基于暂态电流波形斜率的中压柔性直流配电线路 故障定位方法

李泽文¹,颜勋奇¹,肖仁平²,王梓糠¹,穆利智¹ (1. 长沙理工大学 电网安全监控技术教育部工程研究中心,湖南 长沙 410076; 2. 广东电网有限责任公司 江门供电局,广东 江门 529000)

摘要:为了提高中压柔性直流配电网的安全稳定运行能力,提出了一种基于暂态电流波形斜率的中压柔性直 流配电线路故障定位新方法。通过分析时域内的单极接地短路故障、双极短路故障暂态特性,发现不同故障 类型下暂态电流突变点的波形切线斜率不受电容放电形式的影响,暂态电流波形切线斜率与故障点位置构 呈反比例型函数关系。利用正、负极电压梯度判别故障类型与故障极,针对不同故障类型,利用线路两端故 障暂态电流波形的切线斜率求解故障距离。PSCAD / EMTDC 仿真结果验证了所提方法的有效性与准确性, 其能够在不同故障类型、不同故障距离、不同过渡电阻的情况下精确定位故障点位置。 关键词:直流配电网;故障定位;暂态电流;切线斜率;故障判别

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202007007

0 引言

基于电压源型换流器 VSC(Voltage Source Converter)的中压柔性直流配电网具有输送容量大、抗 干扰能力强、方便接入分布式电源(DG)、可控性强、 线损低等一系列优点,适合用于建设智能电网与能 源互联网[1]。但是换流站复杂的控制方式导致系统 故障承受能力较差,不同区段发生的故障类型也不 尽相同,而直流线路是发生故障最为频繁的区段。 故障发生后线路两端换流器并联大电容迅速放电, 故障电流在几毫秒内上升至峰值,线路及换流设备 受到的损害很大。系统对于保护速动性提出了很高 的要求,保护装置需要快速检测并切除故障,使得故 障定位能够利用的有效暂态信息很少。直流配电网 和交流配电网的故障暂态过程存在本质的差别,成 熟的交流配电网定位技术难以直接应用于直流配电 网。直流配电网中线路大范围使用电缆线路且长度 较短,行波定位法无法在直流配电网中得到有效的 应用,因此亟需研究新型直流配电网线路故障定位 方法[2-3]。

直流配电网线路故障定位方法以线路模型为基础,通过分析故障暂态过程获得暂态量与故障距离的关系构建定位表达式。文献[4]利用2个不同时

收稿日期:2019-11-01;修回日期:2020-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877012);湖南省 教育厅重点项目(18A121);湖南省研究生科研创新项目 (CX2018B557)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877012), the Key Projects of Hunan Provincial Department of Education(18A121) and Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate(CX2018B557) 刻的单端回路方程求得故障距离,并且从变量获取 方式上提高了采样值求理论值的精度,但该文献未 研究单极接地故障与存在过渡电阻的情况,且只适 用于安装了限流电抗器的直流线路。文献[5]利用 最小二乘法求解一段数据窗内的故障回路方程,通 过多次求解故障回路等效参数与过渡电阻,提高了 故障定位精度。文献[6]提出了一种基于差动电流 的准确故障定位估计方法,采用非迭代直接 Moore-Penrose 伪逆方法求解故障回路电阻,通过引入不确 定度的比例与分析样本数减少计算误差。文献[7] 利用换流器接地电容放电的暂态电气量构造参考电 压比,采用直接求解法获取线路等效参数,最终得到 故障距离,但该方法通过求解二阶微分方程得到线 路参数,存在较大困难,并且该方法未分析故障回路 阻尼特性对放电形式的影响,具有局限性,并且构造 参考电压比所需的电压传感器使得投资成本增加。 文献[8]分别在金属性故障与非金属性故障下利用 Prony算法提取故障电流表达式的参数计算故障距 离,但是在非金属性故障情况下求解故障距离时受 噪声的影响较大。文献[9]在离线状态下投入测距 装置构造 RLC 二阶电容放电回路, 然后利用 Prony 算法提取两端装置放电电流的特征频率与衰减系 数,消去过渡电阻与电感参数求得故障距离,但该方 法不利于系统故障后的快速重启,且需增设测距设 备。文献[10]提出了一种基于等效电路的故障定位 方法,利用一种改进的离散傅里叶变换(IDFT)算法 消除了衰减周期分量和直流分量的影响,但该方法 需要交流侧馈入阶段的暂态信息,与保护的速动性 相悖。文献[11]利用暂态能量确定故障区段后,使 用负荷电流和故障区间端点的残余电压计算故障距 离,但该方法适用故障范围有限。文献[12]利用单端故障电流微分初始值推导定位方程,但该方法利用单端信息量进行故障定位,定位精度较差。

为此,本文根据基于电压源型换流器的中压柔 性直流配电网的线路故障暂态特性与电流波形变化 特征,提出了一种基于电流波形斜率的双端直流配 电网线路故障定位方法。该方法利用时域内的直流 线路电压梯度极性确定故障类型与故障极,作为故 障定位启动判据;然后联立两端电流波形在故障瞬 间的切线斜率方程求得不同故障类型下的故障点位 置。本文方法利用双端信息量计算故障点位置,具 有较高的故障定位精度。

