

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.008

基于坐标系转换的TRV波形包络线与标准值参数 计算方法研究

班建, 高享想, 黄实, 李刚

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 暂态恢复电压(TRV)标准值参数是考核高压交流断路器在大容量试验站进行短路开断试验时的一项重要指标。文中提出了一种基于坐标系转换的TRV波形包络线与标准值参数计算方法,通过对TRV波形数据经过数学运算由笛卡尔坐标系转换到极坐标系下,进一步对极坐标系下的TRV波形数据计算可以得出与TRV波形相切的3条直线(两参数TRV)或4条包直线(四参数TRV)所组成的包络线以及TRV的标准值参数。应用该计算方法所获得TRV标准值参数,为大容量试验站进行短路开断试验时,预期TRV调试时试验回路 R 、 L 、 C 元件参数的调整以及试验后TRV参数的读取与评定提供了理论依据。

关键词: TRV标准值; TRV波形包络线; 笛卡尔坐标系; 极坐标系

Study on the Calculation Method of TRV Waveform Envelope and Standard Value Parameter Based on Coordinate System Conversion

BAN Jian, GAO Xiangxiang, HUANG Shi, LI Gang

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

Abstract: The transient recovery voltage (TRV) standard value parameters are an important indicator for the short circuit breaking test of high voltage circuit-breakers at the high power test station. This paper presents a calculation method of TRV waveform envelope and standard value parameters, which is converted the TRV waveform data from the Cartesian coordinate system to the polar coordinate system, and gain three straight lines of two-parameters TRV or four straight lines of four-parameters TRV tangent to the TRV waveform and the TRV standard parameter value by calculated the TRV waveform data in the polar coordinate system. The TRV standard value parameters are obtained by this calculation method, which can provide the theory basis for adjusting the R , L and C parameters of the test circuit, and provide the theory basis for reading and evaluation the TRV parameters after the test when proceeding short-circuit breaking test at the high power station.

Key words: TRV standard value; TRV waveform envelope; Cartesian coordinate system; polar coordinate system

0 引言

高压断路器开断电力系统短路故障过程中,在电弧电流过零熄灭时,断口间将承受系统电磁振荡所产生的暂态恢复电压(TRV)。IEC和IEEE经过几十年的研究与经验统计分析,得出标准TRV波形的两种典型表示方法,即两参数法和四参数法,其中四参数法根据波形特征又可以分为凹形和凸形^[1-5]。

目前计算TRV标准值参数的方法有人工法^[2,6-7]、

多项式拟合法^[6-8]、旋转法^[9-12]。人工法是《GB 1984—2014 高压交流断路器》^[2]和《IEC 62271-100:2012》^[3]标准推荐TRV波形包络线和标准值参数获取方法,但人工法效率低、不够精确、人为的主观因素影响较大。多项式拟合法是为了适应计算机数值计算自动求解而发展的一种算法,该方法计算过程繁琐,而且拟合多项式的阶数选择有时比较难以确定,因此精度不够高。在2011年的STL会议上,日本JSTC试验站提出了一种通过旋转TRV波形来获

得TRV包络线和标准值参数的计算方法,但旋转次数过长,而且在四参数计算时比较复杂。

文中提出了一种新的TRV波形包络线与标准值参数计算方法,通过对TRV波形数据从笛卡尔坐标系转换到极坐标系下,由此计算得出与TRV波形相切的3条直线(两参数TRV)或4条包直线(四参数TRV)所组成的包络线以及TRV的标准值参数。

1 TRV的标准规定

TRV是影响高压断路器开断性能的最重要因素,断路器在投入运行之前必须要经过大容量短路开断试验的考核。《GB 1984—2014 高压交流断路器》和《IEC 62271-100:2012》标准规定额定电压126 kV以下的高压交流断路器的预期TRV参考电压用两参数法表示。额定电压126~1 100 kV的高压交流断路器,试验方式T100、T60、近区故障试验方式L90和L75以及失步试验方式OP1和OP2的预期TRV用四参数法表示,试验方式T10和T30用两参数法表示。

两参数参考线和时延线对规定的TRV表示的图例见图1。图1中: u_c 为TRV峰值; t_3 为到达 u_c 的时间; t_d 为规定时延。

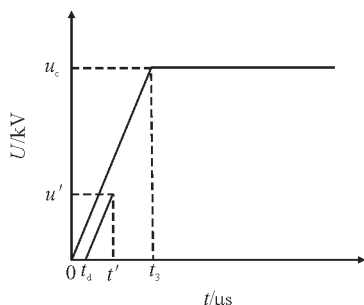


图1 用两参数参考线和时延线对规定的TRV的表示

Fig. 1 Representation of a specified TRV by a two-parameter reference line and a delay line

