

10 kV 小电阻接地系统接地变压器零序保护误动机理研究

潘艳¹, 李晓明¹, 袁勇¹, 谢江辉², 李彬¹, 孙红²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉供电局, 湖北 武汉 430000)

摘要: 以某变电站 10 kV 小电阻接地系统为背景, 针对屡次出现的接地变压器零序保护误动现象, 建立了 10 kV 配电网的数学模型, 并进行了理论分析和 Matlab 数值仿真, 提出了线路参数不对称及线路非金属性接地两个因素共同作用, 导致 10 kV 小电阻接地系统运行方式下接地变压器零序保护误动的客观原因, 以及系统的设计、安装、管理等人为原因。同时给出了检查 10 kV 出线电缆绝缘情况及建立零序电流监测装置等的相应的防范措施, 以防止此类故障的发生。

关键词: 小电阻接地系统; 零序保护; 故障机理; 10 kV 配电网

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)01-0030-04

1 引言

近年来, 随着城市建设和供电业务的迅速发展, 一些大城市新发展的 10 kV 配电网主要采用地下电缆, 使配电网对地电容电流大大增加。如果采用消弧线圈接地, 则需要较大的补偿容量, 而且要配置多台。此外, 10 kV 配电网线路在运行中操作较多, 消弧线圈的分接头及时调整有困难, 容易出现谐振过电压现象。因此有些供电局的 10 kV 配电网中采用了中性点经小电阻接地运行方式来解决这一问题。但在实际运行中, 某变电站的这种系统多次出现接地变压器零序保护误动现象。本文即针对此类误动情况进行研究。

2 事故情况介绍

该变电站 10 kV 配电网采用双母分段带旁路接线方式。左右段母线各自独立运行, 分别经 Y_0/Δ 接法变压器从 110 kV 侧获得电源。左右两段母线各经一台 Z 型变压器引出中性点后经小电阻接地。此接地变压器上安装了零序过流保护(保护类型为微机保护, 整定值为 54.4 A, 动作时间为 2.0 s); 10 kV 出线上也均安装了零序过流保护(保护类型为电磁型继电器保护, 整定值为 45 A, 动作时间为 1.5 s, 2000 年 7 月 18 日以前为 1.2 s)。接地变压器的零序保护主要是作为 10 kV 出线的后备保护, 其在线路发生接地故障而线路零序保护拒动时动作, 从而退出小电阻接地系统以减小接地电流。但在实际运行中, 多次出现小电阻接地变压器上流经超过保护整定值的电流且零序保护动作, 但经选线未发现线路侧有异常, 后小电阻接地系统成功重合的情况。

经现场调查, 2000 年 7 月 1 日至 2002 年 5 月 26 日间, 两套小电阻接地系统零序过流保护动作次数为: 左段母线上接地变压器零序保护动作 10 次, 右段母线上接地变压器零序保护动作 5 次。其中只有 2001 年 2 月 21 日及 2002 年 5 月 24 日左段母线接地变压器零序保护动作是由于该母线上一条出线未安装零序保护(该线路为新增线路, 仅此一条线路未安装零序保护), 在其发生接地故障时, 小电阻零序保护作为后备保护而正常动作。其它则均为不明原因动作情况。作为后备保护, 如此动作几率是很不正常的。

3 故障机理分析

3.1 故障电流分布

该变电站 10 kV 配电母线上既有经小电阻接地系统, 又仍保留消弧线圈, 10 kV 出线中某条线路单相接地时电容电流的分布情况如图 1 所示(为分析方便起见, 忽略线路电阻和变压器内阻的影响)。单相接地时零序网络则如图 2 所示。图 2 中, U_0 为 I_3 单相接地所产生的等效零序电压源; $X_{b1} = L_{b1}$, 为小电阻接地变压器零序电抗; $X_{b2} = L_{b2}$, 为消弧线圈接地变压器零序电抗; $X_L = L_L$, 为消弧线圈电抗值; $X_c = \frac{1}{C}$, 为 10 kV 出线每相等效对地电容; R 为小电阻接地变压器的接地电阻阻值。

