

中性点不接地系统故障充电暂态信号定位法

张文海¹, 汪颖^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:中国中压配电网的中性点主要采用非有效接地系统,此类系统在发生单相接地故障后的一个重要特点是故障相电压降低,非故障相电压升高。由于线路存在电容和电感,故非故障相电压升高的这一暂态过程可看作对非故障相电容的充电暂态过程。利用出线故障录波器记录的电压电流波形信息,通过对充电暂态信号进行频谱分析、信号提取然后再进行故障的定位,并通过 Matlab 进行了仿真分析,证明了所提方法的正确性。

关键词:故障定位; 单相接地故障; 充电暂态; 频谱分析; 信号提取

Abstract: The neutral points in medium-voltage distribution system in China are mainly non-effectively earthed. An important characteristic of this system is that the voltage of fault phase is decreasing and the voltage of non-fault phase is increasing after single-phase earth fault happened. Due to the existing line capacitance and line inductance, the transient progress of non-fault phase voltage increasing can be regarded as a charge transient. Using voltage and current waveform information recorded by the fault recorder installed in the bus bar, the spectrum analysis and signal extraction of charging transient signal are carried out, and then the fault is located. The validity of the proposed method is proved by Matlab simulation analysis.

Key words: fault location; single-phase earth fault; charge transient; spectra analysis; signal extraction

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0026-04

0 引言

随着智能电网的建设和发展,配电系统故障诊断与快速准确定位,是实现智能配电系统的关键内容之一。中国配电网的中性点运行方式主要采用小电流接地,包括经消弧线圈接地和不接地,配电网的电压等级主要为6~35 kV。实践证明,配电网中发生单相接地故障的情况最多。因此,针对配电网单相故障的快速准确定位方法的研究,成为了国内外研究的热点。

欧美国家对配电网故障定位开展了大量研究,提出的主要方法有基频分量法、高频分量法和基于知识的方法^[2],但是,这些研究大多针对中性点有效接地系统进行,而中国的配电网大多为中性点非有效接地系统,在发生故障时,非故障相电压升高为正常运行电压的 $\sqrt{3}$ 倍,由于线路对地电容的存在,因此,故障相电压降低可看作是线路电容的放电过程,非故障相电压升高是线路电容的充电过程^[1]。

配电网故障定位可分为两类,一类是对于故障区段定位,另一类是故障精确测距^[3]。故障区段定位通常利用多点测量,并结合人工智能或数学理论进

行^[4-5],单相接地故障通常对零序信号或零模分量进行分析^[6-7];故障测距法主要有S注入法^[8]、行波法^[9]、传递函数法^[10]以及迭代算法^[11]等。故障区段定位大多基于FTU或配电网自动化,但中国很多实际配电网尚未完全实现配电网自动化;零序电流多点检测的成本较高,单相接地故障的稳态零序电流很小,检测较困难;S注入法易受互感器容量限制,且通常仅离线定位;行波法对于装置的要求高,需要有较高的安装成本,主要应用于输电网;传递函数法的研究还处于理论研究阶段,实际应用还有待验证;文献^[11]中提到的迭代的计算方法需知道双端同步的电压电流信息,局限了此方法的应用。

这里研究中性点不接地系统单相接地故障定位问题。利用非故障相电压升高的暂态充电过程的特点和变化规律进行故障定位,提出一种暂态充电信号量化分析的方法。主要内容包括基本理论和算法、暂态信号频谱分析、信号提取与故障定位算法,最后通过仿真证明了方法的正确性和可行性。

1 理论分析研究

1.1 充电暂态测距的理论分析

在中性点不接地系统中发生单相接地故障时,会产生一些暂态信号,其中最主要的就是非故障相电压升高的充电暂态和故障相电压降低的放电暂态。其暂态信号的组成有充、放电暂态信号,其频率主要集中在0.3~3 kHz^[12]。

对于放电暂态信号直接由故障相经过对地电容与地构成通路;而充电暂态信号则需要通过变压器,然后通过非故障相,然后通过对地电容与地构成通路,信号流通过程如图1。将充电暂态信号的流通过程进行简化等效,用集中参数将电路进行定量化的分析,其简化电路如图2。

