

DOI: 10.7667/PSPC170916

直流输电单极故障引发接地极线路击穿的定位方法研究

朱清代¹, 张纯¹, 石玉东², 滕予非¹, 李小鹏¹, 甄威¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为实现直流输电单极故障引发接地极线路击穿故障点的快速准确定位, 缩短供电恢复时间, 提出一种基于换流站故障录波的接地极线路击穿点定位方法。通过理论分析, 得到直流输电单极故障情况下换流站中性母线电压 U_{DN} 振荡频率随接地极线路等效电感的变化规律, 结合接地极线路模型并考虑参数频变特性的影响, 构建了基于“频率—电感—距离”三者关系的击穿点定位算法。利用西南至华东某特高压直流工程实际故障案例对方法进行了验证。结果表明: 该方法的有效性和精度满足实用要求, 且无需额外增加换流站软硬件配置, 便于工程应用。
关键词: 直流单极故障; 接地极线路; 故障定位; 录波分析法; 中性母线过电压

Research on location method of grounding electrode line fault caused by unipolar fault of HVDC transmission system

ZHU Qingdai¹, ZHANG Chun¹, SHI Yudong², TENG Yufei¹, LI Xiaopeng¹, ZHEN Wei¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to realize the fast and accurate location of breakdown point of grounding electrode line caused by a HVDC unipolar fault, and shorten the power supply restoration time, a fault location method for grounding electrode line based on fault recorder of converter station is proposed. Theoretical analysis has revealed the relationship between the oscillation frequency of the neutral bus in the converter station U_{DN} and the grounding electrode line inductance, combined with the line model and considering the effects of frequency dependent characteristics, a fault location algorithm based on the quantitative relationship between frequency, inductance and distance is proposed. Practical fault cases of a UHVDC project from Southwest to East China is used to check the method. The results show that the method is effective and accurate, and it does not need to increase the configuration of hardware and software of converter station, so it is convenient for engineering application.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51707019) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2016M592659).

Key words: HVDC unipolar fault; grounding electrode line; fault location; waveform analysis; neutral bus overvoltage

0 引言

国内常规直流均采用双极大回线方案, 出于直流入地电流的影响考虑, 接地极选址通常与换流站相距几十到上百公里, 换流站中性母线与接地极之间由双回架空导线并联连接。接地极线路稳态运行电压低, 通常认为其故障对直流输电系统本身并无严重的直接影响。然而, 国内直流输电工程因接

地极线路引起直流闭锁的案例却并不罕见。文献[1]报道了南网±500 kV 兴安直接地极线路在单极故障后接地极线路发生击穿故障, 导致另一极直流相继闭锁; 2015年7月, 西南—华东某特高压直流受端极2直流穿墙套管故障导致极2保护性闭锁, 整流站接地极线路受过电压击穿且未能熄弧, 最终引发极1相继闭锁; 2016年4月, 该直流工程极1线路故障, 保护执行再启动期间, 整流站站接地极线路不平衡保护动作, 运维人员逐塔巡线查找故障, 发现存在瞬时放电痕迹。分析表明: 直流单极故障后, 换流站中性母线连同接地极线路会产生远高于

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51707019); 中国博士后科学基金项目资助(2016M592659)

额定水平的振荡过电压, 易引发接地极线路击穿, 运维人员需要迅速确定击穿点位置, 以便对绝缘薄弱点进行处理, 尽快恢复送电, 确保系统安全。由于瞬时性故障击穿造成的放电痕迹并不明显, 故障点难以查找, 常规逐塔巡线工作费时费力, 效果不佳。针对直流单极故障导致的接地极线路过电压击穿情况, 急需一种迅速有效地故障定位方法。

现有接地极线路相关监测和保护功能中, 电流不平衡保护仅反映故障, 无法定位^[2-3]; ABB 接地极线路阻抗监视系统 ELIS 采用阻抗检测法进行故障监测, 无测距功能, 西门子 PEMO2000 接地极线路故障检测及定位系统采用脉冲反射原理实现故障检测和定位, 仅对永久性故障有效, 不能检测短时故障^[4-5]。针对现有系统不足, 文献[6-8]提出基于行波的接地极线路故障方法, 对采样频率要求较高; 文献[9-11]提出基于贝杰龙模型或 π 模型的接地极线路故障测距算法, 但没有考虑线路参数频变特性的影响; 文献[12]提出一种基于故障录波数据的测距算法, 无需增加硬件设备, 符合现场需求, 在单极运行方式下效果最佳。

