

基于 Prony 算法的小电流接地系统单相接地故障选线研究

邵明, 黄彦全, 韩花荣, 李云飞

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: Prony算法是用一组指数函数的线性组合来拟合等间隔采样数据的方法, 可以从中分析出信号的幅值、相位、衰减系数、频率等信息。通过对故障零序电流特征的分析, 提出采用 Prony算法来提取故障零序电流的谐波分量的信息, 比较谐波分量的幅值和相位来实现正确选线。理论分析及仿真实验表明该方法可以准确实现小电流接地系统单相接地故障选线。

关键词: 小电流接地系统; 选线保护; Prony算法

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)24-0006-04

0 引言

我国配电网主变中性点大多数采用非有效接地方式, 包括中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统, 又称为小电流接地系统。这种系统发生单相接地故障时接地点故障电流小, 三相线电压保持不变, 不影响对负荷的正常供电。为防止因非故障相电压升高导致故障进一步扩大, 必须在一定时间内判断出故障线路并予以处理, 这就提出了单相接地故障选线问题。由于故障点电流小, 故障情况复杂, 系统运行方式多样等原因, 这个问题一直没有得到很好的解决^[1]。

最初的故障选线方法是通过切除线路后零序电压的有无来判断接地线路, 该方法虽然有效, 但会造成对某些用户供电中断。此后提出了多种选线原理, 可分为利用注入信号和利用故障信号两大类, 其中利用故障信号的方法又可以分为利用稳态量和暂态量两类。利用故障信号稳态分量的选线方法有: 零序电流比幅法、比相法、群体比幅比相法、有功分量法、零序电容电流补偿法、负序电流法。利用故障信号暂态分量的选线方法主要有: 零序暂态电流法、首半波法、小波分析法、小波包分析法。近年来, 许多学者又提出了应用模糊推理、模式识别、证据理论、神经网络以及信息融合技术来实现故障选线的多种方法^[1,2]。这些方法给解决单相接地的选线提供了一些有益的途径, 但问题远未彻底解决。

在单相接地时, 故障暂态过程含有很丰富的信号特征量, 其值比稳态时大很多倍, 应用于单相接地选线中可以提高选线的准确性。传统的信号分析方法如傅氏算法、短时傅氏算法等, 基本只能分析稳定

信号, 而对暂态信号无能为力。小波分析是数学领域近年来的工作结晶, 具有广泛的应用前景, 目前, 应用小波分析工具来实现选线有大量的研究^[1-3]。

Prony算法是一种频谱分析工具, 用于故障电流的分析很有效^[4]。该方法是用一组指数函数的线性组合来拟合等间隔采样数据, 可以从中分析出信号的幅值、相位、衰减系数、频率等信息。基于这一认识, 本文提出一种基于 Prony算法的单相接地选线保护方法, 将故障零序电流分解为一组正弦函数的线性组合, 对于特定频率的正弦函数, 综合比较故障线路和非故障线路的幅值和相位, 从而实现小电流接地系统单相接地故障的正确选线。并利用 EMTP进行了仿真验证。

1 基本原理

1.1 Prony算法^[5,6]

Prony算法是用 P 个具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合来拟合信号 $y(t)$, 即:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p b_i e^{z_i t} \quad (1)$$

写成离散形式为:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^k \quad (k = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (2)$$

其中: $\hat{y}(t)$, $\hat{y}(k)$ 为 $y(t)$ 的近似值, N 为信号采样点数, b_i , z_i 为复数, 其一般形式可写为:

$$\begin{cases} b_i = A_i \exp(j \varphi_i) \\ z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i) t] \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_i 为振幅, φ_i 为相位, α_i 为衰减因子, f_i 为振荡频率, t 为采样时间间隔。

Prony方法认识到,式(2)是如下形式的常系数线性差分方程的齐次解:

$$\hat{y}(k) = a_1 \hat{y}(k-1) + a_2 \hat{y}(k-2) + \dots + a_p \hat{y}(k-p) \quad (k=p, p+1, \dots, N-1) \quad (4)$$

式中, a_i 是差分方程的系数。

方程(4)的特征多项式表示为:

$$d(z) = 1 - (a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_p z^{-p}) \quad (5)$$

式(4)中 $\hat{y}(k)$ 用 $y(k)$ 来代替,列出方程组,通过最小二乘估计得到差分方程的系数 a_i 的值,式(5)取 $d(z) = 0$,可以求得 z_i 的值。

b_i 通过下式来得到:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \dots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据求得的 z_i 、 b_i ,利用式(3)即可求出振幅 A_i , 相位 φ_i , 衰减因子 α_i , 频率 f_i 。

