

基于零序功率及谐波相位综合法的小电流接地系统微机选线装置

徒有锋, 何俊佳, 周志成, 李翔, 尹小根

(华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 武汉 430074)

NUGS Choosing Earth-fault Line Device Based on Zero Sequence Power Method and Harmonic Phase Method

TU You-feng, HE Jun-jia, ZHOU Zhi-cheng, LI Xiang, YIN Xiao-gen

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

摘要: 针对现有的小电流接地选线装置选线准确率不高及存在选线死区等问题, 通过分析小电流接地系统单相接地时的特性, 综合分析各种选线方法, 提出以采用目前稳态法中准确度最高的零序功率法为主判据, 以 5 次谐波相位法为二次判据的选线方案。使用 ATP 仿真软件对某个 110/10 kV 变电站单相接地故障进行模拟, 结果显示对于不同的接地电阻和接地位置, 该判据均能准确判断出故障线路。由此设计了基于 PC104 工控机的新型小电流接地选线装置。

关键词: 小电流接地系统; 零序功率法; 谐波相位法

中图分类号: TM773

文献标识码: A

Abstract: Because current choose accuracy of the NUGS choosing earth-fault line device is not high and the range of the choosing line is limited. A new criterion is advanced according to the analysis of the NUGS single-phase grounding characteristic and various methods of choosing earth-fault line. This criterion uses the zero sequence power method (the most efficient method among all stable-state methods) as the main criterion, and the fifth harmonic phase method as the second criterion. A single-phase grounding fault of a 110/10 kV power station is simulated by using ATP simulation software. The results show that, to different fault position and different grounding resistance, the criterion can find out the fault line exactly. Thus a new device is designed based on the PC104 industrial computer.

Key words: non-utility grounding system(NUGS); zero sequence power method; harmonic phase method

1 引言

在电力系统中, 把中性点不接地系统(NUS)或经电阻接地系统(NRS)、经消弧线圈接地系统(NES)统称为小电流接地系统(NUGS), 它广泛应用于国内的 380 V ~ 66 kV 供用电系统中。由于 NUGS

中单相接地电流很小, 所以一般可以带故障运行约 2 h。但是, 长时间的单相接地运行, 极易发展成两相接地短路, 弧光接地还会引起全系统过电压^[1]。因此, 生产实践中希望尽快找到并切除接地线路。

目前各厂家的选线装置所采用的原理不尽相同, 其方法大致可分为 3 类, 即稳态分量法、暂态分量法和注入信号法。考虑到某些情况下需要对故障进行再次判断, 同时由于对选线和跳闸的时限性要求不高, 故许多装置采用稳态法, 主要有: 零序电流基波或 5 次谐波幅值比较法^[2]; 零序电流基波或谐波方向比较法^[3]及零序功率方向法。在有消弧线圈的系统中, 还有采用比较各线路零序有功功率大小的有功功率法^[4]; 比较消弧线圈档位改变前后各线路零序电流增量大小的残流增量法。有的装置还采用多种判据综合判断的方法。总之, 这些方法有的分别与幅值和相位有关, 有的与两者均有关。但是一些方法会出现判断死区^[5], 容易产生误判。本文提出的选线方案综合考虑了以上所述的各种稳态判断法, 开发了依托工控机、以零序功率法为主判据、谐波相位分析法为二次判据的综合选线装置。

2 NUGS 单相接地特性及选线判据分析

2.1 NUGS 单相接地特性

NUGS 发生单相接地故障后, 零序 PT 开口三角处产生零序电压, 故障线路和非故障线路同时产生零序电流。图 1 为 NUGS 的零序等效电路。(r 为接地电阻)。

正常工作状态下开口零序电压 U_0 通常小于 5 V, 出现金属性接地时接近 100 V; 经电阻接地的场合则为 30 ~ 100 V; 非接地线路的零序电流 $I_{\alpha k}$ (k 为线

