

断路器电寿命的折算、限值及其在线监测技术

黎斌

(西安西开高压电气股份有限公司, 陕西 西安 710077)

Conversion, Limit and On-line Monitoring Technology of Electrical Endurance for Circuit Breakers

LI Bin

(Xi'an Shiky High Voltage Electric Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

摘要: 介绍了不同开断电流对灭弧室烧损量的折算方法, 分析了 SF₆ 和真空断路器电寿命的不同限值标准。以笔者推荐的电寿命折算方法和我国通用的电寿命限值标准为基础, 可以开发出断路器电寿命分析软件及具有实用价值的电寿命监测仪

关键词: 电寿命折算; 电寿命限值; 电寿命在线监测

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: Conversion methods for dissipation of interrupter by different breaking currents are introduced, different limit standards of electrical endurance for SF₆ and vacuum circuit breakers are analysed. It is possible to develop analysing software for electrical endurance of circuit breaker and practical and valuable monitor for electrical endurance.

Key words: conversion of electrical endurance;

limit of electrical endurance;

on-line monitoring of electrical endurance

1 断路器电寿命的折算

1.1 寻求电寿命近似折算式的可行性

断路器在电网中开断不同大小的故障电流, 对灭弧室的烧蚀作用是不同的。过去曾流行一种按累积开断电流来判断灭弧室烧损的办法, 经试验验证是错误的。如, 40 kA×20 次与 4 kA×200 次, 其灭弧室的烧损情况就相差极大: 前者灭弧室已达到烧蚀的极限, 而后者, 灭弧室的烧损情况极其轻微, 尽管两者的累积开断电流都为 800 kA。

后来的研究者意识到, 采用开断电流累计加权的办法, 即按 $\sum I_s^\alpha \cdot t_h$ 值来考虑灭弧室触头的电磨损比较合理一些^[1]:

$$V = \int_0^t I_s^\alpha t_h \quad (1)$$

触头的磨损体积 V 与触头材料特性 (k 值) 及开断电流 I_s 的 α 次方值有关 (α 为 1~2)。这些研究都观察到: 尽管断路器在运行时每次故障开断的燃弧时间 t_h 不同, 但当故障开断次数达到一定值之后, 故障开断的平均燃弧时间是趋近的^[2,3]。因此在追求一个比较适合工程使用的 V 值计算式时, 省去了时间因数 t_h 。

与此同时, 还出现一种简单的“电流热能等效的折算法”, 认为累计 $I_s^2 t_h$ 可以估计灭弧室电磨损。运行实践与开断试验都表明, 这种折算法也比较粗糙, 不适于工程使用。

近年来, 对断路器电寿命的研究更趋于适用化。影响开关电寿命的随机因素太多, 如: 不同产品结构相异, 对同样的开断电流却表现出不同的电磨损; 同一产品在不同试验站也有不同的试验结果; 甚至同一产品在同一试验站做两个系列的电寿命试验也可能得到不同的结果^[4]。但是, 诸如燃弧时间、触头及喷嘴的结构与材料等随机因素对灭弧室烧蚀的影响, 从累计的角度考虑, 都可加以简化, 从而可以得到一个比较可行的近似折算公式。

1.2 SF₆ 断路器电寿命折算式

法国高能试验室 (EDF) 和意大利工程指导公司 (ENEL) 对中压和高压断路器的电寿命进行的研究与试验观察到: 限制灭弧室使用寿命的是弧触头而不是喷嘴^[5]。国内许多开关的试验也观察到这一现象。因为喷嘴材料的电弧分解物对 SF₆ 气体绝缘的影响极小, 喷嘴尺寸的扩大通常也不成为制约开断能力的主要因素, 而触头材料的电弧分解物和金属粒子都会影响灭弧室的绝缘特性和对暂态恢复电压的承受能力, 静弧触头长度的磨损和动弧触头口径的扩大, 却是制约灭弧室电寿命的主要因素。

