

DOI: 10.7667/PSPC180223

基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究

贾科, 李论, 宣振文, 李猛, 李晨曦

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 直流配电网中电力电子元件耐受故障电流能力差, 要求保护数毫秒切除故障, 因此留给故障定位所使用的数据量有限。现有基于暂态电流单端量测的定位方法受分布式电容、噪声和过渡电阻影响较大, 难以实现精确的故障定位。因此, 考虑故障发生后直流断路器快速动作, 在系统失电的情况下给系统串联一个 LC 注入装置构成衰减的振荡扰动, 利用振荡频率、衰减系数与故障距离的关系, 可以精确定位故障位置。仿真结果表明所提方法可行且具有一定的耐受过渡电阻、分布式电容、噪声和线路参数误差的能力。

关键词: 直流配电网; 故障定位; LC 注入装置

Study on fault location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection

JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, LI Meng, LI Chenxi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The power electronic component in DC distribution network can't withstand high current, which requires protection remove the fault in a few milliseconds, so the amount of data used for fault location is limited. The existing positioning method based on single ended transient current measurement can't realize accurate fault position influenced by distributed capacitance, high fault resistance and noise. Considering that the fault has occurred, DC circuit breaker breaks off quickly, in the condition of loss of power system, it is connected in series with a LC injection device to form a decaying oscillation disturbance, and the fault location can be accurately located by using the relationship between the oscillation frequency, the attenuation coefficient and the fault distance. The simulation results show that the proposed method is feasible, with a certain ability to withstand fault resistance, distributed capacitance, noise and line parameter errors.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904104), National Natural Science Foundation of China (No. 51725702 and No. 5177707151407067) and Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd. (No. 5211JY16000U).

Key words: DC distribution network; fault location; LC injection device

0 引言

直流配电系统具有线路成本低、电能损耗小^[1-2]、能源利用率高、供电可靠性高^[3-4]、供电半径及能量

大^[5]、电能质量好^[6-7]、不存在短路容量越限问题^[8-10]等特点, 受到了广泛关注。目前, 我国正在大力推进直流配电网相关项目, 其中比较有代表性的是深圳、北京柔性直流配电网示范工程^[11-13]。

直流配电网中故障电流上升速度快、稳态幅值大, 同时电力电子设备承受电流能力小, 导致保护动作时间极短(设备及保护 1 ms 内封脉冲, 系统级保护 3~5 ms 出口), 故障特征不明显, 使得传统的利用故障信息的定位方法难以精确定位故障区域。

基金项目: 国家重点研发计划基金项目资助(2018YFB0904104); 国家自然科学基金项目资助(51725702, 5177707151407067) 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(项目编号: 5211JY16000U)

柔性直流系统中故障定位方法可分为行波法、故障分析法和主动注入法。

行波法测量第一次反行波到达与第二次故障点反射的反行波到达的时间差，以实现故障测距。文献[14]利用小波测量行波到达时间，可在短时间内实现精准的故障测距。不过，行波法的精度依赖于波速的估计和波头的准确识别，易受噪声干扰，耐受过渡电阻能力有限。文献[15]提出了用于直流输电线路的行波固有频率测距法，远距离故障测距误差在 1%以内。然而柔性直流配电系统的线路较短，采样频率需要达到 300 kHz，并存在一定死区。

故障分析法通过分析故障电气量与故障距离之间的内在关系实现故障定位，原理可靠、计算量小。文献[16]通过测量已知长度电缆的电压推算故障距离，但此方法需要额外的电压传感设备。文献[17]将 R-L 模型算法用于柔性直流输电线路故障定位，不过该方法无法消除电流微分项获取过程中引起的误差。文献[18]利用 Prony 算法提取暂态电压振荡特征，进而计算出故障距离，然而此方法存在一定的死区范围。

主动注入法是通过注入装置在故障隔离后主动注入附加信号，进一步检测获取附加信号用以计算求取故障距离。该类方法不受故障暂态量的影响，具有较高的精度。文献[19-20]提出了一种通过注入限流三角波，进而量测系统高频电抗的故障定位方法，该方法在高频下可以增大线路电抗测量的区分度，应用于线路较短的配电网可以有效识别故障位置，然而其注入装置需要额外设计，且高频阻抗计算运算量较大，难以满足直流配网快速定位并隔离故障的需求。

柔直配网中换流器保护动作速度极快，有效故障信息少，并且易受分布式电容、噪声和过渡电阻的影响，难以精准定位故障位置。因此本文以双端供电的±10 kV 直流配电网为研究对象，开展了直流配电系统故障定位研究。故障发生后，位于换流站

