

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200760

基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法

赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 陈淼, 毕天姝

(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: 高压柔性直流输电采用架空线路, 运行环境复杂, 难以避免故障。快速准确的故障定位可以缩短故障清除时间, 对于快速恢复供电十分重要。现有测距算法依赖暂态波头辨识, 受到干扰后测距精度会下降。针对上述问题, 在线路分布参数模型基础上, 在时域中通过电报方程计算线路沿线分布的电压和电流, 进而根据故障点处电阻值相对稳定这一特性构成测距判据。由于输电线路两侧的直流断路器重合时间并不一致, 此时先重合一侧的系统才会继续向故障点馈入短路电流, 因此通过单端量便可实现测距。所提测距方法无需通信, 适用于各种故障类型并且所需窗长较短, 具有耐受过渡电阻和噪声的能力。最后利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建 ± 500 kV 多端柔性直流输电系统模型, 仿真结果验证了所提测距算法的准确性和适用性。

关键词: 直流输电线路; 故障测距; 直流断路器; 分布参数模型; 重合闸

A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing

ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, CHEN Miao, BI Tianshu

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

Abstract: High voltage flexible DC transmission uses the overhead line. This makes it difficult to avoid faults in a complex environment. Fast and accurate fault location can shorten the time of fault clearing, something which is very important for fast power supply recovery. The existing ranging algorithms rely on transient wave head identification, and the ranging accuracy will decrease when disturbed. Based on a distribution parameter model, this paper calculates the voltage and current along the line through the telegraph equation in the time domain, and then forms the ranging criterion according to the feature that the resistance value at the fault point is relatively stable. Since the coincidence time of DC circuit breakers on both sides of the transmission line is not consistent, the system on the overlapping side will continue to feed the short-circuit current to the fault point. Therefore, ranging can be realized through a single terminal. The proposed ranging method requires no communication, which is suitable for various fault types and requires short window length, and can withstand transition resistance and noise. Finally, a four-terminal HVDC ± 500 kV model is built in PSCAD/EMTDC simulation software and the simulation results verify the accuracy and applicability of the proposed ranging algorithm.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904100) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGHB0000KXJS1800685).

Key words: direct current transmission lines; fault location; DC circuit breaker; distributed parameter model; reclosing

0 引言

高压柔性直流输电采用架空线路, 由于其运行环境较为复杂, 线路故障难以避免^[1-2]。而快速准确的故障定位可以有效缩短故障清除时间, 对于保证

系统安全、快速恢复供电十分重要。

目前直流输电线路故障测距的方法根据其原理的不同主要可分为行波法^[3-13]和故障分析法^[14-21]。行波法通过行波到达的时间信息来实现故障测距, 近年来的研究主要围绕如何有效识别行波波头展开, 其中导数法、小波变换法和 Hilbert-Huang 变换法等数学方法均应用于故障行波波头的提取中^[9-13], 然而依赖波头辨识的方法其波头能量大小易受故障

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904100);
国家电网公司科技项目(SGHB0000KXJS1800685)

电阻影响, 导致量测精度下降。

故障分析法是根据量测的电压、电流和系统有关参数, 通过分析计算来实现故障测距。根据其所采用的电气量的不同可分为双端量测距算法^[14-17]和单端量测距算法^[18-21]。文献[14-15]考虑线路分布参数特性提出了通过计算沿线电压分布的双端测距算法, 所需数据窗短并且对采样率要求不高。在此基础上文献[16]基于多阶无穷小的分布参数模型, 通过粒子群算法对测距判据进行了优化, 抗噪声能力较强。然而双端测距法往往需要较为严格的同步数据通信, 远距离场景下的通信延迟、干扰等问题会对测距结果产生影响。

相较而言单端量测距算法无需通信, 避免了这方面的问题^[17]。文献[18]基于输电线路的 R-L 模型, 通过参数识别原理来实现单端量的故障测距, 其不受过渡电阻的影响, 但未考虑线路的分布参数特性; 文献[19-20]则基于输电线路分布参数模型, 给出了用于交流、直流输电线路的时域单端故障测距方法, 其所需数据窗短、对采样率要求较低, 但所提算法适用场景比较有限。在此基础上文献[21]基于线路的固有频率与故障距离及波速的关系, 通过对单端电流进行频谱分析实现测距, 但存在干扰信号时会导致测距精度下降。

针对上述问题, 本文提出了一种基于直流输电线路分布参数模型的单端故障测距方法。首先通过电报方程计算线路沿线电气量的分布, 之后根据故障点处存在过渡电阻, 该点处电压电流之比相当于接地电阻, 其值相对稳定, 通过判断所得电阻值的稳定性进行测距。由于两端直流断路器重合时间并不一致, 先重合一侧的系统才会继续向故障点馈入短路电流, 此时故障电流只由一侧系统提供, 因此只需选取重合闸后单端的暂态量便可完成测距。所提测距方法无需通信, 适用于各种故障类型并且能够耐受过渡电阻和噪声。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建 ±500 kV 多端柔性直流输电系统模型, 仿真结果验证了所提测距算法的准确性和适用性。

