

基于相空间重构与原子分解的复杂电压 暂降特征参数辨识

谢小英¹, 牛益国¹, 于惠慧¹, 董海艳², 崔志强³, 王 珺²

(1. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000; 2. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省
重点实验室, 河北 秦皇岛 066004; 3. 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000)

摘 要:电压暂降特征参数辨识是评估电压暂降严重性及分析其对设备影响的前提。提出一种相空间重构与原子分解相结合的复杂电压暂降特征参数辨识方法。首先对电压暂降扰动序列进行相空间重构, 依据暂降信号的相轨迹特征将扰动波形分割成段, 并确定扰动区段的起止时刻, 然后构建正弦量原子库, 充分利用波形分段结果, 按特定方式实现原子参数的有序匹配, 获取各段电压暂降波形的特征参数, 从而减少原子匹配参数的数量和搜索范围, 降低原子分解算法的计算量, 保证算法的精度。算例结果表明, 该方法能够准确提取电压暂降信号的特征参数, 得到描述整个电压暂降过程的参量化解析表示。

关 键 词:电压暂降; 相空间重构; 波形分段; 原子分解; 特征提取; 参数辨识

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.014 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2020)05-0103-08

Voltage sag characteristic parameter identification method based on phase space reconstruction and atomic decomposition

XIE Xiaoying¹, NIU Yiguo¹, YU Huihui¹, DONG Haiyan², CUI Zhiqiang³, WANG Jun²

(1. Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co. Ltd., Qinhuangdao 066000, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Electronics Energy Saving and Transmission Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Instrumentation Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Chengde 067000, China)

Abstract: The identification of characteristic parameters of voltage sag is a prerequisite for evaluating the severity of voltage sag and analyzing its impact on equipment. In this paper, a complex voltage sags parameter identification method is proposed, which combines phase space reconstruction and atomic decomposition. Firstly, it reconstructs the phase space of the voltage sag disturbance sequence, divides the disturbance waveform into segments according to the phase trajectory characteristics of the sag signal, and determines the start and end time of the disturbance section. Then the method builds a sine-weight atom library, makes full use of the waveform segmentation results, realizes the orderly matching of atomic parameters in a specific way, and obtains the characteristic parameters of each segment of the voltage sag waveform. Thereby the number of atomic matching parameters and the search range is reduced as well

收稿日期:2017-12-15; 修回日期:2018-12-28

基金项目:国家自然科学基金(51807172)

通信作者:崔志强(1989-),男,硕士,讲师,主要从事电能质量分析研究;E-mail:czq187135@163.com

as the computational load of the atomic decomposition algorithm to ensure the accuracy of the algorithm. The results of the calculation example show that the method can accurately extract the characteristic parameters of the voltage sag signal.

Key words: voltage sag; phase reconstruction; waveform segmentation; atomic decomposition; feature extraction; parameter identification

随着非线性负荷的增加和电力电子设备的广泛使用,电能质量问题日益突出。目前中国已基本建成省级电网公司的网络化电能质量监测系统,可以对监测终端捕获的电能质量数据进行深度分析,获得更多有价值的信息。电压暂降是影响较大的电能质量扰动^[1-2],引起电压暂降主要有短路故障、感应电动机启动和变压器励磁涌流等原因。全面、准确辨识电压暂降特征参数,对描述暂降特性、评估暂降严重性以及制定改善措施等具有重要意义^[3-4]。

文献[5]提出三维空间向量法的电压幅值检测方法,可以得到基波和暂降信号的幅值大小;文献[6]应用小波变换将暂降信号分为细节和近似部分,在细节部分实现暂降的定位,在近似部分通过能量算子计算得到暂降幅值;文献[7]通过对信号主频点进行不完全S变换,得到暂降信号的幅值和相位跳变等特征信息;文献[8]提出基于 Hilbert-Huang 变换和小波包能量谱的分析方法,可以得到不同暂降信号突变点、幅值、谐波等特征信息;文献[9]利用小波变换得到不同暂降信号的特征指标,并通过主成分分析法对特征指标进行约简。上述方法主要通过不同的变换算法提取相应的特征量,虽然能够得到不同类型暂降信号在特征参数上的差异,但并不能得到暂降波形的具体特征参量及其表达式。原子分解法^[10]根据信号的特性自适应选择展开函数,能极大地提高信号表示的简洁性和灵活性。文献[11-12]通过构造完备原子库,运用匹配追踪(matching pursuit, MP)算法提取电能质量扰动特征量,得到扰动信号的解析化表示。

