

配电网 10 kV 线路单相接地故障区段定位的有效值法

张国平, 杨明皓

(中国农业大学信息与电气工程学院电力工程系, 北京 100083)

摘要: 针对配电网 10 kV 线路单相接地故障区段定位问题, 提出了一种基于区段零序电流的有效值法, 并利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 和 Matlab 工具对配电网 10 kV 线路进行仿真实验和数据分析, 在理论和实验上说明该方法原理正确、简单, 不受过渡电阻、故障时刻、采样点数等影响, 具有一定的实用价值。

关键词: 单相接地故障; 区段零序电流; 有效值法

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)08-0034-04

0 引言

我国 10 kV 配电网为中性点不接地系统, 发生单相接地故障时故障相对地电压降到极小, 非故障相对地电压升高, 非故障相对地电容电流相应增大, 这样容易引发两相短路接地故障, 两相短路接地故障产生的巨大短路电流可能破坏系统的安全运行^[1], 所以必须尽快找到故障区段并予以切除, 从而缩小停电范围。

在配电自动化设备不具备远程通信和测量功能的情况下, 单相接地故障的识别只能依靠变电站中的接地选线装置来实现^[2]。随着配电网自动化水平的提高和测量技术的发展, 在馈线上安装具有测量和远程通信功能的电力综测仪已经成为可能, 这样就能获取故障时刻的大量信息, 为新方法的研究提供了可能。在此基础上, 本文提出了基于区段零序电流的有效值法, 该方法只需在馈线上安装电力综测仪, 在变电站内安装控制柜, 通过监测故障后馈线上的零序电流, 就可以实现故障区段的定位, 原理简单, 且不受过渡电阻、故障时刻、采样点数等影响, 灵敏度较高, 适用于中性点不接地的 10 kV 辐射状配电网。

1 区段零序电流分析

假设某配电网的一条出线由主干线路 (分为 a 、 b 、 c 三个区段) 和两条分支线路 (d 、 e) 组成, 该系统在 b 区段某处发生 A 相单相接地故障, 零序等效电路如图 1 所示。图中 U_0 为系统零序电压, R_f 为接地点的过渡电阻, $3Z_n$ 为中性点接地元件的等效阻抗 (对于中性点不接地系统 $3Z_n = \infty$), I_{i1} 、 I_{i2} ($i = a, b, c, d, e$) 为各个线路区段的电源侧零序电流、负荷侧零序电流, 图中箭头的方向指示了各零序电流的

实际流动方向。

如果记流入区段 i 的零序电流相量和为 I_{0i} ($i = a, b, c, d, e$), 那么 I_{0i} 就等于同一参考方向下流入区段 i 的电源侧零序电流 I_{i1} 和负荷侧零序电流 I_{i2} 之差^[3], 如下式所示:

$$I_{0i} = I_{i1} - I_{i2} \quad (i = a, b, c, d, e) \quad (1)$$

因此, 图 1 中流入各线路区段的零序电流分别为:

$$I_{0a} = I_{a1} - I_{a2}; I_{0b} = I_{b1} - I_{b2}; I_{0c} = I_{c1} - I_{c2}; \\ I_{0d} = I_{d1} - I_{d2}; I_{0e} = I_{e1} - I_{e2}$$

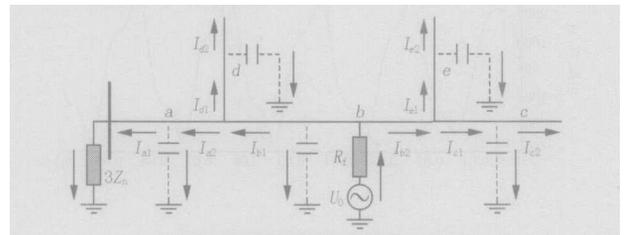


图 1 配电网零序等效电路

Fig 1 Zero-sequence equivalent circuit of power distribution system

由图 1 中各零序电流的实际流动方向可知: 如果区段 i 为故障点所在的线路区段, 那么该线路区段的电源侧零序电流和负荷侧零序电流的流动方向是相反的, 其区段零序电流的绝对值在任何时刻是最大的, 该规律在中性点不接地的 10 kV 辐射状配电网发生单一单相接地故障时都是成立的, 因此本文根据该特点来研究故障区段定位的方法。