1 直流输电线路电气量的计算

目前高压大容量的柔性直流电网多采用架空线的“半桥子模块结构+高压直流断路器”的拓扑结构, 通过直流断路器来快速切断故障电流; 并且考虑到架空线运行环境复杂、容易发生故障且多为瞬时性故障的情况, 故障后为保证系统能快速恢复供电, 需要考虑故障线路的重启流程, 在经过一段

时间的故障去游离后便会进行重合闸操作^[22-25]。因此本文以图 1 所示的多端柔性直流输电系统作为研究对象, 直流断路器(DCCB)配置在输电线路的两端以快速隔离并清除故障, 故障后断路器跳开, 待一定时间的故障去游离后便进行重合。对于长距离具有分布参数特性的直流输电线路, 电报方程求解其沿线电气量的分布较为准确, 并且电报方程考虑了线路各参数对于电气量的影响, 因此在各种故障场景和干扰下仍能进行求解, 具有较好的准确性和适用性。

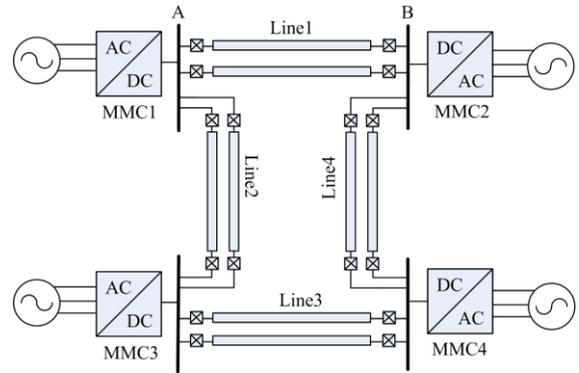


图 1 柔性直流输电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flexible DC transmission system

本文的直流输电线路采用的是贝瑞隆模型, 可以准确反映长距离输电线的分布参数特性, 并且由于单位电容较小, 线路的电阻远小于其特征阻抗, 此时该模型精度较高, 等效电路如图 2 所示。

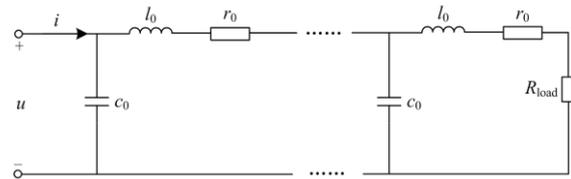


图 2 贝瑞隆线路模型等效图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of Bergeron model

在贝瑞隆模型下, 通过电报方程可以求解线路沿线电压和电流的分布。为方便计算, 首先需要构造如下解耦矩阵^[26]对电压电流进行相模变换:

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}^{-1} = \mathbf{S}^T \end{cases} \quad (1)$$

以线路 Line1 为例, 通过其 A 端量测的电压、电流, 经过相模变换可算出线路沿线分布的模电压及模电流, 表达式如式(2)和式(3)^[27]。其中: $i_{kA}(t)$ 和 $u_{kA}(t)$ 分别为 t 时刻 A 端的 k 模电流和电压; $i_{Ak}(x,t)$ 和 $u_{Ak}(x,t)$ 分别为 t 时刻距离 A 端 x 处的 k

模电流和电压； r_k 为 k 模下的电阻； Z_{ck} 为 k 模下的波阻抗； v_k 为 k 模下的波速度， k 为模量标号，可

取1或者0。

$$u_{Ak}(x,t) = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{ck} + r_k x/4}{Z_{ck}} \right)^2 \left[u_{kA} \left(t + \frac{x}{v_k} \right) - i_{kA} \left(t + \frac{x}{v_k} \right) \times \left(Z_{ck} + \frac{r_k x}{4} \right) \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{ck} - r_k x/4}{Z_{ck}} \right)^2 \left[u_{kA} \left(t - \frac{x}{v_k} \right) - i_{kA} \left(t - \frac{x}{v_k} \right) \times \left(Z_{ck} - \frac{r_k x}{4} \right) \right] - \left(\frac{r_k x/4}{Z_{ck}} \right)^2 \times u_{kA}(t) - \frac{r_k x}{4} \left(\frac{Z_{ck} - r_k x/4}{Z_{ck}} \right) \left(\frac{Z_{ck} + r_k x/4}{Z_{ck}} \right) i_{kA}(t) \quad (2)$$

