

机电技术

10 kV 配电网单相接地故障选线与仿真研究

尹德昌 赵 峰*

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘 要 10 kV 配电网发生单相接地故障时, 由于接地电流很小, 加之故障情况较复杂, 其选线问题一直未能很好地解决。在分析系统发生单相接地故障暂态特征的基础上, 对中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障进行了仿真。提出了一种利用比较各线路暂态零序电流在一个工频周期内绝对值比较的故障选线方法。阐述了该选线方法的原理与步骤。通过 MATLAB 仿真试验表明, 该方法可以准确实现故障选线, 具有较高的灵敏度, 且不受过渡电阻和故障合闸角等因素的影响。

关键词 10 kV 配电网 单相接地 故障选线 零序电流

中图法分类号 TM743; **文献标志码** A

我国 10 kV 配电网广泛采用中性点非直接接地方式。在这种接地方式中, 单相接地故障率最高, 约占配电网总故障率的 80% 左右^[1]。由于系统发生单相接地时, 接地电流很小、馈线数目较多, 加之故障特征有时不明显, 造成故障检测比较困难, 其选线问题一直未能很好地解决。

现有的故障选线方法基本可分为基于稳态方法和基于暂态方法 2 种。对于稳态选线方法, 由于稳态故障信号微弱, 且易受消弧线圈影响, 致使在实际应用中效果不理想^[2]。而系统在发生单相接地故障时存在一个较明显的暂态过渡过程, 此过程中的暂态接地电容电流比稳态电流大数倍甚至数十倍^[3,4] 以上, 且不受消弧线圈影响。故采用暂态方法可取得较好的选线效果。

基于暂态零序电流的幅值比较法^[5,6] 可以利用各条出线的零序暂态电流峰值, 来进行幅值比较。但是就单一的暂态电流峰值而言, 不能充分利用故障期间丰富的暂态信息, 且容易受到噪声的干扰而

产生误判。应寻求更加可靠的故障特征提取方法。

对配电网发生单相接地故障时暂态特征进行了分析, 并对中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障进行了仿真。为了克服上于利用单一零序电流峰值进行故障选线准确率低的问题, 提取各馈线的零序暂态电流在一个工频周期内的绝对值之和, 进而比较各线路暂态零序电流差值的故障选线方法。大量的 MATLAB 仿真试验表明, 该方法可以准确实现故障选线, 具有较高的灵敏度。

1 单相接地故障特征分析

配电网中中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的零序等效网络图如图 1 所示。

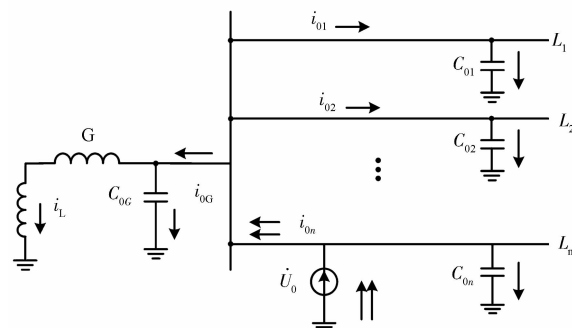


图 1 系统单相接地时的零序等效网络图

系统发生单相接地故障后, 流过故障点的暂态

2012 年 10 月 11 日收到

第一作者简介: 尹德昌 (1987—), 男, 兰州交通大学硕士研究生, 研究方向: 电力系统保护与故障检测。E-mail: yindechang2010@163.com。

* 通信作者简介: 赵 峰 (1966—), 男, 博士, 教授。硕士研究生导师。研究方向: 电力系统故障检测与诊断。

接地电流由暂态的电容电流和暂态的电感电流两部分组成。零序电压 u_0 和暂态接地电流的暂态分量 i_{dos} 分别为

$$u_0 = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$i_{dos} = i_{Cos} + i_{Los} = \frac{u_0}{L_0 \omega_0} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (2)$$

式中, ω_0 为回路自由振荡角频率, L_0 为线路和变压器等在零序回路中的等效电感。

一般情况下, 由于 ω_0/ω 比较大, 暂态电容电流 i_{Cos} 和暂态电感电流 i_{Los} 的频率显著不同, 且在暂态过程中就不能互相补偿。由于故障相电压突然降低而引起的电容电流放电衰减很快, 其振荡频率高达数千赫兹^[7], 振荡的频率主要决定于线路的参数、故障点位置及故障电阻的大小; 而非故障相电压升高而引起的充电电容电流流经回路的电感较大, 因此充电电流衰减较慢, 振荡频率也较低^[8], 仅为数百赫兹。