设分布系数为: $K = \frac{I_D}{I_R}$, 即故障点电流与小电阻接地变压器的接地电阻上流过电流之比。则 K 可计算如下:

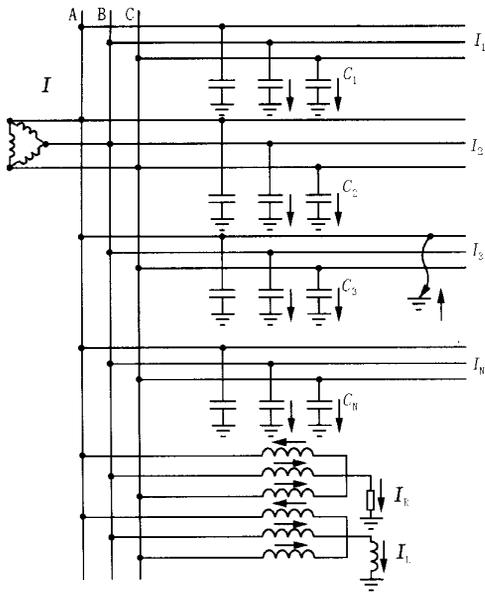


图 1 单相接地故障电流分布图

Fig. 1 Distribution of single-phase ground-fault current

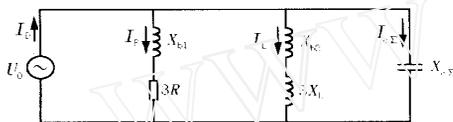


图 2 单相接地零序网络图

Fig. 2 Single-phase ground-fault zero sequence network

$$\begin{aligned}
 &= \left| \frac{I_D}{I_R} \right| = \left| \frac{I_R + I_L + I_C}{I_R} \right| = \\
 &\left| \frac{\frac{U_0}{3R + jX_{b1}} + \frac{U_0}{j3X_L + jX_{b2}} + \frac{U_0}{-jX_C}}{\frac{U_0}{3R + jX_{b1}}} \right| = \\
 &\left| \frac{1}{\frac{3R + jL_{b1}}{3R + j} + \frac{1}{j3L_L + jL_{b2}} + jC} \right| = \\
 &\left| 1 + \frac{3R + jL_{b1}}{j(3L_L + L_{b2})} + jC(3R + jL_{b1}) \right|
 \end{aligned}$$

因为有: $L_{b2} \ll L_L$,

所以可忽略 L_{b2} , $3L_L + L_{b2} \approx 3L_L$, 于是有:

$$\left| \left(1 + \frac{L_{b1}}{3L_L} - \frac{2C}{3L_L} L_{b1} \right) + j \left(3RC - \frac{R}{L_L} \right) \right|$$

已知: $R = 16 \Omega$, $L_{b1} = 4.4 \text{ mH}$, 同时根据实测 10 kV 全网电容电流值得:

$$C = 0.016 \text{ S}$$

又左段母线 1# 消弧线圈有: $L_L = 111.193 \text{ mH}$; 右段母线 2# 消弧线圈有: $L_L = 66.157 \text{ mH}$ 。

将上述已知量代入 的表达式, 可求得: 左段母线: $k_1 = 1.13$; 右段母线: $k_2 = 1.09$ 。两电流分布系数均小于接地变压器与线路零序保护整定值之比 (1.2)。

