

基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法^{*}

龚辰¹ 洪典¹ 李建闽^{1,2} 黄杰¹ 唐强¹ 姚文轩²

(1. 湖南师范大学工程与设计学院 长沙 410081; 2. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘要:电压暂降是电力系统中最令用户困扰的电能质量问题,对其特征参数进行准确测量是电压暂降评估和治理的首要前提。然而,当前电压暂降检测算法存在参数检测准确度低、实时性差以及缺乏相位跳变信息等不足。为此,提出一种基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法,以实现其特征参数的快速、准确检测。该方法首先利用有效值滑窗差分算子准确获取电压暂降的起止时刻。接下来,依据暂降起止时刻对原始信号分区,并对不同分区的信号进行加窗插值快速傅里叶变换(FFT)运算。而后,对采样序列重构并进行相位校正。最后,得到电压暂降的持续时间、暂降深度和相位跳变等特征参数信息。在暂降幅值和相位同时变化、不同谐波分量、不同信噪比噪声等情况下的仿真实验结果表明,所提方法具有准确度高、实时性好和鲁棒性强等优点。实际构建硬件测试平台的测试结果满足 GB/T 30137—2013 中电压幅值误差 $\leq 0.2\%$ 、相位跳变误差 $\leq 1^\circ$ 以及暂降持续时间误差不超过一个周期的要求,验证了算法的有效性和可行性。

关键词:电压暂降;特征参数;有效值滑窗差分算子;采样序列重构;FFT

中图分类号: TM930.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Voltage sag measurement method based on RMS sliding window difference operator and sampling sequence reconstruction

Gong Chen¹ Hong Dian¹ Li Jianmin^{1,2} Huang Jie¹ Tang Qiang¹ Yao Wenxuan²

(1. College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Voltage sag is one of the most perplexing power quality problems in power system. Accurate measurement of its characteristic parameters is the primary premise of voltage sag evaluation and management. However, the current voltage sag detection algorithm has some shortcomings, such as low accuracy of parameters detection, poor real-time performance and lack of phase-angle jumps. Therefore, a new method of voltage sag measurement based on RMS sliding window difference operator and sampling sequence reconstruction is proposed in this paper to achieve fast and accurate detection of characteristic parameters. Firstly, the RMS sliding window difference operator is used to obtain the initial and end time of voltage sag. Next, the original signal is partitioned according to the initial and end time of the voltage sag, and the window interpolation FFT algorithm is performed on the signals in different sections. Then, the sampling sequence is reconstructed and the phase is corrected. Finally, characteristic parameters are calculated, such as the duration of voltage sag, depth of voltage sag and voltage phase-angle jumps. The simulation results under the conditions of simultaneous change of value and phase, different harmonic components and different SNR noise show that the proposed method has the advantages of high accuracy, excellent real-time performance and strong robustness. The test results of the actual hardware test platform meet the requirements of GB/T 30137—2013, such as relative error of voltage amplitude and absolute error of phase-angle jumps are less than 0.2% and 1°, respectively, and absolute error of duration of voltage sag is less than one cycle, which further verifies the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm.

Keywords: voltage sag; characteristic parameters; RMS sliding window difference operator; sampling sequence reconstruction; FFT

收稿日期:2024-03-29

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51907062,52177078)、湖南省自然科学基金(2021JJ40354)项目资助

0 引言

随着具有间歇性、波动性、突变性等特点的新能源大规模并网,新型电力系统的电能质量问题日趋严重^[1-2],其中因电压暂降引起的用户投诉长期占据整个电能质量问题投诉数量的80%以上。在发达国家,电压暂降已经超越谐波、过电压等电力系统扰动成为最令用户困扰的电能质量问题^[3-6]。电压暂降特征参数是判断电力系统是否安全稳定运行的重要参数,其准确检测对定位暂降源、明确暂降责任、构建暂降处罚机制、确保电力系统安全、增强国民经济效益、保障居民正常生活有着重要的现实意义^[7-9]。

暂降深度、持续时间和相位跳变是电压暂降最为重要的3个特征参数。暂降深度定义为 $\mu=U_1/U_0$,其中, U_1 为电压暂降持续期间的电压有效值, U_0 为未发生电压暂降时的电压有效值;暂降持续时间为暂降开始时刻与结束时刻的时间差值;相位跳变是指暂降发生前后的相位差值^[10]。传统电压暂降检测方法,如基波分量法、有效值法和峰值法等无法检测暂降相位的跳变,且在对持续时间的检测上存在较大误差^[11]。文献[12-16]通过S变换及其改进算法来对电压暂降信号进行分析,但该类方法的能量聚集度较差,难以实现电压暂降参数的准确提取。文献[17]提出了一种自适应 Hilbert-Huang 检测方法,改善了暂降时刻定位精度,但其在噪声影响下的检测精度会大幅下降。文献[18-19]通过dq变换及其改进算法来分析电压暂降,但该类方法需在检测前进行相位延迟,使得系统响应时间延长、实时性差。文献[20]采用小波变换来进行电压暂降检测,但其在实际应用中存在小波基选择困难、计算量大等缺陷,同时容易受到噪声的干扰^[21]。文献[22]采用加窗插值算法来分析电压暂降,但其未考虑暂降相位跳变的随机性,使其检测所得相位误差较大。

