

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.12.041

基于积分法和差分法的电力系统短路电流直流分量 特征参数计算

王 蒙¹, 张文朝², 高享想³, 曹生顺¹, 汪 莹¹

(1. 国家电网公司西北分部, 西安 710000; 2. 北京科东电力控制系统有限公司, 北京 100089;

3. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 近些年随着电网中直流时间常数的增大, 导致短路电流中直流分量衰减速度很慢, 超出高压交流断路器在设定时间内开断短路故障的能力。因此, 直流时间常数的计算与评估对电网的优化设计和安全运行尤为重要。文中通过构造函数提出了积分法、差分法、组合法3种计算短路电流中直流分量特征参数(初始值 I_0 和时间常数 τ)的方法, 并应用积分法、差分法、组合法分别对含有三次、五次谐波的3种典型的短路电流波形进行直流分量特征参数计算。研究表明: 积分法、差分法、组合法对理想的短路电流波形均能够零误差的计算直流分量的初始值和时间常数; 叠加高斯白噪声信号后, 3种算法的计算精度依次为积分法、组合法、差分法, 且3种计算方法对叠加信噪比60 dB高斯白噪声信号的计算结果要优于叠加信噪比30 dB高斯白噪声信号。最后, 应用积分法对电网实测的短路电流直流分量进行了计算, 该方法为电网短路电流直流分量特征参数随时间变化时的参数计算提供了一种新的解决方法。

关键词: 直流分量; 时间常数; 积分法; 差分法; 组合法

Calculation of DC Component Characteristic Parameters of Power System Short-circuit Current Based on Integral and Difference Method

WANG Meng¹, ZHANG Wenchao², GAO Xiangxiang³, CAO Shengshun¹, WANG Ying¹

(1. Northwest Branch of the State Grid Corporation of China, Xi'an 710000, China;

2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100089, China;

3. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In recent years, with the increase of DC time constant of power grid, which leads to DC component of short circuit decayed low and exceeded the interruption capability of circuit-breakers in the set time. Therefore, the calculation and evaluation of DC time constant is especially important for the optimal design and safe operation of power grid. In this paper, the integral method, difference method and combination method for calculating the characteristic parameters of DC component of short circuit current with three times and five times harmonic have been proposed. The results show that integral method, difference method and combination method can calculate the characteristic parameters of DC component with zero error for ideal short circuit current waveform. After superposing Gauss white noise signal the calculation precision of three algorithms is integral method, combination method and difference method in turn. What's more, add the 60 dB Gaussian white noise calculation result is better than 30 dB Gaussian white noise. Furthermore, the DC component of short-circuit current measured in power system is calculated by integrating method, it is provided a new solution to calculated the characteristic parameters of DC component when varying to time.

Key words: DC component; time constant; integral method; difference method; combination method

0 引言

随着电力系统的快速发展,系统的短路容量超标问题越来越突出^[1]。特高压电网中各元件 X/R 的增大导致系统直流时间常数增大。此外,系统中串入高压电抗成为降低短路电流有效值的重要措施^[2],串入高压电抗也会导致系统直流时间常数增大。直流时间常数的增大使得高压交流断路器开断非对称短路故障电流时超出其额定的开断能力范围。目前为止,电力系统短路计算主要关注的是短路电流周期分量^[3-7],对直流分量及其衰减规律往往不太重视。直流分量超标严重影响着高压断路器的短路开断能力^[8-12],因此直流时间常数的计算与评估对电网的优化设计和安全运行尤为重要。

目前计算短路电流直流分量的计算方法有递推富氏法^[13]、改进全波傅氏法^[14]、滤波算子法^[15]、小波分析法^[16-17]等方法。递推富氏法通过应用不同数据窗的递推富氏算法来消除衰减非周期分量,通过运算前后数据相减可以得出衰减的直流分量。改进全波傅氏法通过对全波傅氏算法中直流分量引起的误差进行分析与补偿,进一步得到衰减直流分量。滤波算子法通过引入一组滤波算子来消除基波和谐波分量从而计算出衰减的直流分量。小波分析法是通过小波变换来分离短路电流中直流分量和周期分量。