出口的直流断路器快速动作，系统处于失电状态，之后在线路首端串联接入 LC 注入装置，线路电流呈现阻尼振荡，进而利用振荡频率、衰减系数与故障距离的关系，可以精确定位故障位置。该方法不需要借助同步设备，并且受噪声、分布式电容和过渡电阻干扰较小，在 PSCAD/EMTDC 平台上进行仿真分析，证实了该方法的准确性和可行性。

1 直流配电网的结构

本文探讨的直流配网架构借鉴目前正在建的深圳柔性直流配电示范工程，其中与高压交流输电网相连的两个换流站采用 MMC 结构，而与负荷侧相连的是两个 VSC 换流器^[21]。直流配电网电压等级低、容量小，采用成本低、控制简单、可靠性高的两电平 VSC 换流器足够满足系统运行要求，因此本文研究的直流配电网采用两电平 VSC 换流器。双端型供电的±10 kV 直流配电网的拓扑结构如图 1 所示，选取结构简单、经济性好、应用广泛的对称单极方式作为主接线方式。为了防止单极接地故障引起巨大的过电流，正极需经高电阻接地。考虑到设备造价经济性，直流配电网只在各馈线出口配置了直流断路器，而线路之间用分段开关取代了直流断路器。

作为故障隔离的关键技术之一，直流断路器在我国已经获得了巨大发展。我国自主研发的 200 kV 高压直流断路器已在舟山投运，可实现双向故障电流的快速断开，整体控制简单、可靠性高，可在 3 ms 内断开高达 15 kA 的故障电流。南瑞继保公司自主研发的世界首台 500 kV 高压直流断路器已经通过了型式试验，它可在 3 ms 内断开 25 kA 故障电流。对于低压直流断路器，同样有许多具有实际应用价值的样机，10 kV 直流断路器可在 3~5 ms 内开断 12 kA 的故障电流，380 V 直流断路器可在 3~5 ms 开断 120~160 A 的故障电流。综上，对于本文所讨论的系统，我国能够制造出满足开断能力与动作时

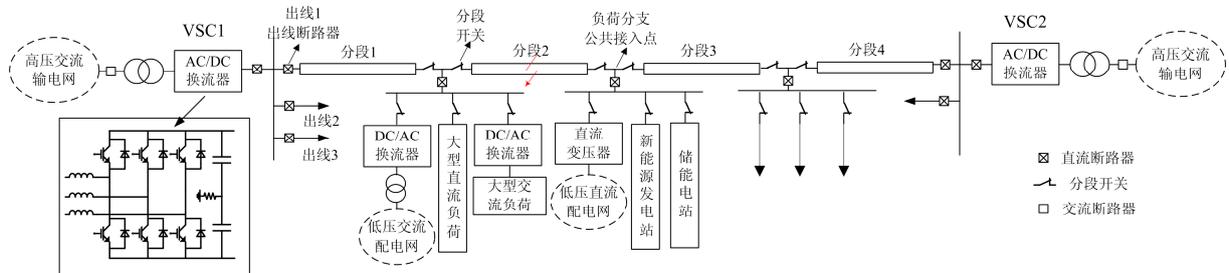


图 1 直流配电网的基本结构

Fig. 1 Basic structure of DC power distribution network

间要求的直流断路器。对于直流配网中的分段开关,根据某实际工程中分段开关的参数,参考如下:额定一次电压 11 kV,额定工作电流 1 250 A,1 min 额定短时工频耐受电压 42 kV,额定峰值耐受电流 50 kA。

故障发生后直流断路器快速动作,保护换流站设备,所提故障定位方法在直流断路器动作后启动,寻找故障点,利用分段、负荷开关隔离故障后,换流站恢复对故障线路的供电。如图 1 所示,分段 2 发生短路故障,分段 1 左侧与分段 4 右侧的直流断路器断开,此时故障线路已从系统中隔离,不会影响换流站对母线其他出线上负荷的供电。接下来利用本文所提方法定位故障点,发现故障点位于分段 2 之后,利用分段 2 左右两侧分段开关将故障点隔离。故障处理期间,可将换流站出口的断路器闭合,对非故障区段进行供电。故障处理结束后,断开分段 1 左侧与分段 4 右侧的断路器,闭合分段开关,最后再闭合断路器,完成对故障区段的供电。若换流站出口的母线仅含有一条出线,断路器断开后,该配网的负荷全部切除。此时的换流站仍可处于 STATCOM 运行方式继续运行:直流侧向交流侧提供无功功率,与交流系统联接的 VSC 各自独立运行在 STATCOM 模式,实现对交流侧的无功补偿。故障排除后,可快速恢复对故障线路的供电,保证用户的供电可靠性。然而,考虑到定位结果存在稍许误差,为了防止因误差导致隔离的区段错误,断路器合闸后再次发生故障,因此决定对定位结果保留一定的裕度。对于离分段开关在定位裕度以内的故障,可选择断开所测故障分段的上级或下级的分段开关,通过暂时扩大停电区域防止故障对电网的二次伤害。

