

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.006

配电网故障暂态信号的逼近处理方法

张长春¹, 王一夫², 刘 钢¹, 李达炜³

(1. 国网重庆市电力公司万州供电分公司, 重庆 404001; 2. 国网重庆市电力公司长寿供电分公司, 重庆 401220; 3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对一些需尽快计算故障后稳态电流电压值的应用情况, 如配网配变支路保护、用户侧保护等, 短时间内处理电流电压故障暂态信号成为了一个必须面对的问题。现有电网故障信号处理方法通常受限于采样数据长度和待求参数数量, 存在处理电流电压故障暂态信号时间较长和难求取的问题。利用配网故障暂态电压电流的特点, 由稳态工频分量和直流衰减分量组合建模近似表征配网故障暂态电压电流, 采用粒子群-高斯牛顿混合算法对此模型的各项参数进行辨识, 实现暂态参数的求取。仿真分析和工程应用表明, 该方法可缩减待求参数个数, 利用较短的采样数据对故障暂态电压电流信号参数进行求取, 且具有较高鲁棒性。

关键词: 配网保护; 暂态衰减分量; 粒子群算法; 高斯牛顿法

中图分类号: TM762

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)11-053-06

An algorithm for calculating transient-state signal parameter of distribution network

ZHANG Changchun¹, WANG Yifu², LIU Gang¹, LI Dawei³

(1. Wanzhou Power Supply Subsidiary Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404001, P.R.China; 2. Changshou Power Supply Subsidiary Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401220, P.R. China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: For some applications such as variable branch protection and user-side protection in distribution network that need to calculate the steady-state current and voltage values as soon as possible, how to deal with current and voltage transient fault signal in a short period of time has become a problem that we face. The existing power grid fault signal processing methods are usually limited in the length of sampling data and the quantity of parameters with the result that the count of current and voltage fault transient signal is hard and takes a long time. This article was based on the characteristics of fault transient voltage and current in distribution network, and established a model including stable-state power frequency component and decaying DC component to approximately characterize distribution network fault transient voltage and current. The particle swarm-Gauss Newton hybrid algorithm was used to identify the parameters of this model and the transient parameters were obtained. The simulation analysis and engineering application have proved that it has a better approximate effect and robustness than former algorithms.

Keywords: distribution protection; transient attenuation component; particle swarm optimization; Gauss-Newton method

收稿日期: 2018-05-03

作者简介: 张长春(1983—), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护研究, (E-mail) 112910982@qq.com。

配电网出现故障后保护通常要计算故障后的稳态电流或电压值,对于一些应用情况,如配变支路保护、用户侧保护等,希望能尽快计算故障后的稳态电流或电压值,以保护快速出口断开故障,为主线路保护配合、备用电源投入等创造良好条件。由于配电网故障后的电流电压信号含有暂态分量,为了能在短时间内(如 10 ms)计算故障后的稳态电流和电压值,就必然需要在短时间内处理电流电压暂态信号。

目前,通常采用加窗傅里叶等滤波算法^[1-3]来提取稳态分量,暂态分量的存在影响了滤波算法的提取精度,增加窗的宽度可提高滤波算法的提取精度,但增加了信号处理时间。为了既不增加信号处理时间又能提高信号处理精度,一些方法将稳态分量和暂态分量组合建模,采用拟合逼近方法求取故障后的稳态分量和暂态分量,多项式拟合方法和扩展 Prony 算法是具有代表性的两种方法。多项式拟合方法利用一定阶数的多项式来拟合暂态分量,多项式的阶数影响暂态分量的拟合效果,增加多项式阶数原则上可促进拟合效果,但增加了待求参数个数^[4-6]。扩展 Prony 算法利用带指数衰减的正弦函数组合来拟合暂态分量,其待求参数较多。随着待求参数的增多,求取参数的困难性增加,如最优解问题、参数约束问题等,且增加了采样数据长度^[7-8]。

为了能在短时间内有效计算故障后的稳态电流和电压值,文中提出一种拟合逼近处理方法,可以在短时间内求解配电网故障暂态信号。方法中,电流电压暂态信号以故障后稳态分量、直流衰减分量和其他高频衰减分量的组合进行表示,且视高频衰减分量成分很小,运用最小二乘法求解稳态分量和直流衰减分量的参数,以计算故障后的稳态电流或电压值。文中就提出的配电网故障暂态信号拟合逼近处理方法进行了仿真计算分析,分析结果表明,所提方法能在短时间内有效计算故障后的稳态电流或电压值。