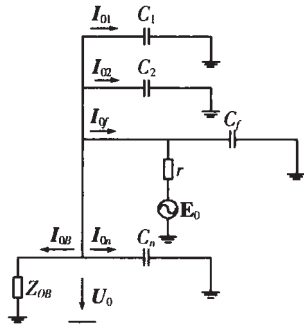


图 1 NUGS 的零序等效电路

路序号) 为该线路的对地等效电容电流, 相位超前于零序电压 U_0 90° ; 即:

$$I_{0k} = j C_k U_0 \quad (k=1, 2, \dots, n, k \neq f) \quad (1)$$

接地线路零序电流 I_{0f} 为所有非接地线路零序电流与变压器中性点电流 I_{0B} 之和, 方向相反, 即:

$$I_{0f} = - \left(\sum_k I_{0k} + I_{0B} \right) \quad (2)$$

对不同的 NUGS 讨论如下: ①对于 NUS, $I_{0B} = 0$, 则有: $I_{0f} = - \sum_k I_{0k}$, 相位滞后 U_0 90° ; 见图 2(a); ②对于 NRS, $I_{0B} = U_0 / R_0$ (R_0 为中性点接地电阻); $I_{0f} = - \left(\sum_k I_{0k} + I_{0B} \right)$, 相位滞后 U_0 约 135° ; 见图 2(b); ③对于 NES, $I_{0B} = U_0 / j L_0$ (L_0 为中性点消弧线圈电感), 由于一般采用过补偿, 且过补偿度为 $5\% \sim 10\%$, 即有 $I_{0B} = (1.05 \sim 1.10) \sum_k I_{0k}$, $\sum_k I_{0k} < \sum_k I_{0k}$, 因此 $I_{0B} > \sum_k I_{0k} > \sum_k I_{0k}$, 所以 I_{0f} 取决于 I_{0B} , 相位超前电压约 90° ; 见图 3(a)。用 5 次谐波分析, 由于 5 次谐波感抗比基波感抗增大了 5 倍, 5 次谐波容抗则比基波容抗缩小了 5 倍, 此时电感对 5 次谐波相当于开路, 因此对于 5 次谐波电流仍满足故障线路与非故障线路相反的特点, 即 I_{0f} 相位滞后于 U_0 90° ; 见图 3(b)。

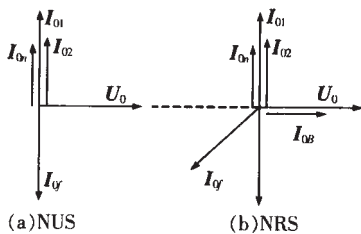


图 2 NUS 及 NRS 的零序电压电流相量图

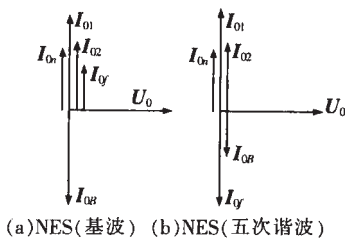


图 3 NES 零序电压电流相量图

2.2 基波及谐波相位分析法

根据以上的特性可知: 非接地线路的零序电流

总是超前于电压 90° ; 而接地线路的零序电流基波 (对于 NUS 或 NRS) 或五次谐波 (对于 NES) 则滞后于电压。

2.3 零序功率法

零序功率法是通过分析单相接地故障时系统中的零序功率无功分量和有功分量来进行选线的。根据图 1 所示单相接地情况 (考虑接地点为非金属性接地) 分析可得图 4 所示的故障时零序电压电流相位关系, 其中: I_{0B} 为消弧线圈流过的电流 (I_L, I_R 分别为 I_{0B} 的电感、电阻分量); $3I_{0f}$ (无消弧) 为没有消弧线圈时故障线路的零序电流, $3I_{0f}$ (有消弧) 为有消弧线圈时故障线路的零序电流, 即 $3I_{0f}$ (有消弧) 为 $3I_{0f}$ (无消弧) 与 $-I_{0B}$ 的矢量和。

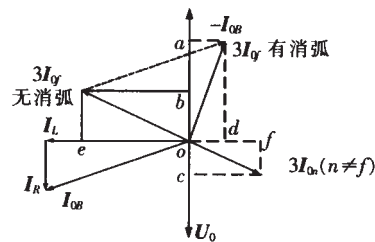


图 4 零序电压电流相位关系

(1) 对于 NUS

由于无论是故障线路零序电流中的无功分量 oe 和还是正常线路的无功分量 of 都远大于它们对应的有功分量 ob 和 oc 。因此, 在 NUS 中利用零序功率的无功分量具有较高的灵敏度。故障线路零序功率的无功分量 $Q > 0$; 正常线路则是 $Q < 0$ 。其中: $Q = 3U_0 I_0 \sin \alpha$, 式中: U_0, I_0 分别为线路零序电压和零序电流的有效值; α 为两者的相位差 (零序电压超前零序电流时为正)。