2 故障定位的研究方法

直流配电网故障冲击电流大,为了保护电力电子器件,需要在 3~5 ms 内切断或者抑制故障电流,导致可用来定位的故障数据有限,因此基于故障数据来进行定位的难度很大。

本文提出的离线式定位方法不需要利用故障数据,而是利用了一个 LC 被动元件构成注入装置来进行故障定位。它由一个电容器 C_p , 一个电感器 L_p , 一个充电电阻 R_p , 一个直流电源 V_p 和若干个开关组成,如图 2 所示。将该装置接在断路器的下游,当故障发生后,故障线路两端的断路器断开,检测到直流线路失压后,将启动该装置进行故障测距。注入设备中的直流电源 V_p 开始给电容器 C_p 充电,为避免充电电流过大,导致电容器 C_p 损坏,应考虑

充电电流的大小以及充电时间,选取适当的电阻 R_p , 以上具体的参数在仿真分析时给出。电容器 C_p 充满电之后,断开开关 S_p , 闭合开关 S_{pf} , 此时电容器 C_p 开始对故障电路进行放电,忽略线路的对地电容,可将其等效为一个 RLC 振荡电路。

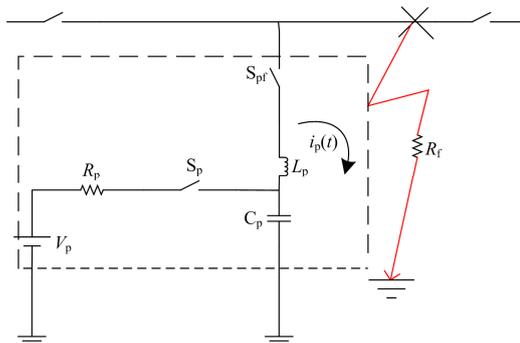


图 2 LC 注入装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of LC injection device

由于该方法的注入装置直接接入一次强电系统,最主要的是电缆接头的绝缘问题以及它对系统运行的影响。采用冷缩式电缆接入方法可以提供良好的绝缘特性,有效解决了电缆接头的绝缘问题。除此之外,其具有制作简便、防水防潮效果好、不受电缆运行时热胀冷缩影响等优点,因此本文所提装置可选用冷缩式电缆接头。由于该装置在直流断路器断开后向线路注入信号,装置本身不会影响系统正常运行,且电缆接头对系统的运行也基本无影响。另一方面,在系统正常时,定位装置的开关 S_{pf} 处于开断状态,因此系统的运行对定位装置也无影响。

对于辅助开关 S_p 、 S_{pf} 的要求具体如下:对开关 S_p 来说,它在 C_p 充电完成后开断,此时的充电电流为 0,因此不存在电流无过零点的问题,不需使用直流断路器,另外,该直流电源电压较低且电流较小,对开关耐压与耐流能力要求较低。对于开关 S_{pf} 来说,承受的电压和电流也较低,流过的电流为欠阻尼振荡电流,同样有过零点。因此对这两个辅助开关的要求不高,可选用常用的单极开关,如 ABB SH201-C63 开关,额定电流 63 A,额定电压 400 V,额定短路电流 6 kA,额定冲击耐受电压 4 kV。另外,此装置未选用电力电子设备,考虑到两点,电力电子装置耐压、通流能力差,造价高;额外的电力电子装置若与换流站并联,两者间的控制策略可能存在相互影响,增加控制的复杂度。另外,还存在利用换流站自身电力电子装置,在故障之后解开部分闭锁模块,产生新的扰动实现注入,利用注入电流来进行故障定位的方法,但会让其内部的电力电子