1 拟合逼近处理方法原理

配电网故障后电流电压暂态信号可表示为稳态分量、直流衰减分量及其他高频衰减分量的组合,即

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t + \varphi_i) + C_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} + G_i(t), \\ u(t) &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u) + C_u e^{-\frac{t}{\tau_u}} + G_u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中: I_m 、 φ_i 、 C_i 、 τ_i 、 $G_i(t)$ 和 U_m 、 φ_u 、 C_u 、 τ_u 、 $G_u(t)$ 分别为电流电压故障后的稳态分量幅值、初相位、直流衰减分量的幅值、衰减时间常数、其他高频衰减分量。式(1)可表示为

$$\begin{aligned} i(t) &= A_i \cos(\omega t) + B_i \sin(\omega t) + C_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} + G_i(t), \\ u(t) &= A_u \cos(\omega t) + B_u \sin(\omega t) + C_u e^{-\frac{t}{\tau_u}} + G_u(t), \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $A_i = I_m \sin \varphi_i$, $B_i = I_m \cos \varphi_i$, $A_u = U_m \sin \varphi_u$, $B_u = U_m \cos \varphi_u$ 。

考虑到配电网暂态高频衰减分量通常衰减很快,且远小于暂态直流衰减分量的特点^[9],可认为直流衰减分量是故障暂态分量的主要成分,由此可将式(2)中的 A 、 B 、 C 、 τ 4 个参数作为待辨识参数,其参数的辨识可转换为求解一个带约束的非线性最小二乘问题^[10-11]

$$\begin{cases} \min(x) = \|f(x)\|^2 \in R^4, \\ \text{s.t. } x_4 > 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T, \quad (4)$$

$$f_i(x) = x_1 \cos(\omega t_i) + x_2 \sin(\omega t_i) + x_3 e^{-\frac{t_i}{x_4}} - y(t_i). \quad (5)$$

式(3)为目标函数和约束条件,式(4)中 m 的取值取决于采样点数,式(5)中 $y(t_i)$ 为式(2)中的电流电压采样值 $i(t_i)$ 或 $u(t_i)$, $f_i(x)$ 对应时间 t_i ,不同的时刻分别对应一个约束方程, $f_i(x)$ 是关于 x 的非线性函数,且具有一阶连续偏导数。

2 算法实现

2.1 初值选取

针对非线性最小二乘问题,传统的解决方法是利用高斯-牛顿法。但高斯-牛顿法存在对初值比较敏感

问题,初值选取不好往往会造成收敛速度慢甚至不收敛。随着智能优化技术的发展,粒子群优化算法(PSO, particle searm optimization)具有原理简单、易于实现、无需梯度信息、参数少等优点,在连续优化和离散优化问题中都表现出良好的效果,但缺乏局部区域精细搜索能力^[10-12]。因此,文中算法选用粒子群算法求取高斯-牛顿算法的初始值。

2.2 带约束粒子群算法

粒子群算法具有较好的全局收敛特点,而在此算法中,根据实际物理意义,直流衰减时间常数 $\tau > 0$,需要在粒子群算法中引入约束。

PSO 算法的约束主要有罚函数法和搜索限制法,罚函数的目的是将约束优化问题转化成无约束优化问题,但罚函数的设计通常比较复杂。搜索限制法将粒子群的搜索范围限制在可行域内,进而保证解的可行性,但初始可行解空间往往很难确定^[13-14]。算法结合模拟退火算法的思想^[15],以一定的概率接受可行域外的粒子。概率公式如下:

$$P = e^{-\frac{D}{T_k}}, \quad (6)$$

$$D = -x_4, \quad (7)$$

式中: D 表示粒子超出可行域的距离, D 越大,被接受的概率就越小; T_k 与模拟退火算法中的温度类似,采用比例下降方式,随着迭代次数进行, T_k 减小,被接受概率越小。当粒子在搜索过程中第 4 个分量 $x_4 < 0$ 时,计算概率 P 。如果

$$P > \xi, (\xi = \text{rand}(0,1)), \quad (8)$$

则接受此粒子;否则,保留上一次粒子位置。这样既保证初始阶段粒子的搜索能力,又保证最终解在可行域内。

2.3 算法流程

步骤 1:初始化粒子随机位置和随机速度,设定初始 T_k 和终止条件。

步骤 2:计算各粒子适应值 $s(x_j) = \|f(x_j)\|^2$, j 表示第 j 个粒子。并与自身和全局粒子历史最好位置比较,如果更好,更新其位置。

步骤 3:利用 $v_j^{k+1} = v_j^k + c_1 \xi(p_j^k - x_j^k) + c_2 \eta(p_g^k - x_j^k)$, $x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^{k+1}$ 对粒子群位置进行更新。

步骤 4:若 x_j^{k+1} 在可行域,转步骤 5;否则,产生 $\xi = \text{rand}(0,1)$,计算 D ,若 $P = e^{-\frac{D}{T_k}} \geq \xi$,转步骤 5;否则令 $x_j^{k+1} = x_j^k$ 。

