

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190987

基于线路电流二阶导数的中压直流系统故障识别方法

王盼宝¹, 孙红梅¹, 郝鑫¹, 苏伟², 袁栋³, 徐殿国¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 直流线路故障的快速有效识别是基于电压源型换流器的中压直流配电系统发展的关键技术之一。直流线路故障电流上升十分迅速, 系统中电力电子器件过载能力小。因此以串入直流线路限流电感的中压直流配电系统为基础, 分析直流系统的故障特性, 在此基础上提出基于线路电流二阶导数的中压直流配电系统直流线路故障快速识别方案。该方案能够实现故障侧、故障类型及故障线路极性的快速识别, 进而实现对线路的保护。最后基于Matlab验证了所提故障检测方案的有效性, 并与基于线路电流一阶导数的故障检测方案进行了对比。仿真结果表明所提方法在故障电阻、故障距离及负载发生变化的情况下仍可实现直流线路故障的快速准确检测, 且相比基于线路电流一阶导数的直流线路故障检测方案具有更好的选择性。

关键词: 中压直流配电系统; 线路电流导数; 直流线路故障; 故障识别

DC line fault identification scheme for a medium-voltage DC power system based on the second derivative of line current

WANG Panbao¹, SUN Hongmei¹, HAO Xin¹, SU Wei², YUAN Dong³, XU Dianguo¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The rapid and effective identification of DC line faults is one of the key requirements for the development of a Medium-Voltage DC (MVDC) distribution system based on the Voltage Source Converter (VSC). The DC line fault current is characterized by rapidly increasing speed, and the overload capacity of the power electronic device in the system is low. Therefore, based on an MVDC distribution system with DC line current-limiting reactors, the DC line fault mechanism of the system is analyzed. On this basis, a fast identification method for DC line faults in an MVDC distribution system based on the second derivative of the line current is proposed. This scheme can quickly identify the fault side, the fault type and the fault line polarity. Finally, the effectiveness of the proposed fault detection scheme is verified by Matlab, and compared with the fault detection scheme based on the first derivative of line current. The simulation results indicate that the proposed method can still realize the rapid and accurate detection of DC line faults when the fault resistance, fault distance and load change. Moreover, compared with the DC line fault detection scheme based on first-order derivative of line current, the proposed scheme has better selectivity.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904700) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJS0000YJJS1801250).

Key words: medium-voltage DC distribution system; derivative of the line current; DC line fault; fault detection

0 引言

基于全控型器件和脉宽调制(PWM)技术的电压源换流器型(Voltage Source Converter)柔性直流输

电技术具有快速、灵活控制功率及改善系统的稳定性等优点, 在系统潮流反转时, 直流电流方向反转而直流电压极性不变, 且易于构成多端直流电力系统^[1-5]。随着输电走廊等土地资源的日益紧张和可再生能源发电的快速发展, 此技术已经在全球范围内应用到可再生能源并网、多端直流输电、中压直流配电系统以及船舶供电系统等多个领域^[6-8]。多端柔

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904700); 国家电网公司科技项目资助(SGJS0000YJJS1801250)

性直流系统(Voltage Source Converter Multi-terminal DC system, VSC-MTDC)是指由3个或3个以上换流站及其连接直流线路构成的直流系统,提供了一种更方便的连接区域网络的方式,具有能够实现多电源供电以及多受点受电,联络多个交流系统的特点,是未来城市电网智能化发展的关键技术之一^[9-11]。

中压直流配电系统的故障保护是其发展的关键技术之一,其主要技术难点包括故障线路的可靠识别和快速隔离^[12-15]。由于直流电力网络的阻尼低,发生直流故障之后,直流线路故障电流将以极快的速度上升,通常在故障后10 ms内达到额定电流的数10倍。与交流系统相比,直流电流不存在自然过零点,因此传统的交流断路器很难切断故障电流。如果不及时隔离,故障电流将威胁到整个系统中设备的正常运行^[16-17]。因此,中压直流配电系统需要一种快速可靠的故障检测和隔离方法。

目前,国内外学者已对直流线路故障的准确识别与判定展开了一定的研究工作。文献[18]利用“握手方法”对故障直流线路进行定位和隔离,在不需通信的情况下对故障直流线路进行恢复,但识别过程中非故障部分存在短时停电问题,影响系统的可靠供电。文献[19]利用直流输电线路两端的固有频率主频差实现直流输电线路纵联频率保护,其可靠性取决于固有频率的提取,由于系统中存在多个共振频率,这种方法容易受到噪声的影响,且对于中点处死区的问题还需要增加辅助判据。文献[20]提出一种基于故障电流幅值和相位差的电流差动保护判据,该方案的精度受电缆分布电容的影响,存在通信延时。文献[21]将小波变换应用于行波差动保护,采用小波变换提取行波的小波变换模极大值构成差动保护判据,原理简单明了,但会受到行波衰减的影响,且易受雷击和噪声干扰的影响。文献[22]采用限流电抗器的电压变化率作为故障识别判据,具有简单、快速的优点,但随着基于电力电子

器件的直流故障限流器的发展,利用故障限流器来降低故障电流变化率,减少直流断路器成本成为研究热点,基于限流电抗器电压变化率的方法不适用于安装其他直流故障限流器的直流系统。

由于直流线路故障具有故障电流上升迅速、影响范围广等特点,为了更好地保护直流网络,降低对故障保护断路器的切断容量要求,可先通过在直流线路两端串入限流电路的方法来对故障电流上升速度及其峰值进行限制^[23-24],本文以串入直流线路限流电感的中压直流配电系统为基础,详细分析了系统发生不同直流线路故障后的线路电流特性,提出基于线路电流二阶导数的故障检测方案,并利用正负极线路电流二阶导数幅值的差值实现了故障类型及故障线路极性的有效识别。最后通过Matlab软件搭建系统模型并进行仿真,仿真结果表明该方法能够有效检测直流线路故障的发生,识别故障侧,区分故障类型并识别故障线路极性,且在故障电阻、故障距离及负载发生变化时仍然有效。

1 中压直流配电系统拓扑及故障特征分析

两电平电压源型换流器几十年来广泛应用于电动机驱动系统、风电并网及变频器等领域,相比于多电平电压源型换流器具有结构简单、控制难度低、成本低且技术最为成熟等优点^[25-26]。模块化多电平换流器具有效率高、谐波含量低等特点,其主要缺点:1)占地面积大;2)由于每个变换器的能量含量高达两电平换流器的10倍左右,其动态响应复杂而缓慢;3)电源电路和控制系统的复杂性呈指数增长,达到电力系统前所未有的水平,这使得模块化多电平转换器(MMC)容易发生故障,对于额定直流电压相对较低(小于±150 kV)的直流线路来说,其吸引力较小^[24,27-28]。故本文以基于两电平换流器的三端VSC-MVDC构成的中压直流配电系统为基础进行研究,其拓扑结构如图1所示。

