

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210309

基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法

罗建, 石家炜

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 为了分析电力系统暂态信号特性和计算暂态信号导数, 依据采样信号拟合暂态信号函数表达式是一种可行方法, 但现有的暂态信号拟合方法还存在拟合函数确定性和可导性方面的不足。针对这一问题, 提出了一种基于希尔伯特变换的电力系统暂态信号正弦表示分析方法, 采用暂态信号的正弦表示构成拟合基函数, 利用希尔伯特变换以满足拟合函数的确定性。与现有方法相比, 该方法可直接分解故障暂态信号的稳态分量和暂态分量, 其暂态分量能反映故障信号的衰减特性。该方法还可拟合暂态信号的函数表达式, 进而计算暂态电压电流信号的任意阶导数值, 这一特性是许多信号处理计算的基础。通过对一组给定信号和一组现场录波信号的分析, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力系统; 暂态分析; 拟合函数; 希尔伯特变换; 衰减特性

Sinusoidal representation of a transient signal based on the Hilbert transform

LUO Jian, SHI Jiawei

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology
(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: To analyze the characteristics of a power system transient signal and calculate its derivative, it is feasible to fit the function expression of the signal based on a sample, but the existing transient signal fitting methods still have shortcomings of certainty and derivability of the fitting function. Given this, a sinusoidal representation method for transient signal analysis of a power system based on a Hilbert transform is proposed. The sine function of the transient signal is used to form a fitting basis function, and the Hilbert transform is used to meet the certainty of the fitting function. Compared with the existing methods, this method can directly decompose the steady-state component and transient component of the fault transient signal, and its transient component can reflect the attenuation characteristics of the fault signal. This method can also fit the function expression of the transient signal, and then calculate the arbitrary order derivative value of the transient voltage and current signal. This is the basis of many signal processing calculations. Through the analysis of a set of given signals and a set of field recorded signals, the effectiveness of the proposed method is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877020).

Key words: power system; transient analysis; fitting function; Hilbert transform; attenuation characteristics

0 引言

电力系统暂态信号分析的目的是获取暂态信号的特性和建立其他功能需求的计算分析基础^[1-3]。目前, 用于电力系统暂态信号分析的方法主要有快速傅里叶变换法(FFT)^[4-8]、自回归谱估算法^[9-10]、Prony法^[11-14]、小波算法^[15-17]、S变换^[18-20]以及启发式算法^[21-23]等。

FFT法是目前最重要的暂态分析方法之一, 但是其在分析含次谐波分量等非平稳故障信号时效果不佳^[4-8]。自回归谱估算法虽没有FFT法中频率分辨率不足等问题, 但自回归谱估计法存在谱线分裂、虚假谱峰等问题^[9-10]。Prony算法采样时间短, 分辨率高, 且计算结果中包含有衰减系数, 符合电力系统暂态信号的特点。但是由于Prony模型在数值上是病态的, 其实质上是一个高度非线性的最优化问题, 因而对于干扰信号十分敏感, 对幅值较小的分量计算不准确^[11-14]。小波算法通过一个可调的时间-频率

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877020)

窗,反映了对信号的时变特性,且已在电力系统暂态信号分析领域有很多应用成果,但其仍存在小波基选取困难的问题^[15-17];S变换在小波变换的基础上采用高斯窗函数且窗宽与频率的倒数成正比,免去了窗函数的选择,改善了窗宽固定的缺陷,但因窗的面积固定,因而产生了局部频率分辨不准等问题^[18-20],且小波变换与S变换的信号表达式较为复杂,很难进行其他数学计算。启发式算法随着人工智能技术的发展,已经被应用于电力系统暂态信号分析中,但是此类算法往往模型参数较多,算法收敛性能受参数影响较大,对样本有较强的依赖性且可解释性较弱^[21-23]。

针对现有的基于拟合函数的暂态信号分析方法存在一些不足,还不能满足电力系统暂态分析与其他模型配合的要求,本文提出一种基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法。通过对一组给定信号和一组现场录波信号的分析,验证了本文方法的有效性。