针对上述问题,本文提出了一种基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法。该方法首先利用有效值滑窗差分算子对信号进行计算,并通过检测阈值获取暂降的起止时刻。然后,根据暂降起止时刻将原始信号进行分区操作,将信号分为不同的区间。而后,针对每个区间的暂降信号进行加 Nuttall 窗插值快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)运算以得到幅值、频率和相位等参数,并利用暂降幅值和频率参数重构相应区间的零相位序列,并对重构后的序列区间再次进行加窗插值 FFT 运算来获得相位偏差。最后,得到电压暂降深度、持续时间和相位跳变等特征参数。

1 有效值滑窗差分算子检测暂降起止时刻

1.1 有效值滑窗差分算子

设电力系统某一时同时发生幅值暂降和相位跳变的电压暂降信号 $x_1(n)$ 为:

$$x_1(n) = \begin{cases} U_0 \sin(2\pi f_0 n / f_s + \varphi_0), & n < n_1, n > n_2 \\ \lambda U_0 \sin(2\pi f_0 n / f_s + \varphi_0 + \varphi), & n_1 \leq n \leq n_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n=0,1,\dots,N-1,N$ 为采样点数; f_s 为采样率; $U_0=1$ p. u. 为标称电压; f_0 为基波频率; φ_0 为初相位; λ 为暂降深度; φ 为相位跳变量; n_1 和 n_2 分别为电压暂降起止时刻对应的采样点。信号 $x_1(n)$ 的时域信号波形如图1所示。

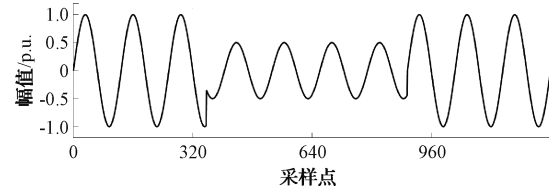


图1 电压暂降信号 $x_1(n)$ 时域波形

Fig. 1 The time domain waveform of voltage sag signal $x_1(n)$

采用窗长为 $L_w=f_s/(2f_0)$ 的窗口(包含半个周期采样数据)从采样第1个数据点开始以步进为1个采样点沿着整个采样序列 $x_1(n)$ 滑动,并同时窗口内的截断信号进行有效值运算,其中,滑窗内有效值的计算如下:

$$U_{1/2rms}(n) = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{n+L_w-1} x_1^2(n)}{L_w}} \quad (2)$$

式中: $n=0,1,\dots,N-L_w-1$ 。

对有效值滑窗后的结果进行差分计算并取绝对值可得有效值滑窗差分算子定义为:

$$U_{diff}(n) \triangleq |U_{1/2rms}(n+1) - U_{1/2rms}(n)| \quad (3)$$

1.2 暂降起止时刻检测

电压暂降信号 $x_1(n)$ 经过有效值滑窗差分算子后的运算结果具体如图2所示。由图2可知,在信号未发生电压暂降的时间区间内,有效值滑窗差分算子检测值 $U_{diff}(n)=0$ 。随后,当包含电压暂降时, $U_{diff}(n)>0$,且将满足判断条件的第1个采样点 N_{start} 作为暂降起始点。接下来,差分算子检测结果将再次保持稳定。而后,随着电压暂降幅值的恢复,差分算子检测值再次满足 $U_{diff}(n)>0$,此时将满足该条件的第1个采样点 N_{end} 作为暂降结束点。

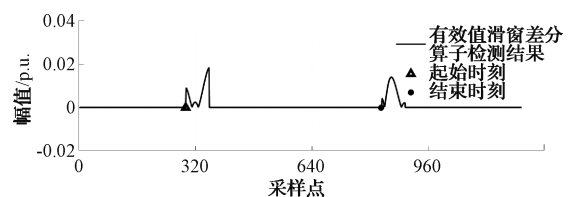


图2 有效值滑窗差分算子检测结果

Fig. 2 Detection results by RMS sliding window difference operator

实际电网信号往往存在诸多干扰因素,使得在未发生电压暂降时出现 $U_{diff}(n)>0$ 的情况。为防止暂降起止时

刻出现误判,特引入一阈值因子 α 并构建检测阈值 U_{th} 。只有当 $U_{diff}(n) > U_{th}$ 才认为当前发生了电压暂降,其中,阈值 U_{th} 定义如下:

$$U_{th} = \frac{\alpha}{N - L_w} \times \sum_{n=0}^{N-1-L_w} U_{diff}(n) \quad (4)$$