四参数参考线和时延线对规定的TRV表示的图例见图2。图2中: u_c 为TRV第一参考电压(峰值); t_2 为到达 u_c 的时间; u_1 为TRV第二参考电压; t_1 为到达 u_1 的时间; t_d 为规定时延。

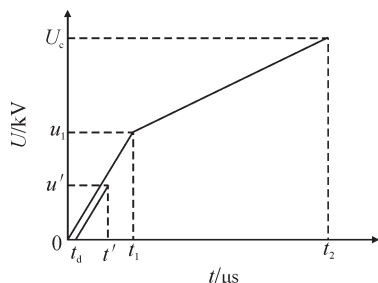


图2 用四参数参考线和时延线对规定的TRV的表示

Fig. 2 Representation of a specified TRV by a four-parameter reference line and a delay line

2 基于坐标系转换的两参数TRV波形包络线与标准值参数计算方法

用两参数包络线表示的预期TRV示例及计算原理见图3,TRV包络线包括切线1、切线2(时延线)、切线3。根据图3所示的计算原理,基于坐标系转换的两参数TRV波形包络线与标准值计算步骤如下。

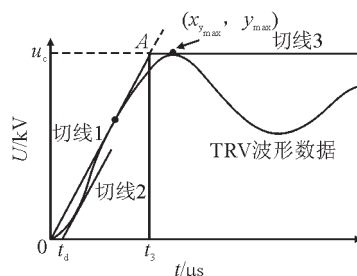


图3 用两参数包络线表示的预期TRV的计算原理图

Fig. 3 Calculation principle of prospective TRV represented by two-parameter reference line

1)通过TRV波形数据,搜索TRV的起始点,以此起始点为笛卡尔坐标系的原点,将坐标系第一象限的数据由笛卡尔坐标系 (x,y) 转换到极坐标系 (r,θ) 下。

2)搜索极坐标系下 θ 值最大的点 $(r_{\theta_{\max}}, \theta_{\max})$,则第1条与TRV波形相切的直线斜率为 $k_1 = \tan \theta_{\max}$,直线的数学表达式为 $y = k_1 x$ 。

3)获得极坐标下点 $(r_{\theta_{\max}}, \theta_{\max})$ 所对应笛卡尔坐标系下的点 (x_1, y_1) ,搜索在区间 $[0, x_1]$ 内到直线 $y = k_1 x$ 距离最大的点,且距离的最大值为 $d_{\max}$ 。则第2条与TRV波形相切直线的截距为 $d_2 = -d_{\max} \times \sqrt{1 + k_1^2}$,斜率同第1条直线,直线的数学表达式为 $y = k_1 x + d_2$ 。

4)获得笛卡尔坐标系下 y 值最大的点 $(x_{y_{\max}}, y_{\max})$,则第3条与TRV波形相切直线的数学表达式为 $y = y_{\max}$ 。

5)计算第一切线与第三切线的交点可以得出 t_3 以及第二切线与 x 轴的交点可以得出 t_d ,则TRV波形的标准值参数计算表达式为

$$\begin{cases} u_c = y_{\max} \\ t_3 = y_{\max} / k_1 \\ t_d = d_{\max} \times (\sqrt{1 + k_1^2} / k_1) \end{cases} \quad (1)$$

3 基于坐标系转换的四参数TRV波形包络线与标准值参数计算方法

用四参数包络线表示的凹形预期TRV示例及

计算原理见图4, TRV 包络线包括切线1、切线2(时延线)、切线3、切线4。根据图4所示的计算原理, 基于坐标系转换的凹形四参数 TRV 波形包络线与标准值计算步骤如下。

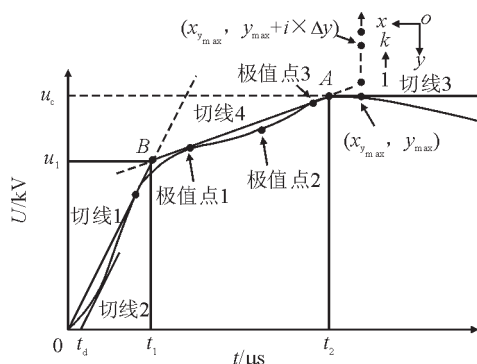


图4 用四参数包络线表示的凹形预期 TRV 示例的计算原理图

Fig. 4 Calculation principle of prospective TRV represented by four-parameter reference line

1) 采用第1节中的方法计算与 TRV 波形数据相切的第1条切线、第2条切线和第3条切线。

2) 在笛卡尔坐标系下, 以点 $(x_{y_{max}}, y_{max})$ 为起始原点, 设定原点在 y 轴方向的步长为 $+\Delta y$, 在循环运算内建立 y 轴方向递增的局部坐标系, 且所建立的局部坐标系 x 轴与全局坐标系反向, y 轴与全局坐标系反向。