本文在分析直流单极故障后接地极线路过电压形成机理及特征的基础上, 提出一种基于换流站中性母线电压频率的接地极线路故障识别及定位新方法, 该方法考虑了线路参数频变特性的影响, 有效性和准确度得到了工程实例验证。

1 直流单极故障引发接地极线路故障机理分析

1.1 电路模型

双极直流输电系统具有对称结构, 其中单极的接线及其运行方式如图 1 所示。

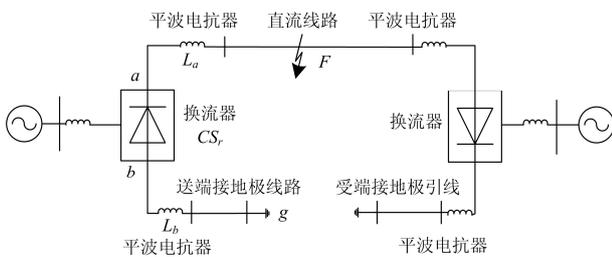


图 1 高压直流单极运行结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HVDC single pole operation

由图 1 可见: 当直流系统发生单极故障时, 故障电流将通过整流侧换流器 CS_r 、极线平波电抗器 L_a 、直流线路故障点 F 、送端接地极址 g 、接地极线路、中性极线平波电抗器 L_b 形成回路。回路在 R 、

L 、 C 参数和控制系统的共同作用下产生复杂的响应过程。其中, 换流站中性母线连同接地极线路会出现远高于额定水平的暂态过电压, 成为接地极线路击穿故障的主要诱因^[13-14]。

为简化分析, 建立电路模型时考虑以下前提:

1) 故障为金属性短路; 2) 接地极线路过电压峰值早于保护闭锁命令出现, 忽略控制系统电流调节作用; 3) 换流站中性母线避雷器未动作; 4) 忽略故障期间健全极的电流扰动^[15]。电路模型如图 2 所示。

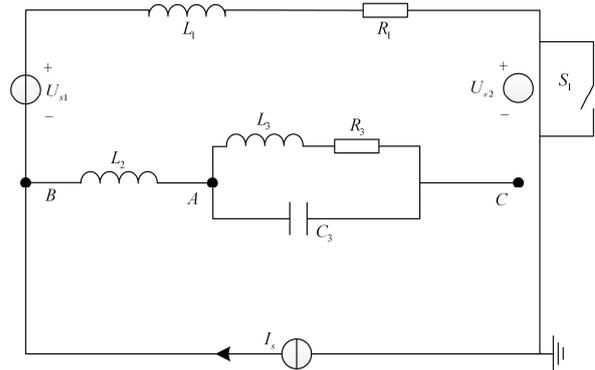


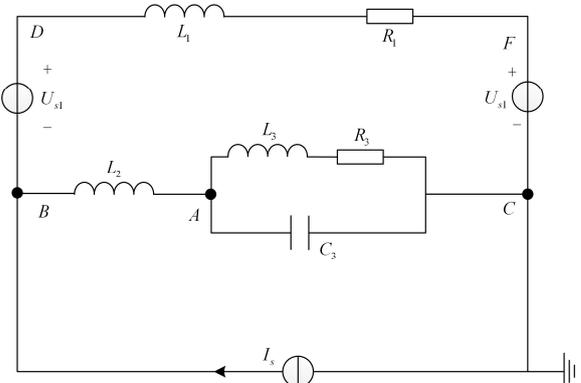
图 2 直流单极故障等值电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of DC unipolar fault

