

[文章编号] 1003-4684(2019)01-0052-05

基于改进 OMP 算法输电线路故障测距研究

姜晓彤, 刘 辉, 陈 辉, 钱金良

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 在正交匹配追踪(OMP)算法的基础上增加了 Jaccard 系数以提高其对相似原子的辨识能力,重新构建出更准确的信号以获取故障行波固有频率进行故障测距。在 SIMULINK 上搭建仿真模型验证表明:在单相接地、两相短路、三相短路等不同的故障类型、不同的故障距离和不同的过渡电阻情况下,改进算法定位精度较高。

[关键词] 正交匹配追踪; 频率提取; 故障测距

[中图分类号] TN913.7

[文献标识码] A

基于暂态行波的故障测距方法^[1]因测量距离精确度高得到了大量的应用,但测距结果极易受到行波色散的影响,过渡电阻也有一定影响。行波波头的检测成为其主要研究对象。研究发现,当出现短路故障时,故障距离和电流中主频率成分具有线性关系。采取行波主自然频率对输电线路进行故障定位^[2-3]得到了广泛应用,通过解析系统参数、故障距离与行波主自然频率之间的关系,此法的使用价值更高,核心是捕获输电线路短路故障后行波主自然频率的值。20 世纪末期, Mallat 提出了原子分解法^[4-5]——在匹配追踪 MP(Matching Pursuit)算法的基础上构造原子库处理信号。这种方法对信号幅值的分辨率较高,进而能够准确解析信号。本文为了增加正交匹配追踪算法^[6]对类似原子的分辨能力,利用了 Jaccard 系数。用改进后的算法处理故障行波信号,为了发现线路故障点的位置,行波主自然频率值的精准捕获成为关键所在。仿真结果表明,无论是单相接地、两相短路还是三相短路等故障,或者是在不同故障距离及其不同大小的电阻,此类方法基本不受影响。

1 行波固有频率的双端输电线路故障定位方法

如图 1 所示的电力系统两端输电线路模型以及当输电线路某点发生故障后行波传输的网格图,设定如图所示输电线路长 L ,左端母线位置设为 P ,设备等效阻抗设为 Z_p ,右端母线位置设为 Q ,设备等

效阻抗设为 Z_q ,故障处 f 与母线 P 的长度设为 d , 以此段故障线路加以分析。

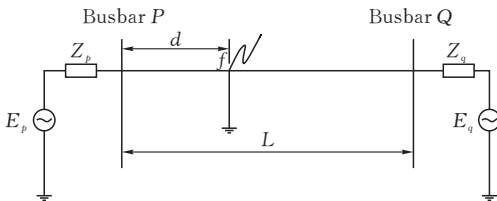


图 1 双端输电线路模型图

由文献[7]可知当出现故障之时,行波自然频率与母线 P 和输电线路故障点之间的距离关系为

$$d = \frac{(\sigma_p + (2k - 1)\pi)\nu_n}{4\pi \cdot f_n} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (1)$$
$$\sigma_p = \arg\left(\frac{Z_p - Z_q}{Z_p + Z_q}\right)$$

行波固有频率的各分量成分设为 f_n , 与此对应的故障行波波速设为 ν_n , σ_f 为故障点靠近 busbar E_p 的行波反射角, σ_p 为母线 P 端的行波反射角。

由于线路不连续阻抗、诸多谐波、线路耦合以及各种噪声等因素影响主固有频率的峰值,当只通过提抽故障点处行波的单个主自然频率之时,故障定位结果并不那么精准。基于此缺陷,本文提出了一种新的方法来求得线路发生故障时故障点的位置。此种方法不仅需要提取单个主自然频率,还要计算基波分量以及多次谐波分量的自然频率。

由公式(1)构造方程组

[收稿日期] 2018-04-22

[第一作者] 姜晓彤(1994-),女,湖北襄阳人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为电气工程

