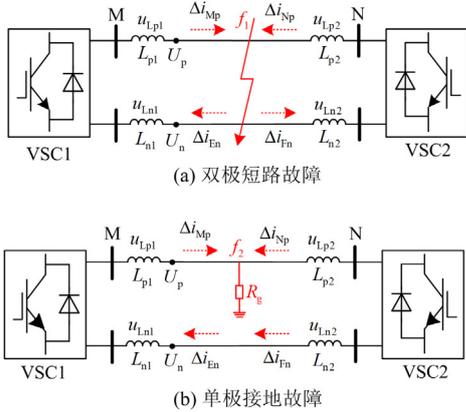


图 2 区内故障等效回路图

Fig. 2 Equivalent loop diagrams of internal faults

如图 2(a)所示, 当直流配电网线路发生区内双极短路故障时, 换流器 VSC1 和 VSC2 同时向故障点注入故障电流, 其幅值快速增大。正极线路两端的故障电流均由母线流向线路, 与参考方向一致, 即突变方向为正, 呈正相关。负极线路两端的故障电流均由线路流向母线, 与参考方向一致, 即突变方向为正, 呈正相关。此时限流电抗器的电压、电流关系为

$$\begin{cases} u_{Lp1}(t) = L_{p1} \frac{di_{Mp}(t)}{dt} \\ u_{Lp2}(t) = L_{p2} \frac{di_{Np}(t)}{dt} \\ u_{Ln1}(t) = L_{n1} \frac{di_{En}(t)}{dt} \\ u_{Ln2}(t) = L_{n2} \frac{di_{Fn}(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{Mp} 、 i_{Np} 分别为流过正极线路两端的电流; i_{En} 、 i_{Fn} 分别为流过负极线路两端的电流。

由式(1)可知, 限流电抗器暂态电压的突变方向和微分电流方向一致。而微分电流与故障电流突变

方向一致, 即发生区内双极短路故障时限流电抗器暂态电压 u_{Lp1} 、 u_{Lp2} 、 u_{Ln1} 、 u_{Ln2} 的突变方向和故障电流突变方向均相同, 为正方向且呈正相关。此时, 正极电压降低, 负极电压升高, 最终都趋于零。因此正、负极电压的变化率可表示为

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} < 0 \\ \frac{dU_n}{dt} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

当直流线路发生区内单极接地故障时, 以发生正极接地故障为例, 其故障回路如图 2(b)所示。此时正极线路两端故障电流突变方向均为正, 根据式(2)可知正极线路两端的限流电抗器暂态电压突变方向均为正, 呈正相关。对于非故障线路(负极), 考虑双极线路间的耦合关系^[13], 非故障线路限流电抗器的暂态电压表达式为

$$\begin{cases} u_{Ln1}(t) = M_1 \frac{di_{Mp}(t)}{dt} \\ u_{Ln2}(t) = M_2 \frac{di_{Np}(t)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中, M_1 、 M_2 为直流正负极线路间的互感。

由式(3)可知, 非故障极限流电抗器暂态电压 u_{Ln1} 、 u_{Ln2} 的突变方向与故障极的故障电流 i_{Mp} 、 i_{Np} 突变方向一致, 故 u_{Ln1} 、 u_{Ln2} 呈正相关。因此, 在柔性直流配电网中, 无论是发生区内双极短路还是单极接地故障, 线路两端限流电抗器暂态电压的突变方向一致, 均呈正相关。

当发生正极接地故障时, 正极电压下降至零, 而负极电压则上升至原先的两倍。因负极电压本身为负, 在发生正极接地故障的情况下, 正极和负极的电压均呈现下降趋势。此时正、负极的电压变化率可表示为

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} < 0 \\ \frac{dU_n}{dt} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

同理, 当直流线路发生负极接地故障时, 正负极间的电压将保持不变, 而负极电压降低至零, 正极电压则升至原先的两倍。因此, 负极接地故障将导致正、负极电压均呈上升的趋势。此时正、负极的电压变化率可表示如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} > 0 \\ \frac{dU_n}{dt} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

1.3 区外故障特性分析

当直流配电网线路2或线路3发生区外双极短路故障时故障等效回路如图3所示。由图3可知,当发生区外双极短路故障时,正负极线路两端的暂态电流将出现方向相反的突变趋势,呈负相关。由式(1)可知,此时负极线路两端限流电抗器的电压突变方向亦相反,呈负相关。

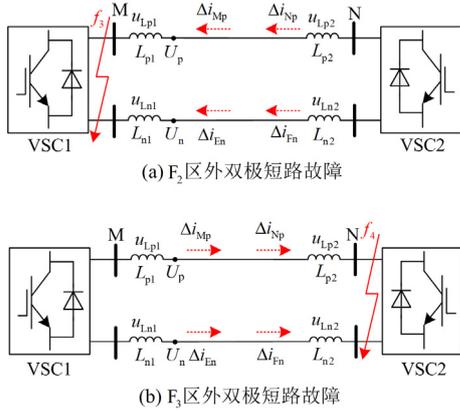


图3 区外双极短路故障等效回路图

Fig. 3 Equivalent loop diagrams of an external bipolar short circuit fault

当直流配电网线路发生区外单极接地故障时,图4为其故障回路等效图。由该图可知,发生单极接地故障时故障极的故障电流突变方向与发生双极短路故障时故障电流的突变方向一致。此时故障极两端限流电抗器暂态电压的突变方向相反,呈负相关。由式(4)可得,非故障极线路两端的限流电抗器暂态电压的突变方向相反,亦呈负相关。