设备在注入过程中承受二次故障冲击电流, 一般工程难以实现, 因此该方法也不可取。

利用如图所示装置开始进行故障定位, 短时间后电容器 C_p 对故障回路放电, 由回路电压定律知:

$$U_L + U_R + U_C = 0 \quad (1)$$

式中: U_L 、 U_R 、 U_C 分别为总电感、总电阻、总电容的电压。

式(1)可以化为

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \frac{Q}{C} = 0 \quad (2)$$

式中: L 为总电感; R 为总电阻; Q 为总电容两端的电荷量; C 为总电容。若 R_d 和 L_d 是故障线路的电阻和电感, R_f 是过渡电阻, 那么总电阻 R 就是电阻 R_d 和 R_f 之和, 总电感 L 是电感 L_d 和 L_p 之和, 线路的对地电容与 C_p 相比很小(具体在仿真结果中进行分析), 可以忽略不计, 因此, 故障线路的总电容 C 就是 C_p 。式(2)对 t 求导, 得到注入电流的数学模型满足式(3)。

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{Rdi}{Ldt} = \frac{1}{LC}i = 0 \quad (3)$$

实际情况中, 可以通过调整 C_p 和 L_p 的大小使

得 $\frac{R^2}{L^2} - \frac{4}{LC} < 0$, 即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 此为欠阻尼情况,

电流 $i_p(t)$ 应该为衰减振荡。电流方程可以写为

$$i_p(t) = K_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t) + K_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) \quad (4)$$

式中: ω_d 和 α 分别是阻尼振荡频率和注入电流的衰减常数; K_1 、 K_2 可由初始条件得到。该 RLC 电路无驱动电压源为零输入响应, 可以求得: $K_1=0$,

$$i_p(t) = K e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t), \quad K = \frac{V_p}{\omega_d L}。$$

图 3 所示为欠阻尼振荡电流波形图。利用测量装置测出时间 t 与电流 $i_p(t)$, 再利用时间 t 与电流 $i_p(t)$ 求解 K 、 α 和 ω_d , 这是一个非线性最小二乘拟合问

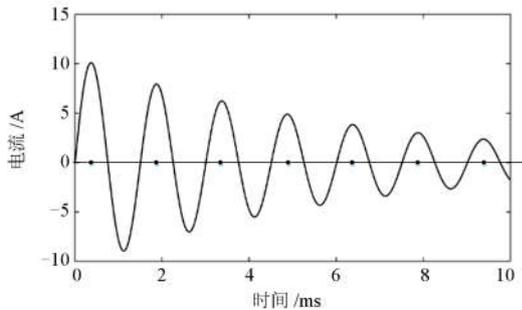


图 3 欠阻尼振荡电流波形

Fig. 3 Current waveform of under-damped oscillation

题, 即求解 K 、 α 和 ω_d , 能够使 $\sum_{i=1}^n (K e^{-\alpha t_i} \sin(\omega_d t_i) -$

$i_p(t_i))^2$ 最小。求出 K 、 α 和 ω_d 后, 根据固有频率 ω_n

与 ω_d , α 的关系以及 ω_n 与距离 d 的关系可得

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \omega_d^2 + \alpha^2 \\ \omega_n = \frac{1}{\sqrt{(L_p + L_u d) C_p}} \end{cases} \quad (5)$$

求解式(5), 可得到故障距离 d 为

$$d = \frac{1 - L_p(\omega_d^2 + \alpha^2) C_p}{L_u(\omega_d^2 + \alpha^2) C_p} \quad (6)$$

其中, 注入电容 C_p 、注入电感 L_p 以及线路单位长度的电感 L_u 已知, 衰减系数 α 与阻尼振荡频率 ω_d 已经求得, 因此可根据式(6)求出故障距离 d 。

综上所述, 该方法的关键是在装置接入配电网后能够产生欠阻尼振荡的注入电流。配电网的最大送电半径、线路最大长度相对固定, 选取适当的注入电容和注入电感, 能够达到上述要求。产生欠阻尼振荡电流需要满足式(7)。

