

一起高阻接地故障时线路差动保护拒动的分析及其改进研究

魏曜, 张尧, 张勇刚, 胡再超

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 通过对一起线路高阻接地故障时电流差动保护拒动的分析, 得出是由于弱故障侧电流启动元件灵敏度不足使得线路两侧差动保护启动元件没有同时动作的原因。因此提出了一种改进的电流差动保护双端零序电流电压辅助启动方法。改进后的辅助启动元件借助线路两侧电流或电压中的故障分量信息, 提高了弱故障侧电流差动保护启动性能。现场故障录波数据回放以及 RTDS 仿真结果显示, 改进后的电流差动保护在高阻接地故障, 尤其是对于在靠近线路一侧故障而远故障侧仅感受到很小的故障量时, 动作性能有明显提升。

关键词: 高阻接地故障; 电流差动保护; 弱故障侧; 双端零序电流电压辅助启动

An analysis and improvement of refusal-operation of line differential protection in high resistance grounding fault

WEI Yao, ZHANG Yao, ZHANG Yong-gang, HU Zai-chao

(Guodian Nanjing Automation Co., Ltd, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper analyzes a refusal-operation of line differential protection in high resistance grounding fault, and works out the reason of no simultaneous operation of differential protection starting element in both sides of line is lack of sensitivity of current starting element in weak fault side. Therefore, an improved auxiliary start-up method of differential protection double-ends zero sequence current and voltage is presented. This new method improves the starting sensitivity of current differential protection in weak fault side through fault component information of current or voltage in both sides of line. Fault recording data replaying and RTDS simulation results show that the protection performance of improved current differential protection is apparently enhanced in high resistance fault, especially in the one-side fault and the side far from the fault only feels the tiny fault component.

Key words: high resistance grounding fault; current differential protection; weak fault side; double-ends zero sequence current and voltage auxiliary start-up

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0127-05

0 引言

电流差动保护已经完全取代纵联方向(距离)保护, 成为线路纵联保护配置的首选。为了防止 CT 断线的影响, 电流差动保护要求线路两侧的保护元件均启动动作才能出口^[1-3]。基于暂态的电流突变量启动元件和基于稳态的零序电流启动元件配合应用, 是高压线路保护最常用的保护启动元件, 理论分析和工程实践表明在系统故障时能有效启动保护。

高压线路发生高阻接地故障时, 基于双端电流

信息的电流差动保护的保护性能要强于其他类型的保护^[4-10]。在超高压和特高压线路上, 保护灵敏度应允许更大的过渡电阻, 如 500 kV 线路要求 300 Ω 、1 000 kV 线路甚至要求 600 Ω , 这对电流差动保护在高阻故障时的动作性能提出了更高的要求。高阻故障的故障点位置、系统运行方式、接地电阻大小会影响线路两侧故障电流的分配, 高阻故障的发生发展形态会影响不同算法原理的保护继电器灵敏度(如故障突变量元件对逐渐发展的高阻故障无能为力)^[11-12]。如若某些情况下线路区内高阻故障时, 造成线路一侧的保护元件无法启动动作, 将会导致电流差动保护拒动。

本文结合一起实际运行系统线路中发生的高阻接地故障, 分析电流差动保护拒动的原因, 并提

基金项目: 国家能源应用技术研究及工程示范项目
(NY20110302-1)

出改进措施，通过 RTDS（实时数字仿真系统）仿真试验证明了改进措施的有效性。

1 事故经过及分析

某地 500 kV 某线路发生 A 相故障，M 侧保护装置的零序 II 段于 2.3 s 后动作跳闸，M 侧开关跳开后，N 侧故障电流助增，两侧的差动保护动作跳闸。

M 侧故障时故障电流突变相对较小，故障电流逐渐变大，故障相电压变化不明显，故障相电压超前电流的角度较小。N 侧故障相电压基本无变化，故障电流非常小，保护装置和故障录波器甚至无法启动。由此故障特征可以判断是线路上发生了高阻接地故障，两侧的故障电流电压波形见图 1、图 2。