1.2 改进的 Prony 算法

Prony算法对模型的估计相当精确,但其对噪声比较敏感。采用 SVD(奇异值分解)方法可以改善算法的准确度^[6]。

文献[7]提出一种改进的 Prony算法,通过利用多输入信号来提高 Prony算法的精度。对于具有特征值近似的 M 组信号:

$$\hat{y}_m(k) = \sum_{i=1}^p b_{mi} z_i^k \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (7)$$

z_i 可以采用每一组输入信号计算出来,但当信号存在噪声时,计算误差较大。对于这一问题,可以通过提高冗余度的方法加以改善,即增加多组输入信号,从而减小非相关噪声对 a_i 参数估计的影响。

b_m 的计算和单输入信号时的计算方法相同。

1.3 单相接地故障特征

配电网出现单相接地故障时,对于中性点不接地电网,非故障线路的零序电流等于本身的对地电容电流,方向由母线流向线路;故障线路的零序电流为全系统非故障元件对地电容电流之和,方向由线路流向母线。对于消弧线圈过补偿接地电网,上述特征消失,无法通过稳态零序电流来实现选线。

单相接地的暂态过程存在着丰富的故障信息,而且故障时的暂态过程不受接地方式的影响,即系统不接地和系统经消弧线圈接地时的暂态过程是近似相同的,因而暂态分量在故障检测中有着非常重要的意义。当中性点经消弧线圈接地的电网发生单

相接地故障时,流过故障线路的暂态零序电流 i_b 由暂态电容电流 i_c 和暂态电感电流 i_l 两部分叠加而成^[8],对于中性点不接地电网只有 i_c 。

$$i_b = i_c + i_l \quad (8)$$

$$i_c = i_{c0s} + i_{cst} = I_{cm} [(\frac{1}{\sin \phi} - \cos \phi \cos \omega_f t) \cdot e^{-\alpha t} + \cos(\omega_f t + \phi)] \quad (9)$$

$$i_l = i_{ldc} + i_{lst} = I_{lm} [\cos \phi e^{-t/L} - \cos(\omega_f t + \phi)] \quad (10)$$

式中, i_{c0s} 为暂态自由振荡分量; i_{ldc} 为暂态直流分量; i_{cst} 、 i_{lst} 为稳态工频分量; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; α 为自由振荡分量的衰减系数; I_{cm} 为电容电流幅值; I_{lm} 为电感电流幅值; L 为电感电流时间常数; ϕ 为初始相位。

对暂态电容电流 i_c 来说,它所含的自由振荡分量 i_{c0s} 的频率主要集中在高频段,而暂态电感电流 i_l 却主要是由工频量和非周期分量构成,在高频下不可能相互补偿。从文献[8]的分析可知,在暂态过程的初始阶段,不论电网的中性点为谐振接地还是不接地方式,其暂态零序电流在高频段的幅频特性主要由暂态电容电流所确定。

由于各线路暂态电容电流都是由对地电容经接地故障点构成回路的,所以流经各非故障线路的暂态电容电流必然要流经故障线路。对于中性点不接地系统,故障线路在基频和自由振荡频率成分其幅值最大,相位和非故障线路相反;对于经消弧线圈接地系统,故障线路在自由振荡频率成分其幅值最大,相位和非故障线路相反。

1.4 选线方法

故障零序电流可以看成是由不同频率、不同幅值、不同初始相位的按指数衰减的正弦函数的组合形式,即:

$$X(t) = \sum_{i=1}^q A_i e^{-\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (11)$$

其中 q 是函数的个数, A_i 为振幅, α_i 为衰减因子, f_i 为振荡频率, φ_i 为相位。对衰减的指数分量来说, $f_i = 0$, $\alpha_i = 0$ 或 ∞ 。对于不衰减的正弦分量来说, $\alpha_i = 0$ 。

对于单相接地故障,各条出线的故障零序电流具有近似的特征值,即对于 Prony分解得到的各个正弦函数具有近似的频率和衰减因子。因此,可以利用改进的 Prony算法,提取出 q 个正弦函数的参数来。

对于小电流接地系统故障零序电流来说,其能量最集中的频率成分为基频和自由振荡频率。对于

中性点不接地系统,故障线路在基频和自由振荡频率成分其幅值最大,相位和非故障线路相反;对于经消弧线圈接地系统,故障线路在自由振荡频率成分其幅值最大,相位和非故障线路相反。因此,在利用 Prony分解故障零序电流得到的自由振荡频率下的正弦函数,故障线路满足以下条件:其幅值最大,并且相位又和与其进行比较的线路相反。

