

基于限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流配电网纵联保护方法

何东, 甘贝贝, 袁英硕, 兰征, 曾进辉
(湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 直流配电网发生短路或接地故障时其故障特性复杂, 快速可靠的故障保护方法是确保直流配电网安全运行的关键。提出了一种基于直流限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流配电网纵联保护方法。首先分析了直流配电网发生区内/外接地故障或短路故障时直流线路两端限流电抗器电压特征的差异性, 根据余弦相似度原理提出了基于限流电抗器暂态电压余弦相似度的故障判别方法, 对区内/外直流故障进行快速识别。然后利用限流电抗器正、负极的电压突变量比值来识别直流故障类型和故障极, 并在此基础上采取对应的保护措施。最后利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了多端辐射型直流配电网仿真模型并验证了所提保护方法的有效性, 仿真结果表明该方法有较强的抗过渡电阻能力, 且能较好地满足直流配电网保护的快速性和选择性需求。

关键词: 直流配电网; 限流电抗器; 故障保护; 短路故障; 单相接地

Pilot Protection Method for DC Distribution Networks Based on Transient Voltage Cosine Similarity of Current-Limiting Reactor

HE Dong, GAN Beibei, YUAN Yingshuo, LAN Zheng, ZENG Jinhui

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: When a short circuit or grounding fault occurs in a DC distribution network, its fault characteristics are complex, and a fast and reliable fault protection method is the key to ensuring the safe operation of the DC distribution network. A fast and reliable fault protection method is an important guarantee for the safe operation of DC distribution networks. A DC distribution network pilot protection method is proposed based on the cosine similarity of the transient voltage of the current-limiting reactor. Firstly, the differences in the voltage characteristics of current-limiting reactors at both ends of the DC line are analyzed when a single line-to-ground or line-to-line faults occur inside and outside the DC distribution network, and according to the principle of cosine similarity, a fault discrimination method based on the cosine similarity of transient voltages of current-limiting reactors is proposed for the fast identification of internal/external DC fault. Then, the voltage surge ratio between the positive and negative poles of the current-limiting reactor is used to identify the type and polarity of DC faults, based on which corresponding protective measures are taken. Finally, a simulation model of a multi-terminal radiated DC distribution network is built using PSCAD/EMTDC simulation software. The effectiveness of the proposed protection method is verified. The simulation results show that the method has a certain degree of resistance to fault resistance and can better meet the rapidity and selectivity requirements of DC distribution network protection.

Key words: DC distribution network; current limiting reactor; fault protection; line-to-line fault; single line-to-ground

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(23B0553); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40172)。

Foundation item: Supported by the Scientific Research Project of Hunan Provincial Education Department (23B0553); the Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ40172).

0 引言

相比传统交流配电网,直流配电网具有换流环节少、线路损耗低、控制灵活等优点^[1-4]。随着电力电子技术的飞速发展,基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的直流配电网是未来城市配电网的重要发展方向之一^[5-6]。但基于两电平的VSC直流配电网在发生直流线路短路或接地故障时故障电流上升速率快,极短时间内即可达到最大峰值,会对VSC中的电力电子器件造成极大威胁,直接影响直流配电网安全运行^[7-9]。因此,快速可靠的直流故障保护方法对直流配电系统的安全稳定至关重要。

目前,直流配电网故障保护方法依据是否借助通信可归为两大类:单端量保护和双端量保护。在直流配电网单端量保护方面,文献[10]利用故障电流的一阶导数和二阶导数作为直流故障的保护判据,但该保护方法的准确性易受过渡电阻的影响。文献[11]将行波保护原理应用于直流配电网,结果表明单端量行波保护能够适用于中压柔性直流配电线路,但行波保护需要较高的采样频率,对采样设备要求也相对较高。文献[12]利用直流线路限流电感的电压变化率来检测区内和区外故障,但该方法在求解限流电感的电压变化率时含有较多高阶方程组,计算繁琐。文献[13-14]分别基于故障电流微分方法和故障电压微分方法进行直流故障保护,并利用单端量故障电流或电压信息提高了保护的速动性。但该方法在多端型直流配电网中保护边界模糊,准确性不高。在直流配电网双端量保护方面,文献[15]提出了基于暂态高频阻抗差异的直流线路纵联保护方法,在高频阻抗模值差异不显著的场景下该保护方法的灵敏性略显欠缺。文献[16]提出了一种基于全电流方向特征的直流纵联保护,其保护速动性易受过渡电阻的影响。近年来已有部分学者将基于余弦相似度原理的保护方法应用于直流配电网、新能源场站和交直流混联系统等领域。文献[17]基于余弦相似度原理利用柔性直流配电系统中故障暂态电流的波形相似度来实现直流线路保护。文献[18]基于余弦相似度原理利用直流线路故障发生后两端电流突变量的差异特征提出一种直流配电网线路纵联保护方法,实现了直流线路的区内外故障识别。文献[19]分析了新能源场站T接型线路对

