

基于残流与首半波综合的接地选线方法研究

胡佐, 李欣然, 石吉银

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 分析了小电流接地系统的故障特征, 针对现有单相接地故障选线判据适应性较差、正确率不高的现状, 应用模糊信息融合原理, 提出了基于残流变化量比较与暂态首半周相位比较的单相接地故障模糊综合选线方法; 构造了形式简洁物理意义清晰的故障隶属函数和综合选线判据; 研制出样机并进行了动模实验检验。实验运行结果表明该判据选线正确, 抗干扰能力强, 是小接地电流电网中一种实用的综合选线判据。

关键词: 小电流接地系统; 残流变化量比较; 暂态首半周相位比较; 模糊信息融合; 综合选线判据

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)07-0006-04

0 引言

我国 3 ~ 60 kV 中压电网一般采用中性点不接地方式 (NUS) 或经消弧线圈接地方式 (NES), 在这种小电流接地系统 (NUGS) 中, 单相接地故障率最高, 占配电网故障的 80% 以上^[1]。

对 NUS 系统单相接地故障选线较容易, 可采用稳态基波分量的群体比幅比相判据, 而对于 NES 系统单相接地故障选线较困难, 由于故障特征差别不大, 并有很大的随机性和不稳定性, 已经提出的多种选线方案都有其局限性: 如五次谐波电流法, 由于谐波电流方向原理所使用的高次谐波分量较小, 易受干扰, 使得这种传统保护选线方法可靠性不高^[1]。零序功率法, 当用于短线路时, 该线路零序电流变小, 当电网中出现高阻接地故障时, 由于 U_0 很小, 残流不大, 该保护的灵敏度出现问题^[2]。信号注入法, 需要额外的专门装置, 接线麻烦复杂, 还很容易对其他保护产生电磁干扰^[3]。负序电流的负序过流保护、负序方向保护及暂态能量保护, 它们能适用于各种中性点接地方式, 但是负序电流的采集比较困难, 保护精度受故障残流大小的影响^[4]。零序暂态电流法, 经过渡电阻接地, 谐波污染, 弧光引起的多过渡过程此法均适用。但在电压过零发生接地时, 暂态过程不明显, 此法不适用。最大投影差值法, 此法的本质是寻求最大零序无功功率突变量的代数值, 从理论上基本消除了 CT 不平衡的影响, 但也有两个缺陷: 计算量相当大; 另外还需选取一个中间参考正弦信号^[5]。

本文在大量的动模实验基础上基于残流比较和暂态首半周相位比较原理, 提出了一种基于残流和

暂态首半周相位原理的综合选线判据; 基于本文提出的判据, 开发了相应的接地选线装置, 并进行了大量的动态模拟实验检验, 动模实验结果表明该判据简单明了, 准确率高, 是一种选线的好方法。

1 NES 系统单相接地判别的残流比较原理

中性点经消弧线圈接地系统 A 相经过渡电阻 R_d 接地时, 系统的简化等效接线如图 1 所示。图中, 线路 1 表示故障线路, 线路 k 表示非故障线路 ($k=2, 3, \dots, N$)。由图 1 可写出任一非故障线路首端流出的各相电流如式 (1)。

$$\begin{cases} I_{Ak} = (U_{Ak} - U_0) (1/\bar{\kappa}_0 + j C_{Ak}) \\ I_{Bk} = (U_{Bk} - U_0) (1/\bar{\kappa}_0 + j C_{Bk}) \\ I_{Ck} = (U_{Ck} - U_0) (1/\bar{\kappa}_0 + j C_{Ck}) \end{cases} \quad (k=2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

式 (1) 中: C_{Ak} 、 $\bar{\kappa}_0$ 等为已知线路参数; U_0 为中性点对地电压 (也即电网每相零序电压), 可由测量确定。由式 (1) 即可容易确定第 k 条非故障线路的零序电流:

$$3I_{0k} = I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}$$

现假设中性点消弧线圈补偿度由故障前的 $P_1\%$ 调整为故障后的 $P_2\%$, 相应的消弧线圈调谐电感为 L_1 和 L_2 , 对应的中性点电压分别为 U_{01} 和 U_{02} , 相应的非故障线路零序电流分别为 I_{0k1} 和 I_{0k2} , 则由式 (1) 即可确定消弧线圈补偿度调整前后的非故障线路零序电流变化量如式 (2) 所示。

$$I_{0k} = (U_{01} - U_{02}) [1/\bar{\kappa}_0 + j (C_{Ak} + C_{Bk} + C_{Ck}) / 3] \quad (k=2, 3, \dots, N) \quad (2)$$