$$R_f + R_u d < 2 \sqrt{\frac{L_p + L_u d}{C_p}} \quad (7)$$

式中: R_f 是过渡电阻; L_p 是注入电感; C_p 是注入电容; L_u 是线路单位长度的电感; R_u 是线路单位长度的电感; d 是故障距离。各个参数在同一国际单位制下, 不等式的左式数值越大, 右式数值越小, 式(7)越难成立。先考虑不等式的左式数值大小, 对于直流配电网而言, 其线路较短, 一般不长于 20 km, 总电阻为几欧姆, 则 $R_u d$ 会很小, 一般不超过 4 Ω 。在不考虑高阻故障的情况下(配网中有专门针对高阻故障的选线和定位研究), 不等式的左式不会太大, 如 R_f 小于 16 Ω , 则 $R_f + R_u d$ 一般小于 20 Ω 。接下来考虑右式的数值大小, $L_u d$ 的存在会使右式更大, 不等式更容易成立。考虑极端情况(线路首端故障), 此时忽略 $L_u d$, L_p 在数值上是 C_p 的几十倍至数百倍也容易实现, 若为 100 倍, 此时的右式为 20 Ω , 也满足式(7), 而非首端故障时, $L_u d$ 的存在使得不等式必然成立。另外, 为了让 $L_u d$ 能够有效促进不等式的成立, 可让 L_p 和 $L_u d$ 处于同一数量级上, 因此在设计 L_p 的值时可以参照线路参数, 将其设计为数公里的线路电感, 较容易实现。再根据 L_p 的值, 取数百分之一作为 C_p 的值, 同样也易实现。该设计方案较多, 按仿真设定的参数, 也能满足大部分故障情况。所以该方法在原理上是完全可行的, 且面

对直流配电网故障有一定的普适性。

分布式电容、噪声以及过渡电阻等都是影响故障定位的不利因素。仿真验证时将该三个因素都考虑在内, 并根据 IEC60502 标准电缆的信息, 合理设置了仿真线路的单位长度电阻、电感以及分布式电容等参数, 具体参数仿真中给出。

3 仿真验证与分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立图 1 所示的 ± 10 kV 直流配电网仿真模型。VSC1 定直流电压控制, VSC2 定有功功率控制, 其故障闭锁策略为电流幅值大于 1.5 倍额定电流则闭锁换流器; 换流器额定容量均为 7 MVA, 额定电流 350 A, 交流换流电抗器 10 mH, 直流并联电容器 100 μ F, 电容中性点接地电阻 2 500 Ω ; 互联的交流系统短路容量 350 MVA; 直流负荷 3 MW 通过直流变压器接入, 交流负荷 4 MVA 通过两电平 VSC 接入; 四段直流电缆线路长度均为 4 km, 总长度 l 为 16 km, 其电缆参数: 电阻 0.121 Ω /km, 电感 0.97 mH/km, 分布式电容 0.350 μ F/km。短路故障发生后, 线路两端直流断路器断开, 将注入装置接入故障线路首端, 其各参数: 注入电容 27 μ F, 注入电感 657 μ H, 注入电源 100 V, 充电电阻 1 k Ω , 此时充电电流不超过 0.1 A, 充电时间大约需要 0.3~0.4 s。由于注入电流衰减速度快, 因此该方法对于采样频率有一定的要求, 仿真中采样率设为 20 kHz, 能满足故障定位精度要求。在城市直流配网中, 考虑电缆供电, 其故障主要以金属性和小过渡电阻短路为主, 仿真中取过渡电阻 0~16 Ω 。接下来以单极短路故障为例, 验证该故障定位的准确性。

3.1 不考虑分布电容的故障定位

系统发生单极短路故障, 若不考虑分布式电容, 注入电流波形为光滑的衰减振荡波形。以故障距离 $d=8$ km、过渡电阻 $R_f=4$ Ω 为例, 得到测量电流数据后, 进行非线性最小二乘拟合, 可以求得衰减系数 $\alpha=299.2$, 阻尼振荡频率 $\omega_d=2 089.7$ rad/s, 测量电流波形与拟合后的电流波形如图 4 所示。

利用式(6), 可以计算得到估计距离 $d'=7.890$ km, 误差百分比 $\varepsilon=(d'-d)/l \times 100\%=0.685\%$, 满足故障定位精度要求。本文验证了更多情况, 将不同过渡电阻和故障距离的短路情况进行汇总如表 1 所示, 其中最上面一栏为过渡电阻, 最左边一栏为故障距离。由于过渡电阻的增加, 故障定位误差也会有所增大, 但是仍然保持在一定的范围内。

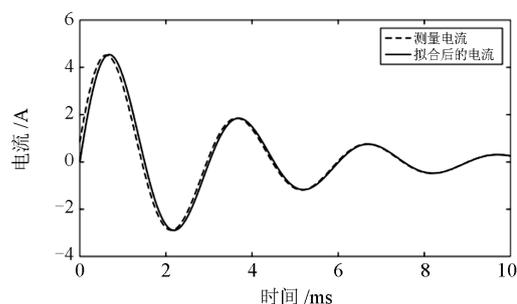


图 4 测量电流波形与拟合电流波形

Fig. 4 Measuring current waveform and fitting current waveform

表 1 各种短路情况下的误差百分比(%)汇总

Table 1 Error percentage of various short circuit conditions (%)