因此, 若母线上某一出线发生单相接地故障使接地变压器零序保护动作的零序电流大小为 I_r 时 (已知 $I_r > 54.4 \text{ A}$), 流过线路的零序电流为:

$$I_d = I_r \cdot k_1 = 1.019 I_r > 1.019 \times 54 > 45 \text{ A}$$

可见当故障电流启动了接地变压器零序保护时, 它也同时启动了线路零序保护。从以上分析得出结论: 电网当前整定值与故障电流分布系数决定了, 当某一种接地故障发生时, 故障电流若是足以启动零序保护, 则必然会同时启动线路零序保护和接地变压器零序保护, 然后根据保护整定时间所带来的选择性 (线路零序保护整定时间为 1.5 s, 接地变压器零序保护整定时间为 2.0 s) 线路先动作。因此在正常情况下, 出现接地变压器零序保护误动的可能性很小。

3.2 主要故障原因

从 3.1 条的分析中知道本文所探讨的零序保护误动现象在正常情况下发生的可能性很小。但系统本身若存在参数不对称的情况 (对于电缆线路来说, 由于安装质量等问题, 在电缆接头处绝缘下降造成参数不对称的情况是很常见的), 则 10 kV 配网中存在着“参数不对称”和“接地故障”这两个“零序电压源”。由分布系数的计算可知故障线路上的零序电流与接地变压器上零序电流之比接近于 1:1, 于是在两个零序电压源的作用下, 接地变压器上流过两个较大的零序电流的叠加, 而故障线路上则只是本身接地电流与线路参数不对称所带来的另一个较小的电容电流的叠加, 不对称线路上同样是一个较大零序电流与较小电容电流的叠加, 于是便可能出现线路上零序电流未达到保护整定值, 而接地变压器上零序电流达到保护整定值的情况。

下面通过等效电路进行故障原因分析。

设 10 kV 出线中线路 1 某相绝缘下降造成对地电容参数不对称, 线路 2 非金属性接地 (如经树枝等物体瞬时接地时), 两零序电压源分别作用如图 3 和图 4。

其中, U_{01} 、 U_{02} 分别为线路 1 对地电容不对称和线路 2 发生接地故障所产生的零序电压源; X_{11} 、 X_{12} 分别为线路 1, 2 的等值对地零序电抗; 其它元件标

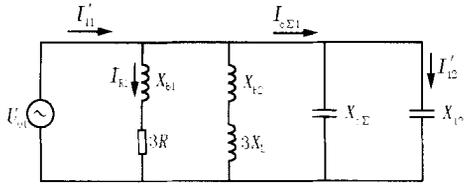


图3 线路1对地电容不对称等值零序网络图

Fig. 3 Zero sequence network when earth capacitances of line 1 are not balanced

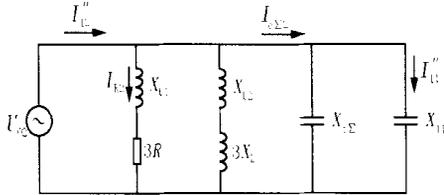


图4 线路2发生接地故障等值零序网络图

Fig. 4 Zero sequence network when single-phase ground fault happens in line 2.

示含义同 3.1 节。将 3.1 节所求参数值代入有：

$$\frac{I_{C-2}}{I_{R2}} = \frac{I_{C-1}}{I_{R1}} = \frac{\sqrt{(3R)^2 + X_{b1}^2}}{X_C} = \frac{48.2}{202 \sim 404} = 0.119 \sim 0.238$$

线路及接地变压器的电流应为两种情况下电流的叠加。当出线数 $n = 10$ ，并应用 $I_D = |I_D| / |I_R|$ 有：

$$I_R = I_{R1} + I_{R2}$$

$$I_{11} = I_{11} + \frac{1}{n-1} I_{C-2} = I_{R1} + (0.119 \sim 0.238) I_{R2}$$

$$I_{12} = I_{12} + \frac{1}{n-1} I_{C-1} = I_{R2} + (0.119 \sim 0.238) I_{R1}$$

显然，此时接地变压器上的电流和故障线路上的电流值不再像前一节所分析那样接近于 1:1 的比例，而是有可能存在流经接地变压器的电流大于线路电流的 1.2 倍的情况（接地变压器的零序电流保护整定为线路的 1.2 倍）。这样，就可能出现线路 1 和线路 2 的电流未超过保护整定值而接地变压器电流超过其保护整定值的情况，因此接地变压器就会误动作。