式中:阈值因子 $\alpha = 4$ 。因该值在实际测试中既能准确提取暂降起止时刻还保持良好的鲁棒性。

因有效值滑窗存在 L_w 个采样点时间延迟,即当有效值滑窗差分算子检测到暂降时,所得暂降起始采样点与真实值之间存在长度为 L_w 个采样点的偏差。故实际暂降起止采样点为:

$$N_1 = N_{start} + L_w \quad (5)$$

$$N_2 = N_{end} + L_w \quad (6)$$

式中: N_1 为实际暂降起始时刻采样点; N_2 为实际暂降结束时刻采样点。

2 采样序列重构检测暂降深度和相位跳变

根据有效值滑窗差分算子得到的暂降起止时刻 N_1 和 N_2 对原始信号进行区间划分,记第 $1 \sim N_1 - 1$ 个原始采样点为暂降前区 $a(n)$,第 $N_1 \sim N_2$ 个原始采样点为暂降区 $b(n)$,第 $N_2 + 1 \sim N$ 个原始采样点为暂降后区 $c(n)$ 。由于实际硬件通常工作在不同步采样条件下,若直接采用 FFT 计算暂降幅值和相位,所得运算结果易受频谱泄露和栅栏效应的影响而出现较大误差。为此,对暂降前区 $a(n)$ 和暂降区 $b(n)$ 进行加 Nuttall 窗插值 FFT 和采样序列重构来准确得到电压暂降深度与相位跳变。

2.1 暂降深度和相位跳变检测

4 项 3 阶 Nuttall 窗的表达式为:

$$w(n) = 0.338\ 946 - 0.481\ 972\cos(2n\pi/N) + 0.161\ 054\cos(4n\pi/N) - 0.018\ 027\cos(6n\pi/N) \quad (7)$$

式中: $n = 0, 1, \dots, N-1, N$ 为采样点数。

电网信号 $x(n)$ 被窗函数 $w(n)$ 截断后的信号表达式为:

$$r(n) = x(n)w(n) \quad (8)$$

$r(n)$ 的离散频谱为:

$$R(k\Delta f) = \sum_{i=1}^L \frac{m_i}{2j} e^{j\varphi_i} W[2\pi(k\Delta f - f_0)/f_s] \quad (9)$$

式中: k 为离散点; f_0 为基波频率; L 为 $x(n)$ 的谐波项数; $\Delta f = f_s/N$, N 为数据截断后的长度; m_i, φ_i 分别为第 i 次谐波的幅值和相角。

由式(9)可得,第 i 次谐波的初相位修正公式为:

$$\varphi_i = \arg[X(k\Delta f)] - \arg \left[W \left(\frac{2\pi(k\Delta f - f_0)}{f_s} \right) \right] \quad (10)$$

设峰值点 k_i 附近最大和次大幅值谱线分别为 k_{i1} 和 k_{i2} ,且对应的幅值分别为 $A_{i1} = |R(k_{i1}\Delta f)|$ 和 $A_{i2} = |R(k_{i2}\Delta f)|$ 。引入两个辅助参数 $\delta = (A_{i1} - A_{i2}) / (A_{i1} + A_{i2})$ 和 $\eta = k_i - k_{i1} - 0.5$,由式(9)可得:

$$\delta =$$

$$\frac{\left| W \left(\frac{2\pi(-\eta + 0.5)}{N} \right) \right| - \left| W \left(\frac{2\pi(-\eta - 0.5)}{N} \right) \right|}{\left| W \left(\frac{2\pi(-\eta + 0.5)}{N} \right) \right| + \left| W \left(\frac{2\pi(-\eta - 0.5)}{N} \right) \right|} \quad (11)$$

记式(11)的反函数为 $\eta = h^{-1}(\delta)$,取 η 在 $[-0.5, 0.5]$,按步进 0.01 取值,由式(11)得出对应的 δ 值,再对其进行反拟合,可得多项式 $\eta = h^{-1}(\delta)$ 为:

$$\eta = h^{-1}(\delta) = 2.954\ 9\delta + 0.176\ 8\delta^3 + 0.089\ 8\delta^5 + 0.056\ 8\delta^7 \quad (12)$$

信号 $x(n)$ 的第 i 次谐波的频率修正公式为:

$$f_i = k_i \Delta f = (\eta - k_{i1} + 0.5) \Delta f \quad (13)$$

修正幅值 m_i 可由 k_{i1} 和 k_{i2} 谱线进行加权平均计算得到,即:

$$m_i = \frac{A_{i1} \left| W \left(\frac{2\pi(k_{i1} - k_i)}{N} \right) \right| + A_{i2} \left| W \left(\frac{2\pi(k_{i2} - k_i)}{N} \right) \right|}{\left| W \left(\frac{2\pi(k_{i1} - k_i)}{N} \right) \right| + \left| W \left(\frac{2\pi(k_{i2} - k_i)}{N} \right) \right|} = \frac{2(A_{i1} - A_{i2})}{\left| W \left(\frac{2\pi(-\eta + 0.5)}{N} \right) \right| + \left| W \left(\frac{2\pi(-\eta - 0.5)}{N} \right) \right|} \quad (14)$$