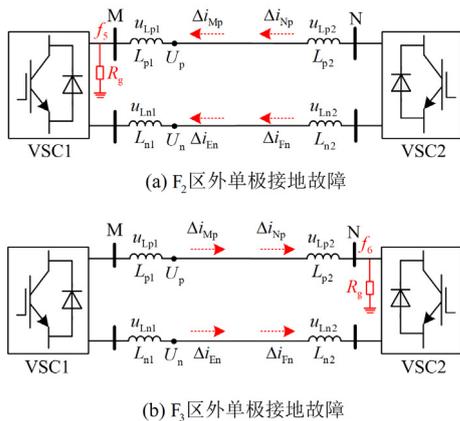


图4 区外单极接地故障等效回路图

Fig. 4 Equivalent loop diagrams of an external unipolar ground fault

综上所述,当直流配电网发生区内故障时,线路两侧限流电抗器暂态电压的变化趋势相同,呈正相

关。当发生区外故障时,线路两侧限流电抗器暂态电压的变化趋势相反,呈负相关。因此,限流电抗器暂态电压趋势变化特征如表1所示。当发生区内双极短路故障时,正、负极电压变化率为一正一负;当发生区内正极故障时,正、负极电压变化率均小于零;当发生区内负极故障时,正、负极电压变化率均大于零,正、负极电压变化率特征如表2所示。因此,可依据发生区内、外故障时线路两侧的限流电抗器暂态电压趋势变化特征和正、负极电压变化率特征的差异来构造区内、外识别判据和选极判据。

表1 线路两端限流电抗器暂态电压趋势特征

Table 1 Transient voltage trend characteristics of current-limiting reactors at both ends of the line

故障位置	线路极性	线路两端的限流电抗器电压变化趋势		相关性
		正极	负极	
区内故障	正极	相同	相同	正相关
	负极	相同	相同	正相关
区外故障	正极	相反	相反	负相关
	负极	相反	相反	负相关

表2 正负极电压变化率特征

Table 2 Characteristics of the voltage change rate of the positive and negative electrodes

故障位置	线路极性	变化率方向
区内双极短路故障	正极	负
	负极	正
区内正极接地故障	正极	负
	负极	负
区内负极接地故障	正极	正
	负极	正

2 所提保护方法

2.1 暂态电压 Pearson 相关系数保护原理

由第1节分析可知,当柔性直流配电网线路发生区内或区外故障时,正极线路两端限流电抗器的电压相关性不同。为更精确地描述这两个电压暂态量之间的关系特征,本文采用 Pearson 相关系数以量化方式描述线路两端限流电抗器暂态电压间的相关程度,进而构造有效的保护判据。

Pearson 相关系数法是一种用于衡量两个变量间相关程度的数学统计方法^[14]。对于离散电压信号序列 $u_{L1} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与 $u_{L2} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 而言,其 Pearson 相关系数的具体计算公式为

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right) \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right)^2}} \quad (6)$$

式中: u_{L1} 、 u_{L2} 表示线路两端的限流电抗器电压; P_m 为 Pearson 相关系数, $P_m \in [-1, 1]$ 。当 $P_m > 0$ 时表示两组相量呈正相关, 即两组相量同增或同减; 当 $P_m < 0$ 表示两组相量呈负相关, 即两组相量变化方向相反; 当 $P_m = 0$ 表示两组相量不相关, 即两组相量相互独立。

2.2 保护启动判据

为了避免故障保护频繁启动, 故需设置保护启动判据。由于柔性直流配电网线路发生故障时, 线路电压会有明显跌落, 而负荷变化、噪声等正常波动对直流线路电压无明显影响, 因此利用母线电压的变化率来设计保护启动判据。

$$K_s = \max \left(\left| \frac{dU_p}{dt} \right|, \left| \frac{dU_n}{dt} \right| \right) > S_1 \quad (7)$$

式中: K_s 为正极线路和负极线路电压变化率的最大值; S_1 为保护启动定值, S_1 的整定原则为一定可靠系数下正常线路电压变化率的最大值^[19]。

本文采用一阶导数的五点数值微分法计算线路母线电压的变化率, 可有效解决精度和干扰的问题, 其计算公式为

$$\begin{cases} \left| \frac{dU_p}{dt} \right| \approx \left| \frac{3U_{p1} - 16U_{p2} + 36U_{p3} - 48U_{p4} + 25U_{p5}}{12\Delta t} \right| \\ \left| \frac{dU_n}{dt} \right| \approx \left| \frac{3U_{n1} - 16U_{n2} + 36U_{n3} - 48U_{n4} + 25U_{n5}}{12\Delta t} \right| \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δt 为采样时间间隔; $U_{p1} - U_{p5}$ 为连续 5 个正极线路的母线电压采样数据; $U_{n1} - U_{n5}$ 为连续 5 个负极线路的母线电压采样数据。

