

直接试验时间常数计算及其对短路开断试验的影响分析

胡 勋¹, 胡 博², 万 媛³, 宇文博¹, 陶 群¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 陕西 西安 710077; 2. 陕西清水川能源股份有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 西安西电电气研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 基于短路电流的表达式, 根据现有试验数据, 推导了短路电流直流分量衰减时间常数的三种计算方法。分析不同方法的适用条件, 并从直流分量、燃弧时间、最后电流半波参数、恢复电压和TRV参数计算等方面分析了直接试验中, 不同直流分量时间常数对断路器短路电流开断性能的影响, 并对标准规定时间常数参数进行量化。结果表明, 系统时间常数越大, 直流分量百分数越大且衰减越缓慢, 燃弧窗口越长, 电弧能量越大, 电流过零息弧时 di/dt 与TRV有所降低。以某试品直接试验数据为算例搭建仿真模型, 模拟12 kV/40 kA短路开断, 仿真结果验证了文章对时间常数对短路开断影响分析方案的有效性及其正确性, 为直接短路试验提供了很好的理论参考依据。

关键词: 直流分量; 时间常数; 断路器; 短路开断

Calculation of time constant of direct test and analysis of its influence on short circuit breaking test

HU Xun¹, HU Bo², WAN Yuan³, YU Wenbo¹, TAO Qun¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Shanxi Qing Shuichuan Energy Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Based on the expression of short-circuit current, according to the existing test data, three kinds of calculation methods of DC component of short circuit current decay time constant are derived. Analyzing the applicable conditions of different methods, and from the DC component, arcing time, final current half wave parameter, recovery voltage and TRV parameter, the influence of different DC component time constant on direct current short-circuit current interruption performance in direct test is analyzed, and the standard time constant parameter is quantified. The results show that the greater the time constant of the system is, the greater the percentage of the DC component is, and the slower the attenuation is, the longer the arc window is, the greater the energy of the arc is, when the current is zero, the di/dt and TRV are reduced. Taking a pilot test data as an example, a simulation model is built to simulate the 12 kV/40 kA short-circuit fault. The simulation results verify the validity and correctness of the time constant analysis scheme for short-circuit interruption, which provides a good theoretical reference for direct short-circuit test.

Key words: DC component; time constant; circuit breaker; short circuit breaking

0 引言

迄今,我国对短路开断电流数据的考核主要聚焦在计算周期分量上,反而忽略了直流分量与试验回路时间常数对断路器开断短路电流的影响,且没有对其影响程度作出一个量化的分析。伴随电网系统中发电机、变压器等设备容量的日益增大及输电电压等级的提高,一次系统中电抗及电阻的比值增加,即系统直流分量时间常数愈发增加,对断路器现实开断能力的表现也越来越显著。对直接试验,假如试验回路的时间常数大于断路器开断额定短路电流的衰减时间常数,最终的 di/dt 和 u_c 会小于常规运行环境,反之亦然。试品刚分点的非对称度将影响试验时的负载不等于正常运行环境下的预期负荷,那么确认检测室试验等效性的唯一途径是考核反映瞬态恢复电压(TRV)参数的 di/dt 、电流零点的非对称水平以及反映电弧能量的最后半波电流幅值及持续时间。对于开断非对称短路电流,在交流分量有效值相等的工况下,假如直流分量的时间常数不同,短路电流的直流分量、试品开断的燃弧窗口、 di/dt 以及电流过零后的TRV参数都将有所不同。

1 直流分量衰减时间常数

1.1 非对称短路电流计算模型

当电网系统a点突发短路时,如图1所示。通过简化系统,可以用单相等效电路图表示,如图2所示。

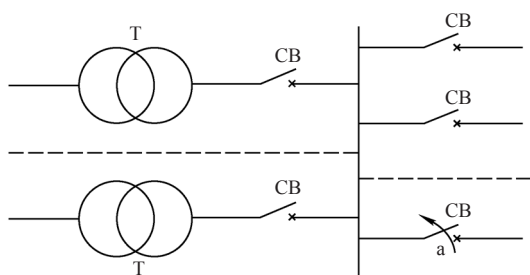


图1 电网短路故障图

Fig. 1 Short circuit fault diagram of power grid

图2中,CB为试品断路器; L 、 R 分别为系统等值电抗及系统等值电阻; R_0 、 C_0 分别为调频电阻、调频电容。则系统电源电压可表示为

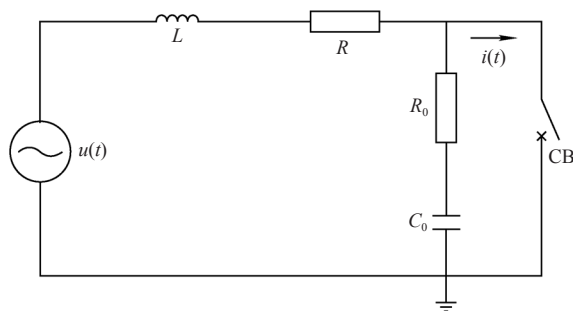


图2 等效单相试验回路

Fig. 2 Equivalent single-phase test circuit

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

当零点时刻突发短路故障时,电路图中断路器闭合,此系统动态过程即为一个一阶电路全响应,表达式为

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

式中, α 为电压初始相角; U_m 为电压幅值。

全响应的解为

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t) \\ = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\omega L}\right) \quad (5)$$