1 中压柔性直流配电网故障暂态分析

基于电压源型换流器的中压柔性直流配电网拓 扑结构如图1所示。基于电压源型换流器的直流线 路故障定位技术是保障中压柔性直流配电网安全可 靠运行的重要保障,故障暂态过程分析是故障定位 的基础。线路发生故障后,中压柔性直流配电网将 经历柔性直流侧电容持续放电、续流二极管自然换 向导通、续流二极管同时导通3个阶段^[13]。考虑到 保护动作时间对定位暂态信息获取的影响,本文选 取故障暂态过程的第一阶段作为定位原理构造依 据。故障发生时,IGBT按照自身保护特性闭锁,故 障极电压大于交流侧任一相电压,故障电流由交流 侧电感镜入电流极小,可忽略不计,故障电流主要由 换流器并联电容放电产生。





1.1 双极短路故障分析

双极短路故障是直流配电网线路故障中对系统 破坏最为严重的故障,其放电回路等效电路如图2 中的回路2所示。图中,*L*_{eq}为线路等效电感;*R*_{eq}为 线路等效电阻;*C*为并联电容;*R*_f为过渡电阻;*u*_{c1}为 极间电容电压;*u*_{c2}为故障极电容对地电压。双极短 路故障发生后,线路电流陡增,电压迅速跌落,换流 器内部续流二极管出现过电流,危及整个直流配电 网的安全运行。换流站采用分裂电容中性点直接接 地方式,为故障后电容放电构建 RLC 二阶动态电路 创造了条件。由于并联了大电容,所以忽略线路上 分布电容对于放电回路的影响。



图2 短路故障放电回路等效电路图



假设故障瞬间故障极并联电容电压为直流电压 U_0 ,线路电感电流初值为 I_0 ,故障回路中电抗、电容、 电阻均取关联参考方向,根据基尔霍夫电压定律 (KVL)将电容放电过程表示为如下微分方程^[14]:

$$L_1 C_0 \frac{\mathrm{d}^2 u_{c1}}{\mathrm{d}t^2} + (R_1 + R_f) C_0 \frac{\mathrm{d}u_{c1}}{\mathrm{d}t} + u_{c1} = 0 \qquad (1)$$

$$i_{c1} = -C_0 \frac{\mathrm{d}u_{c1}}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

其中, $L_1 = 2L_{eq}$; $C_0 = C/2$; $R_1 = 2R_{eq}$; i_{c1} 为电容放电电流。按照故障前运行状态给定初始条件为:

$$\begin{cases} u_{c_1}(0_{+}) = u_{c_1}(0_{-}) = U_0 \\ i_{c_1}(0_{+}) = i_{c_1}(0_{-}) = I_0 \end{cases}$$
(3)

其中,0_表示故障前趋近于故障时的一瞬间;0₊表示 故障后的初始瞬间。

故障发生后,直流短路点到换流器并联电容的 线路参数计入放电过程之中,但由于回路电阻与线 路电感不确定,会造成电容放电形式的不同。双极 短路故障中过渡电阻较小,电容放电形式一般为振 荡放电。联立式(1)—(3),得到 $R_1 + R_f < 2\sqrt{L_1/C_0}$ 时 故障电压与故障电流分别为:

u

$$L_{C1} = A e^{-\delta t} \sin(\omega t + \alpha)$$
(4)

$$E_{C1} = B e^{-\delta t} \sin(\omega t + \gamma)$$
(5)

$$\begin{cases} \delta = (R_{1} + R_{f})/(2L_{1}) \\ \omega = \sqrt{1/(L_{1}C_{0}) - [(R_{1} + R_{f})/(2L_{1})]^{2}} \\ A = \sqrt{[\delta U_{0}/\omega - I_{0}/(C_{0}\omega)]^{2} + U_{0}^{2}} \\ B = A\sqrt{C_{0}/L_{1}} \\ \alpha = \arctan \{U_{0}/[\delta U_{0}/\omega - I_{0}/(C_{0}\omega)]\} \\ \gamma = \arcsin [(I_{0}/A)\sqrt{L_{1}/C_{0}}] \end{cases}$$
(6)

其中, δ 为振荡衰减时间常数; ω 为振荡放电固有频 率; α 为故障放电电压初始角; γ 为故障放电电流初 始角。由式(4)、式(5)可知,故障电压 u_{c1} 与故障电 流 i_{c1} 为指数衰减正弦函数,电容放电形式为振荡放 电。振荡放电使得故障电压存在过零点,造成交流 侧设备与续流二极管中出现严重过电流,而系统要求直流保护装置在故障电压过零点之前隔离故障线路,因此在极短的时间内获取有效的故障定位暂态信息变得较为困难。

1.2 单极接地短路故障分析

单极接地故障是直流配电网线路中发生最为频 繁的故障,其放电回路等效电路如图2中的回路1所 示,它是由故障极并联电容、线路等效电阻、线路等 效电感经接地电容中性点与故障点形成的二阶放电 回路。单极接地故障中过渡电阻、线路参数的大小 未知,电容放电在不同故障情况下分别出现振荡放 电与非振荡放电2种形式。当故障回路参数满足 $R_{eq} + R_{f} < 2\sqrt{L_{eq}/C}$ 时,电容放电过程为振荡放电,故 障动态求解过程与双极短路故障一致,区别在于只 取故障极线路参数计入故障回路。当回路参数满足 $R_{\rm eq} + R_{\rm f} > 2\sqrt{L_{\rm eq}/C}$ 时,电容放电过程为非振荡放电, 此放电形式不存在故障电压、电流过零,即可避免续 流二极管同时导通的情况出现,直流侧与续流二极 管不会出现过电流,使得直流保护装置动作时间裕 度大幅度增加,有利于故障定位方法获取有效暂态 信息。