1 暂态信号正弦表示分析方法

在通过采集装置采样得到电力系统暂态信号后,若能找到采样信号 y 与时间 t 之间的函数关系,将有助于电力系统暂态信号特性的分析,还可计算电力系统暂态信号的高阶导数,如Prony算法就是一种寻找采样信号与时间之间函数关系的暂态信号分析方法。本文研究的目的是希望用特定的函数模型在一定的优度下去逼近采样数据,即用特定函数模型去复现采样暂态信号,也就是寻找整体误差最小,能较好反映采样暂态信号与时间之间的函数关系 $y=f(t)$ 。

1.1 基函数

信号复现时需选用一定的函数形式,设采样信号对应的函数可由一组基函数来线性表示。一般地,若一组基底 $\{\phi_i(p)\}_{i=1}^N$ 是线性无关的,则由该基底张成的泛函空间中的任意元素都可用该组基底的线性组合来表示,对于待复现的信号 $f(t)$ 有如下表示:

$$f(t) = \sum_{i=1}^N c_i \phi_i(t) \quad (1)$$

式中, $\{c_i\}_{i=1}^N$ 是一组待定系数。

基底 $\{\phi_i(t)\}_{i=1}^N$ 的选择则与研究的问题有关,常见的基底有多项式基底,傅里叶基底等。采用幂基作为基底的曲线具有易于计算,适应性强的优点,但是其对应的多项式系数矢量的几何意义不明确,且对于 N 次多项式,其 $N+1$ 及以上阶导数是零,不符合工程要求。而傅里叶基底对应的则是广泛应用

于电力系统分析的傅里叶级数,其在暂态信号分析上存在分辨率不足等问题。可以看出,恰当的基函数选取往往可以降低问题的分析难度或更贴近实际情况。

1.2 暂态信号的正弦表示方法

依据文献[24]提出的暂态信号正弦表示方法,故障信号可表示成

$$f(t) = A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \sin(\omega t) + A(t) \cdot \cos(\omega t) + B(t) \cdot \sin(\omega t) = f_s(t) + f_i(t) \quad (2)$$

式中: A 、 B 分别为常数,是故障稳态信号分量 $f_s(t)$ 的系数^[22];而 $A(t)$ 、 $B(t)$ 则是关于 t 的函数,对应故障暂态信号分量 $f_i(t)$ 。暂态信号采用幅值和相位都随时间变化的正弦函数来表示,且暂态信号幅值将随时间变化而衰减。

1.3 基于希尔伯特变换的暂态信号分析方法

为了体现暂态信号分量的衰减特性,同时也满足工程的要求^[9-12],本文将 $A(t)$ 、 $B(t)$ 表示为

$$A(t) = \sum_{j=0}^N a_j \cdot t^j \cdot e^{-s \cdot t^2} \quad (3)$$

$$B(t) = H[A(t)] \quad (4)$$

式中: $\{a_j\}_{j=0}^N$ 是一组待定系数, N 为 $A(t)$ 中多项式的最高阶数; s 为衰减常数; $B(t)$ 是 $A(t)$ 的希尔伯特变换,以满足 $A(t)$ 的确定性,且可减少拟合函数的待定系数数量; H 为希尔伯特算子,其定义为

$$H[f(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

希尔伯特变换具有线性性质,正交性质和能量守恒性质等一些特性^[25-29]。希尔伯特变换的正交性质使得体现暂态分量 $f_i(t)$ 的两个暂态系数 $A(t)$ 和 $B(t)$ 是正交的。再将式(4)与式(3)代入式(1)可得暂态信号 $f_i(t)$ 的基底为

$$\{t^j \cdot e^{-s \cdot t^2} \cdot \cos(\omega t) + H[t^j \cdot e^{-s \cdot t^2}] \cdot \sin(\omega t)\}_{j=0}^N \quad (6)$$