式中, i_{ac} 为短路电流中的交流分量; i_{dc} 为短路电流中的直流分量; Z 为系统阻抗; φ 为系统回路阻抗相角; τ 为系统回路时间常数,其反映了直流分量的衰减快慢。

$$\tau = L/R \quad (6)$$

直流分量由短路过程中系统感应电势及回路阻抗所确定,呈指数衰减趋势,初始值大小与阻抗角和短路时刻电压角度有关,当系统频率一定的工况下, L/R 比值越大,直流分量衰减越慢。

2 直流时间常数计算

IEC 62271-100和GB 1984-2014中都对试验回路的直流时间常数作了明确的规定。不同电压等级的试验对试验参数的要求不同,因此试验回路时间常数也不同,导致试验中出现如何能满足

标准要求的时间常数的问题。此问题主要涉及试验回路参数的计算和试验回路建设,因此国内外涉及这些参数的计算比较少。根据现有试验参数数据,利用测量软件,确定出可通过三种方法来计算直接试验系统的时间常数,并分析比较三种方法的优缺点。

(1) 方法一

1) 从试验示波图上读取短路电流的直流分量百分数 $dc\%$ 和交流分量的有效值 I_{ac} 。

2) 计算直流分量的值。

3) 将直流分量的值代入公式,计算 τ 值。计算公式为

$$\frac{I_{dc}}{I_{ac}} \times 100 = dc\% \quad (7)$$

$$i_d = I_d e^{\frac{R}{L}t} = I_d e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

式中, i_d 为任意时刻的直流分量; I_d 为直流分量的初始值; t 为 i_d 和 I_d 之间的时间间隔。

以某厂家所做12 kV/40 kA断路器的电寿命试验为例计算,选取单分的试验方式,测量电流值为 I_A 。试验状态如图3、图4所示。

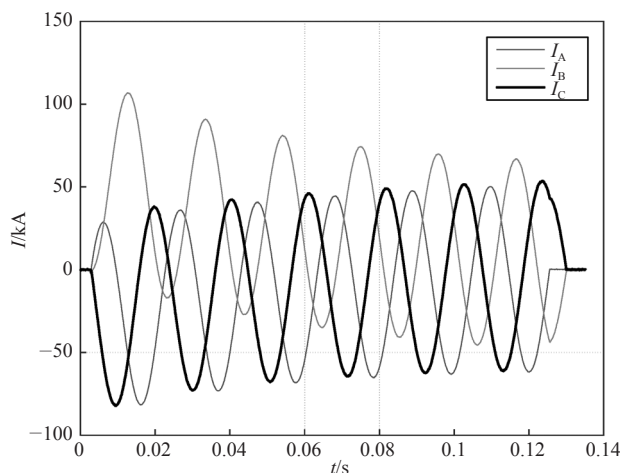


图3 三相短路试验电流

Fig. 3 Three-phase short-circuit test current

1) 从图4中读取电流起始时刻($\Delta t=0$ ms)直流分量百分数 $dc\%=21.87\%$ 。

2) 然后读取短路电流任一时刻直流分量百分数,此处选取 $\Delta t=100.15$ ms处的直流分量百分数 $dc_2\%=4.28\%$ 。

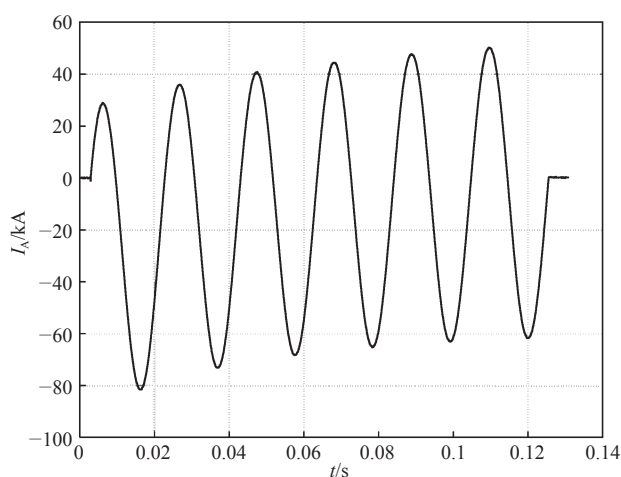


图4 A相短路电流

Fig. 4 A-phase short-circuit test current

3) 由于测量软件无法读取任一时刻短路电流交流分量的值,此处取 $dc_1\%$ 和 $dc_2\%$ 时间的一段区间($\Delta t_2 - \Delta t_1$),用测量软件计算器读取该区间交流分量 $I_{ac}=40.48$ kA。

4) 利用式(7)计算得出 $I_{dc1}=88.53$, $I_{dc2}=17.33$,将其代入式(8),计算得出 $\tau=61.4$ ms。

(2) 方法二

在图5任意相中采集两个时间点电流瞬时值,读取电流交流分量值,通过式(9)~式(11)计算出 τ 。

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} = i - I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{e^{-\frac{t_2}{\tau}}} &= \frac{i_1 - I_m \sin(\omega t_1 + \alpha - \varphi)}{i_2 - I_m \sin(\omega t_2 + \alpha - \varphi)} \quad (11) \\ e^{-\frac{t_2}{\tau}} &= i_2 - I_m \sin(\omega t_2 + \alpha - \varphi) \end{aligned}$$

(3) 方法三

根据直流分量百分数的确定方法,利用测量软件编辑出试验各档实际电流包络线,通过式(12)计算出此档试验时间常数。

$$\begin{aligned} \frac{I_{dc}}{I_{ac}} \times 100 &= \frac{\overline{ON} - \overline{OM}}{\overline{MN}} \times 100 \\ &= \left(\frac{2 \times \overline{ON}}{\overline{MN}} - 1 \right) \times 100 \quad (12) \end{aligned}$$

