

基于原子分解和行波自然频率的单端故障测距方法

徐 高, 龚庆武, 李 勋, 张英杰

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种基于原子分解和行波自然频率的单端故障测距方法, 首先采用 FIR 滤波器对故障电流进行滤波, 得到主自然频率粗略成分, 再运用原子分解算法辨识出主自然频率粗略值, 利用该频率值反馈调整 FIR 滤波器的参数并对故障电流重新滤波, 最后采用原子分解算法精确辨识行波主自然频率值并求得故障距离。EMTP 联合 MATLAB 的仿真结果表明, 该方法具有很高的测距精度和可靠性, 基本不受过渡电阻、故障类型及故障距离的影响。

关键词: 输电线路; 故障测距; 自然频率; 原子分解; FIR 滤波; 鲁棒性

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.021

0 引言

随着电力系统规模越来越大, 高压、远距离输电得到越来越多的应用。受环境、自然灾害、人为因素等影响, 电力系统易发生各种类型的短路故障, 准确快速地排除短路故障将大幅提高电力系统的供电可靠性。为此, 学者们提出了很多方法^[1-6]。其中广泛应用的是基于暂态行波的故障测距方法^[5-6], 该类方法测距精度高、稳定性好, 但易受过渡电阻及行波色散的影响, 其难点在于如何准确捕获行波波头^[7]。

20 世纪 70 年代 Swift 发现线路终端为理想开路或者短路, 线路发生短路时故障电流中主频率成分与故障距离存在线性关系^[8]。文献[9-15]在文献[8]的基础上对这一现象进行了深入的研究, 提出了利用行波主自然频率进行故障定位的方法, 分析了系统参数、故障距离与行波主自然频率的关系, 使得该方法进一步成熟。利用行波主自然频率进行故障定位的关键在于如何准确地捕捉短路后的行波主自然频率值。文献[13]利用离散傅里叶变换(DFT)对故障频谱进行分析, 但是受限于 DFT 分辨率, 该方法很难在测距精度上有很好的表现, 尤其是在故障距离较长、主自然频率较低时^[9]。小波分析和多信号分析方法也可用于行波主自然频率的提取, 但是这些信号处理方法很难从本质上反映故障行波的频谱, 其提取出的行波主自然频率值均存在一定的误差^[11, 15]。此外, 以往学者在仿真时往往将输电线路系统母线端的阻抗理想化, 没有考虑系统端等效阻抗较大时对测距精度的影响。

Mallat 和 Zhang 在匹配追踪 MP(Matching Pursuit)

算法的基础上提出利用构造的原子库进行信号处理的办法, 称为原子分解法^[16]。该方法在暂态行波信号处理方面有很好的自适应性, 具有较强的时频分辨能力, 能够对信号进行准确的分析。原子分解算法已在电力系统中的电能质量分析^[17-18]、低频振荡模式辨识^[19-20]以及自适应重合闸判定^[21]等领域有较为广泛的应用。本文方法利用原子分解法对故障行波信号进行处理, 能准确获取行波主自然频率值, 从而精确测量故障点位置。仿真结果表明, 该测距方法具有较强的鲁棒性和准确性, 基本不受故障类型、故障距离、过渡电阻的影响。

1 原子分解

1.1 基本概念

傅里叶变换和小波变换都能较好地对信号进行分析处理, 但二者都没有从信号本身的特征出发, 仅仅利用一组固定的函数或向量集合来表示任意信号^[17-20]。固定的函数组或向量集合能展开的函数是有限的, 其表达信号的能力范围也是有限的。要想完整地表达各类信号, 函数的展开基应该从具体信号的特征出发选取, 这就需要构建一个超完备的展开函数集合。这种超完备集合中的基称为原子, 由原子组成的展开函数集合称为原子库^[17]。

要提高对信号的分析辨识能力, 原子库必须是高度冗余的, 这使得分解结果非常稀疏, 这个过程即称为稀疏分解^[18]。实现稀疏分解的关键在于如何建立一个合适的原子库以及如何从原子库中寻找最优匹配信号^[20]。

