

关于GB 1984—2014电寿命试验的计算与评估

电寿命试验是验证断路器可靠性的重要型式试验之一。GB 1984—2014相对于IEC 62271—100在用于自动重合闸方式的E2级断路器电寿命试验相关条款中增加了序列4,即100%额定短路电流的20次、30次和50次的开断操作。依据触头相对电磨损计算公式分析比对GB中序列4与IEC原有序列1、2及3的累积电磨损,为电寿命试验时各序列能否相互覆盖提供了理论依据;并比对中性点非有效接地系统电寿命与试验方式T100a三次有效开断操作时电弧能量的差异,依此判断试验方式T100a中的开断操作能否计入电寿命中单分操作的有效次数。

董 玮¹ 叶丽慧² 刘浩军¹ 胡 勋^{1/1}. 西安高压电器研究院有限责任公司
2. 厦门ABB开关有限公司

0 引言

断路器在电力输配电系统中需要同时完成系统功能操作和设备保护,其性能的优劣从很大程度上决定了电网可靠性。断路器在运行中需承受严酷的机械和电气压力:合/分闸操作过程为了触头获得很大的加速度需要操动能量的突然释放;在短时间内开断故障电流时内部电弧损耗造成触头磨损,开断介质的分解等。因此,需要对操动机构进行定期维护,弧触头等可更换部件到达运行寿命周期后需进行更换。但是,盲目的解体拆卸进行检修是很大一笔支出,并且会造成电力系统运行中断^[1-7]。

电寿命试验通过断路器在不进行检修的情况下验证其具有开断所有故障电流的能力来保障断路器功能的可靠性。GB 1984—2014《高压交流断路器》子条款6.112.2用于自动重合闸方式的E2级断路器表30在IEC 62271—100序列1、2和3的基础上增加了序列4,即100%额定

短路电流的20次、30次和50次的开断操作^[8-9]。本文从触头相对电磨损的角度计算分析GB中序列4与序列1、2和3的累积电磨损,并比对中性点非有效接地系统电寿命与试验方式T100a三次有效开断操作时电弧能量的差异。

1 SF₆断路器触头电磨损的计算

SF₆断路器操作时具有一致性:触头分离时,电弧在弧触头之间扩展,弧触头本身包含可以耐受高温的特殊材料。冷的开断用压缩气体通过喷口进行吹弧,喷口直接暴露在电弧强大的辐射下。开断单元中各个组件将决定SF₆断路器的运行周期。

1) 电极。尽管电极由难熔材料制成,但仍会受到电弧根部的侵蚀。局部熔化造成金属蒸汽发射,导致开断用压缩气体电离。侵蚀程度取决于多种因素,如材料的热导率、吹弧情况、电流幅值和燃弧时间等。

2) 喷口。决定了气吹情况,为隔热材料,在电弧高温作用下升华。磨损体现在喷口内外直径的变化。

3) 开断用压缩气体。电弧作用会造成开断用压缩气体化合物成分的轻微改变。各种气体分解物和粉末状产物(金属氟化物)的出现,增加了灭弧室内SF₆和与SF₆接触的电极、喷口及灭弧室内壁表面的化学反应。

大量运行经验和试验结果显示,限制开断单元运行周期的是触头而非喷口。而且,电弧作用导致SF₆分解物数量较小,安置在开断单元内的吸附剂可



董 玮/工程师

关键词/Keywords

E2级断路器 ·
电寿命试验 ·
T100a ·

以将气体内的杂质含量控制在1%。在运行寿命末期，开断单元的绝缘性能主要由下列因素决定：弧触头烧蚀产生的金属粒子，弧触头电磨损后的形状改变场强分布以及SF₆固体分解物。尤其是在开断小电流时，较小的开距下耐受瞬态恢复电压（TRV）时容易造成闪络。综合以上分析显示触头烧蚀是开断单元电磨损的首要因素^[10-16]。