2.3 区内、外故障判据

根据上述直流正极线路两端限流电抗器暂态电压变化趋势的相关特征来计算该电压的 Pearson 相关系数。当系统发生区内故障时, 限流电抗器的电压变化趋势呈正相关, 故 $P_m = 1$ 。当发生区外故障时, 限流电抗器的电压变化趋势呈负相关, 故 $P_m = -1$ 。即可由此构造区内、外识别判据。考虑到上述计算结果均为理想结果, 而在实际工程应用中保护判据的准确性可能会受过渡电阻、通信延迟和测量误差等影响。因此综合考虑上述影响因素, 在保留一定裕度的情况下设区内、外故障识别判据条件, 如式(9)所示。

$$P_{mp} \geq 0.8 \text{ 或 } P_{mn} \geq 0.8 \quad (9)$$

式中: P_{mp} 为正极线路的 Pearson 相关系数; P_{mn} 为负极线路的 Pearson 相关系数。当保护启动判据检

测到直流配电网发生了故障, 可根据式(6)计算 Pearson 系数, 若满足式(9)可判定为区内故障, 反之为区外故障。

2.4 故障选极判据

故障选极判据旨在进一步识别直流配电网线路中发生的故障类型, 即区分正、负极接地故障与双极短路故障。由第 1 节分析可知, 当发生正极接地故障时, 直流线路正极和负极电压均呈下降趋势, 此时正极和负极电压的变化率均小于零。当发生负极接地故障时, 直流线路正极和负极电压均呈上升趋势, 此时正极和负极的电压变化率均大于零。若发生双极短路故障, 正极电压将升高, 而负极电压则会降低, 此时直流线路正极电压变化率大于零, 负极变化率小于零。因此, 故障选极判据可表述为

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} < 0 \cap \frac{dU_n}{dt} < 0 \rightarrow \text{正极接地故障} \\ \frac{dU_p}{dt} > 0 \cap \frac{dU_n}{dt} > 0 \rightarrow \text{负极接地故障} \\ \frac{dU_p}{dt} < 0 \cap \frac{dU_n}{dt} > 0 \rightarrow \text{双极短路故障} \end{cases} \quad (10)$$

2.5 保护流程

本文提出的基于限流电抗器暂态电压 Pearson 相关系数的柔性直流配电网纵联保护方法流程图如图 5 所示。首先利用电压测量装置采样直流线路电压数据, 当采样数据满足式(8)时, 保护启动; 然后分别计算正极和负极线路两端限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数, 以识别区内、外故障; 再次利用正极和负极线路的电压变化率构成故障选极判据以确定故障类型及故障极; 最后向故障线路中直流断路器发出跳闸信号, 断路器动作以隔离故障区域。

3 仿真实验

为了验证本文所提保护方法的正确性, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建如图 1 所示的 ± 10 kV 柔性直流配电系统仿真模型, 其主要参数如表 3 所示。其中数据采样频率设置为 10 kHz, 所提保护方法从保护启动到归位约为 1.88 ms, 其中保护启动时间约为 0.5 ms, 保护算法时间窗为 0.5 ms; 数据处理通常采用可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)技术^[20], 计算时长约为 0.13 ms, 故障选极时长约为 0.3 ms, 信号通信延迟不超过 0.4 ms, 直流断路器动作时间约为 50 μ s^[21], 满足柔性直流配电网的速动性要求。

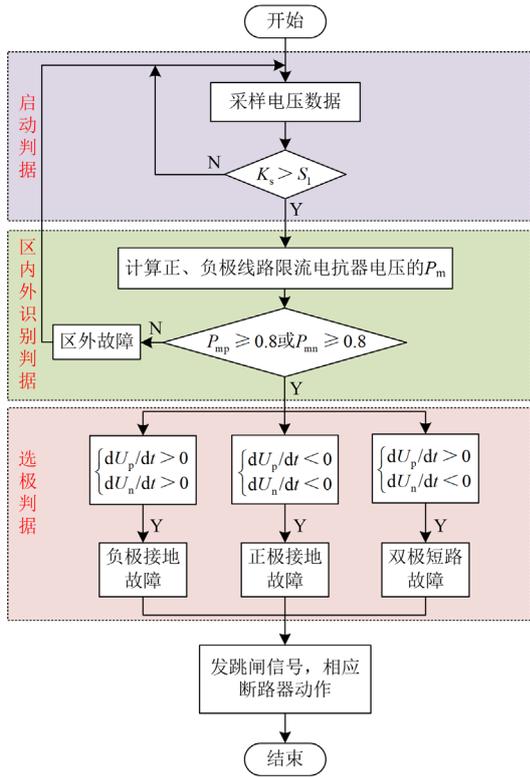


图 5 保护方法流程图

Fig. 5 Protection scheme flowchart

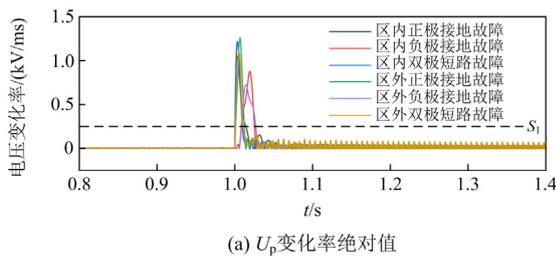
表 3 仿真系统主要参数

Table 3 Main parameters of the simulation system

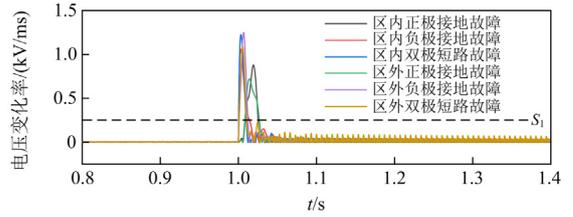
仿真参数	仿真数值
直流配电系统电压等级/kV	±10
直流线路单位电阻/(Ω/km)	0.0139
直流线路单位电感/(mH/km)	0.159
直流线路长度/km	10
VSC 直流侧电容/mF	2
限流电抗器/mH	10