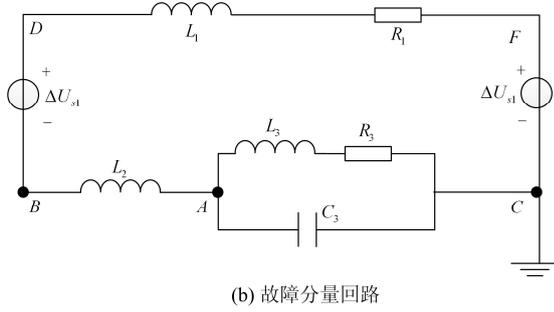
其中, L_1 为极线平抗与至故障点线路电感之和, R_1 为直流线路至故障点处电阻, L_2 为中性母线平抗及阻波器等值电感, L_3 为送端接地线路等值电感, R_3 为接地极线路等值电阻, C_3 为换流站中性极线冲击电容。 U_{s1} 为故障极整流侧直流电压, U_{s2} 为故障点故障前直流电压。忽略故障期间健全极的电流扰动, 用恒流源 I_s 替代。

1.2 接地极线路过电压产生机理

图 2 所示的等值电路中, 直流单极故障是 U_{s2} 由正常电压突降至 0 (S_1 突然闭合) 的阶跃响应, 可用故障分量法进行求解。图 2 电路模型可以分解为故障前回路和故障分量回路, 如图 3 所示。



(a) 故障前回路



(b) 故障分量回路

图3 故障分量分析模型

Fig. 3 Fault component analysis model

由图3可见, 接地线路首端电压即直流中性母线电压 U_{DN} , 对应图中 U_A , 在直流双极平衡运行时 $U_A=0$ 。因此, 直流单极故障时接地极线路首端电压等于其故障分量, 其求解过程推导如下:

故障点 F 处电压突降至 0, 有

$$U_{s2}(s) + \Delta U_{s2}(s) = 0 \quad (1)$$

进而,

$$\Delta U_{s2}(s) = -U_{s2}(s) = -\frac{U_{s20}}{s} \quad (2)$$

式中, U_{s20} 是 F 点故障前的稳态电压。

故障后 D 点电压满足

$$u_{s1} + \Delta u_{s1} = U_{di0} \cos \alpha - d_r I_d \quad (3)$$

而故障前 D 点电压则满足

$$u_{s1} = U_{di0} \cos \alpha_0 - d_r I_{d0} \quad (4)$$

因此

$$\Delta u_{s1}(t) = U_{di0} (\cos \alpha - \cos \alpha_0) - d_r \Delta I_d \quad (5)$$

忽略电流调节器作用的情况下:

$$\Delta u_{s1}(s) = -d_r \Delta I_d(s) \quad (6)$$

根据故障分量回路有

$$\Delta I_d(s) = -\frac{d_r \Delta I_d(s) + \Delta U_{s2}(s)}{s(L_1 + L_2) + R_1 + \frac{sL_3 + R_3}{s^2 L_3 C_3 + sC_3 R_3 + 1}} \quad (7)$$

可得

$$\Delta I_d(s) = -\frac{\Delta U_{s2}(s)}{\left[s(L_1 + L_2) + R_1 + \frac{sL_3 + R_3}{s^2 L_3 C_3 + sC_3 R_3 + 1} + d_r \right]} \quad (8)$$

$$\Delta U_A(s) = \frac{-u_{s20}(sL_3 + R_3)}{s \left\{ [s(L_1 + L_2) + R_1 + d_r] (s^2 L_3 C_3 + sC_3 R_3 + 1) + (sL_3 + R_3) \right\}} \quad (9)$$

当直流系统发生单极故障时, 整流站中性母线上产生的过电压 U_{DN} 可以用式(9)表达。 U_{DN} 的振荡模态与式(9)的极点有关, 由系统各项参数共同决定。工程案例表明, 接地极线路发生击穿故障的一

个重要特征是 U_{DN} 出现频率突变拐点。拐点前电压振荡频率由健全的接地极线路参数确定, 而拐点后的电压振荡频率则是由故障后的接地极线路等值参数所确定。

2 接地极线路故障击穿点定位原理

由前述分析可知, 直流单极故障后 U_{DN} 的振荡频率与接地极参数有关, 在进一步明确接地极线路击穿点距离与等值参数之间关系的基础上, 就可以利用 U_{DN} 的频率信息实现故障点定位, 本文以西南-华东某特高压直流工程参数为例进行阐述, 工程参数如表1所示。