[通信作者] 刘 辉(1962-),男,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为电气工程

$$\begin{cases} d_1 = \frac{(\sigma_p + \pi) \nu_1}{4\pi \cdot f_1} \\ d_2 = \frac{(\sigma_p + 3\pi) \nu_2}{4\pi \cdot f_2} \\ \vdots \\ d_n = \frac{(\sigma_p + (2n-1)\pi) \nu_n}{4\pi \cdot f_n} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $d_1、d_2 \cdots d_n$ 为使用多次固有频率算出的故障距离, $\nu_1、\nu_2 \cdots \nu_n$ 为固有频率 $f_1、f_2 \cdots f_n$ 的 P 段波速,经大量研究发现,当输电线路发生故障时,故障点处行波的自然频率高达上百甚至上千赫兹,此时行波波速的变化可忽略不计,故而基于多次自然频率计算出的故障距离可以认为是一样的。理论上式(2)中的 $d_1、d_2 \cdots d_n$ 的数值应该近似相等,然而实际输电线路受到天气情况以及地形等的干扰并不是连续不断的,同时噪音的存在也会使计算出的故障距离存在不同。为了减少各种干扰带来的误差,可以采取求平均值的方法,如

$$d = \frac{1}{n} \cdot \frac{\nu_k}{4\pi} \cdot \left(\sum_{k=1}^{k-n} \frac{\sigma_p + (2n-1)\pi}{f_k} \right) \quad (3)$$

显然,当输电线路发生故障计算故障距离时考虑多次自然频率精确度更高。同时, f_k 的选取次数对精确度也有影响,由公式(3)可知次数越多越精准。然而,据大量研究发现高次自然频率的组成成分具有很小的能量,在进行估计计算之时造成的误差较大,所以当其对估算的准确度影响不大时,为减少误差的影响可以忽略。在估计前面 k 次自然频率时利用压缩感知理论,以此选定适当的 f_k ,将对应的截止频率 f_k 与 k 代入式(3)。

2 改进 OMP 算法的自然频率估计

2.1 算法思路

本文中故障行波信号的多次自然频率值是通过压缩感知理论估计的,并以之为根基,通过估算得到的多次自然频率值精准定位故障点。压缩感知理论和传统处理信号不同的是为了复原出高稀疏度最开始的信号,需要利用少量测量点的数据。其数学模型如

$$y = \Phi x \quad (4)$$

式中: y 是 $M \times 1$ 矩阵,称为观测向量, x 是 $N \times 1$ 矩阵。

设长度为 N 的离散信号 x , 即 $x(n), n \in [1, 2, \cdots, N]$ 。 x 可以利用一组基于 $\Psi^T = [\Psi_1, \Psi_2, \cdots, \Psi_N]$ 的线性组合来表示,则

$$x = \Psi \theta \quad (5)$$

由公式(4)与(5)可知

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \theta = A \theta \quad (6)$$

式中: A 是 $M \times N$ 矩阵,称为传感矩阵。

当式(6)中的传感矩阵 A 满足 RIP 法则时,压缩感知理论可以对式(6)的反向问题进行求解,先获取稀疏系数 θ ,然后把稀疏度 K 的信号 x 从 $M \times 1$ 维的 y 矩阵中正确地求解出来。对于式(7)来说,求解最优解最简单的方法是通过 ℓ_0 范数。

$$\operatorname{argmin} \|\theta\|_{\ell_0} \text{ s.t. } y = A\theta \quad (7)$$

图 2 是压缩感知理论下改进正交匹配追踪算法估计多次固有频率定位故障的算法流程图,由图可知算法中为了更加准确地定位故障点,引入 Jaccard 系数重新构建频域信号。