1.2 原子库的构建及 MP 算法

原子分解算法中较常用的是 Gabor 原子, 本文构建 Gabor 原子库。Gabor 原子的实数表达式为^[16]:

$$g_{\gamma, \phi}(t) = \frac{K_{\gamma, \phi}}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \cos(\xi t + \phi) \quad (1)$$

收稿日期: 2013-05-27; 修回日期: 2014-04-01

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2013BAA-02B01)

Project supported by the Scientific and Technical Supporting Programs of China during the “11th Five-year Plan” Period (2013BAA02B01)

其中, $g(t)$ 为高斯窗函数; $K_{\gamma,\phi}$ 为原子归一化因子; s 为尺度因子; τ 为位移因子; ξ 为频率因子; ϕ 为相位因子; 原子的索引 $\gamma=(s,\tau,\xi,\phi)$ 。为使原子库的规模不至于过大而影响到计算速度, 对长度为 N 的信号, 采用如下的离散化原则^[16]:

$$\Delta\tau=\Delta\xi/2\pi \quad (2)$$

其中, $\Delta\tau$ 为时间间隔; $\Delta\xi$ 为频率间隔。

索引 γ 经离散处理后为 $\gamma=(a^j, pa^j\Delta\tau, ka^{-j}\Delta\xi, \phi)$, 其中, a 为伸缩因子, $a>1$; $j<\log_2^N$; $0<p<N\cdot 2^{-j+1}$; $0<k<2^{j+1}$ 。取 $a=2$, $\Delta\tau=1/2$, $\xi=\pi$ 。

离散后的 Gabor 原子库形式为:

$$g_{\gamma,\phi}(n)=g_j(n-2p)\cos(2^{-j}nk\pi+\phi) \quad (3)$$

$$g_j(n)=\begin{cases} \delta(j) & j=0 \\ K_{\gamma,\phi}g(2^j n) & j\in[1, \log_2^N) \\ 1/\sqrt{N} & j=\log_2^N \end{cases} \quad (4)$$

其中, $n=0,1,\dots,N-1$ 。

原子分解的核心是 MP 算法。利用 MP 算法迭代处理信号 $f_{R,m}$ 时, 每次都会从原子库中寻找一个最佳匹配原子 g_{γ_m} , 并从信号中抽取出最佳原子的能量 $\langle f_{R,m}, g_{\gamma_m} \rangle g_{\gamma_m}$ ($\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示求内积运算), 形成新的残余信号 $f_{R,m+1}$, 直到残余信号的能量小于设定值或达到迭代次数而终止。最佳原子的选取条件是该原子与待处理信号的内积值最大, 即:

$$\langle f, g_{\gamma_0} \rangle \geq \lambda \sup_{\gamma \in \Gamma} \langle f, g_{\gamma} \rangle \quad (5)$$

其中, $\sup$ 表示取最大值; g_{γ} 为原子库中的原子; g_{γ_0} 为最优原子; λ 为优化因子, $0<\lambda<1$; f 为待处理信号; γ 为 g_{γ} 的索引; Γ 为原子库集合。 N 次迭代后 f 为:

$$f = \sum_{m=1}^N \langle f_{R,m}, g_{\gamma_m} \rangle g_{\gamma_m} + f_{R,N+1} \quad (6)$$

其中, $f_{R,m}$ 为经 $m-1$ 次迭代分解后得到的残余信号; $f_{R,N+1}$ 为经 N 次迭代分解后得到的残余信号; g_{γ_m} 为第 m 次迭代的最优匹配原子。这样就完成了对信号的稀疏分解, 原子的特征参数也就代表了信号中所含成分的相关信息。

