

高压直流接地极线路阻抗监视系统 断线故障时动作性能评估

李小鹏¹, 滕予非¹, 宋新尧², 李世龙¹, 罗荣森¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 高压直流接地极线路阻抗监视系统用于监测接地极线路运行状态。阻抗监视系统的动作性能直接影响着对接地极线路运行状态的实时感知。通过理论分析, 推导了接地极线路在双回线断线和单回线断线故障情况下, 阻抗监视系统测得的阻抗结果。通过不同故障位置的阻抗结果遍历, 分析了不同断线故障情况下阻抗监视系统的动作性能。分析结果显示, 在单回线断线故障时, 在特定的接地极线路长度下, 阻抗监视系统容易发生拒动。

关键词: 接地极线路; 阻抗监视系统; 评估性能

中图分类号: TM934 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0007-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.002

Performance Evaluation of HVDC Electrode Line Impedance Supervision System under Line Break Fault

Li Xiaopeng¹, Teng Yufei¹, Song Xinyao², Li Shilong¹, Luo Rongsen¹

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

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: The operation state of HVDC electrode line is monitored by electrode line impedance supervision (ELIS). The performance of ELIS will affect the operation state identification of electrode line. With theoretical analysis, the measured impedance by ELIS is obtained under double-line break faults and single-line break faults. The performance of ELIS is analyzed based on the impedance measured with different break faults. The results show that for single-line break faults under some specific electrode line lengths, the ELIS will be unable to monitor the fault reliably.

Key words: grounding electrode line; impedance supervision system; performance evaluation

0 引言

目前,特高压直流输电作为远距离大容量电能输送的重要通道已在国内广泛应用,目前在运和在建的特高压直流超过了10条^[1]。直流接地极和接地极线路是特高压直流输电系统的重要组成部分,其为换流阀提供参考地电位,同时作为入地电流的通道。在实际工程运行中,因雷击或过电压闪络引起的接地极线路短路、断线故障已严重威胁到直流系统的安全运行。为可靠迅速地检测和处理接地极线路故障,实际工程中为接地极线路配备了过流保护、电流不平衡保护和接地极线路阻抗监视系统。

过流保护和电流不平衡保护受保护原理限制存在保护死区,难以保护线路全长,且在直流输电系统双极平衡运行或金属回线运行时无法发挥作用。差动保护可以保护接地极线路全长,但依然不适用于双极平衡运行或金属回线运行方式,且需要双端通信,在通信失效时无法发挥作用。为了解决接地极线路保护的可靠性问题,ABB公司提出为直流输电系统配置基于高频信号注入的接地极线路阻抗监测系统。

阻抗监视系统通过向接地极线路注入高频正弦电流信号,同时在注入点测量同频电压信号,间接计算出接地极线路的阻抗变化。如果阻抗监视装置检测到阻抗进入动作区并持续一定时延,判断接地极线路发生了故障。阻抗监视系统可以适应双极平衡

运行方式,但在实际运行过程中,阻抗监视系统曾在短路故障时发生过拒动,需要进一步分析接地极线路的故障特性以及阻抗监视系统在不同故障情况下的动作性能^[2]。

在接地极线路故障特征分析方面,文献[3]针对不同短路故障下接地极线路的暂态行波的特征进行了仿真分析。文献[4]提出了一种接地极线路短路故障快速识别方法。文献[5]分析了接地极线路阻抗监视系统在短路故障情况下的动作情况,并提出了相应的改进措施。

然而,上述研究大多是针对短路故障情况开展的研究,较少涉及断线故障,且缺乏断线故障后阻抗监视系统的动作性能分析。下面着重对接地极线路断线故障开展理论研究,推导了断线故障情况下接地极线路阻抗监视系统的测量阻抗变化情况,并进一步分析了不同故障位置下阻抗监视系统的动作性能,为下一步改进提供了基础。