2 有效值法的原理

任一周期电流 i 的有效值定义为^[4]:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2)$$

如果对零序电流 i_0 进行采样, N 为一周期的采样点数, $i_0(j)$ 为第 j 次采样值, 那么离散形式的零序电流有效值计算式为:

$$I_{0i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_0^2(j)} \quad (3)$$

由式 (1) 和 (3) 可知, 区段 i 的区段零序电流有效值计算式为:

$$I_{0i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_{01}(j) - I_{02}(j))^2} \quad (4)$$

由于故障点所在线路区段的零序电流绝对值在任何时刻是最大的, 因此其区段零序电流有效值也必然是最大的, 有效值法就是通过比较区段零序电流有效值的大小来实现故障区段的定位。有效值法的原理归纳如下: 当 10 kV 线路发生单相接地故障时, 馈线上所有线路区段中区段零序电流有效值最大的线路区段为故障区段, 其余线路区段为非故障区段。

3 有效值法的计算方法

区段零序电流 I_{0i} 等于同一参考方向下流入区段 $i(i=1, \dots, n)$ 的电源侧零序电流和负荷侧零序电流之差, 其计算方法应该根据线路区段所处的位置不同而有所不同, 遵循如下的规律:

如果区段 i 为馈线上所有线路区段中的末端支路 (如图 1 中的 c, d, e 区段), 那么:

$$I_{0i} = I_{0Fi} - I_{0Ti} \quad (5)$$

如果区段 i 为馈线上所有线路区段中的非末端支路 (如图 1 中的 a, b 区段), 那么:

$$I_{0i} = I_{0Fi} - \sum_{j=1}^m I_{0Fj} \quad (6)$$

其中: I_{0Fi} 为区段 i 电源侧的电力综测仪测量的零序电流; I_{0Ti} 为区段 i 负荷侧的电力综测仪测量的零序电流; $\sum_{j=1}^m I_{0Fj}$ 为区段 i 负荷侧所连接的所有 (m 条) 支路电源侧的电力综测仪测量的零序电流之和。

设 N 为 10 kV 线路发生单相接地故障后一周期的采样点数, 则区段 i 的零序电流有效值 I_{0i} 计算可采用递推算法:

$$\begin{aligned} I_{0i}(0) &= 0 \\ I_{0i}(j) &= I_{0i}(j-1) + I_{0i}^2(j) / N \quad (j=1, \dots, N) \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $I_{0i}(j)$ 为第 j 个采样点的区段零序电流值。

计算区段零序电流有效值后, 故障区段的判断只需简单地搜索 $I_{0i}(i=1, \dots, n)$ 的最大值即可, 最大值所对应的线路区段就是单相接地故障的故障区段。

4 ATP-EMTP 仿真软件简介^[5,6]

ATP-EMTP 仿真软件是当今世界上电磁暂态分析程序最广泛使用的一个版本, 是电力系统仿真的强大工具, 可以用来求解电力系统单相或多相的稳态解与各种类型的暂态解。ATP-EMTP 仿真软件主要具有以下特点: 计算速度快、结果准确度高、功能强大, 几乎可以研究任何复杂电力网络的电磁暂态过程; 元件库丰富, 包含有多个集中元件、分布参数、线性与非线性元件、各类型开关、变压器及电机等; 配有图形输入程序 ATP-Draw, 用户可以在计算机中很方便地选择元件、连接网络并修改参数。

5 仿真分析

本文利用 ATP-EMTP 仿真软件对某 10 kV 辐射型配电系统进行单相接地故障的仿真实验, 并利用 Matlab 工具进行数据处理来验证有效值法定位故障区段的可行性。该系统为中性点不接地系统, 系统如图 2 所示, 架空线总长约 4.57 km, 主干线长约 1.905 km (导线型号为 LGJ-95 和 LGJ-75), 分支线长约 2.665 km (导线型号为 LGJ-50 和 LGJ-35), 编号 1~16 为线路区段编号。

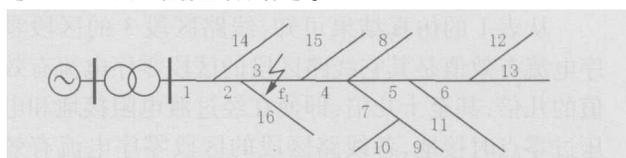


图 2 辐射网系统

Fig 2 Radial network system

本文建立变压器模型的目的是为了考虑配电网的中性点接地方式和计及变压器支路对网络零序电流的影响, 没有考虑变压器的饱和特性, 只考虑变压器原、副边的漏抗参数和变比参数, 因此选择三相两绕组芯式变压器模型 (联结组标号为 $Y_n, d11$), 高压绕组为星形连接, 中性点不接地, 低压绕组为三角形连接, 并假设变压器是线性的, 激磁阻抗无穷大。系统采用无穷大电源模型, 并假定三相电源电压具有对称性。为充分考虑分布电容的作用, 选择分布参数的线路模型。此外, 选用时间控制的开关模型来仿真单相接地故障的发生。

