

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.07.033

大容量试验短路电流波形参数的测算

周小猛¹, 林志力², 苗本健², 李赛赛¹, 袁小娴¹

(1. 国家智能电网输配电设备质量监督检验中心, 广东 东莞 523325; 2. 广东产品质量监督检验研究院, 广州 510670)

摘要: 采用抛物线拟合方法计算大容量试验短路电流波形的峰值和对应的时间坐标。理论证明短路电流波形上相邻两峰值的时间坐标中点的电流值近似等于此时的直流分量值, 并据此给出波形的直流时间常数、交流(基波)分量有效值和直流分量百分数的算法。使用STL提供的标准短路电流波形, 对文中算法和现有算法进行了对比测试。测试结果验证了该算法的准确性, 同时表明, 仅使用3个峰值点并未显著降低文中算法在计算交流分量恒定的短路电流波形参数时的准确度。通过计算直流时间常数不同、频率和交流分量有效值随时间变化等STL标准波形在每一个峰值点处的参数, 得到该算法在计算峰值、直流时间常数、交流分量有效值、直流分量百分数时的相对扩展不确定度分别为0.03%、0.20%、0.40%、0.80%。

关键词: 大容量试验; 短路电流; 参数测算; 直流时间常数; 交流分量有效值; 不确定度

Measurement and Calculation of Short-circuit Current Waveform Parameters for High Power Tests

ZHOU Xiaomeng¹, LIN Zhili², MIAO Benjian², LI Saisai¹, YUAN Xiaoxian¹

(1. China National Quality Supervision and Testing Center for Smart Grid Transmission and Distribution Equipment, Guangdong Dongguan 523325, China; 2. Guangdong Testing Institute of Product Quality Supervision, Guangzhou 510330, China)

Abstract: The parabolic curve fitting method is used to calculate the peak value and the corresponding time coordinate of short-circuit current waveform in high power tests. It is proved theoretically that the current value at the mid-point of the two adjacent peaks in the short-circuit current waveform is approximately equal to the DC component at this time. A algorithm to calculate the DC time constant, the RMS value of AC (fundamental) component and the percentage value of DC component is given accordingly. Using the standard short-circuit current waveform provided by STL, the algorithms of this paper and the existing ones are compared and tested. Test results verify the accuracy of the algorithms in this paper, and show that using only three peak points does not significantly reduce the accuracy of these algorithms when calculating short-circuit current waveform parameters with constant AC components. The relative expanded uncertainties of these algorithms in calculating the crest value, the DC time constant, the RMS value of AC component and the percentage value of DC component are 0.03%, 0.22%, 0.39%, and 0.76% respectively, which were obtained by calculating the parameters of the STL standard waveforms at each peak point, whose DC time constants different, frequency and the RMS value of AC component change over time.

Key words: high power tests; short-circuit current; parameter calculation; DC time constant; RMS value of AC component; uncertainty

0 引言

断路器等高压开关设备在进行高压大容量试验时,从短路电流波形上准确测算出峰值、交流(基

波)分量有效值、直流分量百分数等参数是判断设备的短路开断能力等关键指标是否满足标准和用户要求的前提^[1-3]。在断路器开断性能研究、电力系统继电保护、同步相量测量等领域,准确测算上述参

收稿日期:2018-12-05; 修回日期:2019-02-20

基金项目:国家质检总局科技计划项目(2015QK003)。

Project Supported by Science and Technology Plan Project of AQSIQ(2015QK003).

数也具有重要的意义^[4-7]。测算的难点在于从短路电流波形中准确分离出衰减的直流分量。

国际短路试验联盟(STL)建议用三顶点法计算电流波形的有效值和直流分量百分数^[8],被各高压大容量试验室所采用。文[9-10]采用指数函数拟合波形的峰值点,计算交流分量有效值和直流分量;文[11]通过小波分析滤除直流分量,充分利用了故障电流信号中的暂态信息;文[12-13]使用改进Prony算法计算TA饱和时的短路故障电流参数。文[14]利用频域信息滤除直流分量,同时考虑了基波时变性和直流分量对相量测量的影响;文[15-17]使用改进的离散傅氏算法滤除直流分量,进而计算交流分量有效值;文[18]使用数字滤波器提取并计算基波分量;文[19]使用数字滤波器计算衰减直流分量,获得其与实际衰减直流分量的误差;再通过计算直流时间常数求出衰减直流分量的准确值;最后通过最小二乘法计算基波分量。文[20]首先估算线路直流时间常数,然后利用连续的3个采样点快速提取基波分量的瞬时值;文[21]采用无迹Kalman滤波提取短路电流的基波分量。