1 接地极线路阻抗监视系统

1.1 接地极线路阻抗监视系统原理

高压直流输电工程接地极线路的阻抗监视系统(electrode line impedance supervision, ELIS)如图1所示。

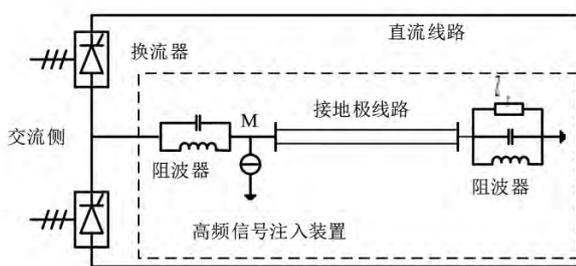


图1 ELIS系统

向接地极线路注入高频电流信号后可以在注入点测得对应频率的电压值。目前国家电网有限公司已经投运的高压直流输电工程中,注入信号频率均为13.95 kHz^[5]。通过测量对应频率的电压电流值即可计算出接地极线路的等效阻抗,进而判断线路上是否发生故障。为了防止高频电流进入直流系统,在接地极线路两端还分别装设有阻波器。其中接地极侧的阻波器还并联有匹配电阻,其阻值与接地极线路等效波阻抗相当。

ELIS系统在换流站内向接地极线路注入13.95 kHz

的高频电流,同时对注入点的同频电压进行检测,并计算出接地极线路的阻抗。ELIS系统的动作条件为

$$\Delta Z = |Z_{eq} - Z_{normal}| \geq Z_{set} \quad (1)$$

式中: Z_{eq} 为测量阻抗; Z_{normal} 为正常运行时接地极线路等效阻抗; ΔZ 为测量阻抗与正常运行时阻抗差值; Z_{set} 为整定阻抗,工程中一般取30 Ω 。

1.2 正常运行时接地极线路阻抗

接地极线路正常运行时,接地极引线的等效电路如图2所示。

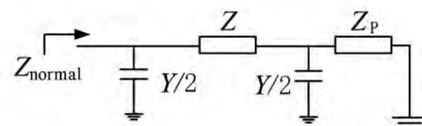


图2 正常运行时接地极线等效电路

由图2可得,此时

$$Z_{normal} = Z_{eq} = \frac{2}{Y} // (Z + \frac{2}{Y} // Z_p) \quad (2)$$

式中: Z_{eq} 为接地极线等效阻抗; Z_p 为接地极线路末端并联的匹配电阻,其值等于线路的波阻抗 Z_c ; Z 和 Y 分别为输电线路PI型等效电路中的等效阻抗和等效导纳,其计算公式为

$$\begin{cases} Z = Z_c \sin \gamma l \\ Y = \frac{1}{Z_c} \frac{2(\cos \gamma l - 1)}{\sin \gamma l} \end{cases} \quad (3)$$

式中: l 为接地极线长度; γ 为线路传播系数; Z_c 为线路波阻抗 $Z_c = \sqrt{Z_1/Y_1}$; z_1 、 y_1 分别为线路单位长度的阻抗和导纳。

将式(3)代入式(2)可得

$$Z_{normal} = Z_c \quad (4)$$

由此可知,正常运行时,接地极线路等效阻抗为线路的波阻抗。

2 接地极线路在断线时的等效阻抗

2.1 双回线断线故障

当距离接地极引线首端 x 处发生双回线断线故障时,接地极线等效电路图如图3所示。

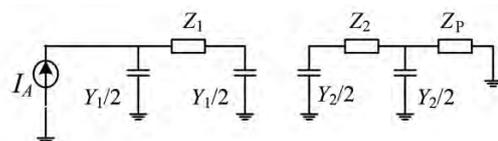


图3 双回线断线故障时接地极等效电路

图中, Z_1 、 Y_1 和 Z_2 、 Y_2 分别是两段线路的等效阻抗和

等效导纳,其计算公式为

$$\begin{cases} Z_1 = Z_C \sin \gamma x \\ Y_1 = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cos \gamma x - 1)}{\sin \gamma x} \\ Z_2 = Z_C \sin \gamma (l - x) \\ Y_2 = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cos \gamma (l - x) - 1)}{\sin \gamma (l - x)} \end{cases} \quad (5)$$

则接地极引线的等效阻抗 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \frac{2}{Y_1} // (Z_1 + \frac{2}{Y_1}) \quad (6)$$