联立式(1)—(3)可得 $R_{eq} + R_f > 2\sqrt{L_{eq}/C}$ 时,故 障电压与故障电流分别如式(7)、式(8)所示。

$$u_{c2} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \Big[\Big(U_0 \lambda_2 + I_0 / C \Big) e^{\lambda_1 t} - \Big(U_0 \lambda_1 + I_0 / C \Big) e^{\lambda_2 t} \Big] (7)$$
$$i_{c2} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \Big[\lambda_2 \Big(C U_0 \lambda_1 + I_0 \Big) e^{\lambda_2 t} - \lambda_1 \Big(C U_0 \lambda_2 + I_0 \Big) e^{\lambda_1 t} \Big]$$
(8)

$$\begin{cases} \lambda_{1} = -(R_{eq} + R_{f})/(2L_{eq}) + \sqrt{[(R_{eq} + R_{f})/(2L_{eq})]^{2} - 1/(L_{eq}C)} \\ \lambda_{2} = -(R_{eq} + R_{f})/(2L_{eq}) - \sqrt{[(R_{eq} + R_{f})/(2L_{eq})]^{2} - 1/(L_{eq}C)} \end{cases}$$
(9)

由式(7)、式(8)可知,故障电压u_{c2}、故障电流i_{c2} 为非振荡放电形式。振荡放电与非振荡放电的放电 特性存在很大的差异,对于提取全过程放电信息的 离线定位法具有很大影响,因此需要提前设定定位 装置参数使放电形式满足振荡放电条件。而本文通 过计算电流波形突变点斜率构建故障定位方程、求 解故障距离,所以放电形式对于本文的故障定位方 法无影响。

2 基于电流波形斜率的定位原理

2.1 电流波形突变特性分析

结合线路正常与故障时的电流特性分析,可得 直流电流波形的突变几何属性。系统正常运行时, 线路电流趋于一个恒定值;当线路发生单极接地短 路故障或双极短路故障,且故障电路为欠阻尼状态 时,线路电流突变,曲线弯曲程度急剧增大,暂态电流振荡衰减,最终趋于稳定。直流电流波形突变几何属性如图3所示。图中,曲线a为不同故障位置下的电容放电电流波形;曲线b为不同过渡电阻下的电容放电电流波形;l_a、l_b分别为故障瞬间不同突变程度下电流波形a、b在故障瞬间的切线。



Fig.3 Abrupt geometric properties of DC current waveform

从几何角度上看,经过曲线上某点,且与该点方 向一致的割线为此处的切线;从代数角度看,曲线所 代表的函数在某点存在导数,则此处的导数为该点 的切线斜率。将故障瞬间区域放大后可知故障电流 突变处曲线存在切线。以单极短路故障为例,由式 (5)可求得故障电流为振荡放电形式下的一阶导 数为:

$$\frac{\mathrm{d}i_{c1}}{\mathrm{d}t} = \mathrm{e}^{-\delta t} \left[K \sin\left(\omega t\right) + D \cos\left(\omega t\right) \right]$$
(10)

$$\begin{cases} K = U_0 / (\omega L) + I_0 \delta^2 / \omega - I_0 \omega \\ D = U_0 / L - 2I_0 \delta \end{cases}$$
(11)

由式(8)可求得故障电流为非振荡形式下的一 阶导数为:

$$\frac{\mathrm{d}i_{c2}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \Big[\lambda_2^2 (CU_0 \lambda_1 + I_0) \mathrm{e}^{\lambda_2 t} - \lambda_1^2 (CU_0 \lambda_2 + I_0) \mathrm{e}^{\lambda_1 t} \Big]$$
(12)

式(10)、(12)中的一阶导数值分别为表示故障 电流变化快慢的振荡衰减量、非振荡衰减量。从中 提取故障瞬时暂态量,即通过式(10)、(12)都可求得 整流侧故障瞬间(*t*=0,)的切线斜率为:

$$k = \frac{\mathrm{d}i_{c_{\mathrm{Im}}}}{\mathrm{d}t} \left(0_{+}\right) = \frac{U_{10}'}{l_{1}d_{1}} - \frac{I_{10}\left(r_{1}d_{1} + R_{\mathrm{f1}}\right)}{l_{1}d_{1}}$$
(13)

其中,r₁为线路单位电阻;l₁为线路单位电感;d₁为故 障点到整流侧并联电容的距离;U'₁₀、I₁₀分别为整流 侧故障极初始电压、初始电流;R₁₁为整流侧等效过 渡电阻;i_{c1m}为整流侧电容放电电流。

由式(13)可知,振荡放电与非振荡放电形式不 影响电流波形在故障瞬间的切线斜率表达式,验证 了第1节中放电形式对于定位方法无影响的观点。 已知线路初始电压、初始电流,电流波形在故障瞬间 的切线斜率大小由故障回路参数决定,即电流波形 在故障瞬间的切线斜率包含了故障距离与过渡电阻 信息,两者的大小决定了电流波形的突变程度。所 以不同突变程度的电流波形在故障瞬间的切线斜率 不同,因此可利用电流波形在故障瞬间的切线斜 率表示电流波形的突变程度。从物理属性角度分 析,电流波形在故障瞬间的切线斜率通过微分定义 表达了故障瞬间电流的变化快慢。图3中,当过渡 电阻不变时,切线斜率与故障距离构成反比例型函 数,两者呈负相关关系;故障距离不变时,切线斜率 与过渡电阻构成一次函数,也呈负相关关系,如图4 所示。