EDF 和 ENEL 在电寿命研究和试验中, 找到了一

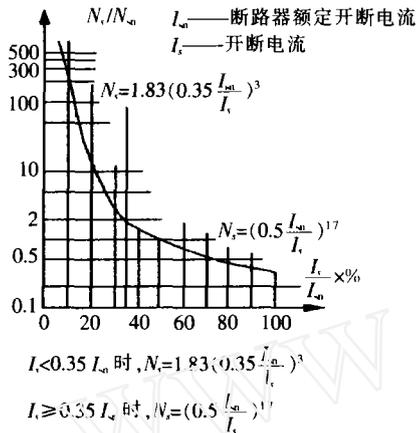
收稿日期: 2005-08-19; 修回日期: 2005-10-16

作者简介: 黎斌 (1939-), 男, 湖北人, 教授级高级工程师, 从事高压电器研发工作。

种适于工程使用的触头损耗等效定律 $N_s=f(I_{sn}/I_s)$, 见图1^[5]。该定律表达了不同开断电流对灭弧室烧损量的折算关系,它以 $0.5 I_{sn}$ (I_{sn} 为额定短路开断电流)一次开断的电磨损为基数,当 $I_s < 0.35 I_{sn}$ 时,与一次 $0.5 I_{sn}$ 开断电磨损相同的小电流 I_s 的等效开断次数 N_s 为:

$$N_s = 1.83 \times (0.35 \times I_{sn} / I_s)^3 \quad (2)$$

当 $I_s \geq 0.35 I_{sn}$ 时,与一次 $0.5 I_{sn}$ 开断电磨损相同的大电流 I_s 的等效开断次数 N_s 为:



$$N_s = (0.5 \times I_{sn} / I_s)^{1.7} \quad (3)$$

图1及计算式(2),式(3)经检验,它适于不同厂家生产的开断原理相同的多种断路器^[5]。

国内也有研究者做了类似的电寿命诊断技术的研究^[6],并统计了一些高压 SF₆ 断路器的开断试验数据,获得了如图2所示的不同开断电流的等效开断次数曲线。该曲线以 11 kA 为界线,由两部分组成:

$$\begin{aligned} \text{当 } I_s < 11 \text{ kA 时, } N_s &= (49.5 / I_s)^{3.46} \\ \text{当 } I_s \geq 11 \text{ kA 时, } N_s &= (223.5 / I_s)^{1.76} \end{aligned} \quad (5)$$

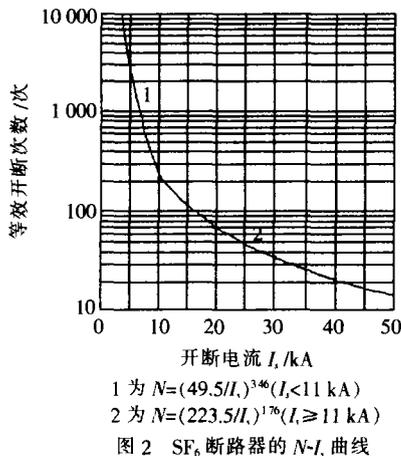


图1与图2两条曲线是以不同结构、不同数量的 SF₆ 断路器的开断试验结果为基础建立的,虽然两者的数学分析式不同,但两条曲线的走势相同,而且两者的数值分析结果也较接近。图1把 50% I_{sn} 的一次开断电流烧损量作为比较的基数,经变换,将一

表1 曲线1,2的比较

$(I_s/I_{sn})/\%$	等效开断次数比 N_s/N_m	
	图1曲线	图2曲线
100	1.00	1.00
75	1.63	1.64
50	3.24	3.36
35	5.95	6.29
25	16.30	11.45
10	254.74	198.96
5	2 039	2 189

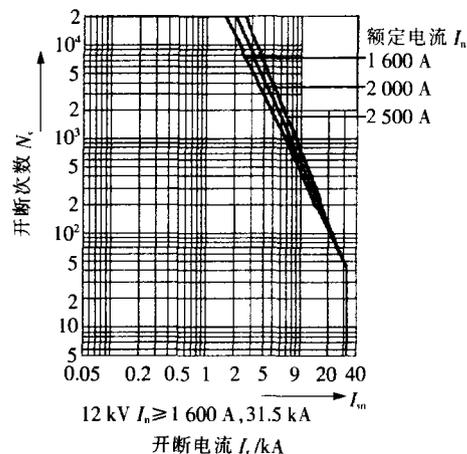
次 I_{sn} 开断的烧损量作为基数时,就可以与图2进行比较,见表1。

表1中 N_m 为 I_{sn} 电流开断次数的累计值。从表1数据可知,在比值 $I_s/I_{sn} \geq 35\%$ 范围内,曲线1与2比较吻合。这不是巧合,它反映了工作原理不同的断路器电寿命与开断电流之间共同的变化规律,它从一个侧面证实了文[5]对图1所作的评价:“经检验,它适用于不同厂家生产的开断原理相同的多种断路器”。