电压暂降可能伴随多个过程,如故障电阻的变化、故障类型的变迁、故障切除后电动机的重启等等,因而暂降波形呈现区段化。不同起止时刻瞬态工频暂降成分直接采用常规原子算法分析时,匹配出的特征参数并不是真正的暂降,需要进一步分析处理。该文引入相空间重构理论对暂降波形进行分

段处理,再应用原子算法对分段信号按特定顺序有针对性地提取特征量,从而提高了参数匹配过程的准确性和稳定性,并减小MP算法的搜索次数。

1 基于相空间重构的波形分段

1.1 相空间重构基本原理

相空间重构理论认为动力学系统中任一分量的信息都隐藏在其他分量的发展变化中,可以通过分析某一分量的时间序列数据将系统原来的变化规律提取和恢复出来^[13-14]。相空间重构通常选择系统测得的一维时间序列 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$, 通过引入时间延迟参数 τ 和嵌入维数 m , 构造一个 m 维的相空间:

$$X_i = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}] \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, L, L = N - (m-1)$ 。

相空间重构的关键是 τ 和 m 2 个重构参数的选取。该文相空间重构的目的是根据相轨迹对暂降波形进行分段,只需在二维平面内构造相轨迹即可,因此取 $m = 2$ 。最佳时间延迟参数 τ 采用互信息函数法^[15]进行确定。设有 2 个离散时间变量 S 和 Q , 其状态数分别为 i 和 j , 则二者的互信息定义为

$$I(Q, S) = \sum_i \sum_j P_{sq}(s_i, q_j) \cdot \log_2 \left[\frac{P_{sq}(s_i, q_j)}{P_s(s_i)P_q(q_j)} \right] \quad (2)$$

式中 $P_s(s_i)$ 和 $P_q(q_j)$ 分别表示 S 和 Q 中事件 s_i 和 q_j 的概率; $P_{sq}(s_i, q_j)$ 为事件 s_i 和 q_j 联合分布概率。

令 s 代表暂降扰动信号时间序列 $x(t)$, q 代表其对应的延迟时间序列 $x(t + \tau)$, 则互信息函数 $I(Q, S)$ 与时间延迟参数 τ 有关, 记为 $I(\tau)$ 。 $I(\tau)$ 的大小表示在已知 S 的条件下 Q 的确定性大小。第一次达到最小时滞时选取 $I(\tau)$ 第一个极小值点所对应的延迟时间为最佳时间延迟。设信号的采样

频率为 3 200 Hz,对工频采样序列用互信息函数法计算其时间延迟的 $I(\tau)-\tau$ 关系曲线如图 1 所示。由图 1 可见,在 $\tau=16$ 点附近时 $I(\tau)$ 第一次达到极小值,由此可取最佳时间延迟参数 $\tau=16$ 。

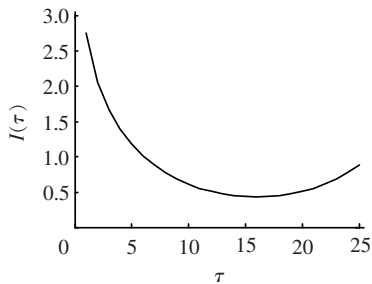


图 1 基波信号的 $I(\tau)-\tau$ 关系曲线

Figure 1 $I(\tau)-\tau$ relationship curve of fundamental wave

1.2 相轨迹特征分析

在 $m=2, \tau=16$ 的条件下对正常基波信号采样时间序列 $x(n)=A \cos(\omega n \Delta t + \varphi)$ 进行二维相空间重构,得到相轨迹关系:

$$X_n = \begin{bmatrix} A \cos(\omega n \Delta t + \varphi) & A \cos(\omega(n + \tau) \Delta t + \varphi) \\ x_n & x_{n+\tau} \\ x & y \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可得正常电压信号的相轨迹在 $x-y$ 平面内为一个圆,即 $x^2 + y^2 = A^2$,而电压暂降信号的相轨迹则会偏离正常信号的相轨迹。因此,构建 $x-y$ 平面各相点到原点的欧氏距离来体现不同暂降波形的相轨迹特征:

$$E(k) = \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \quad (4)$$

式中 x_k, y_k 分别为第 k 个相点的 2 个坐标分量。稳定的短路故障电压暂降在扰动持续时间内幅值基本不变,其相轨迹距离函数值较恒定但小于正常信号的距离函数,如图 2 所示。故障类型变化类电压暂降,其距离函数值是变化的。感应电动机启动类电压暂降是逐渐恢复的,其相轨迹距离函数值在暂降期间逐渐升高。变压器励磁类电压暂降是缓慢恢复且伴随有大量谐波,其相轨迹距离函数值是振荡变化的。对于感应电动机重启类电压暂降,电压也是缓慢恢复的,距离函数值逐渐升高。因此可根据相轨迹距离函数判断暂降信号的区段变化情况。

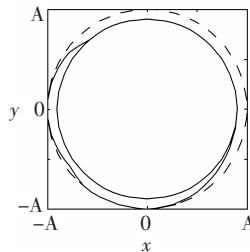


图 2 稳定的短路故障电压暂降相轨迹

Figure 2 Phase trajectory of stable short-circuit fault voltage sag

1.3 波形分段方法

在 $m=2, \tau=16$ 的条件下对采样时间序列进行相空间重构,波形分段方法如下:

1)对记录的电能质量采样时间序列进行相空间重构,得到 $x-y$ 平面的相轨迹。计算 $x-y$ 平面相轨迹中各相点的 $E(k)$ 值。

2)相关标准规定事件波形记录至少包含扰动开始前 2 个周波和扰动结束后 2 个周波的数据^[16],故应先将正常波形分离。根据电压暂降定义,筛选出相点的欧氏距离 $E(k) \geq 0.9U_m$ 的相点,则剩余相点为暂降波形区域,记为集合 C, U_m 为额定电压幅值。

3)对集合 C 中各相点的欧氏距离 $E(k)$ 判断其变化规律,分为几种情况: $E(k)$ 值基本不变; $E(k)$ 波动; $E(k)$ 渐变; $E(k)$ 波动渐变; $E(k)$ 跳变。变化规律相同的暂降信号对应同一个段,变化规律变迁的点为分段点。

4)每个扰动区段的 x 轴坐标向后延迟 2τ ,得到各扰动区段两端的采样点 N_s 和 N_e ,再除以采样频率 f_s ,得到每个扰动区段的起止时间 t_s 和 t_e 。

2 基于原子分解的特征参量提取

2.1 匹配追踪算法

原子分解起源于 Mallat 和 Zhang 提出的信号在过完备原子库上分解的思想^[17]。原子库必须是过完备和高度冗余的,以保证任意信号都可以按照自身特点自适应地选择一组数量远小于空间维数的最佳原子来展开。

原子分解通常采用匹配追踪(MP)算法,每次按照索引方式遍历整个原子库,迭代寻找与待分析

信号最匹配的原子。设 f 为待分析信号, D 为过完备原子库, g_γ 为 D 中的原子。在第 m 次迭代过程中, MP 算法搜索到与当前残余信号 R_f^{m-1} 具有最大内积的原子 g_{γ_m} , 将 g_{γ_m} 从当前残余信号中提取出来, 形成新的残余信号, 迭代关系为

$$R_f^m = R_f^{m-1} - (R_f^{m-1}, g_{\gamma_m}) g_{\gamma_m} \quad (5)$$

经过 n 次迭代后, 忽略残差信号 R_f^m , 原始信号 f 可以近似表示为 n 个原子的线性展开:

$$f \approx \sum_{m=1}^n (R_f^{m-1}, g_{\gamma_m}) g_{\gamma_m} \quad (6)$$

2.2 衰减正弦量原子

该文应用原子分解分析电压暂降信号, 信号基本特征为正弦量。根据待分析信号的特点, 该文采用衰减正弦量原子构建相关原子库, 其表示形式为

$$g(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi) e^{-\rho(t-t_s)} [u(t - t_s) - u(t - t_e)] \quad (7)$$