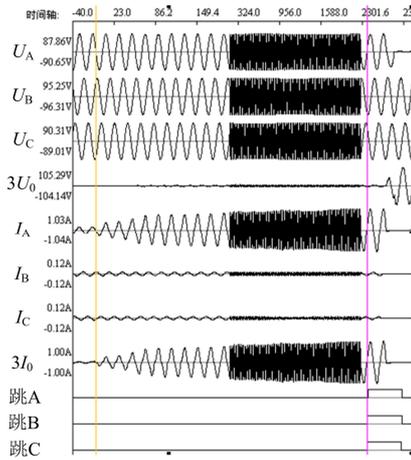


图 1 M 侧故障录波图

Fig. 1 Fault recorder of M side

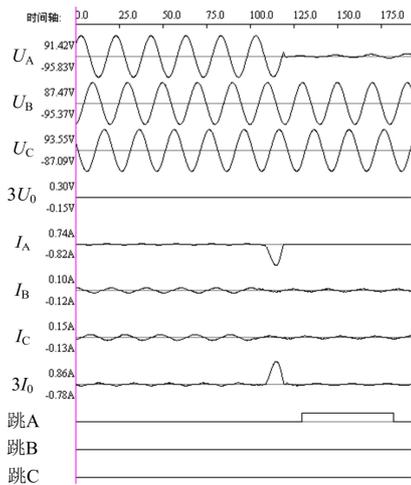


图 2 N 侧故障录波图

Fig. 2 Fault recorder of N side

N 侧零序电流 $3I_0$ 仅 0.04 A（二次值，下同）

小于启动定值，零序电压 $3U_0$ 仅 0.1 V，保护没有启动；M 侧 $3I_0$ 为 0.49 A 大于启动值可以启动保护， $3U_0$ 虽然有 3 V，但由于故障过程中故障电流是逐渐增大的，所以零序电压突变量 $\Delta 3U_0$ 仅 0.4 V，零序电压的变化量不足以强制启动 N 侧，导致电流差动保护无法动作。随着高阻接地故障的持续发展，M 侧故障电流逐渐增大，达到零序 II 段动作定值并在满足延时条件后于 2.3 s 动作跳闸，见图 1。

当 M 侧开关跳开后，故障电流全部从 N 侧流入故障点，电流助增突变使得 N 侧保护启动，差动电流元件满足动作条件，由于此时 M 侧保护仍然处于启动过程中，所以 N 侧电流差动保护可以动作出口，见图 2。

通过对两侧故障录波数据进行计算分析，故障跳闸前 M 侧 A 相电流为 0.69 A、零序电流为 0.66 A，N 侧 A 相电流为 0.03 A、零序电流为 0.04 A，由此计算 A 相差动电流为 0.66 A，制动系数为 0.9 满足动作条件；零序差动电流为 0.62 A，制动系数为 0.88 也满足动作条件。由于 N 侧故障电流远小于 M 侧，因此推断，如果故障初始时刻 N 侧保护能启动，则线路两侧电流差动保护能较早地切除故障。

此次高阻接地故障的特点归纳起来有两点：一是两侧故障电流分配相差极大，其中一侧故障电流太小；二是故障缓慢发展故障电流逐渐增强。前者与故障点位置有关，后者则是由故障性质决定。

2 电流差动保护在高阻接地故障时的启动及动作逻辑现状的分析

考虑到 CT 断线等异常状况可能造成电流差动保护误动作，因此在保护设计规范中明确提出，电流差动保护在两侧启动元件和本侧差动元件同时动作时才允许差动保护出口，且差动电流元件不能单独作为保护的启动元件。

高压线路保护装置一般采用电流突变量启动元件、零序过流启动元件等，对于弱馈线路故障或高阻接地故障，由于会出现一侧故障电流太小（本文对线路故障后故障电流很小的一侧统称为弱故障侧）而无法启动，还辅之以弱故障侧电压降低或零序电压有突变的条件，这对弱馈线路故障及部分高阻接地故障可以取得保护效果。但当发生如本文所述类似发展性高阻接地故障时，仍会因为启动元件灵敏度不足而造成电流差动保护无法动作。如图 3 所示。

忽略线路分布电容等影响，根据零序网络图可求出流入故障点总的零序电流 I_0 为式（1）。

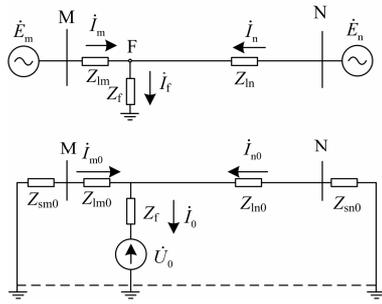


图3 高阻接地故障时的系统示意图及零序网络图

Fig. 3 Circuit diagram of the system and zero sequence circuit with high resistance grounding fault

$$\dot{i}_0 = \frac{-\dot{U}_0}{\frac{(Z_{sm0} + Z_{lm0}) \cdot (Z_{ln0} + Z_{sn0})}{Z_{sm0} + Z_{lm0} + Z_{ln0} + Z_{sn0}} + Z_f} = \dot{i}_{m0} + \dot{i}_{n0} \quad (1)$$