1.3 中压真空断路器电寿命折算式

真空断路器触头结构和熄弧原理与 SF₆ 断路器不同。真空开关的主导电触头与弧触头合二为一,触头表面的烧蚀状况(粗糙度)对触头间隙承受零后暂态恢复电压的能力有较大影响。真空开关触头热容量通常比 SF₆ 断路器的弧触头大,开断时燃弧时间也较短,相应真空断路器通常比 SF₆ 断路器具有更长的电寿命,尤其是在小电流开断时。因此,以 SF₆ 断路器开断试验为基础总结出的电寿命折算式 $N_s=f(I_{sn}/I_s)$ 不适用于真空断路器。

我国是真空开关制造和使用的大国之一,但是,对真空断路器电寿命折算的研究做得太少。国外公司对真空断路器的电寿命做过较多的研究,得出了不同真空断路器开断次数 n 与开断电流 I_s 之间的关系曲线 $n=f(I_s)$ ^[7]。图3示出有代表性的一组曲线。经比较,这些曲线之间在数量上有些差异,但曲线的走



势特征相同。对于 I_{sn} 相同而额定电流 I_n 不同的断路器都表现出： I_n 较大的比 I_n 较小的具有长一些的电寿命，这种差异在开断电流较大 ($0.5 I_{sn}$ 以上) 时很小，在小于 $0.25 I_{sn}$ 的开断电流区间，则差异明显，如在 $0.1 I_{sn}$ 附近，不同 I_n 的开关相同开断电流的开断次数相差约 140%。

分析图 1 与图 3，可以看出图 1 及其折算式 (2)、式 (3) 不能用于真空断路器。有必要参照图 3 曲线寻找一组较适于真空开关使用的电寿命折算式。

依据图 3 曲线上的数据按不同额定电流可以得到如下 3 组适于真空开关使用的电寿命折算式，与一次 I_{sn} 开断电磨损等效的 I_s 开断次数 N_s 为：

(1) 当 $I_n=1\ 600\text{ A}$ 时，
 $I_s < 0.35 I_{sn}, N_{s1} = 1.3 (I_{sn}/I_s)^2$ (6)

$I_s \geq 0.35 I_{sn}, N_{s2} = (I_{sn}/I_s)^{2.2}$ (7)

(2) 当 $I_n=2\ 000\text{ A}$ 时，
 $I_s < 0.35 I_{sn}, N_{s1} = 1.8 (I_{sn}/I_s)^2$ (8)

$I_s \geq 0.35 I_{sn}, N_{s2} = (I_{sn}/I_s)^{2.3}$ (9)

(3) 当 $I_n=2\ 500\text{ A}$ 时，
 $I_s < 0.35 I_{sn}, N_{s1} = 1.6 (I_{sn}/I_s)^{2.2}$ (10)

$I_s \geq 0.35 I_{sn}, N_{s2} = (I_{sn}/I_s)^{2.4}$ (11)

表 2~表 4 列出 n_s 与 N_s 的对比数据及两者相比的极限误差。 n_s 表示按图 3 曲线得到的与一次 I_{sn} 开断电磨损相等的 I_s 等效开断次数； N_s 为按式 (6)~式 (7)、式 (8)~式 (9)、式 (10)~式 (11) 等折算式计算出的相应的 I_s 等效开断次数， f 是 n_s 与 N_s 的比较误差。3 个表中所列 f 值最大为 15%，可以为工程使用所接受。

根据表 (2)~表 (4) 数据作出图 4 的 $N_s=f(I_s/I_{sn})$

表 2 $I_n=1\ 600\text{ A}$ N_s 按式 (6)~式 (7) 计算

I/I_{sn}	N_s /次	n_s /次	$f=(N_s-n_s)/n_s$
0.10	130.0	130.0	0
0.15	57.8	51.0	+0.13
0.20	32.5	32.5	0
0.30	14.4	12.5	+0.15
0.35	10.1	9.5	+0.06
0.50	4.59	4.75	-0.03
0.60	3.08	3.0	+0.03
0.75	1.88	1.62	+0.16
0.85	1.43	1.40	+0.02