由此式(2)的故障信号可表示成

$$f(t) = (A + \sum_{j=0}^N a_j \cdot t^j \cdot e^{-s \cdot t^2}) \cdot \cos(\omega t) + (B + \sum_{j=0}^N a_j \cdot H[t^j \cdot e^{-s \cdot t^2}]) \cdot \sin(\omega t) \quad (7)$$

当模型参数 ω 和衰减系数 s 已经给定时,将采样数据与采样时间序列分别代入式(7),即可求解稳态分量系数 A 、 B 和暂态分量系数 $\{a_j\}_{j=0}^N$ 。

2 暂态信号正弦表示分析方法特性

本文提出的基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法具有如下特性。

1) 暂态信号的衰减特性

所提暂态信号分析方法可将故障信号的暂态信号分量和稳态信号分量分解, 其暂态信号分量具有衰减特性。这里的暂态信号衰减特性由基函数中的含有衰减的类指数函数决定。当衰减系数 s 取值合适时, 其对应的暂态分量即可在相应的时间内衰减到零。

2) 暂态信号任意阶导数的可计算性

基于所提暂态信号分析方法, 结合希尔伯特变换的微分性质与莱布尼兹法则^[26], 可以求取暂态信号对应函数形式的任意阶导函数。希尔伯特变换的微分性质如式(8)。

$$H\left[\frac{df}{dt}\right] = \frac{d}{dt}H[f] \quad (8)$$

式(7)的 n 阶导数表达式为

$$\begin{aligned} f^{(n)}(t) = & \omega^n A \cos(\omega t + \frac{n\pi}{2}) + \omega^n B \sin(\omega t + \frac{n\pi}{2}) + \\ & \sum_{k=0}^n C_n^k \left(\sum_{j=0}^{\infty} a_j t^j e^{-st^2} \right)^{(n-k)} \omega^k \cos(\omega t + \frac{k\pi}{2}) + \\ & \sum_{k=0}^n C_n^k H \left[\left(\sum_{j=0}^{\infty} a_j t^j e^{-st^2} \right)^{(n-k)} \right] \omega^k \sin(\omega t + \frac{k\pi}{2}) \end{aligned} \quad (9)$$

3 给定信号算例

为了验证本文提出方法在暂态信号分析上的有效性, 本节就一组给定信号采用所提方法进行分析。

考虑到电力系统的暂态信号中除稳态的基波分量外, 还存有谐波分量和衰减分量以及噪声。因而给定信号的表达式为

$$\begin{aligned} f(t) = & \sum_{i=1}^3 A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) e^{-st} + B e^{-st} + \\ & C \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) + N(t) \end{aligned} \quad (10)$$

信号 $f(t)$ 包含了稳态分量和暂态分量。稳态分量是以 f_0 为系统频率的正弦信号, 暂态分量则包含了直流衰减分量、基波和倍频衰减分量。其中基波频率即 f_0 为 50 Hz, 其他各谐波的频率与基波倍数关系及对应频率的相角参数如表 1 所示。

表 1 给定信号参数

Table 1 Parameters of given signal

频率分量	频率值/Hz	相位	幅值
f_0	50	0.3π	20
f_1	50	0.1π	4.5
f_2	100	0.2π	1
f_3	150	0.25π	3

直流衰减分量初值为 12, 仿真采样频率为 2 400 Hz, 数据点数量为 $n=36$, 暂态信号模型参数 ω 取 100π , 衰减系数 $s=20$ 。噪声 $N(t)$ 由一组波动范围为 -1 至 1 的随机数构成。经本文第 1 节所述方法对给定信号进行计算, 得基于正弦表示的信号数据与式(6)为基底的系数 $\{a_j\}_{j=0}^N$ 。计算数据与给定信号曲线如图 1 所示。