(2) 对于 NES

由于常采用过补偿方式, 即有 $|I_L|$ 一定比 $3I_{0f}$ (无消弧) 的容性分量 oe 大一点, 所以叠加后 $3I_{0f}$ (有消弧) 会位于 U_0 轴的右侧。由图 4 可看出 od 与 of 方向相同。显然, 此时用零序功率的无功分量无法区分出故障线路, 必须用零序功率的有功分量来进行判别。

$3I_{0f}$ (有消弧) 的有功分量为 oa , 正常线路的有功分量为 oc 。可见故障线路的有功分量比正常线路的大很多, 由此可以区分出故障线路。也可使用公式定量判断: 故障线路零序功率的有功分量 $|P| > P_{zd}$ (整定值); 正常线路则是 $|P| < P_{zd}$ 。其中:

$$P = 3U_0 I_0 \cos \alpha; \quad P_{zd} = 0.5 P_{c01} / n_1 n_2$$

式中: P_{c01} 为消弧线圈有功损耗铭牌值; n_1 为母线 TV 的变比; n_2 为线路零序 TV 的变比^[4]。

进一步分析, $3I_{0f}$ (有消弧) 的有功分量 oa 段中的 ba 段为消弧线圈自身及其串、并联电阻 (调容式消弧线圈) 的有功损耗, 该分量叠加在故障线路的零序有功分量上, 可以使故障线路与正常线路的零序有功值相差更大, 因此现在使用的消弧线圈装置中

通常会配合使用一些串并联电阻^[6]。

3 选线装置硬件软件设计

3.1 总体结构

为了适应电力系统在线应用和数据处理的要求,整个装置以工控机为主体,采用 DOS 操作系统。需采集信号通过级数较少的前端模拟输入模块进入采集卡,模数转换后送入选线程序,最终得出选线结果。见图 5。

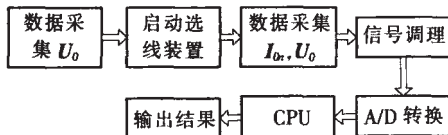


图 5 硬件模块图

3.2 硬件设计

零序 PT 开口三角处的零序电压 U_0 和各条线路零序电流 I_0 分别经由微型精密互感器和微型精密电流变换器隔离后经过保护模块,进入二阶低通滤波模块,再通过 1~2 块(根据变电站实际出线数确定) 12 位采集卡进行模数转换后送入 PC104,运行选线程序,结果显示在液晶屏上,同时也可以从打印机输出实时及历史数据。

3.3 软件设计

选线软件为 DOS 操作系统下的 TC 程序编写的可视化图形界面软件。可根据需要和硬件条件满足 1~2 个电压等级,1~4 段母线,1~60 路出线的选线要求。图 6 所示为软件设计部分判据原理图。

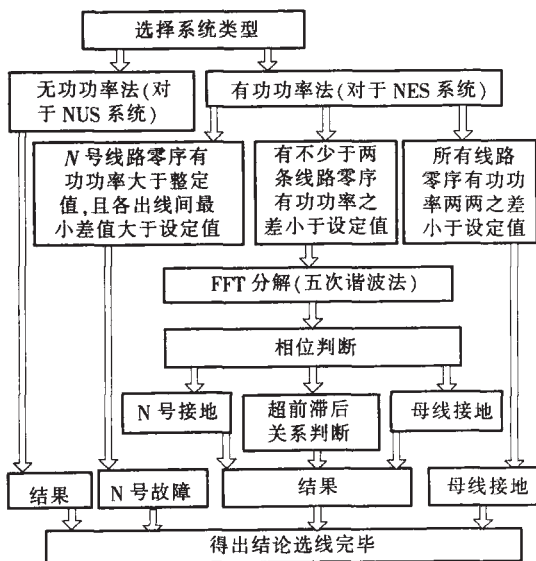


图 6 软件设计判据原理图

4 ATP 仿真

利用仿真软件 ATP 对某 110/10 kV 变电站做单相接地故障仿真,模型见图 7。具体参数为:线路 Line1~Line4 总长分别为 35, 25, 20, 15 km, 线路 Line_f 总长 30 km。0.1 s 时刻线路 Line_f 发生 A 相

短路故障,0.3 s 时刻投入消弧线圈。即 0.3 s 时刻之前电路视为无消弧线圈接线方式,0.3 s 之后为有消弧线圈接线方式。由此得到母线零序电压波形和正常线路、故障线路零序电流波形及中性点电流波形分别见图 8 和图 9。