5.0×10⁶
第 2.5×10⁶
0

$$R_{r}=20 \Omega$$

 $R_{r}=10 \Omega$
5 10 15 20
故障距离/km



Fig.4 Diagram of relationship among tangent slope, transition resistance and fault distance

电流波形切线斜率可采用传统差分值代替微分 值方法求得,则式(13)可以表示为:

$$k = \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \left(t_0 \right) = \frac{i(t_0 + \Delta t) - i(t_0)}{\Delta t} \tag{14}$$

当考虑到差分代替微分的误差时,由泰勒公式 可推导出故障电流微分值与差分值之间的关系为:

$$k = \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \left(t_0 \right) = \frac{i(t_0 + \Delta t) - i(t_0)}{\Delta t} + \gamma_2 \left(t_0 \right) \tag{15}$$

其中, $\gamma_2(t_0)$ 为故障电流差分值与微分值之间的截断 误差; t_0 为故障发生时刻; $\Delta t = 1/f$,为2个故障电流 采样点之间的时间间隔,f为采样频率。当故障发 生在保护装置近端时,故障电流的突变程度大,采样 频率过低则影响差分值代替微分值的精度。通过对 比式(14)、(15)可知,传统的差分替代法未考虑截断 误差对替代精度的影响,即使在采样频率较高的情 况下也存在一定的误差,截断误差会造成故障电流 微分值小于故障电流差分值。

为了解决截断误差造成切线斜率计算误差过大的问题,利用一阶导数的五点数值微分算法计算故障瞬间电流波形的切线斜率。设故障发生后电流信号采样点为 $(t_0, i(t_0))$ 、 $(t_1, i(t_1))$ 、 $(t_2, i(t_2))$ 、 $(t_3, i(t_3))$ 、 $(t_4, i(t_4))$,其中 $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$,各采样点之间的时间间隔为 Δt ,故障电流的4次拉格朗日插值函数为:

$$L(t) = \sum_{m=0}^{4} \left[i\left(t_{m}\right) \prod_{n=0}^{4} \frac{t-t_{n}}{t_{m}-t_{n}} \right] \quad m = 0, 1, \dots, 4 \quad (16)$$

对式(16)求一阶导数,并且将t=t₀代入所求故障电流插值函数一阶导数中,可得故障瞬间一阶导

数的五点数值微分值为:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}(t_0) = \frac{1}{12\Delta t} (-25\,i(t_0) + 48\,i(t_1) - 36\,i(t_2) + 16\,i(t_3) - 3\,i(t_4)) = k$$
(17)

结合故障后第一阶段的电容放电暂态特性,分 析线路电流波形突变特征,通过计算两端电流波形 在故障瞬间的切线斜率构建单极故障、双极故障定 位方程,求解故障距离。

2.2 故障类型与故障极判别

结合交流系统输电线路极性理论与直流电压突 变特性,利用故障时正、负极电压梯度极性判断故障 类型与故障极^[15],即利用故障时刻的后2个采样值减 去前2个采样值获取电压梯度,正、负极电压梯度为:

$$\nabla u_i(k) = \sum_{j=1}^2 u_i(t_s + j) - \sum_{j=1}^2 u_i(t_s - j)$$
(18)

其中,*i*取值为p、n时,分别表示正、负极;*t*_s为当前采 样时刻。为了提高电压梯度算法的可靠性,设定故 障定位启动阈值 U_{set} ,阈值整定值要大于正常运行时 的电压梯度最大值、小于故障时线路电压梯度最小 值。发生正极接地短路故障时,正极电压跌落,负极 电压下降,则有 $\nabla u_p < -U_{set}, \nabla u_n < -U_{set}; 发生负极接地$ $短路故障时,正、负极电压上升,则有<math>\nabla u_p > U_{set}, \nabla u_n > U_{set};$ 发生双极短路故障时,正极电压下降,负极电压 上升,则有 $\nabla u_p < -U_{set}, \nabla u_n > U_{set}$ 。进而构造故障定位 启动判据,以解决高阻接地故障时电压曲线平滑、故 障分量难以提取的问题。

3 故障定位原理

3.1 双极短路故障定位

线路发生金属性故障时,利用一端电流波形在 故障瞬间的切线斜率方程即可计算切线斜率得到故 障距离。但发生非金属性故障时,单端方程中引入 未知量过渡电阻,则需要联立两端电流波形在故障 瞬间的切线斜率方程计算故障距离。考虑到逆变侧 与整流侧具有相同的电容放电故障特征^[16],其故障 电流波形突变也可由电流波形在故障瞬间的切线斜 率表征。将故障网络分解为整流侧与逆变侧2个网 络,如图5所示。

分解后的整流侧、逆变侧故障点电压等于分解 前故障点电压,则对于故障后任意时刻的故障点对 地电压有:

$$\begin{cases} u = i_1 R_{f1} = i_2 R_{f2} \\ u = (i_1 + i_2) R_f \end{cases}$$
(19)