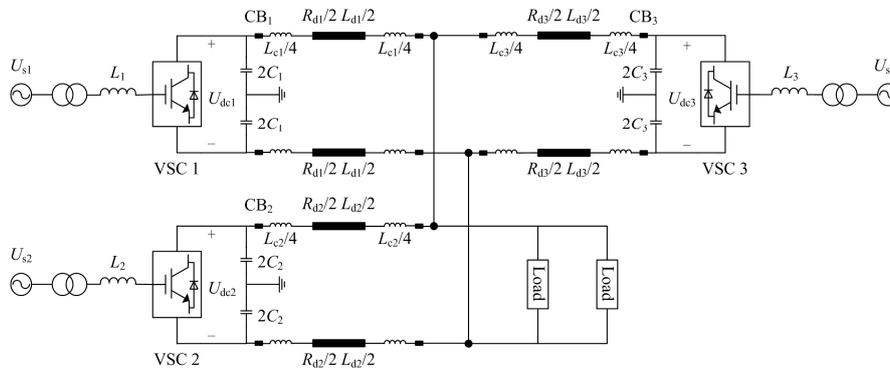


图1 中压直流配电系统结构图

Fig. 1 Structure of medium-voltage DC power distribution system

该系统中三端换流站均为 VSC 结构, 它由换流器、换流变压器、换流电抗器、直流侧电容、直流线路、限流电感以及断路器组成。

中压直流配电系统中两种典型的直流线路故障分别为单极接地故障和极间短路故障, 单极接地故障特征与直流电力系统的接地方式有关, 比较典型的接地方式是 TN-S 接地方式即换流器的中性点连接大地, 故障发生时, 会有较大的故障电流和电压暂变现象。此种接地方式下故障容易检测并快速清除, 有利于加快故障恢复, 且有利于维持直流正负极电压平衡^[29-31]。极间短路危害更大, 其故障特征与接地方式无关^[32]。

以换流站 1 为例进行分析, 单极接地故障(以正极接地故障为例)和极间短路故障的等效电路分别如图 2(a)和 2(b)所示^[33-34]。因实际工程中 IGBT 具有可靠的自保护功能, 其在直流故障发生后能够立即关断, 故在本文中假定直流线路故障发生后换流站立即闭锁^[22-33]。由于 VSC-MVDC 系统自身惯性以及直流侧并联电容这一特殊结构特征, 直流线路故障特征呈阶段特性^[35]。单极接地故障和极间短路故障的第一个阶段皆为电容放电阶段, 此阶段换流器 IGBT 关断, 交流侧电流未增大, 直流侧电容电压衰减, 直流电流增大。为保证快速保护动作与直流断路器跳闸在直流电容电压发生振荡过零时刻之前, 故需要在此阶段实现对故障的快速识别^[33]。

规定图示方向为正方向, 其中 U_{dc1} 为直流侧电压, i 为线路电流, L_{c1} 为限流电感, R_f 为故障电阻, R_{d1} 和 L_{d1} 分别为 π 型直流线路等效电路的等值电阻和电抗。

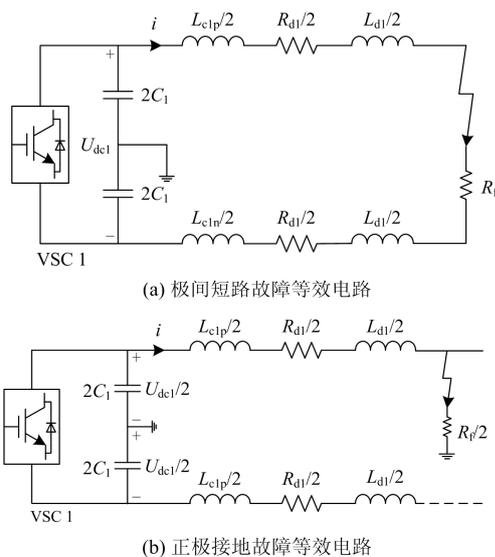


图 2 故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit under fault condition

对于 π 型直流线路等效电路的并联电容 C_d , 通过分析可知, 如果在分析单端换流站故障特性时将其考虑进去, 会使得回路的微分方程变为四阶微分方程, 其解中包含很多 C_d^2 及 C_d 的高次方项, 考虑到直流侧电容 C 远大于 π 型等效电路的并联电容, 这些关于并联电容的高次方项影响会很小, 故忽略直流线路等值容抗的影响^[12]。同理, 对于非故障侧换流站的耦合影响, 当系统发生金属短路时, 非故障侧电流对故障侧电流没有影响, 对于非金属短路故障, 故障侧的耦合影响会使得线路电流解析解变得十分冗长。此处分析不是为了获得精确解, 而是为了验证线路电流可以作为故障判据, 故在分析时忽略非故障侧的耦合影响。

其结合图 2(a), 忽略非故障侧电流的耦合影响, 对系统发生极间短路故障后电容放电阶段的故障特性进行分析。此阶段, 直流侧电容与限流电感、线路等值电抗构成 RLC 回路, 由 KVL 可得

$$L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i - U_{dc1} = 0 \quad (1)$$

$$i = -C_1 \frac{dU_{dc1}}{dt} \quad (2)$$

当 $R_1 < 2\sqrt{L_1/C_1}$ 时, 可以得到微分方程式(1)的解为欠阻尼响应。

$$i(t) = M_1 e^{-\delta_1 t} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \quad (3)$$

进而可以得到欠阻尼响应时线路电流关于时间的一阶导数及二阶导数表达式为

$$\frac{di(t)}{dt} = -M_1 \omega_0 e^{-\delta_1 t} \sin(\omega_1 t + \alpha_1 - \beta_1) \quad (4)$$

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} = M_1 \omega_0^2 e^{-\delta_1 t} \sin(\omega_1 t + \alpha_1 - 2\beta_1) \quad (5)$$

记故障时刻 $t_0 = 0$, 由式(5)可得故障时刻线路电流的二阶导数为

$$i''(t_0) = \frac{R_1(R_1 I_{01} - U_{01})}{L_1^2} - \frac{I_{01}}{L_1 C_1} \quad (6)$$

式中, U_{01} 和 I_{01} 分别为直流侧电压和直流线路电流的初始值。 $\delta_1 = \frac{R_1}{2L_1}$, $L_1 = L_{c1} + L_{d1}$, $R_1 = R_{d1} + R_f$,

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_1 C_1} - \delta_1^2, \quad \omega_{01}^2 = \omega_1^2 + \delta_1^2 = \frac{1}{L_1 C_1}, \quad A_1 = I_{01},$$

$$B_1 = \frac{U_{01} + \delta_1 L_1 I_{01} - R_1 I_{01}}{\omega_1 L_1}, \quad M_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}, \quad \alpha_1 =$$

$$\arctan \frac{A_1}{B_1}, \quad \beta_1 = \arctan \frac{\omega_1}{\delta_1}.$$

当 $R_1 > 2\sqrt{L_1/C_1}$ 时, 可以得到微分方程式(1)的解为过阻尼响应。

$$i(t) = m_1 e^{\lambda_1 t} + m_2 e^{\lambda_2 t} \quad (7)$$

进而可以得到过阻尼响应时线路电流关于时间的一阶导数及二阶导数表达式为

$$\frac{di(t)}{dt} = m_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + m_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t} \quad (8)$$