2 基于原子分解和行波自然频率的故障测距算法

2.1 测距原理及步骤

一简单双端供电系统如图 1 所示, Z_A 、 Z_B 分别为双端供电系统两端母线处的系统阻抗, 线路全长为 L , 在离母线 A 端 d 处发生短路故障。故障距离与行波主自然频率存在以下关系^[9]:

$$d = \frac{(\theta_1 + \pi)v_A}{4\pi f} \quad (7)$$

其中, θ_1 为母线 A 端的行波反射角, v_A 为相应频率下的行波模波速, 反射角 θ_1 和行波模波速 v_A 可根据文献[22]求出; f 为行波主自然频率。

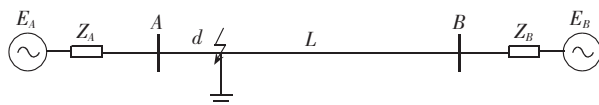


图 1 双端供电系统简图

Fig.1 Simplified schematic diagram of dual-end power supply system

算法流程如图 2 所示。

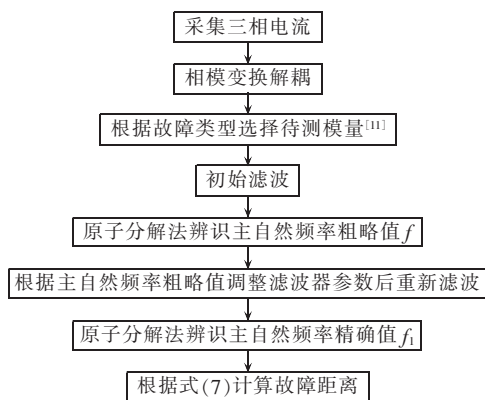


图 2 算法流程图

Fig.2 Flowchart of algorithm

一般 f 和 f_1 差别不大, 但测距精度依赖于行波主自然频率的准确性, 在故障距离较长时该影响尤为明显^[10], 采用反馈滤波方式会更有利。

2.2 行波主自然频率值的辨识

2.2.1 应用原子分解的主自然频率辨识方法

故障电流中主自然频率成分的出现, 是行波在线路两端来回反射及有限长度线路的延时效应共同作用的结果^[14], 其在故障电流信号中表现为一种稳定的谐波频率成分, 其幅值和能量与高次谐波相比均要大得多, 即便是在远距离故障情况下主自然频率值较低时, 也能较为明显地与谐波成分区别开来。故障模电流经初始滤波处理后主要是行波主自然频率成分, 其幅值很大, 占信号总能量的比例最大。应用原子分解算法辨识主自然频率值的具体步骤如下:

a. 构建 Gabor 原子库, 采用 MP 算法对信号进行稀疏分解, 得到最优匹配原子及其索引;

b. 每次迭代时均计算原子与残余信号的内积, 利用伪牛顿法优化原子特征参数 γ , 使其更准确^[19,21];

c. 存储原子的特征参数, 计算残余信号能量, 达到设定的次数时终止迭代。

经原子分解法处理后的信号可近似表示为 H 个最优原子的线性组合 (H 为设置的迭代次数)。根据原子分解算法寻找最优原子的原则可知, 第一次迭代产生的原子与信号的内积值最大, 其占信号总能量的比例最大, 而行波主自然频率成分正具有这一特征, 因此该原子的特征参数就表示了主自然频率成分的特征。根据步骤 c 中的频率参数 ξ 可求得主自然频率值 f :

$f=f_s\xi/(2\pi)$ (8)

其中 f_s 为原始信号的采样频率。

2.2.2 反馈滤波

采用 Clark 变换对故障电流解耦处理后,得到的电流中主要成分是工频分量和各次谐波,不经滤波处理而直接分析其频谱,将很难辨识出行波主自然频率值。由于行波主自然频率值未知,采用下限截止频率较低的直接滤波方式不能理想地滤除故障电流中的低频干扰成分。本文采用反馈滤波方式处理故障模电流,即先用截止频率较低的低通滤波器处理故障电流,再根据原子分解法所得行波主自然频率粗略值反馈调整滤波参数,再对故障模电流重新滤波。行波主自然频率值在线路长度小于 400 km 时不低于 300 Hz,可设置滤波器的下限截止频率 $f_L=200$ Hz,过渡带宽 200 Hz,根据所得主自然频率粗略值 f 调整滤波器的下限截止频率 f_L ,如式(9)所示。对于行波主自然频率值大于 1000 Hz 的情况,此时故障电流中绝大部分谐波的频率均低于主自然频率,设置滤波器下限截止频率为 800 Hz 即有很好的滤波效果。

$$f_L=\begin{cases} f-200 & f\leq 1000 \\ 800 & f>1000 \end{cases}$$
 (9)