步骤 5:利用 $T_{k+1} = T_k \cdot r$, $r \in (0.95, 0.99)$ 降低 T_k ,若达到终止条件,转步骤 6;否则转步骤 2。

步骤 6:将粒子群算法所得最优解作高斯牛顿法初始值 x_0 ,给定允许误差 $\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 > 0$,令迭代次数 $k = 0$ 。

步骤 7:检查是否满足收敛准则。计算 $f(x_k)$ 及 Jacobi 矩阵 $\nabla f(x_k)$,若 $\|\nabla f(x_k)^T f(x_k)\| < \epsilon_1$ 或 $\|f(x_k)\|^2 < \epsilon_2$,迭代终止, x_k 为最优解;否则步骤 8。

步骤 8:构造高斯-牛顿方向。取 $d_k = [\nabla f(x_k)^T \nabla f(x_k)]^{-1} \nabla f(x_k)^T f(x_k)$ 。

步骤 9:求 x_{k+1} ,设 λ_k 初值和 m_0 , $x_{k+1} = x_k + \lambda_k d_k$ 。若 $\frac{\|f(x_k)\|}{\|f(x_{k+1})\|} > \delta$,存储 x_{k+1} ,转步骤 10;否则 $\lambda_k = \lambda_k / 2, m = m + 1$,若 $m > m_0$,转步骤 10;否则转步骤 9。

步骤 10:约束条件检查。若满足 $k = k + 1$,转步骤 7,否则,调整 x_4 初值,转步骤 7。

3 仿真分析

为了验证文中所给方法的有效性,在数据窗取 10 ms 的情况下,就暂态高频衰减分量大小以电流信号对方法的影响为例进行仿真分析。

设电流输入信号: $i_1(t) = 100\cos(\omega_0 t + \pi/6) + 50e^{-t/0.05} + G_m e^{-t/T_2} \cos(n\omega_0 t + \pi/4)$ 。

式中取 $\omega_0 = 2\pi f_0$, $f_0 = 50$ Hz。分析计算结果如表 1~表 3 所示。由于配网中高频分量的主要成分在 500 Hz 以内^[9], 因此, n 在 10 以内取值即可。表 1 是高频衰减分量 n 取 2 的计算结果, 表 2 是高频衰减分量 n 取 5 的计算结果, 表 3 是高频衰减分量 n 取 10 的计算结果。

表 1 高频衰减分量 n 取 2 的计算结果

Table 1 The calculating results at $n = 2$

G_m	T_2/ms	I_m	$\varphi_i/(\text{°})$	C_i	τ_i
0	—	100.000	30.000	50.000	0.050
	0.005 0	96.404	31.599	55.997	0.023
2	0.002 5	97.564	31.000	54.084	0.028
	0.001 0	98.848	30.485	52.137	0.036
	0.005 0	90.947	33.591	64.680	0.013
5	0.002 5	93.777	32.305	60.171	0.017
	0.001 0	97.057	31.166	55.368	0.025
	0.005 0	82.360	35.843	77.731	0.008
10	0.002 5	87.375	33.886	69.903	0.010
	0.001 0	93.932	32.160	60.776	0.016

表 2 高频衰减分量 n 取 5 的计算结果

Table 2 The calculating results at $n = 5$

G_m	T_2/ms	I_m	$\varphi_i/(\text{°})$	C_i	τ_i
0	—	100.000	30.000	50.000	0.050
	0.005	99.220	29.927	50.192	0.044
2	0.002 5	99.475	29.992	50.159	0.046
	0.001	99.437	30.129	50.636	0.043
	0.005	98.028	29.811	50.501	0.037
5	0.002 5	98.671	29.979	50.415	0.040
	0.001	98.574	30.320	51.609	0.036
	0.005	95.979	29.597	51.075	0.029
10	0.002 5	97.283	29.957	50.897	0.034
	0.001	97.076	30.624	53.280	0.028

表 3 高频衰减分量 n 取 10 的计算结果Table 3 The calculating results at $n=10$

G_m	T_z/ms	I_m	$\varphi_i/(^\circ)$	C_i	τ_i
0	—	100.000	30.000	50.000	0.050
	0.005 0	100.962	29.605	48.190	0.077
	0.002 5	100.641	29.682	48.632	0.067
2	0.001 0	100.343	29.805	49.177	0.058
	0.005 0	102.365	28.977	45.480	0.419
	0.002 5	101.580	29.187	46.589	0.135
5	0.001 0	100.853	29.506	47.942	0.079
	0.005 0	—	—	—	—
	0.002 5	—	—	—	—
10	0.001 0	101.686	28.992	45.888	0.187