由以上分析可知, 当系统发生单相接地故障后, 产生的暂态接地电流的幅值和频率主要由暂态电容电流所确定^[9]。

2 故障选线原理与步骤

2.1 选线判据

由于暂态电容电流持续时间很短(大约持续 0.5~1 个周波), 故障信息检测不明显, 若直接采用零序电流的峰值容易受到噪声的干扰, 造成误判。故可采用求取各线路零序暂态电流幅值在一个工频周期内的绝对值之和, 进而比较各线路暂态零序电流差值的选线方法。充分利用暂态过程中丰富的故障信息, 增加选线的可靠性和灵敏度。

线路 j 上的零序电流在一个工频周期内的 N 个采样点数据的绝对值之和为

$$I_j = \sum_{k=1}^{k=N} |i_j(k)| \quad (3)$$

式(3)中, N 为零序电流在一个周波内幅值的采样点数, $i_j(k)$ 为线路 j 的零序电流在第 k 个采样点的幅值。则线路 i 与其他线路的零序电流总和之差为

$$\Delta I_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n I_j - I_i \quad (4)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$ 。 n 为配电网线路条数。

由前面的分析可知, 系统在发生单相接地故障后, 故障线路产生的暂态零序电流最大, 故可利用所有健全线路暂态电流与故障线路暂态电流之差最小实现故障选线。故障线路 l_f 满足

$$\Delta I_{l_f} = \min \{ \Delta I_i \}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

由于单相接地故障分两种: 线路故障与母线故障, 故用此判据的前提是先确定是线路故障还是母线故障。由于故障线路的零序电流约为所有非故障线路零序电流之和, 所以对于有 $n(n > 3)$ 条馈线的配电网, 若线路发生单相接地故障, 则故障线路的零序电流大于其他任何 2 条非故障线路零序电流之和; 若母线发生故障, 则各线路的零序电流相差不大, 具体判别算法见选线步骤(4)。

此方法在计算判据时, 其故障判据是本线路测量的暂态零序电流在一个工频周期内采样点值的绝对值之和, 相当于放大了零序电流幅值, 这样干扰信号将被大信号所淹没, 使抗干扰能力大大增强。

2.2 选线步骤

当系统发生单相接地故障时, 判别某条馈线是否为故障线路的基本步骤为:

(1) 对系统三相电压和各馈线的暂态零序电流进行采集, 采样频率为 8 kHz;

(2) 判断故障相, 其依据是, 发生故障后故障相电压降低(金属性接地时相电压降低为 0), 而健全相电压升高;

(3) 计算一个工频周期内的暂态零序电流 N 个采样点数据绝对值之和 I_j , 其中 $j = 1, 2, \dots, n$, n 为线路总数;

(4) 选出所有线路的 I_j 中前三个最大值, 并按由大到小顺序排列为 $I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$, 依据式 $I_\alpha > I_\beta + I_\gamma$ 进行故障判别。如果满足上式, 则是线路发生故障; 如果不满足上式, 则说明各线路暂态零序电流相差不大, 非馈线故障, 判断为母线故障;