触头电磨损取决于电流幅值和燃弧时间。单次开断操作时燃弧时间随机分布，但对于电寿命试验来说，多次开断后其平均燃弧时间趋于近似，因此可以忽略燃弧时间的随机分散性，只用开断电流幅值作为衡量触头电磨损的参量。基于文献[17-19]得到触头相对电磨损的计算公式如下。

当 $I_{SC} < 0.35I_{SCN}$ 时

$$N = 1.83 \times (0.35 \times I_{SCN} / I_{SC})^3 \tag{1}$$

当 $I_{SC} > 0.35I_{SCN}$ 时

$$N = (0.5 \times I_{SCN} / I_{SC})^{1.7} \tag{2}$$

表1 电寿命试验操作序列造成的累积电磨损

试验电流（额定短路开断电流的百分数）(%)	操作顺序	操作顺序的次数					
		序列1	序列2	序列3	序列4		
10	O	84	12	—			
	O—0.3 s—CO	14	6	—	—		
	O—0.3 s—CO—t—CO	6	4	1			
30	O	84	12	—			
	O—0.3 s—CO	14	6	—	—		
	O—0.3 s—CO—t—CO	6	4	1			
60	O	2	8	15	—		
	O—0.3 s—CO—t—CO	2	8	15			
100（对称的）	O—0.3 s—CO—t—CO	2	4	2	1		
	O	—	—	—	8	13	23
	CO	—	—	—	6	11	21
	O—0.3 s—CO—t—CO	—	—	—	1		
累积电磨损(%)		100*	125	134	84	126	210

注*：以序列1为基准定义 W_{50} ，假设序列1造成的电磨损为100%。

从表1中可以看出，序列4中20次开断100%额定短路电流时造成的累积电磨损仅为序列1的84%；30次开断累积电磨损比序列2仅高出1%，小于序列3，从试验考核严酷程度来讲，序列4中30次开断仅能覆盖序列1、2；50次开断累积电磨损

式中， I_{SC} 为开断电流； I_{SCN} 为额定短路开断电流； N 为能够达到相当与单次开断 $I_{SCN} \times 50\%$ 时造成的磨损等级的分闸操作次数，即

$$W_{50} = NW \tag{3}$$

当 $I_{SC} < 0.35I_{SCN}$ 时

$$W = 12.7 \times W_{50} \times (I_{SC} / I_{SCN})^3 \tag{4}$$

当 $I_{SC} > 0.35I_{SCN}$ 时

$$W = 3.25 \times W_{50} \times (I_{SC} / I_{SCN})^{1.7} \tag{5}$$

式中， W 为单次开断电流 I_{SC} 时造成的电磨损； W_{50} 为单次开断电流 $I_{SCN} \times 50\%$ 时造成的电磨损。

IEC 62271—100利用这些公式对单压式SF₆断路器和真空断路器的磨损量进行计算（对于其他类型的断路器，计算结果可能不同），结果如表1所示。由式（1）、式（2）可得试验电流分别为额定短路开断电流的10%、30%和60%时，要达到与单次额定短路开断电流造成的磨损相当当时所需的开断操作次数分别为253次、9.4次和2.4次。

为210%，比序列1高出2倍多。

2 电寿命与试验方式T100a的电弧能量比对

标准中规定电寿命试验应在与基本短路试验

同样的、干净的且新的断路器上实施，不应进行中间维护。当经过基本短路试验序列后，断路器未经检修继续进行电寿命试验，应该在规定的相应操作循环次数中减去1。实际上，大部分制造厂家为了降低试验成本，都会将基本短路与电寿命试验在一台样机上进行。

电寿命试验是从证明触头耐烧蚀的角度来考核断路器性能，因此本节分析计算中忽略了T100a与电寿命试验TRV参数的不同，仅从电弧能量的角度比对两种试验方式对触头造成的电磨损。