2.2 单回线断线故障

当特高压直流接地极线路出现单回断线故障时,其等效网络如图4所示。

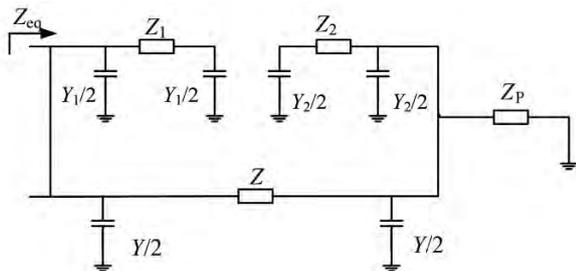


图4 单回线路断线故障时接地极线等效电路

将图4进一步简化为图5。

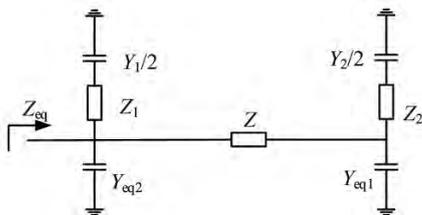


图5 单回线断线故障时接地极线简化电路

图5中各变量的表达式为

$$\begin{cases} Y_{eq1} = \frac{Y_2}{2} + \frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} \\ Y_{eq2} = \frac{Y_1}{2} + \frac{Y}{2} \end{cases} \quad (7)$$

将图5进一步经电路等效变换简化为图6。

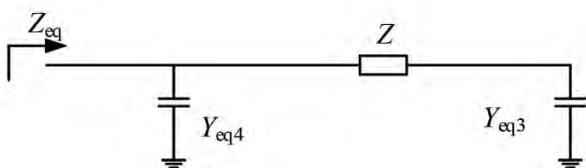


图6 单回线路故障时接地极线简化电路

图6可表达为

$$\begin{cases} Y_{eq3} = 1/(2/Y_2 + Z_2) + Y_{eq1} \\ Y_{eq4} = 1/(2/Y_1 + Z_1) + Y_{eq2} \end{cases} \quad (8)$$

由图6可得等效阻抗 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \frac{Z \times Y_{eq3} + 1}{Z \times Y_{eq3} \times Y_{eq4} + Y_{eq3} + Y_{eq4}} \quad (9)$$

3 接地极线路阻抗监视系统动作性能分析

3.1 双回线断线时 ELIS 动作性能分析

采用某 ±800 kV 特高压直流工程的接地极线路参数来分析 ELIS 系统的性能。在该特高压直流输电工程中,接地极线路采用同杆双回架设,线长 100 km,具体参数如表2所示。注入信号源位于接地极线路换流站端,注入频率为 13.95 kHz。为了减少线路上高频驻波的影响,在接地极线路两端还分别装设有阻波器。

表2 单回接地极线路参数

| $L/(mH \cdot km^{-1})$ | $R/(\Omega \cdot km^{-1})$ | $C/(\mu F \cdot km^{-1})$ |
|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 2.370 9 | 0.262 6 | 0.007 7 |

利用表2参数,首先仿真接地极线路长度变化时,不同故障点双回线断线故障时的故障阻抗,得到故障阻抗与正常运行时的最小阻抗差值随线路长度的变化情况,如图7所示。

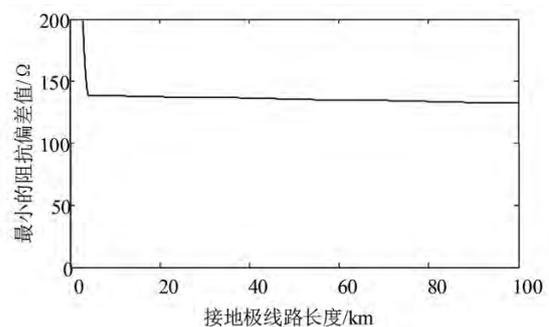


图7 不同接地极线路长度下最小的阻抗偏差值

由图7可知,在线路长度在 100 km 以内时,任意地点发生双回线断线故障时,阻抗差值最小值也在 130 Ω 以上,远远大于整定值 30 Ω,ELIS 系统不会拒动。

3.2 单回线断线时 ELIS 系统动作性能分析

首先考察在线路长度为 100 km 时,发生单回线断线故障,不同故障距离下的阻抗差值,如图8所示。

由图8可知,在接地极线路长度为 100 km 时,接地极线路单回线故障后阻抗变化量均大于门槛

值, ELIS 系统不会拒动。

在以上仿真中接地极线路长度均为 100 km。为了研究接地极线路长度对故障后阻抗变化量的影响, 设置接地极线路长度从 5 km 一直增加到 100 km。同时在接地极线路上每隔 0.1 km 设置一个单回线断线故障点, 在不同的线路长度下故障后阻抗变化量最小值如图 9 所示。