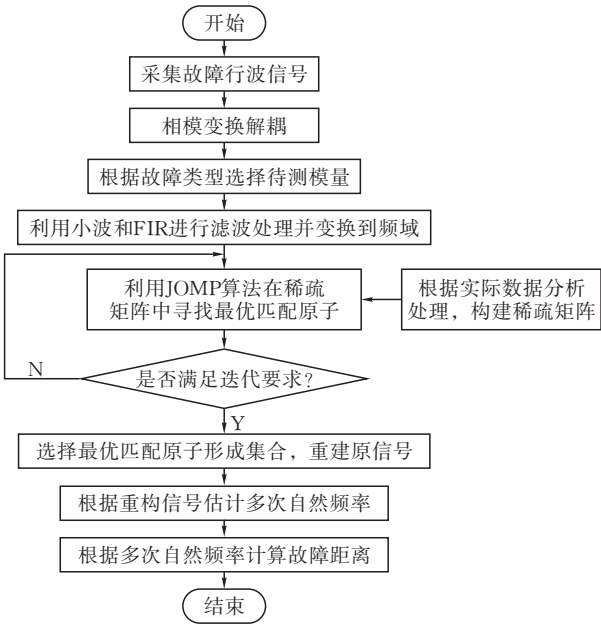


图 2 基于改进正交匹配追踪算法估计多次固有频率定位故障的算法流程图

2.2 稀疏矩阵的设计

根据压缩感知理论可知,恢复原始信号十分依赖稀疏矩阵 Ψ 。设计时,要尽最大可能消除观测向量冗余信息,同时还要确保原始信号的重要信息不丢失。故而,必须对大量实际测量得到的行波故障信号进行特征提取以得出可被使用的稀疏矩阵 Ψ , 同时,也要对行波信号进行优化设计。文献[8]已通过大量实测数据进行设计,本文不再重复。

2.3 改进 OMP 算法

OMP 算法的主旨:为了削减收敛前的迭代次数,算法通过原子的选择规范,使用迭代法让原子选择正交。另一方面,OMP 重构算法的迭代次数是已知的。当算法迭代停止时,能够得到充足的线性测量信号,为精准重构信号做好准备。当该重构信号是 K 稀疏信号时表示迭代停止。

MP、OMP 始于零解,并且需要初始化观测向量 y 的残余。在每次迭代时,为了把 OMP 添加所选列的索引添加到索引集中,OMP 算法会在传感矩阵 A 中选取与残差向量 r 的相关性最好的列。

接着,求解有源列下的最小二乘问题的解向量 x 的索引项(对应于索引集 I 的项):

$$\theta_i(I_t) = \arg \min_{\theta} \|y - A_{I_t}\|_2^2$$

式中,具有向量 θ 索引项的子向量为 $\theta_i(I_t)$, A_{I_t} 是由各个向量的索引列构成的子矩阵。对 $\theta_i(I_t)$ 的求解可以通过求解公式(8)来实现。

$$A_{I_t}^T A_{I_t} x_t(I) = A_{I_t}^T y \tag{8}$$

反复以上环节,直到当前残留范数降低到很小的值 ϵ 。算法停止的标志是 y 存在极限。值得一提的是OMP算法保证残余矢量在每次迭代中正交所有索引列。因此,不可能有哪一列被再次选择,且索引集不断地线性增长。OMP算法对于任意两个向量 φ 、 γ 夹角的余弦值定义为

$$\cos(\varphi, \gamma) = \frac{\langle \varphi, \gamma \rangle}{\|\varphi\| \cdot \|\gamma\|} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \gamma_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \cdot \sum_{j=1}^n \gamma_j^2}}$$

由上式知,向量 φ 和向量 γ 之间的角度越大,则 $\cos(\varphi, \gamma)$ 越小,向量 φ 和向量 γ 之间具有更低的相似层度。那么,OMP算法辨别相似原子的能力就越差。本文中,在原子匹配时利用 JOMP 算法将 Jaccard 系数引入。Jaccard 系数定义为

$$J(\varphi \gamma) = \frac{|\varphi \cap \lambda|}{|\varphi| + |\gamma| - |\varphi \cap \gamma|} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 + \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \lambda_i}$$