$$i_{Ak}(x,t) = \frac{1}{2Z_{ck}} \left(\frac{Z_{ck} + r_k x/4}{Z_{ck}} \right) \left[u_{kA} \left(t + \frac{x}{v_k} \right) - i_{kA} \left(t + \frac{x}{v_k} \right) \times \left(Z_{ck} + \frac{r_k x}{4} \right) \right] - \frac{1}{2Z_{ck}} \left(\frac{Z_{ck} - r_k x/4}{Z_{ck}} \right) \left[u_{kA} \left(t - \frac{x}{v_k} \right) + i_{kA} \left(t - \frac{x}{v_k} \right) \times \left(Z_{ck} - \frac{r_k x}{4} \right) \right] - \frac{1}{2Z_{ck}} \frac{r_k x}{2Z_{ck}} \left[u_{kA} \left(t - \frac{x}{v_k} \right) - \frac{r_k x}{4} i_{kA}(t) \right] \quad (3)$$

通过上式可以计算出线路沿线分布的模电压和模电流，之后通过相模反变换矩阵便可以得到线路各点的正负极电压和正负极电流。

多端柔性直流输电系统发生永久性单极接地故障后，以线路Line1为例，故障等效图如图3所示。

2 故障测距方法

由于瞬时性故障经过一段时间后会自行消除，因此投入重合闸后由于故障已经消失，线路便可以快速恢复供电，对其进行测距的意义不大；而永久性故障下由于故障点一直存在，直流断路器重合后也需要再次快速断开，因此为缩短故障的清除时间有必要对其进行快速准确的故障定位；所以本文主要针对的是永久性故障下的测距。

2.1 故障测距原理

故障发生后故障点会产生电弧，然而其多伴随着瞬时性故障的出现而变化，对于永久性故障而言当断路器跳开后其过渡电阻一般为接近实际值的稳定电阻^[28]，因而永久性故障下可认为故障点处为纯阻性的稳定电阻；所以故障点处电压和电流的比值呈现电阻性质，其值相对稳定。而非故障点则并不呈现电阻性质，因此考虑利用该特征进行测距，通过对其计算所得的电阻值进行判断，阻值较为稳定的点即为故障位置。

考虑到故障后线路两侧的换流器都会向故障点馈入短路电流，因此故障电流由两部分组成，使用单端的电气量信息无法准确计算出故障电流的大小；而在故障后经过一段故障去游离时间，往往只先重合线路一端的直流断路器以识别故障性质，此时如果是永久性故障则系统会通过已经重合的断路器继续向故障点馈入短路电流，此时的故障电流只由单端电源提供，通过单端量便可以进行准确计算。因此本文根据先进行重合的线路一端的直流断路器所量测到的电压电流暂态信息进行计算，得到的电阻值较为稳定的地方即为故障位置。

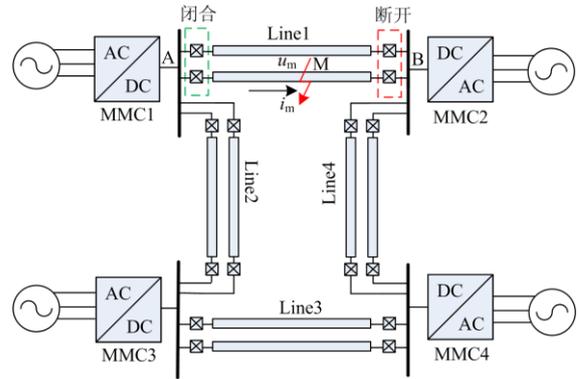


图3 多端系统单极接地故障简图

Fig. 3 Fault diagram of pole-to-ground fault

以Line1中点M处发生故障为例，保护检测到故障后发出命令直流断路器便开始动作，待故障去游离后直流断路器开始重合。假设 u_m 和 i_m 分别是故障点处计算得到的电压和电流， R_m 是故障点的对地电阻。由于两侧断路器的重合时间不一致，当A侧直流断路器重合时，B侧仍然保持断开状态，所以此时只有A侧系统继续向故障点馈入短路电流，因此使用A端直流断路器重合闸时量测的电气暂态量可以准确地计算出此时沿线分布的电压和电流，而在故障点处电阻值计算公式如式(4)所示。

$$R_m = u_m / i_m \quad (4)$$

由于故障点存在稳定的接地电阻，因此在故障点处计算得到的电阻值相对线路其他位置而言更为稳定，依据该性质便可进行测距。如若发生永久性双极短路故障，同样以线路Line1为例，示意图如图4所示。

仍以Line1中点M处发生故障为例，假设 u_{m1} 和 u_{m2} 分别为故障点处正极和负极电压， i_m 则是故障点处的电流。同样由于两侧直流断路器的重合时间并