(5) 利用式(4)计算各线路的 ΔI_i , ($i = 1, 2, \dots, n$), 选出 ΔI_i 值最小者所对应的线路为故障线路。

具体的故障选线算法流程图如图 2 所示。

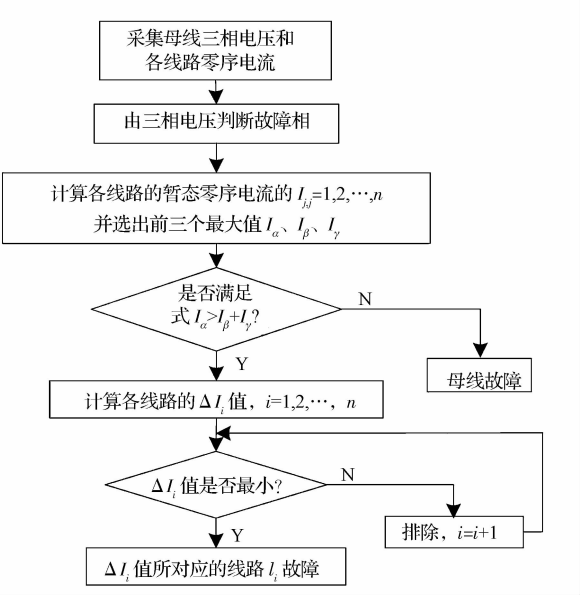


图2 故障选线算法流程图

3 仿真分析

3.1 仿真模型

运用 MATLAB/Simulink 搭建了一个 110/10 kV 的小电流接地系统模型,所用的仿真模型如图 3 所示。系统包含 5 条出线,具体参数如下。

线路的正、零序参数如表 1 所示。各线路长度分别为: $l_1=8\text{ km}$; $l_2=10\text{ km}$; $l_3=13\text{ km}$; $l_4=15\text{ km}$; $l_5=18\text{ km}$ 。

表 1 各线路正序、零序阻抗		
参数	正序阻抗	零序阻抗
$R/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0.45	0.7
$L/(\text{mH}\cdot\text{km}^{-1})$	1.171 4	3.906 5
$C/(\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1})$	0.061	0.038

对于中性点经消弧线圈接地系统,消弧线圈设为 8% 过补偿方式,则消弧线圈电感为 $L=1.287\text{ H}$; 其串联电阻的阻值取为消弧线圈感抗值的 10%,即 $R_e=40.4\text{ }\Omega$ 。

3.2 仿真结果与分析

设 $T=0.015\text{ s}$ (即故障合闸角为 90°) 时,图 3 所示系统距离母线 3 km 处,线路 5 发生 A 相金属性接地。仿真得到的系统母线三相电压、零序电压和各出线零序电流波形如图 4、5 所示。

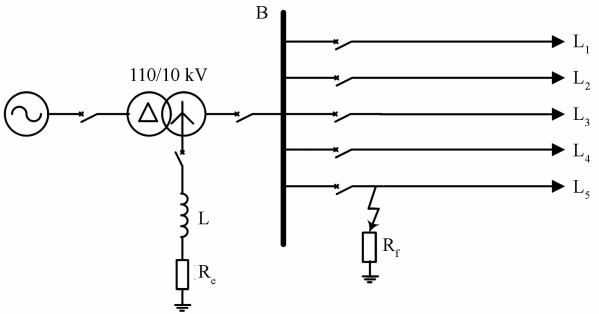


图3 小电流接地系统仿真模型

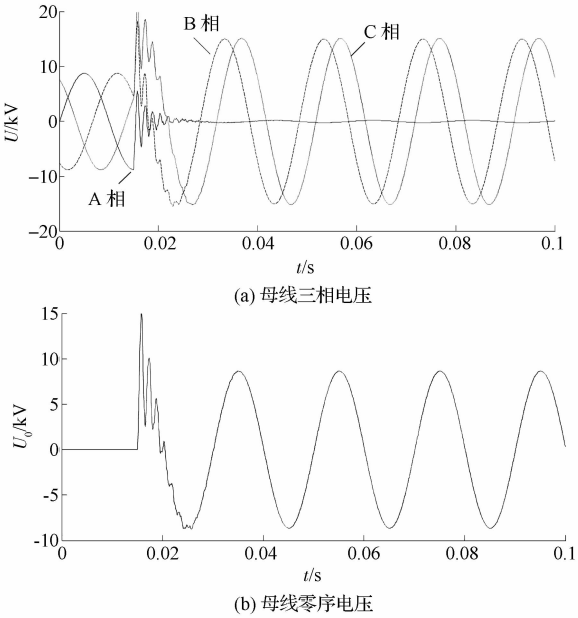


图4 故障后三相电压和零序电压波形

该次故障的选线具体过程如下:

(1) 故障发生后根据图 4(a) 所示母线三相电压波形,由于 A 相电压降低,而 B 相、C 相电压升高,所以判断 A 相为故障相。

(2) 依据式(3) 计算,线路 $L_1\sim L_5$ 零序暂态电流在一个工频周期内的 N 个采样点数据的绝对值之和 I_j 为: $I_1=243.66\text{ A}$, $I_2=303.42\text{ A}$, $I_3=384.40\text{ A}$, $I_4=456.39\text{ A}$, $I_5=1\,070.30\text{ A}$ 。可见,前三个值最大的分别为: I_5 、 I_4 、 I_3 ,并且满足 $I_5>I_4+I_3$,由此判定是线路故障而不是母线故障。