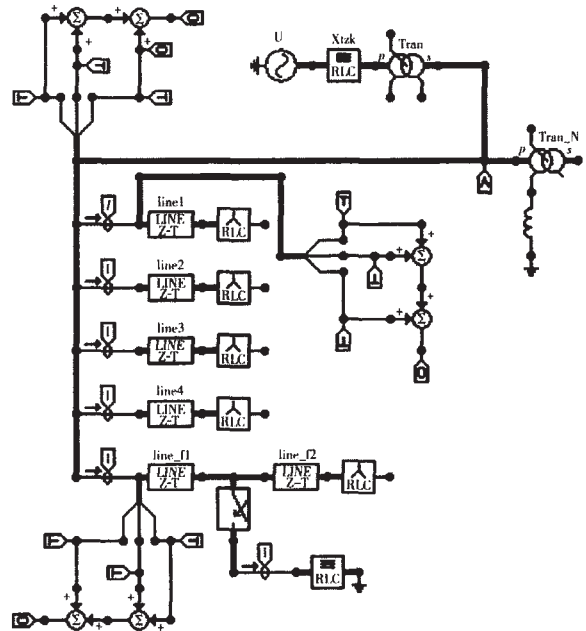


图 7 ATP 仿真模型示意图

U——系统电源 Xtzk——发电机内阻抗 Tran——升压变压器 Tran_N——中性点接地变压器 line1~line4——线路 1~线路 4 line_f1——故障线路第 1 段 line_f2——故障线路第 2 段 LineZ-T——集中参数线路单元 三相 RLC——负载 I——电流探头 V——电压探头 T——tacs 采样单元 Σ——求解向量和单元

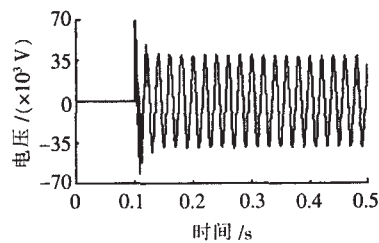


图 8 故障时母线零序电压仿真波形

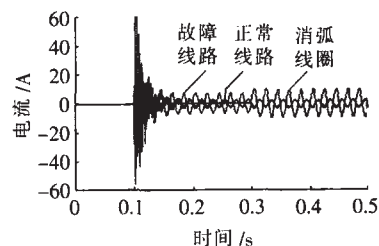


图 9 故障时零序电流仿真波形

当线路 Line_f 的 26 km 处发生近似金属性接地(接地电阻为 0.1 Ω) 时,故障点容性电流有效值为 5.152 A,消弧线圈补偿的感性电流为 5.414 A,电网的过补偿度为 4.8%。对不同的接地电阻值时的计算结果见表 1 和表 2,其中表 2 中 5 次谐波相角值是以零序电压 5 次谐波相位为基准的相对值。

表 1 无消弧线圈时各线路无功功率结果表

接地电 阻值 /	无功功率 /W				
	Line1	Line2	Line3	Line4	Line_f
0.1	-52 819	-37 708	-30 166	-22 616	145 061
1 000	-41 083.4	-29 306.1	-23 447.4	-17 583.7	111 422.4
10 000	-1 190.9	-850.0	-679.7	-509.9	3 230.5

表 2 有消弧线圈时各线路有功功率及 5 次谐波相位结果

接地电 阻值 /		零序有功 /W, 5 次谐波相位 / (°)				
		Line1	Line2	Line3	Line4	Line_f
0.1	有功	75.4	53.8	43.1	33.7	4337.9
	相位	105.21	105.21	105.22	105.22	-82.43
1 000	有功	58.1	41.5	33.2	24.9	1980
	相位	128.07	128.07	128.07	128.07	-49.73
10 000	有功	55.2	39.3	31.5	23.7	754.3
	相位	156.82	156.82	156.82	156.81	-46.21

由以上结果可以看出在 NUS 中利用零序无功功率法能够准确判断出故障线路。在 NES 中故障线路的零序有功功率远大于正常线路，但随着接地电阻值增大，正常线路的零序电流减小，故耐过渡电阻的能力还受到实际系统中装置测量准确度的影响^[7]。从结果也可看出，5 次谐波相位法作为二次判据可以减少由于各线路零序有功差值较小而产生误判的几率。

作者对 Line_f 线路不同的接地点位置 (26 km, 10 km 和 4 km) 也分别做了仿真，结果显示利用笔者所提出的判据均能准确判别出故障线路。由此可见，用文中所提出的选线方案将能以数据间较大的差别