本节仅对中性点非有效接地系统三相短路故障进行讨论，因为应用于中性点有效接地系统的断路器电寿命与试验方式T100a均采用单相试验来替代三相试验。

中性点非有效接地系统中三相对称短路电流开断计算过程较为熟知^[1]，文中不再赘述。图1为中性点非有效接地系统中电寿命试验时三次有效开断操作。假设断路器试验方式T100s中获得的最短燃弧时间为1 ms（若灭弧介质采用SF₆气体时，会得到更长的最短燃弧时间，但这并不影响分析结果），对于如图1所示的三次有效开断操作，根据标准要求每次分闸操作间脱扣脉冲控制的整定值依次提前40电度。依此得到图1中三次开断操作时每相的电弧能量，即求解 i^2 在燃弧窗口内的定积分，所得结果如表2所示。

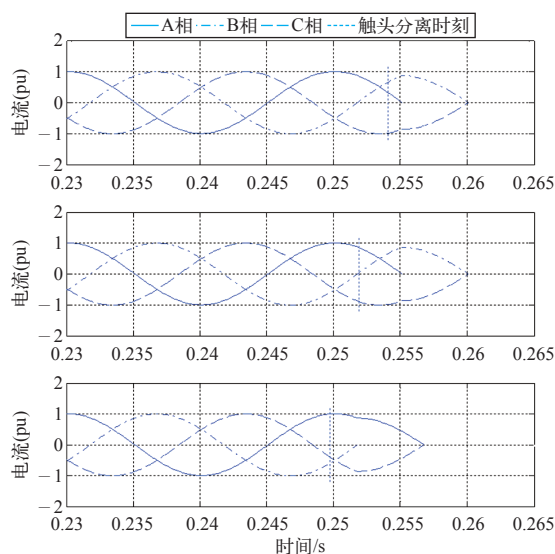


图1 中性点非有效接地系统中电寿命试验时三次有效开断操作

表2 电寿命与T100a三次有效开断时每相电弧能量比较
(单位: pu)

项目	第1次	第2次	第3次	累积能量
电寿命	A相 $\times 10^{-3}$	0.03	0.91	3.9
	B相 $\times 10^{-3}$	2.5	2.9	0.28
	C相 $\times 10^{-3}$	2.8	4.9	2.8
T100a	A相 $\times 10^{-3}$	1.6	5.0	0.68
	B相 $\times 10^{-3}$	2.3	9.0	4.8
	C相 $\times 10^{-3}$	5.5	1.7	7.3

试验方式T100a中流过短路器三相非对称短路电流为

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi)e^{-t/\tau} \\ i_B = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 2\pi/3) - I_m \sin(\alpha - \varphi - 2\pi/3)e^{-t/\tau} \\ i_C = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 2\pi/3) - I_m \sin(\alpha - \varphi + 2\pi/3)e^{-t/\tau} \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出，短路电流为交流分量与直流分量的叠加，计算过程中可以将这两个分量单独运算。设 $t=t_0$ 时，A相短路电流在过零时首先熄弧，此时B、C两相形成单相短路，交流分量推导过程与中性点非有效接地系统中三相对称短路电流开断计算过程一致，由于试验回路本身固有参数未发生变化，直流分量继续按照 $e^{-t/\tau}$ 指数形式衰减，仅是初始值发生改变，这样就可以得到当 $t \geq t_0$ 时

$$I_{BC} = 0.866 I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 2\pi/3 + \pi/6) + K e^{-(t-t_0)/\tau} \quad (7)$$

