

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.04.026

断路器试验方式 T100a 中最长燃弧时间试验分析

姜子元, 刘 朴, 王培人, 阎对丰, 者永祥, 金庆滨

(西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 目前断路器标准中的试验方式 T100a 主要有两种试验程序, 其中一种在额定非对称度小半波末确定最短燃弧时间, 例如 GB/T 1984—2014《高压交流断路器》; 另一种在中等非对称度大半波末确定最短燃弧时间, 例如 GB/T 4473—2018《高压交流断路器的合成试验》。通过比较发现两种试验程序使用的最大燃弧窗口差异较大, GB/T 4473—2018 中的最大燃弧窗口明显小于 GB/T 1984—2014 中的最大燃弧窗口。为了研究 GB/T 4473—2018 中较小的燃弧窗口能否覆盖实际开断过程中可能出现的最长燃弧时间工况, 文中对开断三相非对称电流时可能出现的最长燃弧时间工况进行系统参数计算, 并从最后电流半波参数、燃弧窗口、电荷转移量以及电流能量 4 个方面与 GB/T 4473—2018 中长燃弧试验的试验参数进行比较、分析, 得到以下结论: 一是 GB/T 4473—2018 中长燃弧试验对实际工况的覆盖情况与最短燃弧时间有关; 二是当最短燃弧时间较短时, GB/T 4473—2018 中的长燃弧试验可以覆盖实际开断过程中可能出现的最长燃弧时间所对应工况。

关键词: 断路器; 非对称电流; T100a; 燃弧时间

Analysis of Maximum Arcing Time Test in Test-duty T100a of Circuit Breaker

JIANG Ziyuan, LIU Pu, WANG Peiren, YAN Duifeng, ZHE Yongxiang, JIN Qingbin

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

Abstract: At present, the test-duty T100a of circuit breaker has mainly two test procedures, one is to determine the minimum arcing time at the end of minor loop with required asymmetry degree, such as GB/T 1984—2014 “High-voltage alternating-current circuit-breakers”, the other is to determine the minimum arcing time at the end of major loop with intermediate asymmetry, such as GB/T 4473—2018 “Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers”. It is found by comparison that the maximum arcing window used by the two test procedures is quite different, the maximum arcing window in GB/T 4473—2018 is significantly smaller than that in GB/T 1984—2014. In order to study whether the short arcing window in GB/T 4473—2018 can cover the maximum arcing time condition which may occur during actual breaking period, the calculation of system parameters of maximum arcing time condition which may likely occur in case of breaking three-phase asymmetrical current is performed, is compared analyzed with the test parameters of maximum arcing test of GB/T 4473—2018 from such four aspects as the last current loop parameters, arcing window, charge transfer and current energy. The following conclusions are obtained: ①The coverage of the maximum arcing time test in GB/T 4473—2018 in the actual operation is related to the minimum arcing time. ②In case of short minimum arcing time, the maximum arcing time test in GB/T 4473—2018 can cover the corresponding condition of maximum arcing time condition that may occur during the actual interruption process.

Key words: circuit breaker; asymmetrical current; T100a; arcing time

0 引言

随着断路器标准的不断更新,对断路器非对称短路电流开断性能进行验证的试验方式 T100a 的试验程序也在不断变化,目前中国主要使用的相关标准为 GB/T 1984—2014《高压交流断路器》、GB/T 4473—2018《高压交流断路器的合成试验》、GB/T 24838—2018《1 100 kV 高压交流断路器》、DL/T 402—2016《高压交流断路器》、IEC 62271-100: 2021 “high-voltage switchgear and controlgear - Part 100: alternating-current circuit-breakers”等,其中涉及到的试验方式 T100a 的试验程序主要分为 2 种,第 1 种试验程序在额定非对称度小半波末确定最短燃弧时间,例如 GB/T 1984—2014;第 2 种试验程序在中等非对称度大半波末确定最短燃弧时间,例如 GB/T 4473—2018^[1-5]。两种试验程序中的最后电流半波参数、燃弧时间、TRV(瞬态恢复电压)等试验参数均有区别,相关参数可查阅标准获得。