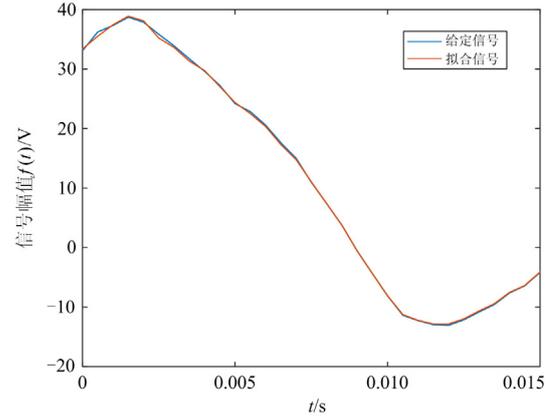


图 1 给定信号与本文方法表示的信号

Fig. 1 Given signal and the signal represented by this method

从图 1 可以看出, 给定信号与本文方法表示的信号曲线几乎重合。经计算, 其最大相对误差为 2.00%。结合计算所得的基底系数 $\{a_j\}_{j=0}^N$ 与式(7)可得给定信号的稳态分量 $f_s(t)$ 和暂态分量 $f_t(t)$, 其波形如图 2 所示。经本文方法计算的暂态信号与给定的暂态信号对比如图 3 所示。

经本文方法计算得到的稳态系数 A 、 B 分别为 16.43 和 11.99, 则稳态分量的初相角为 0.299π , 与给定信号中的初相角相差不大, 稳态分量最大值为 20.34, 与给定信号中的基波稳态分量幅值比为 1.017。

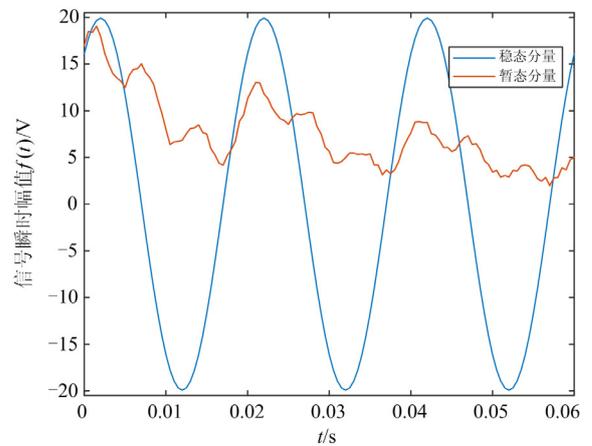


图 2 给定信号的稳态分量与暂态分量

Fig. 2 Stationary and transient components of a given signal

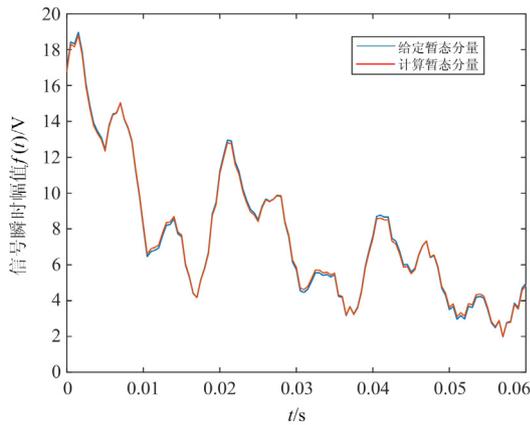


图 3 给定信号与计算信号的暂态分量

Fig. 3 Given signal and calculated signal transient component

而求取的稳态系数 A 、 B 在数值上分别对应稳态幅值与初相角余弦、正弦值的乘积, 即 16.18 与 11.76, 与稳态系数 A 、 B 的相对误差分别为 1.55% 和 1.96%。