3 算例仿真

3.1 原子分解算法时频分辨能力分析

本文方法的核心在于利用原子分解算法精确辨识主自然频率值。为验证原子分解算法具有较强的时频分辨能力,设置仿真测试信号 $s(t)$ 为:

$s(t)=50e^{-t}\cos(550\pi t)+100e^{-1.1t}\cos(6600\pi t)+150e^{-1.2t}\cos(13200\pi t)$ (10)

采样频率设为 100 kHz,仿真时长 0.04 s,在测试信号中加入信噪比为 10 dB 的高斯白噪声,令原子分解法的迭代次数为 5,迭代产生的前 3 个原子的幅值如图 3 所示(A_1 、 A_2 、 A_3 分别为原子 1、原子 2、原子 3 的幅值),对应的特征参数如表 1 所示,表中匹配度表示原子与原始信号的内积值,该值的平方为原子占信号能量的比例。

由图 3、表 1 可知,原子 1 对应信号中频率值为 6 600 Hz 的成分。该成分占信号能量的比例最大,故第 1 次迭代时被分离出来。迭代产生的前 3 个原子的频率值与原信号所含成分极相近,几乎不受噪声信号的干扰,充分说明原子分解算法有时频分辨能力。

3.2 仿真算例 1

本仿真由 EMTF 联合 MATLAB 进行,在 EMTF 中搭建如图 1 所示的仿真模型。线路为恒定参数类型,全长 350 km。A 端电源等效参数为:电源幅值 500 kV,相角 0°,等效阻抗 $Z_A=2.11+j56.4\ \Omega$ 。B 端电源等效

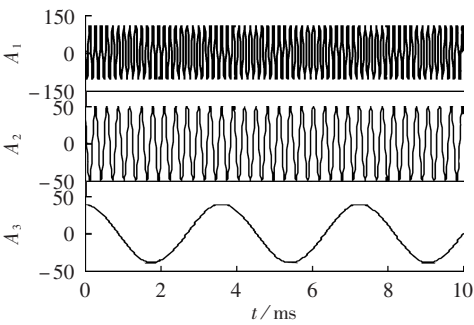


图 3 原子分解提取的 Gabor 原子

Fig.3 Gabor atoms extracted by atomic decomposition

表 1 原子特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of atom

原子	匹配度/%	幅值	相位/rad	频率/Hz
1	76.48	149.107	0.013 4	6 599.92
2	50.88	100.049	-0.001 0	3 300.02
3	25.80	49.270	-0.015 8	275.22

参数为:电源幅值 495 kV,相角 5°,等效阻抗 $Z_B=0.816+j23.6\ \Omega$ 。输电线路单位长度线模参数为: $L_m=0.864$ mH/km, $C_m=0.01336\ \mu\text{F}/\text{km}$, $R_m=0.018\ \Omega/\text{km}$ 。输电线路单位长度零模参数为: $L_{m0}=2.17$ mH/km, $C_{m0}=0.01\ \mu\text{F}/\text{km}$, $R_{m0}=0.161\ \Omega/\text{km}$ [23]。系统采样频率为 1 MHz。

设置三相短路故障,故障点离 A 端 30 km,接地电阻 100 Ω ,故障从 0.04 s 持续到 0.07 s。选取从故障前 5 ms 开始的 1 个工频周期 A 端三相电流数据,按照 2.1 节中的处理步骤,得直接滤波后的 α 模电流波形如图 4 所示。用原子分解算法处理信号(由于数字滤波器会导致一定的延时,故分析时选取处理后的后半部分信号),迭代产生的原子特征如表 2 所示。查看第 1 次迭代产生的原子参数,其幅值为 286.60,计算后的频率值为 2 580.46 Hz,占信号总能量的比例接近 50%,根据自然频率辨识方法知行波主自然频率值为 2 580.46 Hz。