以方法一中所选取对象波形进行计算验证。

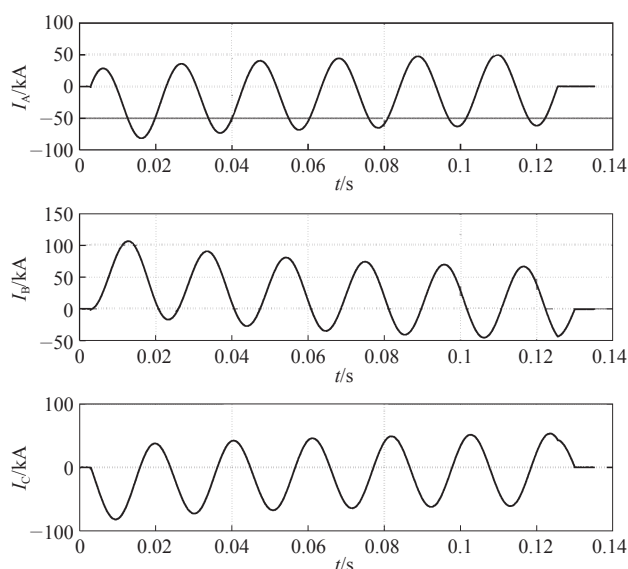


图5 三相短路电流

Fig. 5 Three-phase short-circuit current

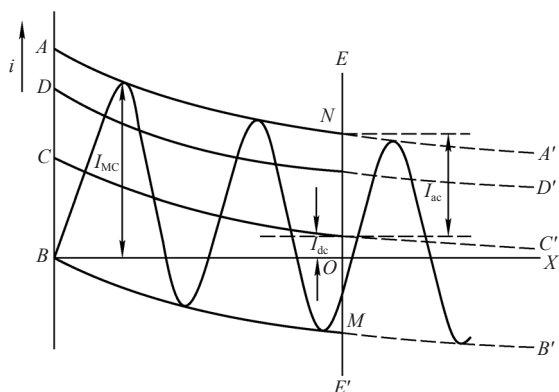


图6 直流分量百分数的确定

Fig. 6 Determination of the percentage of DC component

画出A相电流包络线，如图7所示。选取 $i_d=2.792$ ， $I_d=9.874$ ， $t=87.8$ ms带入式（8），得

$$12.792 = 9.874 \times e^{-\frac{87.8}{\tau}}$$

$$\tau = 69.6$$

比较各种方法，方法一与方法二只是选取试验中其中的两个瞬时时间点的数值进行计算，假如试验要求直流分量较大，实验室为达到试验值所做出的半波数较少时，适用于这两种方法。由于电源衰减及瞬时值并不能代表整个试验波形的趋势，即不能代表整个系统 t 值，方法三表现的是总体电流的直流衰减趋势，虽然之前已经对各点数据进行过计算处理，但是，针对只取两点值进行时间常数计算，与准确值间误差较小。

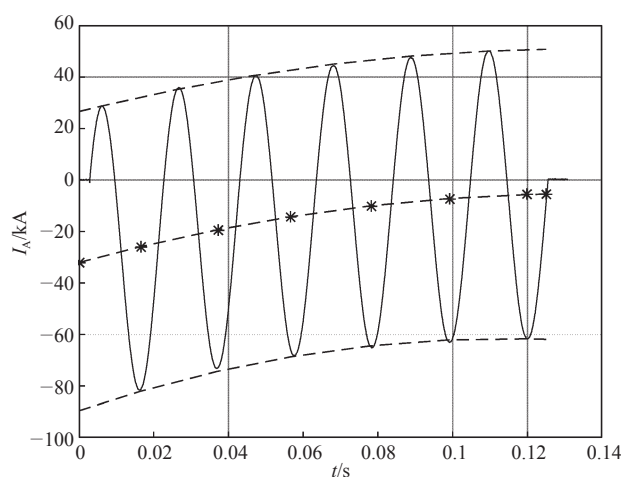


图7 A相短路电流包络线

Fig. 7 A phase short circuit current envelope

图8为标准规定时间常数曲线图。从图8中可以看出，时间常数越大，直流分量衰减越慢。

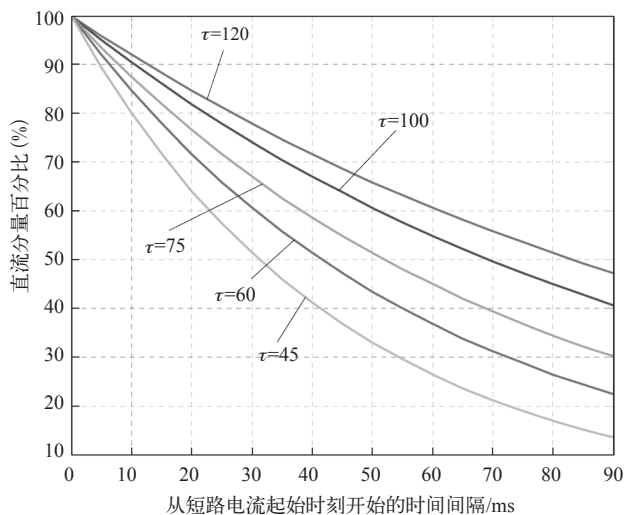


图8 标准时间常数曲线图

Fig. 8 Standard time constant graph

3 时间常数对短路开断的影响分析

由于直流偏置的作用，使短路电流暂态偏离标准的正弦波，区别于周期分量，取而代之的是一个大半波和一个小半波交替出现。大半波时，电流持续时间长，幅值大，进而产生的电弧能量大，开断相对困难；小半波时，电流持续时间短，幅值小，产生电弧能量小，开断相对轻松。根据式（3），综合比较，直流分量的存在致使短路开断电流总的有效值变大，电弧能量随之增加，进而提高了试品开断短路故障电流的困难程度。