按照分布系数的定义, 两侧零序故障电流分别为

$$\begin{cases} \dot{i}_{m0} = C_{m0} \cdot \dot{i}_0 \\ \dot{i}_{n0} = C_{n0} \cdot \dot{i}_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_{m0} = \frac{Z_{sn0} + Z_{ln0}}{Z_{sm0} + Z_{lm0} + Z_{ln0} + Z_{sn0}} \\ C_{n0} = \frac{Z_{sm0} + Z_{lm0}}{Z_{sm0} + Z_{lm0} + Z_{ln0} + Z_{sn0}} \end{cases} \quad (3)$$

所以, 两侧母线处零序电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_{m0} = -\dot{i}_{m0} \cdot Z_{sm0} = -\dot{i}_0 \cdot C_{m0} \cdot Z_{sm0} \\ \dot{U}_{n0} = -\dot{i}_{n0} \cdot Z_{sn0} = -\dot{i}_0 \cdot C_{n0} \cdot Z_{sn0} \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)、式(2)可以看出, 虽然流入故障点的零序电流大小与过渡电阻及故障点两侧零序阻抗有关, 但分配到线路两侧的零序电流分配关系与过渡电阻无关, 仅与故障点两侧零序阻抗分配情况有关。

$$\frac{\dot{i}_{m0}}{\dot{i}_{n0}} = \frac{Z_{sn0} + Z_{ln0}}{Z_{sm0} + Z_{lm0}} \quad (5)$$

当 $Z_{sn0} + Z_{ln0} \gg Z_{sm0} + Z_{lm0}$ 时, 即故障点靠近 M 侧时, $\dot{i}_{m0} \gg \dot{i}_{n0}$, 此结论与金属性接地故障时一样。此时若过渡电阻 Z_f 较大, 则总零序电流很小, N 侧零序电流就更加小, 达不到启动元件动作灵敏度的要求。

而对于线路两侧母线处的零序电压, 其大小是流经本侧的零序电流与背后系统零序阻抗的乘积, 若背后的系统零序阻抗趋于 0 时, 在零序电流不可能无穷大的情况下, 零序电压值也会趋于 0。虽然

实际运行系统中系统等效零序阻抗不会为 0, 但在高阻故障时由于零序电流很小, 所以母线处零序电压也会很小。另外, 零序电流逐渐增大时零序电压也会变大, 但电压突变量相对很小, 这与故障发展性质有关。

通过以上分析, 高阻故障的故障点位置、系统零序阻抗、过渡电阻大小会影响线路两侧零序电流的分配, 可能会出现两侧零序电流均很小的情况, 也可能出现一侧大一侧小的情况, 那么故障电流小的一侧电流量启动元件无法动作; 高阻故障的发生发展形态会影响不同算法原理的保护继电器灵敏度, 基于突变量算法的元件对逐渐发展的高阻故障无能为力。

从故障对系统稳定和设备安全的影响来看, 如果说一侧在故障后的故障电流非常小, 允许带延时的切除故障, 那么另一侧的故障电流较大却没有快速切除, 则是存在一定风险的。因此有必要深入研究电流差动保护的相关逻辑, 并提出有效的改进方法。

3 高阻接地故障时电流差动保护启动逻辑改进方法

电流差动保护针对弱馈系统故障、高阻故障等情况专门设立的各种辅助启动元件, 总结其特点就是利用双端信息的本侧电流、本侧电压、对侧电流、对侧电压中的至少两个信息, 其出发点也是为了避免 CT 断线等异常状况造成电流差动保护启动并动作。

因此, 提出电流差动保护在高阻故障时的启动逻辑改进思路: ①充分挖掘双端信息, 如双端信息的组合可以是同一侧的电流和电压信息; ②当双端信息仍然无法解决弱故障侧的启动灵敏度时, 可仅用强故障侧电流信息, 但需要能区别于 CT 断线特征。

具体方法是, 在现有电流量启动元件基础上, 增加如下辅助启动条件。如果故障后弱故障侧电流量启动元件灵敏度不足无法动作, 则依靠新增辅助启动条件使得电流差动保护启动。