故障情况	0 Ω	4 Ω	8 Ω	12 Ω	16 Ω
2 km	0.058	0.543	1.073	1.528	1.906
4 km	0.019	0.598	1.175	1.710	2.201
6 km	0.019	0.643	1.238	1.805	2.342
8 km	0.058	0.685	1.291	1.874	2.435
10 km	0.097	0.726	1.338	1.932	2.508
12 km	0.136	0.766	1.383	1.984	2.570
14 km	0.175	0.806	1.426	2.032	2.625
16 km	0.214	0.846	1.468	2.078	2.677

对于不同距离、不同过渡电阻的故障, 该算法具有较高的定位精准度, 并且具有一定的抗过渡电阻能力。接下来考虑分布式电容对故障定位产生的影响。

3.2 考虑分布式电容的故障定位

实际电路中有分布式电容, 仿真中简化为 π 型等效电路, 电容为 0.350 μ F/km, 因此注入电流的图像不再是一条光滑的曲线, 大致图像如图 5 所示, 此时仍然可以利用非线性最小二乘拟合方法将图 5 拟合为一个光滑的衰减振荡波形。

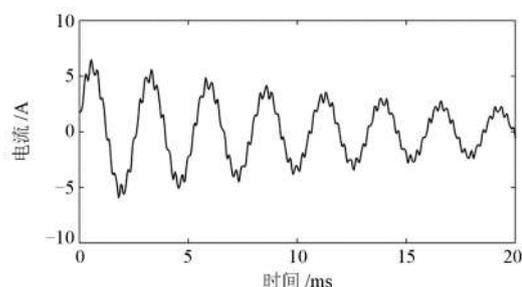


图 5 考虑分布电容的电流波形

Fig. 5 Current waveform considering distributed capacitance

以故障距离注入点 $d=10$ km、过渡电阻 $R_f=2$ Ω 为例, 得到的测量电流波形与拟合后的波形如图 6 所示。

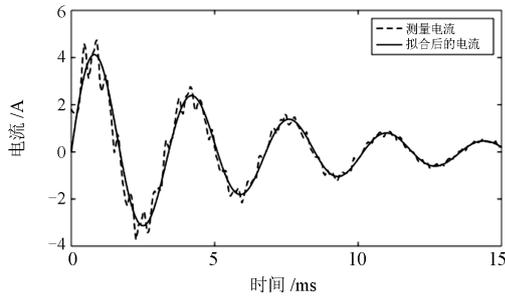


图 6 故障距离 10 km、过渡电阻 2 Ω 时测量电流波形与拟合电流波形

Fig. 6 Measuring current waveform and fitting current waveform when the fault distance is 10 km and the transition resistance is 2 Ω

利用非线性最小二乘拟合求得衰减系数 $\alpha=161.1$, 阻尼振荡频率 $\omega_d=1\ 850.8\ \text{rad/s}$, 利用式(6)计算时, 由于对地电容相比电容 C_p 很小, 依然按照电容 C_p 的大小进行计算, 得到估计距离 $d'=10.385\ \text{km}$, 误差百分比 $\varepsilon=2.407\%$, 满足故障定位精度要求。

本文将不同过渡电阻和故障距离的短路情况进行汇总如表 2 所示。从仿真结果可以发现分布式电容的存在对于故障定位精度有一定的影响, 但是在加入曲线拟合修正算法后, 该方法仍然具有较高的精确度, 并且在有一定的过渡电阻接地的情况下, 误差反而有所降低。

表 2 考虑分布式电容情况下的误差百分比(%)

Table 2 Error percentage considering distributed capacitance (%)

故障情况	0 Ω	4 Ω	8 Ω	12 Ω	16 Ω
2 km	0.209	0.453	1.127	1.798	2.458
4 km	0.539	0.206	1.092	2.111	3.271
6 km	1.087	0.262	0.818	2.161	3.788
8 km	1.854	0.948	0.331	2.001	4.107
10 km	2.936	1.849	0.363	1.646	4.254
12 km	3.408	2.296	1.264	1.101	4.237
14 km	4.477	3.299	2.371	0.368	4.061
16 km	5.129	4.849	3.684	0.551	3.729

