

大容量发电机断路器短路试验程序分析与讨论

高享想¹, 纪祥贞², 马 健², 刘浩军¹,
黄 实¹, 董 玮¹, 王 伟¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 国网临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 随着中国电力工业的不断发展, 大容量发电机断路器的研究也走向更高的容量等级, 容量试验是发电机断路器研究、开发过程中必备的关键性环节。鉴于国家标准 GB/T 14824—2008《高压交流发电机断路器》相对于当前的试验需求的不足, 文中在研究即将颁布的国际标准 IEC/IEEE 62271-37-013:2014(草案版)的基础上, 分析与讨论了发电机断路器的短路故障、短路试验程序、以及与输配电高压交流断路器短路故障的区别, 最后介绍与分析了 XIHARI 大容量试验站进行额定电压 24 kV、额定短路开断电流 160 kA 的发电机断路器(型号为 ZHN10-24/Y25000-160)合成试验回路原理及典型的短路电流开断示波图。文中的研究内容为发电机断路器短路故障开断、关合试验提供了参考与依据。

关键词: 发电机断路器; 系统源故障; 发电机源故障; TRV

Analysis on Short Circuit Test Program of Circuit Breaker for Large Capacity Generator

GAO Xiangxiang¹, JI Xiangzhen², MA Jian², LIU Haojun¹,
HUANG Shi¹, DONG Wei¹, WANG Wei¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
2. State Grid Linyi Power Supply Company, Shandong Linyi 276000, China)

Abstract: With the increase in capacity of large capacity generator circuit breakers, the existing national standard GB/T 14824—2008 “High Voltage AC Generator Circuit Breaker” is insufficient to the short circuit test. In this paper, the short circuit test program for large capacity generator circuit breakers is analyzed based on the international standard IEC/IEEE 62271-37-013:2014(draft version), and the difference of short circuit faults between the generator circuit breaker and the high voltage circuit breaker in power transmission and distribution is discussed. In addition, synthetic test of a generator circuit breaker(ZHN10-24/Y25000-160)was conducted on the XIHARI large capacity test platform with rated voltage 24 kV and short circuit breaking current 160 kA, and the test circuit principle and typical short circuit switching waveform are introduced.

Key words: generator circuit breaker; system-source fault; generator-source fault; TRV

0 引言

随着中国电站的总装机容量不断扩大, 发电机的单机容量亦越来越大。为此, 在发电机组出口端必须安装大容量的发电机断路器来加以保护。由于发电机断路器在电力系统中的特殊位置, 当发电机断路器开断短路故障电流后, 断口间必须承受上升

率很高、时延很短的暂态恢复电压(TRV)。此外, 发电机断路器还需要具备开断具有延迟过零特征的短路电流能力^[1-3]。

通过在大容量试验站进行短路电流的开断、关合型式试验, 是验证发电机断路器是否具备要求的短路开断和关合能力的唯一有效途径, 是发电机断路器研究、开发过程中必备的关键性环节。目前, 国内实验室直接法的试验能力只能达到 15 kV、80 kA。但国内开关厂家已经研制出了额定电压

24 kV、额定短路开断电流 160 kA 的大容量发电机断路器。而且在发电厂已经投入运行。

在发电机断路器型式试验标准方面, 国家标准 GB/T 14824—2008《高压交流发电机断路器》在标准的制定方面延续了美国标准 IEEE Std C37.013—1997 和国家标准 GB/T 1984—2003 的内容和特点, 而这些标准在试验程序和试验方式方面已经远远落后于当前的实际工况的需求, 国际标准 IEC/IEEE 62271-37-013:2014(草案版)是目前国际上最新的发电机断路器标准。笔者在研读新版的 IEC 标准的基础上, 对发电机断路器的短路故障、短路试验程序及试验原理进行了分析与讨论。