以首开极系数 $k_{pp}=1.3$, 频率 $f=50\text{ Hz}$, 直流时间常数 $\tau=120\text{ ms}$ 为例, GB/T 1984—2014 表 19 列 3 与 GB/T 4473—2018 表 I.8 的列 14 的最大燃弧窗口数据见表 1。通过比较标准中的数据发现,第 2 种试验程序中的最大燃弧窗口明显小于第 1 种试验程序中的最大燃弧窗口,

表 1 不同试验程序中最大燃弧窗口

Table 1 Maximum arcing window in different test procedure		
最短开断时间	第 1 种试验程序最大燃弧窗口/ms	第 2 种试验程序最大燃弧窗口/ms
第 1 档	15.5	11.4
第 2 档	14.5	10.8
第 3 档	14.0	10.3
第 4 档	13.0	9.8
第 5 档	12.5	9.5

为研究第 2 种试验程序在最大燃弧窗口较小的情况下能否覆盖实际工况,以及更好的理解不同试验程序的试验原理,文中主要研究在开断三相非对称电流时,系统中可能出现的最长燃弧时间工况的参数,并与 GB/T 4473—2018 中试验方式 T100a 的长燃弧试验参数进行比较、分析,判断试验对实际工况的覆盖情况,为相关标准的使用人员更好地理解试验方式 T100a 的试验程序及参数提供帮助。

1 实际三相非对称电流开断波形

一个典型的三相非对称电流波形图见图 1,其

中 $\tau=120\text{ ms}$, $f=50\text{ Hz}$, $k_{pp}=1.3$, A 相具有最大非对称度, B、C 两相具有中等非对称度。当 B 相在 F 点作为首开极开断电流并获得最短燃弧时间时,控制时序中的分闸命令时刻增加 $d\alpha$ (试验中用来确定燃弧时间时使用的参数,一般为 18°), 会使 A 相在 G 点作为首开极开断电流并获得最长燃弧时间,见图 2。当 C 相在 E 点作为首开极开断电流并获得最短燃弧时间时,分闸命令时刻增加 $d\alpha$, 会使 A 相在 G 点附近作为第二开断极(也称作次开极)开断电流并获得最长燃弧时间,见图 3。

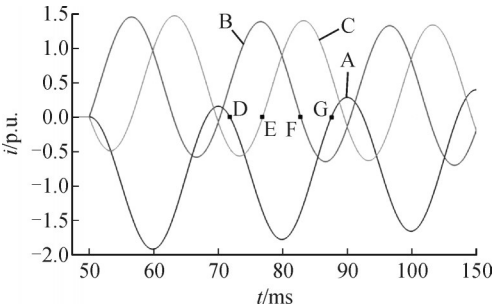


图 1 三相非对称电流波形图

Fig. 1 Three-phase asymmetrical current waveform

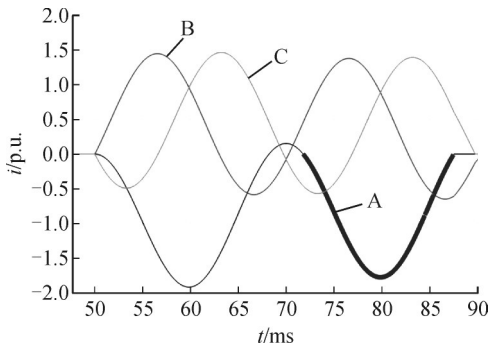


图 2 具有最大非对称度的首开极大半波

Fig. 2 Major loop with the max asymmetry in the first-pole-to-clear

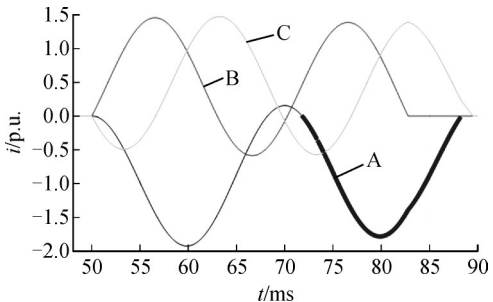


图 3 具有最大非对称度的次开极大半波

Fig. 3 Major loop with the max asymmetry in the second-pole-to-clear

当 A 相在 D 点作为首开极开断电流并获得最短燃弧时间时,分闸命令时刻增加 $d\alpha$, 会使 A 相在 G 点附近作为第三开断极(也称作后开极)开断电流并