3.1 保护启动判据仿真实证

根据 2.2 节的保护启动判据整定原则，电压正常波动时其启动判据无需满足启动。当 $t = 1\text{s}$ 直流线路发生区内、外双极短路故障和单极接地故障时电压 U_p 、 U_n 的变化率绝对值如图 6 所示。考虑一定的可靠系数，本文保护启动定值设置为 $S_1 =$



(a) U_p 变化率绝对值



(b) U_n 变化率绝对值

图 6 区内外故障时 U_p 、 U_n 的变化率绝对值

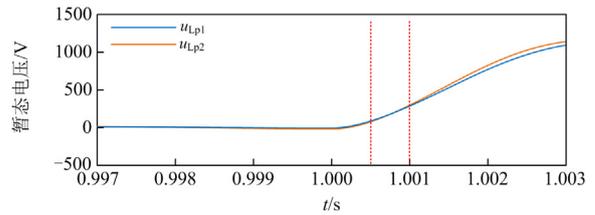
Fig. 6 Absolute values of the rate of change of U_p and U_n during internal and external faults

0.25 kV/ms。由图 6 可知，无论直流线路发生区内或区外故障，电压 U_p 、 U_n 的变化率绝对值均大于启动定值 S_1 ，保护均会启动。

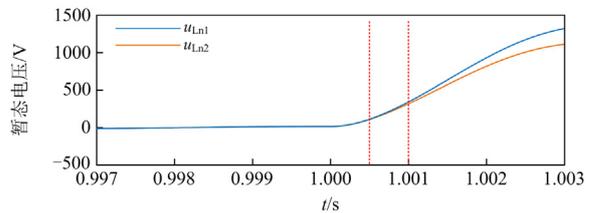
3.2 区内故障

3.2.1 区内双极短路故障

假设在 $t = 1\text{s}$ 图 1 中线路 1 的 F_1 处发生双极短路故障，其限流电抗器暂态电压暂态波形如图 7 所示。故障发生瞬间，测得故障线路两端限流电抗器的电压 u_{Lp1} 、 u_{Lp2} 、 u_{Ln1} 、 u_{Ln2} 迅速上升，且波形变化趋势一致。故障发生后 0.5 ms，保护方法通过式 (6) 计算正、负极线路限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数均等于 1，满足区内识别判据，判定为区内故障。此时正、负极线路电压波形如图 8 所示，由图 8 可知正极电压变化率小于零，负极电压变化率大于零，因此可判定为区内双极短路故障。



(a) 正极线路



(b) 负极线路

图 7 区内双极短路故障时限流电抗器暂态电压波形

Fig. 7 Transient voltage waveforms of current reactor during internal bipolar short circuit fault time limit

3.2.2 区内单极接地故障

假设 $t = 1\text{s}$ 在图 1 中线路 1 的 F_1 处发生正极接

地故障和负极接地故障时,相关电压波形如图 9 所示。由图 9 可知,正极和负极接地故障瞬间,其限流电抗器暂态电压 u_{Lp1} 、 u_{Lp2} 、 u_{Ln1} 、 u_{Ln2} 均迅速上升且波形变化趋势一致。故障发生后 0.5 ms,可利用式(6)计算得到 Pearson 系数均等于 1,且满足区内故障识别判据。

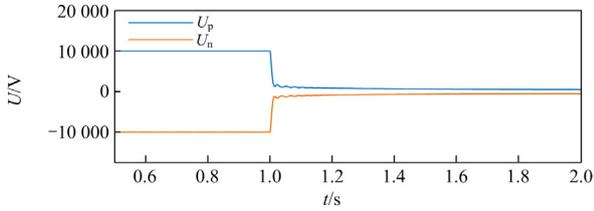
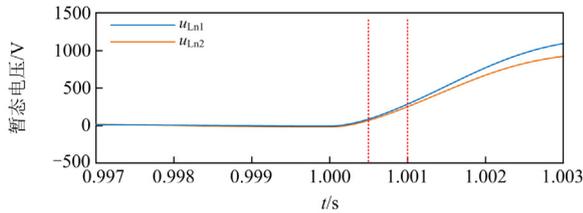
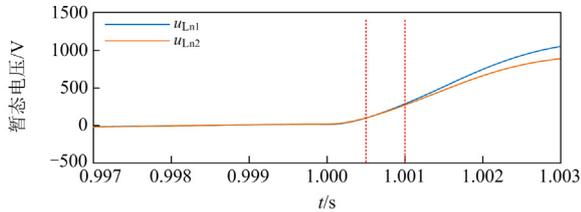


图 8 区内双极短路故障正、负极线路电压波形

Fig. 8 Voltage waveforms of positive and negative line for internal bipolar short circuit fault