3.3 数值仿真

对该变电站 10 kV 系统进行的 Matlab 仿真也验证了上述原因的可能性。假设左段母线上一条出线某相对地电容与另两相不等且为另两相的 K 倍；这时另一条线路发生非金属性接地故障且接地电阻为 R 。图 5、6 中给出了一种仿真得到的在两种情况

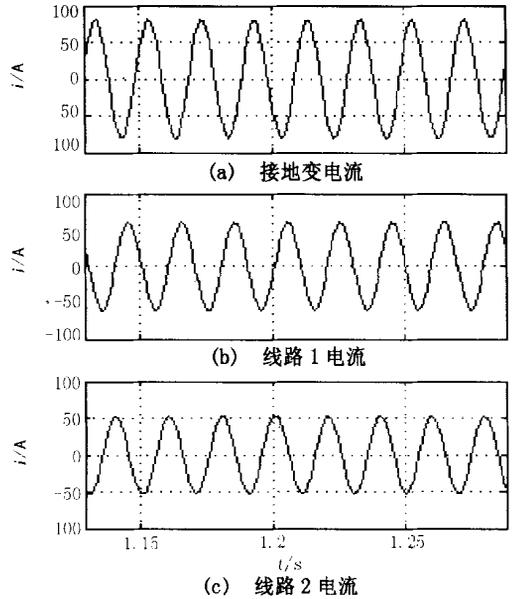


图5 零序电流波形

Fig. 5 Waveform of zero sequence currents.

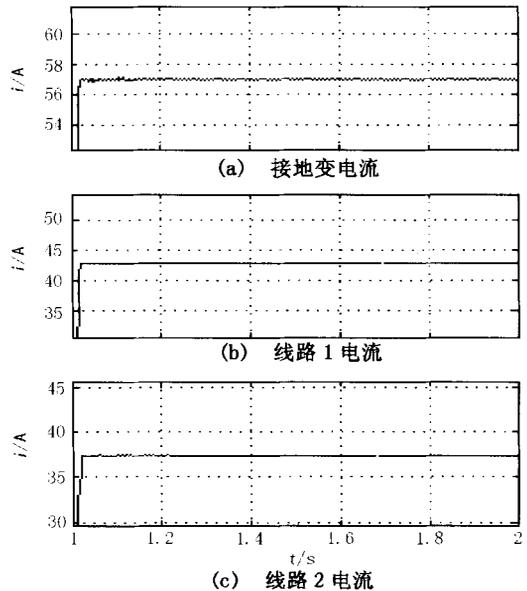


图6 零序电流有效值

Fig. 6 Effective value of zero sequence currents.

同时作用下满足误动条件的情况（即线路零序电流未达到 45 A 的整定值，而变压器零序电流达到 54.4 A 的整定值）。线路 1 的 a 相发生非金属性接地且接地电阻 $R = 85 \Omega$ ；线路 2 的 a 相对地电容不同于另外两相 $C_a = 36 \mu F$ ， $C_b = C_c = 1.6 \mu F$ 。上述情况下接地变压器零序电流 I_r ，线路 1 零序电流 I_{11} ，线路 2 零序电流 I_{12} 的波形图及其对应有效值图分别如图 5、6 所示。图 7 给出了在线路 1 接地电阻 $R = 85 \Omega$ 时，零序电流随线路 2 不对称度 K 变化的