表1 某实际直流工程参数

Table 1 Parameters of a UHVDC project

物理量	参数
R_1	8.93 Ω
R_3	1.541 6 Ω
L_1	1.537 9 H
L_2	0.15 H
L_3	0.137 5 H
C_3	34.7 μF
U_{di0}	229 \times 4 kV
U_{s20}	755.3 kV
d_r	16.96 Ω

2.1 U_{DN} 振荡频率与接地极线路等效参数的关系

当直流系统发生单极故障时, 如未引起接地极线路击穿, 则式(9)中各项 R 、 L 、 C 参数均为定值, 代入表1所示的西南-华东某特高压直流工程实际参数, 通过求取传递函数的主导极点得到 U_{DN} 振荡频率, 约为 76 Hz。

对表1中相关参数对 U_{DN} 振荡频率 f 的影响进行灵敏度分析, 分别令 R_1 、 L_1 、 C_3 、 L_2 、 R_3 、 L_3 在额定值上下 50% 范围内变化(其他变量保持不变), 观察 f 的变化, 结果如图4所示。由图4可以看出: L_3 和 C_3 对 f 影响最大, 其次 L_1 有小幅影响, 其他参数基本没有影响。冲击电容器 C_3 在运行中不会发生变化, 而 L_1 的变化与直流单极故障点位置有关, L_3 的变化则反映接地极线路的故障情况。

接地极线路沿线发生击穿时, 从 A 点向极址方向看去的等值电感 L_3 会随之变化, 进而引起 U_{DN} 的振荡频率变化。将 L_3 从 0 到全线路电感之间进行扫描, 得到 U_{DN} 振荡频率 f 随 L_3 变化的关系如图5所示。

由图5可知: U_{DN} 的振荡频率 f 随着 L_3 增大而单调降低, 对于接地极线路无故障的情况, f 在 75~88 Hz 之间, 具体与直流线路故障点 F 的距离有关。 F 距离换流站越近, f 越高, 反之越低, 但在 L_3 取值较小时, 这种差异并不明显。

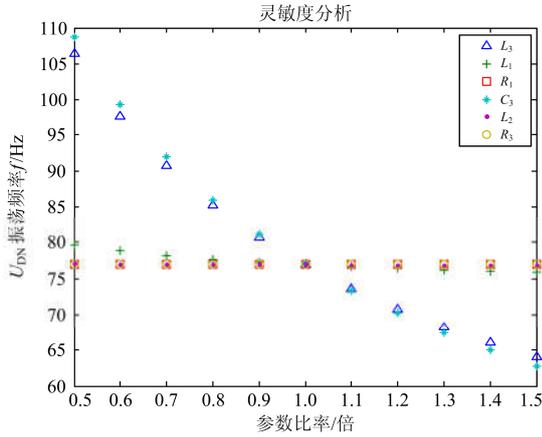
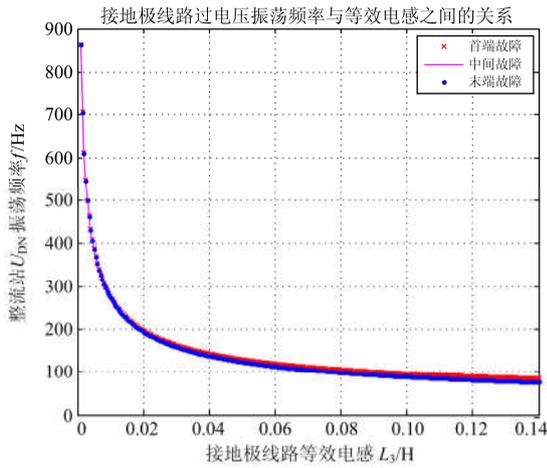


图 4 灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis

图 5 L_3 与 f 之间的关系Fig. 5 Relationship between L_3 and f

2.2 接地极线路等值参数与故障距离之间的关系

接地极线路为双回线并联运行, 当一回因过电压发生击穿故障时, 线路电压随之降低, 因此绝大多数故障下为单回线接地, 本文主要讨论这种情况。设线路全长为 l , 单回线在距首端 x km 处发生故障, 等效电路如图 6 所示。