基于余弦相似度的主保护判据影响,并提出了一种基于余弦相似度特征判据的T接型线路纵联保护方案。文献[20]结合暂态电流故障特性和余弦相似度原理实现了风电场站送出线路的纵联保护。此故障保护方法能可靠识别区内外故障,具有耐过渡电阻和噪声的能力。文献[21]分析了交直流混联系统交流送出线路的故障特征,并提出了一种基于余弦相似度的交直流混联系统交流线路保护方案,有效克服了频率偏移对保护的影响。

为了限制直流配电网故障电流的上升速率,通常会在直流配电网的线路两端且靠近变流器处安装限流电抗器^[22-24]。限流电抗器接入直流配电线路具有以下优点:1)限流电抗器可限制故障电流峰值,降低故障电流对直流系统的危害;2)限流电抗器具有较强的边界特性,可利用相关电气量来更加精确地识别故障区域;3)限流电抗器可延迟故障电流到达峰值的时间,降低了保护动作对时间的要求。同时,余弦相似度是一种衡量不同向量相似性的算法因其具有受幅值影响小、评估精确性高等特点,被广泛应用于电力系统^[25-27]。因此,若将直流故障发生后限流电抗器的相关电气量与余弦相似度原理结合并提出一种故障保护方法,对直流配电网的安全稳定运行具有重要的意义。

综上所述,针对现有单端量和双端量直流保护的不足以及直流配电网中限流电抗器的优势,本文分析了基于VSC的直流配电网发生单极接地和双极短路故障时直流线路两端限流电抗器的电压突变特性,并利用余弦相似度判定原理提出了一种基于直流线路限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流配电网纵联保护新方法,有效实现了区内外故障的快速识别和保护动作。最后利用PSCAD/EMTDC仿真结果验证了所提方法的可行性与准确性。

1 直流配电网基本结构

本文以基于VSC的多端辐射型直流配电网作为研究对象,VSC为交直流配电网的互联装置。该直流配电网拓扑结构如图1所示。图中线路1、线路2、线路3为直流配电网中的直流线路; f_2 、 f_4 、 f_6 表示发生在不同位置的直流线路双极短路故障; f_1 、 f_3 、 f_5 表示发生在不同位置的直流线路单极接地故障; L_{p1} — L_{p6} 分别代表各条正极线路两侧所安装的限流电抗器等效电感; L_{N1} — L_{N6} 分别代表各条负极

线路两侧所安装的限流电抗器等效电感。交流电网经两电平换流器 VSC1、VSC2 接入直流配电网, 交流负荷与直流负荷分别通过 DC/AC 变换器、DC/DC 变换器接入直流系统。

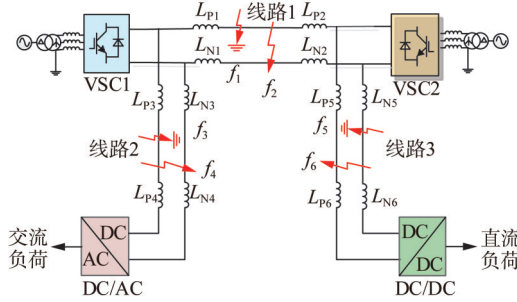


图 1 直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of DC distribution network

2 直流配电网区内外故障特性分析

2.1 区内故障分析

以故障 f_2 为例, 图 2(a)为直流线路 1 发生区内双极短路故障时的故障回路。图中, P、N 分别代表正、负极线路。 L_{P1} 、 L_{P2} 、 L_{N1} 、 L_{N2} 分别为直流正负极线路两侧所安装的限流电抗器等效电感值。 u_{LP1} 、 u_{LP2} 、 u_{LN1} 、 u_{LN2} 分别为故障发生后正、负极限流电抗器上的电压。 i_{Mp} 、 i_{Np} 分别为正极线路两侧的故障电流, i_{Mn} 、 i_{Nn} 分别为负极线路两侧的故障电流。假设正极电流的参考正方向为由母线流向线路, 负极电流的参考正方向则设定为线路流向母线, 正常运行情况下功率的流向由左至右。

如图 2(a)所示, 当直流线路发生区内双极短路故障时, 直流线路两端的变流器 VSC1 和 VSC2 均向故障点注入故障电流, 导致故障电流瞬间增大, 其电流突变参考方向与图 2 标注的电流流向方向相同, 此时故障电流方向皆为正方向。 Δi_{Mp} 、 Δi_{Np} 分别为正极线路两端电流突变量, Δi_{Mn} 、 Δi_{Nn} 分别为负极线路两端电流突变量, 其电流突变量与电流参考方向相同。由此可得直流线路中故障电流突变量可表示为:

$$\begin{cases} \Delta i_{Mp} > 0 \\ \Delta i_{Mn} > 0 \\ \Delta i_{Np} > 0 \\ \Delta i_{Nn} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

因此, 限流电抗器的电压、电流关系为:

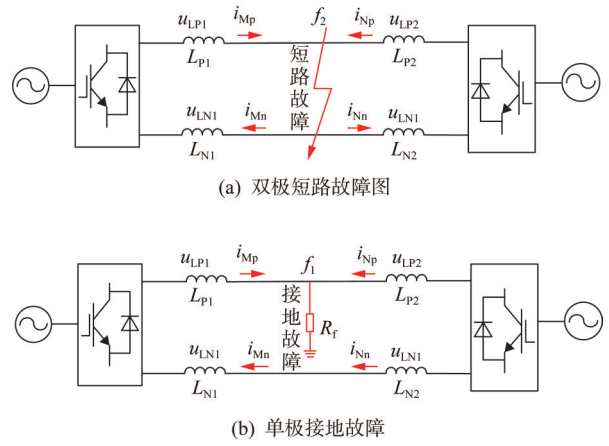


图 2 区内故障网络图

Fig. 2 Diagram of internal fault network

$$\begin{cases} u_{LP1}(t) = L_1 \frac{di_{Mp}(t)}{dt} \\ u_{LP2}(t) = L_2 \frac{di_{Np}(t)}{dt} \\ u_{LN1}(t) = L_3 \frac{di_{Mn}(t)}{dt} \\ u_{LN2}(t) = L_4 \frac{di_{Nn}(t)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{LP1}(t)$ 、 $u_{LP2}(t)$ 分别为正极线路两侧限流电抗器上的瞬时电压; $u_{LN1}(t)$ 、 $u_{LN2}(t)$ 分别为负极线路两侧限流电抗器上的瞬时电压; $i_{Mp}(t)$ 、 $i_{Np}(t)$ 分别为正极线路两侧的瞬时故障电流; $i_{Mn}(t)$ 、 $i_{Nn}(t)$ 分别为负极线路两侧的瞬时故障电流。

由式(2)可知, 限流电抗器的电压突变方向与电流微分方向相同。由于电流微分方向与故障电流突变方向相关, 即故障电流突变方向为正(故障电流随时间的增大而增加), 则微分方向为正; 故障电流突变方向为负(故障电流随时间的增大而减小), 则微分方向为负。由式(1)可知当发生区内故障时, 故障电流突变量均大于 0, 即电流微分方向皆为正。由此可得, 当发生区内双极短路故障时故障限流电抗器电压 u_{LP1} 、 u_{LP2} 、 u_{LN1} 、 u_{LN2} 的突变方向与故障电流的突变方向一致, 均为正方向。因此, 直流线路两端的限流电抗器电压突变量可表示为:

$$\begin{cases} \Delta u_{LP1} > 0 \\ \Delta u_{LP2} > 0 \\ \Delta u_{LN1} > 0 \\ \Delta u_{LN2} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

当直流配电网中线路发生区内单极接地故障时, 故障回路如图 2(b)所示, 图中 R_f 为接地故障电

阻。由图可知,当故障极发生单极接地故障时,直流线路中正极和负极线路两端的故障电流突变量均呈现出大于0的特性。同理,当发生区内单极接地故障时限流电抗器电压 u_{LP1} 、 u_{LP2} 的突变方向与故障电流突变方向一致,即 u_{LP1} 、 u_{LP2} 均大于0。

对于非故障极,若考虑双极线路之间存在的耦合作用,限流电抗器的电压表达式可表示为:

$$\begin{cases} u_{LN1}(t) = M_1 \frac{di_{Mp}(t)}{dt} = k_1 u_{LP1}(t) \\ u_{LN2}(t) = M_2 \frac{di_{Np}(t)}{dt} = k_2 u_{LP2}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_1 、 M_2 分别为直流正负极线路间的互感; k_1 、 k_2 分别为双极线路的极间耦合系数。

同理,式(4)中非故障极限流电抗器电压 $u_{LN1}(t)$ 、 $u_{LN2}(t)$ 的突变方向与故障极故障电流的突变方向一致,即突变量大于0。因此,无论直流配电网发生区内单极接地故障或双极短路故障,直流线路中限流电抗器电压的突变方向与故障电流的突变方向一致且均为正方向,其突变量均大于0。

2.2 区外故障分析

当直流线路发生区外双极短路时的故障回路如图3所示。由图3可知,当线路2或线路3发生双极短路故障时直流线路两侧电流方向均相反,呈现一增一减的趋势。此时直流线路两边电流突变量可表示为:

$$\begin{cases} \Delta i_{Mp} < 0 \\ \Delta i_{Mn} > 0 \\ \Delta i_{Np} > 0 \\ \Delta i_{Nn} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

同理可得,当直流线路发生区外双极短路故障时,正极线路 L_{P1} 电压突变量小于0, L_{P2} 电压突变量大于0。此时,负极线路限流电抗器电压突变量与正极相反。

图4为直流线路发生区外单极接地故障时的故障回路。由图4可知,直流线路发生单极接地与发生双极短路故障时故障极两端的故障电流突变方向一致。

由式(4)可得到非故障极线路限流电抗器电压的突变方向与故障极电流的突变方向一致,所以非故障极线路限流电抗器电压突变量为:

$$\begin{cases} \Delta u_{LN1} < 0 \\ \Delta u_{LN2} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