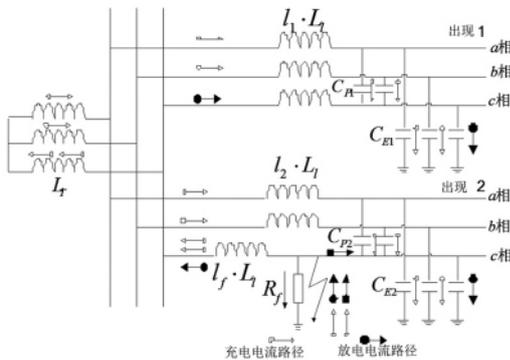


图1 单相接地故障模型

图1中 L_T 为变压器单相电感; L_1 为线路单位电感; R_f 为故障电阻; l_1 、 l_2 分别为出线1和出线2的线路长度; l_f 为故障距离; C_{p1} 、 C_{p2} 分别为出线1、2的相间电容(假设三相对称); C_{E1} 、 C_{E2} 分别为出线1、2的线路对地电容。

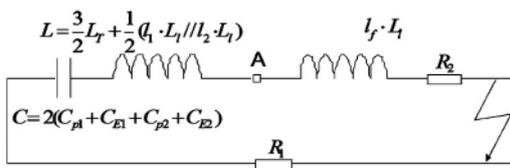


图2 充电暂态电路简化图

图2中,A点代表出线的电压电流测量点(考虑使用的是故障录波器); R_1 为非故障线路和变压器的等值电阻; R_2 为故障点到测量点之间的线路电阻值和故障电阻的和; L 、 C 分别代表变压器和非故障相的等值电感和电容;其他参数同图1中所示。

通过A点测量到的电压、电流信号很容易计算出故障的距离,其计算原理如下^[13]。

$$L_f = \frac{1}{\omega_c} \cdot \frac{v_c}{i_c} \cdot \sin\varphi \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{1}{3}(L_0 + L_1 + L_2) \quad (2)$$

$$l_f = L_f/L_1 \quad (3)$$

式(1)中 ω_c 为充电角频率; v_c 和 i_c 分别代表充电暂态电压和电流信号,可以取瞬时值,也可以取有效值; φ 代表电压超前电流的相位角;式(2)中 L_1 、 L_2 、 L_0 分别代表线路的正、负、零序单位电感;式(3)为求取故障距离的公式。

对于式(1)中 v_c 和 i_c 比值的求取,这里采用了两种方法,一种是均方根值(Yoot mean square, RMS)算法,另一种是极值点序列算法。RMS算法是分别取暂态电压和电流信号中的一段,然后分别求其有效值,最后求其比值;而极值点序列算法则是分别求取信号衰减过程中电压和电流信号对应的极值点的比值,然后求取平均值。

1.2 故障电阻的影响

从图2的简化等效电路图可以很容易看出充电回路可看作串联RLC电路,因此根据电阻对RLC电路充电过程的影响,可分析出故障电阻对所提方法的影响。

在串联RLC电路中,当满足式(4)时为欠阻尼,此时的充电暂态过程为振荡衰减,并且其频率的计算如式(5),当不满足时将为非振荡衰减^[14]。对于振荡衰减的信号,当识别出其振荡频率后,可以很容易将此信号提取出来进行分析,然而,对于非振荡衰减信号,其信号的提取比较困难。

$$R^2C < 4L \quad (4)$$

$$f_c = \frac{1}{4\pi L} \sqrt{\frac{4L - R^2C}{C}} \quad (5)$$

式中 L 、 R 、 C 分别为等效电路中的电感、电阻和电容。

从式(4)中可以看出,充电过程是否为振荡衰减与电路本身的结构参数(电感、电阻和电容)和故障电阻的大小有关。当故障电阻过大时可能导致式(4)不满足,从而所提方法将失效;故障电阻的大小还会影响充电频率大小。

文献[16]曾经统计过中性点不接地系统的配电网中的故障情况(包括故障类型和故障电阻大小),有的故障为单相接地故障,而且在单相接地故障中,故障电阻主要集中在40 kΩ和40 kΩ左右。通过仿真可以发现,当故障电阻小于100 Ω时(和网络的参数有关),满足式(4),所提方法成立。