上述几种算法均需要复杂的运算,且部分算法还有一定的误差。特别地,这几种方法不能有效的计算直流分量特征参数随时间变化的短路电流波形。文中以三角函数在整周期时间域上的运算特征,通过构造函数提出了积分法、差分法、组合法3种计算短路电流中直流分量初始值 I_0 和时间常数 τ 的新方法,所提方法适用于直流分量特征参数随时间变化的短路电流波形。

1 短路电流表达式及直流分量特征参数

当电力系统发生短路故障时,假定系统的电势源恒定,则可以得到短路电流的表达式为

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{k=1}^N I_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

式(1)中: I_0 为衰减直流分量的初始值; τ 为直流分量时间常数; I_k 为 k 次谐波分量的幅值; ω 为基波量的角频率; φ_k 为 k 次谐波分量的初始相位; N 为谐波分量的最高次数。忽略初始的额定运行电流,则短路电流在初始时刻满足条件: $I_0 + \sum_{k=1}^N I_k \cos(\varphi_k) = 0$ 。

由式(1)可知电力系统短路电流主要由衰减的直流分量部分、基频交流分量部分和一定谐波次数的交流分量部分组成,应用式(1)生成包括3次、5次谐波的短路电流波形示意图见图1。

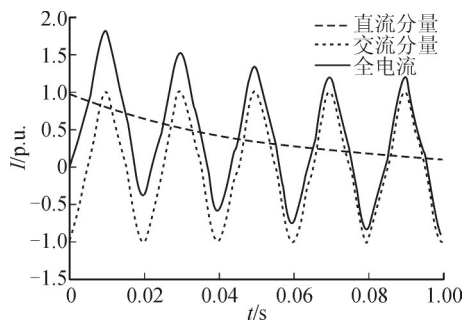


图1 短路电流波形

Fig. 1 Short-circuit current waveform

直流分量时间常数 τ 和直流分量初始值 I_0 是表征短路故障电流中直流分量的重要参数,为了便于分析,文中定义时间常数 τ 和初始值 I_0 为短路电流直流分量的特征参数。

2 短路电流直流分量特征参数计算方法

2.1 积分法

三角函数具有在任意周期内积分都等于零的特征。假设短路电流中的间谐波忽略不计,对图1的短路电流波形在时间域上积分的波形见图2。由图2得出在整周期点0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 s、交流分量的积分数值为零,在这些时间点直流分量的积分数值等于全电流的积分数值。

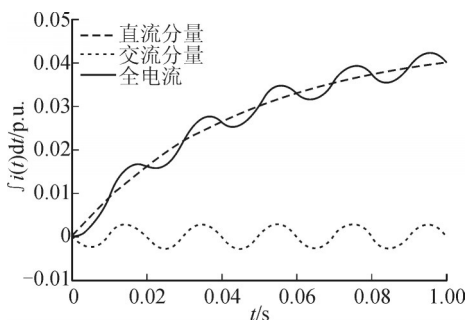


图2 短路电流时间域积分波形

Fig. 2 Short-circuit current time domain integral waveform

从2图还可以得出,短路电流在整周期时间点积分时直流分量的积分数值等于全电流的积分数值,应用这一特征可以计算短路电流直流分量的时间常数 τ 和初始值 I_0 。不失一般性,将图2中以零时刻起始对式(1)的积分推广至时间域区间 $[t, t+T]$ 上的积分,且构造函数 $g(t) = \int_t^{t+T} i(t)dt$,则有

$$g(t) = \int_t^{t+T} \left[\sum_{k=1}^N I_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \right] dt + \int_t^{t+T} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \tau I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \quad (2)$$

式(2)中的方程中含有时间常数 τ 和初始值 I_0 两个未知量,需要两个方程联立求解未知量 τ 和 I_0 。取 $g(t)$ 在时间域 t_1 、 t_2 时刻的方程,建立方程组

$$\begin{cases} g(t_1) = \tau I_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \\ g(t_2) = \tau I_0 e^{-\frac{t_2}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3),求解得到时间常数 τ 为

$$\tau = \frac{-(t_1 - t_2)}{\ln \frac{g(t_1)}{g(t_2)}} \quad (4)$$

将求解得到时间常数 τ 代入 $g(t_1)$,可以得到直流分量初始值 I_0 为

$$I_0 = \frac{g(t_1)}{\tau e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} \quad (5)$$