因 N 通常较大,故式(14)可近似为:

$$m_i = N^{-1} (A_{i1} + A_{i2}) v(\eta) \quad (15)$$

其中, $v(\eta)$ 亦通过最小二乘拟合得到。

故式(15)可改写为:

$$m_i = N^{-1} (A_{i1} + A_{i2}) \left(\sum_{l=0}^L d_l \eta^l \right) \quad (16)$$

式中: L 为多项式拟合的最高阶阶次。

由于幅频响应 $W(\omega)$ 是偶对称函数的,即 $v(\eta)$ 是偶函数。本文取 $L = 7$,故有:

$$v(\eta) = 3.209\ 8 + 0.919\ 2\eta^2 + 0.141\ 9\eta^4 + 0.016\ 4\eta^6 \quad (17)$$

分别对暂降前区 $a(n)$ 、暂降区 $b(n)$ 进行式(7)~(17)运算,可得暂降前区基波幅值 m_a ,暂降前区基波频率 f_a ,暂降前区基波初相位 φ_a ,暂降区基波幅值 m_b ,暂降区基波频率 f_b 和暂降区基波初相位 φ_b ,暂降深度 $\lambda = m_b/m_a$ 。

2.2 基于采样序列重构的相位校正

加窗插值运算虽减小了栅栏效应,但仍会受其影响,使得相位计算依旧存在偏差。为进一步减小暂降相位测量误差,本文对暂降前区进行采样序列重构^[23]。

由暂降前区幅值 m_a 、频率 f_a 重构暂降前区采样新序列为:

$$a_r(n) = m_a \sin(2\pi f_a / f_s n) \quad (18)$$

式中: $n = 0, 1, \dots, N_1 - 1, N_1, N_1$ 为暂降起始时刻采样点。

对式(18)进行加 Nuttall 窗插值 FFT 计算可得初相位 φ_r 。因暂降重构区的初相位为 0,故 φ_r 即为相位偏差。 φ_a 与 φ_r 的差值即为电压暂降原信号相位校正后的初

相位。

最终,经相位校正后的相位跳变 φ 为:

$$\varphi = (\varphi_b - \varphi_s) - (\varphi_a - \varphi_r) \quad (19)$$

式中: φ_a 为暂降前区基波初相位; φ_b 为暂降区基波初相位; $\varphi_s = 2\pi f_a N_1 / f_s$ 为暂降前区的时移相位; φ_r 为相位偏差。

3 电压暂降特征参数测量算法流程

本文所提基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法步骤如下。

1) 利用有效值滑窗差分算子对被测信号 $x(n)$ 进行计算,得到检测值 $U_{diff}(n)$, 结合阈值 U_{th} 得到暂降起止时刻。

2) 根据起止时刻将 $x(n)$ 划分为暂降前区、暂降区和暂降后区,并分别对暂降前区和暂降区使用加窗插值 FFT 操作,以获得对应区间的幅值、频率和相位信息。

3) 利用暂降前区的幅值和频率重构暂降前区采样序列,对重构序列再次进行加窗插值 FFT 操作,以得到相位偏差来进行相位校正。

4) 计算电压暂降的暂降深度和相位跳变等特征参数。

基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法流程如图 3 所示。

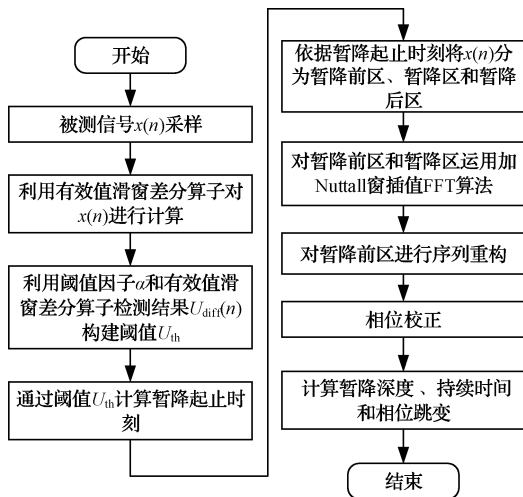


图 3 基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法流程

Fig. 3 Flow diagram of voltage sag measurement method based on RMS sliding window difference operator and sampling sequence reconstruction

为评估算法的实时性能,本文对所提算法进行时间复杂度分析。当电网信号的采样频率为 f_s 、采样点数为 N 时,有效值滑窗长度 $L_w = f_s / (2f_0)$ 为常数,有效值滑窗差分算子的计算需要进行 $NL_w + 2N - 1$ 次加法运算、 $NL_w + 1$ 次乘法运算和 N 次开方运算,其时间复杂度为 $O(N \log_2 N)$,而加 Nuttall 窗插值 FFT 算法的时间复杂度

也为 $O(N \log_2 N)$,故本文所提算法的时间复杂度为 $O(N \log_2 N)$,与 FFT 的时间复杂度相当,表明本文算法具备良好的实时性能。

4 仿真实验与实际测试

为验证所提方法的有效性和准确性,在 MATLAB R2022a 环境下,分别对同时含有幅值暂降和相位跳变、基波频率变动、不同谐波扰动和噪声等情况进行仿真实验。被测信号长度为 10 个周波,采样率为 6.4 kHz。