上述三顶点法用直线代替指数曲线,在短路起始时刻准确度不够理想。峰值点的曲线拟合方程未知量较多,需要较多的点数以准确拟合。傅氏等滤波算法的时间分辨率较差,适用于分析基波分量有效值恒定的波形。高压大容量试验所用的冲击发电机容量相对较小且强励倍数较大,短路电流频率及基波分量非恒定值,使用傅氏算法会产生较大的误差。此外,现有文献均没有对算法不确定度的论述,而这对算法计算结果的可信赖性和溯源性是至关重要的。

在已有研究的基础上,文中简述了通过抛物线拟合计算波形峰值的算法,作为准确测算交流分量有效值等参数的基础。再通过理论推导,论述了使用相邻峰值时间坐标的中点及对应的瞬时电流值计算大容量试验短路电流波形的直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数的算法。通过与现有算法的对比测试,验证了文中算法的准确性及在拟合点数量选择上的灵活性。通过计算不同STL标准波形在每一个峰值点处的参数,得到文中算法的相对扩展不确定度,并进一步验证了算法的准确性和适用性。

1 峰值的计算

短路电流波形峰值的计算借鉴了文[8]提出的曲线拟合方法,步骤为:

1)设定两条水平阈值线,见图1。推荐的阈值水

平为测量通道量程的 $\pm 3\%$ 。

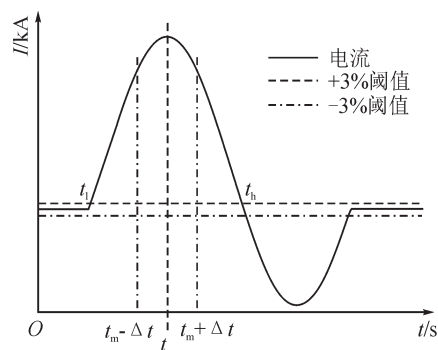


图1 波形峰值的计算

Fig. 1 Calculation of the crest values of the waveform

2)计算阈值线与波形的交点的横坐标 t_l 和 t_h 。对于接近于正弦波的短路电流波形,其峰值出现在 $t_m = (t_l + t_h)/2$ 附近。

3)选取电流波形在 $(t_m - \Delta t, t_m + \Delta t)$ 区间内的若干个点,进行抛物线拟合,抛物线的极值即为所求的峰值。拟合点的数量会影响求解的准确度,STL导则推荐的数量为每周期采样点数的10%且不小于20。

2 直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数的计算

2.1 算法推导

高压大容量试验室均使用分流器或罗氏线圈采集短路电流,无磁饱和问题,短路电流可近似用式(1)来描述^[22],典型波形见图2。电力系统的故障电流虽含有较多的高频分量,但经过低通滤波后的故障电流表达式也近似于式(1)。

$$i(t) = i_{ac} + i_{dc} = I_m \cos(\omega t + \phi_u - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} = I_m \cos(\omega t + \alpha) - I_m \cos \alpha e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式(1)中: i_{ac} 和 i_{dc} 分别为电流的交流分量和直流分量瞬时值; I_m 为电流交流分量幅值; ω 为角频率; t 为时间; ϕ_u 为接通电路时外施电压的初相角,即合闸角; φ 为回路的功率因数角; $\alpha = \phi_u - \varphi$; τ 为回路的直流时间常数。