经过上述的分析与研究,直接对短路电流波形在时间域上积分,需要在图2的两个整周期点构造方程组求解,要求短路电流的波形至少为两个整周期。经过构造函数后仅需要一个整周期的波形即可求解未知量 τ 和 I_0 。

2.2 差分法

三角函数具有在间隔周期为 T 的两个点数值相等的特征。假设短路电流中的间谐波忽略不计,对图1的短路电流波形在时间域上对初始零时刻的数值做差分,得到差分波形见图3。由图3得出在整周期点0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 s、交流分量的差分数值为零,在这些时间点直流分量的差分数值等于全电流的差分数值。

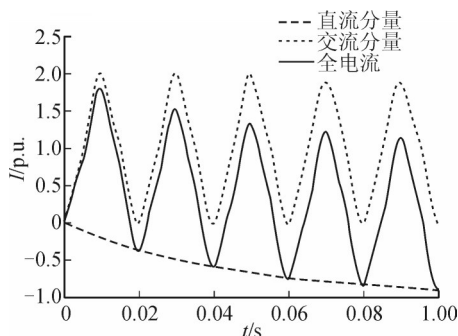


图3 短路电流时间域差分波形

Fig. 3 Short-circuit current time domain difference waveform

从图3还可以得出,短路电流在整周期时间点时直流分量的差分数值等于全电流的差分数值,应用这一特征可以计算短路电流直流分量的时间常数 τ 和初始值 I_0 。不失一般性,将图3中对式(1)与零初始时刻数值的差分推广至时间域时间点 t 、 $t+T$ 上的差分,且构造函数 $h(t) = i(t) - i(t+T)$,则有

$$h(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{k=1}^N I_k \cos(k\omega t + \varphi_k) - I_0 e^{-\frac{t+T}{\tau}} - \sum_{k=1}^N I_k \cos[k\omega(t+T) + \varphi_k] = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} - I_0 e^{-\frac{t+T}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \quad (6)$$

式(6)中的方程中含有时间常数 τ 和初始值 I_0 两个未知量,需要两个方程联立求解未知量 τ 和 I_0 。取 $h(t)$ 在时间域 t_1 、 t_2 时刻的方程,建立方程组

$$\begin{cases} h(t_1) = I_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \\ h(t_2) = I_0 e^{-\frac{t_2}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7),可以求解得到时间常数 τ 为

$$\tau = \frac{-(t_1 - t_2)}{\ln \frac{h(t_1)}{h(t_2)}} \quad (8)$$

将求解得到时间常数 τ 代入 $h(t_1)$,可以得到直流分量初始值 I_0 为

$$I_0 = \frac{h(t_1)}{e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} \quad (9)$$

经过上述的分析与研究,直接对短路电流波形在时间域上对初始值差分,需要在图3的两个整周期点构造方程组求解,要求短路电流的波形至少为两个整周期。经过构造函数后仅需要一个整周期的波形即可求解未知量 τ 和 I_0 。

2.3 组合法

组合法是联立积分法和差分法建立方程组求解时间常数 τ 和初始值 I_0 的方法,联立构造函数 $g(t)$ 、 $h(t)$ 在时间域上 t_1 时刻的方程组为

$$\begin{cases} g(t_1) = \tau I_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \\ h(t_1) = I_0 e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10),可以求解得到时间常数 τ 为

$$\tau = \frac{g(t_1)}{h(t_1)} \quad (11)$$

将求解得到时间常数 τ 代入 $g(t_1)$, 可以得到直流分量初始值 I_0 为

$$I_0 = \frac{g(t_1)}{\tau e^{-\frac{t_1}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)} \tag{12}$$

同理, 组合法也仅需要一个整周期的波形即可求解未知量 τ 和 I_0 。

3 算法测试与讨论

当电网发生短路故障, 且仅当发生非对称短路故障时, 短路电流中才有衰减的直流分量。当系统中某一相的短路故障发生在电压峰值处之外时, 产生非对称的短路电流。因此, 当系统发生三相短路

故障时, 必然有其中的两相电流为非对称短路电流; 当系统发生两相或单相故障时, 当短路故障发生在线电压峰值处或相电压峰值处之外时, 产生非对称的短路电流。短路发生的时刻不同, 所产生的非对称短路电流波形特征也不同。下面分别以理想短路电流波形和实测短路电流波形对文中所提算法进行测试与讨论。