其中, i_1 、 i_2 分别为整流侧、逆变侧故障回路电流。 可得:

$$\begin{cases} R_{\rm f1} = (1 + i_2/i_1)R_{\rm f} \\ R_{\rm f2} = (1 + i_1/i_2)R_{\rm f} \end{cases}$$
(20)



92

图5 双极短路故障分解图

Fig.5 Decomposition diagram of pole-to-pole short circuit fault

逆变侧与整流侧具有相同的电容放电故障特征,其区别在于回路参数不同造成的故障电流波形差异。分析整流侧与逆变侧故障回路放电过程,由式(10)可求得两端电流波形在故障瞬间的切线斜率为:

$$k_{1} = \frac{\mathrm{d}i_{1}}{\mathrm{d}t} \left(0_{+} \right) = \frac{U_{10}}{2 \, l_{1} d_{1}} - \frac{I_{10} (2 \, r_{1} d_{1} + R_{\mathrm{fI}})}{2 \, l_{1} d_{1}} \qquad (21)$$

$$k_{2} = \frac{\mathrm{d}i_{2}}{\mathrm{d}t} \left(0_{+} \right) = \frac{U_{20}}{2 \, l_{1} d_{2}} - \frac{I_{20} \left(2 \, r_{1} d_{2} + R_{12} \right)}{2 \, l_{1} d_{2}} \qquad (22)$$

$$d_1 + d_2 = l \tag{23}$$

其中, d_2 为故障点到逆变侧并联电容的距离;l为线路全长; U_{10} 为整流侧极间初始电压; U_{20} 为逆变侧极间初始电压; I_{20} 为逆变侧线路初始电流; R_{12} 为逆变侧等效过渡电阻。

故障瞬间($t=0_+$), 令 $i_1 / i_2 = I_{10} / I_{20}$, 联立式(20)、 (23)可求得双极短路故障距离为:

$$d_{1} = \frac{U_{10} + 2I_{20}r_{1}l + 2k_{2}l_{1}l - U_{20}}{2I_{10}r_{1} + 2k_{2}l_{1} + 2k_{1}l_{1} + 2I_{20}r_{1}}$$
(24)

发生双极短路故障时,线路两端换流器并联电 容向故障点放电。通过分析故障电流波形突变发现 电流波形在故障瞬间的切线斜率中包含故障距离与 过渡电阻信息。过渡电阻接入故障回路使得故障时 的电流波形平滑,造成差分替代微分过程中误差变 大,进而影响故障定位结果。本文方法利用两端电 流波形在故障瞬间的切线斜率消去了故障定位方程 中的过渡电阻,所以在过渡电阻未知的情况下也能 实现故障定位。

3.2 单极短路故障定位

发生单极接地短路故障时,电容放电过程与双 极短路故障相似,故障回路参数为双极短路故障的 1/2,全线路电容放电分解电路如图6所示。

假设此时放电形式为非振荡放电,对于整流侧、



图 6 单极接地短路故障分解图 Fig.6 Decomposition diagram of pole-to-ground short circuit fault

逆变侧故障回路,由式(12)可得单极短路故障电流 波形在故障瞬间的切线斜率为:

$$k_{3} = \frac{\mathrm{d}i_{1}}{\mathrm{d}t} \left(0_{+} \right) = \frac{U_{10}'}{l_{1}d_{1}} - \frac{I_{10}(r_{1}d_{1} + R_{\mathrm{fI}})}{l_{1}d_{1}}$$
(25)

$$k_{4} = \frac{\mathrm{d}i_{2}}{\mathrm{d}t} \left(0_{+} \right) = \frac{U_{20}'}{l_{1}d_{2}} - \frac{I_{20}(r_{1}d_{2} + R_{f2})}{l_{1}d_{2}}$$
(26)

其中,U₂₀为逆变侧故障极初始电压。同理,当放电 形式为振荡放电时,可通过式(10)分别在整流侧与 逆变侧求得电流波形在故障瞬间的切线斜率公式。 联立式(20)、(23)、(25)、(26)可求得单极短路故障 距离为:

$$d_{1}^{\prime} = \frac{U_{10}^{\prime} + I_{20}r_{1}l + k_{4}l_{1}l - U_{20}^{\prime}}{I_{10}r_{1} + k_{4}l_{1} + k_{3}l_{1} + I_{20}r_{1}}$$
(27)

故障发生后,先利用故障定位启动判据确定故 障类型与故障极,再由不同故障类型选用故障距离 表达式确定故障距离,完成故障定位。故障定位流 程如附录中的图A1所示。

4 仿真验证

为了验证本文方法的有效性与准确性,在 PSCAD/EMTDC中按照图1搭建±12 kV双端电压 源型换流器中压柔性直流配电网线路的仿真模型, 仿真模型的直流侧接地方式为电容中点直接接地方 式。系统额定容量为20 MW,线路总长度为20 km。 为减少高频分量对于故障定位结果的影响,对线路 两侧录波数据采取低通滤波处理。考虑线路参数的 频变效应,计算低频段参数平均值可得单位线路电 阻 r_1 =0.0331 Ω /km,单位线路电感 l_1 =1.3 mH/km。 电缆线路两端换流器前并联电容C=3000 µF,线路 分布电容为12 nF/km。系统在0时刻发生故障,故 障持续时间为50 ms,采样频率为20 kHz。