获得最长燃弧时间,见图4。

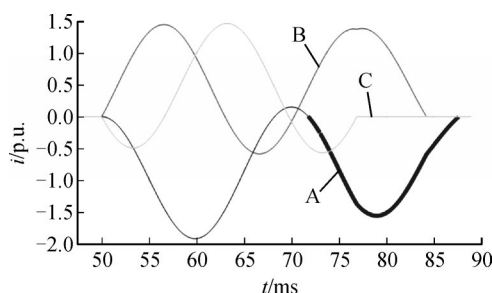


图4 具有最大非对称度的后开极最后半波

Fig. 4 Last loop with the max asymmetry in the third-pole-to-clear

在GB/T 4473—2018 试验方式 T100a 的试验程序中,首开极长燃弧试验对图2代表的工况进行了验证,次开极长燃弧试验(试验中具有最长燃弧时间的试验)对图3代表的工况进行了验证,但是并未对图4中的工况进行验证,图4代表的是系统中可能出现的最长燃弧时间所对应的工况。文中将从最后电流半波参数、燃弧窗口、电荷转移量、电流能量4个方面对图3试验中最长燃弧时间和图4系统中可能出现的最长燃弧时间所对应的工况进行计算、比较。

2 最后电流半波参数比较

将图1、3、4中A相电流的最后半波进行比较,见图5。与预期电流波形相比,后开极电流波形发生变化的起始点J和次开极电流波形发生变化的起始点K与与图1中的E、F为同一时刻,后开极熄弧点记为L,次开极熄弧点记为M。从图5中易得后开极最后半波是一个缩小的大半波,次开极最后半波是一个延长的大半波。

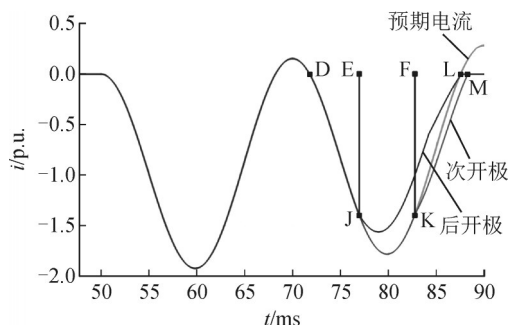


图5 电流波形比较

Fig. 5 Compare with current waveform

对 $k_{pp}=1.3, f=50 \text{ Hz}, \tau=120 \text{ ms}$ 工况下的不同最短开断时间的后开极的 Δt (最后半波持续时间)和 I_{peak} (最后半波峰值)进行计算,与GB/T 4473—2018 表I.8列10和列11的次开极大半波参数进行比较,

见表2^[6-12]。

表2 最后半波参数

Table 2 Last current loop parameters				
最短开断时间	次开极		后开极	
	$I_{peak}/\text{p.u.}$	$\Delta t_1/\text{ms}$	$I_{peak}/\text{p.u.}$	$\Delta t_2/\text{ms}$
$10.0 < t \leq 27.0$	1.78	16.6	1.56	15.9
$27.0 < t \leq 47.5$	1.66	15.3	1.45	14.7
$47.5 < t \leq 67.5$	1.56	14.6	1.37	13.9
$67.5 < t \leq 87.5$	1.47	14.0	1.29	13.2
$87.5 < t \leq 108.0$	1.40	13.5	1.23	12.7

GB/T 4473—2018 中试验方式 T100a 对最后半波的相关要求为:电流最后半波的幅值和持续时间应在基于要求电流额定值和时间常数的 90% 和 110% 之间。由表2易得,次开极的 Δt 和 I_{peak} 均大于相同最短开断时间内的后开极参数。