针对式(10)的给定信号, 由本文提出方法、Prony 算法和小波变换法计算得到的拟合信号如图 4 所示。

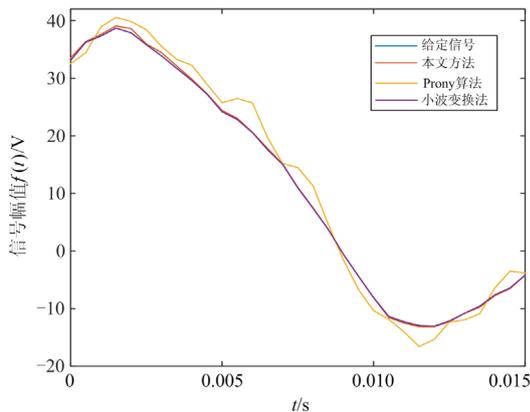


图 4 给定信号与不同方法表示的信号

Fig. 4 Given signals and signals expressed in different ways

在较强的噪声影响下, Prony 算法的计算结果与给定信号有较大的差距, 而本文方法和小波变换法都与给定信号相差不大。以上三种算法的计算性能如表 2 所示。

表 2 不同算法的计算性能

Table 2 Computational performance of different algorithms

算法	计算时间/s	最大相对误差/%	受噪声影响	提供解析表达式
本文方法	0.22	2.0	小	✓
Prony 法	0.69	17.4	大	✓
小波变换法	0.27	0.1	小	×

从表 2 中可以看出, 本文方法虽在误差上与小波变换法有些差距, 但却可以提供相对简单的信号的解析表达式以配合电力系统分析中的其他模型。而在计算时间与抗干扰能力上本文方法均与小波变换法相差不大, 且优于 Prony 法。从图 3 不难看出, 本文方法可以有效地将暂态信号中的稳态分量和暂态分量分离, 可以在保证计算结果准确的基础上, 提供稳态分量和暂态分量的函数表达式。

4 现场录波信号算例

为验证本文方法的有效性, 本节选取重庆电网中某条 220 kV 线路发生 B 相单相接地故障的实际故障录波数据进行计算分析。为方便记录, 记一端为 M 端, 另一端为 N 端。故障线路两侧录波装置的采样频率为 1 200 Hz, 选取故障后、保护装置动作前的一段时间内的数据点。采用第 1 节中算法计算故障后 M 端电流波形的正弦表示方法(以 B 相数据为例), 计算结果如图 5 所示。

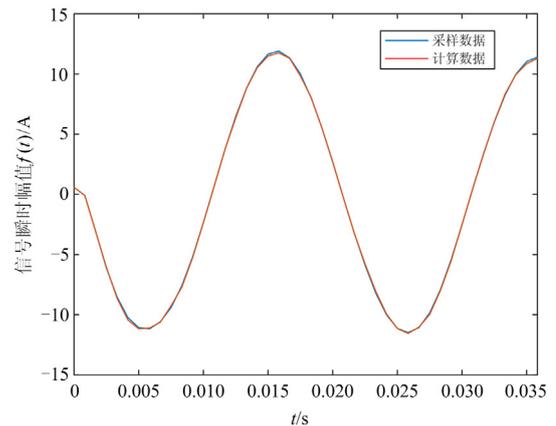


图 5 M 端 B 相电流信号与计算值

Fig. 5 B-phase current signal and calculation value of M end

由图 5 可以看出, 本文方法在针对实际信号时仍表现良好。图 5 中的计算数据与采样数据最大相对误差为 0.95%。将 M 端 B 相电流按本文方法进行分解, 为体现故障发生时暂态电流特点, 将分解后的稳态与暂态信号分量分别与 M 端 CT 变比相乘, 波形如图 6 所示。

当故障发生时, 网络结构发生改变, 因而稳态分量与故障前系统稳定运行时的数据并不一致。故障发生后, 故障相电流极性与另外两相相反, 暂态电流分量快速攀升, 再跌落; 而在达到稳定后, 暂态分量相位与稳态分量的相位相差不大。