式中 f 为频率, φ 为相位, ρ 为衰减系数, t_s 和 t_e 分别为衰减正弦量的起始和终止时刻, 将这些参数用参数组 γ 表示, 即 $\gamma = [f, \varphi, \rho, t_s, t_e]$; A 是衰减正弦量的幅值, $u(t)$ 是单位阶跃函数。

为得到最佳匹配原子, 需要对参数组 τ 进行离散化, 即 $\gamma = [2\pi f_s \omega / N, 2\pi s / N, m f_s / N, n_s / f_s, n_e / f_s]$, 其中 $\omega \in [1, N]$, $s \in [0, N-1]$, $m \in [-N, N]$, $0 \leq n_s < n_e \leq N-1$, N 为信号采样点数, f_s 为采样频率。

2.3 特征参数的有序提取策略

通过相空间重构对整个电压暂降扰动波形分段后, 每个区段两端的分断点分别为一个电压暂降扰动形式的起始时刻 t_s 和终止时刻 t_e , 不需要通过原子搜索起始和终止时刻, 因此参数组的搜索空间由五维变为三维, 从而降低了原子库的规模, 相应计算量也大大减小。其他参数的提取方式如下。

1) 基波特征参数提取。

在对信号进行分段的基础上, 用分段得到的扰动前 2 周波数据提取基波频率。该段数据不含扰动, 仅有基波成分, 只需按 MP 算法搜索频率 f 和相位 φ 2 个参数即可。其原子表示形式由式(7)简化为

$$g(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi) e^{-\rho t} \quad (8)$$

相位搜索可采用 2.2 节的离散化形式; 频率搜

索范围可限定在 49.5~50.5 Hz 内, 搜索步长取 0.01 Hz, 这样的搜索范围对基波频率来说是过完备的。经 MP 搜索得到的频率记为 f_1 。

2) 电压暂降特征参数的提取。

电压暂降扰动主要是基频成分, 因此首先对各分段电压暂降扰动基频成分进行提取, 以提高分析的准确性。电压暂降扰动基频成分与扰动前信号区段的频率相同, 所以在提取电压暂降扰动基频成分时不必对频率进行搜索, 直接搜索相位和衰减系数即可。电压暂降扰动基频成分的原子表示形式为

$$g(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \varphi) e^{-\rho(t-t_s)} \quad (9)$$

式中 f_1 为基频频率, 由上述基波特征参数取得。

3) 其他分量特征参数的提取。

各区段的电压暂降扰动经过基频成分提取后, 剩余扰动的能量较小, 但扰动类型可能有多种, 此时用式(7)进行特征参数的提取。由于剩余扰动能量较小, 提取的迭代过程会很快收敛。提取迭代结束条件的设置可参考文献[11]。

常规原子分解算法通过遍历原子参数来匹配提取合成信号中能量最大的成分, 提取过程无序且具有一定的盲目性。在多阶段电压暂降信号中含有多种工频瞬态信号成分, 按常规原子分解算法进行无序提取, 不同起止时刻出现的瞬态工频成分在提取特征参数时相互影响, 干扰匹配追踪计算过程, 分解效率低且精度和稳定性难以保障。该文对电压暂降扰动进行分段, 再依次提取基波分量和电压暂降扰动基频成分, 可使暂降信号的主要成分得以有序分解, 分析精度和稳定性更好, 运算量大大降低。

2.4 运算量分析

若扰动波形数据不加分段处理直接应用衰减正弦量原子提取电压暂降扰动, 根据 2.2 节参数离散化形式, 频率、相位各生成 N 个参数, 衰减系数生成 $2N+1$ 个参数, 起始和终止时刻共生成 $[1+(N-1) \times N]/2$ 个参数。MP 算法遍历整个原子库进行搜索, 完成一次匹配追踪需要 $N \times N \times (2N+1) \times (N \times N)/2 = N^5 + N^4/2$ 次内积计算。

若利用相空间进行分段并以 2.3 节的方式按次序分析扰动信号, 则运算量大大减少。提取基波分量时, 频率生成 $(50.5 - 49.5)/0.01 + 1$ 个参数, 相

位生成 N 个参数,一次匹配追踪可在 $101 \times N$ 次内积计算完成。提取电压暂降扰动基频成分时,相位生成 N 个参数,衰减系数生成 $2N + 1$ 个参数,进行一次匹配追踪需要 $2N^2 + N$ 次内积计算。