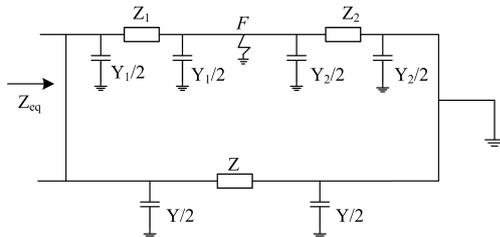


图 6 接地极线路单回故障时等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of single circuit fault of grounding electrode line

图 6 中 Z_1 、 Y_1 和 Z_2 、 Y_2 分别是故障回线的等效阻抗和等效导纳, Z 、 Y 为健全线等效阻抗和等效导纳, 各阻抗由式(10)计算。

$$\begin{cases} Z_1 = Z_C \sinh \gamma x \\ Y_1 = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cosh \gamma x - 1)}{\sinh \gamma x} \\ Z_2 = Z_C \sinh \gamma(l-x) \\ Y_2 = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cosh \gamma(l-x) - 1)}{\sinh \gamma(l-x)} \\ Z = Z_C \sinh \gamma l \\ Y = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\sinh \gamma l} \end{cases} \quad (10)$$

式中: l 为接地极线全长; $Z_C = \sqrt{z_0/y_0}$ 为线路波阻抗; $\gamma = \sqrt{z_0 y_0}$ 为线路传播系数; z_0 、 y_0 分别是线路单位长度的阻抗和导纳, $z_0 = r_0 + j\omega l_0$, $y_0 = b_0 + j\omega c_0$ 。根据式(10)不难看出: 接地极线路的等值电感既与击穿点距离有关, 也与频率有关。其与频率的关系既由于阻抗的表达式中含有 ω 这一项因子, 还因为参数本身具有频变特性。直流接地极线路参数中, 其电感随频率上升而降低, 电容基本不变^[16], 由于前文中提到忽略电阻 R_3 的变化, 因此对集肤效不作考虑。本文用式(11)对西南—华东某直流工程接地极线路电感频变特性进行拟合。

$$l_0 = a f^{-n} + m \quad (11)$$

式中, 拟合系数 $a = 77.8$; $n = -1.03$; $m = 1.81$ 。实测数据及拟合效果如图 7 所示。

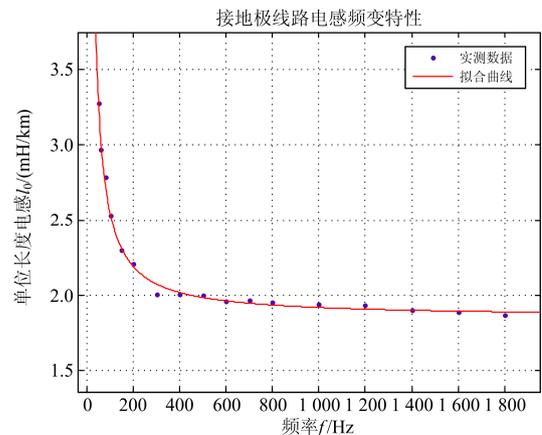


图 7 接地极线路电感频变特性

Fig. 7 Frequency characteristics of grounding line inductance

根据运行经验, 在 0~100 km 线路长度范围内的单回线击穿故障, 振荡频率变化范围约在 70 Hz 至 600 Hz 范围内。在不同频率下将击穿点距离 x

以 1 km 为步长, 从 1 km 到线路全长进行扫描, 将故障距离 x 代入等效阻抗 Z_{eq} , 得到不同故障距离下的等效电感值, 击穿点距离与接地极线路电感之间的关系如图 8 所示。