经过上述分析可得:具有最大非对称度的次开极最后半波参数可以覆盖最大非对称度相作为后开极时的最后半波参数。

3 燃弧窗口比较

根据第一章的分析,要获得次开极最长燃弧时间和后开极最长燃弧时间分别要在E、D两点获得最短燃弧时间。假设不同零点的最短燃弧时间相同记为 t_{arcmin} ,可以分别得到次开极最长燃弧时间 t_{arcmax_second} 和后开极最长燃弧时间 t_{arcmax_third} ,相关波形图见图6、7。

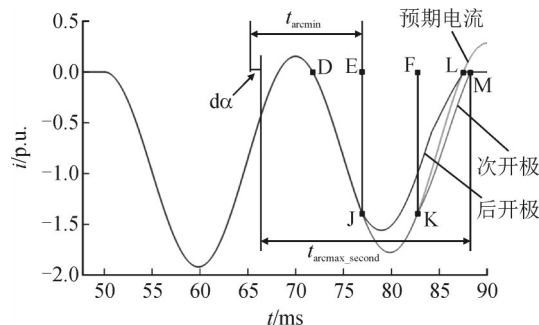


图6 次开极最长燃弧时间

Fig. 6 Maximum arcing time for the second-pole-to-clear

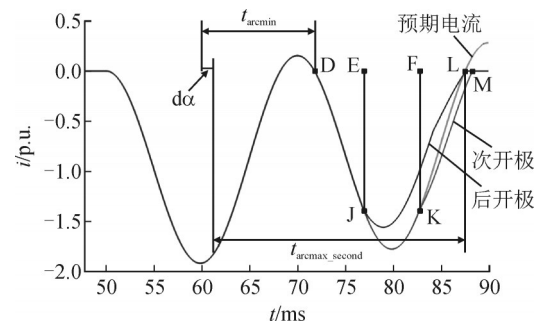


图7 后开极最长燃弧时间

Fig. 7 Maximum arcing time for the third-pole-to-clear

$$t_{\text{arcmax_second}} = t_{\text{arcmin}} + \Delta t_{\text{EM}} - T \times d\alpha / 360^\circ \quad (1)$$

$$t_{\text{arcmax_third}} = t_{\text{arcmin}} + \Delta t_{\text{DL}} - T \times d\alpha / 360^\circ \quad (2)$$

根据 GB/T 4473—2018 对于燃弧窗口的定义得到:

$$\Delta t_{a1} = \Delta t_{\text{EM}} \quad (3)$$

$$\Delta t_{a2} = \Delta t_{\text{DL}} = \Delta t_2 \quad (4)$$

式(3)、(4)中: Δt_{a1} 为次开极最大燃弧窗口; Δt_{a2} 为后开极最大燃弧窗口; Δt_2 为后开极最后半波持续时间。

根据式(4)和表 2 可以得到 $k_{\text{pp}}=1.3, f=50 \text{ Hz}, \tau=120 \text{ ms}$ 工况下不同最短开断时间的后开极最大燃弧窗口, 与 GB/T 4473—2018 表 I.8 的列 14 的次开极最大燃弧窗口数据比较, 见表 3。

表 3 最大燃弧窗口

Table 3 Maximum arcing window		
最短开断时间	次开极最大燃弧窗口 $\Delta t_{a1}/\text{ms}$	后开极最大燃弧窗口 $\Delta t_{a2}/\text{ms}$
$10.0 < t \leq 27.0$	11.4	15.9
$27.0 < t \leq 47.5$	10.8	14.7
$47.5 < t \leq 67.5$	10.3	13.9
$67.5 < t \leq 87.5$	9.8	13.2
$87.5 < t \leq 108.0$	9.5	12.7

经过上述分析可得: ①具有最大非对称度的次开极最长燃弧时间不能覆盖最大非对称度相作为后开极的最长燃弧时间; ②具有最大非对称度的后开极的最大燃弧窗口就是其本身的最后半波持续时间。