3.1 时间常数对直流分量的影响

根据制造厂规定的断路器的最短分闸时间加继电器时间后触头分离时刻的直流分量大于20%时,触头刚分点的直流分量百分数按下式计算

$$dc\% = 100 \times e^{\frac{-(T_{op}+T_r)}{\tau}} \quad (13)$$

式中, T_{op} 为制造厂声明的最短分闸时间; T_r 为继电器保护动作时间(0.5周波)。

对于50 Hz为10 ms,假设 T_{op} 为25 ms,当额定短路电流的时间常数为45 ms、60 ms、75 ms、100 ms和120 ms时,根据式(13)得出试品刚分点的直流分量百分数为46%、56%、63%、70%和75%。综上所述,试验回路中直流分量时间常数与触头刚分点短路电流中的直流分量成正比,且 τ 越大衰减越慢,亦增加了断路器开断短路电流的困难程度。

3.2 时间常数对燃弧窗口的影响

试品开断三相短路电流时,基于三相中各极电流不同时过零,故三相电弧也不会同时熄灭,因此断路器是以特定的次序来开断故障。首开极的恢复电压最严酷,后开极的燃弧时间较长。

试品在开断非对称短路电流试验中,必须考核最短燃弧时间、最长燃弧时间和中燃弧时间下的三种开断方式。短燃弧时在小半波灭弧。以中性点有效接地系统的T100a试验方式为例,要求的最长燃弧时间计算公式为

$$t_{arc\max} \geq t_{arc\min} + \Delta t_1 - T \times \frac{d\alpha}{360} \quad (14)$$

式中, $t_{arc\min}$ 为第一次有效开断中获得的最短燃弧时间; Δt_1 为大半波的持续时间; $d\alpha$ 为脱扣脉冲值(步长为18°); T 为工频的一个周期。

随着时间常数变大,最小燃弧时差也随之变大。假定试品最短开断时间为22.0 ms $\leq t \leq$ 43.0 ms,当系统回路的时间常数分别为45 ms、60 ms、75 ms、100 ms和120 ms时,最小燃弧时差即为11 ms、12 ms、12.5 ms、13 ms和13.5 ms,根据式(14),燃弧时差的递增将使长燃弧及中燃弧随之增加,伴随着电弧能量的增大,亦增大了断路器

开断短路电流的困难程度。

3.3 时间常数对最后半波电流参数的影响

根据GB 1984—2014断路器最短开断时间为22.0 ms $\leq t \leq$ 42.5 ms,非对称方式T100a试验时,表1给出了开断前的最后半波短路电流的要求值。其中, I 为与对称短路电流峰值相关的峰值电流的标么值; Δt_2 为小半波的持续时间。

表1 与短路试验方式T100a相关的最后电流半波参数(50 Hz)

Tab. 1 Parameters of the final current half-wave associated with the short circuit test mode T100a(50 Hz)

时间常数 τ /ms	大半波				小半波			
	I (pu)	Δt_1 /ms	电流零点 直流分量 的百分数 (%)	电流零点 di/dt (额定 对称电 流 di/dt 的百分 数) (%)	I (pu)	Δt_2 /ms	电流零点 直流分量 的百分数 (%)	电流零点 di/dt (额定 对称电 流 di/dt 的百分 数) (%)
45	1.33	12.0	28.9	97.8	0.59	7.5	37.9	89.9
60	1.44	13.0	39.2	94.1	0.49	6.5	48.6	84.8
75	1.51	13.5	47.1	90.2	0.41	6.0	56.4	80.2
100	1.60	14.0	56.0	81.8	0.34	5.5	64.2	78.7
120	1.66	14.5	62.1	80.0	0.28	5.0	70.2	69.4

由表1可以得出,系统回路的时间常数与大半波的电流峰值、半波持续时间和电流零点直流分量的百分数皆成正比,与大半波的电流零点 di/dt 成反比;与小半波的电流峰值、半波持续时间和电流零点 di/dt 成反比,与小半波的电流零点直流分量的百分数成正比。

3.4 时间常数对TRV的影响及计算分析

3.4.1 恢复电压参数的影响

系统发生短路时,断路器触头分开产生电弧,弧隙两端的电压为电弧电压,一定时间电流过零电弧熄灭,出现电压恢复过程。首先出现在弧隙两端的是具有瞬态特性的TRV,其保持时间很短,只有几十微秒到几毫秒,TRV消失后弧隙两端出现的是由工频电源决定的电压,即弧隙两端恢复电压的稳态值。断路器能否成功开断的重要因素是TRV的幅值和上升率,如果幅值越高,且上升率越快,开断越不易。本文将着重解析断路器开断非对称短路电流后的弧隙间TRV参数。