综上所述,表1总结了直流线路在发生区内、

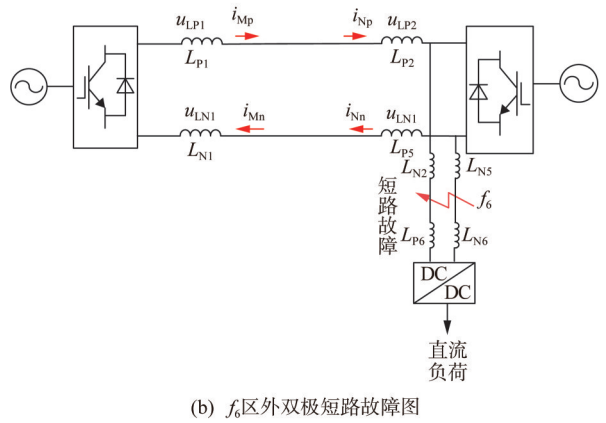
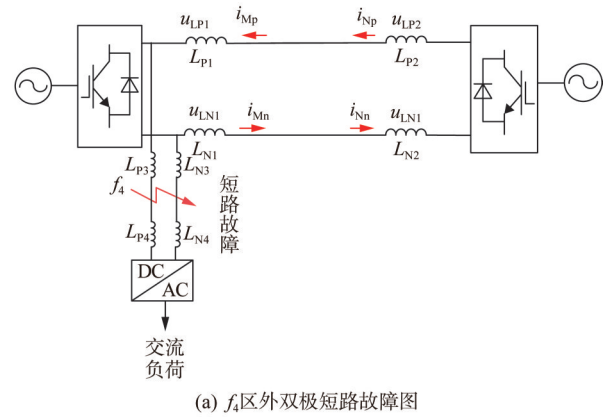


图3 区外双极短路故障回路图

Fig. 3 Diagram of external pole-pole fault network

区外故障时限流电抗器电压突变的方向特征。“↑”表示增加,“↓”表示降低,“→”表示不变。由此可知,故障区域和直流线路限流电抗器电压的变化趋势密切相关。

3 基于限流电抗器电压余弦相似度的直流配电网故障保护判据

3.1 基于限流电抗器电压余弦相似度的故障保护原理

余弦相似度是解析几何中两个向量夹角余弦概念在多元空间的推广,突出判别独立变量的方向差异,且不受幅值的影响,准确性较高。当空间中存在两个变化规律相互独立的离散信号时,余弦相似度^[25]可表示为:

$$\cos(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}} \quad (7)$$

式中: $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$; $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$

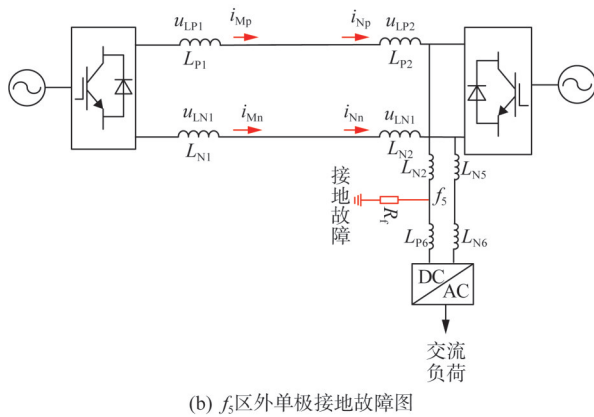
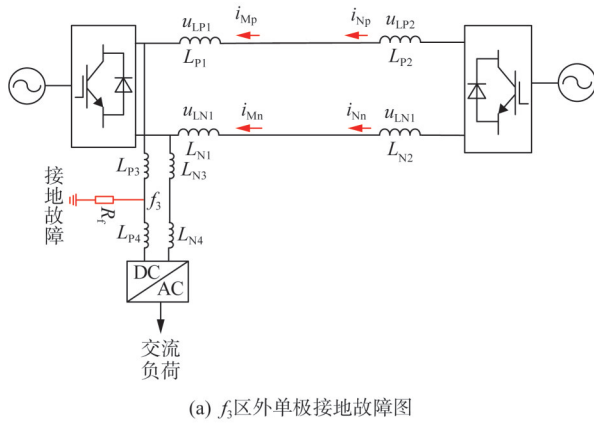


图 4 区外单极接地故障回路图

Fig. 4 Diagram of external single line-to-ground fault network

表 1 限流电抗器电压变化趋势

Tab. 1 Trend of voltages for current-limiting reactors

限流电抗器电压突变量	正极线路		负极线路	
	u_{LP1}	u_{LP2}	u_{LN1}	u_{LN2}
区内故障	↑	↑	↑	↑
区外故障	↑	↓	↑	↓
正常状态	→	→	→	→

$\dots, y_n\}$; x_i, y_i 分别为 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ 的采样值; n 为采样点数量; $\cos(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 为两个向量间的夹角, 即余弦值范围为 $[-1, 1]$ 。当 $\cos(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 越接近 -1 时表示两个向量方向变化相反, 差异越明显; 当 $\cos(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 越接近 1 时表示两个向量方向变化相同。