(a) 正极接地故障

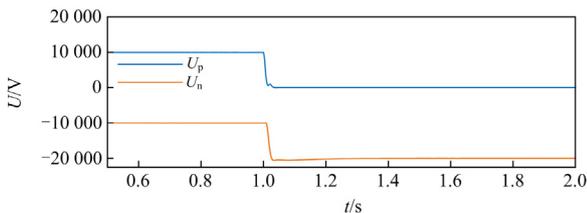


(b) 负极接地故障

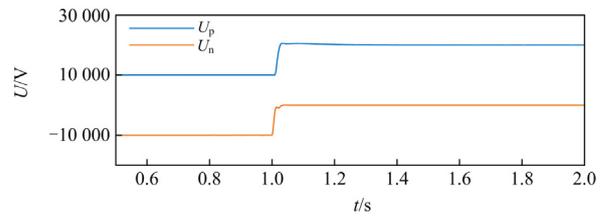
图 9 区内单极接地故障限流电抗器暂态电压波形

Fig. 9 Transient voltage waveforms of the current-limiting reactor with internal unipolar ground fault

图 10(a)为线路 1 发生正极接地故障时正、负极线路电压波形,由图 10 可知正、负极电压变化率均小于零,由此可判定为区内正极接地故障。图 10(b)为线路 1 发生区内负极接地故障时正、负极线路电压波形。此时正、负极电压均呈上升趋势,即变化率均大于零,可判定为区内负极接地故障。



(a) 正极接地故障



(b) 负极接地故障

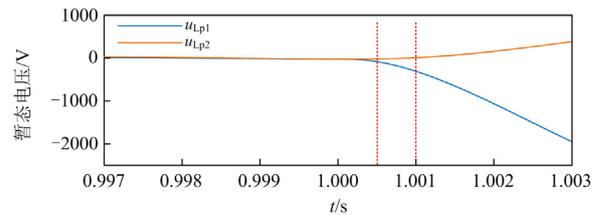
图 10 区内单极接地故障正、负极线路电压波形

Fig. 10 Waveforms of positive and negative line voltages of internal unipolar ground faults

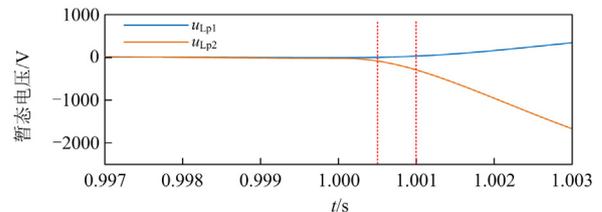
3.3 区外故障

3.3.1 区外双极短路故障

$t = 1\text{ s}$ 在图 1 中 F_2 、 F_3 处分别发生双极短路故障,以正极两端限流电抗器暂态电压为例, F_2 处发生双极短路故障时的电压波形如图 11(a)所示。此时限流电抗器暂态电压 u_{Lp1} 迅速下降、 u_{Lp2} 迅速上升,波形变化趋势相反,呈负相关。故障发生后 0.5 ms,通过式(6)可计算 Pearson 相关系数等于-1,不满足区内识别判据,判定为区外故障。当 F_3 处发生双极短路故障时的电压波形如图 11(b)所示。故障瞬间限流电抗器暂态电压 u_{Lp1} 迅速上升、 u_{Lp2} 迅速下降,波形变化趋势相反。同理,Pearson 相关系数等于-1,定为区外故障。当图 1 中 F_3 处发生双极短路故障时的电压波形如图 12 所示,此时直流线路正极电压呈下降趋势、负极电压呈上升趋势。



(a) F_2 处区外双极短路故障



(b) F_3 处区外双极短路故障

图 11 区外双极短路故障时限流电抗器暂态电压波形

Fig. 11 Transient voltage waveforms of the current-limiting reactor with external bipolar short-circuit fault

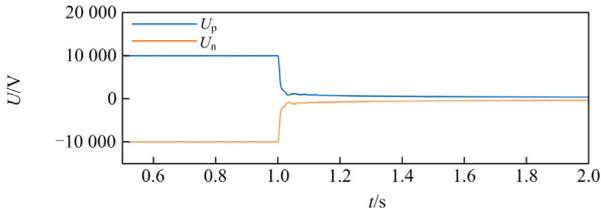
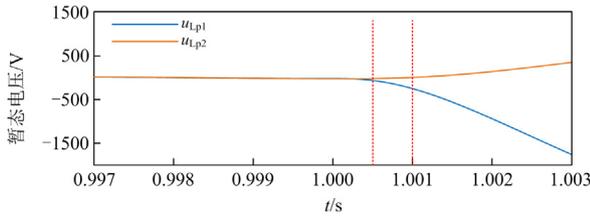


图 12 区外双极短路故障正、负极线路电压波形

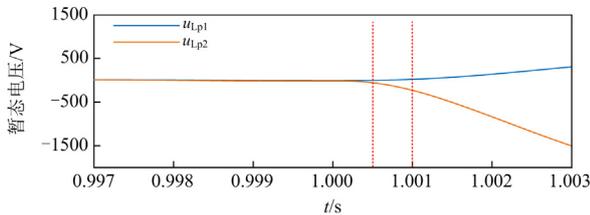
Fig. 12 Voltage waveforms of positive and negative line for external bipolar short circuit fault

3.3.2 区外单极接地故障

图 13 为 $t=1\text{s}$ 在图 1 中 F_2 、 F_3 处发生单极接地故障时线路 1 正极线路两端限流电抗器暂态电压波形。由图 13 可知, 故障瞬间电压 u_{Lp1} 和 u_{Lp2} 的波形变化趋势均相反, 可以计算得到其 Pearson 相关系数等于 -1 , 不满足区内识别判据, 判定为区外故障。