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} = m_1 \lambda_1^2 e^{\lambda_1 t} + m_2 \lambda_2^2 e^{\lambda_2 t} \quad (9)$$

$$\text{式中, } m_1 = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{U_{01} - R_1 I_{01}}{L_1} - \lambda_2 I_{01} \right), m_2 = I_{01} - m_1,$$

$$\lambda_{1,2} = -\delta_1 \pm \sqrt{\delta_1^2 - \omega_{01}^2}.$$

由式(9)可得故障时刻线路电流的二阶导数为

$$i''(t_0) = \frac{R_1(R_1 I_{01} - U_{01})}{L_1^2} - \frac{I_{01}}{L_1 C_1} \quad (10)$$

由式(6)和式(10)可以看出, 对于 $R_1 < 2\sqrt{L_1/C_1}$ 情况下的欠阻尼响应和 $R_1 > 2\sqrt{L_1/C_1}$ 情况下的过阻尼响应, 故障时刻线路电流的二阶导数值相同。

结合图 2(b), 忽略非故障侧电流的耦合影响, 对系统发生正极接地故障后电容放电阶段的故障特性进行分析。此阶段, 直流侧电容与限流电感、线路等值电抗构成 RLC 回路, 由 KVL 可得

$$L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i - U_{dc1} = 0 \quad (11)$$

其中

$$i = -C_1 \frac{dU_{dc1}}{dt} \quad (12)$$

由以上分析知, 在忽略耦合的影响下, 当正极接地故障电阻为极间短路故障的 2 倍时, 正极接地故障下的正极线路电流与极间短路故障下的线路电流分析情况相同。只不过相比而言, 正极接地故障时非故障极线路电流受影响较小, 而极间短路故障时正负极线路受到同等影响, 影响范围较正极接地故障更为广泛, 对系统产生的危害更大。

当故障发生位置距离换流站越近时, 非故障侧对故障线路的耦合影响越小。对图 1 所示系统在故障距离为 0 km 且故障电阻为 0 Ω 时发生极间短路故障和正极接地故障的工况进行仿真, 设置采样频率为 20 kHz, 得到的各换流站侧正极线路电流相关波形如图 3 所示。

在上述内容中已通过对线路电流的解析求解得到线路电流二阶导数的表达式, 求导过程中默认时间的变化量 Δt 趋于 0, 而在仿真过程中, 线路电流二阶导数在故障时刻的值计算方法如式(13)所示, 式中 Δt 的最小值与采样频率有关。

$$i''(t_0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{I'(t_0) - I'(t_0 - \Delta t)}{\Delta t} \quad (13)$$

式中: $I'(t_0)$ 表示在 t_0 时刻线路电流的一阶导数值; $I'(t_0 - \Delta t)$ 表示在 $(t_0 - \Delta t)$ 时刻线路电流的一阶导数值; $I'(t_0) - I'(t_0 - \Delta t)$ 表示在 $(t_0 - \Delta t)$ 时刻到 t_0 时刻之间线路电流一阶导数的变化量。

仿真设置采样频率为 20 kHz, 故仿真计算导数中 Δt 的值为 5e-5 s。以图 3(c)和图 3(e)为例, 在 $t_0 = (0.5 \sim 0.50005)$ s 之间进行二阶导数计算时, 其 $I'(t_0 - \Delta t)$ 均为系统正常运行情况下的线路电流一阶导数值, 故线路电流一阶导数值增量比较大, 即线路电流二阶导数值较大。而当时间间隔超过 5e-5 s 时, 其 $I'(t_0)$ 与 $I'(t_0 - \Delta t)$ 均为系统故障时刻后的线路电流一阶导数值, 线路电流一阶导数值的增量突减, 即线路电流二阶导数值骤减, 分析与仿真结果一致。

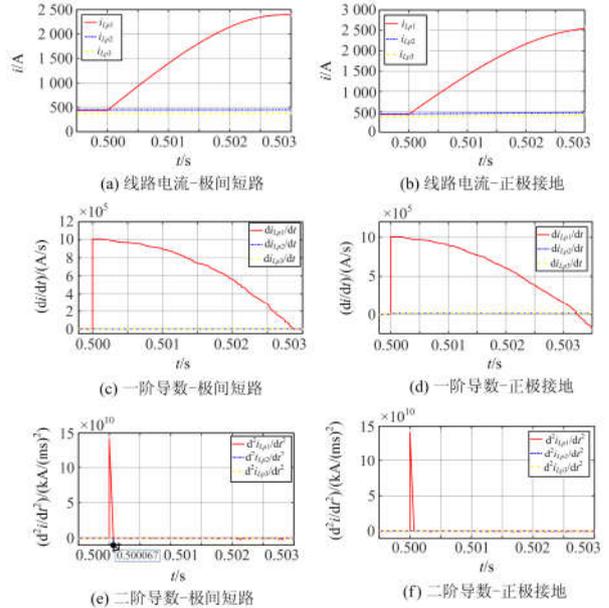


图 3 直流线路故障时线路电流及导数波形

Fig. 3 Waveforms of line current and derivatives during DC faults

此外, 本文提出的二阶导数法与微分跟踪器的共同点是二者的目的都是得到输入信号的二阶微分信号。不同点是二阶导数法是对输入信号在时域上进行求导, 即直流系统发生故障瞬间, 在趋于 0 的 Δt 间隔内, 线路电流在此刻的二次变化率, 而微分跟踪器是一个动态系统: 对于输入信号 v , 它将输出两个信号 v_1 和 v_2 , 其中 v_1 跟踪信号 v , v_2 跟踪信号 v 的导数, 利用定义的相关函数实现对信号的微分, 其相关函数中有可调参数 r 和 h , h 是积分步长, r 是决定跟踪快慢的参数, r 和 h 需要根据不同的输入信号进行调节, 跟踪微分器输出信号的幅值和相位与 r 和 h 的取值有很大关系, r 和 h 的取值不合

适时会导致输出结果误差较大, 且对于输入信号二阶导数的跟踪, 需要将两个跟踪微分器串联后再进行参数调整。

由图 3 可以看到, 系统中直流线路发生故障后, 线路电流变化速率受到限流电感的限制, 线路电流迅速上升, 其一阶及二阶导数幅值发生突变, 之后随着线路电流变化的逐渐平缓, 其一阶导数逐渐衰减, 二阶导数迅速衰减至一定范围内。当故障距离较小时, 耦合程度小, 可以看出发生正极接地故障和极间短路故障时, 故障时刻正负极线路电流二阶导数幅值相差不大。

2 保护方案

基于上述分析可知, 直流线路故障发生时线路电流一阶导数及二阶导数均会发生突变, 考虑到系统中限流电感对故障后线路电流变化率的抑制作用, 以及随着故障距离的增加, 线路电感对线路电流变化率的抑制作用, 本文选用直流线路电流的二阶导数作为故障判据, 对直流线路故障进行检测。