式(3)中, $\varphi = \tan^{-1} 2\pi f\tau$, τ 为回路时间常数, 当 $\alpha = \beta - \pi/2$ 时, 达到最大非对称, 触头分离时刻的直流分量为

$$dc_1 = \sin(\alpha - \varphi)e^{-t_1/\tau} = e^{-t_1/\tau} \quad (15)$$

设 t_0 时电流过零, 此时短路电流的非对称度为

$$dc_0 = \sin(\alpha - \varphi)e^{-t_0/\tau} = e^{-t_0/\tau} \quad (16)$$

假设燃弧时间为 $t_a = t_0 - t_1$, 电流零点的非对称度亦可为

$$dc_0 = dc_1 e^{-t_a/\tau} \quad (17)$$

电流零点的变化率为

$$di(t_0)/dt = 2\pi f I_m \left(\frac{dc_0}{2\pi f \tau} \pm \sqrt{1 - dc_0^2} \right) \quad (18)$$

大半波取+, 小半波取-, 则电流零点的变化率百分数为

$$di(t_0)/dt = \frac{dc_0}{2\pi f \tau} \pm \sqrt{1 - dc_0^2} \quad (19)$$

当 $i(t_0)=0$ 时, 由式(2)、式(18)和式(19)得

$$U_m \sin(\omega t_0 + \alpha) = L di(t_0)/dt = U_m di/dt \quad (20)$$

基于TRV的峰值由熄弧时电源电压决定, 则非对称开断时的TRV峰值为

$$u_{dc} = u_c(di/dt) \quad (21)$$

根据式(20)和式(21), 电流零点的非对称水平 dc_0 决定着 di/dt 和TRV的峰值, dc_0 的增加会使 di/dt 和TRV峰值的减小。最后半波电流幅值和持续时间可通过式(3)获得, 它们映射出试品所开断的电弧能量大小。综上所述, 只要确定最后半波电流的幅值、持续时间以及电流零点的直流分量和 di/dt , 就能保证与实际环境运行时相同的电弧能量及TRV。

3.4.2 TRV参数计算与分析

非对称故障条件下(T100a), 叠加在故障电流上的直流分量改变了最终的 di/dt 与TRV, 开断时, 和对称故障条件不同, 电流零点时刻不对应于外施电压的峰值。即由于直流偏置的存在改变了电流零点与外施工频电压之间的相角。根据电流零点时刻和所加工频电压峰值之间相位移来修正TRV幅值的大小。依据GB/T 1984—2014附录P, 对两参数法表征的首开极TRV参数作以下修

正。

$$u_c(\text{pu}) = \frac{k_1 A_1}{2\pi f} \quad (22)$$

$$k_{1-} = \sin[2\pi f t_3 - \alpha \sin(p)] + p e^{-\frac{t_3}{\tau}} \quad (23)$$

(对于小半波)

$$k_{1+} = \sin[2\pi f t_3 + \alpha \sin(p)] - p e^{-\frac{t_3}{\tau}} \quad (24)$$

(对于大半波)

$$A_1 = \frac{2\pi f}{\sin(2\pi f t_3)} \quad (25)$$

式中, u_c 为相对于对称情况下的TRV峰值的标么值; k_1 计算常数; -用来标识小半波的下标, +用来标识大半波的下标; A_1 为计算常数; p 为电流零点的直流分量的标么值。

例如试品的额定电压为12 kV, 额定短路电流为40 kA, 频率为50 Hz, 时间常数分别为45 ms、60 ms、75 ms、100 ms和120 ms, 规定最短分闸时间为25 ms, p 从表1中查得, 由标准中获得12 kV断路器的预期参数 $u_c=20.6$ kV, $t_3=61$ μ s, RRRV=0.34。将以上参数带入上式, 计算结果如表2所示。

表2 不同时间常数时的首开极预期TRV参数

Tab. 2 The first polar expected TRV parameters of different time constants

时间常数 τ/ms	大半波			小半波	
	TRV 峰值 u_c/kV	RRRV $u_c/t_3/$ (kV/ μ s)		TRV 峰值 u_c/kV	RRRV $u_c/t_3/$ (kV/ μ s)
45	20.08	0.329		18.60	0.305
60	19.30	0.316		17.57	0.288
75	18.49	0.303		16.63	0.273
100	17.32	0.284		15.50	0.254

根据计算分析得出, 12 kV断路器在开断非对称试验方式T100a中, 不管电弧在大、小半波过零时熄弧, TRV峰值和上升率(RRRV)皆与系统时间常数成反比, 对后开极开断短路电流时同样适用, 即试品开断后触头两端的瞬态恢复电压比无周期分量时低, 有利于试品开断。