本文将余弦相似度原理应用于直流故障特征识别提出了基于限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流配电网线路故障区域判别方法。即当发生区内故障时, $\Delta u_{LP1}, \Delta u_{LN1}, \Delta u_{LP2}, \Delta u_{LN2}$ 的突变量方向相同, 所以 Δu_{LP1} 与 Δu_{LP2} 之间、 Δu_{LN1} 与 Δu_{LN2} 之间余弦夹角皆小于 90° 。此时, 满足 $\cos(\Delta u_{LP1}, \Delta u_{LP2}) > 0$,

$\cos(\Delta u_{LN1}, \Delta u_{LN2}) > 0$ 。而当发生区外故障时, Δu_{LP1} 与 Δu_{LP2} 之间、 Δu_{LN1} 与 Δu_{LN2} 之间的突变量方向相反, 所以 Δu_{LP1} 与 Δu_{LP2} 之间、 Δu_{LN1} 与 Δu_{LN2} 之间的余弦夹角皆大于 90° 。此时, 满足 $\cos(\Delta u_{LP1}, \Delta u_{LP2}) < 0$, $\cos(\Delta u_{LN1}, \Delta u_{LN2}) < 0$ 。由此可见, 将余弦相似度方法与限流电抗器暂态电压相结合, 能准确计算出发生直流区内外故障时故障特性的异同, 有助于提升保护的准确性。

3.2 保护判据构造

3.2.1 保护启动判据

直流配电系统发生短路或接地故障时, 直流线路中限流电抗器电压值呈突变状态。本文利用改进电压梯度算法检测直流线路限流电抗器电压的变化, 由此判断系统是否发生故障。基于改进电压梯度的保护启动判据如下。

$$|\nabla U(k)| > U_{\text{set}} \quad (8)$$

$$|\nabla U(k)| = \sum_{i=1}^3 U_L(k-i) - \sum_{i=4}^6 U_L(k-i) \quad (9)$$

式中: $U_L(k-i)$ 为当前时刻第 i 个采样点前的直流线路限流电抗器电压采样值; k 为采样点序号; $|\nabla U(k)|$ 为当前采样时刻的限流电抗器电压梯度值; U_{set} 为保护启动阈值。当线路限流电抗器电压梯度值大于 U_{set} 时, 保护判据条件成立, 保护启动; 当线路限流电抗器电压梯度值小于 U_{set} 时, 保护判据条件不成立, 保护不启动。

3.2.2 故障识别判据

根据 2.1 节和 2.2 节分析可知, 当直流线路发生区内故障时, 线路两端限流电抗器电压突变方向相同; 当发生区外故障时, 线路两端限流电抗器电压突变方向相反。因此, 利用线路两端限流电抗器电压突变量余弦相似度进行故障识别, 由限流电抗器电压突变量的余弦相似度构造故障识别判据如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} C_P = \cos(\Delta u_{LP1}, \Delta u_{LP2}) \\ C_N = \cos(\Delta u_{LN1}, \Delta u_{LN2}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_P 为正极线路限流电抗器暂态电压的余弦相似度计算值; C_N 为负极线路限流电抗器暂态电压的余弦相似度计算值。

根据式 (10) 并结合区内外故障时线路限流电抗器电压的突变特性可知, 当直流线路发生区内和区外故障时线路两端限流电抗器电压夹角余弦值分别

为 1 和 -1。因此,可依据 1 和 -1 之间的差异来构造保护判据。但无论是发生区内故障时满足 $C_p=1$ 、 $C_N=1$ 或者是发生区外故障时满足 $C_p=-1$ 、 $C_N=-1$, 都是理想情况下得到的结果。而在现实工程应用中,过渡电阻、测量误差、通信延迟等都可能对保护判据的准确性造成影响。

考虑到过渡电阻的影响,以区内故障直流配电网线路末端高阻接地故障躲过区外金属性接地故障为整定原则,通过对直流线路不同位置及不同故障类型的大量仿真验证,在保留一定裕度的情况下对 C_p 、 C_N 进行取值。关于测量误差的影响,在实际应用中,依据保护级电压互感器所规定的技术标准,其测量误差必须严格控制在 10% 以内。对于通信延迟的影响,通信通道可以采用光纤通道,例如在 20 km 以内的直流配电网线路中,通信延迟约 0.1 ms 左右。因此综合考虑上述影响因素,在保留一定裕度的情况下取区内、外判据条件如下。

$$C_p > 0.9 \text{ 或 } C_N > 0.9 \quad (11)$$

直流配电网线路故障发生后,可根据式(10)计算得到余弦相似度值,且满足式(11)时可判定为区内故障,反之为区外故障。

3.2.3 故障极判据

当直流配电系统发生双极短路故障时,直流线路正负极限流电抗器的电压突变量近似相等。而发生单极接地故障时,故障极的限流电抗器电压突变量则远大于非故障极。因此,取 0.2 ms 时间窗内正、负极之间限流电抗器电压均值的绝对值比值定义为 K_L ,可得到如下等式。

$$K_L = \frac{\left| \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_L^+(k) \right|}{\left| \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_L^-(k) \right|} \quad (12)$$