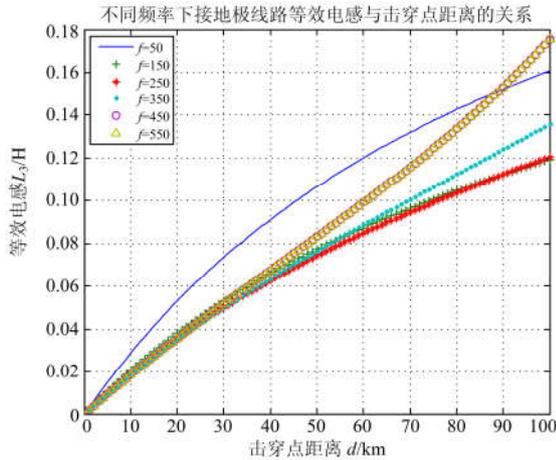


图 8 不同频率下击穿点距离与等效电感之间的关系
Fig. 8 Relation between fault distance and equivalent inductance at different frequencies

由图 8 可知: 在不同频率下接地极线路等值电感 L_3 均随故障点距离增大单调上升。

3 基于 U_{DN} 频率的接地极线路故障定位方法

由前述分析可知, 接地极线路电压振荡频率与线路电感呈单调递减的对应关系, 而在一定的频率下线路电感与故障距离呈单调递增的对应关系。因此, 求取接地线路过电压振荡频率与击穿点距离之间的关系, 就可在已知接地极线路电压振荡频率的条件下实现击穿点定位。

3.1 算法流程

直流系统发生单极故障, 首先确认接地极线路支路电流不平衡是否出现, 支路电流不平衡保护是否启动, ELIS 是否动作。如上述动作或告警信息均未出现, 表明接地极线路无异常, 否则接地极线出现故障。为进一步判定故障位置, 按以下步骤进行。

第一步: 识别 U_{DN} 波形是否存在频率突变拐点。

第二步: 提取接地极引线击穿后(拐点后)的故障电压振荡频率 f , 同时获取直流线路故障测距信息。

第三步: 利用 3.1 节求取“电感—频率”关系曲线的算法计算得到 f 对应的等值电感 L_3 。

第四步: 利用 3.2 节求取“距离—电感”关系曲线的算法, 求取 L_3 对应的故障距离 d 。

算法流程框图如图 9 所示。

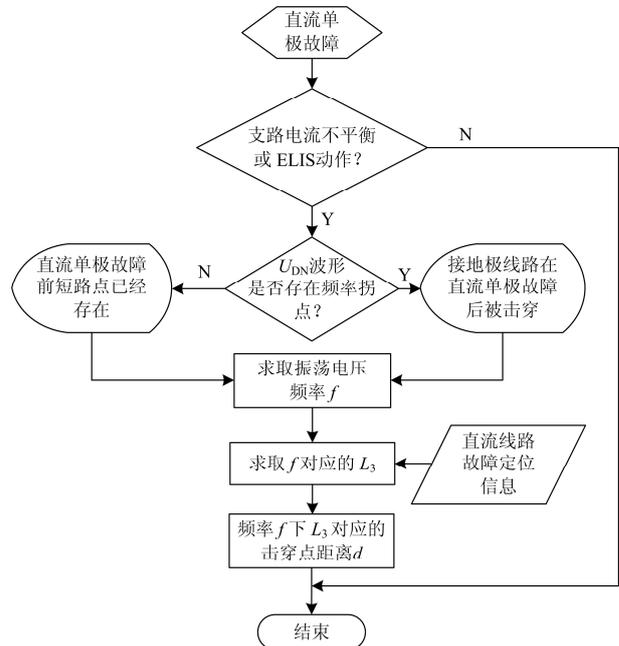


图 9 算法流程框图

Fig. 9 Flow chart of the algorithm

3.2 算例分析

2015 年夏季, 西南—华东某直流工程逆变侧极 II 800 kV 直流套管对地短路, 引发整流侧接地极线路绝缘击穿, 接地极线路支路电流出现不平衡, 中性母线电压 U_{DN} 波形如图 10 所示。

