

小电流接地系统的非短路故障分析

余水忠, 潘 兰

(福建省建阳市供电有限公司, 福建 建阳 354200)

摘要: 小电流接地系统的非短路故障有: 单相失地、电压互感器熔丝熔断、铁磁谐振、单电源线路断线等, 从这些故障的负荷电流和馈线的零序电流及母线相电压、线电压、零序电压五个量进行定性与定量分析, 得出各类非短路故障的判别方法。针对各类非短路故障, 提出相应的技术措施, 以提高处理这些故障的准确性和及时性, 从而缩短电网故障运行时间, 减少因前述故障造成的人身和设备事故。

关键词: 单相失地; 熔丝熔断; 谐振; 断线

Analysis of not-short circuit faults in neutral indirectly grounding system

YU Shui-zhong, PAN Lan

(Jianyang Electric Power Supply Company, Jianyang 354200, China)

Abstract: Not-short circuit faults in neutral indirectly grounding system includes single-phase earth fault, fusing of fuse of PT, ferroresonance, single source line disconnection, et al. This paper proposes a method to identify different not-short circuit faults by analyzing load current of faults, zero sequence current of line and phase-voltage, line-voltage, zero sequence voltage of bus-voltage in both quantitatively and qualitatively way. According to the various not-short faults, this paper takes corresponding measures and deals with these fault accurately and timely so as to shorten the operating time of grid fault and reduce the person and equipment accidents which are made by the above faults.

Key words: single-phase earth fault; striking fuse; resonance; disconnection fault

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0074-05

0 引言

小电流接地系统故障有: 三相短路、二相短路、二相不同地点接地短路、单相失地、电压互感器熔丝熔断、铁磁谐振、线路断线等。短路故障由保护动作跳闸实现对设备的保护, 其余故障其继电保护无法实现或无需出口跳闸, 需通过母线电压变化对各类故障进行判定。

1 单相失地

小电流接地系统在正常运行时, 网络各相对地电压是对称的, 其大小为相电压; 如三相对地电容相等, 则各相对地电容电流对称且平衡, 三相电容电流向量和为零, 地中没有电容电流通过, 中性点对地电压为 0。当一相失地后其电导不能忽略, 中性点对地电压值升高, 消弧线圈的电流与三相电容电流之向量和通过接地电阻产生电压降, 各相对地电压发生变化。

1.1 中性点对地电位随过渡电阻 R_{jd} 变化的轨迹

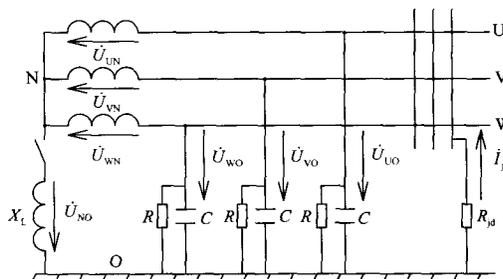


图 1 U 相失地的等值电路图

Fig.1 Equal circuit figure of U-phase earth fault

图 1 为小电流接地系统 U 相经过渡电阻 R_{jd} 接地时的电流和电压。由于正常相对地漏电导比对地电容的电纳小得多, 可忽略不计。电源的三相电势对称时, 地对中性点电压:

$$\dot{U}_{ON} = \frac{\dot{U}_{UN}(g_d + j\omega C) + \dot{U}_{VN}(j\omega C) + \dot{U}_{WN}(j\omega C)}{g_d + j\omega C + j\omega C + j\omega C - j(1/\omega L)} = \frac{\dot{U}_{UN}}{1 + j(3\omega R_{jd}C - R_{jd}/\omega L)} \quad (1)$$

由式(1)可见, 位移电压 \dot{U}_{NO} 的始端轨迹是以接地相 \dot{U}_{UN} 为直径的圆周, 如图 2 所示。中性点电位与补偿度的关系如下:

① 全补偿, $3\omega C = \frac{1}{\omega L}$ (此状态中性点电位由各相对地的漏电导大小决定)。

② 欠补偿, 地电位 0 在右半圆周。

③ 过补偿, 地电位 0 在左半圆周。

中性点电位与 R_{jd} 的关系如下:

① 当 $R_{jd} = 0$ 时, $\dot{U}_{NO} = -\dot{U}_{UN}$, 故障相 $U_{UO} = 0$, 非故障相 $U_{VO} = U_{WO} = \sqrt{3}U_{UN}$ 。

② 当 $R_{jd} \rightarrow \infty$ (不接地) 时, $\dot{U}_{NO} = 0$ 。

③ 当 R_{jd} 在 $0 \sim \infty$ 之间变化时, 地电位 0 在圆周上移动, \dot{U}_{NO} 在 $0 \sim \dot{U}_{UN}$ 之间变化。

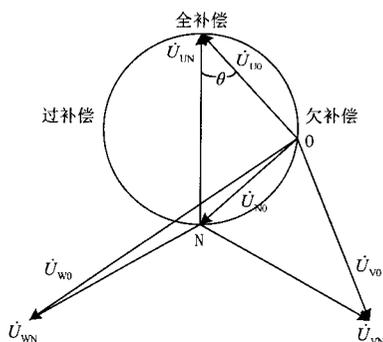


图 2 U 相失地时, 中性点电位随 R_{jd} 变化的轨迹

Fig.2 With the U-phase earth fault, neutral potential locus by R_{jd} changing

1.2 过渡电阻 R_{jd} 对判断接地相的影响

由图 2 及式(1)可知:

$$\sin \theta = \frac{U_{NO}}{U_{UN}} = \frac{1}{1 + j(3\omega CR_{jd} - R_{jd}/\omega L)} \quad (2)$$

1.2.1 中性点不接地系统(中性点消弧线圈刀闸断开), R_{jd} 对判断接地相的影响

① 当 $X_C > \sqrt{3}R_{jd}$ 时, $\theta > 30^\circ$, 故障相对地电压最小。

② 当 $X_C = \sqrt{3}R_{jd}$ 时, $\theta = 30^\circ$, 故障相对地电压

$$U_{UO} = U_{VO} = \frac{\sqrt{3}}{2}U_{UN}, \quad U_{WO} = 1.5U_{UN}。$$

③ 当 $X_C < \sqrt{3}R_{jd}$ 时, $\theta < 30^\circ$, 故障相对地电压 U_{UO} 大于滞后相的电压 U_{VO} , 即

$$U_{VO} < U_{UO} < U_{WO}, \quad \text{且 } U_{WO} < 1.5U_{UN}。$$

从式(2)还可看出, 在绝缘监察整定的开口三角电压一定的情况下(一般为 $10 \sim 15$ V), 随着系统对地电容增大, 其反映绝缘下降的能力也下降。

1.2.2 中性点经消弧线圈接地系统

消弧线圈接地系统(中性点刀闸合上) U 相经过渡电阻 R_{jd} 接地的电压特点与不接地系统一样;

但 $\theta < 30^\circ$, 故障相对地电压 U_{UO} 大于超前相的电压 U_{VO} 。消弧线圈适当的补偿不仅可减小接地点的电流, 而且提高其反映绝缘下降的能力。

1.3 非故障相对地电压大于 $\sqrt{3}$ 倍相电压的范围和最大值

由图 3 可知非故障相对地电压大于 $\sqrt{3}$ 倍相电压的范围在以 \dot{U}_{WN} 为圆心 U_{WN} 为半径的圆与 $\frac{1}{2}\dot{U}_{UN}$ 为圆心 $\frac{1}{2}U_{UN}$ 为半径的圆相交的两交点间。非故障相电压最大值为:

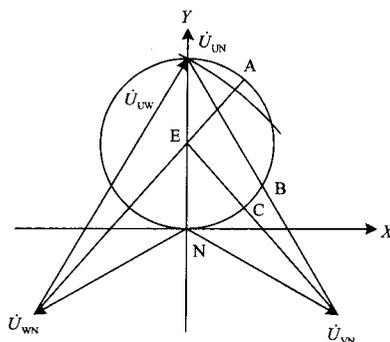


图 3 U 相失地时, 非故障相对地电压极限点

Fig.3 With the U-phase earth fault, limit point of not-fault phase voltage to earth

$$U_{wo,max} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{21}}{14} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{7 + \sqrt{28}}{14} + \frac{1}{2}\right)^2} U_{UN} \approx 1.82U_{UN}$$

