

文章编号:1000-582x(2001)05-0089-04

馈线自动化中的故障寻址技术

牟龙华

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:配电网的故障检测与诊断是实现馈线自动化的关键技术之一,其中单相接地故障的正确检测一直未能得到很好的解决。文章在讨论了配电网发生单相接地故障时接地故障相判别方法的基础上,着重分析了单相接地故障的检测方法,提出了基于故障相电流实现接地故障检测的新方法,给出了动作判据算法模型,对算法模型的仿真计算结果表明,该方法对接地故障具有很高的选择性能,并可很好地适用于馈线自动化中。文章还简要介绍了馈线保护中短路故障的检测技术。

关键词:馈线自动化;故障检测;接地故障;算法模型

中图分类号:TM 774

文献标识码:A

配电自动化是继电网调度自动化、变电站自动化之后发展起来的电力系统自动化新领域,它是80年代末首先由美国而后到其它工业发达国家发展起来的,其内容也在不断变化^[1,2]。特别是到了90年代,随着计算机软硬件水平的不断提高和配电一次设备的成功开发,配电自动化的发展取得了前所未有的成就。配电自动化内容大致可以分为4个方面:馈线自动化(FA),即配电线路自动化;用户自动化,此与需方管理含义相同;变电站自动化;配电管理自动化^[3]。

馈线自动化是配电自动化的主要功能之一,也是一个技术难度大、表征配电自动化成败的关键系统。馈线自动化的主要功能包括:配网馈线运行状态监测、控制、故障诊断、故障隔离、网络重构。配电网的实时信息通过就地的FTU采集,传送到区域集控站或变电站集中后,上报配电调度中心;配电调度中心的控制命令通过区域集控或变电站转发给FTU执行。

配电网中最常见的故障是接地故障、短路故障,对这些故障的正确检测,可保证故障区段的快速隔离,恢复对非故障区段的可靠供电。本文主要对馈线自动化中的这些故障诊断与定位问题进行叙述。

1 单相接地故障检测

我国的配电系统为小电流接地系统,并以中性点不接地系统居多,其优点是单相接地电流较小,单相接

地不形成短路回路,电力系统安全运行规程规定可继续运行1~2h。但是,长时间的接地运行,极易形成两相接地短路,弧光接地还会引起全系统过电压。而欧美、日等国的配电系统,大部分为大电流接地系统,单相接地时即构成单相短路,接地保护易于实现,保护动作使开关跳闸。因此,目前国内引进的重合器、分段器、配电自动开关等都按大电流接地系统设计,无法满足小电流接地系统对寻找接地故障区段的需要。配电系统的故障率,尤其是架空线路90%以上是单相接地故障,若不解决单相接地故障的识别问题,必然大大降低馈线自动化系统的实用性。虽然国内已出现了一些小电流接地选线装置,但要实现馈线自动化中的接地故障区段寻址,还存在不足。另外,目前变电站10kV出线大部分只在A、C两相装设电流互感器,为得到供接地选线用的零序电流信号,除要求零序电压互感器外,还必须另设零序电流互感器或安装B相电流互感器,使其应用受到限制。

1.1 接地故障相的判别

考虑图1所示带3条馈出线路的中性点不接地系统,线路 L_1 的A相发生接地故障, R 为接地故障点过渡电阻, i_R 为流过 R 的接地故障点电流。图中 C_{01} 、 C_{02} 、 C_{03} 分别为线路 L_1 、 L_2 、 L_3 的每相对地电容,用集中参数表示。

单相经过渡电阻 R 接地时电网零序电压为

• 收稿日期:2001-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50077022)

作者简介:牟龙华(1963-),男,江苏宜兴人,中国矿业大学副教授,博士,从事微机保护与供电安全方面的研究工作。

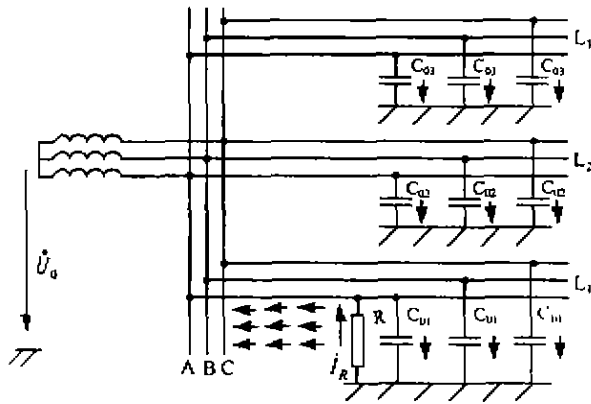


图1 中性点不接地系统单相接地故障图

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= -\frac{\dot{E}_A}{1 + j3\omega RC_0} = \\ &= -\frac{\dot{E}_A}{\sqrt{1 + (3\omega RC_0)^2}} e^{j\theta} = -\dot{E}_A \cos\theta e^{j\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $C_0 = C_{01} + C_{02} + C_{03}$, 为电网每相对地总电容; $\theta = \text{tg}^{-1}(-3\omega RC_0)$, 当 R 由 $0 \rightarrow \infty$, θ 由 $0^\circ \rightarrow -90^\circ$; \dot{E}_A 为 A 相电源电势。