2.1 故障触发判据

系统稳定运行时, 线路电流理想情况下可视为某恒定的常数, 其一阶导数与二阶导数为 0, 当发生故障时, 直流线路电流二阶导数产生突变, 故障侧判据为

$$\left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right| > I''_{TH1(set)} \text{ 或 } \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right| > I''_{TH1(set)} \quad (14)$$

式中: i_{Lp} 和 i_{Ln} 分别为检测到的正负极线路电流;

$\frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2}$ 和 $\frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2}$ 分别为正负极线路电流的二阶导数;

i 表示换流站 i 侧, 其取值为 $1 \leq i \leq 3$; $I''_{TH1(set)}$ 为整定的直流线路故障检测阈值。

2.2 故障侧判据

当发生直流线路故障时, 故障侧电流突变, 由于电流变化信号要经过线路电抗和非故障侧限流电感才会传播到非故障侧, 故非故障侧的线路电流二阶导数小于故障侧线路电流二阶导数, 且故障位置距离故障侧越近, 故障侧和非故障侧线路电流二阶导数差值就越大。故障侧判据为

$$\left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right| > I''_{TH2(set)} \text{ 或 } \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right| > I''_{TH2(set)} \quad (15)$$

式中, $I''_{TH2(set)}$ 为整定的故障侧识别阈值。当线路电流二阶导数的幅值大于此阈值时, 判定为此换流站直流侧发生故障。

2.3 故障类型判据

对于单极接地和极间短路故障, 由第 2 节分析可知, 故障时刻故障极线路电流的二阶导数几乎是相同的, 无法再单纯地通过故障极线路电流的二阶导数进行有效区分。考虑到发生极间短路故障时正负极线路会受到几乎同样的影响, 而发生单极接地故障时故障极受影响较非故障极要大的多, 故可利用正负极线路电流二阶导数幅值的差值作为故障类型判据。

$$\begin{cases} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} - \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right| > I''_{TH3(set)}, \text{单极接地故障} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} - \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right| < I''_{TH3(set)}, \text{极间短路故障} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $I''_{TH3(set)}$ 为整定的故障类型识别阈值, 若检测到正负极线路电流二阶导数幅值之差的绝对值大于此阈值, 则判定为单极接地故障, 反之为极间短路故障。

2.4 故障线路极性判据

上述判据已经完成了故障类型的识别, 即单极接地或极间短路故障。若为单极接地故障, 还需进一步完成对故障线路极性的识别。由以上分析可知发生单极接地故障时故障极线路电流的二阶导数远大于非故障极线路电流的二阶导数, 故障线路极性判据为

$$\begin{cases} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} - \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right| > I''_{TH4(set)}, \text{正极接地故障} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} - \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right| < -I''_{TH4(set)}, \text{负极接地故障} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $I''_{TH4(set)}$ 为整定的故障线路极性识别阈值, 若正负极线路电流二阶导数幅值之差大于此阈值, 则判定为正极接地故障, 若正负极线路电流二阶导数幅值之差小于此阈值的相反数, 则判定为负极接地故障。

3 保护方案相关问题

3.1 故障触发判据 $I''_{TH1(set)}$ 的整定

系统安全运行时, 理想情况下线路电流的二阶导数应该为 0, 实际上考虑到噪声及谐波等干扰的影响, 线路电流二阶导数值应稳定在一定范围内, 因而故障触发判据应当是一个大于零的数值, 且应当满足式(18)的两个条件。

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) I_{\text{TH1(set)}}'' > \max_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{\text{(稳定运行+考虑干扰)}} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{\text{(稳定运行+考虑干扰)}} \end{array} \right. \\ (2) I_{\text{TH1(set)}}'' < \min_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (18)$$

$I_{\text{TH1(set)}}''$ 的选取应使得此阈值大于稳定运行且考虑干扰时各线路电流的二阶导数，小于故障时刻任一侧线路电流的二阶导数。

在系统运行过程中只要检测到任意换流站侧线路电流的二阶导数幅值大于故障触发阈值 $I_{\text{TH1(set)}}''$ ，即可判断系统发生故障。由解析式知，当故障发生在三端公共交点时，故障位置到三端换流站距离相同，电容放电回路阻抗较大，由于三端稳定状态时线路电流不同，故三端线路电流的二阶导数受故障影响不会完全相同，但此时三端受故障影响程度综合最小，以此位置发生直流线路故障时三端线路电流二阶导数的最小值为基准对故障触发阈值进行整定。由式(6)知，故障时刻线路电流二阶导数幅值会受到故障电阻的影响，故在选择此阈值时需计入故障电阻。发生极间短路时故障电阻不会很大，而发生单极接地故障时会呈现高阻抗状态^[36]，故此处设定三端公共交点发生极间短路故障时故障电阻为 1Ω ，发生单极接地故障时故障电阻为 100Ω ，结合 $I_{\text{TH1(set)}}''$ 需满足的条件，进行如下整定。

$$I_{\text{TH1(set)}}'' = K_{\text{rel1}} \min_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \end{array} \right. \quad (19)$$

式中， K_{rel1} 为故障触发整定系数，在受干扰的情况下，系统稳定运行时线路电流二阶导数值存在一个范围，为保证 $I_{\text{TH1(set)}}''$ 的最终选取不会落在这个范围内，考虑整定系数 K_{rel1} 在 0.5 到 1.0 之间取值，且 $I_{\text{TH1(set)}}''$ 的最终选取需要保证能够可靠识别故障，其值应当小于故障时刻的线路电流二阶导数值，即 K_{rel1} 应当小于 1，综合考虑最终选取 K_{rel1} 为 0.6。

3.2 故障侧判据 $I_{\text{TH2(set)}}''$ 的整定

由上述分析知，故障时刻故障侧线路电流的二阶导数远大于非故障侧，即

$$\frac{d^2 i_{Lk}}{dt^2} = \max_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \end{array} \right. \quad (20)$$

故障侧判据应当满足条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{TH2(set)}}'' > \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{1 \leq i \leq 3(\text{故障时刻})} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{1 \leq i \leq 3(\text{故障时刻})} \end{array} \right. \\ I_{\text{TH2(set)}}'' < \frac{d^2 i_{Lk}}{dt^2} \end{array} \right. \quad (21)$$

式中， i, k 表示换流站 i, k 侧，即 $I_{\text{TH2(set)}}''$ 的选取应使得此阈值小于故障侧线路电流二阶导数幅值，即所有线路电流二阶导数幅值中的最大值，同时大于非故障侧线路电流二阶导数幅值，以保证有效识别故障侧。

同样以三端公共交点分别发生故障电阻为 1Ω 的极间短路故障和故障电阻为 100Ω 的单极接地故障时，所得到的个线路故障电流二阶导数为基准，对故障侧动作阈值进行整定。

$$I_{\text{TH2(set)}}'' = K_{\text{rel2}} \min_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{\text{(故障时刻)}} \end{array} \right. \quad (22)$$

式中， K_{rel2} 为故障侧整定系数。因故障侧线路电流的二阶导数大于非故障侧线路电流的二阶导数，故对任一不发生在三端公共交点的直流线路故障，故障侧线路电流的二阶导数必然大于直流线路故障发生在三端公共交点时任一侧线路电流的二阶导数。考虑到所选取基准二阶导数值为较严苛工况下的线路电流二阶导数， K_{rel2} 可在 0.95 到 1.05 之间取值，此处取值为 1。