3) 第 i 次运算时, 将第一象限内、区间在 $[0, x_{y_{max}}]$ 的数据由局部笛卡尔坐标系的原点 $(x_{y_{max}}, y_{max})$ 转换到极坐标系下, 并获得该次运算极坐标系下3个极值点 $(r_{\theta_1^i}, \theta_1^i), (r_{\theta_2^i}, \theta_2^i), (r_{\theta_3^i}, \theta_3^i)$ 。当第一极值点的 θ_1^i 和第三极值点的 θ_3^i 的差 $\Delta\theta^i = \theta_1^i - \theta_3^i$ 小于所设定的阈值 Γ 时, 运算结束。则第4条与 TRV 波形相切的直线斜率为 $k_4 = \tan\left(\frac{\theta_1^i + \theta_3^i}{2}\right)$, 截距为 $d_4 = y_{max} + i \times \Delta y - k_4 \times x_{y_{max}}$, 数学表达式为 $y = k_4 \times x + d_4$ 。

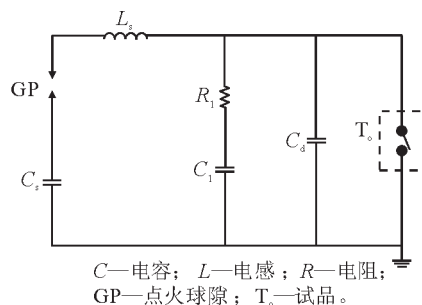
5) 计算第一切线与第四切线的交点可以得出 u_1 、 t_1 、第三切线与第四切线的交点可以得出 t_2 以及第二切线与 x 轴的交点可以得出 t_d , 得出 TRV 波形的标准值参数计算表达式为

$$\begin{cases} u_1 = k_1 \times d_4 / (k_1 - k_4) \\ t_1 = d_4 / (k_1 - k_4) \\ u_c = y_{max} \\ t_2 = (y_{max} - d_4) / k_4 \\ t_d = d_{max} \times \left(\sqrt{1 + k_1^2} / k_1 \right) \end{cases} \quad (2)$$

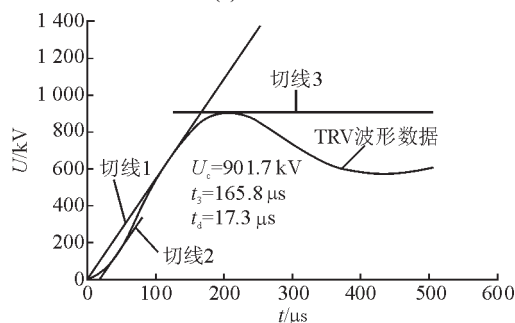
4 基于坐标系转换的 TRV 波形包络线与标准值参数计算举例

4.1 两参数 TRV 计算

西安高压电器研究院有限责任公司(简称西高院, XIHARI)大容量试验站采用图5(a)所示的电路产生两参数 TRV, 文中以额定电压 550 kV、额定短路开断电流 63 kA 高压交流断路器的试验方式 T30 为例。试验电路的参数见表1, 由电磁暂态计算程序可以得出图5(a)所示试验电路所产生的预期 TRV, 根据第2节的计算步骤, 进一步可以得出如图5(b)所示的 TRV 波形包络线与标准值参数。计算结果表明表1给出的电路参数所产生的预期 TRV 标准值参数均满足标准值要求, 电路参数合理。



(a) 试验电路



(b) 计算结果

图5 两参数 TRV 波形包络线与标准值参数计算举例

Fig. 5 The calculation example for two-parameters TRV envelope and standard value parameter

表1 两参数 TRV 回路参数

Table 1 Circuit elements parameters for two parameters TRV

充电电压/kV	$C_i/\mu\text{F}$	L_i/mH	R_i/Ω	$C_d/\mu\text{F}$	$C_1/\mu\text{F}$
640.000	4.500	0.073	1 777.000	0.207	0.049

4.2 四参数 TRV 计算

西高院大容量试验站采用图6(a)所示的电路产生四参数 TRV, 文中以额定电压 363 kV、额定短路开断电流 63 kA 高压交流断路器的试验方式 T100s 为例。试验电路的参数见表2, 由电磁暂态计算程序可以得出图6(a)所示试验电路所产生的预期 TRV, 根据第3节的计算步骤, 进一步可以得出如图6

(b)所示的TRV波形包络线与标准值参数。计算结果表明,表2给出的电路参数所产生的预期TRV标准值参数均满足标准值要求,电路参数合理。

表2 四参数TRV回路参数

Table 2 Circuit elements parameters for four parameters TRV				
充电电压/kV	$C_1/\mu\text{F}$	L_2/mH	R_1/Ω	$C_2/\mu\text{F}$
481.600	10.162	0.017	90.000	0.704
充电电压/kV	L_2/mH	R_2/Ω	$C_2/\mu\text{F}$	$C_d/\mu\text{F}$
481.600	0.013	41.900	1.620	0.024