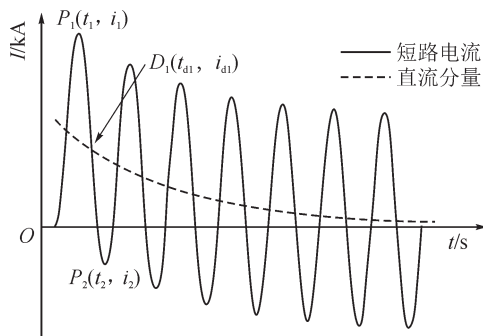


图2 短路电流波形

Fig. 2 Waveform of short-circuit current

图2中, P_1 和 P_2 为短路电流波形的两个相邻峰值; D_1 为直流分量衰减曲线与短路电流波形的交点。现拟证明, 短路电流波形上相邻两峰值的时间坐标中点的电流值近似等于此时的直流分量值, 即

$$t_{d1} \approx (t_1 + t_2)/2 = t_{m1} \quad (2)$$

$$i_{d1} \approx i\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \quad (3)$$

证明过程如下:

短路电流波形与直流分量衰减波形相交时, 则

$$i_{ac} = I_m \cos(\omega t_{d1} + \alpha) = 0 \quad (4)$$

得

$$t_{d1} \approx \frac{k\pi + \pi/2 - \alpha}{\omega} \quad (5)$$

式(5)中, $k=0, 1, 2, \dots$ 。

为计算电流波形峰值处的时间 t_1 和 t_2 , 对式(1)求导并令其为零, 化简得

$$\sin(\omega t_{1,2} + \alpha) = \frac{\cos \alpha}{\tau \omega} e^{-\frac{t_{1,2}}{\tau}} \quad (6)$$

短路试验时, 通常 $t \geq 10$ ms、 $t \geq 45$ ms、频率为 50 Hz 或 60 Hz, 故

$$\left| \frac{\cos \alpha}{\tau \omega} e^{-\frac{t_{1,2}}{\tau}} \right| \leq \frac{e^{-\frac{10}{45}}}{0.045 \times 2 \times 3.1416 \times 50} = 0.0566 \approx 0 \quad (7)$$

在零点附近 $x \approx \sin x$, 因此式(6)可近似为

$$\sin(\omega t_{1,2} + \alpha) = \sin\left(\frac{\cos \alpha}{\tau \omega} e^{-\frac{t_{1,2}}{\tau}}\right) \quad (8)$$

得

$$\begin{cases} \omega t_{1,2} + \alpha = k\pi \pm \frac{\cos \alpha}{\tau \omega} e^{-\frac{t_{1,2}}{\tau}} \\ t_{1,2} = \frac{k\pi - \alpha}{\omega} \pm \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_{1,2}}{\tau}} \end{cases} \quad (9)$$

若短路电流波形的直流分量始终大于零, 则

$$\frac{\cos \alpha}{\tau \omega} e^{-\frac{t}{\tau}} < 0 \quad (10)$$

通过作图可知, 正峰值的时间坐标为

$$t_1 = \frac{k\pi - \alpha}{\omega} - \left| \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right| = \frac{k\pi - \alpha}{\omega} + \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (11)$$

负峰值的时间坐标为

$$t_2 = \frac{(k+1)\pi - \alpha}{\omega} - \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_2}{\tau}} \quad (12)$$

若短路电流波形直流分量始终小于零, 同理可得正、负峰值的时间坐标分别为

$$\begin{cases} t_1 = \frac{k\pi - \alpha}{\omega} + \left| \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right| = \frac{k\pi - \alpha}{\omega} + \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_1}{\tau}} \\ t_2 = \frac{(k+1)\pi - \alpha}{\omega} - \frac{\cos \alpha}{\tau \omega^2} e^{-\frac{t_2}{\tau}} \end{cases} \quad (13)$$

综合得相邻两峰值时间坐标的中点

$$t_{m1} = \frac{k\pi + \pi/2 - \alpha}{\omega} + \frac{\cos \alpha}{2\tau \omega^2} \left(e^{-\frac{t_1}{\tau}} - e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right) \quad (14)$$

对比式(5)可得

$$|t_{m1} - t_{d1}| = \left| \frac{\cos \alpha}{2\tau \omega^2} \left(e^{-\frac{t_1}{\tau}} - e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right) \right| < \frac{1}{2 \times 0.045 \times 314.16^2} = 0.113(\text{ms}) \quad (15)$$