1.4 非故障相对地电压小于故障相电压的范围和最小值

由图 3 可知, $\theta < 30^\circ$ 时, $U_{VO} < U_{UO}$ 。非故障相电压最小值为:

$$U_{vo,min} = \left(\sqrt{\left(0 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)^2} - \frac{1}{2}\right) U_{UN} = 0.82U_{UN}$$

1.5 零序电流

线路失地时，在零序电压的作用下，各非故障线路的零序电流均增大，但故障线路的零序电流变化更为明显。

2 电压互感器引起的铁磁谐振

2.1 工频铁磁谐振

工频铁磁谐振是电压互感器的励磁电抗与系统每相对地电容的容抗相近时产生的，其表征现象为：一相或两相电压（等值）升高且超过线电压，另两相（等值）或一相电压降低，线电压对称且大小不变，一相升高时开口三角电压小于 100 V，两相升高时开口三角电压大于 100 V。一般在空载母线时发生，投入一条线路将自动消失。

2.2 分频铁磁谐振

分频铁磁谐振主要的表征现象为：三相电压同时升高且同时摆动，线电压对称且大小不变，开口三角电压不定。一般发生在对地电容电流较大的系统。

2.3 高次谐波谐振

高次谐波谐振的表征现象为：三相电压同时升高，线电压对称且大小不变，开口三角电压不定。一般发生在对地电容电流较小的系统或系统中含有多组的电压互感器（其等效励磁电感很小）。

3 电压互感器熔丝熔断

电压互感器一、二次侧都是通过熔断器和系统及负载相连的，一般由三台单相电压互感器连接而成三相电压测量系统（三相五柱式电压互感器应用较少，不予分析），其一次侧和二次侧熔丝熔断有以下几类：

3.1 一次侧一相熔丝熔断

当电压互感器某相一次侧熔丝熔断时，该相电压互感器就没有励磁电源，其二次和三次侧也就没有感应电势，其它正常相的二次和三次侧输出电压正常，造成二次电势不对称。在理想情况下（二次负载的阻抗无限大），熔断相二次电压为 0，其它二相不变。由于外接负载和互感器本身二次侧的影响，其它两相电压通过负载等串联到该相，致使该相电压读数不为 0。与断线相有关的线电压减小，与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角电压约为 33 V，发单相失地信号。

3.2 一次侧两相熔丝熔断

当电压互感器某两相一次侧熔丝熔断时，这两相互感器就没有励磁电源，其二次和三次侧也就没有感应电势，正常相的二次和三次侧输出电压正常，造成二次电势不对称。在理想情况下（二次负载的

阻抗无限大），两熔断相二次电压为 0，正常相不变。由于外接负载和互感器本身二次侧的影响，其它两相电压通过负载等串联到该相，致使两熔断相的电压读数不为 0。线电压小于正常相的相电压。二次系统的开口三角电压约为 33 V，发单相失地信号。

3.3 二次侧熔丝熔断

当电压互感器的二次侧熔丝熔断时，其相电压和线电压与一次侧熔丝熔断时一致，但三次侧仍然对称，二次系统的开口三角电压输出为 0，不发单相失地信号。

4 单电源进线断线

4.1 断线处导线的两端都落地

断线处导线的两端都落地，如图 4(a)，这种情况母线三相电压指示能正确反映出失地的相别，失地相对地电压随负荷和导线断落点两端接地电阻的大小而变化，Yd11 变压器低压侧电压的对称性也随负荷和两端接地电阻的大小而变化。与断线相有关的线电压读数变小，与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角电压小于 100 V。

