

考虑线路参数不确定性的零序电流增益分析

陈 昊

(江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 单相接地故障是中性点接地系统最常见的故障。输电线路发生单相故障时, 三相跳闸后, 后跳开侧零序电流有时出现突然变化的现象。故障波形分析表明, 这种零序电流变化可能受线路参数不确定性的影响。本文考虑了线路参数的不确定性, 分析了线路不确定参数和故障点位置参数与零序电流的定量关系, 为更好地解释故障过程, 理解故障后的保护行为, 保证电网的安全稳定运行提供了参考的依据。

关键词: 单相接地; 零序电流增益; 故障点; 线路零序阻抗

0 引言

单相接地故障是中性点接地系统最常见的故障。考虑到某些线路重合闸采用三重方式、沟通三跳压板投入, 或虽重合闸是单重方式, 但由不分相的保护切除故障, 或由于保护选相失败, 或保护单相跳后单相重合于故障等原因, 单相故障时三相跳闸是实际系统中的一种常见形式。

由于保护跳令发出时间、操作箱延时、断路器跳闸时间差异等因素的存在, 会造成两侧断路器断开时刻有所差别^[1-4]。以南京地区近五年 220kV 及以上线路单相故障分析统计资料来看, 两侧跳闸时间超过 40ms (两周波) 已有十余次, 在此时间差内, 后跳开侧零序电流可能会发生变化。一定条件下, 这种变化将十分显著, 此时若依照传统的线路参数均匀假设, 零序电流的突增理论值为零, 不能与实际波形吻合。据故障波形分析, 这种零序电流变化常受到线路参数不确定性的影响。深入分析线路参数变化对故障后零序电流变化的定量关系为更好地认识故障过程、提高故障测距精度有着重要的意义。

现有对单相故障三相跳闸后零序电流的研究中, 文献[4]讨论了单相接地故障发生在某些特定位置时线路零序电流的变化。文献[5][6]讨论了一般情况下, 后跳开侧零序电流的变化, 但未涉及线路参数不确定性对零序电流的影响。本文在文献[5][6]基础上, 考虑线路参数的不确定性, 导出了零序电流增益和线路参数以及故障点位置的定量关系。

1 线路参数的不确定性

220kV 及以上输电线路工频参数 (尤其是零序阻抗) 的测量受线路结构、运行方式、干扰电压、地质情况等因素的影响^[7-9]。这些影响因素对输电线路的各部分有着不同的影响, 很多线路两端不均匀程度较高, 线路中间部分稍为均匀。同时, 这些影响因素更存在着时变性特征, 如线路各部分相应的土壤电阻率等随着时间的变化而变化, 影响着线路各段零序参数不断变化。

在继电保护整定、电力故障分析时常忽略线路参数的不确定性, 而使用一个常数 (或为理论值, 或为实测值) 描述线路参数。由于线路参数不确定性的存在, 使用常数描述线路参数显然存在一定的误差。在某些不利条件下, 可能产生较为显著的影响。

2 单相故障三相跳闸后零序电流分析

2.1 两侧电源系统

设某 220kV 线路两侧电源系统如图 1。不失一般性, 设线路 A 相发生单相接地故障, 短路电流分布如图 1 所示, 其中, Z_{1M} 、 Z_{0M} 分别为 M 侧母线到故障点的正序阻抗、零序阻抗, Z_{1N} 、 Z_{0N} 分别为 N 侧母线到故障点的正序阻抗、零序阻抗。此时, 线路两侧断路器都处于合位。

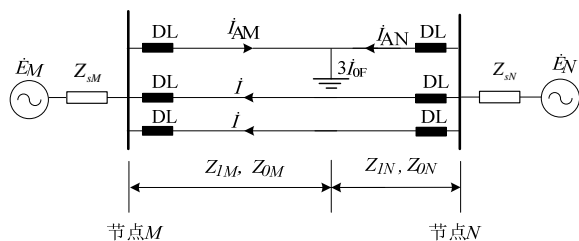


图1 跳闸前电流示意图

Fig.1 the Current before Tripping

故障发生后,线路保护动作,发出“三跳”指令跳两侧断路器。设在线路一侧(N侧)率先单相跳闸,此时N侧三相断路器由合位变为分位,考察此时另一侧(M侧)零序电流的变化,如图2。

