

# 小电流接地系统单相断线加接地故障的分析

张慧芬<sup>1,2</sup>, 潘贞存<sup>1</sup>, 桑在中<sup>1</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** 在 6~35 kV 的中低压配电系统中, 单相断线加接地的复杂故障情况时有发生。以负载侧降压变压器为例, 分接地点在断口的电源侧和负载侧两种情况, 对这种复杂故障进行了分析, 导出了系统各点处电压电流的计算公式, 绘出了电压的相量图, 得出了一些重要的结论。利用静态模拟线路进行了模拟实验, 验证了分析结果的正确性。

**关键词:** 小电流接地系统; 断线; 接地; 故障分析

**中图分类号:** TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0006-04

## 0 引言

与 110 kV 及以上的高压、超高压输电线路相比, 6~66 kV 小电流接地系统的输电线路具有杆塔矮、导线细、走线地理环境复杂、易受外力破坏(包括犯罪分子盗割)等特点, 因而导线断落事件时有发生。导线断落后, 会形成断线加接地的复杂故障。根据断口处导线落地侧的不同, 单相断线加接地故障可以分为断口两侧的导线都落地、落地点在断口的电源侧和落地点在断口的负荷侧三种情况。由于断口两侧的导线都落地时, 断口两侧会通过大地形成通路, 此时系统中电压电流的分布情况与发生不断线的单相接地故障时完全相同, 本文将不再分析; 另外两种情况下, 系统中电压、电流的分布情况会有较大变化, 本文将分别对这两种故障进行分析, 并利用静态模拟线路进行模拟实验, 验证分析结果的正确性。

### 1 导线落地点在断口电源侧时的故障分析

导线落地点在断口电源侧的故障网络如图 1 所示。

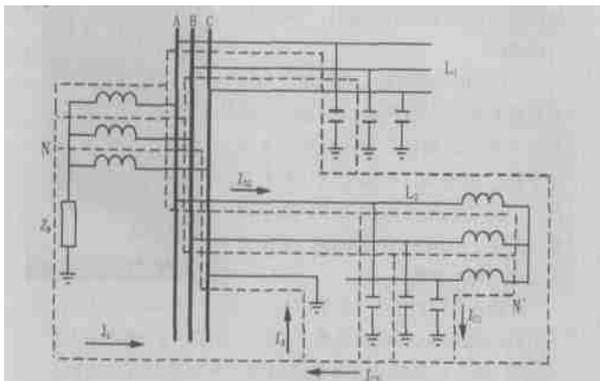


图 1 导线落地点在断口电源侧的故障网络

Fig. 1 Fault network with grounding point in supply side

图中将所有非故障线路归并为一条, 用  $L_1$  表示, 故障线路用  $L_2$  表示。现分别分析断口前和断口后电压电流的分布情况。

由于 C 相接地点的存在, 断口电源一侧各相对地电压与无断线情况下的 C 相单相接地情况完全一样, 电压相量图<sup>[1]</sup>如图 2(a) 所示。

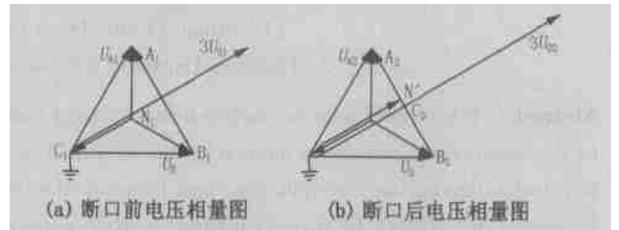


图 2 断口两侧电压相量图

Fig. 2 Voltage phasors of supply side and load side in case one

显然这时有:

$$\begin{cases} U_{A1} = \sqrt{3} E_A e^{-j30^\circ} \\ U_{B1} = \sqrt{3} E_B e^{j30^\circ} \\ U_{C1} = 0 \\ 3U_{01} = -3E_C \end{cases} \quad (1)$$

对于断口的负荷一侧, 非断线相对地电压与电源一侧一样。若不计断线相分布电容电流在负荷变压器绕组上产生的微小压降, 则断线相上任一点都与负荷变压器中性点 N 同电位。C 相断线后负荷变压器中性点 N 变为 A、B 相间电压的中分点, 此时电压相量图如图 2(b) 所示。此时:

$$\begin{cases} U_{A2} = \sqrt{3} E_A e^{-j30^\circ} \\ U_{B2} = \sqrt{3} E_B e^{j30^\circ} \\ U_{C2} = U_N = -1.5 E_C \\ 3U_{02} = -4.5 E_C \end{cases} \quad (2)$$