4.1 单极接地短路故障定位结果

系统发生单极短路故障时,以过渡电阻0、10、

20 Ω,故障点位置距离整流侧1、4、8、12、18 km的 情况为验证对象展开研究。将线路两端录波器所得 仿真数据导入MATLAB中,分别利用传统微分替代 算法、五点数值微分替代算法计算电流波形在故障 瞬间的切线斜率,再联立两端电流波形切线斜率方 程消去过渡电阻求解故障距离,验证定位方法的准 确性。单极接地短路故障定位结果如表1所示。表 中,算法1、2分别表示微分替代算法、五点数值微分 替代算法,后同。

表1 单极接地短路故障定位结果

Table 1 Location results of pole-to-ground

| short circuit fault | | | | | | |
|---------------------|--------------|-----------|---------|----------|-------|--|
| 实际故障 | 过渡电 | 测量距离 / km | | 定位误差 / % | | |
| 距离 / km | 阻 / Ω | 算法1 | 算法2 | 算法1 | 算法2 | |
| | 0 | 1.0205 | 1.0112 | 0.103 | 0.056 | |
| 1 | 10 | 1.0263 | 1.0182 | 0.132 | 0.091 | |
| | 20 | 1.0418 | 1.0201 | 0.209 | 0.101 | |
| | 0 | 4.0250 | 4.0141 | 0.125 | 0.071 | |
| 4 | 10 | 4.0291 | 4.0162 | 0.146 | 0.081 | |
| | 20 | 4.0352 | 4.0201 | 0.176 | 0.101 | |
| | 0 | 8.0183 | 8.0110 | 0.092 | 0.055 | |
| 8 | 10 | 8.0200 | 8.0133 | 0.100 | 0.067 | |
| | 20 | 8.0252 | 8.0152 | 0.126 | 0.076 | |
| | 0 | 12.0190 | 12.0109 | 0.095 | 0.055 | |
| 12 | 10 | 12.0222 | 12.0114 | 0.111 | 0.057 | |
| | 20 | 12.0286 | 12.0146 | 0.143 | 0.073 | |
| | 0 | 18.0261 | 18.0151 | 0.131 | 0.076 | |
| 18 | 10 | 18.0287 | 18.0222 | 0.144 | 0.111 | |
| | 20 | 18.0368 | 18.0285 | 0.184 | 0.143 | |

4.2 双极短路故障定位结果

双极短路故障时,仿真条件、故障距离计算过程 与单极接地短路故障类似,故障定位结果见表2。

表2 双极短路故障定位结果

Table 2 Location results of pole-to-pole

| short circuit fault | | | | | | |
|---------------------|--------------|-----------|----------|---|-------|--|
| 实际故障 | 过渡电 | 测量距离 / km | | 定位误差 / % | | |
| 距离 / km | 阻 / Ω | 算法1 | 算法2 | 算法1 | 算法2 | |
| | 0 | 1.0205 | 1.0162 | 0.133 | 0.081 | |
| 1 | 10 | 1.0263 | 1.0171 | 0.151 | 0.086 | |
| | 20 | 1.0418 | 1.0183 | 0.178 | 0.092 | |
| | 0 | 4.0250 | 4.0148 | 0.115 | 0.074 | |
| 4 | 10 | 4.0291 | 4.0168 | 0.143 | 0.084 | |
| | 20 | 4.0352 | 4.0199 | 0.174 | 0.096 | |
| | 0 | 8.0183 | 8.0105 | 0.126 | 0.083 | |
| 8 | 10 | 8.0200 | 8.0121 | 0.142 | 0.061 | |
| | 20 | 8.0252 | 8.0145 | 定位後 算法1 0.133 0.151 0.178 0.115 0.143 0.174 0.126 0.142 0.166 0.149 0.158 0.171 0.151 0.178 0.178 0.186 | 0.073 | |
| | 0 | 12.0190 | 12.0111 | 0.149 | 0.056 | |
| 12 | 10 | 12.0222 | 12.0134 | 0.158 | 0.072 | |
| | 20 | 12.0286 | 12.0158 | 0.171 | 0.079 | |
| | 0 | 18.0261 | 18.0157 | 0.151 | 0.079 | |
| 18 | 10 | 18.0287 | 18.0182 | 0.178 | 0.091 | |
| | 20 | 18 0368 | 18 014 7 | 0.186 | 0.074 | |

由表1、2可知,采用五点数值微分算法时故障 定位精度比采用传统微分替代算法时提高了近 50%,极大地减少了计算切线斜率过程中的替代误差,单极短路接地故障和双极短路故障的定位误差分别不超过0.3%和0.2%。

在实际工程应用中,故障暂态信号中会引入噪 声。本文在理想故障暂态信号中叠加0~30 dB的白噪 声,分析定位方法的抗噪性能^[17],结果如图7所示。



图7 噪声对故障定位误差影响



由图7可知,噪声在10 dB以内时对故障定位的 精度影响不大,当噪声大于10 dB后,随着噪声增 大,故障定位精度逐渐降低。电容放电阶段的故障 暂态电流为1 kHz以下低频段信号,而噪声属于高 频信号,可利用低通滤波装置减小噪声对于故障定 位的干扰。