(3) 利用式(4) 计算各线路与其他线路零序电流总和之差 ΔI_i 为: $\Delta I_1=1\,970.8\text{ A}$, $\Delta I_2=1\,851\text{ A}$, $\Delta I_3=1\,689.3\text{ A}$, $\Delta I_4=1\,545.4\text{ A}$, $\Delta I_5=317.6\text{ A}$ 。

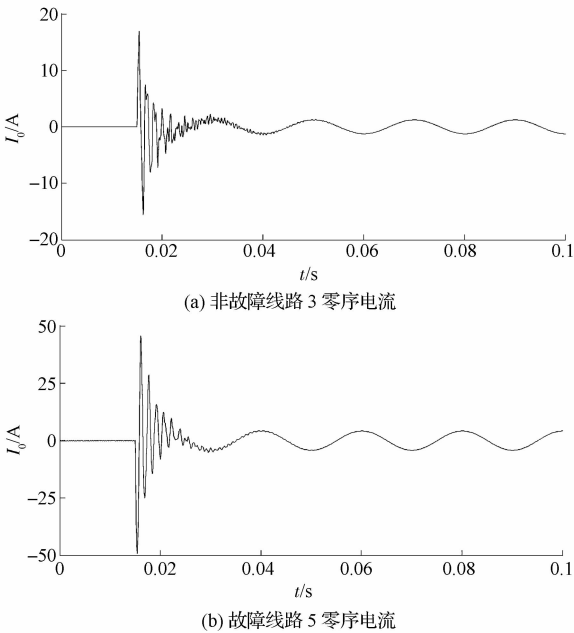


图 5 各出线零序电流波形

可见, ΔI_5 最小, 因此可确定线路 L_5 为故障线路,

这与实际情况吻合, 结果准确。

此外, 用此方法对母线故障进行仿真验证。设 $T=0.013\ 33\ \text{s}$ (即故障合闸角为 60°) 时, 系统母线发生 B 相金属性接地故障, 用式 (3) 求得线路 $L_1 \sim L_5$ 零序暂态电流在一个工频周期内的 N 个采样点数据的绝对值之和 I_j 为: $I_1=111.09\ \text{A}$, $I_2=140.60\ \text{A}$, $I_3=176.34\ \text{A}$, $I_4=193.28\ \text{A}$, $I_5=231.56\ \text{A}$ 。可见, 前三个值最大的分别为: I_5 、 I_4 、 I_3 , 但不满足 $I_5 > I_4 + I_3$, 说明各线路暂态零序电流之间相差不大, 由此判定是母线故障而不是线路故障, 选线结果正确。

3.3 方法有效性验证

此外, 还采用上述选线方法对可能发生的各种故障类型进行了仿真, 通过编制 MATLAB 程序计算得到的各线路的暂态零序电流差值如表 2 所示。大量的仿真结果都表明此选线方法准确、有效, 且不受故障线路、故障点位置、过渡电阻和故障角等不同故障条件的影响。

表 2 系统在不同故障条件下选线结果

序号	故障支路	故障距离/km	接地电阻/ Ω	故障角/ $(^\circ)$	零序电流差值 $\Delta I_i / \text{A}$					选线结果
1	L2	2	0	90	[2 743.4	258.8	2 428.3	2 302.7	2 049.5]	L2
2	L2	5	1 000	60	[381.3	8.1	347.1	333.2	307.8]	L2
3	L2	8	100	30	[993.8	11.4	889.5	845.8	781.7]	L2
4	L4	3	100	90	[1 041.4	1 008.4	915.1	74.9	773.7]	L4
5	L4	10	10	30	[1 071.0	1 013.8	931.1	16.0	806.1]	L4
6	L4	5	1000	60	[350.8	334.4	304.8	6.1	262.5]	L4
7	L5	10	10	30	[1 026.4	975.4	894.1	853.7	-39.6]	L5
8	L5	15	100	0	[667.7	632.0	578.4	542.8	9.6]	L5