可见, 在断口的负荷侧, 三相对地电压都会升

高,非故障相升高至原电压的 $\sqrt{3}$ 倍,故障相升高至原电压的1.5倍,而零序电压也达到了相电压的1.5倍。若负载侧装有电压互感器PT,则其开口三角输出电压将达到单相接地时输出电压的1.5倍,即为150V,这对接在其上的二次设备的绝缘可能产生危害。

负荷变压器绕组上的电压为:

$$\begin{cases} U_A = U_{A2} - U_N = \frac{\sqrt{3}}{2} E_A e^{j30^\circ} \\ U_B = U_{B2} - U_N = -\frac{\sqrt{3}}{2} E_A e^{j30^\circ} \\ U_C = U_{C2} - U_N = 0 \end{cases} \quad (3)$$

也就是说,断线加接地的情况下,尽管负荷变压器处各相对地电压都升高,但变压器绕组上的电压却会降低,断线相电压变为0,两非故障相的电压降至原电压的 $\sqrt{3}/2$ ,且相位相反,这将使该变压器无法对负荷正常供电。

另外,相间电容、断线相的分布电容和负荷绕组的电感串联,可能发生谐振,产生谐振过电压并使负载变压器三相绕组的电压相序与电源相反。现场运行中曾发生过小容量电动机反转现象<sup>[2]</sup>。

故障相的电流为残余电流 $I_d$ ,是中性点对地电流和分布电容电流的向量和,其大小和相位取决于电容电流的大小和补偿的脱谐度。在只有单相接地而无断线的情况下,全系统接地相电压都降为0,所以接地相不提供电容电流。而在图1所示的断线加接地情况下,非故障相提供的电容电流与单纯接地情况一样,因故障相断口后电压不为0,所以它也会提供一部分电容电流(图1中 $I_{C1}$ ),使总的电容电流 $I_{C\Sigma}$ 增大,因而故障点的残流 $I_d$ 、故障线路的零序电流 $I_{02}$ 都会发生变化。

对中性点不接地系统,故障相的残流 $I_d$ 等于总的电容电流 $I_{C\Sigma}$ 。  $I_{C\Sigma}$ 增大,故障相残流也增大,故障线路的零序电流 $I_{02}$ 也增大。对反映零序无功电流的接地选线保护没有不利影响;对注入法选线保护,由于故障线路中电容电流的增大,而不利于注入信号的检测,电容的分流也将增大,使注入效率降低。

对消弧线圈接地系统,一般工作在过补偿状态,过补偿度为5%~10%,脱谐度为负。电容电流的增加,故障相残流增大,故障线路的零序电流 $I_{02}$ 也增大。过补偿度减小,即脱谐度(为负)增大,合谐度减小,容易出现系统谐振的危险<sup>[3]</sup>,需增加消弧线圈的电感量,防止谐振的发生。对欠补偿,脱谐度

(为正)也增大,合谐度减小,欠补偿度增大,没有谐振的危险,但不利于电弧的熄灭。对反映零序电流五次谐波和反映有功量的选线保护没有不利影响;对注入法选线保护的影响与中性点不接地系统的情况相同。

## 2 导线落地点在断口负荷侧时的故障分析

导线落地点在断口负荷侧的故障网络如图3所示。

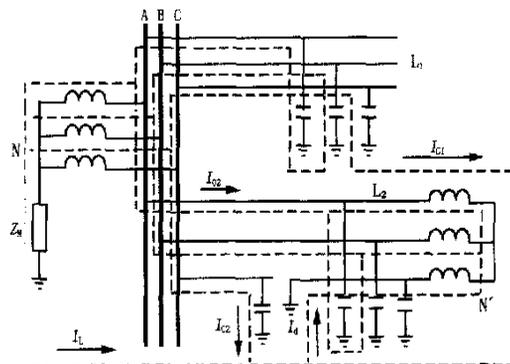


图3 接地点在断口负荷侧时的故障网络

Fig. 3 Fault network with grounding point in load side

由于断口的负荷侧接地,在不计接地点的残余电流 $I_d$ 在故障相导线和负荷变压器绕组压降的情况下, $N$ 点的对地电位下降为0,而因C相断线, $N$ 点位于AB相间电压的中分点,所以断口的负荷侧各相电压的相量图如图4(a)所示。