不一致, 当A侧直流断路器重合时, B侧仍然保持断开状态, 此时故障电流只由A侧系统馈入, 因此通过单端量便可以计算出线路沿线分布的电流量, 此时在故障点处可得:

$$R_m = (u_{m1} - u_{m2}) / i_m \quad (5)$$

双极短路故障情况下两极间的过渡电阻同样较为稳定, 因此在故障点处计算得到的电阻值稳定性最好, 仍可根据该性质进行测距。

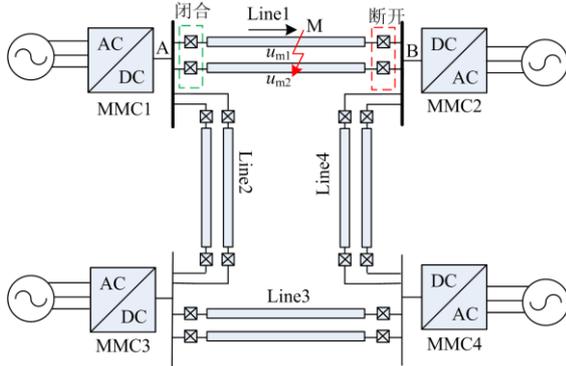


图4 多端系统双极短路故障简图

Fig. 4 Fault diagram of pole-to-pole fault

综上所述, 相较于传统的基于波动方程的使用故障时刻信息的双端测距方法, 本文所提测距原理的改进之处在于通过直流断路器重合闸暂态量来进行计算, 有效规避了对端电源对故障支路的电流助增问题, 从而能够使用单端量进行测距, 避免了双端量测距时存在的通信延迟等问题对测距精度的影响; 并且所提测距方法本质上可以把任何场景下的测距问题都转化为单端电源供电的单端故障测距问题, 因此适用场景也较为广泛。

2.2 故障测距判据函数

由以上可知, 通过对电阻值稳定性的判断便可完成测距, 那么如何衡量电阻值的稳定性便非常重要。在数学领域, 标准差是对一组数据平均值分散程度的一种度量, 可以反映该组数据中的各个数值和其平均值之间的差异, 因此可以通过一组样本中电阻值标准差的大小对其稳定性进行衡量, 标准差较小, 则数据的稳定性越高。

假设一个时间窗长内测得 n 个数据, 则标准差的计算公式为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \left[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + L + (x_n - \bar{x})^2 \right]} \quad (6)$$

式中: S 为标准差; x_1, x_2, \dots, x_n 为测得的 n 个数据, \bar{x} 为 n 个数据的平均值。

根据上述分析可知故障点处电阻值的稳定性最高, 那么故障测距函数便可表示为

$$f(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \left\{ \left[R_1(x_k) - \overline{R(x_k)} \right]^2 + L + \left[R_n(x_k) - \overline{R(x_k)} \right]^2 \right\}} \quad (7)$$

式中: $R_1(x_k), \dots, R_n(x_k)$ 为一个窗长内距离 A 端 x_k 处所计算出的 n 个电阻值; $\overline{R(x_k)}$ 为所求得的 n 个电阻值的平均值。

计算过程中考虑到电报方程求解时相模变换后 1 模分量和 0 模分量传输速度的差异, 导致会出现冗余数据, 所以计算电阻值的有效数据窗长选取要小于冗余数据的窗长。而重合闸后, 对端断路器重合之前的整个过程在有效数据窗长内的信息都可以用来测距。同时考虑到系统实际运行过程中会出现的一些影响因素, 导致电压电流出现一定误差, 因此上式取最小值所对应的 x 即为实际故障点。

3 仿真实验与分析

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建如图 1 所示的 ± 500 kV 多端柔性直流输电系统进行仿真。MMC1 采用定直流电压和定交流电压控制, MMC2、MMC3 和 MMC4 采用定有功功率和定交流电压控制。各条输电线路长度都为 400 km, 输电线路采用贝瑞隆模型, 具体参数见附表 2; 采样频率为 200 kHz, 设置 1.5 s 时刻线路不同位置发生单极接地和双极短路故障, 计算电阻值标准差时窗长取为 1 ms。

3.1 单极接地故障情况下仿真实验验证

以线路 Line1 发生故障为例, 在线路不同位置设置单极接地故障, 图 5 为本文所提测距函数的仿真结果。可以看出故障点处的电阻值标准差最小, 从而说明所提测距方法具有较高的准确性。

表 1 则给出了线路不同位置发生单极接地故障时算法的测距结果以及误差。

表 1 单极接地故障测距结果

Table 1 Fault location of results of pole-to-ground fault

故障位置/km	测距结果/km	误差/%
50	51.031 6	0.257 9
100	100.021 9	0.005 5
150	151.053 4	0.526 7
200	200.043 7	0.010 9
250	251.057 3	0.264 3
300	300.065 6	0.016 4