3.3 故障类型判据 $I_{\text{TH3(set)}}''$ 的整定

由以上分析知，对于单极接地故障和极间短路故障的区分，单纯利用故障极线路电流的二阶导数无法实现，进一步提出利用故障侧正负极线路电流二阶导数幅值的差值作为故障类型判据。理论上极间短路时正负极线路电流的二阶导数幅值之差为 0，考虑噪声及谐波等干扰的影响，以三端公共交点发生故障电阻为 100Ω 的单极高阻抗接地故障时，三端线路电流二阶导数幅值的最小值为基准，对故

障类型判据 $I''_{TH3(set)}$ 进行如下整定。

$$I''_{TH3(set)} = K_{rel3} \min_{1 \leq i \leq 3} \begin{cases} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{(故障时刻)} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{(故障时刻)} \end{cases} \quad (23)$$

式中, K_{rel3} 为故障类型整定系数, 在受噪声及谐波等干扰的情况下, 系统稳定运行时正负极线路电流二阶导数幅值的差值存在一个范围, 为避免 $I''_{TH3(set)}$ 的最终选取落在该范围内, 考虑整定系数 K_{rel3} 在 0.5 到 1.0 之间取值, 且 $I''_{TH3(set)}$ 的最终选取需要保证能够准确识别故障类型, 其值应当小于故障时刻正负极线路电流二阶导数幅值的差值, 即 K_{rel3} 应当小于 1, 综合考虑最终选取 K_{rel3} 为 0.6。在对故障类型进行有效识别后, 若识别为单极接地故障, 还需进一步判断故障线路极性。

3.4 故障线路极性判据 $I''_{TH4(set)}$ 的整定

当系统发生正极接地故障时, 故障侧正负极线路电流二阶导数幅值之差为正的, 且接近正极线路电流二阶导数幅值的值, 而对负极接地故障而言, 故障侧正负极线路电流二阶导数幅值之差为负的, 且接近负极线路电流二阶导数幅值的值。仍以 3.3 节中设定的单极高阻抗故障发生在三端公共交点时线路电流二阶导数幅值的最小值为基准, 对故障线路极性判据 $I''_{TH4(set)}$ 进行如下整定。

$$I''_{TH4(set)} = K_{rel4} \min_{1 \leq i \leq 3} \begin{cases} \left| \frac{d^2 i_{Lpi}}{dt^2} \right|_{(故障时刻)} \\ \left| \frac{d^2 i_{Lni}}{dt^2} \right|_{(故障时刻)} \end{cases} \quad (24)$$

式中, K_{rel4} 为故障线路极性整定系数, 在考虑干扰的情况下, 发生单极接地故障时, 非故障极线路电流的二阶导数值不为 0, 故障极与非故障极线路电流二阶导数幅值之差的绝对值低于故障极线路电流二阶导数幅值, 为保证可靠识别故障线路极性, K_{rel4} 可在 0.7 到 0.9 之间取值, 此处取 K_{rel4} 为 0.8。

3.5 故障检测流程图

综上, 所提故障检测方案流程如图 4 所示。

首先需要采集系统的线路电流并计算其二阶导数, 将其二阶导数幅值与故障触发阈值 $I''_{TH1(set)}$ 进行比较, 若其值小于 $I''_{TH1(set)}$, 则系统未发生直流线路故障, 反之, 判定系统发生直流线路故障; 进一步将线路电流二阶导数幅值与故障侧识别阈值

$I''_{TH2(set)}$ 进行比较, 大于 $I''_{TH2(set)}$ 的一侧发生直流线路故障; 进一步计算故障侧正负极线路电流幅值之差的绝对值并与故障类型识别阈值 $I''_{TH3(set)}$ 进行比较, 若小于 $I''_{TH3(set)}$, 则判定为极间短路故障, 反之则为单极接地故障; 若判定为单极接地故障, 则计算故障侧正负极线路电流二阶导数幅值的差值, 并与故障线路极性识别阈值 $I''_{TH4(set)}$ 进行比较, 若大于 $I''_{TH4(set)}$ 则为正极接地故障, 反之则为负极接地故障。

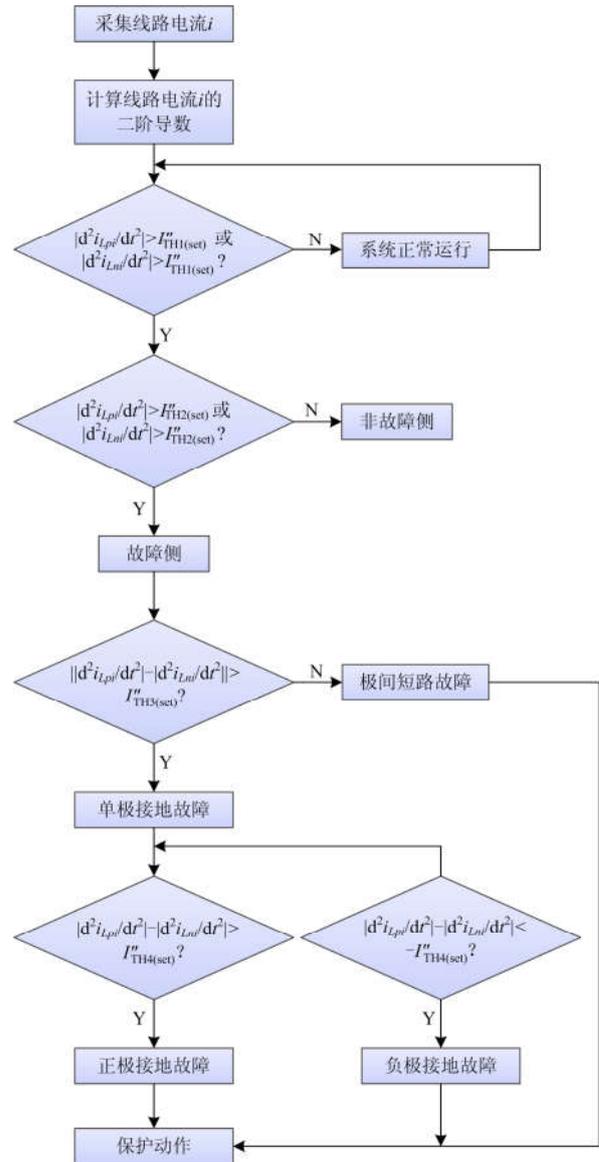


图 4 所提直流线路故障检测方法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed DC fault detection method

4 仿真实验

基于 Matlab 仿真软件搭建如图 1 所示的三端 VSC-MVDC 系统模型, 其中换流站 1 采用定直流

电压控制, 换流站 2、3 采用定有功功率控制。直流线路采用 RL 模型等效, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation system