$\cos(\varphi, \gamma)$ 使用了向量中各分量平方和的几何平均值,相比之下算术平均值却能够更加方便地突出向量中的核心,所以采用算术平均值的 Jaccard 系数可以更加无误地从传感矩阵 A 中选择出哪个原子与残差信号更为相合。JOMP 算法总结为:

- 第一步:初始化, $\theta_0 = 0, \gamma_0 = y, t = 1, I_0$ 非空;
- 第二步:首先在 A 阵中选取原子,使其与残差向量相似度最高,然后添加到 I 中,利用内积的方法计算相似度时用 $J(\varphi, \gamma)$ 替换 $\cos(\varphi, \gamma), i_t = \arg \max_{1 \leq j \leq N} |\langle A^T \gamma_{t-1} \rangle|, I_t = I_{t-1} \cup \{(i_t)\}$;
- 第三步:利用索引集 I 中现有的原子逼近原信号 $\hat{\theta}_t = \arg \min_{\theta} \|y - A_{I_t} \theta\|_2$;
- 第四步:计算新的残差向量, $\gamma_t = y - A_{I_t} \theta_t(I_t)$;
- 第五步:如果 $\|\gamma_t\|_2 < \epsilon$, 算法终止,且 $\hat{\theta} = \theta_t(I_t)$ 最终结果;否则,增加迭代次数: $t = t + 1$, 并且返回到第二步。图 3 为改进后的正交匹配追踪算法的流程图。

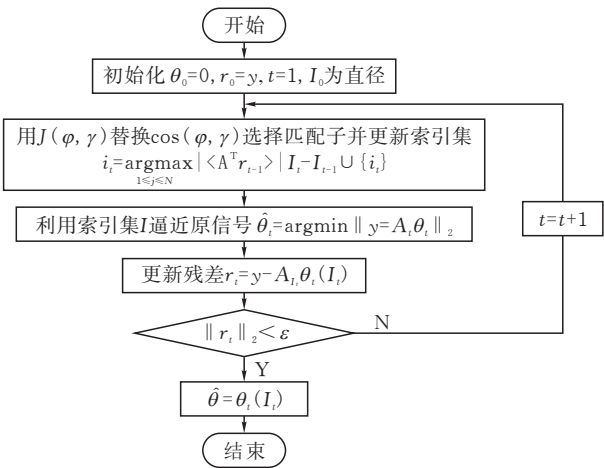
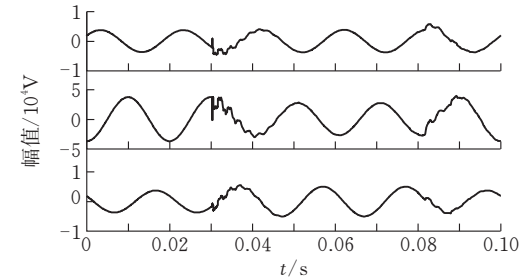


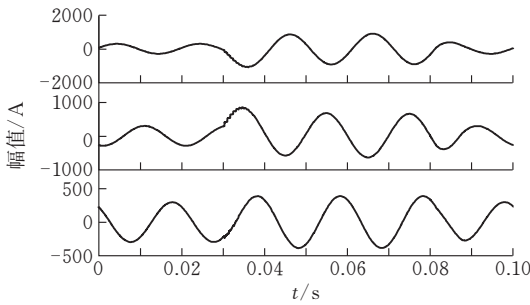
图 3 改进后的正交匹配追踪算法的流程图

3 仿真分析

基于 SIMULINK 平台构建输电线路仿真模型,频率设为 50 hz,电压的有效值为 500 kV,母线两头阻抗设为 $Z_p/\Omega = 2.08 + j54.7, Z_q/\Omega = 0.821 + j28.3$,正序电阻、零序电阻设为 $R_{p0} = 0.1138 \Omega/\text{km}, R_{p1} = 0.02083 \Omega/\text{km}$,正序电容、零序电容设为 $C_{p0} = 5.23 \times 10^{-9} \text{ F/km}, C_{p1} = 12.94 \times 10^{-9} \text{ F/km}$,正序电感和零序电感设为 $L_{p0} = 3.2866 \times 10^{-3} \text{ H/km}, L_{p1} = 0.8984 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ 。单相接地故障发生在距离母线 P 端 100 km 处,并假设过渡电阻大小为 0。故障时间设为 0.03 s 到 0.08 s。图 4 为 AB 接地时采集的电压和电流信号。