由于消弧线圈补偿度的调整幅度一般在 10% ~ 15%, 如果不考虑过渡电阻影响, 消弧线圈补偿度

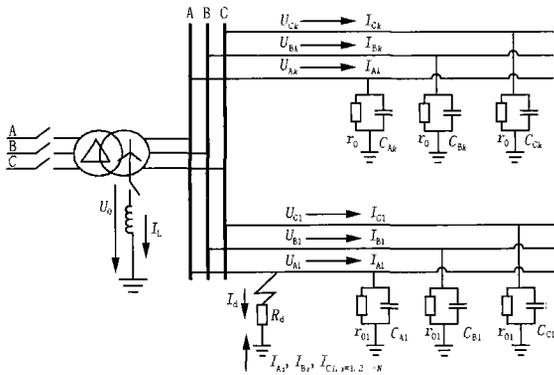


图 1 接地故障时补偿电网的等值接线图
Fig 1 Equivalent connection for compensated distribution network with earth fault

调整前后中性点电压变化很小,从而由式(1)所决定的任一非故障线路的零序电流变化量 I_{0k} 很小;同时,通常 $1/\omega_0$ 比 jC 小得多,所以 I_{0k} 近似地为数值很小的纯电容电流。

图 1 所对应的故障线路流经接地过渡电阻的电流如式(3)

$$I_d = - [I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} + \sum_{k=2}^N (I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}) + I_L] \quad (3)$$

式(3)中: I_{Ak} 、 I_{Bk} 、 I_{Ck} 分别代表第 k 条线路的 A、B、C 相对地电容电流,其中, $I_L = U_0 / jL$, I_L 为消弧线圈对系统的补偿电流。则故障线路首端流出的零序电流如式(4)所示

$$3I_{01} = I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} + I_d \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)即得式(5)

$$3I_{01} = - \sum_{k=2}^N (I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}) - I_L \quad (5)$$

由此可计算出故障线路在消弧线圈调整前后的零序电流变化量 I_{of} 为:

$$I_{of} = \sum_{k=2}^N I_{0k} + I_L \quad (6)$$

$$I_L = \frac{U_0}{j} \left(\frac{L_2 - L_1}{L_1 L_2} \right) \quad (7)$$

式(6)中: I_L 是消弧线圈调整前后补偿电流的变化量,为纯电感电流,其值由式(7)确定;电容电流 $\sum_{k=2}^N I_{0k}$ 数值很小,可以忽略不计。从而 $I_{of} \approx I_L$, 即故障线路的零序电流变化量近似等于调整消弧线圈前后的补偿电流变化量。

2 NES系统单相接地暂态首半周比相原理

接地电流的暂态分量其值等于电容电流的暂态

自由分量与电感电流的暂态直流分量之和,两者幅值不仅不能互相抵消,甚至还可能彼此叠加,使暂态接地电流幅值将更大。当故障发生在相电压接近于最大值瞬间时,暂态电容电流较暂态电感电流大很多,故暂态过程的电流通常是很大的,而且暂态的频率也很高,这时流过消弧线圈的电流很小,对暂态量不起作用。所以在故障的初期,电感电流与电容电流是不能互相补偿的,其暂态接地电流的特性主要是由暂态电容电流的特性所决定。零序电流与零序电压首半波之间也存在着固定相位关系,对于放射形结构的电网而言,故障线路两个零序量极性相同,在非故障线路上两者极性相反^[1],也就是说以故障线路和非故障线路的暂态零序电流两者方向相反,此也应该可以检出故障线路。

3 基于残流和暂态首半周的模糊综合选线方法

本文采用基于残流变化量和暂态电流首半周相位相结合的综合选线方法,运用模糊综合决策原理构成选线判据。选择暂态首半周方法是因为此法的特点是对故障反应迅速,但若在电源电压过零时发生单相接地,则暂态过程不明显;而残流选线方法原理简单明了,它的判据不是绝对值,而是相对值,即零序电流的增量,故减小了零序电流互感器(CT)和测量回路误差及干扰等因素的影响。对于选线过程中可能出现的不确定性,可采用模糊理论中的方法加以处理。即可对各量的变化设定确定区及不确定区,定义各区的隶属函数。据此计算线路故障的置信度,找出故障线路。