参数	数值
直流侧额定电压 U_{dc}/kV	10
直流侧并联电容 $2C_1/\mu F$	1 000
限流电感/mH	5
直流线路电阻/ Ω/km	0.006
直流线路电感/(mH/km)	0.795
线路长度/km	100
换流站 1 功率/MW	43
换流站 2 功率/MW	45
换流站 3 功率/MW	38

根据上述阈值选取方法, 得到故障检测阈值分别为: 故障触发阈值 $I''_{TH1(set)} = 1.5442 \times 10^8 \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 故障侧识别阈值 $I''_{TH2(set)} = 2.5737 \times 10^8 \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 故障类型识别阈值 $I''_{TH3(set)} = 3.0981 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 故障线路极性识别阈值 $I''_{TH4(set)} = 4.1308 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 。可以看到, 在忽略非故障侧电流注入影响的条件下, 阈值与公式计算得到的故障时刻线路电流二阶导数值会相差数量级, 但通过对故障电流的暂态分析, 验证线路电流作为故障判据仍然有效。此外, 由于二阶导数法会放大高频噪声, 在实际应用时可进行高频滤波处理。

以换流站 1 侧分别发生极间短路故障和单极接地故障为例, 对所提方案进行仿真验证, 并就故障电阻、故障距离及负载发生变化对所提故障识别方案的影响进行分析。

4.1 故障识别方案可行性验证

设直流线路故障发生于换流站 1 侧, 设置故障距离为 50 km, 正极接地故障电阻分别为 0Ω 和 20Ω 时线路电流二阶导数波形如图 5(a)和 5(b)所示; 极间短路故障电阻为 0Ω 时线路电流二阶导数波形如图 5(c)所示。

可以看出, 换流站 1 侧发生直流线路故障时, 故障侧线路电流二阶导数产生突变, 故可选用线路电流二阶导数作为故障判据。当系统发生直流线路故障时, 故障时刻故障侧线路电流二阶导数幅值远大于非故障侧线路电流二阶导数幅值; 对于极间短路故障, 故障时刻正极负极线路电流二阶导数幅值几乎相等; 对于正极接地故障, 故障时刻正极线路电流二阶导数幅值远大于负极线路电流二阶导数幅值。基于线路电流二阶导数的直流线路故障检测方案可以实现对直流线路故障的快速识别, 具体的故障检测结果如表 2 所示。

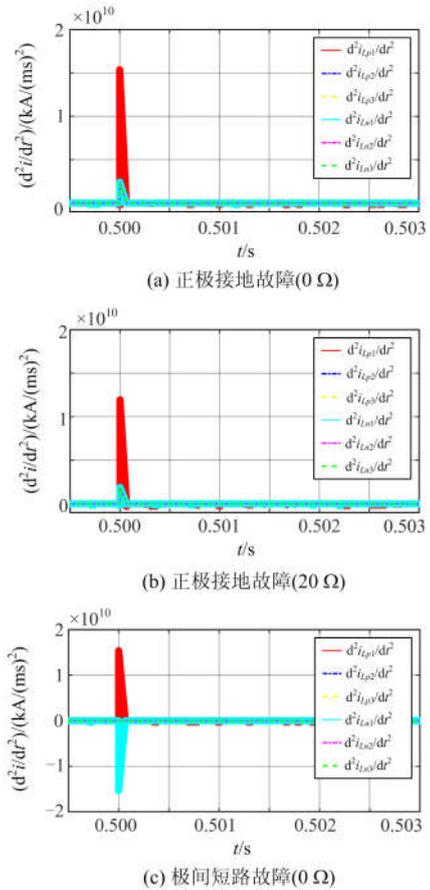


图 5 直流线路故障时线路电流二阶导数仿真波形

Fig. 5 Simulation results of second derivative of line current during DC faults

表 2 不同工况直流线路故障检测结果

Table 2 Detection results of DC faults under different working conditions

故障电阻/ Ω	故障侧	故障判据/ $(kA/(ms)^2)$				故障线路极性判据	故障检测结果
		故障触发判据	故障侧判据	故障类型判据	故障线路极性判据		
0	VSC 1 侧	1.5376×10^{10}	1.5376×10^{10}	0	0		VSC 1 侧极间短路故障
0	VSC 1 侧	1.5376×10^{10}	1.5376×10^{10}	1.2950×10^{10}	1.2950×10^{10}		VSC 1 侧正极接地故障
20	VSC 1 侧	1.1964×10^{10}	1.1964×10^{10}	1.8904×10^{10}	1.8904×10^{10}		VSC 1 侧正极接地故障

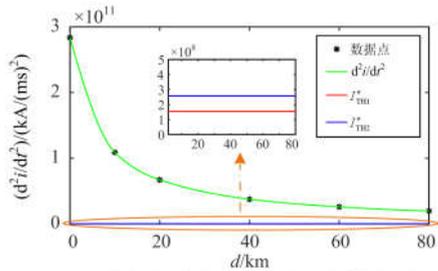
由表 2 可知, 极间短路故障和单极接地故障发生后, 故障侧直流线路电流二阶导数幅值均大于故障检测阈值 $1.5442 \times 10^8 \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 可以快速检测到

故障的发生。随后, 将故障侧直流线路电流二阶导数幅值与故障侧识别阈值 $2.5737 \times 10^8 \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 进行比较, 可确定故障发生于换流站 1 侧。对极间短路故障而言, 计算得到故障侧正负极线路电流二阶导数幅值之差为 0, 低于故障类型识别阈值 $3.0981 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 判定系统换流站 1 侧线路发生极间短路故障。对单极接地故障而言, 正负极线路电流二阶导数幅值之差分别为 $6.3574 \times 10^{10} \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 和 $4.9474 \times 10^{10} \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 高于故障类型识别阈值 $3.0981 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$, 判定为单极接地故障。最后, 将 $6.3574 \times 10^{10} \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 和 $4.9474 \times 10^{10} \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 与故障线路极性判定阈值 $4.1308 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 进行比较, 判定系统换流站 1 侧线路发生正极接地故障。

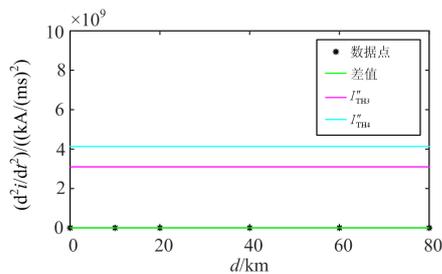
从仿真结果可以看出, 本文所提出的故障检测方案能够在故障发生后 1 ms 内实现对直流配电系统中故障线路的快速检测及可靠识别。

4.2 不同故障距离下方案可行性验证及对比

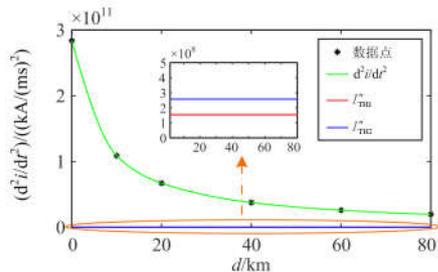
设直流线路故障发生于换流站 1 侧, 设置故障电阻为 0Ω , 故障距离在 0~80 km 范围内变化, 故障发生时刻故障侧线路电流二阶导数变化如图 6 所示。