4 综合时间和电流两个维度比较

文中第 2 章和第 3 章分别从最后电流半波参数和最大燃弧窗口对 GB/T 4473—2018 试验方式 T100a 中最长燃弧试验的试验参数和系统实际可能的最长燃弧时间工况的参数进行了比较, 单独从燃弧时间和电流波形并不能清晰的展现试验参数对实际工况的覆盖情况, 所以综合考虑燃弧时间和电流波形这两个参数进行进一步的比较。

4.1 电荷转移量比较

参考最后半波选取 Δt 和 I_{peak} 作为参数, 选择对燃弧过程中的预期电流波形进行积分, 得到电荷转移量, 并对次开极和后开极在最长燃弧时间下的电荷转移量进行比较^[13-17]。

以 $\tau=120 \text{ ms}, f=50 \text{ Hz}, k_{\text{pp}}=1.3$, 最短开断时间 $10.0 < t \leq 27.0$ 且 $t_{\text{arcmin}}=13 \text{ ms}$ 为例, 由表 3 计算得到 $t_{\text{arcmax_second}}=23.4 \text{ ms}, t_{\text{arcmax_third}}=27.9 \text{ ms}$, 得到具有最大非

对称度的次开极最长燃弧时间所对应的电流波形和具有最大非对称度的后开极最长燃弧时间所对应的电流波形见图 8, 其中后开极起弧时刻、熄弧时刻分别记为 t_1, t_3 ; 次开极起弧时刻、熄弧时刻分别记为 t_2, t_4 。

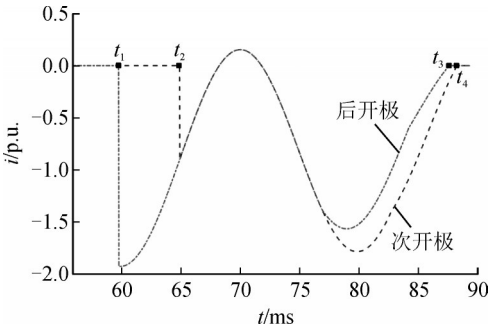


图 8 燃弧时间对应的电流波形

Fig. 8 Current waveform corresponding to the arcing time

定义电荷转移量之比为

$$p = \frac{\int_{t_1}^{t_3} |i_2| dt}{\int_{t_2}^{t_4} |i_1| dt} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, i_1 为次开极燃弧时间所对应的预期电流波形; i_2 为后开极燃弧时间所对应的预期电流波形。

根据式(5)和图 8 的电流波形计算得到 $p=126\%$ 。按上述方法, 对 $\tau=120 \text{ ms}, f=50 \text{ Hz}, k_{\text{pp}}=1.3$, 最短开断时间 $10.0 < t \leq 27.0$ 情况下不同 t_{arcmin} 对应的 p 值进行计算, 结果见图 9。

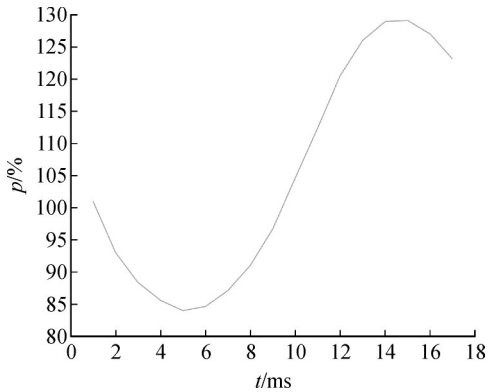


图 9 不同最短燃弧时间对应的 p 值

Fig. 9 p value corresponding to the different minimum arcing time

经过上述分析可得: 电荷转移量之比 p 是与最短燃弧时间 t_{arcmin} 相关的函数, 不同的 t_{arcmin} 会使得试验参数对实际工况的覆盖情况不同。

4.2 电流能量比较

高压交流断路器属于机械式的开关装置, 熄弧原理虽然与完全依靠自身能量的熔断器不同, 但是

电弧能量仍然是影响开断成功与否的关键因素。参考熔断器的焦耳积分概念^[18],选择对燃弧过程中的预期电流每一时刻的平方进行积分,得到燃弧过程中的电流能量,并对次开极和后开极在最长燃弧时间下的电流能量进行比较。