3 算例仿真与分析

3.1 仿真模型

在 MATLAB/Simulink 仿真平台下搭建配电网仿真模型如图 3 所示。图中 F 为故障点, M 为测量点。采样频率为 3 200 Hz, 采样 1 s 的数据, 为验证该文方法的抗噪性, 在采样数据中添加 40 dB 的高斯白噪声。设置不同类型的电压暂降进行仿真验证。

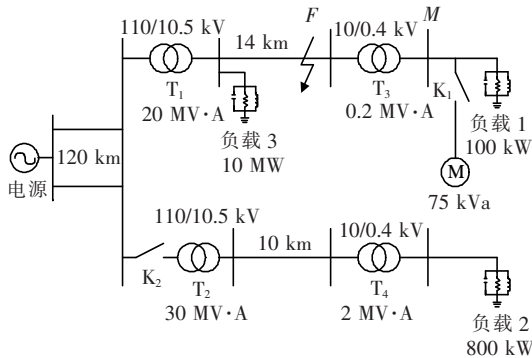


图 3 电压暂降仿真模型

Figure 3 The simulation model of voltage sag

3.2 仿真分析

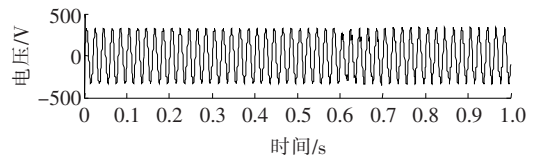
1) 变压器励磁引起的电压暂降仿真。

设置参数: 变压器 T_2 投入时刻为 0.6 s, 从测量点 M 测得的三相电压波形如图 4 所示。

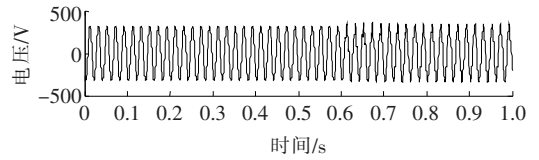
以 C 相为例, 根据 1.3 节波形分段方法, 得到 C 相不同采样点的 $E(k)$ 值及波形分段结果, 如图 5 所示。

从图 5 可知, C 相波形分为 2 个区段, 其中第 1 区段为扰动前区段, 第 2 区段为扰动区段, 2 个区段的分断点为 1 922 点。

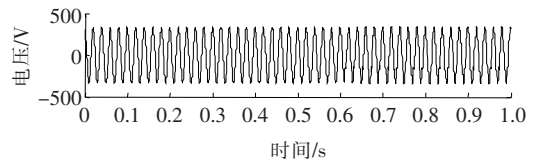
采用 2.3 节方法对 C 相波形第 1 区段提取基波参数, 然后得到基波分量, 去除基波分量后对第 2 区段依次提取电压暂降扰动基频成分和其他分量。变压器励磁引起的电压暂降 A 相和 B 相分析与 C 相类似, 所提取的三相特征参数如表 1 所示。



(a) A 相电压



(b) B 相电压



(c) C 相电压

图 4 变压器励磁引起的电压暂降三相电压波形

Figure 4 Three-phase voltage waveform of voltage sag caused by transformer excitation

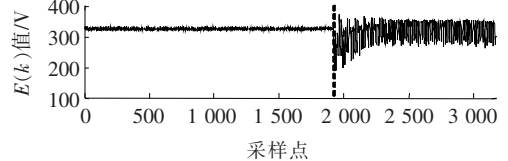


图 5 C 相波形距离函数值及分段结果

Figure 5 The values of distance function and segmentation of C-phase

表 1 变压器励磁引起的电压暂降三相特征参数

Table 1 Three-phase characteristic parameters of voltage sag caused by transformer excitation

信号	U_m/V	f/Hz	φ/rad	ρ	t_s/s	t_e/s
A 相基波	325.399 4	50	4.564 8	—	—	—
A 相暂降	39.032 6	50	1.057 8	5	0.600 6	0.999 7
A 相谐波	22.506 3	250	3.316 6	—	0.600 6	0.999 7
B 相基波	325.398 8	50	2.468 8	—	—	—
B 相暂降	26.395 4	50	5.098 6	3	0.600 6	0.999 7
B 相谐波	26.348 0	250	5.079 0	—	0.600 6	0.999 7
C 相基波	325.400 5	50	0.376 8	—	—	—
C 相暂降	22.426 7	50	3.259 7	2	0.600 6	0.999 7
C 相谐波	28.316 5	250	1.556 3	—	0.600 6	0.999 7