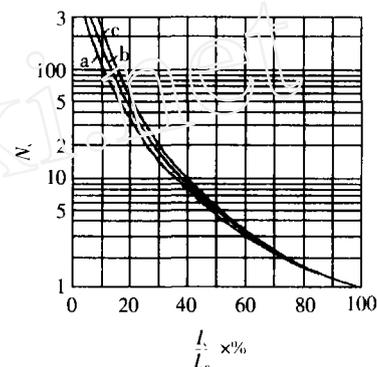
表 3 $I_n=2\ 000\text{ A}$ N_s 按式 (8)~式 (9) 计算

I/I_{sn}	N_s /次	n_s /次	$f=(N_s-n_s)/n_s$
0.10	180.0	200.0	-0.10
0.15	80.0	75.0	+0.07
0.20	45.0	40.0	+0.13
0.30	20.0	18.10	+0.11
0.35	11.2	10.5	+0.07
0.50	4.92	4.85	+0.01
0.60	3.24	3.5	-0.07
0.75	1.94	1.75	+0.11
0.85	1.45	1.50	-0.03

表 4 $I_n=2\ 500\text{ A}$ N_s 按式 (10)~式 (11) 计算

I/I_{sn}	N_s /次	n_s /次	$f=(N_s-n_s)/n_s$
0.10	253.6	288.0	-0.12
0.15	104.0	110.0	-0.05
0.20	55.0	51.0	+0.08
0.30	22.6	21.5	+0.05
0.35	12.4	12.5	-0.01
0.50	5.28	5.0	+0.06
0.60	3.41	3.88	-0.12
0.75	1.99	1.90	+0.05
0.85	1.48	1.60	-0.08

曲线，及其相应的式 (6)~式 (7)、式 (8)~式 (9)、式 (10)~式 (11)，可适用于真空断路器的电寿命折算。图 4 中， N_s 为与一次额定短路开断电流 I_{sn} 开断电磨损等效的任意开断电流 I_s 的开断次数。



曲线 a 为 $I_n=1\ 600\text{ A}$ ，按式 (6)~(7) 计算 N_s 。
 曲线 b 为 $I_n=2\ 000\text{ A}$ ，按式 (8)~(9) 计算 N_s 。
 曲线 c 为 $I_n=2\ 500\text{ A}$ ，按式 (10)~(11) 计算 N_s 。

图 4 真空断路器随开断电流而变化的等效开断次数

2 断路器电寿命的限值

2.1 断路器电寿命限值的讨论

断路器的使用寿命为 25 年，这一年限已被国内外开关制造行业和使用部门普遍接受，如何才能实现这一目标，即断路器电寿命如何限制？这是近 20 年来国内外开关制造行业和使用单位不断讨论的重要问题。国外一些研究单位提出了许多电寿命试验方案，认为断路器只要通过了这些电寿命试验，就可以认为灭弧室可用 25 年且不必维护。但是，至今的各种电寿命试验方案，除用于中压断路器的试验方案被 IEC62271-100《高压交流断路器》标准采纳，定为 E2 级断路器电寿命试验操作顺序之外，其它诸多试验方案仍未取得一致意见。

我国开关制造行业和运行部门对断路器电寿命限值的讨论，意见比较统一，在断路器各自的产品技术条件（或产品样本）中和电力行业标准 DL/T403-2000《12~40.5 kV 高压真空断路器订货技术条件》中都做了相应的规定（用额定短路开断电流 I_{sn} 连续开断不检修次数 16, 20, 30, 40, 50 次等来表示）。业内大多数人士认为：“断路器电寿命试验在我国行业标准

中的规定是合理可行的,而且已执行近20年,促进了我国真空和SF₆断路器的技术进步,应予保留^[8]。

2.2 对高压SF₆断路器电寿命限值合理性的分析

我国各种高压SF₆断路器电寿命限值多采用I_{sn}×16次或I_{sn}×20次的指标,由各产品自行规定,供用户选用。应讨论的问题是,该指标的合理性。要回答这个问题,除产品本身条件之外,还应由中国电网的故障率来评判,但却没有这方面可靠的运行统计数据。因此,只能借助国外电网有关统计数据来分析。