4 仿真实验

搭建仿真模型, 设定电源电压为12 kV, 短路电流为40 kA, 回路电感为0.000 550 4 H, 功率电

阻为 $0.012\ 23\ \Omega$ ，时间常数为 $45\ \text{ms}$ ，回路成感性回路，系统模型如图9所示。图9中，SP为试品断

路器，HK为合闸开关，通过调整三相合闸开关选相，满足大、小半波开断。

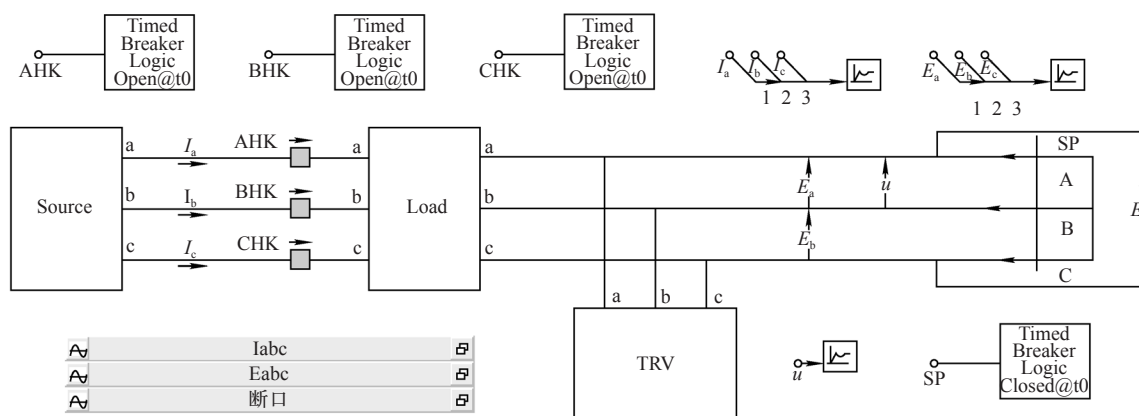


图9 系统仿真模型

Fig. 9 System simulation model

4.1 开断对称电流

调节三相合闸开关选项，满足对称电流开断要求，调节回路TRV使试品开断短路电流时，满足标准TRV参数要求，仿真波形如图10～图15所示。

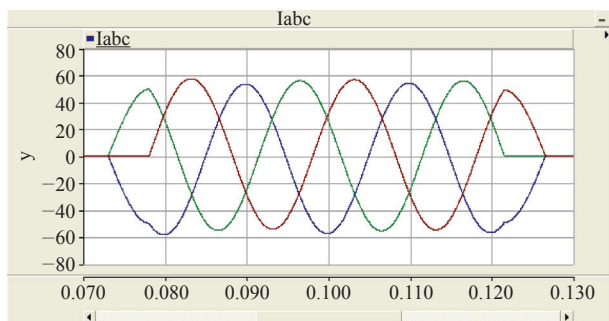


图10 三相对称电流

Fig. 10 Three phase symmetrical current

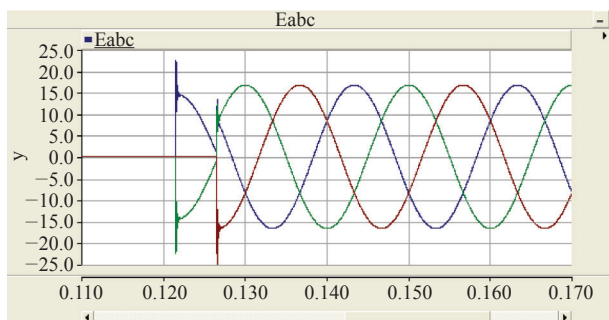


图11 三相恢复电压

Fig. 11 Three phase recovery voltage

首开极为B相, 由示波图中读出 $u_c=22.342\text{ kV}$

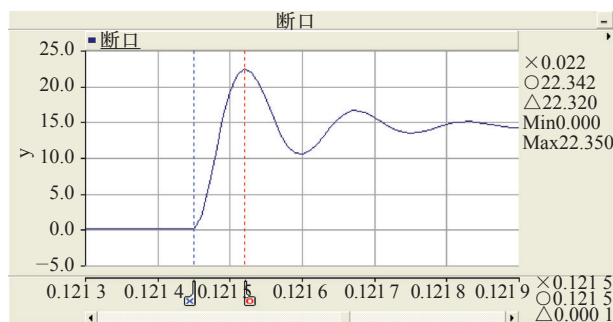


图12 B相首开极TRV1

Fig. 12 The first polar TRV of B phase 1

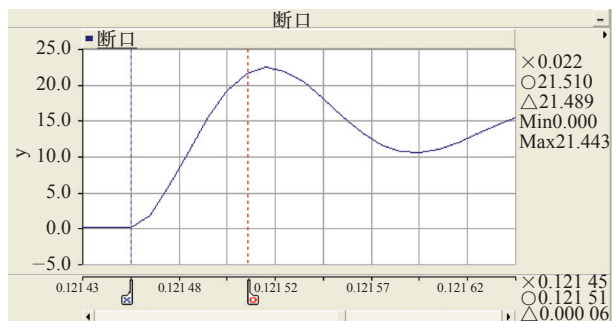


图13 B相首开极TRV2

Fig. 13 The first polar TRV of B phase2

(标准要求为20.6~22.66 kV), $t_3=62.8 \mu\text{s}$, $\text{RRRV}=0.36$ (标准要求0.34~0.391)。改变时间常数, 调整为75 ms时 ($L=0.000\ 550\ 4 \text{ H}$, $R=0.007\ 338 \Omega$), 由示波图读出 $u_c=21.972 \text{ kV}$, $t_3=62.7 \mu\text{s}$, $\text{RRRV}=0.35$, 验证时间常数增大时, u_c 峰值减小, 上升率减小。