从表 1 可知, 每相不仅有缓慢变化的电压暂降, 而且有谐波分量(5 次)。所提取的各扰动分量符合变压器励磁引起的电压暂降在每个阶段的特征。

2) 线路故障引起的电压暂降仿真。

设置参数:故障点 F 距变压器 T_1 为 6 km, A 相短路接地故障的时刻为 0.4 s, B 相击穿的时刻为 0.6 s, 故障切除时刻为 0.7 s, 接地电阻为 0.01Ω , 从测量点 M 得到的三相电压如图 6 所示。

以 B 相为例, 根据 1.3 节波形分段方法, 得到 B 相不同采样点的 $E(k)$ 值及波形分段结果, 如图 7 所示。

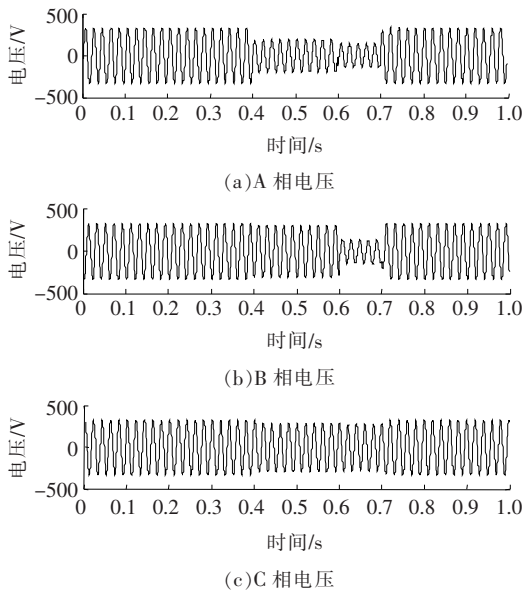


图 6 线路故障引起的电压暂降三相电压波形
Figure 6 Three-phase voltage waveform of voltage sag caused by line fault

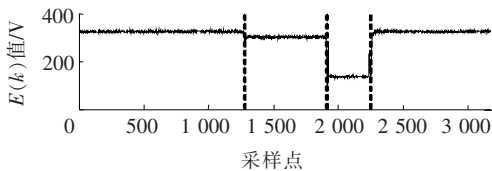


图 7 B 相波形形距离函数值及分段结果
Figure 7 The values of distance function and segmentation of B-phase

从图 7 可知, B 相波形分为 4 个区段, 其中第 1 区段为扰动前区段, 第 2 区段为 A 相接地到 B 相击穿区段, 第 3 区段为 B 相击穿到故障切除区段, 第 4 区段为扰动后区段, 各个区段的分断点为 1 283 点、1 927 点和 2 263 点。

采用 2.3 节方法对 B 相波形第 1 区段提取基波参数, 然后得到基波分量, 去除基波分量后对第 2、3 区段分别依次提取电压暂降扰动基频成分和其他分量。线路故障引起的电压暂降 A 相和 C 相分析与 B 相类似, 所提取的三相特征参数如表 2 所示。

表 2 故障类型变化引起的电压暂降三相特征参数

Table 2 Three-phase characteristic parameters of voltage sag caused by fault translation

信号	U_m/V	f/Hz	φ/rad	t_s/s	t_e/s
A 相基波	325.400 2	50	4.562 8	—	—
A 相暂降 1	136.115 4	50	1.350 2	0.400 9	0.601 9
A 相暂降 2	276.030 2	50	1.860 5	0.601 9	0.701 6
B 相基波	325.399 7	50	2.470 8	—	—
B 相暂降 1	68.198 7	50	4.500 1	0.400 9	0.601 9
B 相暂降 2	282.510 1	50	5.177 1	0.601 9	0.701 6
C 相基波	325.400 3	50	0.374 8	—	—
C 相暂降 1	68.291 1	50	4.480 4	0.400 9	0.601 9
C 相暂降 2	49.792 7	50	3.395 1	0.601 9	0.701 6