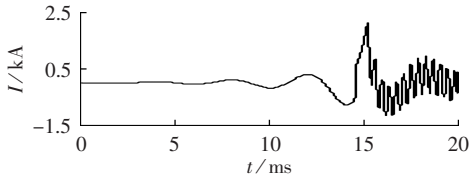


图 4 直接滤波后的 α 模电流

Fig.4 α -modular current after direct filtering

表 2 原子特征参数

Tab.2 Characteristic parameters of atom

原子	匹配度/%	幅值	频率/Hz
1	70	286.60	2 580.46
2	21	400.96	264.40
3	18	49.27	7 403.60

根据反馈滤波方法,设置滤波器下限截止频率为 800 Hz 并进行滤波,滤波后的电流波形见图 5,原

子特征参数见表 3。显然,反馈滤波后的电流成分更单一,低频干扰信号基本滤除,原子 1 占总信号能量比例约为 98%,可知主自然频率为 2 588.07 Hz。

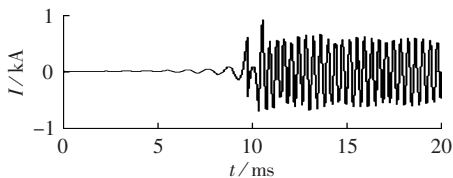


图 5 反馈滤波后的 α 模电流

Fig.5 α -modular current after feedback-modified filtering

表 3 原子特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of atom

原子	匹配度 / %	幅值	频率 / Hz
1	98.9	287.0	2 588.07
2	12.6	24.7	7 405.00
3	11.0	22.3	9 164.47

由系统端阻抗 $Z_1=2.11+\mathrm{j}2\,919.4\,\Omega$ 、特征阻抗 $Z_c=254.3-\mathrm{j}0.163\,\Omega$ 可得系统端反射角 $\theta_1=0.055\pi^{[9]}$,并计算得模波速为 294 333.6 km/s。代入式 (7),得故障距离 $d=30.005\,\mathrm{km}$ 。反馈滤波过程的引入强化了滤波器对干扰信号的滤除能力,有利于行波主自然频率的精确辨识,提高了测距精度。

3.3 仿真算例 2

反馈滤波过程的引入是为了更好地滤除故障电流中的谐波分量,从而更准确地辨识主自然频率值。为体现反馈滤波方式的效果,以三相对称短路故障为例分析,设置 10 组不同的故障位置,仿真结果如图 6 所示。由图可见,本文方法对较大范围内的故障情况均能可靠定位,对比 2 种滤波后的定位结果可知,远距离故障情况下引入反馈滤波环节能得到更高的定位精度。因行波主自然频率值随着故障距离的增加而减小,故障距离较大时,谐波分量与行波主自然频率值相差较小,对主自然频率值的准确辨识会产生较大影响,同时线路对端母线反射行波亦会干扰到本侧母线处行波主自然频率的准确检测^[10],使得测距算法在故障距离较大时的测距精度略有下降。而反馈滤波环节的引入能够优化滤波器的参数设置,在保留主自然频率成分的同时更好地滤除谐波干扰分量,利于原子分解法分析信号。需要特别指出的是,故障距离为 2.5 km 时本文方法无法得到测