4.1 暂降幅值和相位同时变化

设同时含有幅值暂降和相位跳变的电压暂降信号的如下式所示:

$$x_2(t) = \begin{cases} U_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0), & t < t_1, t > t_2 \\ \lambda U_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi), & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中:电力系统供电电压 U_0 为 1 p. u.;基波频率 f_0 为 50 Hz;初相位 $\varphi_0 = 0^\circ$;暂降起始时刻 t_1 为 0.045 s;暂降结束时刻 t_2 为 0.123 s;暂降深度 $\lambda = 0.67$ p. u.;相位跳变 $\varphi = -30^\circ$ 。

采用本文算法对上述信号进行测量可得,电压暂降开始时刻为 0.044 8 s,结束时刻为 0.122 8 s;采样序列重构过程中, $\varphi_b - \varphi_s = -30.005 0^\circ$, $\varphi_a - \varphi_r = 0^\circ$;暂降深度为 0.670 0 p. u.;相位跳变为 $-30.005 0^\circ$ 。由上述结果可知,由于本文算法对暂降前区进行序列重构并进行了相位校正,有效减少了相位测量时的误差,使得相位跳变的检测结果准确度较高。

4.2 不同谐波分量的影响

现代电力系统中存在的大量谐波会改变电压暂降信号波形,从而影响到暂降特征参数的准确提取^[24]。

设存在谐波干扰的电压暂降信号 $x_3(t)$ 的表达式为:

$$x_3(t) = \begin{cases} U_0 [\sin(2\pi f_0 t) + \sum_{i=2}^H h_i \sin(2\pi i f_0 t)], & t < t_1, t > t_2 \\ \lambda U_0 [\sin(2\pi f_0 t + \varphi) + \sum_{i=2}^H h_i \sin(2\pi i f_0 t)], & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $U_0 = 1$ p. u. 为供电电压; $f_0 = 50$ Hz 为基波频率; $t_1 = 0.069$ s 为暂降起始时刻; $t_2 = 0.154$ s 为暂降结束时刻; H 为最高谐波的阶次; $h_i (i = 2, 3, \dots, H)$ 为各次谐波幅值; $\lambda = 0.4$ 为暂降深度; $\varphi = -60^\circ$ 为相位跳变。仿真中, $x_3(t)$ 包含 3、5、7 和 9 次谐波,且 $h_3 = 0.15$, $h_5 = 0.1$, $h_7 = 0.05$, $h_9 = 0.08$ 。

采用本文算法对该信号进行测量可知,电压暂降开始时刻为 0.070 8 s 且发生暂降深度为 0.400 0 p. u. 的幅值跌落;相位跳变为 $-60.034 6^\circ$;暂降结束时刻为 0.153 9 s。因本文设置了电压暂降检测阈值可防止谐波存在时对暂降起止时刻所造成的误判,有效提高了算法

的鲁棒性。

4.3 基波频率变动的影响

实际电网频率往往存在变动,进而影响到电压暂降检

测的准确性。为此,沿用式(21)的信号仿真测试。其中,信号基波频率在49.5~50.5 Hz,按照0.1 Hz的步进量变化。算法所得仿真检测结果具体如表1所示。

表1 不同基波频率影响下的电压暂降检测结果

Table 1 Voltage sag detection results under the influence of different fundamental frequencies

f_0/Hz	$\varphi_b - \varphi_s/(\circ)$	$\varphi_a - \varphi_r/(\circ)$	起始时刻	结束时刻	持续时间	暂降深度	相位跳变
			绝对误差/s	绝对误差/s	绝对误差/s	相对误差/%	绝对误差/(\circ)
49.5	-60.001 3	0.023 8	-0.002 7	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.002 8	-0.000 8	-0.025 1
49.6	-60.003 0	0.024 7	-0.002 4	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.002 5	-0.000 9	-0.027 7
49.7	-60.004 6	0.025 1	-0.002 2	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.002 3	-0.001 0	-0.029 7
49.8	-60.006 1	0.025 5	-0.002 1	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.002 2	-0.001 1	-0.031 6
49.9	-60.007 4	0.025 9	-0.001 9	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.002 0	-0.001 1	-0.033 3
50.0	-60.008 6	0.026 0	-0.001 8	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.001 9	-0.001 2	-0.034 6
50.1	-60.010 5	0.025 2	-0.001 6	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.001 7	-0.001 2	-0.035 7
50.2	-60.017 6	0.018 8	-0.001 6	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.001 7	-0.001 2	-0.036 4
50.3	-60.017 6	0.019 3	-0.001 5	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.001 6	-0.001 2	-0.036 9
50.4	-60.018 6	0.018 3	-0.001 5	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.001 6	-0.001 1	-0.036 9
50.5	-60.016 9	0.019 5	-0.001 5	$9.375 0 \times 10^{-5}$	-0.001 6	-0.001 1	-0.036 4