式中: n 为在 0.2 ms 时间窗口内的采样点数量; $u_L^+(k)$ 和 $u_L^-(k)$ 分别为正和负极限流电抗器电压的采样值。采样序号 k 的取值范围从 1 至 n 。其中, k_{set} 整定原则为:当发生区内单极故障时,故障极与非故障极的限流电抗器的电压比值近似等于双极线路间的耦合系数。当发生区内双极短路故障时,正极和负极的限流电抗器电压比值近似为 1。因此整定值 k_{set} 的取值范围大于双极线路耦合系数且小于 1,由此可区分不同的故障类型。通过以上分析得出直流线路故障极的判据。

$$\begin{cases} k_{\text{set}} \leq K_L \leq \frac{1}{k_{\text{set}}} \rightarrow \text{双极故障} \\ K_L > \frac{1}{k_{\text{set}}} \rightarrow \text{正极故障} \\ K_L < k_{\text{set}} \rightarrow \text{负极故障} \end{cases} \quad (13)$$

3.3 保护流程

根据 3.1 节和 3.2 节提出了一种新的直流故障保护判据原理,该方法基于限流电抗器暂态电压余弦相似度进行故障识别,其保护流程如图 5 所示。首先通过电压测量装置检测各直流线路中的限流电抗器电压,当采集的电压数据满足式(8)中故障识别判据时,保护启动。保护装置启动后,将所采集得到的直流线路限流电抗器电压通过所提出的余弦相似度判据计算是否满足式(11),由此识别区内、区外故障,并连续判断计算 3 次以避免保护误动。若连续 3 次满足保护判据,则判定为直流线路发生区内故障。最后,再利用式(12)判定直流故障类型及其故障极。

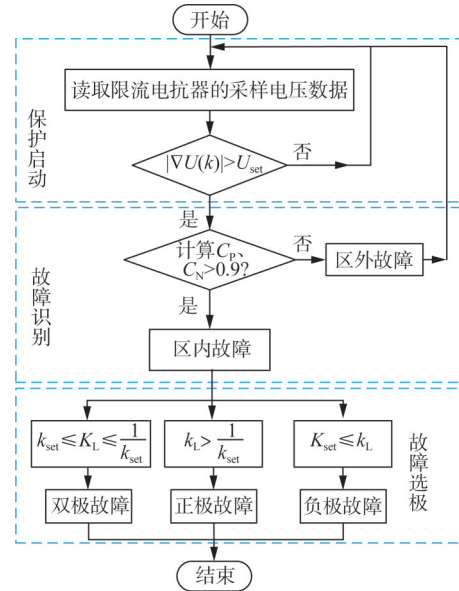


图 5 故障保护流程图

Fig. 5 Flowchart of fault protection

4 仿真实验

为了验证本文所提直流保护方法的有效性,利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了如图 1 所示 ±10 kV 直流配电系统仿真模型,主要参数如表 2 所示。假设在 1.5 s 时刻直流线路发生故障,采样频率为 10 kHz。所提出的保护方法从保护启动到保护归位

最多用时约 5 ms。其中保护算法数据窗长为 0.3 ms,连续计算判断 3 次所用时间约为 1 ms,保护启动时间约 0.3 ms,通信延迟 1 ms,断路器动作时间为 3 ms。该仿真以图 1 中的测量点 1、2 作为故障测试点,其中 f_1 、 f_2 为区内故障, f_3 — f_6 为区外故障。

表 2 仿真系统主要参数

Tab. 2 Main parameters of the simulation system

参数	数值
直流配电系统电压等级/kV	± 10
直流线路单位电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.125
直流线路单位电感/ $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.058 6
直流线路长度/km	10
对地单位电容/ $(\text{pF} \cdot \text{km}^{-1})$	10
系统等效电容/ μF	3 300

4.1 区内故障分析

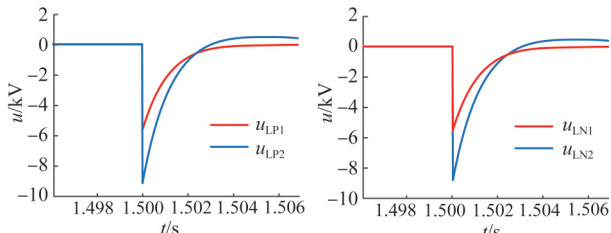
4.1.1 区内双极短路故障

假设 1.5 s 时刻,直流配电网在故障点 f_2 位置处发生双极短路故障,可测得正、负极两端的限流电抗器电压变化波形如图 6 所示,且通过采样限流电抗器电压数据计算得到的余弦相似度值如表 3 所示。