差值接近于零, 且随着时间的增大而迅速减小。因此, 可认为相邻两峰值的时间坐标中点的电流值近似等于此时的直流分量值。

在计算短路起始时刻附近的参数时, 式(15)的差值仍会引起一定的误差。此时可用该式修正 t_{m1} , 使其更接近 t_{d1} , 即

$$\begin{aligned} t_{d1} &= t_{m1} - \frac{\cos \alpha}{2\tau \omega^2} \left(e^{-\frac{t_1}{\tau}} - e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right) = \\ t_{m1} - \frac{I_m \cos \alpha e^{-\frac{t_1}{\tau}} - I_m \cos \alpha e^{-\frac{t_2}{\tau}}}{I_m} \cdot \frac{1}{2\tau \omega^2} &= \\ t_{m1} \pm \frac{(d_{t1}\% - d_{t2}\%)}{200\tau \omega^2} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中: $d_{t1}\%$ 、 $d_{t2}\%$ 分别为 t_1 、 t_2 时刻的直流分量百分数 ($t_1 < t_2$); 波形的最大峰值和该点的峰值同号时, 取“+”; 否则取“-”。

2.2 计算步骤

根据 2.1 节的推导过程, 可得到短路电流波形的直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数的算法, 其步骤为:

1) 使用文 1 节的峰值算法, 计算短路电流波形的峰值 i_k 及其时间坐标 t_k , $k=1, 2, \dots$ 。

2) 计算相邻峰值时间坐标的中点 (t_{mk} , i_{mk}), 用此点近似代替图 2 的点 $D_1(t_{d1}, i_{d1})$ 。 $t_{mk} = (t_k + t_{k+1})/2$; 正弦曲线在过零点附近近似为直线, 故 i_{mk} 可通过线性插值计算得到。

3) 对计算得到的一系列点 (t_{mk} , i_{mk}), 选取至少 2 个点进行最小二乘法的曲线拟合, 拟合方程为

$$i_{dc} = I'_0 e^{-\frac{t}{\tau'}} \quad (17)$$

得到直流分量起始值和直流时间常数的拟合值 τ' 和 I'_0 。当拟合点数量为 2 时, 则

$$\tau' = \frac{t_{m2} - t_{m1}}{\ln(i_{m1}/i_{m2})} \quad (18)$$

$$I'_0 = \frac{i_{m1}}{e^{-t_{m1}/\tau'}} \quad (19)$$

4) 计算波形在第 k 个峰值 t_k 处的直流分量瞬时值 i_{dek} 、交流分量有效值 I_k 和直流分量百分数 $d_{ik}\%$ 分别为

$$i_{dek} = I'_0 e^{-\frac{t_k}{\tau'}} \quad (20)$$

$$I_k = |i_k - i_{\text{dek}}| / \sqrt{2} \quad (21)$$

$$d_{i_k} \% = \left| \frac{i_{\text{dek}}}{i_k - i_{\text{dek}}} \right| \times 100 \quad (22)$$

5)使用式(16)及求得的 $d_{i_k} \%$ 对第2步的 t_{mk} 进行修正,使其更接近点 D_1 。角频率 ω 可由相邻 t_{mk} 的差值确定。

6)重复步骤3)~5),以提高计算的准确度,通常迭代10次左右结果便趋于稳定,为进一步提高准确度,迭代时可采取以下措施:① $d_{i_k} \%$ 较大的峰值点不参与步骤3)的曲线拟合。因为由式(16)可知, $d_{i_k} \%$ 越大,其变化率越大, t_{mk} 与 t_{dk} 的差值也就越大。②使用直流分量在某一区间范围内的点(t_{mk} , i_{mk})计算 i_{dek} ,而不是使用 I_0' ,即式(23)代替式(20)。

$$i_{\text{dek}} = \frac{\sum_{k=m}^n i_{mk} e^{\frac{t_{mk}-t_k}{\tau}}}{n-m+1} \quad (23)$$

选取适当的正整数 m 、 n ($m < n$) 使得 $d_{im} \% \sim d_{in} \%$ 都在某一区间范围,可减小式(16)在直流分量过高时的计算误差,以及式(17)在直流分量过低时的拟合误差。取平均值可进一步消除因 t_{mk} 与 t_{dl} 不重合及短路电流交流分量不恒定而产生的误差。