由表1可知,所提方法在不同基波频率条件下依旧保持较高的测量精度。电压暂降的起始时刻、结束时刻、暂降深度和相位跳变的最大绝对误差分别为-0.002 8、 $9.375 0 \times 10^{-5}$ s、-0.0012%和0.036 9°。

4.4 不同信噪比白噪声的影响

实际电网信号检测会受到采样设备和传输通道等多方面引入噪声的干扰。为此,对式(21)的电压暂降信号加入不同信噪比白噪声进行仿真测试。测试信号的信噪比在30~50 dB变化,步进量为10 dB。考虑噪声具有随

机性,将在相同信噪比条件下进行10 000次实验后取其平均值作为测试结果。本文算法在不同信噪比条件下的实验结果如表2所示,其中, t_1 为电压暂降起始时刻, t_2 为电压暂降结束时刻, t_d 为电压暂降持续时间, λ 为电压暂降深度, φ 为相位跳变。

由表2可知,尽管受到噪声影响,本文方法仍然能够准确获得电压暂降特征参数,其中,暂降深度最大相对误差为0.002 0%,暂降持续时间的最大绝对误差不超过0.002 1 s,相位跳变最大绝对误差不超过0.037 9°。

表2 噪声影响下的电压暂降特征参数测量结果

Table 2 The measurement results of voltage sag characteristic parameters under the influence of noise

电压暂降特征参数	30 dB	40 dB	50 dB
起始时刻 t_1 绝对误差/s	0.002 2	0.001 8	0.001 8
结束时刻 t_2 绝对误差/s	$-9.823 4 \times 10^{-5}$	$-9.375 0 \times 10^{-5}$	$-9.375 0 \times 10^{-5}$
持续时间 t_d 绝对误差/s	0.002 1	0.001 7	0.001 7
暂降深度 λ 相对误差/%	-0.001 6	-0.002 0	$-1.314 8 \times 10^{-4}$
相位跳变 φ 绝对误差/(\circ)	-0.035 9	-0.037 9	-0.035 2

4.5 与其他电压暂降检测算法对比

为验证本文方法的准确性和有效性,将算法所得结果分别与dq变换检测法^[20]、提升复小波变换法(LCWT)^[25]、ST、MOFDST^[26]和OST^[27]等算法的检测结果进行对比。MOFDST的采用的最优参数分别为 $a=0.020 70$ 、 $b=0.002 03$ 、 $c=0$ 和 $d=0$;OST的4个优化参数分别为 $r=0$ 、 $m=0$ 、 $p=0$ 和 $k=0.156 2$ 。仿真测试的标称电压为1 p. u.,基波频率 $f_0=50$ Hz,暂降起始时刻 $t_1=0.06$ s,暂降结束时刻 $t_2=0.12$ s,暂降深度 λ 和相位跳变 φ 分别为0.6 p. u.和-30°。上述电压暂降检测算法

测量所得结果分别如表3所示。

由表3可知,dq变换通过转换坐标系的方法获取暂降起止时刻且精度较差。LCWT算法能够精确提取暂降起止时刻以及暂降深度,然而未提及相位跳变的计算。ST算法以及其改进算法OST因其过低的相位跳变测量精度以及庞大的计算量,不适宜对暂降进行测量。MOFDST算法相较于传统ST和OST,优化了参数,在暂降测量精度上得到了极大的提升,但仍然未能克服计算量大的不足。文中所提算法以较高的精度提取了暂降起止时刻、暂降深度、相位跳变等特征参数,其中,由于采样序

表3 不同方法所得电压暂降特征量的检测结果

Table 3 The detection results of voltage sag characteristics obtained by different methods

检测方法	起始时刻/s	起始时刻绝对误差/s	结束时刻/s	结束时刻绝对误差/s	暂降深度/%	相位跳变/(°)
<i>dq</i>	0.061 7	0.001 7	0.123 6	0.003 6	—	—
LCWT	0.060 7	0.000 7	0.120 6	0.000 6	60.00	—
ST	0.055 6	-0.004 4	0.122 5	0.002 5	63.80	-24.10
OST	0.049 5	-0.010 5	0.128 8	0.008 8	71.70	-15.97
MOFDST	0.057 7	-0.002 3	0.120 4	0.000 4	60.00	-29.95
本文	0.061 6	0.001 6	0.121 1	0.001 1	60.00	-30.02

注:—为未提及

列重构操作对相位进行了校正,因此相位跳变的测量均优于上述其他算法。暂降起止时刻的提取在加入阈值操作后拥有较强的鲁棒性,同时暂降起止时刻的测量精度也优于除 LCWT 的其他算法。

4.6 实际硬件平台测试

为进一步验证本文算法对实际电压暂降参数检测的准确性和可行性,构建了实际硬件测试平台。整个硬件测试平台的结构如图4所示,平台基于TI公司的双极性18位、8通道同步采样的数模转换器(analog to digital converter, ADC)ADS8598H和Xilinx公司的可编程式片上系统 ZYNQ-7000 所构成。