由表 1 可知, 本文所提方法测距结果较为准确, 不同故障位置的测距误差都在 1% 以内。为进一步验证算法的适用性, 在不同过渡电阻和噪声情况下进行测距仿真实验验证。

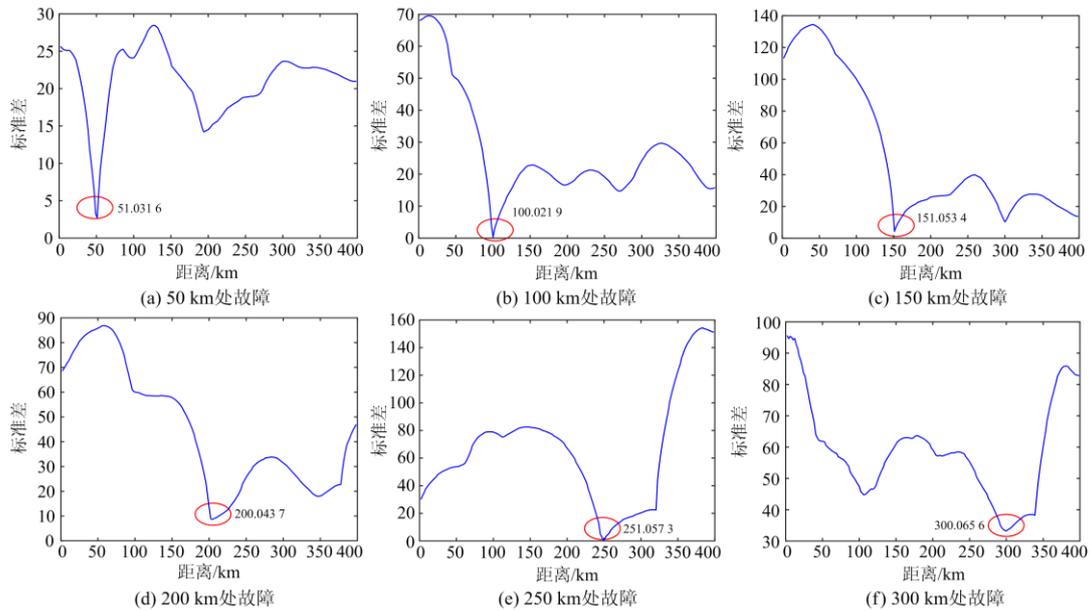


图5 单极接地故障仿真结果

Fig. 5 Simulation results of pole-to-ground fault

1) 抗过渡电阻能力

设置单极接地故障时的过渡电阻分别为 10 Ω、50 Ω 和 100 Ω，测试所提测距算法的耐过渡电阻的能力，测距结果以及误差如表 2 所示。

表 2 单极接地故障经不同过渡电阻接地测距结果

Table 2 Fault location of results of pole-to-ground fault under transition resistance

故障位置/km	过渡电阻/Ω	测距结果/km	误差/%
50	10	51.031 6	0.257 9
	50	48.990 3	0.252 4
	100	48.990 3	0.252 4
100	10	100.021 9	0.005 5
	50	100.021 9	0.005 5
	100	100.021 9	0.005 5
150	10	151.053 4	0.263 4
	50	151.053 4	0.263 4
	100	151.053 4	0.263 4
200	10	200.043 7	0.010 9
	50	200.043 7	0.010 9
	100	200.043 7	0.010 9
250	10	249.034 1	0.241 5
	50	249.034 1	0.241 5
	100	249.034 1	0.241 5
300	10	300.065 6	0.016 4
	50	302.106 9	0.526 7
	100	302.106 9	0.526 7

从测距结果可以看出，由于所提测距算法是通过判断电阻值的稳定性来进行定位的，而过渡电阻并不会改变故障点所呈现的电阻性，因此故障点处

的电阻值仍然最为稳定；由表 2 可知，在不同过渡电阻的情况下，测距误差也都在线路全长的 1% 以内，证明了算法能够耐受一定的过渡电阻。

2) 抗噪能力

为进一步验证算法的普适性，在直流断路器重合后量测得到的暂态电气量中分别加入信噪比为 30 dB、40 dB 和 50 dB 的白噪声，测试所提测距算法的抗噪声能力，测距结果如表 3 所示。

