

基于小波变换和 BP 网络的非故障相暂态电流故障定位

王 铭,徐玉琴

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要:针对小电流接地系统单相接地故障定位的研究现状,提出基于非故障相暂态电流的单相接地故障定位的思想。应用小波变换理论进行分析,总结出非故障相暂态电流随故障点位置变化的规律,并用 BP 神经网络实现模极大值与故障点位置之间的映射关系,从而进行故障定位。在不同过渡电阻、不同故障距离点情况下的仿真结果证明,该故障定位方法准确可靠。

关键词:配电网;故障定位;非故障相暂态电流;小波分析;BP 神经网络

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0025-03

目前,我国 6~35 kV 配电系统的中性点一般采用不接地或经消弧线圈接地 2 种方式^[1]。该类系统发生单相接地故障时,流过故障线路的电流很小甚至反相,统称为小电流接地系统。有关规程规定,小电流接地系统发生单相接地故障时可以继续运行 1~2 h。但是,由于发生故障时非故障相的电压上升至线电压^[2],为防止绝缘破坏造成故障进一步扩大,必须及时发出信号并排除故障。小电流接地系统发生单相接地故障时,系统对地电容与故障点之间充放电,将产生振幅比稳态基频大许多倍的高频暂态分量^[3]。此过程包含丰富的故障信息,为提取故障特征进行故障选线和定位提供了有利条件。近年来单相接地故障定位问题的研究多是围绕故障馈线故障相的暂态量进行。但是,单相接地故障发生时,故障馈线故障相上流过的是系统所有非故障相暂态电流的总和,会受相关系统非故障线路对地电容大小、故障馈线不对称性及系统运行方式和结构等诸多不确定因素的影响,因此利用故障相暂态电流分量进行故障定位很难解决故障定位的精确度问题。

1 故障定位理论

1.1 方法提出

当中性点经消弧线圈接地的电网发生单相接地故障时,故障线路故障相及各出线非故障相的电流 I_k 和 I_{Bi} , I_{Ci} 分别为

$$I_k = -j\omega \sum_{i=1}^n C_{0i} (U_B + U_C) = -j\omega \sum_{i=1}^n C_{0i} U_0 \quad (1)$$

$$I_{Bi} = U_B j\omega C_{0i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$I_{Ci} = U_C j\omega C_{0i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中 C_{0i} 为第 i 个非故障元件的对地电容。

可见故障馈线故障相上流过的是系统所有馈线非故障相暂态电流之和,故母线出线数目或线路参

数变化会影响其取值,而各馈线非故障相上流过的只有本条线路自身暂态电流,能更准确地定位故障。

1.2 ATP 仿真模型建立

本文使用 ATP/EMTP 模拟小电流接地系统单相接地故障,以获得所需要的故障暂态信息。仿真所用系统结构模型见图 1。线路参数:正序阻抗为 $(0.17+j0.38)\Omega/\text{km}$,零序阻抗为 $(0.23+j1.72)\Omega/\text{km}$,正序容纳为 $3.045\mu\text{S}/\text{km}$,零序容纳为 $1.884\mu\text{S}/\text{km}$ 。

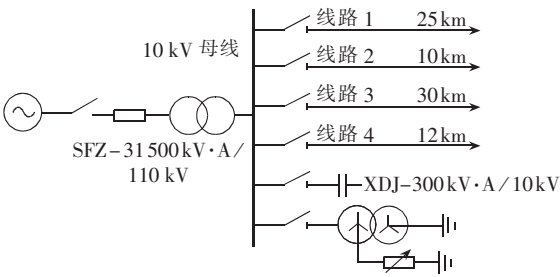


图 1 小电流接地系统仿真实例

Fig.1 Model of small current grounding system

假设线路 1 在距母线 8 km 处发生 A 相接地故障,采样频率为 200 kHz,数据窗取故障前 5 ms 至故障后 25 ms 共 30 ms。使用 ATP 仿真得到的去除负载电流后的各相暂态电流如图 2 所示。

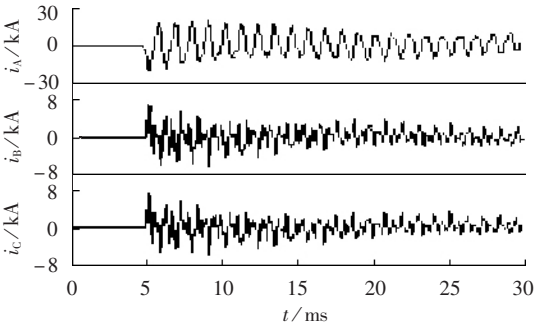


图 2 A 相接地故障时三相暂态电流

Fig.2 Transient currents of three phases during grounding fault of phase A

单相接地故障时,故障线路故障相的暂态电流为线路 1 至线路 4 所有非故障相的暂态电流之和,具有很大的不确定性。而线路 1 非故障相的暂态电流仅与自身线路的参数有关,且此电流中包含有故障距离的信息。这就证明了利用故障馈线非故障相的暂态电流进行单相接地故障定位的思想是可行的。