由图 6(a)—(b)可知,直流线路在 1.5 s 时刻发生双极短路故障瞬间,正和负极线路两端的限流电抗器电压突变量均为负值且突变方向相同,线路两端的限流电抗器电压突变波形具有较高的相似度。发生区内双极短路故障时,正极线路两端限流电抗器电压余弦相似度计算值和负极线路两端限流电抗器电压余弦相似度计算值均为 0.999,且大于式(11)中的整定值 0.9,因此满足保护动作判据条件。

4.1.2 区内单极接地故障

假设 1.5 s 时刻,直流配电网在故障点 f_1 处发生正极接地故障,测得故障极两端的限流电抗器电压



(a) 正极线路两端限流电抗器电压 (b) 负极线路两端限流电抗器电压

图 6 区内双极短路故障线路两侧限流电抗器电压波形

Fig. 6 Voltage waveforms of current-limiting reactors on both sides of an internal pole-pole fault line

表 3 区内故障线路两端限流电抗器电压相似度计算结果

Tab. 3 Calculation results of voltage similarity of current limiting reactors at both ends of the faulty line inside the area

故障类型	区内故障故障极	两端限流电抗器电压突变方向	相似度
双极短路故障	正极	相同	0.999
	负极	相同	0.999
正极接地故障	正极	相同	0.998
负极接地故障	负极	相同	0.998

变化波形如图 7 所示。由图 7 可得,在 1.5 s 时刻直流线路单极接地故障发生瞬间,正极线路两端限流电抗器电压突变量均为负值,电压突变波形具有较高的相似度。距故障发生后 0.3 ms 通过式(10)计算余弦相似度结果来识别区内故障,计算结果如表 3 所示。从表中数据可知,在单极接地故障情况下,无论是正极还是负极发生故障,当故障发生在保护区内时,其线路两端限流电抗器电压余弦相似度计算值均为 0.998 且大于式(11)中的整定值 0.9。此时,发生单极接地故障时仍满足保护动作判据条件。

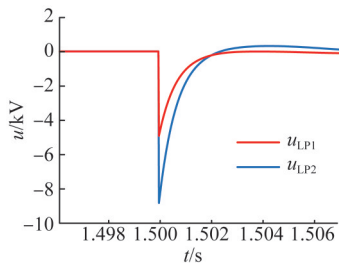


图 7 区内单极接地故障时 u_{LP1} 、 u_{LP2} 波形

Fig. 7 Waveforms of u_{LP1} and u_{LP2} in the event of an internal single-pole grounded fault

4.2 区外故障分析

假设 1.5 s 时刻,在直流配电网中的故障点 f_3 、 f_5 处发生单极接地故障, f_4 、 f_6 处发生双极短路故障。以正极线路 u_{LP1} 、 u_{LP2} 为例的变化趋势如图 8 所示,且采样限流电抗器电压数据计算得到的余弦相似度值如表 4 所示。

由图 8(a)—(b)可知,在 1.5 s 时刻直流线路发生区外故障瞬间,无论是发生双极短路故障还是单极接地故障,正极线路两端限流电抗器电压的突变方向相反,限流电抗器电压波形的相似度低。由表 4 可得,限流电抗器电压余弦相似度计算值接近 -1,满足区外故障判据条件。由此可得,无论是发生区

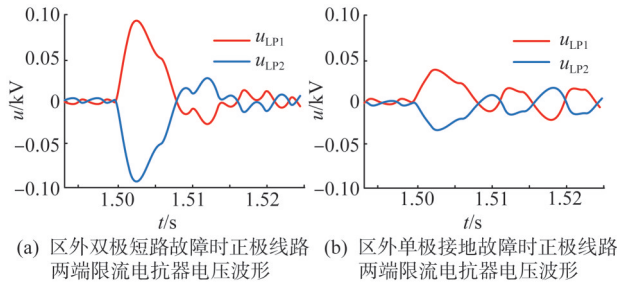
图 8 区外故障时 u_{LP1} 、 u_{LP2} 变化波形Fig. 8 Waveforms of u_{LP1} and u_{LP2} in the event of the external fault

表 4 区外故障线路两端限流电抗器电压相似度计算结果

Tab. 4 Calculation results of voltage similarity of current limiting reactors at both ends of the fault line outside the area

故障类型	区外故障	两端限流电抗器电压突变方向	相似度
双极短路故障	正极	相反	-0.999
	负极	相反	-0.999
正极接地故障	正极	相反	-0.996
负极接地故障	正极	相反	-0.996

外双极短路故障还是单极接地故障, 保护方法均能可靠的识别区内外故障。

4.3 过渡电阻对保护方法的影响

为了验证过渡电阻对所提保护方法准确性的影响, 假设在 1.5 s 时刻 f_2 处发生双极短路故障且过渡电阻分别设置为 5、10、15 和 20 Ω 时得到直流线路两侧限流电抗器电压余弦相似度计算值如表 5 所示。由表 5 可知, 过渡电阻越大时限流电抗器电压余弦相似度计算值越低。且上述 4 种过渡电阻情况下均满足故障判据, 判别结果准确无误。因此所提故障保护方法有较好的耐过渡电阻能力。