表 3 单极接地故障在不同噪声情况下测距结果

Table 3 Fault location of results of pole-to-ground

fault under different noise			
故障位置/km	噪声/dB	测距结果/km	误差/%
50	50	53.072 8	0.768 2
	40	53.072 8	0.768 2
	30	53.072 8	0.768 2
100	50	100.021 9	0.005 5
	40	100.021 9	0.005 5
	30	100.021 9	0.005 5
150	50	151.053 4	0.263 4
	40	151.053 4	0.263 4
	30	151.053 4	0.263 4
200	50	202.085 0	0.521 3
	40	202.085 0	0.521 3
	30	204.126 3	1.031 6
250	50	249.034 1	0.241 5
	40	249.034 1	0.241 5
	30	246.992 8	0.751 8
300	50	300.065 6	0.016 4
	40	300.065 6	0.016 4
	30	300.065 6	0.016 4

从表 3 中结果可以看出, 噪声虽然会影响量测得到的电压和电流幅值, 但是并不会改变在故障点处所呈现的电阻特性, 因此在故障点处电阻值的标准差仍然是最小的。不同噪声情况下测距算法的最大误差大约为线路全长的 1%, 说明所提算法具有

一定的抗噪声能力。

3.2 双极短路故障情况下仿真验证

为了进一步验证测距算法的有效性, 同样以线路 Line1 发生故障为例, 在线路不同位置设置双极短路故障, 图 6 为本文所提测距函数的仿真结果。

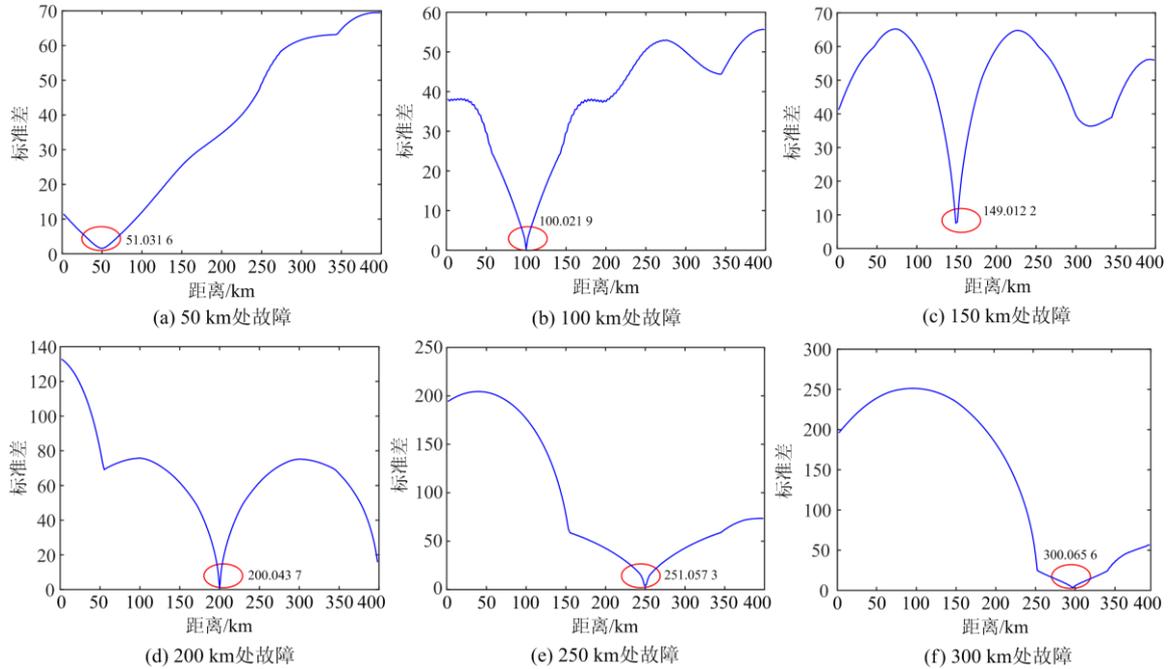


图 6 双极短路故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results of pole-to-ground fault

从图 6 可以看出: 在双极短路故障情况下, 由于故障点所表现出的电阻特性, 测距函数仍然在故障点处的值最小, 说明了其具有较好的适用性和准确性。表 4 则给出了其在线路不同位置发生故障时算法的测距结果以及误差。

表 4 双极短路故障测距结果

Table 4 Fault location of results of pole-to-pole fault

故障位置/km	测距结果/km	误差/%
50	51.031 6	0.257 9
100	100.021 9	0.005 5
150	149.012 2	0.247 0
200	200.043 7	0.010 9
250	251.057 3	0.002 6
300	300.065 6	0.016 4

由表 4 可知, 本文所提测距方法在双极短路故障情况下仍然较为准确, 不同故障位置的测距误差都在 1% 以内。为进一步验证算法的适用性, 在不同过渡电阻和噪声情况下进行测距仿真验证。

1) 抗过渡电阻能力

由于两极线路一般不会经过较大的过渡电阻故

障, 因此进行仿真验证时设置的过渡电阻值较小, 分别设置双极短路故障时的过渡电阻为 10Ω 、 20Ω 和 30Ω , 测试所提测距算法的耐受过渡电阻能力, 表 5 给出了测距结果。