(a) F_2 处区外单极接地故障

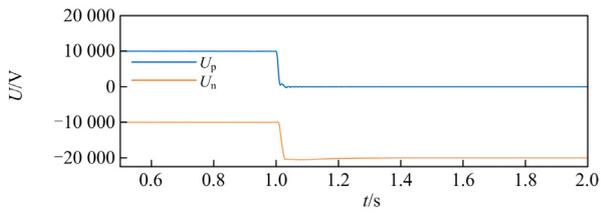


(b) F_3 处区外单极接地故障

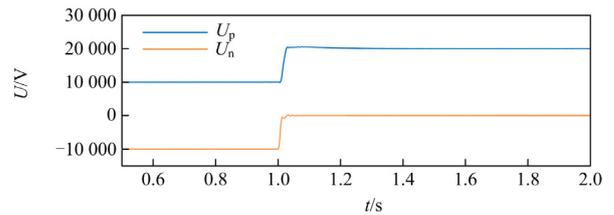
图 13 区外单极接地故障时限流电抗器暂态电压波形

Fig. 13 Transient voltage waveforms of the current-limiting reactor with external unipolar ground fault

当图 1 中 F_3 处发生单极接地故障时的直流线路电压波形如图 14 所示, 当发生正极接地故障时, 线路 1 正、负极电压呈下降趋势, 当发生负极接地故障时, 线路 1 正、负极电压呈上升趋势。



(a) 正极接地故障



(b) 负极接地故障

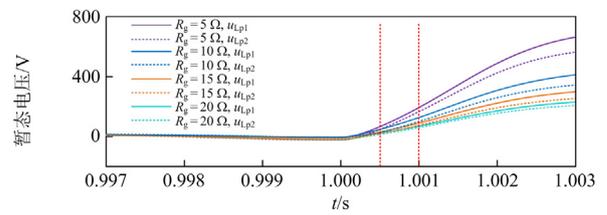
图 14 区外单极接地故障正、负极线路电压波形

Fig. 14 Waveforms of positive and negative line voltages of external unipolar ground faults

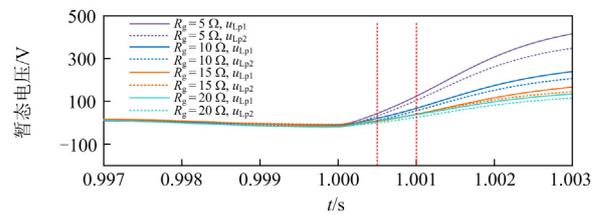
3.4 保护性能分析

3.4.1 过渡电阻影响

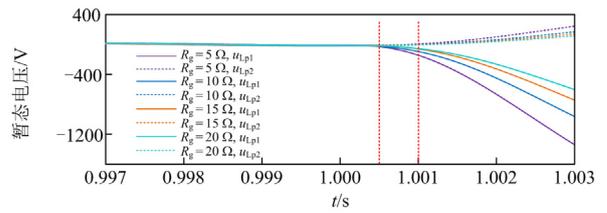
故障保护过程中过渡电阻会对故障电流的幅值、微分量及积分量等暂态特性产生影响, 最终影响保护方法的性能。基于此, 本文分析了过渡电阻分别设定为 5 、 10 、 15 、 $20\ \Omega$ 时对所提保护方法的影响。在上述过渡电阻下, 发生区内、外故障时正极线路限流电抗器的电压波形如图 15 所示。由图 15 可知, 随着过渡电阻的增大, 限流电抗器的电压变化趋势减小, 其识别结果如表 4 所示。由表 4 可知, 在上述 4 种过渡电阻下, 发生区内故障时 Pearson 相关系数均大于整定值 0.8 , 发生区外故障时 Pearson 相关系数均小于整定值 0.8 。因此, 过渡电阻大小对本文所提保护方法的影响较小。



(a) 区内双极短路故障



(b) 区内单极接地故障



(c) 区外双极短路故障

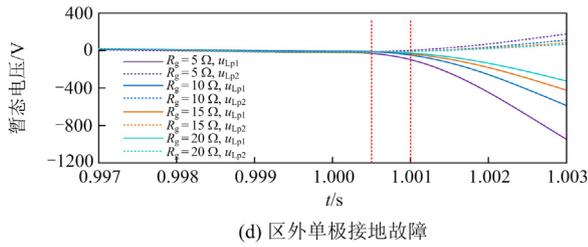


图 15 不同过渡电阻下 u_{Lp1} 、 u_{Lp2} 波形

Fig. 15 Waveforms of u_{Lp1} and u_{Lp2} at different transition resistors

表 4 不同过渡电阻下正极线路限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数计算结果

Table 4 Pearson correlation coefficient calculation results of transient voltage of positive line current-limiting reactor under different transition resistances

过渡电阻/ Ω	5	10	15	20	判别结果
区内单极接地故障 P_{mp}	0.999	0.997	0.996	0.994	区内
区内双极短路故障 P_{mp}	0.997	0.995	0.993	0.991	区内
区外单极接地故障 P_{mp}	-0.984	-0.953	-0.946	-0.928	区外
区外双极短路故障 P_{mp}	-0.965	-0.943	-0.932	-0.915	区外