步骤3)、式(21)、(22)的最后计算结果即为所求的直流时间常数及每一个峰值点处的交流分量有效值和直流分量百分数。

3 测试验证

STL提供的试验数据发生器(TDG)软件根据短路试验方程及实际应用场景,生成了可覆盖大多数高压大容量试验工况的8个标准短路电流波形,并通过理论计算给出了这些波形在每个峰值点处的峰值、时间坐标、交流分量有效值和直流分量百分数的参考值,这些参考值均具有较高的准确度和可信度。因此文中使用这些波形作为标准数据源、它们的参考值作为约定真值,来测试新算法的准确性。

3.1 峰值算法的对比测试

使用现有算法(通过寻找采样点极大值来确定峰值)及文中算法分别编写了电流波形峰值的MATLAB计算程序,用来计算TDG波形1和3的部分峰值及其时间坐标(波形1的频率和交流分量恒定,波形3的频率和交流分量随时间逐渐降低)。计算结果见表1。

表1 峰值的计算结果

Table 1 Calculation results of crest value

波形 编号	峰值 序号	峰值/kA			时间坐标		
		参考值	现有算法	文中算法	参考值	现有算法	文中算法
1	1	1.802 3	1.802 3	1.802 2	298.188 5	298.000 0	298.241 4
	2	-0.359 8	-0.359 7	-0.359 8	401.439 6	401.000 0	401.452 5
	3	1.514 1	1.514 0	1.514 0	498.840 6	499.000 0	498.828 2
	4	-0.589 3	-0.589 3	-0.589 3	600.924 0	601.000 0	600.934 2
3	1	2.561 5	2.561 4	2.561 3	297.323 2	297.000 0	297.331 3
	2	-0.316 3	-0.316 2	-0.316 2	401.805 2	402.000 0	401.832 0
	3	2.000 9	2.000 7	2.000 7	499.547 1	500.000 0	499.538 1
	4	-0.592 1	-0.592 1	-0.592 1	603.249 2	603.000 0	603.263 7

从表1可以看出,现有算法与文中算法的准确度均较为理想。不过文中算法在计算时间坐标时准确度更高,可更好地用于后续直流时间常数等参数的计算。

3.2 直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数算法的对比测试

根据文2.2节所述算法的步骤,编写了电流波形直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数的MATLAB计算程序,与现有的三顶点法一起,

分别计算了TDG波形1、3在部分峰值点处的交流分量有效值和直流分量百分数。计算时,两种算法所用的峰值均由文中的峰值算法求得。文中算法中,直流分量大于40%的峰值点不参与曲线拟合;式(23)的区间范围选取为[10, 30],迭代计算10次。直流时间常数无法由三顶点法算出,故新算法对它单独的计算结果见表2。交流分量有效值和直流分量百分数的计算结果见表3。

表2 直流时间常数的计算结果

Table 2 Calculation results of DC time constant

波形 编号	参考值/ms	文中算法/ms	相对误差/%
1	45.000 0	45.000 0	0.000
3	45.000 0	45.065 9	0.146

表3 交流分量有效值和直流分量百分数的计算结果

Table 3 Calculation results of the RMS value of AC component and the percentage value of DC component

波形 编号	峰值 序号	交流分量有效值/kA			直流分量百分数/%		
		参考值	三顶点法	文中算法	参考值	三顶点法	文中算法
1	1	0.707 1	0.713 4	0.705 8	80.073 7	78.620 9	80.543 7
	2	0.707 1	0.713 4	0.706 4	64.118 0	64.339 2	63.984 3
	3	0.707 1	0.703 0	0.706 5	51.341 7	50.574 0	51.525 7
	4	0.707 1	0.711 0	0.706 8	41.111 2	41.394 9	41.048 9
3	1	0.958 8	0.918 3	0.959 1	88.780 0	97.231 9	88.823 4
	2	0.902 3	0.918 3	0.899 2	75.373 4	75.649 0	75.133 8
	3	0.870 6	0.867 9	0.870 8	62.412 9	64.511 0	62.465 2
	4	0.852 2	0.860 0	0.850 8	50.941 9	51.314 6	50.789 4