3.3 考虑噪声情况时的故障定位

为了单纯考虑噪声的影响, 此时将忽略分布式电容。噪声的存在同样会使电流的波形不再是光滑的衰减振荡, 在电流数据中加入信噪比(SNR)为 20 dB 的高斯白噪声, 故障距离为 4 km、过渡电阻为 0.5 Ω 时的电流波形如图 7 所示。

根据图 7 求得故障距离为 4.054 km, 误差百分比为 0.339%, 定位结果非常精确。

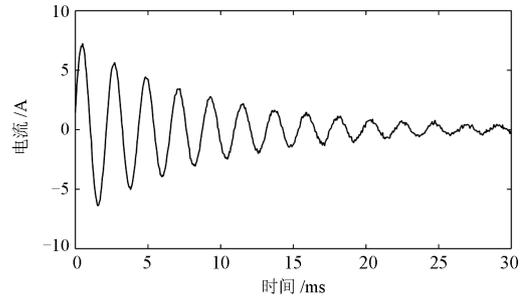


图 7 噪声情况的电流波形

Fig. 7 Current waveform with noise

当故障距离为 4 km, 过渡电阻为 0.5 Ω 时, 误差百分比与信噪比(SNR)的关系如图 8 所示。

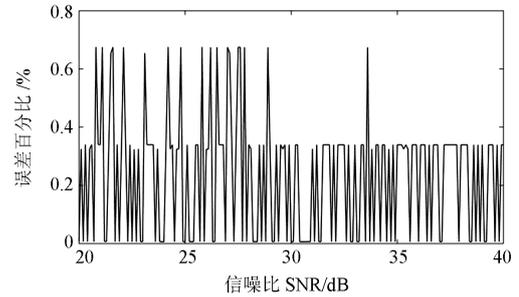


图 8 误差百分比与信噪比的关系

Fig. 8 Relationship between error percentage and signal to noise ratio

由于高斯噪声是随机产生的, 所以并不一定是信噪比越小, 带来的误差越大, 但可以看出, 在有噪声的情况下, 利用该算法来处理数据所带来的误差总体上都很小。本文论证了更多的情况, 发现噪声所带来的误差很小, 验证了该方法的抗噪声能力。

3.4 同时考虑噪声和分布式电容影响时的故障定位

考虑分布式电容的同时, 在测量电流加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声, 故障距离为 4 km、过渡电阻为 8 Ω 时的电流波形如图 9 所示。

计算出故障距离为 3.842 km, 误差为 0.988%。

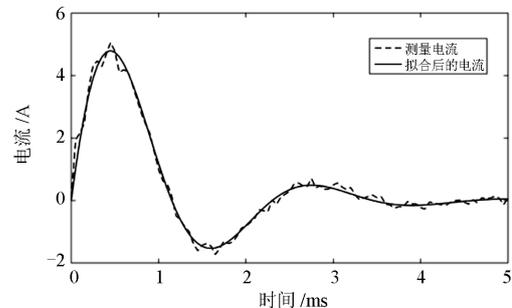


图 9 测量电流波形与拟合电流波形

Fig. 9 Measuring current waveform and fitting current waveform

由于所加高斯白噪声的随机性, 所以误差结果不固定, 但起伏并不大。各种情况下的误差如表 3 所示, 可以发现即使同时考虑分布式电容与噪声的影响, 该定位方法依旧具有较好的准确性。

表 3 考虑分布式电容与噪声情况下的误差百分比(%)

故障情况	0 Ω	4 Ω	8 Ω	12 Ω	16 Ω
2 km	0.209	0.424	1.084	2.068	2.361
4 km	0.542	0.245	0.988	1.863	2.697
6 km	1.079	0.297	0.904	2.276	4.551
8 km	1.324	2.353	1.492	0.137	3.637
10 km	2.803	1.847	1.923	1.87	3.844
12 km	4.035	2.757	1.556	1.326	5.374
14 km	5.466	4.454	2.271	0.92	5.448
16 km	6.341	5.777	1.191	4.94	6.878

由仿真结果可以看出, 即使同时考虑分布式电容与噪声的影响, 该定位方法依旧具有较好的准确性。

3.5 线路参数误差的影响

线路参数受运行时间、气候、测量精度等因素的影响, 实际值可能与计算所用值有所偏差。为了考虑线路参数误差的影响且保证参数误差的随机性, 本文采用蒙特卡洛方法随机设置线路参数的偏差, 使得每次仿真的线路电阻、电感参数分别服从计算所用值 0.9~1.1 倍间的均匀分布, 来探讨线路参数准确性对定位结果的影响。每个故障点仿真 5 次, 最后求其误差平均值, 仿真结果统计如表 4 所示, 可见线路参数的准确性对定位结果有一定影响, 但在可接受的范围之内。