4.3 线路分布电容对故障定位精度的影响

考虑到直流电缆线路存在对地分布电容,有必要分析分布电容对定位精度的影响。本文对过渡电 阻 R_r =20 Ω ,故障点位置距离整流侧1、4、8、12、18 km, 线路分布电容 C_k =160 nF的故障情况进行仿真,分析相同过渡电阻、相同分布电容、不同故障位置对单极接地短路故障、双极短路故障定位精度的影响,故障定位结果如附录中的表A1所示。由表A1可知,分布电容为160 nF时,其对不同故障位置下的故障定位精度有一定影响,故障定位精度仍然随故障距离产生变化,但定位精度仍然较高。

然后对过渡电阻 $R_{\rm f}$ =20 Ω ,故障点位置距离整流侧 8 km,线路分布电容分别为 40、80、120、160、 200、240、280 nF 情况下的单极接地短路故障、双极 短路故障进行仿真,分析相同过渡电阻、相同故障位 置、不同分布电容对单极接地短路故障、双极短路故 障定位精度的影响,结果如图 8 所示。



图8 线路分布电容对故障定位误差影响



由图 8 可知,线路分布电容对于故障定位误差 有影响,定位误差在 0~0.3%的范围内无规律变化, 定位精度几乎不受分布电容的影响。这是由于换流 器并联了大电容,故障电流主要为大电容放电电流, 分布电容电流在故障电流的占比很小。电容放电阶 段的故障暂态电流的频段主要分布在 1 kHz 以内, 线路分布暂态电流的频段主要分布在 1.8 kHz 以 上^[18]。利用这种频段分布特性差异,采用合适的低 通滤波器可以减少线路分布电容对于故障定位误差 的影响。

4.4 采样频率对定位精度的影响

由式(14)可知,切线斜率需要利用差分值代替 微分值计算,两者之间的替代误差为:

$$\gamma_2(t_0) = -\frac{\Delta t}{2} i''(\xi) = -\frac{1}{2f} i''(\xi) \quad \xi \in (t_0, t_0 + \Delta t) \quad (28)$$

其中,*i*"(ξ)为故障电流的二阶导数。故障电流切线 斜率的计算精度受采样频率的影响,随着采样频率 f 增加,差分值替代微分值的误差逐渐变小。切线斜 率的计算值更加精确,定位精度也将逐渐增加。过 渡电阻为20Ω时,不同采样频率下的故障定位误差 如附录中的表A2所示。由表可知,过渡电阻为20Ω 时,不同故障距离下的整体故障定位误差小于 0.5%。随着采样频率的增加,故障定位精度逐渐增 加,增大采样频率能够有效提高定位精度。当采样 频率大于20kHz时,增大采样频率对于提高定位精 度无明显作用。

5 结论

综合分析中压柔性直流配电线路故障动态特性 与直流电流波形突变特性,提出了一种基于电流波 形斜率的中压柔性直流配电线路故障定位方法。该 方法利用电压梯度快速、可靠确定故障类型与故障 极,利用一种五点数值微分替代算法计算线路两端 暂态电流波形在故障瞬间的切线斜率,构建定位方 程求解故障距离,减少了切线斜率计算误差,提高了 定位精度。该方法无需复杂算法、原理简明、计算简 单、采样频率低。理论分析和仿真结果表明,定位方 法能够在不同故障位置、不同过渡电阻、不同故障类 型下实现精确定位,有望在中压柔性直流配电网中 得到实际应用。本方法只针对双端电压源换流器配 电线路故障定位有效,对于电压源换流器内部故障 或者多端柔性直流配电系统故障定位还有待进一步 研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 王渝红,傅云涛,曾琦,等.柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J].高电压技术,2019,45(8):2362-2374.

WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2362-2374.

- [2]余修勇,肖立业.直流配电网故障识别和定位技术研究综述
 [J].电工电能新技术,2019,38(7):56-66.
 YU Xiuyong, XIAO Liye. An overview of fault identification and location technology for DC distribution networks[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019,38(7):56-66.
- [3] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73. SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua,et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [4] 李猛,贾科,毕天姝,等.适用于直流配电网的测距式保护[J]. 电网技术,2016,40(3):719-724.
 LI Meng,JIA Ke,BI Tianshu, et al. Fault distance estimationbased protection for DC distribution networks[J]. Power System Technology,2016,40(3):719-724.
- [5] FENG Xianyong, LI Qi, PAN Jiuping. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3):1834-1840.
- [6] DHAR S, PATNAIK R K, DASH P K. Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):4303-4312
- [7] 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.
- [8] JIA Ke, LI Meng, BI Tianshu, et al. A voltage resonance-based single-ended online fault location algorithm for DC distribution networks [J]. Science China-Technological Sciences, 2016, 59(5):721-729.
- [9] 徐铭铭,肖立业,王海风,等. 一种基于 Prony 算法的直流配电 网电缆故障定位方法[J]. 电工电能新技术,2015,34(4): 1-5,30.
 XU Mingming,XIAO Liye,WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on Prony algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2015,34(4):1-5,30.
- [10] JIA Ke, LI Meng, BI Tianshu, et al. Sixth harmonic-based fault location for VSC-DC distribution systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(14): 3485-3490.
- [11] 徐铭铭,肖立业,林良真. 直流配电网单极接地故障定位方法
 [J]. 电工电能新技术,2015,34(11):55-62,74.
 XU Mingming,XIAO Liye,LIN Liangzhen. Method of locating single-pole-to-ground fault in DC distribution system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015,34(11):55-62,74.
- [12] 高仁栋,吴在军,范文超,等. 基于电流微分初始值的VSC直流 配电系统线路故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2018,38
 (2):27-33.
 GAO Rendong,WU Zaijun,FAN Wenchao, et al. Line fault location method of VSC-based DC distribution system based on initial current differential value[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):27-33.
- [13] 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.
- [14] 贾科,王聪博,毕天姝,等.考虑过渡电阻影响的柔性直流配电

系统电流突变量保护[J]. 电网技术,2018,42(10):3187-3195. JIA Ke,WANG Congbo,BI Tianshu, et al. A DC current derivative protection with capability of resisting high resistance for flexible DC distribution system[J]. Power System Technology,2018,42(10):3187-3195.