仍以图8中的电流波形为例,定义电流能量之比

$$q = \frac{\int_{t_1}^{t_2} i_2^2 dt}{\int_{t_2}^{t_3} i_1^2 dt} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中: i_1 为次开极燃弧时间所对应的预期电流波形; i_2 为后开极燃弧时间所对应的预期电流波形。

根据式(6)和图8的电流波形计算得到 $q=127\%$ 。按上述方法,对 $\tau=120\text{ ms}$, $f=50\text{ Hz}$, $k_{pp}=1.3$,最短开断时间 $10.0 < t \leq 27.0$ 情况下不同 t_{arcmin} 对应的 q 值进行计算,结果见图10。

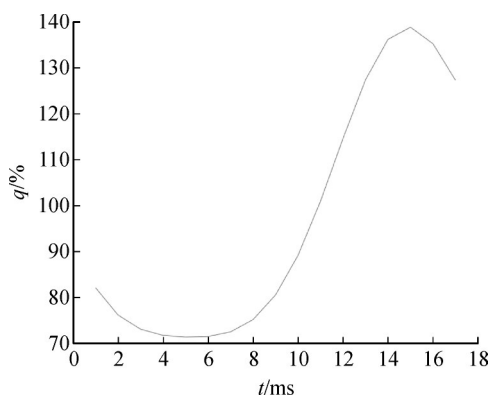


图10 不同最短燃弧时间对应的 q 值

Fig. 10 q value corresponding to the different minimum arcing time

经过上述分析可得:电流能量之比 q 是与最短燃弧时间 t_{arcmin} 相关的函数,不同的 t_{arcmin} 会使得试验参数对实际工况的覆盖情况不同。

4.3 小结

由4.1和4.2的分析得到在电荷转移量和电流能量两个判断维度下,试验参数对实际工况的覆盖情况与最短燃弧时间 t_{arcmin} 有关,当 t_{arcmin} 较短时,试验参数对实际工况的覆盖情况较好,在电弧能量角度这一点尤为明显。

在文中的计算过程中未区分不同零点的最短燃弧时间,但是在开断非对称电流的实际工况中,因为受直流分量影响,断路器在不同零点的最短燃弧时间是不同的,若考虑这一因素,图9中 $p \leq 100\%$ 和图10中 $q \leq 100\%$ 所对应的 t_{arcmin} 范围将会发生变化。

除最后电流半波参数、燃弧窗口、电荷转移量以及电流能量外,仍有很多影响断路器能否成功开断电流的因素,例如:熄弧零点的 di/dt ,TRV(瞬态恢复电压)、断路器的灭弧方式等,文中给出的4种计

算维度虽然不能完全代表断路器开断时的难易程度,但是可以作为判断GB/T 4473—2018中的长燃弧试验对实际开断过程中可能出现的最长燃弧时间所对应工况的覆盖情况的参考^[19-26]。

5 其他试验程序中最长燃弧时间

除文中计算的实际工况中关于第三开断极可能的最长燃弧时间外,在IEC 62271-101:2006的附录L中曾给出试验中使用到的关于第3开断极的最长燃弧时间,这部分内容在IEC 62271-101:2017之后的版本中已删去。经过计算与比较,其代表的工况为具有额定非对称度的相作为次开极(首开极和后开极都具有中等非对称度)且获得最长燃弧时间时,后开极所具有的最长燃弧时间,见图11。

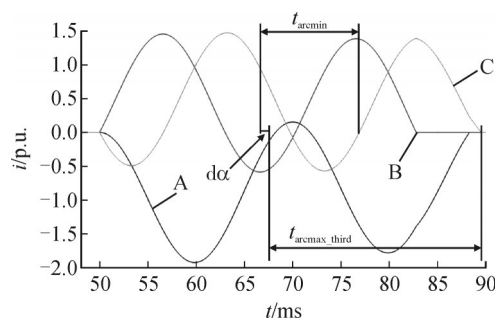


图11 其他后开极最长燃弧时间

Fig. 11 Another maximum arcing time for the third-pole-to-clear

选择 $k_{pp}=1.3$, $f=50\text{ Hz}$, $\tau=120\text{ ms}$,将图11中代表的后开极燃弧窗口与图7中代表的后开极燃弧窗口比较,见表4。由表4易得,图4代表的最大燃弧窗口明显大于图11代表的最大燃弧窗口。