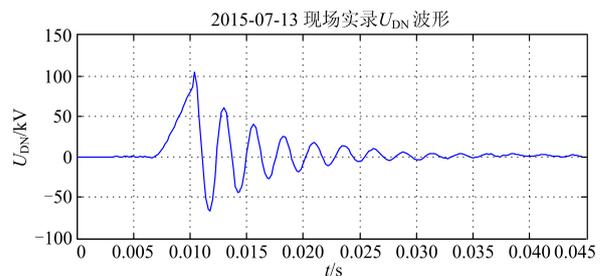


图 10 接地极线路击穿电压波形

Fig. 10 U_{DN} waveform in a unipolar fault

由图 10 可见: U_{DN} 波形在第一个半波电压上升期间出现明显的拐点, 随后频率显著升高, 提取拐点后电压振荡频率为 380 Hz, 由 3.1 节算法, 得到对应的线路电感 $L_3=0.0051$ H, 进一步由 3.2 节算法得 $f=380$ Hz 下 L_3 对应故障距离 d 的曲线, L_3 对应故障距离 d 约为 2.8 km。该事件接地极线路实际故障点为 11 号杆塔, 距离整流站 3.12 km, 与计算结果基本吻合。

2016 年春季, 同一直流工程极 II 线路中段靠近整流站位置发生故障, 直流线路再启动期间接地极线路支路电流不平衡保护同时动作, 中性极母线

电压 U_{DN} 波形如图 11 所示。

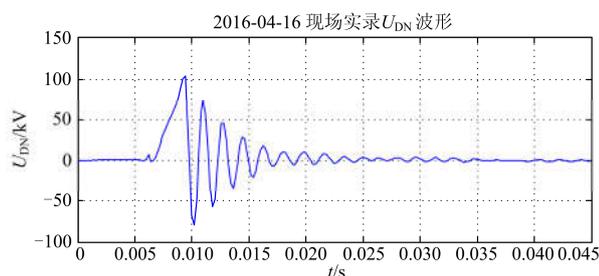


图 11 接地极线路击穿电压波形

Fig. 11 U_{DN} waveform in a unipolar fault

由图 11 可见: 该波形同样存在明显的频率拐点, 之后的振荡频率 $f=550$ Hz, 计算得 $L_3=0.0025$ H, 对应击穿点距离 $d=1.3$ km。实际放电点为 5 号杆塔, 距离整流站 1.53 km, 与计算结果基本吻合。

在该工程系统调试期间, 逆变侧进行直流线路人工短路试验的波形如图 12 所示, 该曲线波形平滑无拐点, 提取波形频率 $f=76$ Hz, 根据上述算法算得 $L_3=0.1375$ H, $d=99.5$ km, 而接地极线路全长为 101.2 km, 与计算所得“击穿点”距离基本吻合, 在线路末端即接地极址接地, 表明线路无故障。

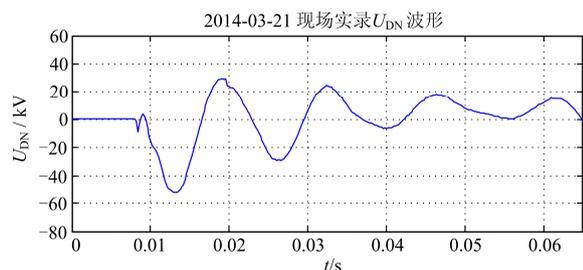


图 12 接地极线路未发生击穿的电压波形

Fig. 12 U_{DN} waveform with no fault

上述 3 个算例均验证了本文提出算法的有效性和准确度。

4 结论

直流输电单极故障后, 接地极线路电流突变, 在回路中各储能元件的共同作用下形成振荡的电压和电流。接地极线路首端电压振荡频率随接地极线路等效电感呈单调递减的一一对应关系, 而接地极线路的等效参数可以根据接地极线路故障距离进行计算, 本文在考虑接地极电感参数频变特性的基础上得到“频率—电感—距离”对应关系, 可方便准确地用于接地极线路击穿点定位。方法在直流单极故障后利用故障录波数据, 代入接地极线路实测参数, 可实现接地极线路击穿故障的辅助判别与定位