[15] 吕煜,朱思丞,汪楠楠,等.基于电流突变量的直流电网区内双极短路故障定位方法[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4686-4694,4971.

LÜ Yu, ZHU Sicheng, WANG Nannan, et al. Internal pole-topole short-circuit fault location of bipolar HVDC grid using sudden-change current information[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16):4686-4694, 4971.

[16] 刘剑,邰能灵,范春菊,等.基于暂态电流 Pearson 相关性的两 电平 VSC-HVDC 直流线路故障判别[J].电工技术学报,2017, 32(3):74-85.

LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for two-level VSC-HVDC DC line based on Pearson correlation of transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3):74-85.

 [17] 和敬涵,周琳,罗国敏,等.基于单端电气量的多端柔性直流配 电系统暂态保护[J].电力自动化设备,2017,37(8):158-165.
 HE Jinghan,ZHOU Lin,LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.

[18] 贾科,李猛,毕天姝,等.柔性直流配电线路能量分布差动保护
 [J].电网技术,2017,41(9):3058-3065.
 JIA Ke,LI Meng,BI Tianshu, et al. Energy distribution-based differential protection for VSC-DC distribution lines[J]. Po-

wer System Technology, 2017, 41(9): 3058-3065.

作者简介:



李泽文(1975—),男,湖南常德人,教 授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方 向为电力系统保护与控制(E-mail:lzw0917@ 163.com);

颜勋奇(1993—),男,湖南祁阳人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统保护与 控制(E-mail;yan823395998@qq.com);

肖仁平(1994—),男,湖南新化人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统保护与

控制(E-mail:852766105@qq.com)。

(编辑 任思思)

Fault location method based on slope of transient current waveform for flexible mid-voltage DC distribution line

LI Zewen¹, YAN Xunqi¹, XIAO Renping², WANG Zikang¹, MU Lizhi¹

 The Grid Security Monitoring Technology Engineering Research Center of the Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

Jiangmen Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

Abstract: In order to improve the safe and stable operation capability of MV(Mid-Voltage) DC(Direct Current) distribution network, a novel fault location method based on the slope of transient current waveform for MV DC power distribution lines is proposed. The transient characteristics in the time domain of pole-toground and pole-to-pole faults are analyzed, by which it is found that the tangent slope of the transient point of the transient current waveform under different fault types is not affected by the form of capacitor discharge, and the tangent slope of transient current waveform is inversely proportional to the position of fault. The positive and negative voltage gradients are used to determine the fault type and the fault pole, and the fault distance can be calculated by using the tangent slope of the transient current waveforms at both ends of the line for different fault types. The simulative results of PSCAD / EMTDC verify the effectiveness and accuracy of the proposed method, which can accurately locate the fault point under different fault types, different fault distances and different transition resistances.

Key words: DC distribution network; fault location; transient current; tangent slope; fault discrimination





图 A1 故障定位流程图

Fig.A1 Flowchart of fault location

| 表 A1 短路故障定位结果($R_{\rm f}=20\Omega$ | , $C_{\rm k} = 160 {\rm nF}$) |
|---|---|
| Table A1 Location results of short circuit faults | $(R_{\rm f}=20\Omega, C_{\rm k}=160{\rm nF})$ |
| | |

| 实际故障 | 单极接地 | 单极接地短路故障 | | 双极短路故障 | |
|-------|---------|----------|---------|--------|--|
| 距离/km | 测量距 | 定位误 | 测量距 | 定位误 | |
| | 离/km | 差/% | 离/km | 差/% | |
| 1 | 1.0299 | 0.118 | 1.0286 | 0.143 | |
| 4 | 4.0389 | 0.195 | 4.0371 | 0.186 | |
| 8 | 8.0278 | 0.139 | 8.0332 | 0.166 | |
| 12 | 12.0301 | 0.151 | 12.0366 | 0.183 | |
| 18 | 18.0399 | 0.200 | 18.0384 | 0.192 | |

表 A2 不同采样频率下的故障定位误差 ($R_{\rm f}$ =20 Ω)

| TableA2 Fault location errors under different samplin | ng frequencies | $(R_{\rm f}=20\Omega)$ |
|---|----------------|------------------------|
|---|----------------|------------------------|

| 故障距离/km | | 定位误差 | 套/% | |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| | 10kHz | 20kHz | 40kHz | 80kHz |
| 1 | 0.248 | 0.134 | 0.126 | 0.112 |
| 4 | 0.278 | 0.161 | 0.150 | 0.139 |
| 8 | 0318 | 0.176 | 0.152 | 0.110 |
| 12 | 0.390 | 0.198 | 0.172 | 0.131 |
| 18 | 0.454 | 0.199 | 0.175 | 0.138 |