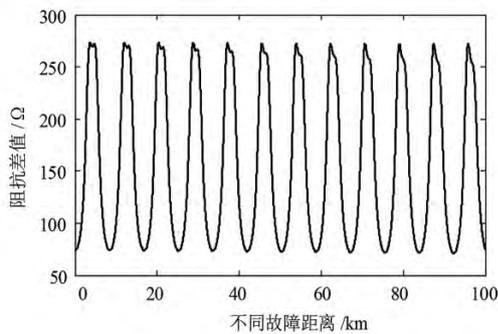


图 8 不同故障距离下阻抗偏差值

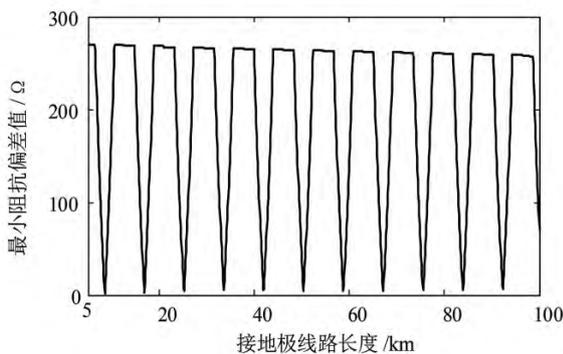


图 9 不同接地极线路长度下最小阻抗偏差值

由图 9 可以看出, 在某些线路长度下单回线断线故障后的最小阻抗变化量将远小于门槛值, 这就意味着在这些故障情况下 ELIS 系统将会拒动。

由图 9 可知这些特殊情况的线路长度接近于注入信号半波长的整数倍。

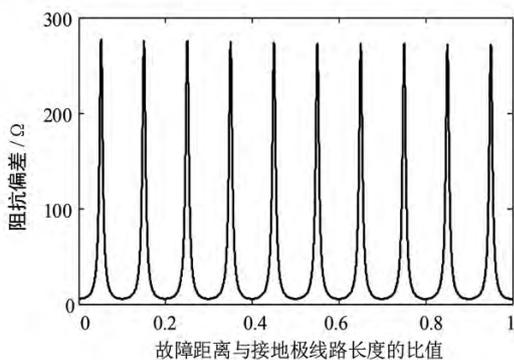


图 10 接地极线路长度为 10 倍注入信号半波长时阻抗偏差

为了验证上述结论, 将线路长度设置为注入信号半波长的 10 倍, 接地极线路单回断线故障后的阻抗变化量如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 当故障距离为注入信号半波长的整数倍时, 线路单回断线故障后测量阻抗与正常运行时的测量阻抗相当, 这就意味着在这种情况下 ELIS 系统将会拒动。

4 结 语

前面首先分析了接地极线路在双回断线和单回断线故障后的等效阻抗, 然后利用接地极线路参数研究了不同故障下 ELIS 的动作性能。研究表明: ELIS 系统在接地极线路双回断线时能可靠发现故障, 但在接地极线路长度为注入信号半波长的整数倍时, 在某些故障距离下 ELIS 系统将无法发现线路上的单回线断线故障。

参考文献

- [1] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 滕予非, 汤涌, 周波, 等. 基于高频电压突变量的特高压直流输电系统接地极引线故障监测方法 [J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 72-78.
- [3] 张悛宁, 王彩芝, 陈平, 等. 直流接地极线路故障暂态行波传播特效分析 [J]. 中国电力, 2015, 48(3): 88-93.
- [4] 束洪春, 田鑫翠, 张悛宁. 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.
- [5] Y. F. Teng, X. P. Li, Q. Huang, et al. A Novel High-frequency Voltage Standing-wave Ratio-based Grounding Electrode Line Fault Supervision in Ultra-high Voltage DC Transmission Systems [J]. Energies, 2017, 10(3): 309.

作者简介:

李小鹏(1987), 博士, 高级工程师, 研究方向为特高压直流控制保护技术;

滕予非(1984), 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定、高压直流输电。

(收稿日期: 2019-06-04)