从表 2 可知, 每相有 2 个缓慢变化的电压暂降。在线路故障引起的电压暂降中, 其它扰动能量很小, 可忽略不计, 因此不能有效提取。所提取的各扰动分量符合线路故障引起的电压暂降在每个阶段的特征。

3) 感应电动机重启引起的电压暂降仿真。

设置参数: 故障点 F 距变压器 T_1 为 6 km, 三相短路故障的起始时刻为 0.3 s, 故障切除时刻为 0.6 s, 然后感应电动机开始重新启动, 接地电阻为 2Ω , 从测量点 M 得到三相电压波形如图 8 所示。

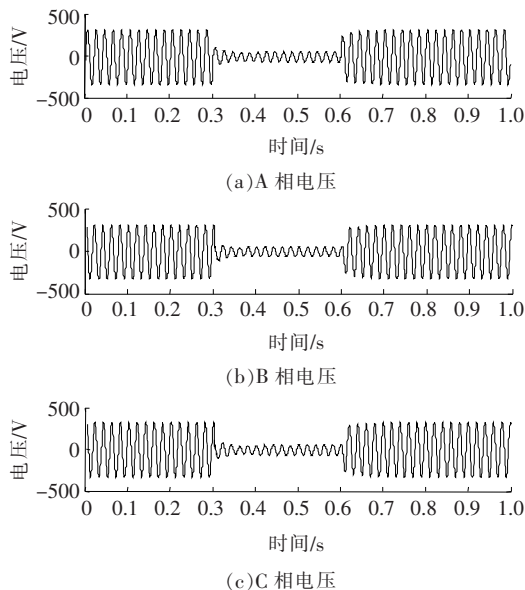


图 8 感应电动机重启引起的电压暂降三相电压波形
Figure 8 Three-phase voltage waveform of voltage sag caused by induction motor restarting

以 A 相为例,根据 1.3 节波形分段方法,得到 A 相不同采样点的 $E(k)$ 值及波形分段结果,如图 9 所示。

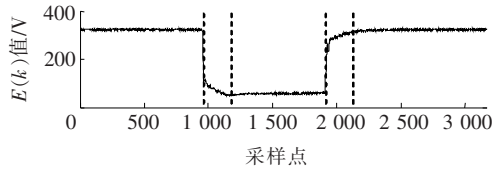


图 9 A 相波形距离函数值及分段结果

Figure 9 The values of distance function and segmentation of A-phase

从图 9 可知,A 相波形分为 5 个区段,其中第 1 区段为扰动前区段,第 2 区段为三相接地故障暂态区段,第 3 区段为三相接地故障稳态区段,第 4 区段为感应电动机重启区段,第 5 区段为扰动后区段,各个区段的分断点为 967 点、1 225 点、1 927 点和 2 174 点。

采用 2.3 节方法对 A 相波形第 1 区段提取基波参数,然后得到基波分量,去除基波分量后对第 2、3、4 区段分别依次提取电压暂降扰动基频成分和其他分量。感应电动机重启引起的电压暂降 B 相和 C 相分析与 A 相类似,所提取的三相特征参数如表 3 所示。

表 3 感应电机重启引起的电压暂降三相特征参数

Table 3 Three-phase characteristic parameters of voltage sag caused by induction motor restarting

信号	U_m/V	f/Hz	φ/rad	ρ	t_s/s	t_e/s
A 相基波	322.750 0	50	4.568 7	—	—	—
A 相暂降 1	233.434 6	50	1.542 5	-3	0.302 2	0.382 8
A 相暂降 2	266.452 8	50	1.501 3	—	0.382 8	0.602 2
A 相暂降 3	44.700 4	50	1.077 4	25	0.602 2	0.679 4
B 相基波	322.747 9	50	2.476 7	—	—	—
B 相暂降 1	244.066 2	50	5.728 5	-2	0.302 2	0.382 8
B 相暂降 2	266.644 0	50	5.689 3	—	0.382 8	0.602 2
B 相暂降 3	47.899 9	50	5.234 0	27	0.602 2	0.679 4
C 相基波	322.746 2	50	0.382 7	—	—	—
C 相暂降 1	243.769 1	50	3.632 6	-2	0.302 2	0.382 8
C 相暂降 2	266.686 8	50	3.595 3	—	0.382 8	0.602 2
C 相暂降 3	43.273 0	50	3.124 3	24	0.602 2	0.679 4