3.4.2 同步误差的影响

在实际工程应用中，测量线路两端限流电抗器暂态电压数据时普遍采用乒乓对时法和全球定位系统(global positioning system, GPS)同步法。乒乓对时法的同步精度易受传输时差影响，而 GPS 同步法则能保证同步误差控制在 $2 \mu s$ 以内。目前光纤通信被广泛用于信号传输，其最大传输速率可达 200 km/ms 。考虑到直流配电网的线路长度普遍不足 40 km 。因此，在直流配电网中使用光纤通信时其通信延迟不会超过 0.2 ms 。同时，综合考虑设备传输延迟等其他因素，其总体信号传输延迟也不会超过 0.4 ms 。表 5 列出了不同同步误差情况下，图 1 中 F_1 处发生双极短路故障时保护算法的测试结果。由此可知，不同同步误差下该保护算法亦可实现准确的故障识别。

表 5 不同同步误差下正极线路限流电抗器暂态电压的 Pearson 系数计算结果

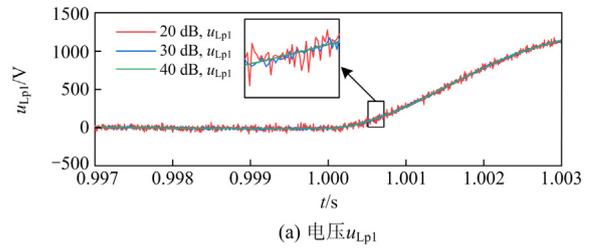
Table 5 Pearson coefficient calculation results of transient voltage of positive line current-limiting reactor under different synchronization errors

故障位置	同步误差/ms	Pearson 系数	保护判别
区内双极 短路故障	0.1	0.975	区内故障
	0.2	0.963	区内故障
	0.3	0.945	区内故障
	0.4	0.914	区内故障

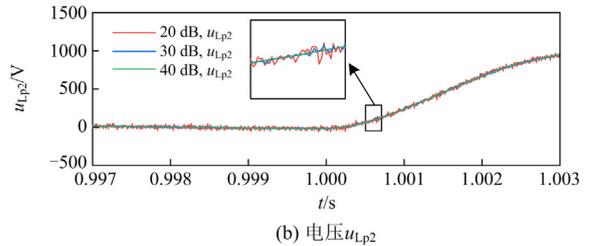
3.4.3 白噪声的影响

同理，实际工程应用中故障暂态电压采样信号易受电磁波和测量噪声的干扰，进而影响保护的可靠

性。为了验证所提保护方法在噪声环境下的稳定性，以 F_1 处发生区内双极短路故障为例，分别向限流电抗器的原始电压信号中注入幅度分别为 40 、 30 和 20 dB 的高斯白噪声，其仿真波形如图 16 所示。由图 16 可知，随着信噪比的减小，噪声干扰不断增强。由式(6)计算线路两端限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数和故障判别结果，如表 6 所示，即当信噪比达到 20 dB 时，线路两端限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数仍大于整定值 0.8 ，故障仍能可靠识别。由于噪声是由一系列无序且无规律的信号组成，其与原始信号之间并无相关性。因此，噪声对原始电压信号的 Pearson 相关系数计算影响甚微，即对本文所提保护方法影响较小。



(a) 电压 u_{Lp1}



(b) 电压 u_{Lp2}

图 16 噪声干扰下电压 u_{Lp1} 、 u_{Lp2} 波形

Fig. 16 Voltages u_{Lp1} and u_{Lp2} waveforms under noise interference

表 6 不同噪声下正极线路限流电抗器暂态电压的 Pearson 相关系数计算结果

Table 6 Pearson correlation coefficient calculation results of transient voltage of positive line current-limiting reactor under different noises

故障位置	信噪比/dB	Pearson 系数	保护判别
区内双极 短路故障	20	0.991	区内故障
	30	0.993	区内故障
	40	0.995	区内故障

3.5 保护方法对比

为进一步验证本文方法的创新性，将所提保护方法与部分典型保护方法性能进行对比分析。文献[22]利用故障电流极性实现故障区域的判别，该方法在过渡电阻较大时需等待故障极性变化，速动性低。文献[23]利用故障点两侧电流微分符号相反的

原理构造保护判据,但随着过渡电阻的增大,线路两侧电流微分值逐渐减小,可能会拒动。相关对比结果如表 7 所示。表中“√”表示满足要求,即能耐受 20 dB 白噪声,“×”表示不能满足要求。由此可知,本文所提保护方法与传统基于幅值或正负极性构成的保护方法相比,其受过渡电阻和白噪声的影响小,不需要严格的通信同步,且能快速准确识别单极接地故障和双极短路故障。

表 7 本文方法与典型保护方法对比结果

Table 7 Comparison results between the proposed scheme and the typical protection scheme

保护方法	过渡电阻影响	抗噪声 干扰	适用故障 类型	所需时 长/ms
文献[13]	整定阈值受影响	√	单、双极	2
文献[14]	基本无影响	√	双极	5
文献[16]	基本无影响	√	双极	3
文献[22]	影响快速性	√	双极	1
文献[23]	整定阈值受影响	×	单、双极	3.5
本文方法	基本无影响	√	单、双极	1.88

4 结论

本文利用直流故障后线路中限流电抗器暂态电压的差异特征,提出一种基于限流电抗器暂态电压 Pearson 相关系数的柔性直流配电网纵联保护方法,并利用 Matlab/Simulink 仿真软件验证了所提方法的有效性。由理论分析和仿真结果总结如下。