则各相对地电压可表示为

$$\begin{aligned} U_A &= \dot{E}_A + \dot{U}_0 = \dot{E}_A(1 - \cos\theta e^{j\theta}) \\ U_B &= \dot{E}_B + \dot{U}_0 = \dot{E}_A(\alpha^2 - \cos\theta e^{j\theta}) \\ U_C &= \dot{E}_C + \dot{U}_0 = \dot{E}_A(\alpha - \cos\theta e^{j\theta}) \end{aligned}$$

式中, $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$. 取 $|\dot{E}_A|$ 为基准值, 可得各相对地电压标么值为

$$U_A^* = \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta)} \quad (2)$$

$$U_B^* = \sqrt{2 + \cos 2\theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\theta} \quad (3)$$

$$U_C^* = \sqrt{2 + \cos 2\theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\theta} \quad (4)$$

根据式(2)、(3)、(4), 作出经过过渡电阻接地时各相对地电压变化曲线如图2所示。

分析图2可知, 非故障的 C 相对地电压总是最高, 其可能出现的最大值为 1.82; B 相并不总是升高, 而接地相 A 相虽然总是降低的, 但并不总是最低。单相经过过渡电阻接地时判断接地故障相的规律为: 以正相序为基准, 对地电压最高相的下一相为接地相。例如, 当电网对地电压最高相分别为 C、B、A 时, 则对应的接地相分别为 A、C、B。

1.2 接地选线判据

在得到接地故障相后, 就可进一步实现接地故障选线。根据图1, 假设电流以流入大地为正方向, 则流

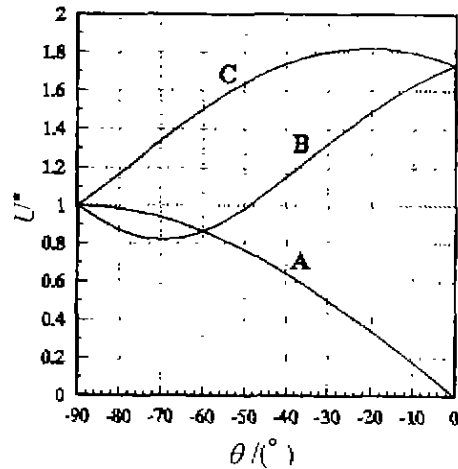


图2 中性点不接地系统各相对地电压变化曲线

过线路 L_1 故障相 A 首端的接地故障电流为

$$\dot{i}_R = -j3\omega C_0 \dot{U}_0 \quad (5)$$

它是单相经过过渡电阻 R 接地故障情况下全系统对地电容电流之和, 至于流过非故障线路故障相 A 首端的故障电流 \dot{i}_{Ei} ($i = 2, 3$), 仅是故障相对地电压在本相对地电容上产生的电流, 其表达式为

$$\dot{i}_{Ei} = j\omega C_{0i} \dot{U}_A \quad (6)$$

显然, \dot{i}_{Ei} 的值较 \dot{i}_R 要小得多, 在金属性接地故障情况下, $\dot{i}_{Ei} = 0$ 。由于接地故障电流 \dot{i}_R 只流过接地线路的故障相, 因此, 可以采用取出此电流的方法来实现选线。

设单相接地故障前、后线路 L_1 故障相 A 中的电流分别为 I_A (负荷电流), \dot{i}_M (负荷电流与接地故障电流之和), 其相位角分别为 φ_A , φ_M , 并设 \dot{U}_0 的相位角为 φ_u , 根据傅氏算法可求得

$$\varphi_A = \text{tg}^{-1} \frac{I_I}{I_R}, \varphi_M = \text{tg}^{-1} \frac{I_\beta}{I_\beta}, \varphi_u = \text{tg}^{-1} \frac{U_I}{U_R}$$

令 $\varphi = \varphi_A - \varphi_u$, $\varphi_f = \varphi_M - \varphi_u$, 则有

$$\begin{cases} \sin\varphi = \frac{1}{\sqrt{(I_I^2 + I_R^2)(U_I^2 + U_R^2)}} (I_I U_R - I_R U_I) \\ \sin\varphi_f = \frac{1}{\sqrt{(I_\beta^2 + I_\beta^2)(U_I^2 + U_R^2)}} (I_\beta U_R - I_\beta U_I) \end{cases} \quad (7)$$