从表 3 中可知,每相有 3 个电压暂降,其中三相接地暂态过程为缓慢变化的电压暂降,三相接地稳态过程为稳定的电压暂降,感应电动机重启为缓慢

变化的电压暂降。除这 3 个电压暂降外其它扰动能量很小,不能有效提取。所提取的各扰动分量符合感应电动机重启引起的电压暂降在每个阶段的特征。

4 结语

1)采用相空间重构理论建立基波及电压暂降信号的相轨迹,根据相轨迹的不同将电压暂降扰动波形进行分段,有利于提高原子分解算法的效率和精度。

2)在对扰动信号分段的基础上,针对电压暂降信号的特点采取分步有序特征提取方法,降低了原子库的维数和参数搜索范围,大大削减了匹配追踪算法的运算量。

3)仿真结果表明,该文方法可以准确地得到不同类型电压暂降扰动参数,可以参量化解析地表示整个电压暂降过程,特征参数物理意义直观清晰。

参考文献:

- [1] 康军胜,刘桂英,刘思贤,等.基于动态预测和形态学滤波的电压暂降检测研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):96-101.
KANG Junsheng, LIU Guiying, LIU Sixian, et al. Research on voltage sags detection based on dynamic prediction and morphological filtering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 96-101.
- [2] 何娟,刘晓波,袁旭峰,等.含微网的配电网电压暂降检测算法仿真[J].智能电力,2019,47(2):15-21+74.
HE Juan, LIU Xiaobo, YUAN Xufeng, et al. Simulation of voltage sag detection algorithms for distribution network with microgrid[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 15-21+74.
- [3] 冯澎湃,肖楚鹏,郭松,等.考虑含多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):36-44.
FENG Pengpai, XIAO Chupeng, GUO Song, et al. Voltage sag vulnerable area identification of a distribution grid with multiple sensitive loads[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 36-44.
- [4] 裴星宇,焦夏男,杨锐雄,等.变压器电压暂降的传递特

- 性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(1): 90-95.
- PEI Xingyu, JIAO Xianan, YANG Ruixiong, et al. Analysis on voltage sag transfer characteristics of transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 90-95.
- [5] 卢远宏, 郑琼林, 马亮. 基于三维空间法向量的三相电压幅值检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 155-164.
- LU Yuanhong, ZHENG Qionglin, MA Liang. Three-phase voltage amplitude detection based on 3D space normal vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 155-164.
- [6] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.
- LU Boyong, HUANG Wenqing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.
- [7] 肖助力, 龚任喜, 陈双. 一种改进不完全S变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 62-68.
- XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.
- [8] 祁博, 邹金慧, 范玉刚, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换和小波包能量谱的电压暂降源识别[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 112-117.
- QI Bo, ZOU Jinhui, FAN Yugang, et al. Identification of voltage sags source based on hilbert-huang transform and wavelet packet energy spectrum[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 112-117.
- [9] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别特征的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 105-110.
- ZHAO Ying, ZHAO Chuan, YE Hua, et al. Method to reduce identification feature of different voltage sag disturbance source based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 105-110.
- [10] Lovisolio L, Da Silva E A B, Rodrigues M A M, et al. Efficient coherent adaptive representation of monitored electric signals in power systems using damped sinusoids[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3831-3846.
- [11] 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 CESS, 2011, 31(4): 51-58.
- [12] 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.
- [13] Feng X, Huang H. A fuzzy-set-based reconstructed phase space method for identification of temporal patterns time series[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(5): 601-613.
- [14] 李智勇, 吴为麟, 林震宇. 基于相空间重构和支持向量机的电能扰动分类[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 70-75.
- LI Zhiyong, WU Weilin, LIN Zhenyu. A power disturbance classification method based on phase space reconstruction and support vector machines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 70-75.
- [15] 张淑清, 贾健, 高敏, 等. 混沌时间序列重构相空间参数选取研究[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1576-1582.
- ZHANG Shuqing, JIA Jian, GAO Min, et al. Study on the parameters determination for reconstructing phase-space in chaos time series[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 1576-1582.
- [16] Q/GDW 650—2011. 电能质量监测终端技术规范[S].
- [17] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuits with time frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.