从测距结果可以看出, 由于所提测距算法是通过判断电阻值的稳定性来进行定位的, 而过渡电阻并不会改变故障点所呈现的电阻性, 因此故障点处的电阻值仍然最为稳定; 由表 2 可知在不同过渡电阻的情况下, 测距误差仍然在 1% 以内, 验证了算法具有一定耐受过渡电阻的能力。

2) 抗噪能力

在直流断路器重合后量测的电压和电流中分别加入信噪比为 30 dB、40 dB 和 50 dB 的白噪声, 测试所提测距算法的抗噪声能力, 表 6 给出了测距结果。

从表 6 中结果可以看出, 噪声虽然会影响量测得到的电压和电流幅值, 但是并不会改变在故障点处所呈现的电阻特性, 因此在故障点处电阻值的标准差仍然是最小的。不同噪声情况下测距算法的最大误差也能控制在线路全长的 1% 以内, 说明所提算法具有一定的抗噪声能力。

表 5 双极短路故障在不同过渡电阻情况下测距结果
Table 5 Fault location of results of pole-to-pole fault under transition resistance

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	测距结果/km	误差/%
50	10	48.990 3	0.252 4
	20	48.990 3	0.252 4
	30	48.990 3	0.252 4
100	10	100.021 9	0.005 5
	20	100.021 9	0.005 5
	30	100.021 9	0.005 5
150	10	149.012 2	0.247 0
	20	149.012 2	0.247 0
	30	149.012 2	0.247 0
200	10	200.043 7	0.010 9
	20	200.043 7	0.010 9
	30	200.043 7	0.010 9
250	10	251.075 3	0.268 8
	20	249.034 1	0.241 5
	30	249.034 1	0.241 5
300	10	300.065 6	0.016 4
	20	300.065 6	0.016 4
	30	300.065 6	0.016 4

表 6 双极短路故障在不同噪声情况下测距结果
Table 6 Fault location of results of pole-to-pole fault under different noise

故障位置/km	噪声/dB	测距结果/km	误差/%
50	50	48.990 3	0.252 4
	40	48.990 3	0.252 4
	30	48.990 3	0.252 4
100	50	100.021 9	0.005 5
	40	100.021 9	0.005 5
	30	100.021 9	0.005 5
150	50	146.970 9	0.757 3
	40	146.970 9	0.757 3
	30	146.970 9	0.757 3
200	50	200.043 7	0.010 9
	40	200.043 7	0.010 9
	30	200.043 7	0.010 9
250	50	249.034 1	0.241 5
	40	249.034 1	0.241 5
	30	251.075 3	0.268 8
300	50	300.065 6	0.016 4
	40	300.065 6	0.016 4
	30	300.065 6	0.016 4

4 结论

现有测距算法依赖暂态波头辨识, 受到干扰后会导致测距精度下降。针对上述问题, 本文基于直流线路分布参数模型提出了一种单端测距方法。其

中, 所提方法利用故障后直流断路器重合时的暂态电气量在时域中进行故障测距, 根据故障点处存在过渡电阻, 通过判断所得电阻值的稳定性来实现对故障位置的定位。

本文所提方法具有以下优点:

1) 行波测距法较为依赖波头辨识, 易受故障电阻影响, 从而导致测距精度下降。本文所提方法通过计算线路沿线分布的电气量, 通过判断电阻值的稳定性进行测距, 具有一定的耐受过渡电阻和噪声的能力。

2) 多端系统中发生故障后多个换流器会向故障点馈入短路电流, 因而主要依赖双端量进行故障测距。而考虑到故障后线路两端直流断路器重合时间并不一致的特点, 先重合一侧的系统才会继续向故障点馈入短路电流, 此时故障电流只由一侧系统提供, 因此只需选取重合闸时单端的暂态量便可完成测距, 无需通信, 提高了测距的准确性。

附录

表 1 系统仿真模型中 MMC 换流器详细参数

Table 1 Detailed parameters of MMC converters

HB-MMC	额定容量 S_N	1 000 MVA
	额定直流电压 U_{DCN}	± 500 kV
	电平数 N	77
	桥臂电感 L_{arm}	50 mH
	子模块电容 C_{SM}	2 800 μ F
交流电网	子模块通态电阻 R_{SM}	0.000 5 Ω
	电压等级	220 kV

表 2 系统仿真模型中直流输电线路详细参数

Table 2 Detailed parameters of transmission lines

线路模型	参数	数值
贝瑞隆模型	0 模电阻 R_0	0.067 1 Ω /km
	0 模电感 L	4.1 mH/km
	0 模电容 C_0	6.599 4 nF/km
	1 模电阻 R_1	0.066 94 Ω /km
	1 模电感 L_1	0.685 7 mH/km
	1 模电容 C_1	8.75 nF/km

参考文献

- [1] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [2] 孙栩, 曹士冬, 卜广全, 等. 架空线柔性直流电网构建方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 678-682.