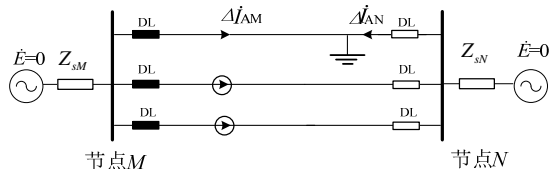


图2 N侧先跳闸后电流增量示意图

Fig.2 the Current Increment after Tripping at N Side

此处分析中,考虑高压线路中零序补偿系数一般在实轴附近,这里设整条线路从M侧至故障点的零序阻抗和正序阻抗比为实数 R_M ,即有 $R_M = \frac{Z_{0M}}{Z_{1M}}$ 。

类似的,有从N侧至故障点的零序阻抗和正序阻抗比为实数 R_N ,有 $R_N = \frac{Z_{0N}}{Z_{1N}}$ 。

下面通过引入线路零序阻抗与正序阻抗比 R_M ,对三相跳闸对对侧零序电流影响做一个简化的推导。

2.2 三相跳闸后的电流

线路A相发生单相接地故障时,B,C两相电流差的故障分量相等,即有 $\Delta \dot{I}_{BC} = 0$,亦有B,C两相电流的故障分量相等,记为 \dot{I} ,即有 $\Delta \dot{I}_B = \Delta \dot{I}_C = \dot{I}$,如图1所示。

考虑将N侧三相跳闸等效于在B、C两相加入与非故障相电流 \dot{I} 大小相等、方向相反的电流,由此带来的电流变化量如图2。令在M侧A相中感应的电流为 $\Delta \dot{I}_{AM}$ 。

考虑M侧母线,有

$$\frac{Z_{0M} + 2Z_{1M}}{3} \Delta \dot{I}_{AM} = 2 \frac{Z_{0M} - Z_{1M}}{3} \Delta \dot{I}_{BM} \quad (1)$$

使用 R_M 的定义,有

$$\Delta \dot{I}_{BM} = \frac{R_M + 2}{2(R_M - 1)} \Delta \dot{I}_{AM} \quad (2)$$

$$\Delta \dot{I}_{0M} = \frac{\Delta \dot{I}_{BM} + \Delta \dot{I}_{CM} - \Delta \dot{I}_{AM}}{3} \quad (3)$$

考虑到 $\Delta \dot{I}_{BM}^g = \Delta \dot{I}_{CM}^g$,可得M侧零序电流变化量为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{0M} &= \frac{\frac{R_M + 2}{R_M - 1} - 1}{3} \Delta \dot{I}_{AM} = \frac{1}{R_M - 1} \Delta \dot{I}_{AM} \\ &= \frac{2}{R_M + 2} \Delta \dot{I}_{BM} \end{aligned} \quad (4)$$

即有

$$\Delta \dot{I}_{0M} = \frac{-2}{R_M + 2} \dot{I} \quad (5)$$

3 线路参数不确定性对电流的影响

考察图1,可导出式(6)

$$\dot{I} = (C_0 - C_1) \dot{I}_{F0} \quad (6)$$

其中, C_1 为正序电流分配系数, C_0 为零序电流分配系数。

整理式(6)可得

$$\dot{I} = \left(\frac{Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}} - \frac{Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} \right) \dot{I}_{F0} = \left(\frac{1}{1 + \frac{Z_{0N}}{Z_{0M}}} - \frac{1}{1 + \frac{Z_{1N}}{Z_{1M}}} \right) \dot{I}_{F0} \quad (7)$$

由上式可知,如果线路参数完全均匀,则有 $\frac{Z_0}{Z_1}$

恒为常数,即有

$$\frac{Z_0}{Z_1} \equiv C \quad (8)$$

则有 $\frac{Z_{0M}}{Z_{1M}} = \frac{Z_{0N}}{Z_{1N}}$,亦满足 $\frac{Z_{0N}}{Z_{0M}} = \frac{Z_{1N}}{Z_{1M}}$,根据式(7)

可导出 \dot{I} 为零,如图3中红色线条所示。

如前分析,实际电网中线路参数尤其是零序参数具有一定的不确定性。因此更一般的情况是线路每部分的 $\frac{Z_0}{Z_1}$ 不恒为常数。考虑线路参数不确定性影响的 \dot{I} 动态变化如图3。