3.1 理想短路电流波形

分别以第一个半波为中等非对称度小半波、最大非对称度大半波、中等非对称度大半波的 3 种典型波形为例, 对上述算法进行测试与验证。应用

式(1)生成包括 3 次、5 次谐波的 3 种理想的典型波形, 具体参数见表 1, 波形见图 4。

表 1 3 种典型的测试电流波形参数

Table 1 Three typical test current waveform parameters

3 种典型波形	直流分量		基波分量		3 次谐波分量		5 次谐波分量	
	$I_0/\text{p.u.}$	τ/s	$I_1/\text{p.u.}$	$\varphi_1/(\text{^\circ})$	$I_3/\text{p.u.}$	$\varphi_3/(\text{^\circ})$	$I_5/\text{p.u.}$	$\varphi_5/(\text{^\circ})$
中等非对称度小半波	0.707	0.045	0.838	-45	0.10	-30	0.03	20
最大非对称度大半波	1.00	0.120	0.907	0	0.10	60	0.05	-30
中等非对称度大半波	0.866	0.075	0.882	30	0.08	-10	0.03	40

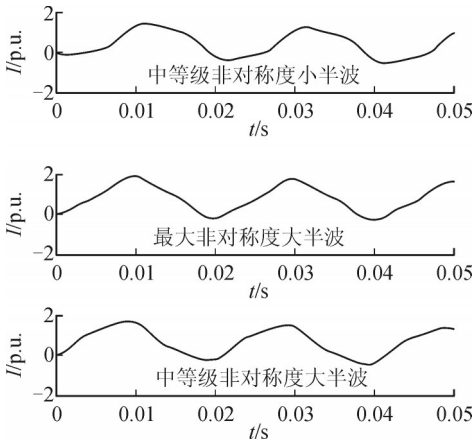


图 4 3 种典型的测试电流波形

Fig. 4 Three typical test current waveforms

设置每个工频周期的采样 200 个点, 对上述推导得出的积分法、差分法、组合法求解公式离散化, 分别对 3 种典型的短路电流波形提取直流分量特征参数, 时间常数 τ 和初始值 I_0 的计算结果见表 2。

比较表 1、2 中直流分量特征参数 τ 和 I_0 的数值, 结果表明积分法、差分法、组合法对 3 种典型波形的直流分量特征参数计算零偏差。进一步对表 1 中的 3 种典型的波形加入信噪比为 30 dB、60 dB 的高斯白噪声信号, 应用积分法、差分法、组合法对直流分量特征参数的计算结果分别见表 3、4。

分析表 3、4 的计算结果, 可以发现 3 种计算方法对叠加信噪比 60 dB 高斯白噪声信号的计算结果

表 2 3 种典型的测试电流波形直流分量特征参数计算结果

Table 2 Calculation results of characteristic parameters of DC component of three typical test current

3 种典型波形	$I_0/\text{p.u.}$			τ/s		
	积分法	差分法	组合法	积分法	差分法	组合法
中等非对称度小半波	0.707	0.707	0.707	0.045	0.045	0.045
最大非对称度大半波	1.000	1.000	1.000	0.120	0.120	0.120
中等非对称度大半波	0.866	0.866	0.866	0.075	0.075	0.075

表 3 叠加信噪比 30 dB 高斯白噪声后直流分量特征参数计算结果

Table 3 Calculation results of characteristic parameters of DC component with 30 dB Gaussian white noise

3 种典型波形	$I_0/\text{p.u.}$			τ/s		
	积分法	差分法	组合法	积分法	差分法	组合法
中等非对称度小半波	0.708	0.637	0.700	0.045	0.035	0.050
最大非对称度大半波	1.000	0.950	1.010	0.116	0.165	0.137
中等非对称度大半波	0.865	1.030	0.884	0.075	0.079	0.082

表4 叠加信噪比60 dB 高斯白噪声后直流分量特征参数计算结果

Table 4 Calculation results of characteristic parameters of DC component with 60 dB Gaussian white noise