2 小波变换及其模极大值检测

2.1 小波变换及模极大值检测理论^[1-2]

小波分析(wavelet analysis)是 20 世纪 80 年代后期发展起来的应用数学分支,它汲取了傅里叶变换、数值分析、泛函、样条等众多分支的精华,在时、频域同时具有良好的局部化性质,可以观察信号的任意细节。暂态电流分量成分复杂、衰减快而且持续时间短,采用小波可以完整有效地提取暂态分量^[4-5]。

小波变换的极大值检测法是多尺度边缘检测。多尺度边缘检测是在不同尺度上先对信号进行平滑,再由光滑信号的一阶导数检测信号的突变点。

假设 $\theta(t)$ 为光滑函数,记其一阶导数为 $\Psi(t) = d\theta(t)/dt$,则由它产生的小波族为

$$\frac{\Psi((t-b)/a)}{\sqrt{|a|}} = \frac{d\theta((t-b)/a)}{\sqrt{|a|}dt} \tag{4}$$

根据小波变换定义有

$$W_{a,b}f(t) = \langle f(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = |a|^{-\frac{1}{2}} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \theta\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{5}$$

由上式可知: $f(t)$ 经 $\Psi(t)$ 小波变换后,变成 $f(t)$ 与光滑函数卷积后求的一阶导数。因此,小波变换的局部极大值即局部模极大值点就对应信号的突变点^[6]。据此原理,可以描述单相接地故障信息。

2.2 小电流接地系统单相接地故障分析^[7-8]

理论证明,小电流接地系统单相接地故障绝大多数发生在相电压的峰值附近。其能量主要集中在 300~1 500 Hz。本文选用 Dabuechies 5(Db5)小波进行分析,小波分解级数为 6 级,可以识别的最大频率为 1 562.5 Hz,能够满足检测要求。图 3 为 B 相暂态电流分量的小波分解。

由图 3 尺度 6(即 i_6)可以得到信号的模极大值出现在第 1 080 个采样点处(即 5.4 ms 时刻)。其模极大值的尺度为 4.596 4。改变故障距离,运用同样方法得到一组不同故障距离时的模极大值。本文分别测得过渡电阻为 0 Ω 和 30 Ω 时不同故障距离时的模极大值。

3 基于 BP 神经网络故障定位

人工神经网络中的 BP(Back Propagation)网络具有很强的自适应性和自学习性。BP 算法是目前应用最为广泛的神经网络学习算法。理论证明,对任何复杂的对象,采用 3 层 BP 网络时,只要适当地

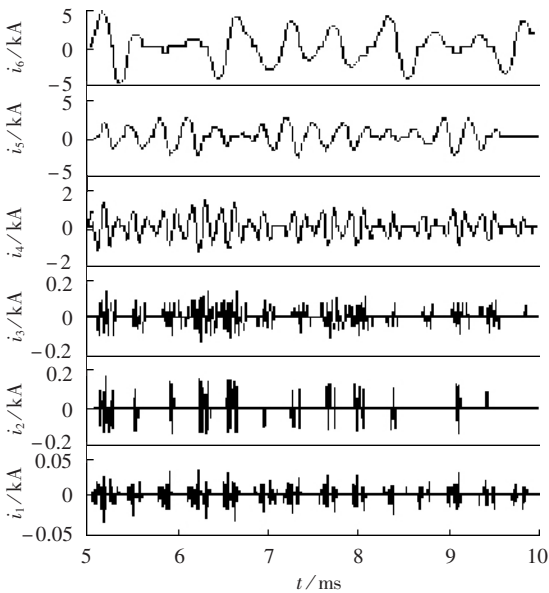


图 3 B 相暂态电流的小波变换

Fig.3 Wavelet transform for transient current of phase B

选择神经元的数目,就可以任意地对研究对象进行分类识别^[9]。用于本论文中的神经网络为 3 层前馈 BP 网络。输入层输入前面所求得的不同故障距离时的模极大值。隐含层经过多次训练后,取 6 个神经元可达到目的。隐含层的传递函数为 Sigmoid 型可微函数 $f(x) = 1 / (1 + \exp(-x))$ 。输出层为 1 个神经元,使用纯线性传递函数,输出表示故障距离。