2.2.1 CIGRE WG13.08 调查资料

由荷兰、日本、瑞士、意大利和德国5国专家组成的国际大电网会议断路器寿命管理工作组(CIGRE WG13.08),汇总了来自四大洲13个国家的18份资料,于1998年公布了调查统计结果指出,在63 kV及以上电网^[9]:①每100 km线路每年发生短路次数平均为5.1~1.7次(100~700 kV);②90%以上故障发生在架空线路上,每条线路平均年故障1.7次;③最大短路预期电流平均值是断路器额定开断电流的40%~60%;④80%故障一次重合成功(O-C后消除),5%故障两次重合成功(O-CO-C后消除),15%故障为永久性故障(O-CO-CO后依然存在);⑤在较高电压等级的线路上,90%故障是单相短路,10%是两相短路,因此故障的61%~64%都是由断路器的同一极开断的^[9]。

由以上统计资料可作出如下统计推算:①25年内每条线路平均故障总数应为N_f=1.7×25=42.5次;②断路器25年内故障跳闸总次数为N_b=0.8×1×N_f+0.05×2×N_f+0.15×3×N_f=57.4次;③因61%~64%的故障分布在同一极开断,因此在25年内单极最大的故障跳闸次数为N_p=0.64 N_b=36.74次;④在36.74次开断中,其故障电流平均值最大为I_m=0.6I_{sn},按电寿命折算式(2)和式(3)可以折算出25年内等效I_{sn}开断次数为N_{s2}:

先将N_p次I_m折算成0.5I_{sn}等效开断次数:

$$N_{s1} = \frac{36.74}{(0.5 \times I_{sn} / 0.6 I_{sn})^{1.7}} = 50.1 \text{ 次}$$

再将N_{s1}次0.5I_{sn}折算成I_{sn}等效开断次数:

$$N_{s2} = (0.5 \times I_{sn} / I_{sn})^{1.7} \times 50.1 \text{ 次} = 15.4 \text{ 次}$$

该值小于我国高压SF₆断路器(GCB)累计开断I_{sn}的次数(16~20)次。

2.2.2 EDF与ENEL的电寿命试验研究经验

法国高能试验室(EDF)和意大利工程指导公司(ENEL)对中高压断路器电寿命进行了20年的试验研究工作,对各电压等级的GCB电寿命试验程序做了规定,作为一例,将420 kV/40 kA GCB电寿命试验程序列入表5^[5]。EDF认为,这些试验负荷可以代表一般线路保护用GCB在25年内所能碰到的各种故障开断负荷的总和。

表5 EDF进行的420 kV/40 kA线路保护断路器电寿命试验程序

	操作循环	电流/kA	TRV
	35次O;7次O-0.3s-CO	12	
老化试验 (无TRV)	9次O	16.8	
	5次O	21	无
	2次O	24	
	2次O	30	
	1次O	40	试验方式D4b开断
	1次O	36	近区故障L90开断
验收试验:有TRV开断及绝缘试验	1次O,1次CO	10	失步开断
	切空载线路24次		
能承受至少80%额定雷电冲击 耐受电压和额定工频耐受电压			

表5中共进行了71次开断试验(切空线电流太小,对触头的烧损可忽略不计),累计I_s²次值为17 849 kA次,我国各种40 kA GCB所具有的电寿命I_{sn}×(16~20)次的I_s²次累计值25 600~32 000 kA次,显然大于EDF长期使用的电寿命试验程序所累计的I_s²次值。

再将表5试验按电寿命折算式(2)和式(3)分别将各种开断电流都折算成等效的I_{sn}开断次数:

当I_s<0.35I_{sn}时,等效开断次数N_{si}按式(12)折算:

$$N_{si} = \frac{1}{1.83(0.35 \times I_{sn} / I_s)^3} \times (0.5 I_{sn} / I_s)^{1.7} \times n \quad (12)$$

当I_s≥0.35I_{sn}时,等效开断次数N_{si}按式(13)折算:

$$N_{si} = \frac{1}{(0.5 \times I_{sn} / I_s)^{1.7}} \times (0.5 I_{sn} / I_s)^{1.7} \times n \quad (13)$$

以上两式中:I_s为表5中所列的开断电流;I_{sn}=40 kA,表5从上至下,各开断电流分别为:0.3,0.42,0.53,0.6,0.75,1,0.9及0.25I_{sn};n为各开断电流对应的开断次数:49,9,5,2,2,1,1及2次。

按式(12),式(13)计算出各挡开断试验等效I_{sn}的开断次数N_{si},累计值为:∑N_{si}=N_{s1}+N_{s2}+...+N_{s8}=12.98次,也小于我国高压GCB电寿命N_{sn}×(16~20)次。