3种典型波形	$I_0/\text{p.u.}$			τ/s		
	积分法	差分法	组合法	积分法	差分法	组合法
中等非对称度小半波	0.707	0.738	0.707	0.045	0.048	0.045
最大非对称度大半波	1.000	1.080	1.000	0.120	0.131	0.120
中等非对称度大半波	0.866	0.808	0.866	0.075	0.068	0.075

要优于叠加信噪比30 dB 高斯白噪声信号。叠加高斯白噪声信号后,3种算法的计算精度依次为积分法、组合法、差分法。产生这种结果的主要原因是积分法在一个周期上积分,因此本身具备一定的滤波效果;而差分法是间隔为一个周期上的两个点差分,因此不具备滤波效果,且计算结果有很强的随机性;组合法的是两种算法的结合,精度介于两者之间,同样结果有一定的随机性。

3.2 实测短路电流波形

某750 kV 系统A处单相短路故障实测波形见图5,应用积分法对图5的短路电流进行直流分量特征参数计算结果见图6。由于短路波形的起始部分有一定程度的畸变,直流时间常数的计算结果在对应的时刻为奇异点,因此需要滤除这些奇异点。计算结果显示:时间常数随着短路时间逐渐衰减,最大值为92.7 ms,最小为76.5 ms,平均值为80.0 ms。直流分量起始值为2.95 kA。

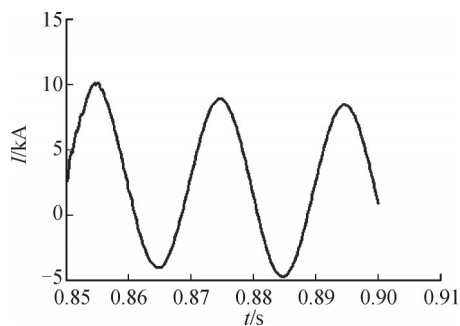


图5 某750 kV 系统A处单相短路故障实测波形

Fig. 5 Measured waveform of single phase short-circuit

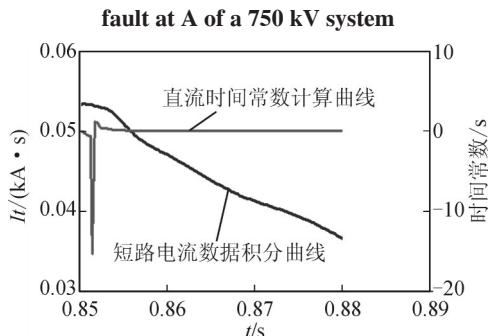


图6 短路电流直流分量特征参数计算结果

Fig. 6 Calculation results of DC component characteristic parameters of short-circuit current

某750 kV 系统B处单相短路故障实测波形见图7,应用积分法对图7的短路电流进行直流分量特征参数计算结果见图8。由于短路波形的第一个半波有一定程度的畸变,直流时间常数的计算结果在对应的时刻为奇异点,因此需要滤除这些奇异点。计算结果显示:时间常数随着短路时间也发生变化,最大值为52.4 ms,最小为36.5 ms,平均值为43.5 ms。直流分量起始值为0.5 kA。

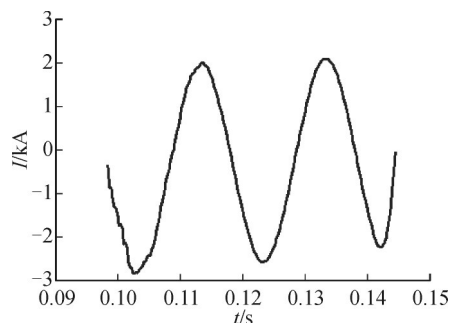


图7 某750 kV 系统B处单相短路故障实测波形

Fig. 7 Measured waveform of single phase short-circuit fault at B of a 750 kV system

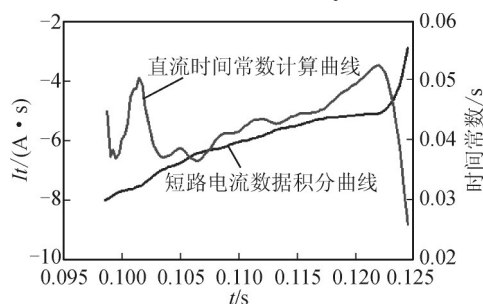


图8 短路电流直流分量特征参数计算结果

Fig. 8 Calculation results of DC component characteristic parameters of short-circuit current