1 发电机断路器的短路故障及其特征分析

电站线路及故障示意图见图 1, 发电机断路器安装在电站的发电机出口和升压变压器之间, 用于发电机的控制和保护。正因为发电机断路器在电站中特殊的安装位置和及其功能, 决定了发电机断路器和输配电系统中的高压断路器在短路故障开断和关合能力方面的不同。在图 1 中, 根据不同的短路故障位置, 发电机断路器的主要短路故障有^[1-3]:

1) 系统源故障(图 1 中的位置 a)。由于从故障点到电力系统的等效阻抗比较小, 因此系统源故障的特点是短路电流大。此外, 升压变压器的对地电容很小, 发电机断路器开断系统源短路故障电流后, 断口间要承很高的 TRV 上升率。特别是假设输配电系统为无限大功率电源(系统的阻抗为零)时, 变压器上的压降就等于系统电压, 在这种情况下 TRV 的上升率和峰值达到最大值。因此, 发电机断路器开断系统源故障的 TRV 特征和输配电系统中高压断路器开断短路故障的 TRV 特征相反, 在输配电系统中短路电流增大时, 系统的等效电路呈过阻尼振荡电路, TRV 的上升率和峰值将降低; 反之, 短路电流减小时, 系统的等效电路呈欠阻尼振荡电路, TRV 的上升率和峰值将增大^[4-10]。

2) 发电机源故障(图 1 中的位置 b, c)。发电机源故障的对称短路电流远小于上述的系统源故障的短路电流, 这是由于发电机系统的超瞬态和瞬态电抗值要远大于系统源故障的等效阻抗值。但是发电机源故障短路电流的直流分量(非周期分量)可能比交流分量大, 这将会导致短路电流延迟过零和发电机断路器的燃弧时间延长^[1-2, 9]。

故障前发电机在欠励磁状态下以超前功率因数运行时, 会出现最大非对称度, 发电机源短路电

流的对称分量也低于要求的对称短路电流, 对大量的发电机运行结果分析表明, 最大的非对称度为 130%, 此时短路电流的交流分量仅为要求值的 74%。相反, 故障前发电机在带负载的滞后功率因数运行时, 非对称度将较低, 短路电流的交流分量将较高。

由于非对称分量较大, 因此电流过零开断时, 电源电压比较低(甚至为零), 故发电机源故障的 TRV 上升率和峰值都较小。

3) 失步故障。当发电机和电力系统之间失去或者缺乏同步时, 使整个系统失去稳定而引起系统异常, 称之为失步故障^[1-2]。在失步角为 180°时, 发电机与系统全反相, 失步短路电流将超过发电机端短路电流, 这种情况对于发电机断路器是绝不允许出现的。因此, 通过自动同步或者快速切除电力系统中的短路故障来避免这种情况的发生。IEC 与 IEEE 发电机断路器标准中规定, 发电机断路器开断失步故障的最大失步角为 90°, 相比较于输配电系统中的高压断路器开断失步故障, 其特征为短路电流大、TRV 上升率高。

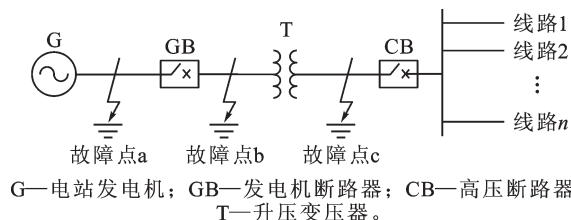


图 1 电站线路及故障示意图

Fig. 1 Power station and fault schematic diagram

2 发电机断路器的短路试验

IEC/IEEE 62271-37-013:2014 中规定发电机断路器的额定操作方式为 CO-30 min-CO, 由于其短路试验方式、操作次数较输配电系统中高压断路器的要少, 在进行发电机断路器的短路试验时, 需要根据实际工况, 考核到断路器在最严酷的情况下的开断能力。在确定了发电机断路器的短路电流的情况下, 能够反映其开断能力的主要特征为短路开断试验方式, 以及相应的燃弧时间和 TRV。