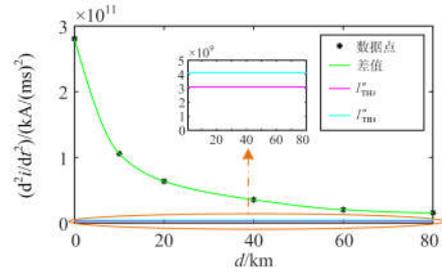
(a) 极间短路时故障检测及故障侧识别



(b) 极间短路时故障检测及故障极性识别



(c) 单极接地时故障检测及故障侧识别



(d) 单极接地时故障类型及故障极性识别

图 6 不同故障距离下基于二阶导数的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of different fault distances based on the second derivative

可以看出, 随着故障距离的增加, 直流侧电容放电回路阻抗增加, 从而线路电流二阶导数也有所降低。但即使故障发生于公共端且故障电阻较大时, 故障检测判据、故障侧识别判据、故障类型识别判据以及故障线路极性判定判据始终成立, 所提方案能够实现整条线路直流故障的快速有效检测。

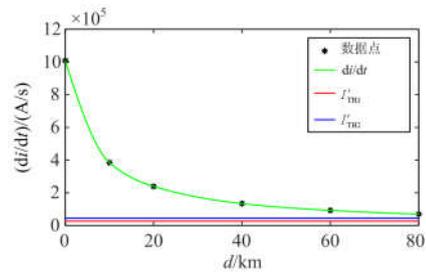
由第 2 节分析可知, 故障时刻线路电流一阶导数也会产生突变, 由式(8)知故障时刻线路电流一阶导数为

$$i'(t_0) = \frac{U_{01} - R_1 I_{01}}{L_1} \quad (25)$$

可以看出故障时刻线路电流一阶导数值也会受到故障距离的影响。按照上述方案的确定流程, 对基于线路电流一阶导数的直流线路故障检测方案进行设计, 可以得到故障检测阈值分别为: 故障触发阈值 $I'_{TH1(\text{set})} = 26870 \text{ A/s}$, 故障侧识别阈值 $I'_{TH2(\text{set})} = 44784 \text{ A/s}$, 故障类型识别阈值 $I'_{TH3(\text{set})} = 22248 \text{ A/s}$, 故障线路极性识别阈值 $I'_{TH4(\text{set})} = 29664 \text{ A/s}$ 。

对直流线路故障发生于换流站 1 侧, 故障电阻为 0Ω , 故障距离在 0~80 km 范围内变化的直流线路故障进行仿真, 得到故障发生时刻故障侧线路电流一阶导数变化如图 7 所示。

对比图 6 和图 7 可以看出, 故障距离发生变化时, 对比基于一阶导数和基于二阶导数的直流线路故障检测方案, 可以发现两种方案都会受到故障距离变化的影响, 但基于二阶导数的直流线路故障检



(a) 极间短路时故障检测及故障侧识别

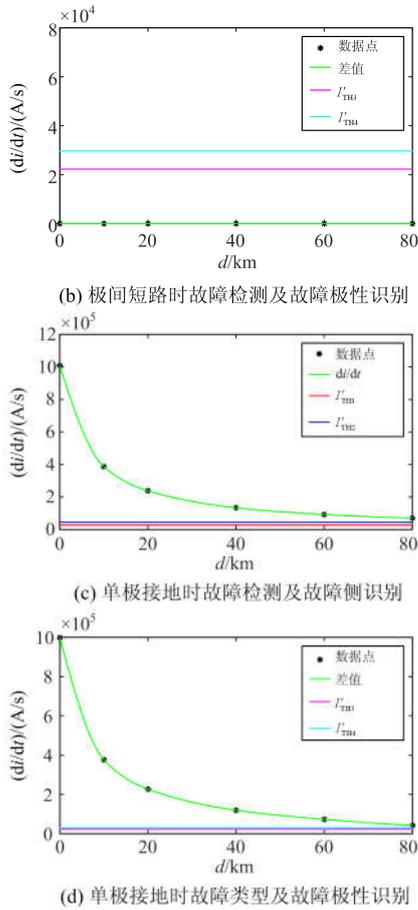


图 7 不同故障距离下基于一阶导数的仿真结果
Fig. 7 Simulation results of different fault distances based on the first derivative

测方案具有更好的选择性，对直流线路故障的检测更为精准。

4.3 不同故障电阻下方案可行性验证

设直流线路故障发生于换流站 1 侧，故障距离为 10 km，极间短路故障电阻在 0~10 Ω 范围内变化，单极接地故障电阻在 0~100 Ω 范围内变化，故障发生时刻线路电流二阶导数变化如图 8 所示。实际工程中，极间短路故障电阻很小，而发生单极高阻抗接地时会出现较大的故障电阻，此处设置是为了分析极端情况下故障电阻对所提故障检测方案的影响^[23]。

可以看出，随着故障电阻的增加，换流站直流侧电容放电回路的阻抗增加，线路电流二阶导数有所减小，但故障侧线路电流二阶导数幅值始终大于故障检测阈值 $1.5442 \times 10^8 \text{ kA}/(\text{ms})^2$ ，故障检测和故障线路识别方法有效。由图 8(c)可知，随着故障电阻的增加，发生单极接地故障时故障侧线路正负极线路电流二阶导数幅值之差有所减小，但始终大于

故障类型识别阈值 $3.0981 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$ 以及故障线路极性判定阈值 $4.1308 \times 10^9 \text{ kA}/(\text{ms})^2$ ，故障类型及故障线路极性识别方法有效。

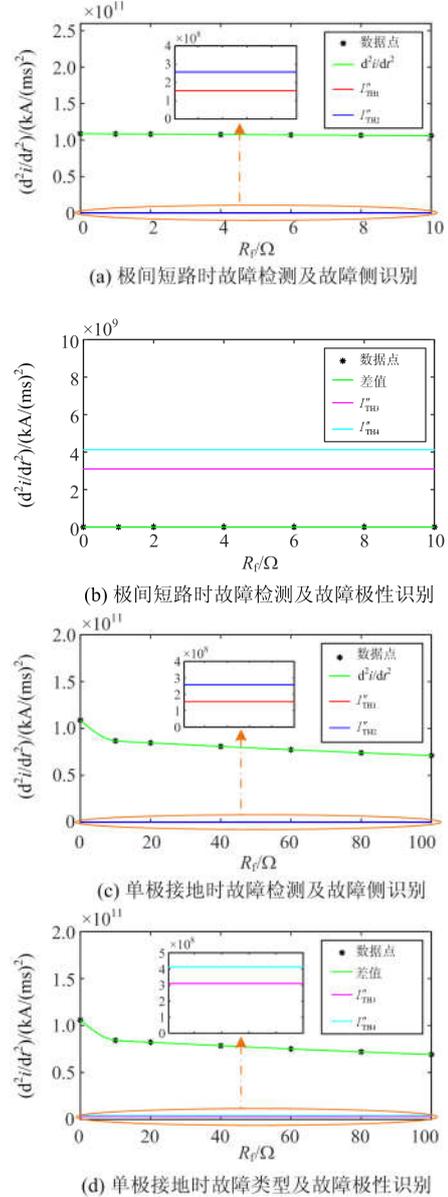


图 8 不同故障电阻下基于二阶导数的仿真结果
Fig. 8 Simulation results of different fault resistances based on the second derivative