3.1 残流比幅方法的故障隶属度函数

设系统中性点消弧线圈补偿度由故障前的 $P_1\%$ 调整为故障后的 $P_2\%$,线路 i 在消弧线圈调整前后的残流变化量用 I_{di} 表示,则 $I_{di} = I_{dih} - I_{diq}$, 这里 I_{diq} 表示线路 k 故障前(消弧线圈补偿度 $P_1\%$)的零序电流, I_{dih} 表示线路 k 故障后(消弧线圈补偿度 $P_2\%$)的零序电流。令 $sum = \sum_{i=1}^N I_{di}$, 定义线路 i 的残流变化量如式(8)所示。

$$u_1(i) = I_{di} / sum \quad (8)$$

本文构造如式(9)所示的故障隶属度函数以描述基于残流变化量比较的判断线路故障的可能程度。

$$\mu_1(i) = \begin{cases} 0 & u_1(i) < 0.2 \\ \frac{u_1(i) - 0.2}{0.6} & 0.2 < u_1(i) < 0.8 \\ 1 & 0.8 < u_1(i) \end{cases} \quad (9)$$

3.2 零序电流暂态首半波极性的故障隶属函数

设零序电压首半周采样点数为 L , 定义第 i 条线路零序电流首半周相位特征函数 $u_2(i)$ 如式 (10)。其中 T_{il} 为线路 i 在第 l 个采样点的零序电流相位特征——线路 i 的零序电流与零序电压在采样点 l 上极性相同, 则 $T_{il} = 1$, 否则 $T_{il} = 0$ 。

$$u_2(i) = \left(\sum_{l=1}^L T_{il} \right) / L \quad (10)$$

在动模实验研究基础上, 本文构造如式 (11) 所示的故障隶属度函数以描述基于零序电流首半周相位比较的判断线路故障的可能程度。

$$A\mu_2(i) = \begin{cases} 0 & u_2(i) < 0.4 \\ \frac{u_2(i) - 0.4}{0.4} & 0.4 < u_2(i) < 0.8 \\ 1 & u_2(i) > 0.8 \end{cases} \quad (11)$$

3.3 模糊综合选线判据设计

为适应接地故障选线的特点, 在基于不同故障特征的故障隶属度函数设计的基础上, 采用模糊信息融合原理构造综合选线判据。

假设电网中有 N 条线路, 使用 M 种选线方法完成综合选线判断。则采用第 j ($j=1, 2, \dots, M$) 种选线方法得到的第 i 条线路 ($i=1, 2, \dots, N$) 的故障测度隶属度函数为 $A\mu_j(i)$, 第 j 种选线方法的权系数为 $B\mu_j$ 。则每一条待选线路 i 都可得到一个 M 种方法融合的总的模糊决策可信度 Y_i 。显然, 可信度最大的即为故障线路, 从而本文构造的单相接地故障选线的模糊综合判据如式 (12) 所示。其中 Y_f 即为故障线路的故障可信度。

$$Y_f = \max\{Y_i\} = \max\left\{ \sum_{j=1}^M A\mu_j(i) B\mu_j \right\} \quad (12)$$

表 1 残流选线和暂态首半周选线的权系数

Tab 1 Weight-right coefficients with residual-current selection and transient-current angle selection

$A\mu_1$	$A\mu_2$	$B\mu_1$	$B\mu_2$
$(0.8, 1]$	$(0.6, 1]$	0.8	0.8
	$[0, 0.6)$	0.8	0.4
$(0.6, 0.8]$	$(0.6, 1]$	0.6	0.8
	$[0, 0.6)$	0.6	0.4
$[0, 0.6)$	$(0.6, 0.1]$	0.4	0.8
	$[0, 0.6)$	0.4	0.4

因为接地故障具有随机性, 因而不同过渡电阻的接地故障和不同选线方法所对应的权系数也应不同。为了确定合理的权系数, 作者进行了大量的动态模拟实验, 由此确定了本文所使用的残流变化量比较方法和暂态首半周相位比较方法的相应权系数

如表 1 所列。

4 动模实验检验

4.1 系统模型与参数

动模实验系统的接线类似于图 1, 以 380 V 模拟 10 kV 电压等级, 变电站有 10 kV 出线 10 条。线路分布电容用集中电容模拟, 假设实际线路单位长度的平均对地电容为 $0.01 \mu\text{F}/\text{km}$ (单位长度平均对地电纳为 $3.14 \times 10^{-6} \text{S}/\text{km}$)。取对地电容电流相等为模拟条件, 在本动模实验中, 发电机的出口电压为 380 V, 升压变压器的变比为 1:1, 因此若将 10 kV 系统中的线路等效集中电容 C_{01} 换算到此实验平台下 C_{02} 有: $\sqrt{3}U_1 C_{01} = \sqrt{3}U_2 C_{02}$, U_1 取 10 kV, U_2 取 0.38 kV, 即 $C_{02} = 26.3 C_{01}$, 即模拟线路的每相单位长度对地电容为 $0.2624 \mu\text{F}/\text{km}$ 。消弧线圈电感量 $L = 86 \text{mH}$, 取过补偿度为 $P_1 = 10\%$, $P_2 = 15\%$ 。为简化讨论, 下文实验结果对应于第 4 号线路为故障线路; 过补偿度 $P_1 = 10\%$ 和 $P_2 = 15\%$ 。