电网中发生短路故障时,当接地电弧的电阻随着时间的变化较小或者接地电弧的电阻相对系统的直流电阻可以忽略时,系统的直流时间常数随着时间的变化也较小,见图6;当接地电弧的电阻随着时间的变化较大且接地电弧的电阻相对系统的直流电阻不可以忽略时,系统的直流时间常数随着时间的变化较大,见图8。由于积分法本身具备一定的滤波效果,因此可以处理电网短路电流直流分量特征参数随时间变化的问题。

4 结论

文中研究与提出了积分法、差分法、组合法3种方法来计算电网中短路电流直流分量特征参数,主要得出以下结论:

1)通过含有3次、5次谐波的3种典型的理想短路电流波形:中等非对称度小半波、最大非对称度大半波、中等非对称度大半波,对积分法、差分法、组合法进行测试,3种计算方法对直流分量特征参数的计算零偏差。

2)对理想短路电流波形叠加高斯白噪声信号后,积分法表现出很高的计算精度,这主要是其自身具有一定滤波效果。信噪比越高对3种算法的影响越低,反之信噪比越低对3种算法的影响越高。

3)叠加高斯白噪声信号后,差分法和组合法的计算结果对噪声信号的依赖性很强,针对实际的波形可以通过滤波后再计算,可以提高计算的准确性。

4)实际电网中短路电流的交流分量有效值也会以一定的时间常数衰减,直流时间常数受电阻性元件的非线性变化也会发生变化。两者的变化时间常数应该均大于一个工频周期的时间,因此可以应用文中所提的计算方法进行分段处理,每一段的时间跨度为一个工频周期。

参考文献:

- [1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
RUAN Qiantu. Present situation of short circuit current control in Shanghai power grid and countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83.
- [2] 曹 炜, 王永生, 张文青, 等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 283-288.
CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing, et al. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 283-288.
- [3] 三相交流系统短路电流计算 第1部分 电流计算: GB/T 15544.1—2013[S]. 2013.
Short-circuit current calculation in three-phase AC systems—Part 1: Calculation of currents: GB/T 15544.1—2013[S]. 2013.
- [4] 张 勇, 王云辉, 沈建涛, 等. 输电网短路电流计算[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 39-42.
ZHANG Yong, WANG Yunhui, SHEN Jiantao, et al. Research of short-circuit current calculation in transmission network[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 39-42.
- [5] 汤 涌. 电力系统短路电流计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
TANG Yong. Computation of short-circuit current in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [6] 中国电力科学研究院. 特高压输电技术交流输电分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
China Electric Power Research Institute. UHV transmission technology AC transmission branch[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [7] KASIKCI I. Short circuits in power systems practical guide to IEC 60909[M]. Germany: Wiley-VCH Verlag-GmbH, 2002.
- [8] 曹 炜, 王 伟, 刘 蓓, 等. 受端电网负荷动态特性与三相短路电流相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 61-65.
CAO Wei, WANG Wei, LIU Bei, et al. Analysis on relativity between load dynamics and three-phase short-circuit current of receiving-end power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 61-65.
- [9] 蒲如兰. 短路电流中的周期分量和非周期分量对高压断路器运行状态的影响[J]. 福建电力与电工, 1994, 14(2): 20-22.
PU Rulan. The effect of symmetrical short-circuit current and its DC offset on high voltage circuit breaker operating conditions[J]. Fujian Electric Power and Electrotechnics, 1994, 14(2): 20-22.
- [10] 高压交流断路器: GB 1984—2014[S]. 2014.
High-voltage alternating current circuit-breakers: GB 1984—2014[S]. 2014.
- [11] 米尔萨德·卡普塔诺维克. 高压断路器理论、设计与试验方法[M]. 闫 静, 王建华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
KAPETANOVI M. High voltage circuit breakers[M]. YAN Jing, WANG Jianhua, translation. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [12] 罗 为, 丘家驹, 魏路平. 电力系统断路器遮断容量实时校核[J]. 华东电力, 2004, 32(4): 17-19.
LUO Wei, QIU Jiaju, WEI Luping. Real-time check of circuit breaker interrupting capacity in power system[J]. East China Electric Power, 2004, 32(4): 17-19.
- [13] 袁洪平, 李冬根. 短路电流对高压断路器及其开断电流选择的影响[J]. 江西电力, 2009, 33(1): 42-45.
YUAN Hongping, LI Donggen. The effect of short-circuit current on high voltage circuit breakers and its interrupting current[J]. Jiangxi Electric Power, 2009, 33(1): 42-45.
- [14] 周大敏. 递推富氏算法中衰减非周期分量的消除方法[J]. 继电器, 1998, 26(5): 5-7.
ZHOU Damin. Elimination of decaying aperiodic components in recursive fourier algorithm[J]. Relay, 1998, 26(5): 5-7.
- [15] 熊 岗, 陈 陈. 一种能滤除衰减直流分量的交流采样