4.4 负载变化时方案可行性验证

在仿真模型中设定负载在 $t=0.5 \text{ s}$ 时由 120 MW 变为 500 MW，得到负载变化时各线路电流及其二阶导数波形如图 9 所示。

由图 9 可以看出，在 $t=1.2 \text{ s}$ 负载发生变化后，线路电流发生变化，但线路电流二阶导数并没有发

生突变, 仍维持在正常工作线路电流二阶导数的范围内, 故本文所提出的故障检测方案在负载变化时不会产生误判, 不会将负载变化误判为系统内发生直流线路故障, 具有一定的抗负载波动能力。

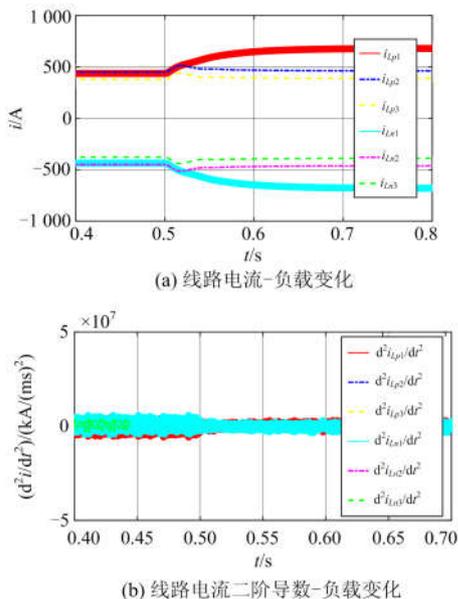


图 9 负载变化时线路电流及导数波形

Fig. 9 Waveforms of line current and derivatives when load changes

5 结论

针对带有限流电感的中压直流配电系统, 本文提出了一种利用线路电流二阶导数快速检测直流线路故障的方法, 该方法同样适用于安装直流故障限流器等其他限流装置的多端柔性直流配电系统。

通过对三端直流电网实验系统的仿真, 综合验证了所提方法能够快速检测直流线路故障、识别故障侧、判定故障类型、识别故障线路极性, 实现对整条线路直流故障的识别、且故障检测基于本地测量的系统变量, 无需通信, 有效降低了时间延迟, 能够在 1 ms 内快速、准确地识别直流线路故障, 具有很好的速动性。文中还论证了当系统负载发生变化时, 保护不会误动作; 当故障电阻和故障距离发生变化时, 所提方案能够保持较高的精度, 具有一定的应用前景, 但该方法中整定值的选取仍需通过仿真验算结果进行整定。

参考文献

[1] WANG W, BARNES M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1721-1730.

[2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[3] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.

[4] HERTEM D V, GHANDHARI M. Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: obstacles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3156-3163.

[5] SUN Q, HAN R, ZHANG H, et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3006-3019.

[6] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.

XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.

[7] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[8] TANG Weizhong, LASSETER R H. An LVDC industrial power distribution system without central control unit[C] // 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference, June 23-23, 2000, Galway, Ireland, 2000, 2: 979-984.

[9] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.

LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.

[10] HU M, FU C, WANG J S, et al. Real time digital simulation of the parallel multi-terminal HVDC transmission system[C] // 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 30-November 2, 2012, Auckland, New Zealand: 1-5.

- [11] 王成山, 罗凤章, 张天宇, 等. 城市电网智能化关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2017-2027.
WANG Chengshan, LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, et al. Review on key technologies of smart urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2017-2027.
- [12] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4627-4637.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. DC fault protection strategy for the flexible multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4627-4637.
- [13] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 13-19.
WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.
- [14] 戴志辉, 葛红波, 陈冰研, 等. 柔性中压直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 78-86.
DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Bingyan, et al. Line protection schemes for flexible medium voltage DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 78-86.
- [15] NADEEM M H, ZHENG X, TAI N, et al. Detection and classification of faults in MTDC networks[C] // 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), October 7-10, 2018, Kota Kinabalu, Malaysia: 311-316.
- [16] LUO Y, HE J, LUO G, et al. Fast DC fault location and isolation strategy for the flexible multi-terminal DC system[J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(15): 908-912.
- [17] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759.
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): 1752-1759.
- [18] TANG L, OOI B. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [19] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 利用电流频率特性的 VSC-HVDC 直流输电线路纵联保护[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1989-1996.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1989-1996.
- [20] ZHANG L, CONG W, XUN T, et al. A current differential protection criterion based on amplitude and phase difference of fault current[C] // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, October 16-20, 2011, Beijing, China: 346-350.
- [21] TANG L, DONG X, LUO S, et al. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1359-1369.
- [22] 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 AC/DC hybrid distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 537-545.
- [23] MEI J, FAN G, GE R, et al. Research on coordination and optimal configuration of current limiting devices in HVDC grids[J]. IEEE Access, 2019, 7: 106727-106739.
- [24] 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.
- [25] SHUTTLEWORTH R, CHANG B, CWIKOWSKI O, et al. Multi-terminal VSC-HVDC pole-to-pole fault analysis and fault recovery study[C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2015), February 10-12, 2015, Birmingham, UK: 1-8.
- [27] ADAM G P, IBRAHIM A, EDWARD F J, et al. Improved two-level voltage source converter for high-voltage direct current transmission systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1670-1686.
- [28] TCAI A, ALSOFYANI I M, LEE K. DC-link ripple reduction in a DPWM-based two-level VSC[C] // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 23-27, 2018, Portland, OR, USA: 1483-1487.
- [29] 管敏渊, 徐政. 两电平 VSC-HVDC 系统直流侧接地方式选择[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 55-60.

- GUAN Minyuan, XU Zheng. DC side grounding methodology for a two-level VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 55-60.
- [30] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [31] 李蕊, 罗飞, 焦在滨. 中压直流配电系统接地方式研究[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2594-2603.
LI Rui, LUO Fei, JIAO Zaibin. Grounding mode research of MV DC distribution system[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2594-2603.
- [32] 周嘉阳, 李凤婷, 刘渊, 等. 基于直流电抗电压的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 95-101.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, LIU Yuan, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on DC reactor voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 95-101.
- [33] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [34] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [35] WANG Yi, ZHANG Ziguang, FU Yuan, et al. Pole-to-ground fault analysis in transmission line of DC grids based on VSC[C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22-26, 2016, Hefei, China: 2028-2032.
- [36] SHUAI Zhikang, HE Dong, XIONG Zhijie, 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.

收稿日期: 2019-08-18; 修回日期: 2020-01-12

作者简介:

王盼宝(1984—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为直流电力系统运行、保护与优化技术;
E-mail: wangpanbao@hit.edu.cn

孙红梅(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流电力系统故障识别与限流装置优化配置;

郝鑫(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电系统故障限流保护技术。

(编辑 许威)