2 信号的分析处理

在得到充电暂态电压和电流的波形后,还必须对

表1 故障测距结果

故障实际 距离/km	故障 电阻/ Ω	负荷大小 /MVA	故障电压 初始角/ $^\circ$	是否存在 故障分支	RMS 测距算法		极值点序列测距算法	
					计算结果/km	相对误差/%	计算结果/km	相对误差/%
10	0				8.52	-14.78	8.61	-13.89
10	20				9.08	-9.23	9.42	-5.80
10	40	$5 + j3.75$			9.70	-2.97	10.01	0.07
10	80		45		10.87	8.69	13.52	35.2
10	100			否	12.38	23.8	15.81	58.1
10	20	$10 + j7.5$			9.50	-5.01	9.86	-1.41
10	40				10.01	0.14	10.51	5.13
10	40		0		9.02	-9.77	9.53	-4.68
10	40	$5 + j3.75$	90		9.53	-4.72	10.13	1.28
16	0				15.81	-1.16	15.08	-5.74
16	40		45	是	15.57	-2.64	16.87	5.41

信号进行处理后才能计算得到故障的距离。信号的处理主要包括暂态信号的频谱分析、充电信号的频率识别以及信号的提取。

在进行频谱分析时采用的是FFT(fast Founier transform)变换,在进行信号提取时采用的是连续小波变换。如图3所示是电流和电压暂态信号的频谱分析,从图中可以很容易地识别出充电暂态信号(约700 Hz)和放电暂态信号(约1800 Hz)。

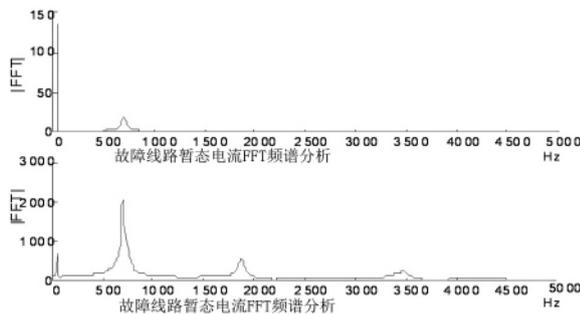


图3 电流和电压暂态信号的频谱分析图

在进行充电暂态信号的提取时可以采用离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)和连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)。当使用离散小波变换时,提取的信号是一个频段范围内的信号^[16],因此,当充电频率在频段范围的边界时就会导致信号提取误差的增大。这里采用的是连续小波变换,当识别出充电暂态信号的频率后,结合选择的母小波的中心频率可计算出小波变换的尺度(见式(6)),然后再在这个尺度下进行连续小波变换即可提取出充电暂态信号随时间变化的曲线图(如图4)。

$$scale = f_c * f_s / f_a \quad (6)$$

式中 f_c 为母小波的中心频率; f_s 为采样频率; f_a 为需要提取的信号频率(即充电频率)。

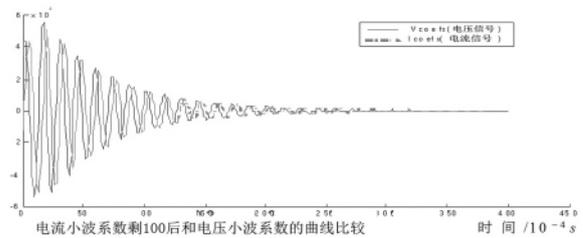


图4 充电暂态电压电流信号波形图

在提取出充电暂态电压和电流信号后,可通过电压电流的波形信号的时间差计算其相位差(相位差的计算见式(7)),再利用前面所提到的测距方法进行故障的定位(包括RMS算法和极值点序列算法)。

$$\varphi = t_s * \omega_c = t_s * 2\pi * f_c \quad (7)$$

式中 φ 为电压超前电流的相位; t_s 代表电压超前电流的时间差(可从提取的电压和电流的波形图中求出); ω_c 为充电角频率; f_c 为充电频率。

3 仿真分析结果

在Matlab的电力系统仿真工具下进行了仿真和数据分析。通过建立配电网模型和设置好相关参数进行仿真分析,根据文献[17]设置线路的参数为线路正序电阻为0.17 Ω /km,零序电阻为0.23 Ω /km,正序电感为1.2 mH/km,零序电感为5.48 mH/km,正序电容为9.697 nF/km,零序电容为6 nF/km。