1) 双端零序电压辅助启动条件

任一侧零序电压满足式(6)或式(7)。

$$3U_0 > U_{0set} + k_1 \cdot U_{0fdmk} \quad (6)$$

$$\Delta 3U_0 > U_{0set} \quad (7)$$

其中: $3U_0$ 是保护采集的零序电压; $\Delta 3U_0$ 是零序电压突变量; 固定门槛 U_{0set} 可取 0.5~1 V(二次值); U_{0fdmk} 为零序电压浮动门槛, 即正常运行期间的不平衡零序电压; 可靠系数 k_1 可取 1.2~1.5。

表中“√”表示保护动作,“×”表示保护不动作。结果表明,改进后的电流差动保护,在线路两侧 K1、K3 点发生高阻接地故障时动作性能提高明显,这与理论分析结果一致。在线路中间 K2 点故障时,由于分配到两侧的零序故障电流相近,可能两侧都无法启动保护,保护性能最差,但考虑到此种情况下两侧零序电流一般较小,对系统危害影响较小。而负荷电流对高阻接地故障的保护性能的影响是,重负荷运行时制动电流增大会降低分相差动继电器性能,零序差动继电器性能不变,但较大的负荷电流会使得本文提出的双端零序电流辅助启动条件的灵敏度降低,从而影响电流差动保护的动作性能。

5 结论

本文提出了一种改进的电流差动保护双端零序电流电压辅助启动方法,借助线路两侧电流或电压中的故障分量信息,大大提高了在靠近线路一侧故障而远故障侧仅感受到很小故障量时的电流差动保护动作性能。采用新方案的保护逻辑在通过仿真及动模试验验证后,将实施于电网已运行保护设备,可有效解决部分高阻接地故障时电流差动保护无法动作的实际问题。

参考文献

- [1] 国家能源局. DL/T 317-2010 继电保护设备标准化设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 文明浩. 线路纵差保护 CT 二次断线判据分析[J]. 继电器, 2006, 34(18): 1-3.
WEN Ming-hao. Analysis of second loop break criterion of CT used in differential protection of transmission line[J]. Relay, 2006, 34(18): 1-3.
- [3] 倪腊琴, 骆敬年. 两起因高铁施工引发的 500 kV 线路事故保护动作行为分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 130-133.
NI La-qin, LUO Jing-nian. Analysis on the 500 kV line protection action in two accidents caused by high-speed railway construction[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 130-133.
- [4] 夏建矿. 关于输电线路光纤电流差动保护的若干问题讨论[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 1-2.
XIA Jian-kuang. Discussions on several problems about the optical fiber differential protection of the transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 1-2.
- [5] 王兴国, 黄少锋. 过度电阻对故障暂态分量的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 29-32.
WANG Xing-guo, HUANG Shao-feng. Impact of fault resistance for fault transient component[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 29-32.
- [6] 王尔寒, 王强, 路光辉, 等. 浅析电压量在高压线路光纤差动保护中的作用[J]. 继电器, 2004, 32(23): 1-2.
WANG Er-han, WANG Qiang, LU Guang-hui, et al. Brief analysis of voltage effect on HV differential protection based on channel of optical fiber[J]. Relay, 2004, 32(23): 1-2.
- [7] 李清波, 刘沛. 光纤纵差保护的应用及灵敏度的提高[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(4): 21-24.
LI Qing-bo, LIU Pei. Applications of fiber differential protection and sensitivity improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(4): 21-24.
- [8] 王晓宇, 伍叶凯, 黄少锋. 检测故障分量的光纤纵联差动保护[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 60-63.
WANG Xiao-yu, WU Ye-kai, HUANG Shao-feng. Optical pilot differential current protection based on fault component[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 60-63.
- [9] 汤俊, 王晓茹. 反映重负荷下高阻故障的稳态量线路差动保护判据[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 72-77.
TANG Jun, WANG Xiao-ru. Current differential protection criterion using steady currents for heavy-load line with high fault resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 72-77.
- [10] 孙立存, 熊炬, 陈照强, 等. 一起 220 kV 线路高阻接地故障跳闸分析[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 58-61.
SUN Li-cun, XIONG Ju, CHEN Zhao-qiang, et al. Analysis of a 220 kV line trip caused by high-resistance earthing[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 58-61.
- [11] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1986.
- [12] 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, 1995.

收稿日期: 2013-05-15

作者简介:

魏 曜 (1979-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统继电保护研发和管理工作; E-mail: yao-wei@sac-china.com

张 尧 (1984-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事电力系统继电保护研发工作;

张勇刚 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护研发工作。