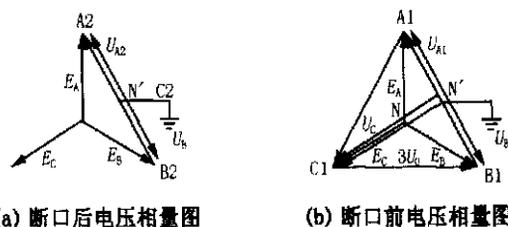


图4 断口两侧电压相量图

Fig. 4 Voltage phasors of supply side and load side in case two

可见,在此情况下,负荷侧各相对地电压为:

$$\begin{cases} U_{A2} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_A e^{j30^\circ} \\ U_{B2} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_B e^{-j30^\circ} = -\frac{\sqrt{3}}{2} E_A e^{j30^\circ} \\ U_{C2} = U_N = 0 \\ 3U_{02} = U_{A2} + U_{B2} + U_{C2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

再来看断口的电源侧的情况,两非故障相的对地电压与负荷侧情况完全一样。对于故障相,其对

地电压的情况取决于电源变压器的感应电动势,相量图如图 4(b) 所示。此处各相对地电压为:

$$\begin{cases} U_{A1} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_A e^{j30^\circ} \\ U_{B1} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_B e^{-j30^\circ} = -\frac{\sqrt{3}}{2} E_A e^{j30^\circ} \\ U_{C1} = U_{NN} + E_C = 1.5 E_C \\ 3 U_{01} = U_{A1} + U_{B1} + U_{C1} = 1.5 E_C \end{cases} \quad (5)$$

即在这种故障情况下,整个系统非故障相的对地电压均降至原相电压的  $\sqrt{3}/2 = 0.866$  倍;断口后的故障相对地电压、零序电压均为 0,断口前故障相对地电压不仅不会降低,反而会升高至原相电压的 1.5 倍,断口前的零序电压为相电压的 0.5 倍。

负荷变压器绕组上电压的情况、不计电容电流时负荷电流的分布情况等均与接地点在电源侧时类似,不再赘述。

另外,和电源侧导线接地类似,相间电容、断线相的分布电容和负荷绕组的电感串联也可能发生谐振,而且断线后导线在负荷侧接地要比电源侧接地更易发生谐振<sup>[4]</sup>。

断口电源侧,非故障相对地电压降至相电压的  $\sqrt{3}/2$  倍,且相位相反,断线相对地电压升高至相电压的 1.5 倍,将导致根据电压大小选择故障相的选线装置误动。零序电压为相电压的 1/2 倍,使中性点的补偿电流降为单纯接地情况下相应量的 1/2,由于两非故障相的电容电流相互抵消不提供零序电流,故障线路的出口零序电流仅为断线相断口前线路的分布电容电流,约为单纯接地时的 0.4 倍,对反映零序电流的接地选线保护有较大的影响。对注入法选线保护,因信号无法注入而失效。对基于有功量的选线保护没有不利影响。

对消弧线圈接地系统,过补偿时,电容电流的减小,使故障相残流也减小,脱谐度(为负)减小,合谐度(大于 1)增大,没有谐振的危险,但不利于电弧的熄灭。欠补偿时,脱谐度(为正)也减小,合谐度(小于 1)增大容易出现系统谐振的危险,需减小消弧线圈的电感量,防止谐振的发生。

### 3 静态模拟实验

为了验证上述分析的正确性,利用静态模拟线路对以上两种复杂故障情况进行了模拟实验,实验接线如图 5 所示。

令模拟线路的 C 相断线,分别将断口的电源侧( $d_1$  点)和负荷侧( $d_2$  点)短接至模拟大地,测试出

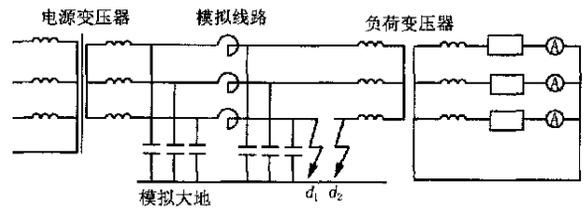


图 5 静态模拟实验接线图

Fig. 5 Connection diagram of the static simulation test

电源变压器出口对地电压  $U_1$ 、负荷变压器入口对地电压  $U_2$ 、负荷变压器绕组电压  $U_3$  和负荷电流,测试结果与上述理论分析的情况完全吻合,证明了理论分析的正确性。

### 4 结论

中低压电网由于杆塔低、导线细、地理环境复杂,断线加接地的复杂故障现象时有发生,本文通过理论分析和模拟实验,弄清了这种情况下系统中各处电压电流的分布规律,得到了如下的结论:

1) 接地点在断口电源侧的情况下,电源侧各相对地电压、零序电压均与单纯单相接地情况完全相同,即故障相降为 0,非故障相升高至原对地电压的  $\sqrt{3}$  倍,零序电压升高至相电压;负荷侧非故障相电压