表 5 不同过渡电阻时线路两端限流电抗器电压相似度计算结果

Tab. 5 Calculation results of voltage similarity of current-limiting reactors at both ends of the line with different fault resistors

过渡电阻/ Ω	两端限流电抗器电压突变方向	相似度
5	相同	0.998
10	相同	0.995
15	相同	0.983
20	相同	0.982

4.4 保护特点与优势

本文所提基于限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流线路故障保护方法可快速(算法数据窗长仅为 0.3 ms)、有选择地识别各类故障。该方法能满足直

流保护速动性和选择性要求, 且具有一定的抗过渡电阻的能力。相比传统基于电压或电流极性(直接测量电压或电流幅值正负)的直流纵联保护方法和电压微分保护方法, 本文利用余弦相似度法构成的保护判据可更加有效提取故障信息, 且无需严格的通信同步, 有利于提高保护的选择性。优势总结如下。

1) 相较于传统电压微分保护方法, 限流电抗器电压的余弦相似度在反映区内外故障特性差异方面展现出更高的敏感性。

2) 在工程实践中, 电压微分保护判据通常利用 $[u(t) - u(t - T)]/T$ 的形式近似表示 $du(t)/dt$, 其中 T 为采样周期。然而, 经过离散化处理后得到的等效差分值与实际电压变化率之间不可避免地存在一定的偏差, 特别是在采样频率相对较低的情况下偏差更为明显。采用限流电抗器电压余弦相似度进行保护判据计算(如式(10)所示)能实时、精确地反映故障电压信息。

5 结论

为保障直流配电网的安全稳定运行, 本文分析了区内外故障时直流配电网线路两端限流电抗器暂态电压特性, 提出了一种基于限流电抗器暂态电压余弦相似度的直流配电网纵联保护方法, 并利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所提保护方法的有效性进行了验证, 结论如下。

1) 该保护方法计算简单, 原理易实现, 仅需获取 1 ms 数据窗便能快速可靠的识别直流配电网中的区内、区外故障, 满足直流配电网的保护速动性要求。

2) 所提保护方法耐过渡电阻能力较好, 在高过渡电阻 20 Ω 的情况下线路两端限流电抗器电压余弦相似度大于 0.9, 满足保护动作判据条件。

3) 该保护方法以多端辐射型直流配电网拓扑为研究对象, 也同样适用于环状直流配电网拓扑, 且受电网运行方式的影响较小。

4) 该保护方案需采集直流线路双端限流电抗器暂态电压信号, 当通信信号有较大延迟或中断时可能会出现保护误判的情况。因此在实际工程应用中, 还需进一步完善通信方案。

参考文献

- [1] WUNDERLICH A S, DANIEL B, ENRICO S. et al. Protection scheme for fast detection and interruption of high-

- impedance faults on rate-limited DC distribution networks[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 2540 – 2549.
- [2] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114 – 3122.
XUE Shimin, CHEN Chaocao, JIN Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114 – 3122.
- [3] 韩笑, 刘建婷, 张益伟, 等. 柔性直流配电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.
- [4] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179 – 187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179 – 187.
- [5] 薛士敏, 朱晓帅, 王守相. 基于控保协同的环形直流微网电流式单端测距保护[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4959 – 4967.
XU Shimin, ZHU Xiaoshuai, WANG Shouxiang. Current single-ended-ranging ring DC microgrid protection is based on control and protection cooperation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4959 – 4967.
- [6] 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.
- [7] FENG X, QI L, PAN J. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 1834 – 1840.
- [8] 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.
- [9] 张琳希, 牟龙华, 梁紫雯, 等. 直流区域配电网极间短路故障区域定位方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 38 – 46.
ZHANG Linxi, MOU Longhua, LIANG Ziwen, et al. Fault area location method for short circuit between poles in DC regional distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 38 – 46.
- [10] MEGHWANI A, SRIVASTAVA S C. A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 172 – 181.
- [11] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 50 – 55.
CHEN Fufeng, YANG Yang, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 50 – 55.
- [12] 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.
- [13] MARVIK J I, DARCO S, SUUL J A, et al. Communication-less fault detection in radial multi-terminal offshore HVDC grids[C//]. 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, February 10 – 12, 2015, Birmingham, UK. London: IET: 1 – 8.
- [14] 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.
- [15] 贾科, 宣振文, 李晨曦, 等. 柔性直流配网中基于暂态高频阻抗比较的方向纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5343 – 5351.
JIA Ke, XUAN Zhenwen, LI Chenxi, et al. A directional pilot protection based on transient high-frequency impedance phase angle for flexible DC distribution grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5343 – 5351.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165 – 171.
ZHOU Jiapi, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165 – 171.
- [19] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的新能源场站T接型送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 111 – 119.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Longitudinal protection of T-connected transmission lines in new energy stations based on cosine similarity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 111 – 119.
- [20] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263 – 6274.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Wind farm station transmission line longitudinal protection based on cosine similarity [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263 – 6274.