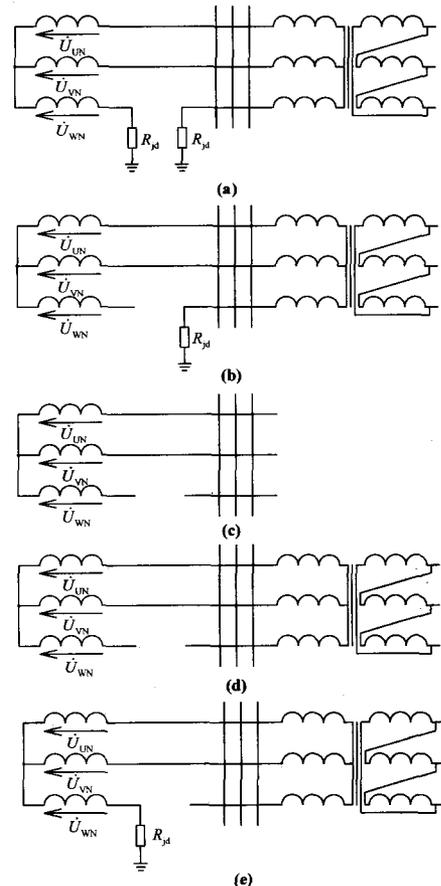


图 4 断线示意图

Fig.4 Line disconnecting picture

4.2 断线处导线的电源端悬空而负荷端落地

断线处导线的电源端悬空而负荷端落地, 如图 4(b), 这种情况负荷端母线三相电压指示如下: 断线相电压互感器的励磁电源为 0, 其二次和三次侧感应电势为 0, 相电压读数为 0; 其它正常相的二次和三次侧输出电压正常, 造成二次电势不对称。与断线相有关的线电压读数为相电压值, 与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角电压约为 33 V, 发单相失地信号。

4.3 断线处导线的两端悬空且负荷端变压器未投入

断线处导线的两端悬空且负荷端变压器没有投入, 如图 4(c), 这种情况负荷端母线三相电压指示如下: 断线相电压互感器的励磁电源为 0, 其互感器二次和三次侧感应电势为 0, 相电压读数近 0 (受外接负载和互感器本身及断线相对地电容影响); 其它正常相的二次和三次侧输出电压正常, 造成二次电势不对称。与断线相有关的线电压读数接近相电压值, 与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角电压约为 33 V, 发单相失地信号。

表 1 故障类型与特性对照表

Tab.1 Fault types and characteristic of lookup table

特性故障		线电压	相电压	零序电压	电流	备注
类型						
单相接地	金属性接地	大小、方向、对称性不变	接地相的相电压为 0, 其它两相升为线电压	100 V	正常馈线的 $3I_0$ 增大, 故障馈线的 $3I_0$ 变化明显。	最大的非接地相电压为 1.82 倍的相电压。最小非接地相电压为 0.82 倍的相电压。故障相的相电压可能大于非故障相的相电压
	非金属性接地		三相电压随接地电阻值和系统对地电容量的变化而变化但不相等。	小于 100 V		
电压互感器铁磁谐振	工频铁磁谐振	与断线相有关的线电压减小, 与断线相无关的线电压不变, 不对称	一相或两相等值升高超过线电压, 另两相或一相电压降低	单相升高小于 100 V, 两相升高大于 100 V	各馈线的 $3I_0$ 增大。	由于 PT 配有一次熔丝, 所以线路零序电流增大经常使一次熔丝熔断。
	分频铁磁谐振		三相电压同时升高且同时摆动	有零序电压但数值不定		
	高次谐波铁磁谐振		三相电压同时升高			
电压互感器熔断器熔断	一次熔丝熔断	与断线相有关的线电压减小, 与断线相无关的线电压不变, 不对称	断线相电压接近 0, 其它两相电压不变	等于 33 V	没变化	
	二次熔丝熔断		断线相电压不为 0, 其它两相电压不变	无		
线路断线	两端落地	与断线相有关的线电压减小, 与断线相无关的线电压不变, 不对称	断线相电压降低, 其它两相电压升高	小于 100 V	负荷电流不对称	
	负荷端落地, 电源端悬空		断线相电压为 0, 其它两相电压不变	等于 33 V		
	两端悬空, 负荷端无变压器		断线相电压为 0, 其它两相电压不变	等于 33 V		
	两端悬空, 负荷端有变压器		断线相电压为 0.5 倍相电压, 其它两相电压不变	等于 50 V		
	电源端落地, 负荷端悬空		断线相电压为 1.5 倍相电压, 其它两相电压变为线电压	等于 150 V		