式中， K 为晚开两相构成单相回路时直流分量衰减系数， K 可以通过 t_0 时刻边界条件获得，即 $t=t_0$ 时

$$I_{BDC\%} = K e^{-(t-t_0)/\tau} = I_B - I_{BAC\%} \quad (8)$$

式中， $I_{BAC\%}$ 、 $I_{BDC\%}$ 分别为B相电流交、直流分量。

根据GB 1984—2014中6.102.10.1.2的要求进行中点非有效接地系统中的试验方式T100a时，对于如图2所示的第一次有效开断操作，在A相获得触头分离瞬间所要求的直流分量，A相为首开极，电弧在大半波末熄灭且有尽可能最长的燃弧时间；第二次有效操作时应将短路起始相角提前60°，脱扣脉冲控制的整定提前130°，此时在B相获得触头分离瞬间所要求的直流分量，B相为晚开相，电弧经过延长的大半波后开断；第三次操作时应将短路起始相角提前60°，脱扣脉冲控制的

整定提前 25° ，此时在C相获得触头分离瞬间所要求的直流分量，C相为晚开相，电弧经过延长的大半波后开断。这样得到的三次有效开断操作依次是：A相首开大半波、B相延长大半波、C相延长大半波。由式（7）和式（8）得到的电流表达式可以计算图2中三次有效开断时每相的电弧能量，所得结果见表2。

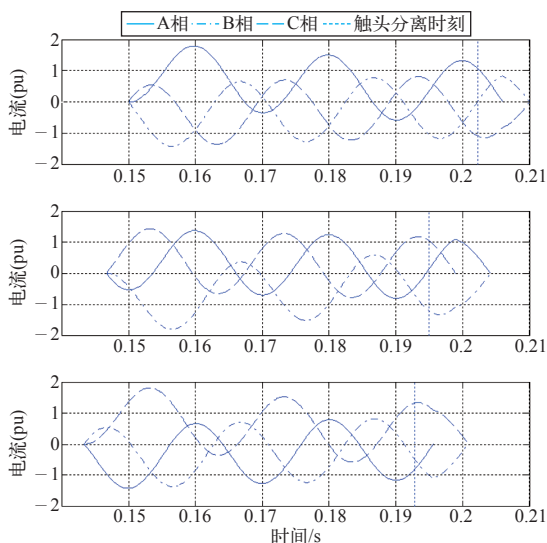


图2 中性点非有效接地系统中T100a试验时三次有效开断操作

从表2中可以看出，T100a三次有效开断时三相累积电弧能量大于电寿命三次有效开断所产生的电弧能量。因此，从电寿命试验的考核目的来讲，试验方式T100a可以计入电寿命试验的单分操作次数。

3 结束语

大量运行经验和试验结果表明触头的耐烧蚀度为限制开断单元运行周期的主要因素。在此基础上利用触头相对电磨损计算公式能够根据电流幅值的大小量化判断高压交流断路器的电寿命极限。据此计算可得：①试验电流分别为额定短路开断电流的10%、30%和60%时，要达到与单次额定短路开断电流造成的磨损相当时所需的开断操作次数分别为253次、9.4次和2.4次。②GB 1984—2014《高压交流断路器》中用于自动重合闸方式的E2级断路器电寿命试验时，序列2累积电磨损为序列1的126%，序列3累积电磨损为134%，新增序

列4中连续20次开断100%额定短路电流时造成的累积电磨损仅为序列1的84%；30次开断累积电磨损为126%；50次开断累积电磨损为210%。据此可以清楚地判断各序列之间能否相互覆盖。

在中性点非有效接地系统三相对称短路电流表达式的基础上，文中提出了三相非对称短路电流的计算公式，依此计算T100a试验时三次有效开断操作中产生的电弧能量与电寿命试验时的差异。结果表明，T100a试验中三相累积电弧能量较之电寿命试验更高，因此试验方式T100a可以计入电寿命试验的单分操作次数，即如果断路器在进行完基本短路试验序列后未经检修，继续按序列4进行电寿命试验时，应在相应的单分操作中减去T100a的试验次数。