编制程序利用 Matlab 神经网络工具箱^[10]对上述网络进行训练。表 1 是在不同过渡电阻、不同故障距离点下的仿真结果。

表 1 利用 BP 网络进行故障定位仿真结果

Tab.1 Simulative results of fault locating using BP neural network

d_1/km	$R = 0 \Omega$		$R = 30 \Omega$	
	d_2/km	$e/\%$	d_2/km	$e/\%$
2.0	2.0043	0.2150	1.9981	-0.595
3.1	3.0712	-0.9290	3.1331	1.068
4.0	3.9767	-0.5825	3.9251	-1.873
5.0	4.9945	-0.1100	4.9719	-0.562
6.0	6.0182	0.3030	5.9686	-0.523
7.0	7.0585	0.8360	7.0925	1.321
8.0	8.0688	0.8600	8.0090	0.113
8.2	8.1397	-0.7350	8.1568	-0.527
9.0	9.0467	0.5190	8.8613	-1.541
12.5	12.4468	-0.4260	12.5555	0.444
13.5	13.5208	0.5140	13.4553	-0.331
15.0	14.8983	-0.6780	15.0404	0.269
16.0	15.7113	-1.8040	16.0695	0.434
18.0	18.1631	0.9060	18.0575	0.319
19.0	19.2803	1.4750	19.0403	0.212
20.0	19.9811	-0.0950	19.8235	-0.883
21.0	21.1795	0.8550	21.1128	0.536
22.0	22.0012	0.0050	22.0270	0.123
23.0	22.9775	-0.0980	23.0104	0.045
23.5	23.3340	-0.7060	23.4444	-0.237
25.0	24.9225	-0.3140	24.8342	-0.663

注: R 为过渡电阻; d_1 为实际距离; d_2 为测量距离; e 为相对误差。

由表 1 可见:所有故障点的相对误差绝对值都在 1.9%之内,其中相对误差小于 1%的点有 39 个,占检测点总数的 85.71%,能够满足工程测量的要求。以上仅列出过渡电阻为 0 Ω 和 30 Ω 时的仿真结果,但已经证明过渡电阻变化时,在最高尺度上检测到的模极大值位置不变,具有较强的规律性。

基于非故障相暂态电流模极大值的故障定位方法算法流程图如图 4 所示。

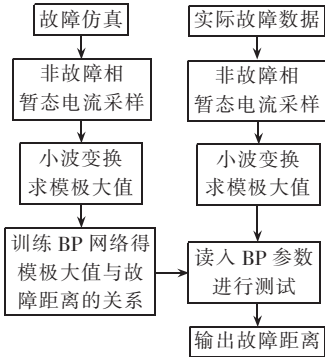


图 4 故障定位方法流程图
Fig.4 The flowchart of fault location

4 结论

- a. 单相接地故障时,非故障相暂态电流只受自身线路参数等的影响,可以更准确地实现故障定位。
- b. 利用小波变换模极大值检测理论分析非故障相暂态电流,并用 BP 神经网络实现模极大值与故障点位置间的映射。仿真结果表明该理论完全可行。
- c. 本文仅给出故障发生在相电压峰值时的情况,通过大量仿真得到,故障发生在其他时刻时,基于非故障相暂态电流模极大值的故障定位方法同样能够满足系统检测的要求。

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.
[2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,1994.
[3] 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.

[4] 徐佩霞,孙功宪. 小波分析与应用实例[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996.
[5] 王娜,周有庆,龚静. 小波变换在配电网接地故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):27-30.
WANG Na,ZHOU You-qing,GONG Jing. Application of wavelet transform to phase-to-ground fault detection in distribution system[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(10):27-30.
[6] LITTLE T B,MORROW D J. Wavelets for the analysis and compression of power system disturbances[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1999,8(2):358-364.
[7] 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[J]. 西安交通大学学报,2004,38(2):195-199.
XUE Yong-duan,FENG Zu-ren,XU Bing-yin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. **Journal of Xi'an Jiao-tong University**,2004,38(2):195-199.
[8] 孙雅明,苗友忠. 谐振接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):62-66.
SUN Ya-ming,MIAO You-zhong. A new principle of transient current grounded relay for feeder in resonant-grounded distribution systems [J]. **Proceedings of the CSEE**,2004,24(3):62-66.
[9] 余得伟,招海丹. 人工神经网络应用于继电保护的探讨[J]. 电力自动化设备,1999,19(3):24-26.
YU De-wei,ZHAO Hai-dan. Application principle of artificial neural networks in relay protection[J]. **Electric Power Automation Equipment**,1999,19(3):24-26.
[10] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助神经网络分析与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

王 铭(1977-),女,山东莱阳人,硕士研究生,主要从事小电流接地系统单相接地故障定位新方法的研究(E-mail:wmingnever@163.com);
徐玉琴(1964-),女,河南开封人,教授,主要从事电力系统继电保护新原理与新技术、电力系统分析与控制方面的研究(E-mail:xuyuqin_ncepu@sina.com)。

Locating fault using transient component of non-fault-phase based on wavelet analysis and BP neural network

WANG Ming,XU Yu-qin

(School of Electrical Engineering,North China Electric Power University, Baoding 071003,China)

Abstract: Combined with the research status of single-phase-to-ground fault locating for small current grounding system,a new idea based on non-fault-phase transient current is presented. Wavelet transfer theory is applied,and the rule of non-fault-phase transient current changing with the fault point location is concluded. The mapping relationship between modulus maximum and fault point location is realized using BP(Back Propagation) neural network. Simulations under conditions with different transition resistors and different fault distances prove its accuracy.

Key words: distribution system; fault locating; non-fault-phase transient current; wavelet analysis; BP neural network