3.3 拟合点数降低对新算法的影响测试

如前所述,文中算法可使用3个及以上的峰值点计算直流时间常数等参数。为测试拟合点数降低对新算法准确度的影响,考虑极端情况,选择3个相邻的峰值点,得到2个拟合点,用式(19)、(20)代替式(16)来计算文3.2节的电流波形的参数,迭代次数不变,结果见表4(参考值见表3)。

表4 拟合点数降低后的计算结果

Table 4 Calculation results after the decrease of the number of fitting points

波 形 编 号	峰 值 序 号	交流分量有效值		直流分量百分数	
		计算结果/ kA	相对误 差/%	计算结果/ kA	相对误 差/%
1	1	0.707 1	-0.01	80.231 1	0.200
	2	0.705 7	-0.19	63.950 7	-0.260
	3	0.706 6	-0.08	51.517 9	0.340
	4	0.706 8	-0.05	41.048 4	-0.150
3	1	0.925 0	-3.53	95.802 3	7.910
	2	0.923 9	2.39	75.796 7	0.561
	3	0.885 5	1.71	59.780 7	-4.220
	4	0.860 4	0.96	51.336 6	0.770

从表4可以看出,拟合点数降低后,新算法在计算波形1时的误差依然很低,但计算波形3时的误

差显著上升。主要原因在于波形的直流分量较大且交流分量衰减时,用式(19)计算的直流时间常数与理论值存在较大的差异,导致时间坐标的中点 t_{mk} 无法被精确地修正。增加迭代次数可提高准确度,但不能完全消除此差异。

4 不确定度评定

一般情况下,可认为算法的不确定度服从矩形分布^[8],标准不确定度由矩形分布的区间宽度 $[-a, a]$ 决定,即

$$u(x)=\frac{a}{\sqrt{3}} \tag{24}$$

由此得算法在覆盖概率为95.45%时的扩展不确定度为

$$U_{DE}=k\cdot\sqrt{u_n^2+u^2(x)}=k\cdot\sqrt{u_n^2+a^2/3} \tag{25}$$

式(25)中: k 为覆盖因子,算法的计算点数超过50时,可取 $k=2$,其他可通过查询 t 检验分布表获得; u_n 为标准波形的标准不确定度。对于分辨率12位、采样频率10 kHz及以上的TDG波形,其采样值与理论值的偏差不超过0.012%, u_n 可忽略不计。

为获得文中算法的不确定度的区间半宽 a ,选取编号为1-5、8的TDG波形作为标准波形,这些波形的主要特征见表5。为避免零漂抑制和滤波算法引入额外的不确定度,波形4的零漂事先经过了软

件补偿,波形6和7未参与运算。

表5 TDG 波形的主要特征

Table 5 Main features of TDG waveform

波形 编号	采样 频率/ kHz	短路持 续时间/ ms	直流时 间常数/ ms	频率/Hz	交流分量 有效值/kA
1	10	355	45	50.0	0.707 1
2	10	357	120	50.0 ~ 52.5	0.531 4 ~ 0.647 2
3	10	352	45	50.0 ~ 47.5	0.958 8 ~ 0.766 5
4	10	355	45	50.0	0.707 1
5	10	355	45	50.0	0.707 1
8	15	1 060	80	50.0 ~ 43.0	0.977 9 ~ 0.723 9

注:波形2的频率和交流分量有效值随时间逐渐升高;波形3和波形8的频率和交流分量有效值随时间逐渐降低。

用文中算法分别计算上述波形的直流时间常数及在每一个峰值点处的峰值、时间坐标、交流分量有效值和直流分量百分数(依据STL导则,直流分量小于20%的点不参与直流分量百分数算法的不确定评定)。峰值算法的拟合点数按推荐值选取;直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数算法的计算方式与文3.2节的相同。将计算结果同TDG波形的参考值相互比对,得到的峰值及其时间坐标、交流分量有效值、直流分量百分数和直流时间常数的最大相对误差分别见表6、7。