为了体现本文方法可计算暂态信号任意阶导数

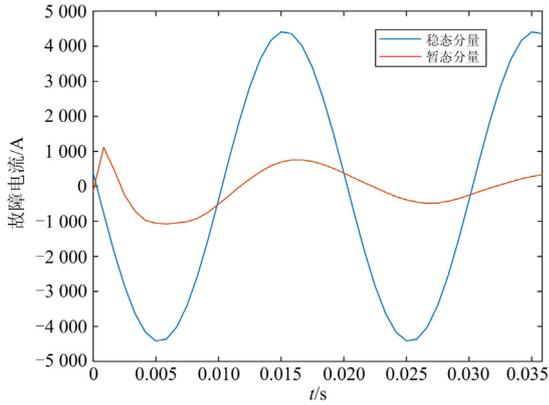


图6 故障电流稳态分量与暂态分量

Fig. 6 Steady state component and transient component of fault current

的特性, 本节将其应用于文献[30]中的分布参数线路模型计算, 以获取本节实际故障案例的故障点电压。

分布参数线路模型为

$$\begin{cases} u_N(t) = u_M(t) - (Ri_M(t) + Lli'_M(t)) + \sum_{j=1}^{\infty} A(j) \\ i_N(t) = i_M(t) - \sum_{j=1}^{\infty} B(j) \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} A(j) = \frac{1}{(2j)!} \sum_{i=0}^j l^{2j} C_j^i R^i L^{j-i} (C^j u_M^{(2j-i)}(t) + G^j u_M^{(2j-i-1)}(t)) - \\ \frac{1}{(2j+1)!} \sum_{i=0}^{j+1} l^{2j+1} C_{j+1}^i R^i L^{j-i+1} (C^j i_M^{(2j-i+1)}(t) + G^j i_M^{(2j-i)}(t)) \\ B(j) = \frac{1}{(2j-1)!} \sum_{i=0}^{j-1} l^{2j-1} C_{j-1}^i R^i L^{j-i-1} (C^j u_M^{(2j-i-1)}(t) + \\ G^j u_M^{(2j-i-2)}(t)) - \frac{1}{(2j)!} \sum_{i=0}^j l^{2j} C_j^i R^i L^{j-i} (C^j i_M^{(2j-i)}(t) + \\ G^j i_M^{(2j-i-1)}(t)) \end{cases} \quad (12)$$

式中: R 、 L 、 C 、 G 分别是单位长度的电阻(单位 Ω/km)、电感(单位 H/km)、电容(单位 F/km)、电导(单位 S/km); l 为输电线路长度(单位 km); M 、 N 点分别表示线路的始端和末端; $i_M^{(2j-1)}(t)$ 、 $u_M^{(2j-1)}(t)$ 分别为 t 时刻 M 端电流的 $(2j-1)$ 阶导数, 其他电压电流的上标含义与之相同。故障线路参数如表 3 所示。

表 3 中, R 、 L 、 C 、 G 为线路的正序参数, R_0 、 L_0 、 C_0 为线路的零序参数, l 为线路全长。暂态信号模型参数 ω 取 100π , 衰减系数 s 取 20。根据电网公司提供的故障报告, 故障点位于距 M 端 20 km 处。根据本文暂态分析方法与分布参数线路模型, 由 M 端计算距 M 端 20 km 处 B 相电压波形与由 N 端计

算距 N 端 12.6 km 处 B 相电压波形如图 7 所示。

表 3 故障线路参数

Table 3 Parameters of fault line

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$R/(\Omega/\text{km})$	0.041 0	$R_0/(\Omega/\text{km})$	0.186 1
$L/(\text{H}/\text{km})$	9.59×10^{-4}	$L_0/(\text{H}/\text{km})$	0.002 5
$C/(\text{F}/\text{km})$	2.03×10^{-9}	$C_0/(\text{F}/\text{km})$	7.10×10^{-9}
$G/(\text{S}/\text{km})$	0	l/km	32.6

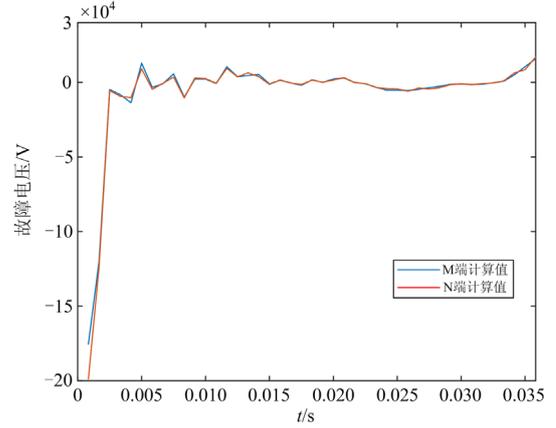


图7 由两端计算的故障点电压

Fig. 7 Fault point voltage calculated from both M and N ends

从双端计算结果可以看出, 由两端计算出的故障点处电压波形一致, 这也进一步说明了本文提出的暂态分析方法的有效性。从式(12)可以看出, 分布参数电路模型需要计算电压、电流表达式的各阶导数, 图 7 中两端计算的故障点处电压一致的结果也证明了式(9)的正确性。