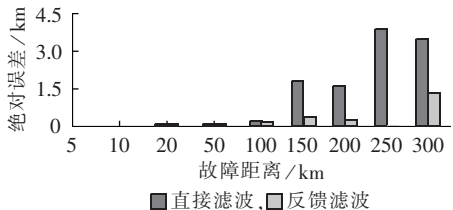


图 6 不同故障距离时的测距结果

Fig.6 Fault location results for different fault distances

距结果,主要原因在于此时的行波主自然频率值接近 30 kHz,且幅值较小,受滤波器的截止频率门槛设置影响,主自然频率成分易被低频谐波分量所淹没。

3.4 仿真算例 3

设置不同类型的短路故障,分析本文算法的鲁棒性。接地故障时过渡电阻设为 100 Ω ,相间短路故障过渡电阻设为 10 Ω ,故障点距离 A 端 30 km,具体测距结果见表 4。单相故障采用 0 模 α 模平均法^[9]计算故障距离,表中仅示出 α 模量主自然频率。由表可知,本文方法在两相和三相短路故障时的测距精度较高,绝对误差均小于 50 m,对故障类型不敏感,表现出了较强的鲁棒性。而单相故障的测距精度略有降低,原因在于单相故障时的模混杂现象会影响主自然频率的辨识,本文仿真模型采用的系统端等效阻抗较大,使得故障行波在系统端的反射偏角加大,导致模混杂现象更加明显。

表 4 不同故障类型下的测距结果

Tab.4 Fault location results for different fault types

故障类型	主自然频率 / Hz		计算距离 / km	绝对误差 / m	相对误差 / %
	直接滤波	反馈滤波			
ABC	2 598.1	2 588.3	29.995	5	0.017
ABG	2 587.3	2 588.6	29.998	2	0.007
ACG	2 598.1	2 588.5	29.999	1	0.003
BCG	2 589.5	2 590.3	29.977	23	0.077
AB	2 596.2	2 587.5	30.011	11	0.037
AC	2 590.4	2 589.4	29.988	12	0.037
BC	2 591.1	2 592.0	29.956	44	0.147
AG	2 201.6	2 284.1	30.783	783	2.610
BG	2 201.6	2 284.9	30.776	776	2.590
CG	2 041.8	2 242.5	30.727	727	2.420

3.5 仿真算例 4

现将傅里叶算法与本文方法进行对比。以 BC 两相接地短路为例,分别设置不同的系统端等效阻抗、故障距离和接地电阻值进行仿真分析。傅里叶算法的频率分辨率与仿真的采样频率和总的采样点数有直接关系^[24],为保证采用傅里叶算法计算故障距离时有较高的精度,共保留短路前后约 1 s 的数据,此时傅里叶算法的频率分辨率约为 1 Hz。由于采样数据点过多会影响计算效率,设置采样频率为 100 kHz。2 种方法的测距结果如表 5 所示。

由表 5 可知,当系统端等效阻抗较理想且故障距离较近时,本文方法与傅里叶算法均能较准确地获取主自然频率值并确定故障点的位置,而当系统端等效阻抗较大或故障距离增大时,傅里叶算法测距误差明显增大,而本文方法显示出较强的鲁棒性,测距误差变化较小且结果不受过渡电阻的影响。需要特别指出的是,在等效阻抗较大的条件下发生远端故障时,本文方法的测距精度将受到一定的影响。由于本文采用滤波性能较好地反馈滤波方式和具有较强时频分辨能力的原子分解法,测距算法的抗差

表 5 测距结果对比
Tab.5 Comparison of fault location results

故障距离/km	接地电阻/ Ω	等效阻抗/ Ω	主自然频率/Hz		计算距离/km		绝对误差/m	
			本文算法	傅里叶算法	本文算法	傅里叶算法	本文算法	傅里叶算法
50	0	0	2944.9	2942	49.9362	50.023	64	23
		2.11+j56.4	1604.5	1600	49.9734	50.088	27	88
	50	0	2944.9	2942	49.9362	50.023	64	23
		2.11+j56.4	1604.5	1600	49.9734	50.088	27	88
	500	0	2944.9	2942	49.9362	50.023	64	23
		2.11+j56.4	1604.5	1600	49.9734	50.088	27	88
150	0	0	980.8660	981.5	150.0376	149.9407	38	59
		2.11+j56.4	602.8649	595.0	149.8626	152.1844	138	2184
	50	0	980.8660	981.5	150.0376	149.9407	38	59
		2.11+j56.4	602.8649	595.0	149.8626	150.4362	138	2184
	500	0	980.8660	981.5	150.0376	149.9407	38	59
		2.11+j56.4	602.8649	595.0	149.8626	150.4362	138	2184
300	0	0	491.4256	487.7	299.4691	301.759	531	1759
		2.11+j56.4	338.1396	333.0	299.0780	304.690	922	4690
	50	0	491.4256	487.7	299.4691	301.759	531	1759
		2.11+j56.4	338.1495	333.0	299.0669	304.690	933	4690
	500	0	491.4256	487.7	299.4691	301.759	531	1759
		2.11+j56.4	338.1495	333.0	299.0669	304.690	931	4690