由分析计算结果可看出:若暂态高频衰减分量为零,在数据窗取 10 ms 的情况下,文中方法可精确计算工频稳态分量的幅值和初相角;随着暂态高频衰减分量幅值的增大,工频稳态分量幅值和初相角的计算精度逐渐变差,甚至变得无法收敛;工频稳态分量幅值和初相角的计算精度与暂态高频衰减分量的衰减快慢相关,衰减愈快,计算精度愈高;暂态高频衰减分量的频率高低也对工频稳态分量幅值和初相角的计算精度产生影响,频率愈高,计算精度愈差。

由于通常情况下,配电网暂态高频衰减分量很小且衰减很快,因此,文中方法是一种针对实际配网运行条件的实用方法。文中方法已在配网用户侧保护得到应用^[16]。其应用通过求取电网侧电压工频分量的变化,快速判断电网侧的故障。

4 结 论

考虑到配电网暂态高频衰减分量小、衰减快的特点,文中方法采用配电网故障后的稳态工频分量和直流衰减分量组合建模,减少了待求参数个数、缩短采样数据长度。结合改进的带约束的粒子群算法寻找初值,提高了算法的整体收敛性,防止算法陷入局部最优。通过模拟退火引入约束,使所求参数符合工程实际,具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 牛秀龄. 基于 FRFT 的电能质量扰动滤波算法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
NIU Xiuling. The research of algorithm of power quality disturbance filtering based on FRFT[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [2] Moreno R, Visairo N, Núñez C, et al. A novel algorithm for voltage transient detection and isolation for power quality monitoring[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 114(3):110-117.
- [3] 牟龙华, 金敏. 微机保护傅里叶算法分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 91-93.
MU Longhua, JIN Min. Analysis of fourier algorithm in microcomputer-based protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 91-93. (in Chinese)

- [4] Duan X Z, Su S, Mei N. Transmitting electric power system dynamics in SCADA using polynomial fitting[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 52(4): 937-943.
- [5] 原波, 白征东, 付春浩. 一种基于多项式拟合法的新的单频周跳探测方法[J]. 工程勘察, 2011, 12: 63-66.
YUAN Bo, BAI Zhengdong, FU Chunhao. A new method for cycle-slip determination in single-frequency phase observation based on polynomial fitting method [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 12: 63-66. (in Chinese)
- [6] 李春红. 多项式拟合方法在周跳探测中的应用改进[J]. 科技创业, 2013, 26(5):190-192.
LI Chunhong. Polynomial fitting method improved cycle slip detection[J]. Pioneering with Science&Technology, 2013, 26(5):190-192. (in Chinese)
- [7] 陈晶腾, 林韩, 蔡金锭, 等.改进的 Prony 算法在电力系统暂态信号分析中的应用[J].电力与电工,2013,33(3): 5-8.
CHEN Jingteng, LIN Han, CAI Jinding, et al. Application of improved prony algorithm on analysis of transient signal on power system[J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2013,33(3): 5-8. (in Chinese)
- [8] 张宇波, 陈继瑞, 任慧. 改进的 Prony 算法在频谱估计中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2011,38(2): 187-189.
ZHANG Yubo, CHEN Jirui, REN Hui. Application of improved Prony algorithm in spectrum estimation [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(2): 187-189.(in Chinese)
- [9] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版.北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Shengshi. Principle and technology of high voltage power network relay protection[M]. 3rd. Beijing: China Electric Power Press, 2005. (in Chinese)
- [10] Chen J, Liu Y, Wang X. Recursive least squares algorithm for nonlinear dual-rate systems using missing-output estimation model[J]. Circuits Systems & Signal Processing, 2016, 36(4):1406-1425.
- [11] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WANG Dingwei, WANG Junwei, WANG Hongfeng, et al. Intelligent optimization method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [12] Manickavelu D, Vaidyanathan R U. Particle swarm optimization (PSO)-based node and link lifetime prediction algorithm for route recovery in MANET[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2014, 2014(1):107.
- [13] 甘敏, 彭辉, 王勇. 多目标优化与自适应惩罚的混合约束优化进化算法[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 378-382.
GAN Ming, PENG Hui, WANG Yong. Multiobjective optimization and adaptive penalty function based constrained optimization evolutionary algorithm[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 378-382.(in Chinese)
- [14] Krohling R A, Coelho L S. Coevolutionary particle swarm optimization using Gaussian distribution for solving constrained optimization problems[J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2006, 36(6): 1407-1416.
- [15] Zhi J Z, Yu G B, Deng S J, et al. Modeling and Simulation about TSP Based on Simulated Annealing Algorithm[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 2617(380):1109-1112.
- [16] 曾强, 罗建, 高明振, 等. 一种快速识别电网故障的方法: CN 102944809 B[P].2015.
ZENG Qiang, LUO Jian, GAO Mingzheng, et al. A quick way to identify grid faults: CN 102944809 B[P]. 2015.(in Chinese)