5 结论

为适应电力系统暂态分析的要求, 本文提出一种基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法, 具有以下特点:

- 1) 可将故障信号的暂态信号分量和稳态信号分量分解, 其暂态信号分量具有衰减特性。
- 2) 依据拟合的暂态信号函数表达式, 可计算暂态信号任意阶导数值。

本文对一组给定信号和一组现场录波信号进行了分析, 分析结果表明本文方法可有效分解故障信号的暂态信号分量和稳态信号分量, 有效拟合暂态信号函数表达式, 进而有效计算暂态电压电流信号的任意阶导数值。

参考文献

- [1] 李伟峰, 张庆波, 叶容慧. 一种基于暂态分析的配电

- 网小电流接地故障远程诊断系统[J]. 广东电力, 2015, 28(12): 53-57.
- LI Weifeng, ZHANG Qingbo, YE Ronghui. Remote diagnosis system for small current grounding fault of power distribution network based on transient analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(12): 53-57.
- [2] 郑博文, 王增平, 吕哲, 等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 18-25.
- ZHENG Bowen, WANG Zengping, LÜ Zhe, et al. Research on relay protection based on transient quantity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 18-25.
- [3] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.
- LÜ Zhe, WANG Zengping. New principle of fast differential protection based on transient current waveform characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.
- [4] SERBES A. Fast and efficient sinusoidal frequency estimation by using the DFT coefficients[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3): 2333-2342.
- [5] 高云鹏, 滕召胜, 温和, 等. 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 43-48.
- GAO Yunpeng, TENG Zhaosheng, WEN Wen, et al. Power harmonic analysis and application of Kaisai window interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 43-48.
- [6] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
- PANG Hao, LI Dongxia, ZU Yunxiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.
- [7] NOSHAHR J B, KALESAR B M. Harmonic spectrum estimation and analysis of the voltage at the PCC of the distribution network connected to solar plant based on parametric algorithm (music)[C] // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 6-9, 2017, Milan, Italy: 1-6.
- [8] OLGA P, ALEXEY P, NATALIA S. Application of Parametric DFT for Measuring Harmonic Signal Amplitude[C] // 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), March 25-27, 2020, Moscow, Russia: 1-4.
- [9] 李明, 王晓茹. 一种用于电力系统间谐波谱估计的自回归模型算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 72-76.
- LI Ming, WANG Xiaoru. An autoregressive model algorithm for power system interharmonic spectrum estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 72-76.
- [10] 马秉伟, 刘会金, 周莉, 等. 一种基于自回归模型的间谐波谱估计的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 79-83.
- MA Bingwei, LIU Huijin, ZHOU Li, et al. An improved algorithm for interharmonic spectrum estimation based on autoregressive model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 79-83.
- [11] ERRO D, SAINZ I, NAVAS E, et al. Efficient spectral envelope estimation from harmonic speech signals[J]. Electronics Letters, 2012, 48(16): 1019-1021.
- [12] 丁屹峰, 程浩忠, 吕干云, 等. 基于 Prony 算法的谐波和间谐波频谱估计[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 98-101.
- DING Yifeng, CHENG Haozhong, LÜ Ganyun, et al. Spectrum estimation of harmonics and interharmonics based on Prony algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 98-101.
- [13] 李高望, 张智, 李达, 等. 基于 Prony 分析特征提取的同调机组分群方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 91-99.
- LI Gaowang, ZHANG Zhi, LI Da, et al. Coherency clustering method based on Prony analysis feature extraction[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 91-99.
- [14] 刘应梅, 高玉洁. 基于 Prony 法的暂态扰动信号分析[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 26-30.
- LIU Yingmei, GAO Yujie. Transient disturbance signal analysis based on Prony method[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 26-30.
- [15] 赵勇, 王学伟. 小波 Mallat 谐波测量的带内泄漏误差分析与算法改进[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 59-63.
- ZHAO Yong, WANG Xuewei. In band leakage error analysis and algorithm improvement of wavelet Mallat harmonic measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 59-63.
- [16] 任震, 黄群古, 黄雯莹, 等. 基于多频带小波变换的电力系统谐波分析新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 39-42, 47.
- REN Zhen, HUANG Qungu, HUANG Wenyong, et al.