在实际工况中发电机断路器开断的短路故障系统为中性点不接地的三相系统, 由于试验站的容量有限, 不能够满足大容量发电机断路器的三相短路开断试验。目前, 通用的方法是用“分步法”的单相试验来替代三相试验。下面将依据 IEC/IEEE 62271-37-013:2014 中 6.102.10 给出的最严酷的开断条件, 对短路开断试验方式、燃弧时间分别做出说明和解释。

2.1 系统源故障、失步故障的短路开断、关合试验

1) 对称短路电流开断试验(T100s、OP1)。发电机断路器在开断三相对称短路故障电流时,当首开极燃弧时间分别在最短和最长时,对发电机断路器的考核是最严格的。当燃弧时间最短时,由于开距较小,TRV 上升很高;当燃弧时间最长时,电弧能量达到最大,这两个方面都很容易导致开断失败。相比较而言,当首开极燃弧时间达到最长时,对发电机断路器的考核是最严格的。因此,IEC/IEEE 62271-37-013:2014 在确定替代的单相试验考核发电机断路器开断性能时,仅考虑首开极的燃弧时间到达最长时,来分别考核三相系统中首开极和晚开极的燃弧时间和 TRV。

两次合分操作中的其中一次需要考核首、晚开极在最长燃弧时间情况下的开断能力,且 TRV 满足首、晚开极的要求,要求的燃弧时间分别为 t_{arcmax1} 、 t_{arcmax2} 和 TRV 峰值 u_c 见表 1。

表 1 对称电流开断燃弧时间和 TRV 的规定

Table 1 Arcing time and TRV parameters specified value for symmetrical current interruption

操作方式	燃弧时间	TRV 峰值 u_c	
		系统源故障	失步故障
CO_{sym}	$t_{\text{arcmax1}} = t_{\text{arcmin}}^* + T \times \frac{42^\circ}{360^\circ}$	$1.84U_r$	$2.6 \times U_r$
CO_{sym}	$t_{\text{arcmax2}} = t_{\text{arcmin}}^* + T \times \frac{132^\circ}{360^\circ}$	$0.58 \times 1.84U_r$	$0.58 \times 2.6 \times U_r$

注: t_{arcmin} 为最短燃弧时间。通过触头分离相对于电流波形增加任一额外时延后,可导致在下一个电流零点开断。这个最短燃弧时间可以通过步长为 18° 改变脱扣脉冲的整定值来获得。

2) 非对称短路电流开断试验(T100a、OP2)。发电机断路器在开断三相非对称短路故障电流时^[11-12],由于短路电流直流分量的存在,考核断路器的严酷程度会随着触头分离时刻的不同有很大的变化。根据实际的工况,发电机断路器开断首开极大半波和延长大半波且两种情况下燃弧时间达到最长时的非对称短路电流对其考核是最为严酷的。因此,在确定替代的单相试验考核发电机断路器开断非对称短路电流试验时,需要考核到发电机断路器的首开极和晚开极分别在最后电流半波开断具有要求的非对称度的短路电流能力,及其相应的燃弧时间和 TRV。下面分别以 A 相首开大半波、A 相延长大半波为例,解释与说明 IEC/IEEE 62271-37-013:2014 在非对称短路电流开断两次合分操作的试验程序及燃弧时间的确定方法。特别需要说明的是当考核相为 A 相时,A 相短路电流具有满足标准要求

最大非对称度,那么 B、C 两相具有满足标准要求的中等度的非对称度。

A 相首开大半波的试验程序及燃弧时间的确定方法见图 2,由于 A 相为考核的首开极最大非对称度,所以需要根据 B 相(中等级非对称度)的最短燃弧时间 t_{arcmin1} 来确定 A 相首开大半波的最长燃弧时间。在 B 相的最短燃弧时间的基础上,通过触头分离相对于电流波形增加任一额外 da 时延后(图 2 中虚线所在位置),以此来获得 A 相最长的燃弧时间 t_{arcmax1} 。