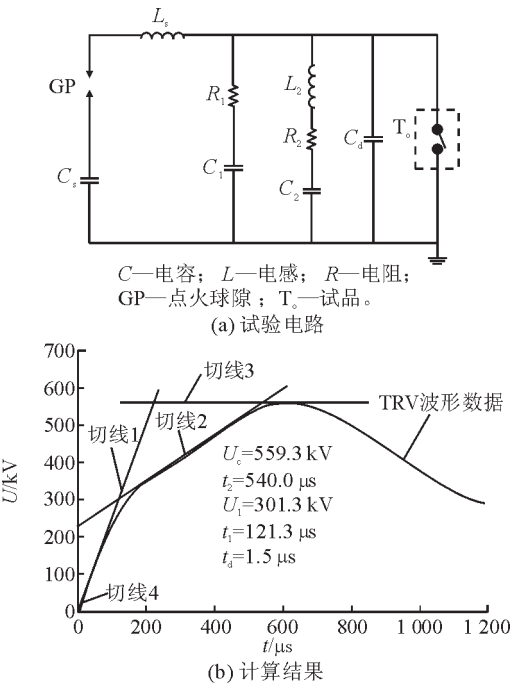


图6 四参数TRV波形包络线与标准值参数计算举例

Fig. 6 The calculation example for four-parameters TRV envelope and standard value parameter

5 结语

文中应用坐标转换的方法,将TRV波形数据由笛卡尔坐标系转换到极坐标系下,通过数学运算得出TRV波形数据的包络线和标准值参数。进一步以额定电压550 kV、额定短路开断电流63 kA高压交流断路器的试验方式T30和额定电压363 kV、额定短路开断电流63 kA高压交流断路器的试验方式T100s为例,分别举例说明了该方法在两参数、四参数TRV包络线和标准值参数计算中的应用。文中所提出的基于坐标转换的TRV包络线和标准值参数计算方法为大容量短路开断试验TRV参数的评估与计算提供了一种新的有效计算方法。

参考文献:

[1] KAPETANOVIC M. 高压断路器—理论、设计及试验方

法[M]. 北京:机械工业出版社,2015.

KAPETANOVIC M. High voltage circuit breakers[M]. Beijing:China Machine Press,2015.

[2] DAVID F P. Current interruption transients calculation[M]. England:John Wiley and Sons Ltd.,2014.

[3] 高压交流断路器:GB 1984—2014[S]. 2014.

High-voltage alternating current circuit-breakers :GB 1984—2014[S]. 2014.

[4] High-voltage switchgear and controlgear—Part 100: High-voltage alternating - current circuit breakers : IEC 62271 - 100:2012 [S]. 2012.

[5] IEEE application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis: IEEE Std C37.011—2011[S]. 2011.

[6] IEEE standard for rating structure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis- amendment 2: To change the description of transient recovery voltage for harmonization with IEC 62271-100: IEEE Std C37. B—2008[S]. 2008.

[7] 徐燕飞,张桂红,王安,等. 瞬态恢复电压波形参数提取方法算法的研究[J]. 高压电器,2007,43(3):212-213.

XU Yanfei, ZHANG Guihong, WANG An, et al.Study on algorithms for waveform parameters of transient recovery voltage[J]. High Voltage Apparatus,2007,43(3):212-213.

[8] 吴鹏,徐燕飞,郭弘,等. 暂态恢复电压波形参数提取[J]. 高压电器,2008,44(4):347-349.

WU Peng, XU Yanfei, GUO Hong, et al. Algorithms for waveform parameters of transient recovery voltage[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(4):347-349.

[9] 宁磊,淡淑恒. 瞬态恢复电压的包络线计算方法[J]. 高压电器,2016,52(10):27-31.

NING Lei, DAN Shuheng. Envelope calculation of transient recovery voltage waveform[J]. High Voltage Apparatus,2016, 52(10):27-31.

[10] KOSHIZUKA T, KUDO K, NAKAMOTO T A, et al.Investigation of tangential lines and prospective values for TRV measurements[J]. Electrical Engineering in Japan, 2015, 190(1): 21-27.

[11] TRV-TDG for test circuit prospective TRV calibration :JSTC (TC)11.03[S]. 2011.

[12] TRV-TDG: Drawing of tangent line for 4 parameters TRV : JSTC(TC)15.03[S]. 2015.

班建(1963—),男,硕士,高级工程师,主要从事高压直流输电工程设计与技术研究工作。

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、标准修订、试验回路设计与开发工作,研究方向为高压电器电流开断暂态分析、计算与建模。