1) 该保护方法计算简单,速动性较好,从保护启动到归位约为 1.88 ms,能够满足柔性直流配电网速动性和选择性的要求。

2) 该保护方法利用趋势特征构成识别判据,受过渡电阻、白噪声干扰的影响小,可靠性高。

3) 该保护方法不需要严格的通信同步,在一定同步误差的范围内仍能可靠识别。

4) 该保护方法在通信信号出现大延迟或中断的情况下,保护判据可能会出现误判风险。下一步将对该方法的通信方案进行研究。

参考文献

[1] 韩笑, 刘建婷, 张益伟, 等. 柔性直流配网继电保护关键技术评述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 1-9.
HAN Xiao, LIU Jianting, ZHANG Yiwei, et al. Summary of key technology of relay protection in flexible DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 1-9.

[2] 刘子奕, 贾科, 姚昆鹏, 等. 基于主动注入的柔性直流配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 21-30.

LIU Ziyi, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. An active converter injection-based fault location method for a flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 21-30.

[3] 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.

[4] HE D, ZHOU H, LAN Z, et al. Solid-state circuit breaker based on cascaded normally-on SiC JFETs for medium-voltage DC distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 32-46.

[5] SHUAI Z, HE D, XIONG Z, et al. Comparative study of short-circuit fault characteristics for VSC-based DC distribution networks with different distributed generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 528-540.

[6] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887, 7078.
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887, 7078.

[7] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.

[8] 高淑萍, 吕宇星, 宋国兵, 等. 利用改进变分模态分解突变能量的直流配电网保护方法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(5): 159-170.
GAO Shuping, LÜ Yuxing, SONG Guobing, et al. A DC distribution network protection method based on improved VMD and abrupt energy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(5): 159-170.

[9] 郑涛, 李紫肖, 陈颖. 基于换流站不同出线低频暂态能量比值的多端柔直电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 1-12.
ZHENG Tao, LI Zixiao, CHEN Ying. Protection scheme for a multi-terminal flexible DC grid line based on low frequency transient energy ratios of different outgoing lines at the converter station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 1-12.

[10] 戴志辉, 刘自强, 刘雪燕, 等. 基于首行波曲率的柔性直流输电线路单端量保护[J]. 电工技术学报, 2021,

36(9): 1831-1841.
 DAI Zhihui, LIU Ziqiang, LIU Xueyan, et al. Single-ended protection for flexible DC transmission line based on curvature of initial traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1831-1841.

[11] 祁晓敏, 裴玮, 李鲁阳, 等. 基于限流电感电压的多端交直流混合配电网直流故障检测方案[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 537-545.
 QI Xiaomin, PEI Wei, LI Luyang, et al. DC fault detection scheme for multi-terminal hybrid AC/DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 537-545.

[12] 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 voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 89-94.

[13] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于单端暂态电压的含限流电抗器直流配电网保护方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 185-193.
 CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Protection method based on single-terminal transient voltage for DC distribution network with current limiting reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 185-193.

[14] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.
 WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3832.

[15] 刘海涛, 徐旖旎, 刘艳梅, 等. 基于 Daniel 趋势检验的柔性直流配电网纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 139-146.
 LIU Haitao, XU Yini, LIU Yanmei, et al. Pilot protection scheme based on Daniel trend test for flexible DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 139-146.

[16] 上官鑫, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关性的 MMC 多端柔性直流配电网单极接地故障保护方案[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1740-1749.
 SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Pole-to-ground fault protection scheme for MMC multi-terminal flexible DC distribution network based on Pearson correlation of transient voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1740-1749.

[17] 杨乐, 秦文萍, 陈晓乾, 等. 基于限流控制与保护协同的柔性直流配电线路整体保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4634-4646.
 YANG Le, QIN Wenping, CHEN Xiaoqian, et al. Overall protection scheme for flexible DC distribution lines based on synergy of current limiting control and protection[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4634-4646.

[18] 韦延方, 王志杰, 王鹏, 等. 基于限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5068-5079.
 WEI Yanfang, WANG Zhijie, WANG Peng, et al. Protection method for flexible DC distribution network faults based on current limiting reactance voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5068-5079.

[19] 李波, 廖凯, 朱禹澜, 等. 基于限流电抗器电压的直流配电网单端量保护[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2693-2705.
 LI Bo, LIAO Kai, ZHU Yulan, et al. Single-terminal protection for DC distribution network based on current limiting reactor voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2693-2705.

[20] JIA K, XUAN Z, FENG T, et al. Transient high-frequency impedance comparison-based protection for flexible DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 323-333.

[21] MEGHWANI A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 172-181.

[22] 李猛, 贾科, 张秋芳, 等. 基于全电流方向特征的柔性直流配电网纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 116-122, 130.
 LI Meng, JIA Ke, ZHANG Qiufang, et al. Directional pilot protection for flexible DC distribution network based on directional characteristics of instantaneous current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 116-122, 130.

[23] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 多端 VSC-HVDC 直流线路故障限流及限流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5122-5133, 5393.
 LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5122-5133, 5393.

收稿日期: 2024-04-13; 修回日期: 2024-08-22

作者简介:

何东(1986—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为直流电网故障特性分析及其保护控制; E-mail: hd861116@163.com

甘贝贝(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流配电网保护。

(编辑 许威)