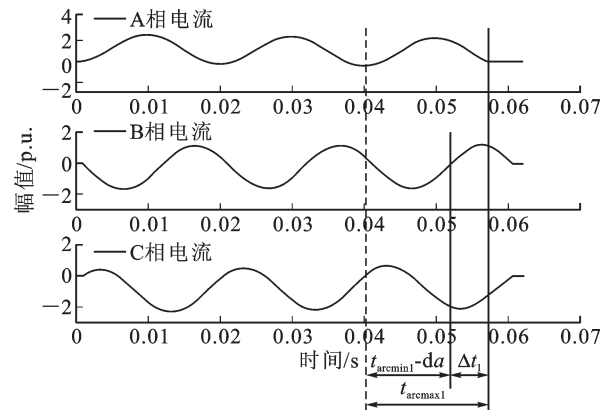


图 2 首开大半波示意图

Fig. 2 Major loop with first clearing pole

图 2 中, Δt_1 表示 A 相在最长燃弧时间下的过零点与 B 相在最短燃弧时间下过零点的时间间隔。 t_{arcmax1} 与 t_{arcmin1} 、 Δt_1 所满足的关系见表 2。

表 2 非对称电流开断燃弧时间和 TRV 的规定

Table 2 Arcing time and TRV parameters specified value for asymmetrical current interruption

操作方式	燃弧时间	TRV 峰值 u_c /p.u.	
		系统源故障	失步故障
CO_{asym}	$t_{\text{arcmax1}} = t_{\text{arcmin1}} - T \times \frac{da}{360^\circ} + \Delta t_1$	$\sqrt{1-p^2} - \frac{p}{2\pi f\tau}$ [9,11]	
CO_{asym}	$t_{\text{arcmax2}} = t_{\text{arcmin2}} - T \times \frac{da}{360^\circ} + \Delta t_2$		

注: u_c (p.u.) 为对应于对称故障的 TRV 标么值; p 为电流零点的直流分量百分数; τ 为直流时间常数。

A 相延长大半波的试验程序及燃弧时间的确定方法见图 3,由于 A 相为考核的晚开极最大非对称度,所以需要根据 C 相(中等级非对称度)在小半波末开断来获得最短燃弧时间 t_{arcmin2} 来确定 A 相延长大半波的最长燃弧时间。在 C 相的最短燃弧时间的基础上,通过触头分离相对于电流波形增加任一额外时延 da 后(图 3 中虚线所在位置),导致 B 相(中等级非对称度)成为首开极,最终获得 A 相的最长的燃弧时间 t_{arcmax2} 。图 3 中 Δt_2 表示 A 相在最长燃弧时间下的过零点与 C 相在最短燃弧时间

下过零点的时间间隔。 $t_{\text{arcmax}2}$ 与 $t_{\text{arcmin}2}$ 、 Δt_2 所满足的关系见表 2。

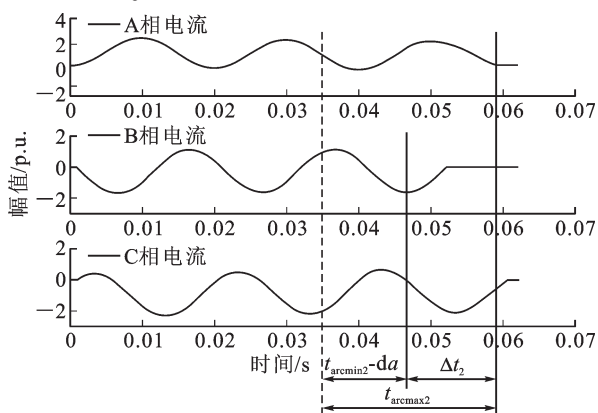


图 3 延长大半波示意图

Fig. 3 Major extended loop

综上所述,两次合分操作中的其中一次需要考核首开极灭弧时刻出现在大半波末且具有最长的燃弧时间,同时满足要求的最大非对称判据及与之相应的首开极 TRV 条件,要求的燃弧时间 $t_{\text{arcmax}1}$ 和 TRV 峰值 u_c 见表 2。另外一次需要考核晚开极灭弧时刻出现在大半波末且具有最长的燃弧时间,同时满足要求的最大非对称判据及与之相应的晚开极 TRV 条件,要求的燃弧时间 $t_{\text{arcmax}2}$ 和 TRV 峰值 u_c 见表 2。