性能得到了显著提高。总体而言,本文所提算法较傅里叶算法适应能力更强,测距精度更高。

4 结论

本文采用原子分解处理故障模电流,并结合反馈滤波方式有效提高了故障定位的精度。原子分解法具有较好的暂态信号处理能力,其分辨率较高,算法准确稳定。与现有的基于行波主自然频率的测距算法相比,本文所提方法在系统端呈现较大阻抗时仍具有较高的测距精度,且基本不受过渡电阻、故障类型及故障距离的影响,优于傅里叶算法。如何消除近端测距死区以及进一步提高单相测距和远端故障测距精度,同时优化原子库的生成和计算速度以提高算法效率是下一步将要研究的内容。

参考文献:

[1] 李勋,石帅军,龚庆武. 采用信赖域法和双端非同步数据的故障测距算法[J]. 高电压技术,2010,36(2):396-400.
LI Xun,SHI Shuaijun,GONG Qingwu. Transmission line fault location algorithm using trust-region method and two-terminal unsynchronized data[J]. High Voltage Engineering,2010,36(2): 396-400.

[2] 陈玉林,陈允平,龚庆武. 基于时频相关分析的高压电缆双端行波测距[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):16-20.
CHEN Yulin,CHEN Yunping,GONG Qingwu. Double-terminal traveling wave fault location for HV cable based on time-frequency component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12):16-20.

[3] 龚庆武,雷庆生,王志梅,等. 采用输电线路双端信号的故障精确定位系统[J]. 继电器,1999,27(6):18-23.
GONG Qingwu,LEI Qingsheng,WANG Zhimei,et al. An accurate fault location system for transmission line using two-terminal signals[J]. Relay,1999,27(6):18-23.

[4] 王宾,董新洲,薄志谦. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化,2008,32(14):25-29.
WANG Bin,DONG Xinzhou,BO Zhiqian. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(14):25-29.

[5] 范新桥,朱永利,卢伟甫. 基于多点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):39-45.
FAN Xinqiao,ZHU Yongli,LU Weifu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):39-45.

[6] 卢毅,汪焱春,韩志钲,等. 基于单位脉冲响应法的单端行波故障测距[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):69-73.
LU Yi,WANG Yanchun,HAN Zhikun,et al. Single-end traveling wave fault location based on unit impulse response method[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):69-73.

[7] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007:303-305.

[8] SWIFT G W. The spectra of fault-induced transients[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1979,98(3):940-947.

[9] 郭林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 成都:西南交通大学,2009.
WU Linyong. Single terminal fault location method using natural frequencies of traveling wave [D]. Chengdu:Southeast Jiaotong University,2009.

[10] 夏璐璐. 基于行波固有频率的输电电网故障测距方法[D]. 成都:西南交通大学,2011.
XIA Lulu. A transmission lines fault location method based on traveling wave natural frequencies[D]. Chengdu:Southeast Jiaotong University,2011.