- SUN Xu, CAO Shidong, BU Guangquan, et al. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 678-682.
- [3] 孙广, 王阳, 薛枫, 等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 113-120.
- SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 113-120.
- [4] NAIDU O, PRADHAN A K. A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 505-513.
- [5] 夏远洋, 李啸骢, 陈飞翔, 等. 基于 FastICA 的输电线路行波故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 138-143.
- XIA Yuanyang, LI Xiaocong, CHEN Feixiang, et al. FastICA based traveling wave fault location algorithm for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 138-143.
- [6] 田斌, 方覃绍阳, 李振兴, 等. 基于波速修正的多回输电线路行波测距算法[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 184-189.
- TIAN Bin, FANG Qinshaoyang, LI Zhenxing, et al. Parallel multiloop transmission line travelling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 184-189.
- [7] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 121-127.
- GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 121-127.
- [8] ZHANG C, SONG G, WANG T, et al. Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 2028-2038.
- [9] 顾艳, 王玉忠. 基于小波变换和数学形态学的双回线故障测距[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 34-38.
- GU Yan, WANG Yuzhong. Fault location based on wavelet transform and mathematical morphology for double-circuit transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 34-38.
- [10] 赵海龙, 陈钦柱, 梁亚峰, 等. 一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 85-93.
- ZHAO Hailong, CHEN Qinzhu, LIANG Yafeng, et al. A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 85-93.
- [11] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3832-3840.
- CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection for hybrid HVDC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3832-3840.
- [12] 杨斌, 张翠娟, 江聪, 等. 加窗小波包变换及其在故障测距中的应用[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 245-250.
- YANG Bin, ZHANG Cuijuan, JIANG Cong, et al. Windowed wavelet transform method and its application to fault location[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 245-250.
- [13] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
- FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [14] SUONAN J, GAO S, SONG G, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1203-1209.
- [15] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 57-61.
- SONG Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [16] 康丽红, 唐昆明, 罗建, 等. 直流输电线路单极接地双端故障测距[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2268-2273.
- KANG Lihong, TANG Kunming, LUO Jian, et al. Two-terminal fault location of monopolar earth fault in HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2268-2273.
- [17] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.
- YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. Overview of fault location methods in high voltage direct current transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 185-191.
- [18] 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. One-terminal

- fault location for VSC-HVDC transmission lines based on principles of parameter identification[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 94-99.
- [19] 哈恒旭, 王婧, 谭雨珍, 等. 基于微分算子逼近的单端故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 69-73, 78.
HA Hengxu, WANG Jing, TAN Yuzhen, et al. New single-ended fault locating principle based on differential operator approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 69-73, 78.
- [20] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A fault location method for HVDC transmission lines on the basis of distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [21] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. 利用电流固有频率的VSC-HVDC直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 112-119.
CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 112-119.
- [22] 彭发喜, 汪震, 邓银秋, 等. 混合式直流断路器在柔性直流电网中应用初探[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2092-2098.
PENG Faxi, WANG Zhen, DENG Yinqiu, et al. Reclosing strategy for hybrid DC circuit breakers[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2092-2098.
- [23] 张群, 赵倩, 郝俊芳, 等. 基于直流断路器的柔性直流电网架空线路故障隔离策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 17-22.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, HAO Junfang, et al. Study on fault isolation strategy of overhead transmission line based on DC circuit breaker in flexible DC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 17-22.
- [24] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [25] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3733.
WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733.
- [26] 李化, 林福昌, 何俊佳, 等. 相模变换法分析特高压直流输电线路接地故障[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 51-55.
LI Hua, LIN Fuchang, HE Junjia, et al. Analysis of grounding fault in UHVDC system by phase-modal transformation method[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 51-55.
- [27] 宋国兵, 索南加乐, 许庆强, 等. 基于双回线环流的时域法故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 24-29.
SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. A novel time domain algorithm for locating faults on parallel transmission lines by circulating circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 24-29.
- [28] 邵文权, 南树功, 张望妮, 等. 利用过渡电阻特征的超/特高压输电线路电弧性故障及熄弧时刻识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1822-1827.
SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Wangni, et al. Arcing fault detection and arc extinction time capture based on characteristics of transition resistances for EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1822-1827.

收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2020-10-27

作者简介:

赵冠琨(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网保护与控制; E-mail: zhaoguankun_ncepu@163.com

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

陈金锋(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: chan_jinfeng@126.com

(编辑 魏小丽)