参考文献

- [1] 徐国政，张节容，钱家骊，等. 高压断路器 [M]. 北京：清华大学出版社，2000.
- [2] 曹荣江，顾霓鸿. 高压交流断路器的运行条件 [M]. 北京：北京工业大学出版社，1999.
- [3] 王季梅，苑舜. 大容量真空开关理论及其产品开发 [M]. 西安：西安交通大学出版社，2001.
- [4] 钱家骊. 高压断路器的更换技术和日本的更换量化准则 [J]. 高压电器，2003，39（4）：53-55.
- [5] 刘全志，师明义. 高压断路器在线状态监测与诊断技术 [J]. 高电压技术，2001，27（5）：29-31.
- [6] 王季梅，钱忠厚. 真空断路器电寿命试验采用降低电压试验方法的分析 [J]. 高压电器，1990，26（1）：37-39.
- [7] 王季梅，张伟. 真空断路器在额定电流下开断的电寿命试验研究 [J]. 电工技术学报，1993（2）：56-60.
- [8] 全国高压开关设备标准化技术委员会 (SAC/TC 65). GB 1984—2014 高压交流断路器 [S]. 北京：中国标准出版社，2014.
- [9] IEC 62271-100: High-voltage switchgear and controlgear—part 100: high-voltage alternating-current circuit breakers [S]. 2012.

(下转第79页)

- 和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] GB 1984—2014 高压交流断路器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [3] IEC 62271—100: High-voltage switchgear and controlgear—part 100: high-voltage alternating-current circuit breakers [S]. 2012.
- [4] IEC 62271—306: Guide to IEC 62271—100, IEC 62271—1 and other IEC standards related to alternating current circuit-breakers [S]. 2012.
- [5] 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.
- [6] Colclaser, Jr R G, Buettner D E. The traveling-wave approach to transient recovery voltage [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88 (7): 1028-1035.
- [7] Pipes, Louis A. Transient analysis of symmetrical networks by the method of symmetrical components [J]. IEEE Electrical Engineering, 1940, 59 (8): 457-459.
- [8] GB 4473—2008 高压交流断路器的合成试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [9] IEC 62271—101: High-voltage switchgear and controlgear—part 101: synthetic testing [S]. 2012.
- [10] Ren-fu Wang. Calculation and adjustment limitation of four-parameter TRV in high power testing circuits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2 (3): 758-764.
- [11] Mazzoleni B, Rovelli S. Experiences gained on artificial lines for synthetic testing under short line fault conditions [J]. IEEE Power Apparatus and Systems, 1972, 91 (3): 823-820.
- (收稿日期: 2016-05-14) **EA**

(上接第61页)

- [10] 孙福杰, 王章启. 高压断路器触头电寿命诊断技术 [J]. 电网技术, 1999, 23 (3): 59-61.
- [11] 郭贤珊, 王章启. 高压断路器触头电寿命预测的研究 [J]. 高电压技术, 1999, 25 (3): 43-44.
- [12] 李炜, 李玉春, 高以梅, 等. 关于真空断路器电寿命极限开断次数的研究 [J]. 高压电器, 2007, 43 (3): 222-226.
- [13] 王阳, 朴在林. 断路器电寿命在线监测的几种计算方法 [J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36 (1): 250-252.
- [14] 胡文平, 尹相根. 基于Matlab的高压断路器触头电寿命仿真研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 9-12.
- [15] 曹荣江, 顾霓鸿. 表征真空断路器电寿命的若干判据 [J]. 电网技术, 1997, 21 (11): 26-32.
- [16] 高文胜. 基于绝缘诊断的期望寿命预测 [J]. 高电压技术, 1997, 23 (1): 57-58.
- [17] Pons A, Sabot A, Babusci G. Electrical endurance and reliability of circuit-breakers—common experience and practice of two utilities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (1).
- [18] IEC Publication 271, List of basic terms, definitions and rated mathematics for reliability [M]. 2nd. Geneve: International Electrotechnical Commission, 1974: 1-53.
- [19] Pierrat L. Thermo-mechanical effects of short-circuit currents: failures by progressive degradation of sudden breakage [C]. 4th International Symp. SCCPS, Liege, 1990.
- (收稿日期: 2016-05-05) **EA**