表6 峰值算法的验证数据

Table 6 Verification data of algorithm of crest values

波形 编号	计算点数	最大相对误差/%	
		峰值	时间坐标
1	35	0.011	0.018
2	37	0.019	0.026
3	33	0.024	0.007
4	35	0.012	0.019
5	35	0.016	0.021
8	91	0.012	0.005

峰值和时间坐标的总计算点数为266,故峰值算法在计算峰值和时间坐标时的相对扩展不确定度分别为

$$\begin{cases} U_{DE_1} = k \cdot \sqrt{1/3 \cdot \max(a_1)^2} = 2 \times \sqrt{0.024^2/3} = 0.03\% \\ U_{DE_2} = 2 \times \sqrt{0.026^2/3} = 0.03\% \end{cases} \quad (26)$$

交流分量有效值和直流分量百分数的总计算点数均大于50,同理可得算法在计算交流分量有效值和直流分量百分数时的相对扩展不确定度分别

表7 直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数算法的验证数据

Table 7 Verification data of algorithm of DC time constant, AC component and percentage value of

DC component

波 形 编 号	计算点数		最大相对误差/%		
	交流 分量 有效值	直流 分量 百分数	直流时间 常数	交流分量 有效值	直流分量 百分数
1	34	7	0.000	0.179	0.587
2	36	17	0.019	0.045	0.065
3	33	8	0.146	0.340	0.318
4	34	7	0.023	0.210	0.651
5	34	7	0.031	0.215	0.656
8	90	11	0.065	0.100	0.113

为0.4%和0.8%。

直流时间常数的总计算点数为6。查 t 分布表可知,为保证95.45%的覆盖概率, k 应取2.65。故算法对应的相对扩展不确定度为

$$U_{DE_3} = 2.65 \times \sqrt{0.146^2/3} = 0.2\% \quad (27)$$

5 结语

文中着重论述了使用相邻峰值时间坐标的中点及对应的瞬时电流值计算大容量试验短路电流波形的直流时间常数、交流分量有效值和直流分量百分数的算法。通过与现有算法的对比测试,表明仅使用3个峰值点并未显著降低文中算法在计算交流分量恒定的短路电流波形参数时的准确度;但对于交流分量随时间变化的波形,需增加拟合点数以保证准确度。文中算法可通过直流分量指数衰减方程较为准确地计算短路电流波形在任意点处的直流分量瞬时值,故也可用于计算交流分量近似恒定的短路电流波形在断路器分闸时刻等任意点处的参数。

通过计算STL标准波形在每一个峰值点处的参数,得到文中算法的相对扩展不确定度。对比测试和不确定度评定结果表明,该算法可用于相对准确且可信地测算直流时间常数不同、频率和交流分量有效值随时间变化等各种大容量试验电流波形的参数,并可为建立统一的短路电流参数计算方法提供一定的参考。

参考文献:

- [1] High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alter-

- nating-current circuit-breakers: IEC 62271-100: 2002[S]. 2012.
- [2] 高电压试验技术第1部分:一般定义及试验要求:GB/T 16927.1—2011[S]. 2011.
High voltage test techniques-Part 1:General definitions and test requirements:GB/T 16927.1—2011[S]. 2011.
- [3] 高电压和大电流试验技术第4部分:试验电流和测量系统的定义和要求:GB/T 16927.4—2014[S]. 2014.
High voltage and high current test techniques - Part 4: Definitions and requirements for test currents and measuring systems: GB/T 16927.4—2014[S]. 2014.
- [4] 舒胜文,阮江军,黄道春,等.系统故障参数对真空断路器开断性能影响的建模与仿真研究[J].电力自动化设备,2013,33(11):81-87.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Influence of system fault parameters on breaking performance of vacuum circuit breaker; modeling and simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 81-87.
- [5] 罗深增,李银红,游昊,等.基于同步相量测量单元的串联补偿线路自适应故障定位算法[J].电工技术学报,2017,32(5):143-151.
LUO Shenzeng, LI Yinhong, YOU Hao, et al. An adaptive fault location algorithm based on PMU measurement for series compensated transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 143-151.
- [6] 蔡超,陆于平.一种提高智能变电站PMU相量测量精度的改进采样值调整算法[J].电力自动化设备,2014,34(3):149-154.
CAI Chao, LU Yuping. Improved sampled value adjustment algorithm increasing measurement precision of smart substation PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 149-154.
- [7] 金涛,陈毅阳,段小华,等.基于改进DFT的电力系统同步相量测量算法研究[J].电工技术学报,2017,32(17):1-10.
JIN Tao, CHEN Yiyang, Duan Xiaohua, et al. Research on synchronous phasor measurement algorithm of power system based on improved DFT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 1-10.
- [8] Short-circuit Testing Liaison. Harmonisation of data processing methods for high power laboratories[R]. Coventry, England: Short-circuit Testing Liaison, 2004.
- [9] 王晶,牟磊,李彦明,等.大容量实验室电流波形参数计算机提取算法的研究[J].高压电器,2006,42(1):44-46.
WANG Jing, MOU Lei, LI Yanming, et al. Computation methods of current waveform parameters in high power laboratory[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 44-46.
- [10] 曹炜,王永生,丁北平,等.基于包络线和函数拟合的录波数据分析[J].上海电力学院学报,2010,26(4): 315-318.
CAO Wei, WANG Yongsheng, DING Beiping, et al. Analytical study of fault recording data based on envelopes and function fitting[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2010, 26(4): 315-318.
- [11] 吕思颖,裴岳,秦昕,等.基于小波多尺度分析和Kalman滤波的微机保护算法[J].电力系统保护与控制,2015,43(21):54-59.
LYU Siying, PEI Chan, QIN Xin, et al. Microprocessor-based protection algorithm based on wavelet multi-scale analysis and Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 54-59.
- [12] 任龙飞,郝治国,张保会,等.继电保护抗TA暂态饱和和改进Prony算法[J].电力自动化设备,2014,34(5):126-132.
REN Longfei, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Improved Prony algorithm against transient CT saturation for relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 126-132.
- [13] 王家林,夏立,吴正国,等.采用改进Prony算法的电力系统故障暂态信号分析[J].电力自动化设备,2012,32(7):89-93.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Analysis of power system transient signal based on improved Prony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 89-93.
- [14] 符玲,韩文朕,麦瑞坤,等.利用频域信息滤除衰减直流的同步相量测量算法[J].中国电机工程学报,2016,36(18):4923-4929.
FU Ling, HAN Wenzhen, MAI Ruikun, et al. Phasor estimator based on frequency-domain information considering decaying DC components[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4923-4929.
- [15] 吴继维,童晓阳,廖小君,等.一种滤除衰减直流分量的全波傅氏改进算法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(2):9-17.
WU Jiwei, DONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. A full-wave Fourier improved algorithm of filtering decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 9-17.
- [16] 厉伟,陈刚.一种利用LabVIEW滤除衰减直流分量的改进算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):7-12.
LI Wei, CHEN Gang. An improved algorithm to filter decaying DC component based on LabVIEW[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 7-12.
- [17] CHO Y S, LEE C K, JANG G, et al. An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 73-78.
- [18] ALAM A S. A new fast algorithm to estimate real-time phasors using adaptive signal processing[J]. IEEE Transactions

- on Power Delivery, 2013, 28(2): 807-815.
- [19] HOOSHYAR A, SANAYE-PASAND M. Accurate measurement of fault currents contaminated with decaying DC offset and CT saturation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 773-783.
- [20] 黄世年, 佟为明, 郭志忠, 等. 直接提取基频分量瞬时值的快速滤波算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 44-49.
- HUANG Shinian, TONG Weiming, GUO Zhizhong, et al. A fast filtering algorithm for extracting fundamental instantaneous value[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 44-49.
- [21] 吕思颖, 黎 丹, 要 航, 等. 基于无迹 Kalman 滤波的基波分量提取[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 79-84.
- LYU Siying, LI Dan, YAO Hang, et al. Fundamental component extraction based on unscented Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 79-84.
- [22] 邱关源. 电路[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- QIU Guanyuan. Circuit[M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 周小猛(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压大容量试验检测和回路设计工作。
- 林志力(1964—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事电气检测研究工作。