2 仿真分析

利用 EMTP对不接地和经消弧线圈接地系统中不同故障点位置、故障初相角和不同数值的过渡电阻等故障情况进行了详尽的仿真验证。仿真系统模型如图 1所示,开关 K断开为不接地,开关 K闭合时系统经消弧线圈接地,补偿方式取过补偿,补偿度为 5%。线路参数如下。阻抗 $Z_1 = (0.17 + j0.38) / \text{km}$,正序容纳 $b_1 = 3.045 \mu\text{S}/\text{km}$,零序阻抗 $Z_0 = (0.23 + j1.72) / \text{km}$,零序容纳 $b_0 = 1.884 \mu\text{S} / \text{km}$ 。

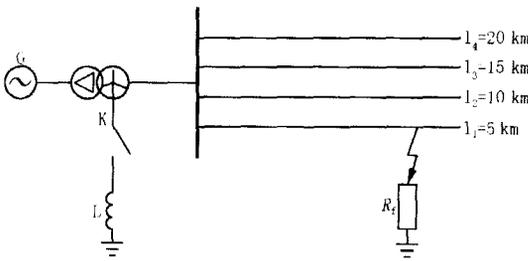


图 1 仿真系统示意

Fig 1 Simulation of distribution network with grounding fault

仿真中取采样频率为 2 kHz,采样数据窗取短路后四个周期。通过计算, Prony算法中采用 5种频率的基本分量来拟合故障零序电流信号较为准确。用 Prony算法计算出基频和自由振荡频率的正弦函数的幅值和相位,对于中性点经消弧线圈接地系统只提取具有自由振荡频率的正弦函数的幅值和相位。针对不同的接地电阻 R_f ,故障点位置 D_f ,不同的故障时刻进行了大量的仿真,限于篇幅,表 1和表 2只列出了一些典型数据,其他情况与此类似。表 1和表 2中,馈线 4发生 C相接地故障, R_f 为接地电阻值, D_f 为故障点位置,幅值和相位表示各馈线故障零序电流在特定频率下的幅值和初始相位。

从仿真数据不难看出,对于中性点不接地系统,基波分量和自由振荡高频分量均具有故障线路的幅值最大,故障线路和非故障线路的相位差大于 90° 的特点。过渡过程受接地电阻的影响,过渡电阻越大,暂态过程越不明显,当过渡电阻很大时会出现某

次谐波幅值或相位不满足的情况,此时可以通过多重判据加以解决。对于中性点经消弧线圈接地系统,其自由振荡高频分量正弦函数具有同样的特点。

表 1 中性点不接地系统故障零序电流经

Prony分解后的基频和高频分量

Tab 1 Basic and high frequency components of fault zero sequence current in ungrounded systems by Prony method

	$R_f=2$	$D_f=2.5 \text{ km}$	$R_f=1$	$D_f=1 \text{ km}$	$R_f=50$	$D_f=2.5 \text{ km}$
	48.8 Hz	485.2 Hz	46.2 Hz	347.4 Hz	49.7 Hz	485.5 Hz
幅值	1 1.25	13.29	1.09	11.44	1.03	24.77
/A	2 0.86	5.68	1.06	2.56	0.67	16.28
	3 0.54	3.10	0.58	1.52	0.47	7.46
	4 2.49	21.91	2.64	15.52	2.17	43.39
相位	1 -36.5	-73.5	-1.2	94.8	-35.6	86.1
/ (°)	2 8.9	-89.6	32.2	96.3	-35.4	143.2
	3 -13.0	-80.6	16.0	94.6	-36.5	128.4
	4 162.8	101.4	195.5	-85.0	144.3	-68.4

表 2 中性点经消弧线圈接地系统故障

零序电流经 Prony分解后的高频分量

Tab 2 High frequency component of fault zero sequence current in resonant-grounded systems by Prony method

	$R_f=0.5$	$R_f=5$	$R_f=1$	$R_f=1$	$R_f=50$
	$D_f=2.5 \text{ km}$	$D_f=2.5 \text{ km}$	$D_f=2 \text{ km}$	$D_f=3 \text{ km}$	$D_f=2.5 \text{ km}$
	485.3 Hz	485.8 Hz	458.8 Hz	434.6 Hz	486.7 Hz
幅值	1 12.44	13.43	12.02	12.71	22.12
/A	2 6.23	6.67	7.92	6.80	14.16
	3 3.26	3.84	5.88	3.69	7.34
	4 21.97	24.06	22.15	22.88	42.42
相位	1 -74.8	-75.7	68.08	-68.5	95.8
/ (°)	2 -75.4	-77.5	72.35	-70.0	80.3
	3 -73.0	-64.2	-0.69	-71.6	83.8
	4 105.2	105.7	236.5	109.6	-81.4