(下转第 280 页)

- (1):158-164.
- [17] LIU Qiang, WANG Chengen. Pipe-assembly approach for aero-engines by modified particle swarm optimization[J]. Assembly Automation, 2010, 30(4): 365-377.
- [18] 唐勇波. 数据驱动的大型电力变压器故障诊断和预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- TANG Yongbo. Data-driven fault diagnosis and prediction for large-scale power transformer[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [19] 武中利. 电力变压器故障诊断方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- WU Zhongli. Research on fault diagnosing methods for power transformers[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [20] 高文军. 基于人工免疫算法优化支持向量机的电力变压器故障诊断研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- GAO Wenjun. Study on fault diagnosis for power transformer based on support vector machine of artificial immune algorithm[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [21] 李 俭. 大型电力变压器以油中溶解气体为特征量的内部故障诊断模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- LI Jian. Study on the models of fault diagnosis about power transformer based on dissolved gases analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [22] 郭创新, 朱承治, 张 琳, 等. 应用多分类多核学习支持向量机的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 128-134.
- GUO Chuangxin, ZHU Chengzhi, ZHANG Lin, et al. A fault diagnosis method for power transformer based on multiclass multiple-kernel learning support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 128-134.
- [23] 柳 强, 王成恩. 基于Kriging模型的复杂产品管线敷设顺序粒子群优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 140-146.
- LIU Qiang, WANG Cheng'en. Kriging model-based routing sequence planning for complex products by particle swarm optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 140-146.
- [24] 刘 瞻, 张建国, 王灿灿, 等. 基于优化Kriging模型和重要抽样法的结构可靠度混合算法[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1347-1355.
- LIU Zhan, ZHANG Jianguo, WANG Cancan, et al. Hybrid structure reliability method combining optimized Kriging model and importance sampling[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1347-1355.
- [25] 游海龙, 贾新章. 基于遗传算法的Kriging模型构造与优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(1): 64-68.
- YOU Hailong, JIA Xinzhang. The construction and optimization of Kriging metamodel based on genetic algorithms[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(1): 64-68.

柳 强(1982—), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事故障诊断方法、电力经济调度、多目标优化等研究工作。

丁 宇(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事变压器故障诊断等方面的工作(通讯作者)。

(上接第273页)

- 新算法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(2): 24-26.
- XUN Gang, CHEN Chen. A new AC sampling algorithm for filtering attenuated DC components[J]. Power System Automation, 1997, 21(2): 24-26.
- [16] 幸晋渝, 刘 念, 郝江涛, 等. 故障电流中衰减直流分量的滤波算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(13): 10-12.
- XIN Jinyu, LIU Nian, HAO Jiangtao, et al. Study on filtering algorithm of attenuated DC component in fault current[J]. Relay, 2005, 33(13): 10-12.
- [17] 杨纪明, 马志瀛, 金立军. 基于小波变换的短路电流各分量的计算[J]. 电工技术, 1999(6): 13-15.
- YANG Jiming, MA Zhiying, JIN Lijun. Calculation of components of short-circuit current based on wavelet transform[J]. Electrical Engineering Technology, 1999(6): 13-15.

王 蒙(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网规划、电网安全运行及分析等方面的研究。

张文朝(1978—), 男, 博士, 硕士生导师, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究工作。

高享想(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压电器产品大容量试验检测和试验技术研究以及试验回路设计与开发工作。

曹生顺(1961—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网规划、电网安全运行及分析等方面的研究。

汪 莹(1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网规划、电网安全运行及分析等方面的研究。