3)短路关合电流试验。发电机断路器关合额定短路关合电流的能力需要考核到两种极端的情况:①在电压波的零点处关合,无预击穿,产生一个完整的非对称短路电流,金短时间要求达到 250 ms 以上。对于直流时间常数为 133 ms,关合电流的峰值为 2.74 倍的额定对称短路开断电流;②在电压波的峰值处关合,产生一个对称的短路电流以及最长的预击穿电弧。考虑到试验站短路容量的限制,当预击穿时间小于十分之一周波时(通过在额定电压、小电流下确定),允许在降低的电压(不低于 50%的额定电压)下进行关合试验。

2.2 发电机源故障的短路开断、关合试验

IEC/IEEE 62271-37-013:2014(草案版)中规定发电机断路器开断、关合发电机源故障的能力有:

1)对称短路电流开断试验。发电机源故障的短路开断电流要比系统源的短路开断电流小很多,而且会随着发电机的超瞬态和瞬态时间常数衰减。因此,发电机源故障的对称电流开断能力低于系统源故障的对称电流开断能力,实际的试验过程中,发电机断路器通过系统源故障对称电流开断试验后,该试验方式可以通过计算来评估。

2)非对称短路电流开断试验。两次开断操作中的其中一次需要考核到最大非对称度,标准要求的

最大的非对称度为 130%,此时短路电流的交流分量为额定短路开断电流的 74%。另外一次需要考核额定短路起始后交流分量衰减大于直流分量的工况,这种情况导致触头分离时刻直流分量将大于交流分量。标准要求的非对称度为 110%,此时短路电流的交流分量为额定短路开断电流。

目前,国内的容量试验站进行大容量发电机断路器的短路试验时,通过冲击发电机提供短路电流。由于冲击发电机容量有限,一方面希望尽量减小试验回路电抗来提高短路电流,另一方面希望增大试验回路电抗来增大直流回路时间常数,所以在电抗的选择上是矛盾的。因此要获得延迟电流零点的预期短路电流波形是很困难的,在验证发电机电源故障开断延迟过零的非对称短路电流的能力是通过计算来实现的,是在预期电流的基础上考虑电弧电压的影响,来考核能否强迫短路电流在燃弧区间内过零开断。

3)短路关合电流试验。当实际工况中会出现发电机电源故障的短路关合电流高于系统源故障时,要求进行短路关合试验,金短时间要求达到 250 ms 以上。

3 发电机断路器合成试验回路设计与实施

由于大容量发电机断路器要求的短路试验容量很大,目前,国际上均采用合成试验回路来考核发电机断路器的短路开断性能^[11-14]。合成试验回路可以分为电流引入回路和电压引入回路^[15-17],XIHARI 采用并联电流引入法的 Weil 合成试验回路,大容量试验站发电机断路器试验原理图见图 4。

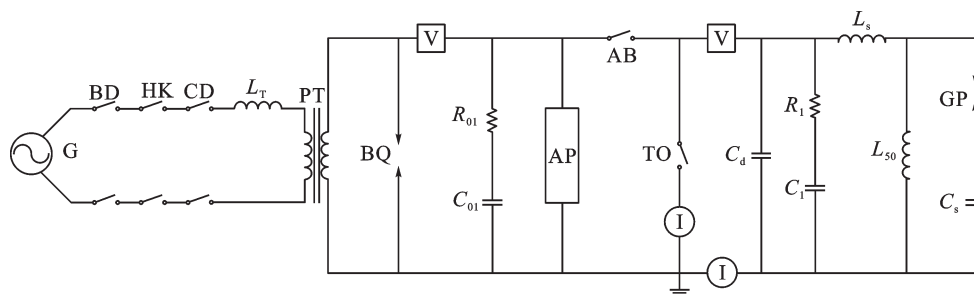
试验时由发电机提供要求的短路开断、关合电流;主电容 C_s (预先充有计算好的试验所需电能)、 L_s 及 TRV 调频装置(R_1 、 C_1 、 C_d)向试品提供开断后断口间的恢复电压。