上述各式中, $U_I, U_R, I_I, I_R, I_\beta, I_\beta$ 分别为 $\dot{U}_0, \dot{I}_A, \dot{i}_M$ 的虚部和实部。将 \dot{I}_A, \dot{i}_M 都投影到与 \dot{U}_0 垂直的平面上, 构造下列动作判据方程

$$\Delta i = I_f \sin\varphi_f - I \sin\varphi > K \quad (8)$$

式中, I_f, I 分别为 \dot{i}_M, \dot{I}_A 的模值, K 为动作整定值。

进一步简化式(8)得

$$\Delta i = \frac{I_{R1}U_R - I_{R1}U_I}{\sqrt{U_{I1}^2 + U_R^2}} - \frac{I_{R2}U_R - I_{R2}U_I}{\sqrt{U_{I2}^2 + U_R^2}} > K \quad (9)$$

忽略故障前线路 L_1 负荷电流中的对地电容电流分量, 显然, 式(8)基本反映了流过接地线路故障相的单相接地故障电流分量。考虑到计算误差的影响, 具体实现时, 判 Δi 值最大的那条线路为故障线路。由于该方法直接利用电流互感器二次输出作为接地选线用信号, 从而可省去零序电流互感器, 在两相 CT 的情况下, 仍可获得 2/3 的选线机会。

1.3 接地选线判据算法仿真

为验证接地选线判据的正确性与可行性, 仍考虑图 1 所示电网, 电网电压为 10 kV。设线路 L_1 负载阻抗为 $Z_{L1} = 19.2 + j14.4 \Omega$, 线路 L_2 负载阻抗为 $Z_{L2} = 20.5 + j15.8 \Omega$; 各相对地电容为: $C_{01} = 1 \mu\text{F}$, $C_{02} = 2 \mu\text{F}$, $C_{03} = 3 \mu\text{F}$ 。

则 A 相发生金属性接地故障 ($R = 10 \Omega$) 时, 由式(1)得电网零序电压为:

$$\dot{U}_0 = -0.9984 \dot{E}_A e^{-j3.235^\circ}$$

A 相发生高阻接地故障 ($R = 1000 \Omega$) 时:

$$\dot{U}_0 = -0.1742 \dot{E}_A e^{-j30^\circ}$$

根据式(5)、(6), 可以很方便地求得 L_1 、 L_2 故障相中的接地故障电流。考虑各线路中负荷电流的影响, 对算法模型式(9)进行仿真计算得数据如表 1 所示, 计算时采用全波傅氏算法进行(每周采 12 个点)。

表 1 算法仿真计算结果

| 线路名 | 假设故障 | 仿真计算结果 | 满足动作条件否 |
|----------|------------|--------------|---------|
| | R/Ω | $\Delta i/A$ | |
| 线路 L_1 | 10 | 30.782 9 | 是 |
| | 1 000 | 5.368 3 | 是 |
| 线路 L_2 | 10 | -3.619 1 | 否 |
| | 1 000 | -0.631 8 | 否 |

仿真计算时, 皆考虑了电网正常运行时负荷电流中的对地电容电流分量的影响。

从表中数据可以看出, 反映接地线路 L_1 故障单相接地故障电流分量的 Δi 值较非故障线路 L_2 的要大得多, 且方向相反。可见, 动作判据十分清晰, 显然可以很好地满足选择性接地保护的要求。

1.4 在馈线自动化中的应用

国内外馈线自动化的常用控制模式有: 重合器—自动配电开关控制模式; 重合器控制模式(就地隔离故障); 智能终端 (FTU) 控制模式; 集中远方控制模式(负荷开关 + FTU + 通信 + 配调中心站)。集中远方控制模式也称微机控制模式, 是最佳的控制模式, 是国内外馈

线自动化最终要达到的模式。

考虑图 3 所示的手拉手环网供电系统, 采用集中远方控制模式。其中 CB_1 、 CB_2 为变电站 10 kV 出线断路器, $S_1 \sim S_5$ 为馈线分段开关, 采用具有电动操作机构的负荷开关或环网柜, 同时配置 FTU 馈线智能控制单元。每个分段开关或环网柜的 FTU 与配调中心站通信, 故障隔离操作由配调中心站遥控进行集中控制。其中 S_4 为开环点, 正常运行时, S_4 为断开状态。