故障线路: 对地电容 $C_4 = 2 \mu\text{F}$, $R_d = 100 \Omega$ 。

非故障线路 (多回非故障线路的集成等效): $C_1 = 0.5 \mu\text{F}$, $C_2 = 0.5 \mu\text{F}$, $C_3 = 0.5 \mu\text{F}$, $C_5 = 2 \mu\text{F}$, $C_6 = 3 \mu\text{F}$, $C_7 = 3 \mu\text{F}$, $C_8 = 1 \mu\text{F}$, $C_9 = 2 \mu\text{F}$, $C_{10} = 1 \mu\text{F}$ 。

4.2 实验方案

取两个典型实验方案。方案 I $R_d = 0$; 方案 II $R_d = 100 \Omega$ 。装置实测纪录的零序电压和零序电流波形如图 2、3 所示, 为了波形显示清晰, 图中只给出了零序电压和 3 个线路的零序电流。选线置动作结果如表 2、3 所列。

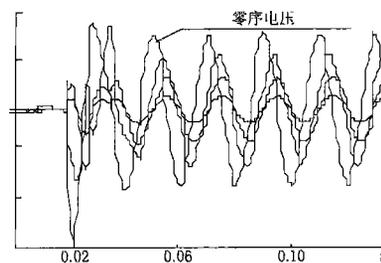


图 2 A 相金属性接地的零序电流、电压波形

Fig 2 Zero sequence current and voltage waves without transition resistance of phase A grounding-fault

表 2 线路 4 发生金属性接地短路

Tab 2 Phase A grounding-fault without transition resistance action results

选线方法	权系数	测度集	是否正确
首半波	0.8	0.00, 0.00, 0.00, 0.80	是
残流法	0.8	0.16, 0.00, 0.00, 0.83	是

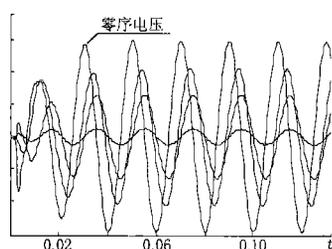


图3 A相经过渡电阻 100 接地的零序电流、电压波形
Fig 3 Zero sequence current and voltage waves of phase A grounding-fault with 100 transition resistance

表3 线路4发生经过渡电阻 $R_g = 100$ 接地短路

Tab 3 Phase A grounding-fault with 100 transition resistance action results

选线方法	权系数	测度集	是否正确
首半波	0.8	0.00, 0.00, 0.00, 0.75	是
残流法	0.4	0.00, 0.00, 0.00, 0.62	是

4.3 动模实验结果及讨论

作者的大量动模实验结果表明,在上述所及的实验条件下,装置都能正确动作,从而说明本文所提出的综合选线判据准确有效,适应性强。

应当指出,当发生金属性接地或者接地电阻较小时,故障线路的残流变化量远大于非故障线路;随着过渡电阻的增加(在作者的实验系统中约大于100),故障线路的残流变化量不一定是所有线路中的最大者——对地等效电容最大的线路可能与故障线路接近或相当,但是故障线路的残流变化量仍然比一般线路要大得多。在实际应用中,可以适当减小残流变化量比较的权系数,增大暂态首半周相位比较权系数,然后再依据首半波的相位判断便可以非常准确地选出故障线路。如果谐波成分丰富,还可以增加五次谐波辅助判别,这样效果会更好。在实际现场条件下,通常经两分钟左右延时后,过渡电阻不可能很大,因此采用残流变化量和暂态首半波相位的模糊综合比较,能有效克服各种干扰,简化判据,提高选线准确率。

5 结论

随着配电网规模的增大,单相接地故障发生几率增多;电缆配电网的日益普遍应用又使接地电容电流越来越大,自动调谐消弧线圈的应用越来越广泛。因此,深入研究适应各种中性点运行方式的小接地电流系统单相接地故障选线方法,仍然是一个艰巨的研究课题。