[11] 林圣,何正友,李小鹏,等. 一种考虑时域特征的单端行波固有频率测距方法[J]. 电网技术,2012,36(7):243-248.
LIN Sheng,HE Zhengyou,LI Xiaopeng,et al. Single terminal fault location by natural frequencies of travelling wave considering its time-domain characteristics[J]. Power System Technology,

- 2012,36(7):243-248.
- [12] 郭林勇,何正友,钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):69-75.
WU Linyong,HE Zhengyou,QIAN Qingquan. A single ended fault location method using traveling wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(10):69-75.
- [13] 郭林勇,何正友,钱清泉. 单端行波故障测距的频域法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):99-104.
WU Linyong,HE Zhengyou,QIAN Qingquan. A frequency domain approach to single-ended traveling wave fault location [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(25):99-104.
- [14] 束洪春,田鑫萃,张广斌,等. ± 800 kV 直流输电线路故障定位的单端电压自然频率方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):104-111.
SHU Hongchun,TIAN Xincui,ZHANG Guangbin,et al. Fault location for ± 800 kV HVDC transmission lines using natural frequency of single terminal voltage data[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):104-111.
- [15] 夏璐璐,何正友,李小鹏,等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):67-73.
XIA Lulu,HE Zhengyou,LI Xiaopeng,et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(18):67-73.
- [16] MALLAT S G,ZHANG Zhifeng. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Singal Processing,1993,41(12):3397-3415.
- [17] 王宁,李林川,贾清泉,等. 应用原子分解的电能质量扰动信号分类方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):51-58.
WANG Ning,LI Linchuan,JIA Qingquan,et al. Classification of power quality disturbance signals using atomic decomposition method[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):51-58.
- [18] 贾清泉,于连富,董海艳,等. 应用原子分解的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):61-64.
JIA Qingquan,YU Lianfu,DONG Haiyan,et al. Power quality disturbance features extraction based on atomic decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):61-64.
- [19] 李勋,龚庆武,贾晶晶,等. 基于原子稀疏分解的低频振荡模态参数辨识方法[J]. 电工技术学报,2012,27(9):124-133.
LI Xun,GONG Qingwu,JIA Jingjing,et al. Atomic sparse decomposition based identification method for low-frequency oscillation modal parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(9):124-133.
- [20] 李勋,龚庆武,贾晶晶. 采用原子分解能量熵的低频振荡主导模式检测方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):131-139.
LI Xun,GONG Qingwu,JIA Jingjing. A detection method for low frequency oscillation dominant modes based on atomic decomposition energy entropy [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(1):131-139.
- [21] 贾晶晶,龚庆武,李勋,等. 采用原子分解法的带并联补偿线路单相自适应重合闸[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):117-123.
JIA Jingjing,GONG Qingwu,LI Xun,et al. Single-phase adaptive reclose of shunt compensated transmission lines using atomic decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):117-123.
- [22] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,2006:487-496.
- [23] DONG Xinzhou,KONG Wei,CUI Tao. Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(2):552-559.
- [24] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002:363-366.

作者简介:



徐 高

徐 高(1990-),男,湖北荆州人,硕士研究生,通讯作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:xugao.121310@163.com);

龚庆武(1967-),男,湖南邵阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统继电保护和自动化方面的研究;

李 勋(1983-),男,湖南岳阳人,博士研究生,研究方向为大电网安全与稳定分析;

张英杰(1990-),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行控制。

Single-terminal fault location based on atomic decomposition and natural frequency of traveling wave

XU Gao,GONG Qingwu,LI Xun,ZHANG Yingjie

(School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: An algorithm based on the atomic decomposition and the natural frequency of traveling wave is proposed for single-terminal fault location. In the first turn,the fault current is processed by a FIR filter to obtain its main natural frequency component and an approximate value of its main natural frequency is identified by an atomic decomposition algorithm;in the second turn,the parameters of that FIR filter are adjusted according to the approximate value of main natural frequency and its accurate value is obtained by the identification of that atomic decomposition algorithm,which is then used to locate the fault. The results of simulation with EMTP and MATALB show that,immune to the transition resistance,fault type and fault distance,the proposed method has higher fault locating accuracy and reliability.

Key words: transmission line; electric fault location; natural frequency; atomic decomposition; FIR filter; robustness