假设在 L_3 的 K 处发生 A 相接地故障, 根据接地电流向, 此时相当于 L_1 、 L_2 、 L_3 为故障线路, 而 L_4 为非故障线路。由于在变电站母线电压互感器的开口三角处将出现零序电压 U_0 , 各 FTU 接到此信号与接地故障相的信息后, 根据算法模型式(9), 即可计算出各自对应的 Δi ; 配调中心召测各 FTU 的接地信息, 即可判断出故障区段 L_3 。考虑到流过 S_1 、 S_2 故障相的接地电流可能接近相等, 故应判出现最大 Δi 值的最远一台开关为故障区段所在处。然后将 S_2 、 S_3 开关跳开, 实现故障区段的隔离; 合上联络开关 S_4 , 恢复对非故障区段 L_4 的供电。

2 短路故障检测

短路故障也是配网中的常见故障。在馈线自动化中, 短路故障的切除由变电站出线断路器完成, 故障区段的判定则可通过比较各 FTU 的故障检测结果来确定, 即调配中心只需知道各开关中有无故障电流流过, 并不要求常规的保护继电器那样具有选择性。

仍以图 3 为例, 假设 K 点发生永久性短路故障, 断路器 CB_1 的保护动作跳闸, 同时各 FTU 记忆下相应的故障电流 I_{k1} ; 经过一短延时(如 0.5 s) CB_1 重合, CB_1 再次跳闸, 各 FTU 得到第二个故障电流 I_{k2} 。调配中心查询各 FTU 的故障信息, 判 I_{k1} 、 I_{k2} 值都有突增的最后一台开关 S_3 后为故障区段。

微机保护中短路保护的故障起动元件通常采用电流的突变量实现, 即

$$\Delta i_k = |i_k - i_{k-N}| - |i_{k-N} - i_{k-2N}| \quad (10)$$

式中, i_k 为电流在某一时刻 k 的采样值; N 为一个工频周期内的采样点数, 对 30° 采样, $N = 12$; i_{k-N} 、 i_{k-2N} 分别为比 i_k 早 20 ms、40 ms 的采样值; Δi_k 为 k 时刻电流的突变量。

而在馈线自动化中, 由于断路器重合于永久性故障时电流即激增, 故不应采用式(10)的电流突变量起动元件, 而宜采用过电流检测原理, 通过判断电流是否超过整定值来检测故障。关于整定值的选择原则, 在文

献[4]中已有较详细的介绍。

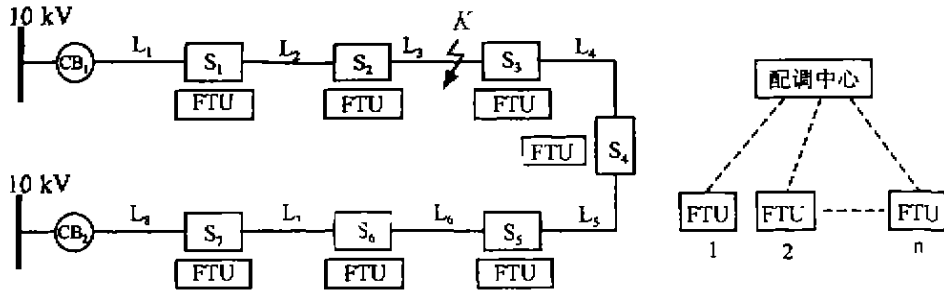


图3 环网供电一次接线

3 结论

文中提出的基于故障相中接地故障电流的选线保护原理,可较好地解决馈线自动化中单相接地故障区段的识别和定位问题;对短路故障的判别,不按常规的继电保护原理,而充分利用 FTU 的计算、记忆功能,配合通讯来实现定位。

参考文献:

- [1] 孙德胜,郭志忠,王刚军,等. 配电自动化系统综述[J]. 继电器,1999,27(3):1-3.
- [2] HUMPHREYS S. Substation automation systems in review[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1998, 11(2): 24-30.
- [3] 顾锦汶,张步林. 配电自动化[J]. 电力系统自动化,1999, 23(5): 35-40.
- [4] 徐丙垠. 配电自动化远方终端技术[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 41-44.

Fault Detection Techniques for Feeder Automation

MU Long-hua

(College of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Fault detection of the distribution systems is one of the key techniques for feeder automation. At all times, it is still very difficult for the exact detection of single-phase-to-ground fault. First of all, the distinguishing rules of the faulted phase are presented when ground-fault occurs in distribution systems. This paper analyzes the fault detection technique for single-phase-to-ground in system with floating neutral point. Based on faulted-phase's current, a method realizing ground-fault protection is proposed and the algorithm model of action criterion is given out. The simulation results show that the method will be with very good selectivity to ground fault, and it can be used preferably in feeder automation. The detection method for short-circuit fault is also introduced simply.

Key words: feeder automation ; fault detection ; ground-fault ; algorithm model

(责任编辑 李胜春)