- New methods of power system harmonic analysis based on wavelet transform with multi-frequency band[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 39-42, 47.
- [17] 韩志伟, 刘志刚, 鲁晓帆, 等. 基于 CUDA 的高速并行小波算法及其在电力系统谐波分析中的应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 98-101.
HAN Zhiwei, LIU Zhigang, LU Xiaofan, et al. High-speed parallel wavelet algorithm based on CUDA and its application in power system harmonic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 98-101.
- [18] 兰金晨, 朱革兰, 李松奕. 基于广义 S 变换突变识别的暂稳态谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 46-52.
LAN Jinchun, ZHU Gelan, LI Songyi. Transient steady state harmonic detection method based on mutation identification of generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 46-52.
- [19] 马明, 陈春林. 基于 BP-AdaBoost 的电压暂降源识别方法[J]. 供用电, 2020, 37(9): 9-16.
MA Ming, CHEN Chunlin. Identification method of voltage sag source based on BP-AdaBoost[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 9-16.
- [20] 徐永干, 冉恒, 苟鑫, 等. 基于广义 S 变换和 QPSO-SVM 的水电机组振动故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 38-44, 84.
XU Yonggan, RAN Heng, GOU Xin, et al. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating unit based on generalized S transform and QPSO-SVM[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 38-44.
- [21] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用遗传神经网络的电力系统暂态信号分析方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 170-175.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Power system transient signal analysis method based on genetic neural network[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 170-175.
- [22] 杨宣访, 王家林. 采用 Prony 与粒子群算法的电力暂态信号分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(8): 25-30.
YANG Xuanfang, WANG Jialin. Analysis of transient signals of power using Prony and particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(8): 25-30.
- [23] SEVEROGLU N, SALOR O. Statistical models of EAF harmonics developed for harmonic estimation directly from waveform samples using deep learning framework[C] // 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 10-16, 2020, Detroit, MI, USA.
- [24] 汪太昊. 广义正弦变换方法及其在配电系统保护中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
WANG Taihao. Generalized sinusoidal transform method and its applications in protection of distribution system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [25] YU B, YANG X. The Hilbert transform of B-spline wavelets[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28: 693-697.
- [26] 刘译胶. 一种时域希尔伯特变换方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LIU Yijiao. A time domain Hilbert transform method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [27] WANG Yan, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. A new method with Hilbert transform and slip-SVD-based noise-suppression algorithm for noisy power quality monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 987-1001.
- [28] 张国军, 任荣, 韩静静, 等. 希尔伯特变换在配电网故障选线中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 23-28.
ZHANG Guojun, REN Rong, HAN Jingjing, et al. Application of Hilbert transform in fault line selection of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 23-28.
- [29] 李国欣, 费骏韬, 朱堂宇, 等. 基于自适应变分模态分解的谐波检测算法[J]. 供用电, 2021, 38(11): 1-8, 13.
LI Guoxin, FEI Juntao, ZHU Tangyu, et al. Harmonic detection algorithm based on adaptive variational modal decomposition[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 1-8, 13.
- [30] 张开迪. 分布参数电路模型及其在特高压线路保护中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZAHNG Kaidi. Distributed parameter circuit model and its application in UHV line protection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-11-21

作者简介:

罗建(1960—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制, 电力系统信号处理; E-mail: luojian10000@x263.net

石家炜(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态信号处理。E-mail: 1548174853@qq.com

(编辑 周金梅)