表 4 考虑线路参数误差的误差百分比(%)

故障情况	0 Ω	4 Ω	8 Ω	12 Ω	16 Ω
2 km	0.328	0.539	0.117	1.414	1.930
4 km	0.809	0.469	0.402	0.882	1.705
6 km	1.594	2.398	1.882	1.923	1.919
8 km	1.568	1.789	2.282	2.374	3.182
10 km	2.919	2.232	2.991	3.026	4.828
12 km	4.895	4.972	3.425	3.983	5.423
14 km	6.103	6.562	5.311	4.342	5.816
16 km	6.563	6.163	5.446	6.188	6.562

此外, 对于双极短路故障, 所用定位方法同样适用。只需要将注入装置连接在双极之间, 使得双极连通成为一个回路。本方法计算出来的故障距离的 1/2 即为双极短路故障的故障距离。

4 结论

由于柔性直流配网保护动作速度快, 故障信息少, 本文以双端型供电的 ± 10 kV 直流配电网为研究对象, 提出了一种利用注入 LC 装置的离线式故障定位方法。利用该方法得到所需电流数据后, 将数据进行拟合得到理想的波形, 并求出拟合电流的振荡频率与衰减系数, 通过振荡频率、衰减系数与故障距离的关系, 可以精确定位故障位置。该方法不需要借助通信或同步设备就能够实现精准的定位, 并且具有一定的耐受过渡电阻、分布式电容、噪声和线路参数误差的能力, 为未来直流配网故障定位的研究与现场应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [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] 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. Fault analysis and current limiting method of flexible DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [4] 徐铭铭, 王鹏, 高明春. 基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 103-109.
XU Mingming, WANG Peng, GAO Mingchun. A fault location algorithm for the single-pole-to-ground fault of DC distribution network based on power flow calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 103-109.
- [5] 薛士敏, 陈超超. 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 Chaochao. Review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [6] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电网电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170.
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [7] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 直流电缆线路电流突变量极性纵联保护适用性研究[J]. 电力系

- 统保护与控制, 2013, 41(5): 10-16.
- CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. Research on the applicability of VSC HVDC transmission line surge current surge protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 10-16.
- [8] 丁明, 田龙刚, 潘浩. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [9] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.
- XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [10] ZHANG Y, TAI N, XU B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [11] 李智诚. 直流配电网故障分析及保护配置研究[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(2): 62-65.
- LI Zhicheng. Research on fault analysis and protection configuration of DC distribution network[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(2): 62-65.
- [12] JAE-DO P, CANDELARIA J, MA L, et al. DC ring-bus micro-grid fault protection and identification of fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2574-2584.
- [13] 胡竟竟, 徐习东, 裘鹏, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 844-851.
- HU Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. Review of protection technology for DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851.
- [14] FLETCHER S D A, NORMAN P J, GALLOWAY S J, et al. Optimizing the roles of unit and non-unit protection methods within DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2079-2087.
- [15] HE Z Y, LIAO K, LI X P, et al. Natural frequency-based line fault location in HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 851-859.
- [16] YANG J, FLETCHER J E. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection scheme design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2318.
- [17] 宋国兵, 李德坤, 褚旭, 等. 基于参数识别原理的VSC-HVDC输电线路单端故障定位[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 94-99.
- SONG Guobing, LI Dekun, CHU Xu, et al. Single terminal fault location for VSC-HVDC transmission lines based on parameter identification theory[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 94-99.
- [18] JIA K, MENG L, BI T S, et al. A voltage resonance-based single-ended online fault location algorithm for DC distribution networks[J]. Science China Technological Sciences, 2016(5): 1-9.
- [19] CHRISTOPHER E, SUMNER M, THOMAS D W P, et al. Fault location in a zonal DC marine power system using active impedance estimation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 49(2): 3050-3054.
- [20] JIA K, CHRISTOPHER E, THOMAS D, et al. Advanced DC zonal marine power system protection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 301-309.
- [21] 刘国伟, 赵彪, 赵宇明, 等. 中压柔性直流配电技术在深圳电网的应用框架[J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 1-10.
- LIU Guowei, ZHAO Biao, ZHAO Yuming, et al. Application framework of medium voltage flexible DC distribution technology in Shenzhen power grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 1-10.

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-05-30

作者简介:

贾科(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网故障定位与系统自我恢复。E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn

(编辑 姜新丽)