在实际测试过程中,任意波形发生器 AFG1602 用于产生实际电压暂降信号,其输出的暂降信号经过信号调理电路后送入模数转换器 ADS8598H 进行数据采集。采集后的数据通过串口发送给 ZYNQ-7000 进行暂降参数的分

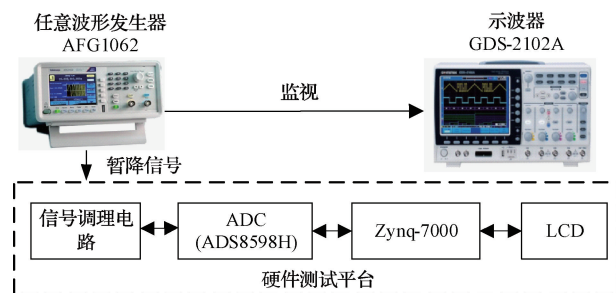


图4 实际硬件测试平台

Fig. 4 The actual hardware test platform

析与测量。最后的暂降测量结果通过液晶显示屏(liquid crystal display, LCD)呈现。示波器 GDS-2102A 用于对函数发生器 AFG1602 产生的电压暂降信号进行实时监控。实际硬件测试平台的测试结果如表4所示。

表4 实际硬件测试平台的测试结果

Table 4 The test results of the actual hardware test platform

实际暂降深度 λ	实际持续时间/s	实际相位跳变/(°)	持续时间绝对误差/s	暂降深度相对误差/%	相位跳变绝对误差/(°)
0.3	0.091	30	0.000 125	0.117 590	0.137 360
0.3	0.092	30	0.000 125	0.080 022	0.025 568
0.4	0.094	40	0.000 750	0.192 720	-0.702 710
0.4	0.095	50	-0.005 375	0.189 800	-0.641 850
0.5	0.110	50	0.000 000	-0.033 607	0.382 530
0.5	0.106	50	-0.000 250	0.035 174	-0.046 371
0.6	0.112	60	-0.000 125	0.026 437	0.348 840
0.6	0.111	60	0.000 250	0.129 990	0.471 750

由表4可知,本文提出的基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法能够有效减小相位误差以及抑制采样过程中可能存在的噪声等干扰,其中暂降相位跳变绝对误差不超过 0.471 75°,持续时间绝对误差最大为 0.005 375 s,暂降深度相对误差不超过 0.192 72%,均满足 GB/T 30137-2013 中电压幅值误差不超过标称输入电压 $\pm 0.2\%$ 、相位跳变误差不超过 1°以及持续时间误差不超过一个周波的要求。

5 结论

本文提出了一种基于有效值滑窗差分算子和采样序列重构的电压暂降测量方法。该方法采用有效值滑窗差分算子和暂降检测阈值,可有效减少实际电网对暂降起止时刻所造成的误判,实现了暂降起止时刻的准确检测。此外,利用采样序列重构对相位进行校正,进一步提高了相位跳变检测的精度。仿真实验结果表明,该算法能够准

确、有效且快速地检测电压暂降信号的暂降起止时刻及持续时间、暂降深度和相位跳变量等特征参数,并能有效抑制基频波动、谐波、噪声等干扰的影响。与现有检测方法相比,本文方法具有检测精度高,鲁棒性好,计算量小,易于嵌入式等优点。

参 考 文 献

- [1] 张禹,张永明,吴飞飞. 基于改进广义S变换的谐波信号分析方法[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(5): 38-41.
ZHANG Y, ZHANG Y M, WU F F. Harmonic signal analysis based on improved generalized S transform[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(5): 38-41.
- [2] 桑博,刘洪文,尹志勇. 单一电能质量扰动的分类识别研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 56-59.
SANG B, LIU H W, YIN ZH Y. Research of signal power quality disturbance identification and classification[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(7): 56-59.
- [3] 王雪,唐正聪,刘兴杰. 电压暂降随机影响下考虑低压脱扣器保护动作机制的电压敏感设备运行状态评估[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3794-3804.
WANG X, TANG ZH C, LIU X J. Evaluation of the operating status of voltage sensitive equipment considering the protective action mechanism of low voltage release under the random influence of voltage sag[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3794-3804.
- [4] 张嫣,林涌艺,邵振国. 电压暂降可观约束下的定位监测点多目标优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2375-2383.
ZHANG Y, LIN Y Y, SHAO ZH G. Multi-objective optimal allocation of monitors for voltage sag location under observability constraint [J]. Transactions of China Electro-technical Society. 2019, 34 (11): 2375-2383.
- [5] SANTIS M D, STASIO L D, NOCE C, et al. Indices of intermittence to improve the forecasting of the voltage sags measured in real systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37 (2): 1252-1263.
- [6] 徐永海,李晨懿,汪坤,等. 低压变频器对电网电压暂降耐受特性及兼容性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2216-2229.
XU Y H, LI CH Y, WANG K, et al. Compatibility between low voltage variable-frequency drives and voltage sags in distribution systems[J]. Transactions China Electro-Technical Society, 2019, 34 (10): 2216-2229.
- [7] 沙浩源,郑建勇,梅飞,等. 基于轨迹特征关键点匹配的电压暂降同源数据精确检测算法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 109-116.
SHA H Y, ZHENG J Y, MEI F, et al. Accurate detection algorithm for homologous voltage sag data based on matching of feature key points for trajectories [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 109-116.
- [8] ABD GHANI M F, FARID ABIDIN A, TALIB MAT YUSOH M A. Real time voltage sag monitoring based on embedded S-transform algorithm in Labview[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2019.
- [9] HASAN S, MUTTAQI K, SUTANTO D, et al. Calculation of the voltage sag recovery point-on-wave and sag duration using system parameters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4): 4588-4601.
- [10] LIAO H L, ABDELRAHMAN S, GUO Y, et al. Identification of weak areas of power network based on exposure to voltage sags—Part I: Development of sag severity index for single-event characterization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2392-2400.
- [11] 张艳,殷礼胜,马瑞卿,等. 基于复小波变换和有效值算法的电压暂降检测方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(10): 74-79.
ZHANG Y, YIN L SH, MA R Q, et al. Voltage sag detection method based on complex wavelet transform and RMS algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 53(10): 74-79.
- [12] LI J, YANG Y, LIN H, et al. A voltage sag detection method based on modified S transform with digital prolate spheroidal window[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 997-1006.