(a) AB 两相接地电压信号图



(b) AB 两相接地电流信号图

图 4 输电线路故障后信号采集图像

多信号分类(MUSIC)算法是一种基于参数的谱估计方法,是比较常用的信号频域分析方法,文献

[9]已经详细的论述了如何提取自然频率主要组成成分,本文不予详述。这里以输电线路发生 AB 两相接地故障为例,通过多信号分类的方法来提取发生故障时故障点处行波的频谱图,如图 5a 所示。

文献[10]将 MP 算法这种经典的贪婪算法与 Gabor 原子库相结合的方法定位输电线路故障点,在本文中简要称为 GMP 算法。由于该文献中已经通过与小波分析及傅立叶算法相比较证明了 GMP 算法更加优良,这里不多论述。采用贪婪算法与 Gabor 相结合的 GMP 算法计算得到的反馈滤波后的 β 模电流如图 5b 所示。

运用多信号分类算法对故障电流信号 β 模信号进行自然频率主成分提取,由图 5a 可知,计算得到的模波速 $v=295\ 333\text{ km/s}$,代入公式(3)后得到故障距离为 99.106,误差为 0.894%。

运用 GMP 算法提取自然频率主成分,迭代后得到的原子特征参数见表 1,计算得到的模波速为 $v=295\ 333\text{ km/s}$,代入公式(3)后得到的故障距离为 99.360,误差为 0.640%。

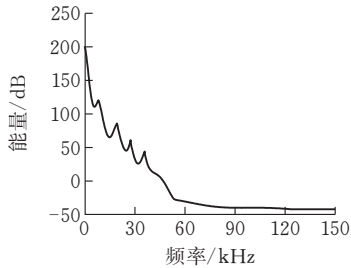
表 1 GMP 算法得到原子特征参数^[10]

原子	匹配度/%	幅值	频率/Hz
1	98.9	287.3	858.07
2	12.6	24.7	3425.40
3	11.0	22.3	916.47

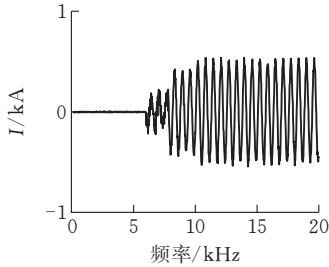
运用本文 JOMP 算法提取自然频率主成分,重新构建的频域信号如图 5c 所示,由图可知主频率为 814.23 Hz,计算得到的模波速为 $v=295\ 333\text{ km/s}$,代入公式(3)后得到故障距离 99.733,误差0.2670%。

综上所述,与多信号分类算法和 GMP 算法

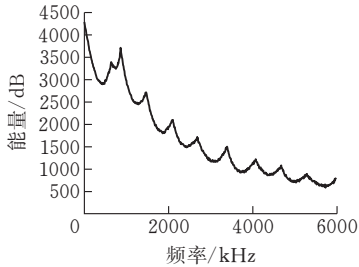
相比,在提取故障点处行波的自然频率上 JOMP 算法更好,精确度最高。



(a) MUSIC 算法得到的频谱图



(b) GMP 算法反馈滤波后的 β 模电流



(c) JOMP 算法重构的故障信号频谱图

图 5 故障信号行波与对应的固有频率频谱

分别使用三种算法在单相接地、两相短路、三相短路三种故障类型,100 km 与 200 km 两种故障距离,0 Ω 与 100 Ω 两种接地电阻下的故障点测量结果及误差分析见表 2。