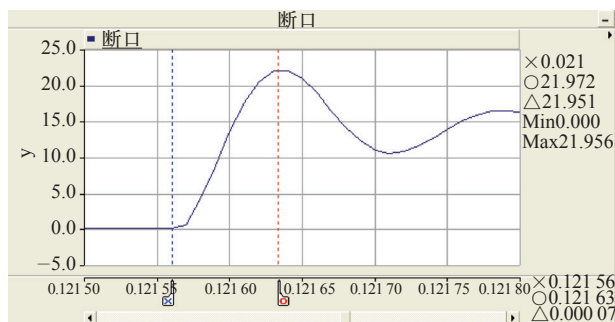


图14 B相首开极TRV1

Fig. 14 The first polar TRV of B phase

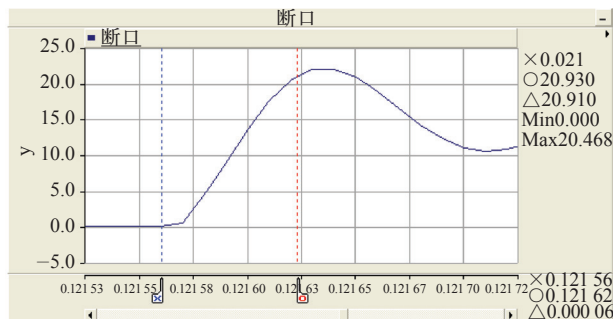


图15 B相首开极TRV2

Fig. 15 The first polar TRV of B phase 2

4.2 开断非对称电流

仿真波形如图16~图21所示。

4.2.1 首开小半波

调节三相合闸开关选项，在满足非对称开断小半波要求的同时，读取TRV参数。由示波图读出，A相首开小半波最后半波时间为7.5 ms时， $u_c=20.125$ kV， $t_3=61.3$ μ s，RRRV=0.33。

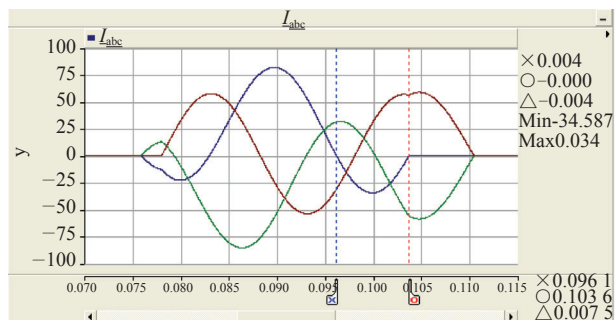


图16 三相非对称电流

Fig. 16 Three phase asymmetrical current

4.2.2 首开大半波

调节三相合闸开关选项，在满足非对称开断大半波要求的同时，读取TRV参数。由示波图读出，C相首开大半波最后半波时间为12 ms时，

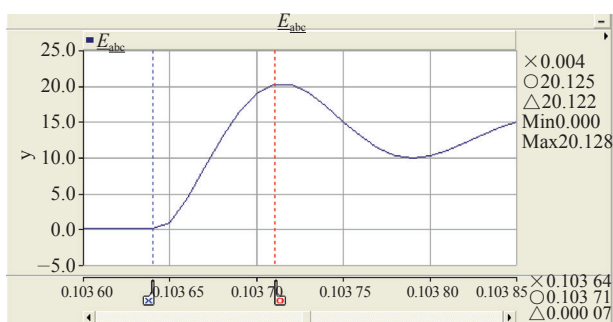


图17 A相首开极TRV

Fig. 17 The first polar TRV of A phase

$u_c=21.568$ kV， $t_3=61.8$ μ s，RRRV=0.35。

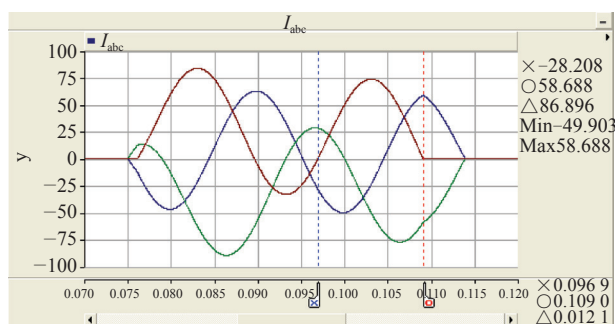


图18 三相非对称电流

Fig. 18 Three phase asymmetrical current

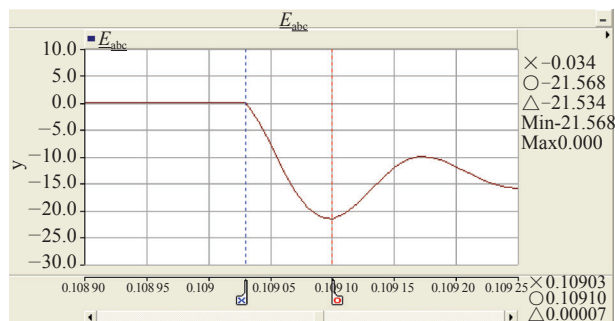


图19 C相首开极TRV

Fig. 19 The first polar TRV of C phase

同样在不改变其他参数工况下，仅改变功率电阻以调整回路时间常数，使原45 ms增大到75 ms ($L=0.0005504$ H， $R=0.007338$ Ω)。由示波图读出，小半波开断时， $u_c=19.781$ kV，大半波开断时， $u_c=20.590$ kV，峰值皆减小，即验证了时间常数与TRV峰值成反比。