在仿真中分别考虑了不同故障电阻、负荷大小、故障初始角以及是否存在线路分支对于故障测距的影响,并将RMS算法和极值点序列算法做了简单比较,仿真结果参见表1。

4 结论及展望

从仿真的结果可以看出,所提方法不受负荷大

小、故障初始角以及故障分支的影响,但当过渡电阻较大时精度大大降低,原因是过渡电阻增大时,暂态信号的衰减速度增大;当过渡电阻大于某值时,方法将失效。还利用了充电暂态信号进行故障的定位,思路新颖清晰,但是精度不高,还需要在信号的分析处理上进行深入研究,特别是充电信号的提取问题。前面只考虑了故障电阻较小时的单相接地故障定位问题,以后还需要对高阻抗故障以及瞬时性故障的识别与定位进行深入的研究。而且只是利用了故障时产生的暂态信号,在以后的研究中还应加入故障稳态信号的分析,利用暂稳结合的方法以提高故障定位的准确性和可靠性。

参考文献

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

[2] M. Mirzaei, M. Z. A. Ab Kadir, E. Moazami, etc. Review of Fault Location Methods for Distribution Power System [J]. Australia: Basic and Applied Science, 2009, 3(3): 2670 - 2676.

[3] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119 - 124.

[4] 许奎,张雪松,杨波. 配电网故障定位的改进通用矩阵算法[J]. 继电器, 2007, 35(3): 6 - 8.

[5] 王林川,李庆鑫,刘新全,等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29 - 33.

[6] 张利,杨以涵,司冬梅,等. 基于零序电流和磁场检测故障杆的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 73 - 76.

[7] 孙波,徐丙垠,孙同景,等. 基于暂态零模电流近似熵的

小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83 - 87.

[8] 张惠芬,潘贞存,桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64 - 66.

[9] 于盛楠,鲍海,杨以涵. 配电网故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86 - 90.

[10] 吴振升,杨学昌,伊贵业. 配电网三相不换位线路接地故障定位的传递函数法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 7 - 11.

[11] 梁志瑞,穆毓,牛胜锁,等. 一种小电流接地系统单相接地故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 66 - 70.

[12] 唐轶,陈奎,陈庆. 小电流接地电网单相接地故障的暂态特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 175 - 179.

[13] Seppo Hanninen. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks: Characteristics, Indication and Location [D]. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2001.

[14] William H. Hayt Jr, Jack E. Kemmerly. 工程电路分析(第七版)[M]. 周玲玲,蒋乐天,等译. 北京:电子工业出版社, 2007: 285 - 318.

[15] Seppo Hanninen, Matti Lehtonen. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44: 155 - 161.

[16] David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffrey S. Mayer, et al. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050 - 1058.

[17] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利水电出版社, 1993.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第8页)

[5] Irvin J. Balaguer, Heung-Geun Kim, Fang Z. Peng, et. Survey of Photovoltaic Power Systems Islanding Detection Methods [C]. Industrial Electronics 34th Annual Conference of IEEE 2008: 2247 - 2252.

[6] H. H. Zeineldin, James L. Kirtley, Jr. A Simple Technique for Islanding Detection with Negligible Nondetection Zone [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 779 - 786.

[7] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi. Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention [J]. IEEE Transactions on Energy

Conversion, 1999, 14(3): 810 - 816.

[8] M. E. Ropp*, M. Begovic and A. Rohatgi. Prevention of Islanding in Grid-connected Photovoltaic Systems [J]. Progress in Photovoltaics, Summer, 1999: 39 - 59.

[9] Ward Bower, Michael Ropp, Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems [R]. SANDIA REPORT, SAND2002 - 3591, November 2002.

[10] H. H. Zeineldin, S. Kennedy. Instability Criterion to Eliminate the Non-detection Zone of the Sandia Frequency Shift Method [C]. Power System Conference and Exposition, 2009: 1 - 5. (收稿日期:2011-04-13)