当配电网发生单相接地故障时,过渡电阻、故障时刻等是影响故障电容电流幅值的主要因素,因此本文在进行仿真实验的时候考虑了这些因素,进行了多次单相接地故障的仿真实验:

1) 金属性单相接地故障($R_f=0$)。假设系统初始时按稳态正常运行,以线路区段3为例在0.004 s发生A相单相接地故障,位置如图2中 f_1 所示。

2) 经过渡电阻($R_f=2000$)单相接地故障。假设系统初始时按稳态正常运行,以线路区段3为

例在0.004 s经过渡电阻 $R_f=2000$ 发生A相单相接地故障,位置如图2中 f_1 所示。

3) 电压过零点时单相接地故障。假设系统初始时按稳态正常运行,以线路区段3为例在0.005 s(即电压过零点)时发生A相单相接地故障,位置如图2中 f_1 所示。

采样点数是决定有效值法可行性的的重要因素,因此本文分别采样故障后一周期的256点、128点、64点数据进行有效值法计算分析,各区段零序电流有效值计算结果见表1所示,最大值加*标志。

表1 仿真实验和数据处理结果

Tab 1 Results of simulation experiment and data processing

线路 区段 编号	256点			128点			64点		
	$t=0.004$ s		$t=0.005$ s	$t=0.004$ s		$t=0.005$ s	$t=0.004$ s		$t=0.005$ s
	$R_f=0$	$R_f=2000$	$R_f=0$	$R_f=0$	$R_f=2000$	$R_f=0$	$R_f=0$	$R_f=2000$	$R_f=0$
1	0.433 5	0.014 2	0.003 5	0.438 3	0.016 8	0.003 5	0.359 1	0.022 5	0.003 5
2	0.448 9	0.010 6	0.003 9	0.473 1	0.012 6	0.003 9	0.457 8	0.017 0	0.003 9
3	4.627 5*	0.119 9*	0.100 1*	5.171 9*	0.130 8*	0.100 0*	4.975 9*	0.154 1*	0.099 1*
4	0.703 1	0.023 4	0.008 7	0.684 1	0.026 8	0.008 7	0.843 8	0.034 7	0.008 5
5	0.756 8	0.022 3	0.011 4	0.796 2	0.023 7	0.011 3	0.659 0	0.029 4	0.011 2
6	1.313 9	0.039 4	0.018 5	1.315 3	0.035 2	0.018 1	1.286 3	0.024 3	0.018 0
7	0.383 4	0.009 0	0.005 2	0.427 2	0.009 5	0.005 1	0.389 6	0.009 8	0.005 1
8	0.417 1	0.019 3	0.004 5	0.414 3	0.025 9	0.004 4	0.416 8	0.036 0	0.004 4
9	0.598 6	0.013 3	0.001 8	0.545 7	0.014 7	0.001 7	0.523 4	0.017 3	0.001 8
10	0.356 3	0.008 0	0.004 6	0.340 9	0.007 7	0.004 6	0.317 1	0.007 2	0.004 6
11	0.186 7	0.004 8	0.002 1	0.208 6	0.005 2	0.002 1	0.199 4	0.005 8	0.002 1
12	0.474 7	0.012 4	0.005 0	0.462 7	0.015 6	0.004 8	0.503 1	0.020 4	0.004 8
13	0.256 8	0.005 8	0.002 5	0.248 4	0.006 9	0.002 4	0.244 2	0.006 9	0.002 4
14	0.918 7	0.023 0	0.009 4	1.008 8	0.028 2	0.009 4	1.016 2	0.037 0	0.009 3
15	1.479 6	0.025 6	0.009 3	1.432 7	0.033 5	0.009 9	1.501 7	0.044 8	0.009 8
16	0.760 1	0.017 0	0.009 3	0.755 1	0.015 8	0.009 3	0.748 5	0.015 3	0.009 3

从表1的仿真结果可知,线路区段3的区段零序电流有效值是其它线路区段的区段零序电流有效值的几倍,甚至十几倍,即使在经过渡电阻接地和电压过零点时接地,各线路区段的区段零序电流有效值也只是幅值变小了,而线路区段3的区段零序电流有效值仍然是最大的,从而可以正确地判断出线路区段3就是故障区段。仿真实验表明有效值法具有很强的抗接地过渡电阻能力,灵敏度较高,在电压过零点时也不存在死区,具有一定的可行性和正确性。