- [13] 唐求,滕召胜,郭斯羽. 基于广义 S 变换的电压骤降特征量检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2): 113-119.
TANG Q, TENG ZH SH, GUO S Y. Research on detection method for voltage sag characteristics based on generalized S-transform[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(2): 113-119.
- [14] 肖助力,龚仁喜,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 ZH L, GONG R X, CHEN SH. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.
- [15] 刘海涛,叶筱怡,吕干云,等. 基于最优组合赋权改进 S 变换的电压暂降检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 47-52.
LIU H T, YE X Y, LYU G Y, et al. Modified S-transform of voltage sag detection method based on optimal combination weights[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 47-52.
- [16] 吉玥,赵肖雄. 基于改进不完全 S 变换的电压暂降源分类方法[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(11): 47-51.
JI Y, ZHAO X X. Voltage sags classification based on modified incomplete S-transform [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(11): 47-51.
- [17] HASAN S, MUTTAQI K, SUTANTO D. Application of the automatic segmented Hilbert Huang transform method for the evaluation of the single-event characteristics of voltage sags in power systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1882-1891.
- [18] 黄永红,施慧,徐俊俊,等. 改进 dq 变换的动态电压恢复器检测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 117-122.
HUANG Y H, SHI H, XU J J, et al. Improved dq transform algorithm for dynamic voltage restorer detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(10): 117-122.
- [19] 周军,伏修来,李曙光. 基于求导法的 dq 变换结合形态学滤波的电压暂降检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 19-25.
ZHOU J, FU X L, LI SH G. Single phase voltage detection method based on derivation $\alpha\beta-dq$ transformation combined with morphological[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 19-25.
- [20] JI X, XUE G Y, MENG X P, et al. Voltage sag detection method based on dq transform and complex wavelet transform[C]. 2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology, 2021.
- [21] COSTA F B, DRIESEN J. Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 336-346.
- [22] 徐勇,向运琨,曾麟,等. 基于分段加 Nuttall 窗插值 FFT 的电压暂降检测方法[J]. 自动化仪表, 2021, 42(9): 54-60.
XU Y, XIANG Y K, ZENG L, et al. Voltage sag detection method based on segmented interpolation FFT with Nuttall window[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(9): 54-60.
- [23] 洪典,李建闽,唐强,等. 基于采样序列重构和频谱校正的通用电网闪变测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(12): 8-15.
HONG D, LI J M, TANG Q, et al. Generalized power grid flicker measurement method based on sample sequence reconstruction and spectrum calibration[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(12): 8-15.
- [24] 彭诚,胡水林,曹宇,等. 一种改进的三相不平衡电压暂降检测算法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 62-65.
PENG CH, HU SH L, CAO Y, et al. An improved three-phase unbalanced voltage sag detection algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 62-65.
- [25] 李涛,夏浪,张宇,等. 基于提升复小波的暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 66-72.
LI T, XIA L, ZHANG Y, et al. Detection and localization of power transient disturbances based on lifting complex wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,

31(25): 66-72.

- [26] REDDY M V, SODHI R. A modified S-transform and random forests-based power quality assessment framework[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(1): 78-89.
- [27] MOUKADEM A, BOUGUILA Z, ABDESLAM D O, et al. A new optimized Stockwell transform applied on synthetic and real non-stationary signals[J]. Digital Signal Processing, 2015, 46: 226-238.

作者简介

龚辰, 硕士研究生, 主要研究方向为电气参数检测、电能质量监控。

E-mail: 1225656774@qq.com

李建国(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为电能质量监测、电力系统分析、数字信号处理。

E-mail: ljmdzyx@163.com