4.4 断线处导线的两端悬空且负荷端变压器投入

断线处导线的两端悬空且负荷端变压器投入, 如图 4(d), 这种情况负荷端母线三相电压指示如下: 断线相互感器励磁电源为 0.5 倍的相电压, 其

相电压读数为 0.5 倍的相电压值; 其它正常相的二次和三次侧输出电压正常, 造成二次电势不对称。与断线相有关的线电压读数为 0.5 倍的线电压值, 与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角

电压约为 50 V, 发单相失地信号。

4.5 断线处导线的电源端落地、负荷端悬空且负荷端变压器投入

断线处导线的电源端落地、负荷端悬空且负荷端变压器投入, 如图 4(e), 这种情况负荷端母线三相电压指示如下: 断线相互感器励磁电源为 1.5 倍的相电压, 其相电压读数为 1.5 倍的相电压值; 其它正常相的相电压升高为线电压, 造成二次电势不对称。与断线相有关的线电压读数为 0.5 倍的线电压值, 与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角电压约为 150 V, 发单相失地信号。

以上分析结果见表 1。

5 技术措施

从分析结果可知, 要准确地判定故障类型, 变电站的后台或调度监控应能测量系统三相的相电压、线电压和馈线的三相(二相)相电流、零序电流。这对日益普及的变电站综合自动化系统来说, 已不需增加硬件设备, 只需在变电站的后台或调度监控电脑的主接线图中加入前述的各测量量, 即可满足非短路故障判别的需求。

6 结论

通过对单相失地、电压互感器熔丝熔断、铁磁谐振、单电源线路断线等故障的负荷电流和馈线的零序电流及母线相电压、线电压、零序电压五个量进行定性与定量分析, 得出各类非短路故障的判别方法。变电站的后台或调度监控能测量系统三相的相电压、线电压和馈线的三相(二相)相电流、零序电流, 可提高处理这些故障的准确性和及时性, 减少因前述故障造成的人身和设备事故。

参考文献

[1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.

[2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:电力工业出版社, 1981.

收稿日期: 2008-10-29; 修回日期: 2008-12-20

作者简介:

余水忠(1967-), 男, 本科, 从事电力网运行管理工作;

E-mail: ysz2468@163.com

潘 兰(1967-), 女, 本科, 从事电力网运行管理工作。

(上接第 22 页 continued from page 22)

[8] Chung C Y, Tse C T, Wang K W, et al. Synthesis of Sensitivity Coefficients for Controller Parameters of Static Var Compensator[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2000, 147(4):223-230.

[9] El-Sadek M Z, I-Saady G U, Abo-El-Saud M. A Variable Structure Adaptive Neutral Network Static Var Controller[J]. Electric Power System Research, 1998, 45(2):109-117.

[10] Zhang Y, Malik O P, Hope G S, et al. Application of Inverse Input Output Mapped ANN as a Power System Stabilizer[J]. IEEE Trans, 1994, 9(3):433-441.

[11] Chung C Y, Tse C T, David A K, et al. Partial Pole Placement of H_∞ Based PSS Design Using Numerator Denominator Perturbation Representation[J]. IEE Proceedings Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148(5): 13-419.

[12] Burchett R C, Heydt G T. Probabilistic Methods for Power System Dynamic Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1978, 97(3):695-702.

[13] Brucoli M, Torelli F, Trovato. Probabilistic Approach for Power System Dynamic Stability Studies[J]. IEE Proc-Gener Transm and Distrib, 1981, 28(5):295-301.

[14] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking Account the Variation of Load Power[J]. International Journals of Electric Power Systems Research, 1998, 46: 221-227.

[15] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2).

[16] Chung C Y, Wang K W, Tse C T. Selection of the Location And Damping Signal for Static Var Compensator by Versatile Modeling[J]. International Journals of Electric Power System Research, 2006, 53(1):7-14.

[17] Hussein M Z E, Alden R T H. Second Order Eigenvalue Sensitivities Applied to Power System Dynamics[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(6):1928-1936.

[18] Tse C T, Tso S K. Design Optimisation of Power System Stabilisers Based on Modal and Eigen-sensitivity Analyses[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 1998, 135(5):406-415.

收稿日期: 2008-11-24; 修回日期: 2009-02-20

作者简介:

边晓燕(1976-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统稳定、控制、风力发电; E-mail: kuliz@163.com

周歧斌(1977-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为雷电防护与电磁兼容;

王克文(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制。