6 结论

区段零序电流有效值具有如下的特点:线路发生单相接地故障时,馈线上所有线路区段中的故障区段的区段零序电流有效值最大,非故障区段的区段零序电流有效值为故障区段的区段零序电流的几分之一,甚至几十分之一。在此理论基础上,本文提

出了配电网10 kV线路单相接地故障区段定位的有效值法,该方法只需在变电站内安装控制柜,在馈线上安装电力综测仪构成测控系统来监测馈线上的零序电流,通过比较区段零序电流有效值来实现故障区段的定位。仿真实验表明有效值法原理简单,抗接地过渡电阻能力强,灵敏度较高,能够准确地实现故障区段的定位,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
LI Fu-shou Operation of Electric Power System with Neutral Ineffective Grounding[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.
- [2] 刘宇, 申东日. 小电流接地系统单相接地故障选线原理综述[J]. 抚顺石油学院学报, 1997, 17(4): 52-57.
LIU Yu, SHEN Dong-ri Survey of Principle for Discriminating the Faulted Line or Bus in the Power System with

Floating Neutral[J]. Journal of Fushun Petroleum Institute, 1997, 17(4): 52-57.

[3] 夏雨,贾俊国,靖晓平,等. 基于新型配电自动化开关的馈线单相接地故障区段定位和隔离方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 102-106
XIA Yu, JIA Jun-guo, JING Xiao-ping, et al A New Method of Locating and Isolation for Single Phase Grounding Fault Section of Feeders in Power Distribution Network Based on New Types of Distribution Automation Switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 102-106

[4] 邱关源. 电路(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
QIU Guan-yuan Circuit, Fourth Edition [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

[5] 徐政. 免费使用的电磁暂态分析程序——ATP-EMTP

程序介绍[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 64-66
XU Zheng An Introduction to ATP-EMTP[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 64-66

[6] 钱鑫,李琥,施围. 电力系统仿真计算软件介绍[J]. 继电器, 2001, 30(1): 43-46
QIAN Xin, LI Hu, SHI Wei Simulation Software in Power System[J]. Relay, 2001, 30(1): 43-46

收稿日期: 2004-08-02; 修回日期: 2004-09-30
作者简介:

张国平(1979-),男,硕士研究生,研究方向为配电自动化技术; E-mail: mhs4@cau.edu.cn
杨明皓(1953-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为配电自动化、配电系统规划与运行。

A virtual value method of locating single-phase grounding fault section of 10kV feeders in power distribution system

ZHANG Guo-ping, YANG Ming-hao
(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the problem of locating single-phase grounding fault section of 10 kV feeders in power distribution system, this paper presents a virtual value method based on zero-sequence current of sections. Simulation experiment with ATP-EMTP and data processing with Matlab demonstrate that the proposed method is correct. The method is simple in theory, and not influenced by grounding resistance, fault time, and sampling nodes. It has some practical values.

Key words: single-phase grounding fault; zero-sequence current of sections; virtual value method

(上接第 33 页 continued from page 33)

[2] 过增元,赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京:科学出版社, 1986.
GUO Zeng-yuan, ZHAO Wen-hua Plasma of Electric Arc and Heat[M]. Beijing: Science Press, 1986.

[3] 王其平. 电气电弧理论[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
WANG Qi-ping Theory of Electrical Arc[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.

[4] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社,

1998.
WU Jing-chang Harmonic of Power Supply System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2004-07-30; 修回日期: 2004-09-23
作者简介:

郭继红(1979-),女,硕士生,研究方向为变电站电流谐振和抑制方法; E-mail: slimgirl_1979@163.com
颜湘武(1965-),男,教授,主要从事电力电子与电气工程理论方面的研究和教学工作。

Model and simulation of arc furnace system for harmonic analysis

GUO Ji-hong, YAN Xiang-wu
(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A new idea for harmonic analysis of arc furnace system is put forward with theoretical research, and its feasibility is testified with examples. At first, a performance curve of arc furnace resistance is obtained by Matlab simulation according to random variation equation of arc resistance. And then, simulation of overall system and harmonic analysis are carried out based on ultimate value of arc resistance. Finally, simulation results and actual measurement data are compared, and the error is very little. So this theory is feasible.

Key words: arc furnace; harmonic; arc resistance; Matlab