表 2 三种算法在不同情况下的测距结果

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/ Ω	MUSIC		GMP		JOMP	
			测距位置/km	相对误差/%	测距位置/km	相对误差/%	测距位置/km	相对误差/%
单相接地	100	0	99.085	0.915	99.068	0.932	99.434	0.566
		200	99.018	0.982	99.011	0.989	99.298	0.702
	200	0	198.018	0.991	198.083	0.960	198.796	0.602
		200	197.933	1.034	197.907	1.047	198.018	0.991
两相短路	100	0	99.154	0.846	99.360	0.640	99.825	0.175
		200	98.957	1.043	99.024	0.976	99.611	0.389
	200	0	198.094	0.953	198.344	0.828	199.432	0.284
		200	197.897	1.052	198.006	0.997	199.218	0.391
三相短路	100	0	99.162	0.838	99.343	0.657	99.801	0.199
		200	98.968	1.032	99.012	0.988	99.598	0.402
	200	0	198.101	0.950	198.412	0.794	198.934	0.733
		200	197.926	1.037	198.138	0.931	198.321	0.840

由表 2 可知:随着输电线路发生故障后故障距离的增加、故障类型的不同以及过渡电阻的变化,无

论是多信号分类算法,还是 GMP 算法,亦或是 JOMP 算法都会影响故障定位的准确性。仿真验证

表明,当输电线路发生故障时,JOMP 算法更能精准的定位故障点的距离。

4 结 束 语

本文利用改进的 JOMP 算法有效提高了故障定位的精度,通过单相接地、两相短路、三相短路三种故障类型,0 Ω 与 100 Ω 两种接地电阻,100 km 与 200 km 两种故障距离的仿真验证,表明本文提出的故障定位方法精准度更高。

JOMP 算法通过引入 Jaccard 系数重新构建频域信号,可以更加准确地定位故障点,但是在整个计算过程中不仅需要提取单个主自然频率,还要计算基波分量以及多次谐波分量的自然频率,同时还要搜索稀疏矩阵中的每个原子来寻找相似度最高的一个,使得所需时间进一步提升。故而,下一步研究可以从如何提升算法运行速度思考。

[参 考 文 献]

[1] 卢毅. 基于暂态行波的电缆故障测距方法研究[D]. 重庆大学, 2011.

[2] Kai L, Zhengyou H E, Xiaopeng L I. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3):104-109.

[3] Gao X U, Gong Q, Xun L I, et al. Single-terminal fault location based on atomic decomposition and natural frequency of traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):133-138.

[4] 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.

[5] Zhengwei Q U, Hao W, Ning W. Application of atomic rapid decomposition algorithm in power quality disturbance analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015.

[6] Li B, Shen Y, Rajan S, et al. Theoretical results for sparse signal recovery with noises using generalized OMP algorithm[J]. Signal Processing, 2015, 117(C): 270-278.

[7] 林圣, 武骁, 何正友, 等. 基于行波固有频率的电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1):270-275.

[8] 于华楠, 马聪聪, 王鹤. 基于压缩感知估计行波自然频率的输电线路故障定位方法研究[J]. 电工技术学报, 2017(23):140-148.

[9] Rangarao K V, Venkatanarasimhan S. gold-MUSIC: A variation on music to accurately determine peaks of the spectrum[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(4):2263-2268.

[10] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 基于原子分解和行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5):133-138.

Research on Fault Location of Transmission Line Based on Improved Orthogonal Matching Pursuit Algorithm

JIANG Xiaotong, LIU Hui, CHEN Hui, QIAN Jinliang

(School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Based on the orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm, the Jaccard coefficient is added to improve the recognition ability of similar atoms, and a more accurate signal is reconstructed to obtain the natural frequency of the fault traveling wave for fault location. The simulation model built on SIMULINK shows that the improved algorithm has higher positioning accuracy under different fault types such as single-phase grounding, two-phase short circuit and three-phase short circuit, different fault distance and different transition resistance.

Keywords: Orthogonal matching pursuit; frequency extraction; fault location

[责任编辑: 张岩芳]