4 结语

对 10 kV 配电网发生单相接地故障进行了分析和仿真, 介绍了一种利用暂态零序电流在一个工频周期内的绝对值作差比较的选线方法, 通过仿真分析得到以下结论:

- (1) 充分利用配电网发生接地故障后丰富的暂态故障信息, 提取各线路暂态零序电流在一个工频周期内所有采样点数据的绝对值之和, 放大了零序电流幅值, 避免仅利用零序电流单一峰值引起检测不准确, 提高了配电网故障选线的可靠性。
- (2) 通过对各线路采集的零序电流进行差值比较, 使故障线路与非故障线路电流之间的区别更加显著, 提高了选线的准确率。通过 MATLAB 仿真表

明, 该选线方法在各种故障条件下均能取得令人满意的效果, 具有一定的应用价值。

参 考 文 献

1 束洪春. 配电网络故障选线. 北京: 机械工业出版社, 2008

2 张伟刚, 张保会, 胡海松, 等. 应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线. 电力系统自动化, 2009; 33(23): 60—64

3 张保会, 赵慧梅, 张文豪, 等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法. 电力系统保护与控制, 2008; 36(17): 5—10

4 张新慧, 徐丙垠, 潘贞存. 小电流接地系统单相接地故障选线原理. 山东理工大学学报, 2008; 22(3): 78—83

5 唐捷, 周源, 伏进, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线新方法. 高压技术, 2007; 33(12): 143—147

6 康忠健, 李丹丹, 刘晓林. 应用非工频暂态分量的配电网故障选线方法. 电力自动化设备, 2011; 31(4): 1—6

况;该方法在电源电压无畸变和对称的情况下,能够准确快速地产生指令电流信号,补偿后的电源电流波形与电源电压基波正序分量同相位且为正弦波,验证了该检测方法的正确性。

参 考 文 献

1 公茂忠,刘汉奎,顾建军,等. 并联型有源电力滤波器参考电流获

取的新方法. 中国电机工程学报,2002;22(9):37—43

2 颜晓庆,万兆安. 电力有源滤波器及其新发展. 电工技术杂志,1998;(4):3—4

3 丁菊霞,张华俊,张秀峰. 基于平均值理论的无锁相环三相电路谐波电流检测方法. 电测与仪表,2010;47(5):43—47

A Method Based on Sine and Cosine Table of Calculating Current Reference for Shunt Active Power Filters

LU Chao-hui, TIAN Ming-xing

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

[Abstract] A new method to calculate the current reference for shunt active power filter (APF) is presented. The fundamental positive component of the supply voltage is obtained by given the sine and cosine table whose frequency is the same as the supply voltage fundamental positive component, generate the current reference with the synchronous detection method. The method obviates the phase-locked loop circuit, avoid the problem of the detection error and delay of the phase-locked loop circuit, the detection accuracy is improved; The proposed method works well under various load conditions, especially in the case of a distorted and asymmetric supply. The theoretical analysis and simulation results verify the validity and feasibility of the proposed method.

[Key words] active power filter (APF) current reference sine and cosine table

(上接第 1612 页)

7 郭清滔,吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述. 电力系统保护与控制,2010;38(2):146—152

8 薛永端,冯祖仁,徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障

暂态特征分析. 西安交通大学学报,2004;38(2):195—199

9 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地(第二版). 北京:中国电力出版社,2009

Simulation Research and Fault Line Selection of Single-phase Grounding Fault in 10 kV Distribution Network

YIN De-chang, ZHAO Feng

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

[Abstract] The fault line selection of single-phase grounding fault in 10 kV distribution network has not been well solved, due to which fault condition intricately and fault current too small. On the basis of analysis to fault transient characteristics of system when occur single-phase-to-earth fault, the single phase grounding fault of power system with neutral grounding *via* arc suppression coil is simulated. A method of single-phase grounding line selection in small current grounding system was put forward, based on comparison difference of transient zero sequence current absolute value of each line in a power frequency cycle. At the same time, principle and procedure of fault line selection of the method were introduced. The MATLAB Simulations indicate that the method can find out the faulty line correctly. It has a high sensitivity and cannot be affected by fault resistances and fault current angles and other factors.

[Key words] small current grounding system single-phase grounding fault fault line selection zero-sequence current