根据上述的仿真分析结果,可分为如下 3个步骤实现本文提出的故障选线方法: 用 Prony算法对故障零序电容电流进行分解。对于中性点不接地系统,提取基频和自由振荡频率的成分,对经消弧线圈接地系统,只提取自由振荡频率的成分。综合比较幅值和相位,确定故障线路。

仿真结果表明,根据 Prony算法提取故障零序电流特定频段的选线原理不受故障条件的影响,能正确地选出故障线路。本算法无需区分暂态和稳态过程,综合利用了故障零序电流的信息。

在仿真过程中,通过移动数据窗得到多个幅值和相位,建立故障测度^[3],选出故障线路,可以增加选线的可靠性。

3 结论

本文提出的配电网单相接地故障选线方法充分利用了 Prony算法拟合信号精确度高的优点,自适

应地提取故障零序电流信号的特定频率成分的特征分量,得到以下结论。

1) 将各条馈线的零序电流用改进的 Prony 算法进行分析,拟合出各馈线故障零序电流在同一频率下的正弦函数,从而比较特定频率正弦函数的幅值和相位,提高了抗噪声干扰的能力。

2) 理论分析和仿真结果表明:该方法可以准确实现小电流接地系统单相接地故障选线。

3) Prony 算法较复杂,运算量大,但考虑到小电流接地系统单相接地故障后,一般仍可以运行一段时间,应用 Prony 算法进行选线是可行的。

本文仅是对应用 Prony 算法进行小电流接地系统单相接地故障选线的一个初步探索,在对 Prony 算法的改进,拟合信号的阶数,减少噪声的干扰以及对提取出的有用信息来确定选线方法等方面,尚有许多工作要做。

参考文献:

- [1] 齐郑,杨以涵.中性点非有效接地单相接地选线技术分析[J].电力系统自动化,2004,28(14):1-5.
QI Zheng, YANG Yi-han Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Faults in Neutral Point Non-effectively Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [2] 李冬辉,史临潼.非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J].继电器,2004,32(18):74-78.
LI Dong-hui, SHI Lin-tong Survey of the Methods to Select Single-phase-fault Line in Neutral Point Indirectly Grounded Power System[J]. Relay, 2004, 32(18): 74-78
- [3] 齐郑,陈炯聪,杨奇逊.基于小波变换和 LMS 自适应滤波器的单相接地选线方法[J].电力系统自动化,2004,28(9):58-61.

QI Zheng, CHEN Jiong-cong, YANG Qi-xun Selection of Single-phase to Ground Fault Line Based on Wavelet Transform and LMS Adaptive Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 58-61.

- [4] Charri O, Bastard P, Meunier M. Prony's Method: an Efficient Tool for the Analysis of Earth Fault Currents in Petersen-coil-protected Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1234-1241.
- [5] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [6] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
ZHANG Xian-da Modern Signal Process[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [7] Trudnowski D J, Johnson J M, Hauer J F Making Prony Analysis More Accurate Using Multiple Signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 226-231.
- [8] 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.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue The Resonant Earth in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

收稿日期: 2005-04-12; 修回日期: 2005-06-05

作者简介:

邵明(1981-),男,硕士研究生,研究方向为微机保护与综合自动化;E-mail: smingok@163.com

黄彦全(1961-),男,副教授,主要从事变电站综合自动化、电力系统状态估计等方面的研究;

韩花荣(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统状态估计。

Fault line detection for single-phase-to-earth faults in the neutral indirectly grounded system based on Prony method

SHAO Ming, HUANG Yan-quan, HAN Hua-rong, LI Yun-fei

(Department of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Prony algorithm is a method in which a set of linear combination of exponential components were used to fit the uniformly spaced sampling data. With the algorithm, the amplitude, phase, damping, and frequency of the signal can be analyzed. Through the analysis of the characteristics of zero sequence currents in fault circumstances, Prony algorithm could be adopted to abstract the information about the harmonic component of fault zero sequence current, then the fault line could be detected by comparing the amplitude and phase of that. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed method can detect the fault line reliably and exactly.

Key words: neutral indirectly grounded system; fault line detection; Prony method