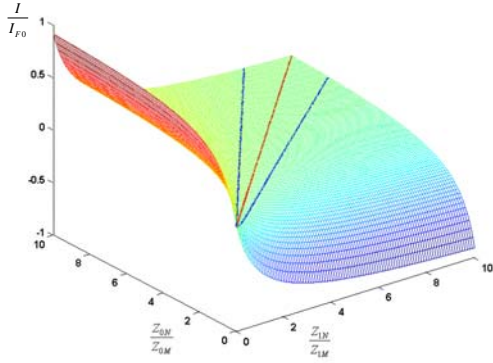
图3 考虑线路参数影响下 $\frac{I}{I_{F0}}$ 的变化曲面

Fig.3 the surface of $\frac{I}{I_{F0}}$ considering the uncertainty of line parameter

由图3可见,发生单相接地故障时,当 $\frac{I}{I_{F0}}$ 一定时,非故障相电流 I 随线路参数的变化而变化。其变化的空间曲面如图3所示。

进一步,考虑一条实际线路的参数不均匀程度常处于一定范围内,设 $\frac{R_N}{R_M} \in \left[\frac{4}{5}, \frac{5}{4}\right]$, 整理可得式

(9)

$$\frac{\frac{Z_{0N}}{Z_{0M}}}{\frac{Z_{1N}}{Z_{1M}}} \in \left[\frac{4}{5}, \frac{5}{4}\right] \quad (9)$$

依式(9),可在 $\frac{I}{I_{F0}}$ 变化的空间曲面上绘制实用限制线,如图3中蓝色线条所示,即实际线路只用

到图3曲面上以 $\frac{\frac{Z_{0N}}{Z_{0M}}}{\frac{Z_{1N}}{Z_{1M}}} = 1$ 为中轴的一条窄带区

域。

4 零序电流增益的导出

将M侧零序电流增量和故障点零序电流的比值 $\frac{\Delta I_{0M}}{I_{F0}}$ 定义为零序电流增益A。联立式(3)、式(7)两式,则有

$$A = \left| \frac{\Delta I_{0M}}{I_{F0}} \right| = \frac{2}{R_M + 2} \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_{0N}}{Z_{0M}}} - \frac{1}{1 + \frac{Z_{1N}}{Z_{1M}}} \right| \quad (10)$$

$$\text{记 } \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{Z_{0N}}{Z_{0M}}} - \frac{1}{1 + \frac{Z_{1N}}{Z_{1M}}}$$

式(10)可简化为

$$A = \frac{2|\varepsilon|}{R_M + 2} \quad (11)$$

根据式(11)可以绘制零序电流增益A的变化曲面, $R_M \in (0, +\infty)$, 如图4。

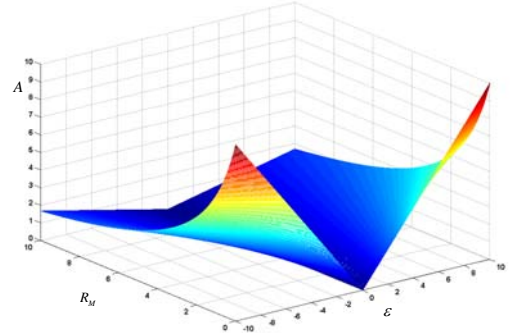


图4 零序电流增益变化曲面

Fig.4 the surface of zero-sequence current gain

至此,已获得单相接地故障三跳后零序电流增益的一个完整的推导。从图4中可得到以下几点结论:

- 1) 当线路参数完全均匀, $\frac{Z_0}{Z_1}$ 恒为常数时, ε 恒为0, 零序电流增益为零, 且不受故障点位置的影响。
- 2) 故障点位置相同时, 零序电流增益由线路正序阻抗、零序阻抗的均匀程度而定。二者差异越大时, 零序电流增益的幅值越大。
- 3) 零序电流增益的幅值亦受故障点发生位置, 线路参数完全相同时, 零序电流增益随故障位置参数 R_M 的增加而单调减小。