24 kV/160 kA 的发电机断路器开断系统源故障 T100s、T100a 短路电流成功开断的典型的示波图见图 5。24 kV/160 kA 的发电机断路器开断失步故障 OP1、OP2 短路电流成功开断的典型的示波图见图 6。

图 5、6 中各参量符号代表的物理意义: I_{coil} 为线圈电流, I 为电流源回路电流, I_h 为电压源回路电流, U_{cs} 为电流源电压, U_r 为断口恢复电压, T_r 为行程曲线, T_m 为分闸时刻, U_{arc} 为电弧电压。图 5、6 中 1pu 对应的值为右下角黑色的标尺高度。

4 结论

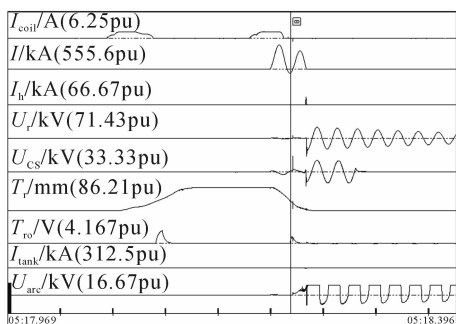
笔者在研究国际标准 IEC/IEEE 62271-37-



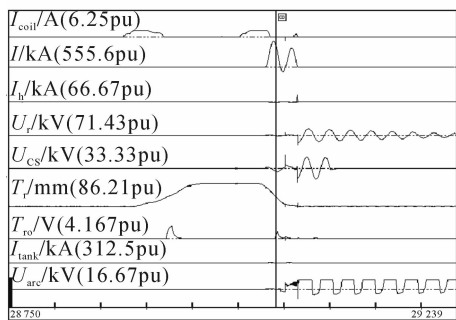
G—冲击发电机；BD—保护断路器；HK—合闸开关；CD—操作断路器；AB—辅助断路器；PT—变压器；BQ—保护球隙；R—电阻；L—电抗器；C—电容；TO—被试断路器；V—电压测量装置；I—电流测量装置；GP—高压点火装置；AP—延弧回路。

图4 短路开断、关合试验回路图

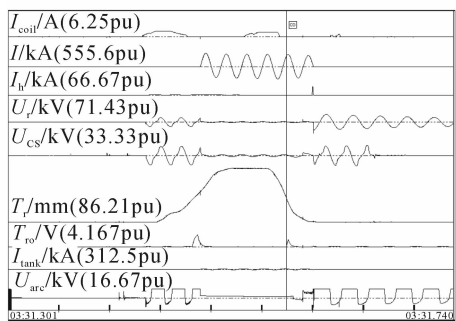
Fig. 4 Test circuit of short-circuit test