表4 不同工况的最大燃弧窗口

Table 4 Maximum arcing window in different operating condition

最短开断时间	图11代表的最大燃弧窗口/ ms	图4代表的最大燃弧窗口/ ms
第1档	12.7	15.9
第3档	12.2	14.7
第4档	11.9	13.9
第5档	11.6	13.2
第6档	11.4	12.7

6 结论

文中主要研究在开断三相非对称电流时,系统中可能出现的最长燃弧时间工况的参数,并从最后电流半波参数、燃弧窗口、电荷转移量以及电流能量4个方面与GB/T 4473—2018中最长燃弧试验的

试验参数进行比较、分析,得到以下结论:

1)GB/T 4473—2018 中长燃弧试验对实际工况的覆盖情况与最短燃弧时间有关。

2)当最短燃弧时间较短时,GB/T 4473—2018 中的长燃弧试验可以覆盖实际开断过程中可能出现的最长燃弧时间所对应工况。

文中还介绍了其他标准中关于后开极最长燃弧时间的相关内容,帮助标准使用人员更好的理解在不同试验程序中,试验方式T100a最长燃弧时间试验的区别及原因。

参考文献:

- [1] 高压交流断路器的合成试验:GB/T 4473—2018[S].2018.
Synthetic testing of high - voltage alternating current circuit—Breakers:GB/T 4473—2018[S].2018.
- [2] 高压交流断路器:GB/T 1984—2014[S].2014.
High - voltage alternating - current circuit - breakers: GB/T 1984—2014[S].2014.
- [3] 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求:GB/T 11022—2020[S].2020.
Common specifications for high-voltage alternating-current switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2020 [S].2020.
- [4] High-voltage switchgear and controlgear-Part 101: Synthetic testing:IEC 62271-101:2021[S].2021.
- [5] High-voltage switchgear and controlgear - Part 306: Guide to IEC 62271-100, IEC 62271-1 and other IEC standards related to alternating current circuit-breakers: IEC 62271-306:2018[S].2018.
- [6] 汤涌,田芳,黄彦浩,等. 电力系统短路电流计算[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
TANG Yong, TIAN Fang, HUANG Yanhao, et al. Computation of short circuit current in power system[M]. Beijing:China Electric Power Press,2015.
- [7] 徐国政. 高压断路器原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [8] 张旭航,黄阮明,曹炜,等.短路电流直流分量实用计算方法研究[J]. 高压电器, 2019,55(5):169-174.
ZHANG Xuhang, HUANG Ruanming, CAO Wei, et al. Research on practical calculation method of DC component of short circuit current[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):169-174.
- [9] 黄实,高享想,刘浩军,等. 非对称电流开断试验T100a 电流零点 di/dt 及 TRV 峰值 u_c 的计算[J]. 高压电器,2015, 51(10):163-167.
HUANG Shi, GAO Xiangxiang, LIU Haojun, et al. Calculation of di/dt at current zero and TRV peak value u_c for test-duty T100a[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 163-167.
- [10] 王蒙,张文朝,高享想,等. 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[J]. 高压电器, 2018,54(12):268-273.
WANG Meng, ZHANG Wenchao, GAO Xiangxiang, et al. Calculation of DC component characteristic parameters of power system short-circuit current based on integral and difference method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54 (12):268-273.
- [11] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
LI GuangQi. Power system transient analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press,2017.
- [12] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京:中国电力出版社 2003.
GUAN Genzhi. Foundation of high voltage engineering[M]. Beijing:China Electric Power Press,2003.
- [13] 周小猛,林志力,苗本健,等.大容量试验短路电流波形参数的测算[J]. 高压电器, 2019,55(7):227-234.
ZHOU Xiaomeng, LIN Zhili, MIAO Benjian, et al. Measurement and calculation of short-circuit current waveform parameters for high power tests[J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(7):227-234.
- [14] 贾磊,蔡汉生,胡上茂,等. 500 kV 串联电抗器对线路断路器开断能力的影响研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 7-11.
JIA Lei, CAI Hansheng, HU Shangmao, et al. Study on influence of 500 kV series reactor on interrupting capability of line circuit breaker[J]. South Power Grid Technology, 2014, 8(6): 7-11.
- [15] 郑少鹏,钟显,孙谊嫔,等. ± 1100 kV 特高压直流接入后短路电流分析及限制措施研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 18-24.
ZHENG Shaopeng, ZHONG Xian, SUN Yizhong, et al. Research of short-circuit current analysis and its limiting measures after ± 1100 kV UHVDC connected to grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 18-24.
- [16] 周明,曹炜,陈文涛,等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制,2017, 45(11):147-153.
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. Power System Protection and Control,2017,45(11):147-153.
- [17] 韩戈,韩柳,吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144.

- HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144.
- [18] 高压交流熔断器 第2部分:限流熔断器:GB/T 15166.2—2008[S]. 2008.
- High-voltage alternating-current fuses - Part 2: Current-limiting fuses:GB/T 15166.2—2008[S]. 2008.
- [19] 王仁甫.关于直接试验和合成试验等价性的一些问题[J]. 高压电器, 1982, 6(1): 8-14.
- WANG Renfu. Some questions about the equivalence of direct testing and synthetic testing[J]. High Voltage Apparatus, 1982, 6(1): 8-14.
- [20] 吴盛刚, 王学军, 成俊奇, 等. 以振荡回路为电流源的非对称开断合成试验方法研究[J]. 电气技术, 2010(12): 17-22.
- WU Shenggang, WANG Xuejun, CHENG Junqi, et al. Synthetic testing method study of asymmetrical breaking using oscillation circuit for current source[J]. Electrical Technology, 2010(12): 17-22.
- [21] 王建华. 高压断路器——理论、设计与试验方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- WANG Jianhua. High-voltage circuit breakers - theory, design and test methods[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
- [22] 李刚, 孙梅, 程茵. 一种新的合成试验回路[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 136-139.
- LI Gang, SUN Mei, CHENG Yin. A new synthetic test circuit [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 136-139.
- [23] 裴振江, 何俊佳, 姚斯立. 特高压断路器的大容量开断试验等价性分析与开断试验方法[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 1-5.
- PEI Zhenjiang, HE Junjia, YAO Sili. Equivalency analysis and test method of high power test for ultra-high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 1-5.
- [24] 裴振江, 姚斯立, 何俊佳, 等. 特高压断路器几种开断试验回路比较[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 321-323.
- PEI Zhenjiang, YAO Sili, HE Junjia, et al. Comparison of several synthetic test circuits for ultra-high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 321-323.
- [25] 陈波, 舒展, 周宁, 等. 计及短路电流直流分量的断路器实际开断能力分析[J]. 江西电力, 2017(4): 17-20.
- CHEN Bo, SHU Zhan, ZHOU Ning, et al. Analysis of actual breaking performance of circuit breaker considering DC component of short circuit current[J]. Jiangxi Electric Power, 2017(4): 19-22.
- [26] 张谦, 孟涛, 刘新元, 等. 短路电流直流分量对断路器开断能力影响的研究[J]. 山西电网, 2020(6): 5-9.
- ZHANG Qian, MENG Tao, LIU Xinyuan, et al. Research on the impact of DC component of short-circuit current on the breaking capacity of circuit breaker of shanxi power grid [J]. Shanxi Electric Power, 2020(6): 5-9.
- 姜子元(1994—), 男, 工程师, 从事高压开关设备大容量试验及标准化工作(E-mail: jiangziyuan@xihari.com)。
- 刘朴(1962—), 男, 正高级工程师, 从事高压电器设备大容量试验工作。