5 结束语

总结分析了直接试验中直流分量时间常数的计算方法，基于标准规定的不同时间常数，从

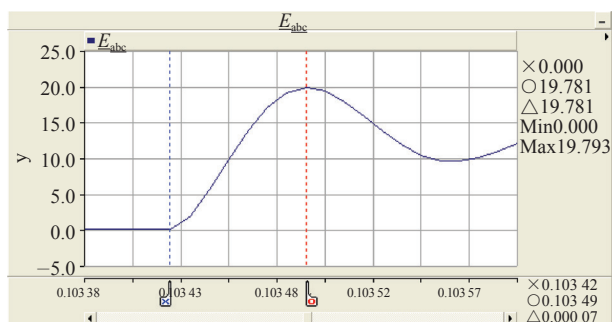


图20 A相首开小半波TRV

Fig. 20 The first minor loop TRV of A phase

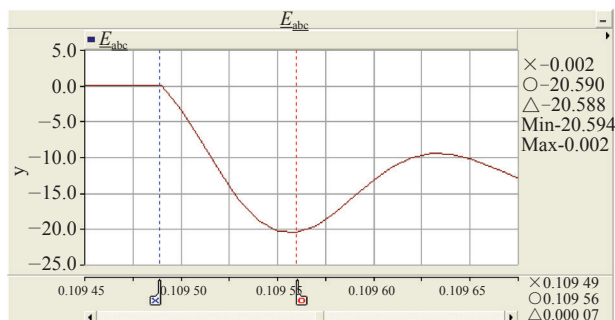


图21 C相首开大半波TRV

Fig. 21 The first major loop TRV of C phase

直流分量、最后电流半波的参数和TRV参数计算等方面对断路器开断短路电流性能进行了量化分析,得出以下结论:时间常数与短路开断电流中的直流分量百分数、燃弧窗口成正比,最后电流半波的参数随之发生变化,TRV峰值和上升率(RRRV)皆与系统时间常数成反比,即时间常数的增加会带来电流有效值、电弧能量的增加,虽然TRV有所减小,但试品开断时仍需根据断路器特性考虑主要影响因素。

参考文献

- [1] 高压交流断路器: GB 1984—2014[S].
- [2] 杨英杰, 王学斌, 孔祥军. 三相非对称故障开断试验探讨[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 382-384.
YANG Yingjie, WANG Xuebin, KONG Xiangjun. Discussion on asymmetrical short-circuit fault breaking test by circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 382-384.
- [3] Guide for asymmetrical short-circuit breaking test duty T100a: IEC/TR 62271—308—2002[S].
- [4] High-voltage switchgear and control gear part 109: IEC 62271—109[S].
- [5] High-voltage switchgear and control gear part 203: IEC 62271—203[S].
- [6] High-voltage switchgear and control gear part 100: IEC 62271—100[S].
- [7] 林集明, 顾霓鸿, 项祖涛. 特高压系统中的短路电流直流分量与零点漂移[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 1-5.
LIN Jiming, GU Nihong, XIANG Zutao. A study on time constant of DC component of short circuit current and current-zero offset in UHV systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 1-5.
- [8] 赵振元, 陈维荣, 戴朝华. 系统惯性时间常数对互联电网暂态稳定水平的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 102-107.
ZHAO Zhenyuan, CHEN Weirong, DAI Chaochua. Influence of system inertia time constants on transient stability level of interconnected AC power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 102-107.
- [9] 寇凌岳, 艾欣. 惯性时间常数对互联系统暂态稳定性影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 42-47.
KOU Lingyue, AI Xin. Simulation study of system inertia on power system transient stability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 42-47.
- [10] 徐国政, 张节容, 钱家骊. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [11] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13] 赵庆斌, 黄实, 吴钊. 发电机断路器非对称电流开断电流参数的计算与标准的分析[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 113-118.
ZHAO Qingbin, HUANG Shi, WU Zhao.

- Computation and comparison of current parameters of asymmetrical current breaking for generator circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 113-118.
- [14] 王汉明. 发电机断路器高非对称短路电流开断能力的探讨[J]. 广东水利水电, 2004(4): 72-75.
WANG Hanming. Discussion on interrupting capacity of generator circuit breaker to large non-symmetric short circuit current[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2004(4): 72-75.
- [15] 李刚, 姚斯立, 杜炜. UHV断路器非对称电流开断试验方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 20-24.
LI Gang, YAO Sili, DU Wei. Research on test method of asymmetric current breaking test for UHV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 20-24.
- [16] 刘路辉, 庄劲武. 燃弧时间对混合型直流真空断路器分断特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 55-60, 75.
LIU Luhui, ZHUANG Jinwu. Effect of arcing time upon the interruption characteristic of the hybrid DC vacuum circuit breaker [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 55-60, 75.
- [17] 刘小浩, 刘旭, 李健. 直流分量时间常数对断路器非对称开断性能影响分析[J]. 电工电气, 2016(8): 47-50, 58.
LIU Xiaohao, LIU Xu, LI Jian. Analysis of direct current component time constant influence on asymmetrical breaking ability of circuit breakers[J]. Electrical Appliance, 2016(8): 47-50, 58.
- [18] High-voltage switchgear and control-gear part101: synthetic testing: IEC 62271-101-2006[S].
- [19] STL Guide to the interpretation of IEC 62271-101: 2006[S].
- [20] 周沛洪, 戴敏, 娄颖. 1 000 kV交流断路器开断电流的直流分量时间常数和零偏现象[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 722-730.
ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying. DC component time constant and zero offset phenomena of breaking current for 1 000 kV circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 722-730.
- [21] 李帅, 赵成勇. 一种新型限流式高压直流断路器拓扑[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 102-110.
LI Shuai, ZHAO Chengyong. A new topology for current-limiting HVDC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 102-110.
- [22] 葛国伟, 廖敏夫. 双断口真空断路器配合特性仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 51-65.
GE Guowei, LIAO Minfu. Simulation and experimental of matching characteristics of vacuum circuit breakers with double-break [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 57-65.

作者简介



胡 勋

胡勋(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向为高电压电器产品试验检测及电力电子在电力系统中应用的技术研究。

(收稿日期:2018-06-27)EA