(a) T100a首开极长燃弧



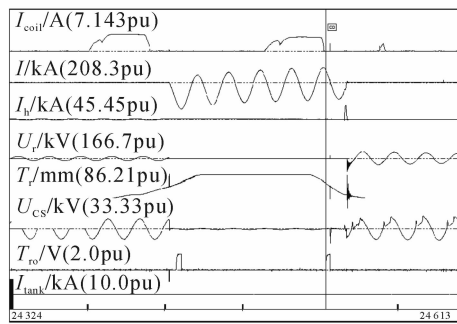
(b) T100a晚开极长燃弧



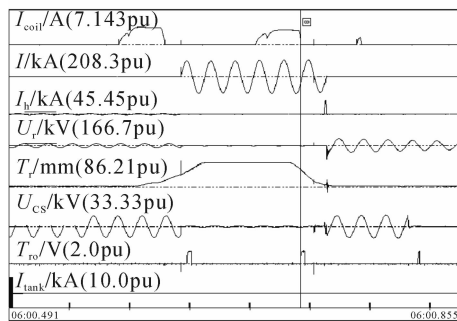
(c) T100s晚开极长燃弧

图5 系统源故障开断试验典型示波图

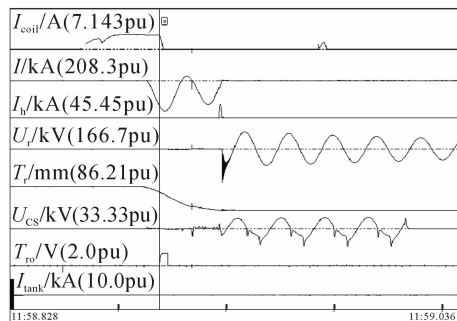
Fig. 5 Typical test results oscillogram of system-source fault



(a) OP1首开极长燃弧



(b) OP1晚开极长燃弧



(c) OP2晚开极长燃弧

图6 失步故障开断试验典型示波图

Fig. 6 Typical test results oscillogram of out-of-phase fault

013:2014(草案版)的基础上,分析与讨论了发电机断路器系统源短路故障、发电机源短路故障、失步故障的原理及其特征,以及与输配电系统用的高压

交流断路器短路故障的区别,并进一步分析了3种故障的短路开断、关合试验程序及参数要求。最后,介绍了 XIHARI 大容量试验站的发电机断路器合成

试验回路及其工作原理。

参考文献:

- [1] IEC/IEEE 62271-37-013:2014 High-voltage switchgear and controlgear—Part 37-013: Alternating-current generator circuit-breakers[S]. Edition 1.2014.
- [2] IEEE Std C37.03—1997 IEEE standard for AC high-voltage generator circuit breakers rated on a symmetrical current basis[S]. 1997.
- [3] GB/T 14824—2008 高压交流发电机断路器[S]. 2008.
GB/T 14824—2008 High-voltage alternative generator circuit-breaker[S]. 2008.
- [4] IEEE Std C37.011—2011 IEEE application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis[S]. 2011.
- [5] GB 1984—2014 高压交流断路器[S]. 2014.
GB 1984—2014 High-voltage alternating current circuit-breakers[S]. 2014.
- [6] IEC 62271-100:2012 High-voltage switchgear and controlgear—Part 100: High-voltage alternating-current circuit breakers [S]. Edition 2.1.2012.
- [7] IEEE Std C37.04—1999 IEEE standard rating structure for AC high-voltage circuit breakers[S]. 2006.
- [8] IEEE Std C37.04b—2008 IEEE standard 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[S]. 2008.
- [9] IEEE Std C37.06—2009 IEEE standard for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis—preferred ratings and related required capabilities for voltages above 1 000 V[S]. 2009.
- [10] 张万荣, 赵伯楠, 苟锐锋. 发电机出口真空断路器瞬态恢复电压的研究[J]. 高压电器, 2000, 36(4): 15-18.
ZHANG Wanrong, ZHAO Bainan, GOU Ruifeng. Study on transient recovery voltage of generator circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(4): 15-18.
- [11] 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.
- [12] SMEETS R P P, TE PASKE L H. Testing of SF₆ and vacuum generator circuit breakers[C]//2011 1st International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology. Xi'an: ICEPE, 2011: 147-151.
- [13] 刘浩军, 黄实, 李刚, 等. 发电机断路器 T100a 试验方法比对研究及试验实施[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 36-41.
LIU Haojun, HUANG Shi, LI Gang, et al. Comparative study and implementation of the T100a test methods for generator circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 36-41.
- [14] 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[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 113-118.
- [15] SMEETS R P, VAN DER LINDEN W A. The testing of SF₆ generator circuit-breakers[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(4): 1188-1193.
- [16] GB 4473—2008 高压交流断路器的合成试验[S]. 2008.
GB 4473—2008 Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers[S]. 2008.
- [17] IEC 62271-101:2012 High-voltage switchgear and controlgear—Part 101: Synthetic testing[S]. Edition 2.0.2012.

高享想(1986—), 男, 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, 研究方向为高压电器电流开断暂态分析、计算与建模。