与电源侧相同,故障相对地电压升高至相电压的 1.5 倍,零序电压将升高至相电压的 1.5 倍,这将对接于负荷变压器中性点处的消弧线圈以及电压互感器 PT 开口三角上的二次设备的绝缘产生不利影响,还会使整个系统的脱谐度发生较大变化。

2) 接地点在断口负荷侧的情况下,电源侧非故障相对地电压不但不会升高,反而会降至相电压的 0.866 倍,且两非故障相电压相位相反,故障相对地电压不但不会降低,反而会升高至相电压的 1.5 倍,零序电压为相电压的 0.5 倍,这将会导致根据电压大小选择故障相别的选相装置的错误动作;负荷侧非故障相电压与电源侧相同,故障相对地电压降为 0,零序电压也为 0,装在此处的绝缘检查装置将不会动作,消弧线圈也不会输出电流。

3) 无论接地点在断口的哪一侧,无论有无接地,断线相负荷变压器绕组上的电压都为 0,非断线相负荷变压器绕组上的电压降至原电压的  $\sqrt{3}/2$ ;负荷变压器断线相原副边绕组中电流都为 0,对负荷的正常供电将产生严重影响。

## 参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月(YAO Huan-nian, CAO Mei-yue). 电力系统谐振接地(Resonance Grounding of Power Systems) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),2000.
- [2] 刘万顺(LIU Wan-shun). 电力系统故障分析(Electric Power System Fault Analysis) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1990.
- [3] 李福寿(LI Fu-show). 中性点非有效接地电网的运行(Operation of Neutral Indirectly Grounded Power Network) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press),1993.
- [4] 方瑜(FANG Yu). 配电网过电压(Distribution Network Overvoltage) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press),1994.

收稿日期: 2003-12-23; 修回日期: 2004-01-17

## 作者简介:

张慧芬(1970-),女,硕士,讲师,主要研究方向为电力系统配电网故障检测; E-mail: zhf7777@163.com

潘贞存(1962-),男,教授,博导,研究方向为电力系统继电保护与自动监控技术;

桑在中(1938-),男,教授,研究方向为电力系统继电保护与自动监控技术。

### Analysis of complex line breaking and grounding fault in the power system with neutral point indirectly grounded

ZHANG Hui-fen<sup>1,2</sup>, PAN Zhen-cun<sup>1</sup>, SANG Zai-zhong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Information Science and Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China)

**Abstract:** The complex line breaking and grounding fault is one type of fault that may frequently occur in the 6~35kV distribution system. Taking the distribution system with the load side connected to a step-down transformer as an example, and considering the two situations of grounding point in supply side and load side, the complex fault is analyzed in this paper. The formulas and phasor diagrams of voltages and currents in different points are deduced, and some important conclusions are reached. A static simulation test is made and the correctness of above analysis is proved by the test results.

**Key words:** power system with neutral point indirectly grounded; line breaking; grounding fault; fault analysis

## 许继集团获中国机械工业联合会表彰

8月28~29日,“全国机械行业文明单位表彰暨中国机械政研会20周年纪念大会”在江苏省徐州市举行。会上,许继集团有限公司被表彰为“全国机械行业文明单位”和“全国机械行业企业文化建设先进单位”,王纪年总裁荣获“全国机械行业思想政治工作和企业文化建设突出贡献奖”。

中国机械工业联合会、国资委监事会、中国机械政研会、江苏省政府、徐州市政府有关领导以及150多家机械行业企事业单位的代表221人出席了这次表彰大会。

大会对106个“2001~2003年度全国机械行业文明单位”、40个“全国机械行业企业文化建设先进单位”、30个“全国机械行业优秀政研会”和28名“全国机械行业思想政治工作和企业文化建设突出贡献先进个人”进行了隆重表彰。

会上,中国机械工业联合会副会长薛德林作了《全国机械行业文明单位创建工作》的报告,对三年来全行业两个文明的建设进行了全面回顾,对下一步工作的指导思想和目标作了安排部署;中国机械政研会常务副理事长杨淑云作了题为“根在研究,重在应用,贵在创新”的报告,回顾了对中国政研会20年的成长历程,阐述了今后一个时期的工作思路和要求。

徐工集团、特变电工、东风汽车公司和东方汽轮机厂四家单位在会上作了经验交流。

中国机械工业联合会党委书记、会长于珍作了题为“坚持以人为本,树立科学发展观,促进两个文明建设协调发展”的总结报告。在报告中,于珍会长既总结了近年来全国机械行业两个文明建设取得的可喜成绩,又阐述了当前行业两个文明建设面临的形势及存在的问题。并就如何进一步搞好机械行业两个文明建设提出了具体的希望和要求。