曲线;图8则为线路2不对称度 $K=21$ 时,零序电流随线路1接地电阻变化的曲线。

由仿真图形可见,仿真计算验证了在前节中所提出的误动原因的可能性。

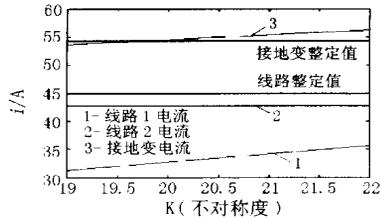


图7 $R=85$ 时零序电流随 K 变化曲线

Fig. 7 Curves of zero sequence currents when $R=85$

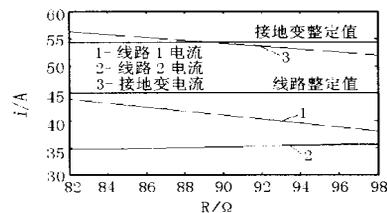


图8 $K=21$ 时零序电流随 R 变化曲线

Fig. 8 Curves of zero sequence currents when $K=21$.

3.4 其它故障原因及防范措施

(1) 线路零序电流互感器接线不正确

调查到的2000年7月至2002年4月间该变电站10 kV 馈线故障统计表明,有几条线路装设了零序保护但其零序保护从未动作。因此可能存在有线路零序保护故障而保护不能正确动作的可能,于是便可导致线路瞬时接地故障而其零序保护拒动从而接地变压器零序保护作为后备保护动作跳闸。由于是瞬时故障,运行人员在选线时便未能发现线路异常,造成接地变压器零序保护误动的假象。因此建议对满足以上条件的线路的零序电流互感器进行检查,其中又应重点检查带有裸线架空线而更可能发生瞬时故障的线路,以防止出现因零序电流互感器接线错误引起的零序电流值检测不正确问题。

(2) 线路零序电流互感器变比过小

该变电站10 kV 出线零序电流互感器的变比为150/5,而实际上线路单相接地电流可达近300 A(我们调查到的线路单相接地电流就曾达288 A)。因此故障零序电流很大时可能会致使线路零序电流互感器极度饱和,而多次处于饱和状态可能造成零序电流互感器损坏,从而造成线路零序保护拒动。因此建议增大线路零序电流互感器变比。

4 结论

即使电缆的安装及老化等造成的电缆对地电容参数不对称和线路瞬时非金属性接地故障分别单独作用产生的零序电流不足以使线路和接地变压器零序保护动作跳闸,但两者叠加起来产生的零序电流却可能使接地变压器零序电流保护动作跳闸。因此,建议对10 kV 出线电缆绝缘情况进行全面检查,减少电缆参数不对称的情况。为了便于故障分析和定位,建议安装一套监测装置,监测接地变压器零序电流、线路零序电流及母线零序电压等。通过该监测装置,可以了解零序电流的分布情况、线路参数对称情况和零序保护动作情况。此外,对零序保护从未动作过的线路的零序电流互感器进行检查,重点是检查接线和变比。

参考文献:

- [1] 曹承宗. 城网10kV系统中性点接地方式的探讨[J]. 华北电力技术, 1995, (12): 28~30.
- [2] 赵卫东 孙仲奇. 中性点经电阻接地的技术[J]. 高电压技术, 1996, (9): 19~21.

收稿日期: 2002-07-18 修回日期: 2002-09-02

作者简介:

潘艳(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

李晓明(1955-),男,教授,长期从事电力系统及其自动化专业的科研与教学。

Study on the misoperation mechanism of zero sequence protection of grounding transformer on low resistance grounded 10 kV system

PAN Yan¹, LI Xiao-ming¹, YUAN Yong¹, XIE Jiang-hui², LI Bin², SUN Hong²

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Power Supply Bureau, Wuhan 430000, China)

Abstract: This paper is for low-resistance grounded 10kV substation. The misoperation of zero sequence protection in grounding transformer that happened repeatedly was analysed theoretically. Objective causes and artificial causes were addressed. Corresponding suggestions were also presented in this paper to avoid this kind of misoperation.

Key words: low-resistance grounded system; zero sequence protection; misoperation mechanism; 10kV distribution network