(上接第 189 页)

离开关应力分布，上、下元件的下法兰处应力集中程度最大，将其拉应力、剪应力代入临界裂纹的计算公式，得到表 2 中不同形状因子对应的临界裂纹尺寸。

表 2 不同形状因子对应的临界裂纹尺寸

裂纹长深比 $l/c/a$	Q 值	临界裂纹尺寸 /mm	
		顶部下法兰	底部下法兰
10 1	1.102 9	12.8	5.5
4 1	1.466 5	17.0	7.3
2 1	2.464 0	28.6	12.2

由以上计算可知，在最大拉应力与扭转剪应力的综合作用下，隔离开关支柱瓷瓶的上元件最小临界裂纹尺寸为 12.8 mm，下元件最小临界裂纹尺寸为 5.5 mm；下元件下法兰口附近最危险，这与国家电力公司所统计的断裂事故相符^[1]。裂纹长深比 c/a 为 10 1 的很少，多数在 4 1 附近，因此可以选择探伤灵敏度为 5 mm。若还考虑法兰处附加应力的影响，上、下元件的探伤灵敏度应该比表 2 中的尺寸更小些。

5 结论

(1) 利用 ANSYS 对隔离开关支柱瓷瓶分析，倒闸操作时，导线静拉力、风力、及摩擦力所引起的扭矩的综合作用造成支柱瓷瓶下法兰口附近的应力集中，与实际断裂部位相符。

来确保选线准确性。

5 结语

提出的选线方案综合考虑了目前普遍采用的各种选线原理，通过对各种方法利弊以及 ATP 仿真结果的分析，最终确定了以采用目前稳态法中准确度最高的零序功率法为主判据，以 5 次谐波相位法为二次判据的选线方案。该方案兼用了幅值与相位、基波与谐波，用互补的方法去解决可能存在的判断死区，从而改善选线的准确性和适应性。

参考文献:

- [1] 肖白, 束洪春, 穆钢, 等. 基于模极大值理论的配电网接地保护研究[J]. 继电器, 2004, 32(10): 36-39.
- [2] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒, 等. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报, 1994(2): 15-19.
- [3] 庞华, 刘承洲, 任元恒, 等. 新型小电流接地系统微机消谐选线综合装置的原理及应用[J]. 电力情报, 1994(1): 62-66.
- [4] 杨汉生, 赵斌, 姚晴林, 等. 基于零序功率的小电流选线方法[J]. 继电器, 2002, 30(11): 30-32.
- [5] 郝玉山, 高曙, 杨以涵等. MLN 系列小电流接地微机选线装置动作原理[J]. 电力情报, 1994(2): 7-11.
- [6] 陈玉书, 张一华. 谐振接地系统单相接地故障 DK 法选线及其应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 69-70.
- [7] 杜丁香, 徐玉琴. 消弧线圈接地电网的有功选线[J]. 继电器, 2002, 30(5): 33-36.

(2) 利用 ANSYS 有限元分析与断裂力学相结合，计算隔离开关支柱瓷瓶的临界裂纹尺寸的方法，以 ZS1.1-252/8 型号为例，计算了下元件最小临界尺寸为 5.5 mm，上元件 12.8 mm。

(3) 隔离开关支柱瓷瓶下元件下法兰口附近临界裂纹尺寸小、危险性最大。因此，在对隔离开关支柱瓷瓶进行探伤时，检测工艺更加严格，确保能有效检测出表面的小缺陷。

参考文献:

- [1] 国电公司输电运营部支柱瓷绝缘子事故调查组. 高压支柱瓷绝缘子事故调查分析及预防措施[Z]. 2003.
- [2] 李晓红, 刘叙笔. 支柱瓷绝缘子断裂临界裂纹尺寸的分析与计算[J]. 高电压技术, 2004: 102-103.
- [3] 闫斌, 丁辉. 支柱瓷绝缘子断裂失效分析[J]. 青海电力, 2003(1): 1-6.
- [4] 电力工业部西北电力设计院. 电气工程电气设备手册电气一次部分[K]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 754-833.
- [5] 弋东方. 电气工程电气设计手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 384-408.
- [6] 高庆. 工程断裂力学[M]. 重庆大学出版社, 1986: 94-96.
- [7] 崔振源. 表面裂纹理论及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1987: 16-18.
- [8] Clark W G, Logsdon W A. 断裂力学方法在瓷器中的应用[R]. [s.l.]: 美国西屋研究试验室, 1982.