5 结论

1) 线路参数的不确定性对后跳闸侧零序电流增益的变化有着重要的影响。基于对零序电流增益的推导可以解释实际生产中单相故障三相跳闸后零序电流突变的现象。

2) 通过定量讨论线路参数不确定性对线路保护的影响, 使继电保护装置可以更好地发挥其作用, 保证电网的安全稳定运行。

3) 线路零序阻抗受环境影响较大, 实际运行

中难以适时获取当前的线路零序阻抗,对零序电流增益的定量研究对当前线路零序阻抗的计算和校核亦有重要价值。

参考文献:

- [1] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
CUI Jia-pei, MENG Qing-yan, CHEN Yong-fang, et al. Setting of relay and control equipment for power system stability[M] Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社.1999.
WANG Mei-yi. The Utility of Power System Network Protection. Beijing: China Electric Power Press, 1999
- [3] 刘万顺.电力系统故障分析(第二版)[M].北京: 中国电力出版社, 1998.
Liu Wanshun. Power system analysis[M].Beijin Electric Power Press of China, 1998.
- [4] 江苏省电力公司. 电力系统继电保护原理与实用技术[M].北京: 中国电力出版社, 2006.
Jiangsu Electric Power Company. The Principle and Practical Technology of Relay Protection of Power System[M].Beijing:China Electric Power Press,2006.
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
Zhu Sheng-shi. The Principle and Technique of High Voltage Network Protection[M] Beijing: China Electric Power Press, 2005
- [6] 洪佩孙, 李九虎. 输电线路距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
Hong Peisun, Li Jiuhu. Distance protection of power line[M] Beijing: China,2008.
- [7] 胡中慧, 傅中, 杨道文, 等.500kV 输电线路零序阻抗的测量及研究[J].电力系统保护与控制, 2009,37(14):90-92.
Hu Zhonghui, Fu Zhong, Yang Daowen, et al. Measurement and research of the Zero Sequence Impedance of 500kV Transmission Line[J].Power System Protection and Control, 2009,37(14):90-92.
- [8] 郑钊, 蔡金锭. 输电线路工频参数影响因素[J].高电压技术, 2008,34(4):813-815.
Zheng Chuan, Cai Jinding. Quantification of Facts Influencing Transmission Line Parameters[J].High Voltage Engineering, 2008,34(4):813-815.
- [9] 蒋俊,郭剑,陆家榆. 交流输电线路单相接地故障对输油输气管道的电磁影响与线路参数的关系[J]. 电网技术,2010,34(6):10-13.
Jiang Jun, Guo Jian, Lu Jiayu. Relation Between Transmission Line Parameters and Electromagnetic Impact on Petroleum/Gas Pipelines due to Single-Phase Earth Fault in AC Transmission Line[J]. Power System Technology,2010,34(6):10-13.
- [10] 程小平. 电网变化对零序电流影响定性分析[J] 继电器, 2002,28(2):4-6,11.
Cheng Xiaoping. Qualitative analysis zero sequence overcurrent affected by change network component[J]. Relay.2002,28(2):4-6,11
- [11] 王广学. 电力系统接地故障点的分析计算方法[J].电力系统自动化. 1984, (4):34-39.
Wang Guangxue. Analysis and Computation of Fault Location for Power Lines on the Basis of Zero-Sequence current[J].Automation of Electric Power Systems,1984,(4):34-39.
- [12] DL /P 559- 1994 220~ 500kV 电网继电保护装置运行整定规程[S], 1994.
DL /P559-1994 Setting and operating code of 220 ~ 500 kV power system [S], 1994.
- [13] 林湘宁,黄小波,翁汉琰,等. 基于分布参数模型的单相故障单端测距算法[J]. 电网技术,2007,31(9):74-79.
Lin Xiangning, Huang Xiaobo, Weng Hanli, et al. A novel phase comparison algorithm for single terminal fault location based on distributed parameter mode[J]. Power System Technology,2007,31(9):74-79.
- [15] 林富洪,曾惠敏.基于分布参数模型的高压输电线路单相接地故障单端测距方法[J]. 电网技术, 2011,35(4):201-205.
Lin Fuhong, Zeng Huimin. One-terminal fault location of single-phase to earth fault based on distributed parameter model of HV transmission line[J].Power System Technology, 2011,35(4):201-205.

作者简介:

陈昊(1980-),男,江苏南京人,高级工程师,从事220kV及以上继电保护工作。