测距, 为故障后快速查找放电点提供有效帮助。

参考文献

- [1] 张鹏, 林睿, 陈立. 兴安直流系统一起双极跳闸事故分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 104-107.
ZHANG Peng, LIN Rui, CHEN Li. Analysis on a bipolar trip in Xing'an HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 104-107.
- [2] 朱韬析, 何方, 何焯勇, 等. 南方电网直流输电系统接地极线路不平衡保护动作后果探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 112-116.
ZHU Taoxi, HE Fang, HE Yeyong, et al. Discussion on operation results of electrode current unbalanced protection used in HVDC transmission system in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 112-116.
- [3] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.
LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.
- [4] 王磊. PEMO2000 接地极线监测特性分析[J]. 电力建设, 2008, 29(8): 41-43.
WANG Lei. Analysis of ground wire monitoring characteristics of PEMO2000[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(8): 41-43.
- [5] 周源. 南方电网直流输电工程两种接地极线路监视装置性能对比分析[J]. 电网技术, 2014, 38(增刊2): 68-69.
ZHOU Yuan. Function comparative analysis of two kinds of electrode line monitoring device in HVDC projection of CSG[J]. Power System Technology, 2014, 38(S2): 68-69.
- [6] 王彩芝. 直流感地极线路单端行波故障测距研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
WANG Caizhi. Research on single ended traveling wave fault location of HVDC grounding electrode lines[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014.
- [7] 蔡永梁, 张楠, 冯鹤, 等. 基于行波原理直流输电系统接地极线路故障测距系统设计[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 48-50.
CAI Yongliang, ZHANG Nan, FENG Dong, et al. Design of traveling wave based fault location system of HVDC electrode lines[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 48-50.
- [8] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双

- 端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [9] 张恽宁, 王彩芝, 李京, 等. 直流接地极线路单端行波故障测距算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 91-95.
- ZHANG Yining, WANG Caizhi, LI Jing, et al. Algorithm of fault location by single ended traveling wave on HVDC grounding electrode line[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(4): 91-95.
- [10] 程星星, 张恽宁, 王健, 等. 高压直流接地极线路故障特性仿真及其故障测距新算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 105-110.
- CHENG Xingxing, ZHANG Yining, WANG Jian, et al. HVDC grounding electrode line fault simulation and its new fault location algorithm research[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 105-110.
- [11] 张恽宁, 束洪春, 田鑫萃, 等. 特高压直流输电线路接地极线路高阻故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 1-7.
- ZHANG Yining, SHU Hongchun, TIAN Xincui, et al. Research on fault location algorithm for HVDC electrode line high impedance fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 1-7.
- [12] 束洪春, 田鑫萃, 张恽宁. 接地极线路短路故障快速识别及故障测距研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3584-3591.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Yining. Research on short circuit fault identification and fault location algorithm for HVDC electrode line[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3584-3591.
- [13] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
- PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [14] 杨光, 朱韬析, 魏丽君, 等. 直流输电系统接地极线路故障研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 45-49.
- YANG Guang, ZHU Taoxi, WEI Lijun, et al. Research on the faults of electrode line of HVDC transmission system in monopolar ground return operation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 45-49.
- [15] 李瑶佳, 汪娟娟, 李子林, 等. 考虑高压直流输电系统无功特性的低压限流参数设置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 16-23.
- LI Yaojia, WANG Juanjuan, LI Zilin, et al. VDCOL parameters setting influenced by reactive power characteristics of HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 16-23.
- [16] 刘博, 张博, 庞锴, 等. 哈密南-郑州±800 kV 特高压直流输电工程接地极线路参数测量及分析[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 14-18.
- LIU Bo, ZHANG Bo, PANG Kai, et al. Parameter measurement and analysis of the grounding line for southern Hami-Zhengzhou ±800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 14-18.

收稿日期: 2017-06-19; 修回日期: 2017-11-08

作者简介:

朱清代(1964—), 男, 工学学士, 高级工程师, 研究方向为直流输电运维技术、电力系统调度与运行; E-mail: zhuqd3853@sc.sgcc.com.cn

张纯(1985—), 男, 通信作者, 工学硕士, 工程师, 研究方向为直流输电保护与控制、换流站运检技术; E-mail: zcdamaomao@foxmail.com

石玉东(1966—), 男, 工学学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运维管理。E-mail: shiyudong@sc.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)