本文在深入分析小电流接地系统的故障特征的

基础上,针对现有单相接地故障选线判据适应性较差、正确率不高的现状,应用模糊信息融合原理,提出了基于残流变化量比较与暂态首半周相位比较的单相接地故障模糊综合选线方法;构造了形式简洁物理意义清晰的故障隶属函数和综合选线判据;研制出样机并进行了动模实验检验。实验运行结果表明该判据选线正确,抗干扰能力和适应性强,是小接地电流电网中一种准确有效且实用性好的综合选线判据。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Grounding of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 何奔腾,胡为进. 能量法小电流接地选线原理 [J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451-457.
HE Ben-teng, HU Wei-jin. A New Principle to Detect the Grounded Line in a Neutral Point Indirectly Grounded Power System Based on the Energy Function [J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1998, 32(4): 451-457.
- [3] 桑在中. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线与定位 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11-12.
SANG Zai-zhong. Protection for Single Phase to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System by Injecting Signal [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12.
- [4] 曾祥君,等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 84-89.
ZENG Xiang-jun, et al. Study for Negative Sequence Current Distributing and Ground Fault Protection in Middle Voltage Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 84-89.
- [5] 檀国彪. 基于最大 IS_N 或 (IS_N) 原理的微机选线装置 [J]. 中国电力, 1995, 28(7): 16-20.
TAN Guo-biao. Microcomputerized Faulty Line Discriminator Based on Theory of Maximizing IS_N or (IS_N) [J]. Electric Power, 1995, 28(7): 16-20.
- [6] 许颖. 对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议 [J]. 电网技术, 2002, 26(10): 75-77.
XU Ying. Dissidence of the Elimination of Ground Arcing Faulted Caused Overvoltage by Petersons Coils [J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 75-77.
- [7] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-33.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al. New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequency Current [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-33.

(下转第 37 页 continued on page 37)

Lines[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19
(3): 474-480.

监控、随机 Petri网的研究; E-mail: dayspring_js@126.com

罗毅 (1966-),男,副教授,主要从事 EMS/DMS、电力系统安全
监控的研究;

涂光瑜 (1941-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统运行
与控制的研究。

收稿日期: 2005-08-25; 修回日期: 2005-10-14

作者简介:

罗金山 (1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统事故

Study on fault chains monitoring in regional power network by using a stochastic Petri net model

LUO Jin-shan, LUO Yi, TU Guang-yu, SONG Fu-long

(College of Electronic & Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Regional power network faults are generally caused by complicated sequences of concurrent chain events. If the model of fault chain can be built before the fault and the complicated chain events sequence of system faults can be analyzed, it is beneficial to monitor the fault of power system. This paper uses a new method on building chain events model of regional power network based on stochastic Petri nets and designs a rapid dynamic searching algorithm to calculate the chain events of the regional power network based on the change of load and structure. This method uses quantitative analysis to locate the dangerous fault chains which require monitoring specially and designs a control algorithm based on influencing factors of regional power network fault. Finally, a regional power network instance is analyzed, the result proves that this method is valid and correct.

Key words: fault chains; stochastic Petri nets; security monitoring; predictive control

(上接第 9 页 continued from page 9)

[8] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护 (第三版) [M]. 北京:中国电力出版社,1994.

HE Jia-li, SONG Cong-ju. The Protective Relaying Elements of Electric Power System, Third Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.

收稿日期: 2005-09-13; 修回日期: 2005-10-31

作者简介:

胡佐 (1980-),男,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护
研究; E-mail: huzuo8000@yahoo.com.cn

李欣然 (1957-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分
析与控制,电力系统辨识与建模,配电网故障诊断与状态监测等方
面的研究工作。

Analysis of earth fault selection based residual current and current angle integration

HU Zuo, LI Xin-ran, SHI Ji-yin

(Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper analyzes the fault feature of system with neutral ungrounding, a new scheme of line selection about earth fault diagnosis in the networks based on "Residual Current Method" and transient current angle comparison with fuzzy information fusion is proposed. It has simple design and concision subordinate function for integrated line selection. A sample selection platform has been built for testing the method. The operation results show the new method has excellent disturbances-proof ability. It is an ideal method for earth-fault selection.

Key words: artificial network; residual current comparison; transient current angle comparison; fuzzy information fusion; integration line selection

(上接第 26 页 continued from page 26)

Abstract: In this paper, a variable interval fuzzy control arithmetic with self-adjusting factor is proposed in the whole field, which aims at the control system design of UPFC. This control arithmetic can simultaneously enhance steady precision and dynamic performance, moreover it has optimization characteristic. Simulation result indicates that node voltage and line power flow are effectively controlled and the transient stability of power system is improved in the designed control system with quickly response, high precision accuracy and strong robust.

Key words: unified power flow controller; self-adjusting; variable interval; fuzzy control