笔者对CIGRE WG13.08工作组提出的来自13个国家高压电网的事故统计资料进行了分析,对法国高能试验室等单位多年的GCB电寿命试验研究的经验进行了分析,从不同侧面验证了:我国高压SF₆断路器采用的I_{sn}×(16~20)次的电寿命限值是比较合适的,可以满足断路器运行25年不更换灭弧

表6 E2级断路器电寿命试验操作顺序

额定短路开断电流百分数/%	操作顺序	操作顺序的次数
	O	84
10	O-0.3s-CO	14
	O-0.3s-CO-t-CO	6
	O	84
30	O-0.3s-CO	14
	O-0.3s-CO-t-CO	6
	O	2
60	O-0.3s-CO-t-CO	2
	O-0.3s-CO-t-CO	2
100	O-0.3s-CO-t-CO	2

室零部件的要求。

2.3 对中压真空断路器电寿命限值合理性的分析

2.3.1 对 IEC 标准的满足度

通过世界各国运行中断路器电寿命的调查, IEC62271-100《高压交流断路器》制定了 E2 级断路器电寿命试验操作程序, 见表 6。认为在断路器预期使用寿命期内, 产品只要能通过表 6 规定的开断操作, 而不更换灭弧室零部件, 其电寿命就符合要求。我国 GB1984-2003《高压交流断路器》标准也采用了这一规定。

表 6 共列出总开断次数为 274 次, 其中: $0.1I_m$ 开断 130 次, $0.3I_m$ 开断 130 次, $0.6I_m$ 开断 8 次, I_m 开断 6 次。按折算式(6)~式(7), 式(8)~式(9), 式(10)~式(11)全部折算成等效 I_m 开断的累计开断 $\sum N_{si}$ 次:

$$\sum N_{si} = N_{s1} + \dots + N_{s4} = 14.72 \sim 18.63 \text{ 次 (对应 } I_m = 1\,600 \sim 2\,500 \text{ A)}$$
, 小于我国中压真空断路器普遍所具有的 I_m 累计开断次数 (20~50) 次。

表 7 ENEL 进行的额定电压 17.5~24 kV 线路保护断路器电寿命试验顺序 (重复两次)

额定短路开断 电流百分数 %	操作循环	操作顺序 的次数
100	0-0.3 s-CO	1
	0	1
60	0-0.3 s-CO-30 s-CO-30 s-CO-180 s-CO	1
	0	23
30	0-0.3 s-CO-30 s-CO-30 s-CO-180 s-CO	23
	0-0.3 s-CO	18
10	0-0.3 s-CO-30 s-CO-30 s-CO-180 s-CO	18

2.3.2 与 ENEL 的电寿命试验程序的比较

ENEL 对配电网中的 17.5~24 kV 断路器的运行电负荷做过调查与估计, 提出了模拟断路器运行 25 年电寿命试验程序, 即按表 7 试验顺序重复试验两次^[5]。该电寿命试验程序已使用多年, 一般情况下断路器都能毫无困难地进行这些试验。ENEL 的这一电寿命试验经验对制定 IEC 标准产生了积极的影响。

表 7 所示试验程序每做一次共计开断次数为 272 次, 重复两次共计 544 次, 其中等于和小于 $0.3I_m$ 的开断占 97%。同前述按折算式(6)~式(7), 式(8)~式(9)及式(10)~式(11)全部折算成等效 I_m 开断的累计开断次数为 $\sum N_{si}$ (试验重复两次): $\sum N_{si} = N_{s1} + \dots + N_{s4} = 23 \sim 32.2$ 次 (对应 $I_m = 1\,600 \sim 2\,500$ A), 也基本在我国中压真空断路器电寿命值 $I_m \times (20 \sim 50)$ 次的覆盖范围之内。

从以上对 IEC62271-100 及 GB1984-2003 中压 E2 级断路器电寿命试验规定和对 ENEL 中压断路器电寿命试验经验的分析中, 可见我国现行的中压

真空断路器电寿命指标 $I_m \times (20 \sim 50)$ 次符合 IEC 及国标相应规定, 也与国外有代表性的电寿命试验经验相吻合。作为一种正式的中压断路器电寿命限值要求, 笔者认为上限取 $I_m \times 30$ 次就可以了。为展示产品电寿命能力, 超过这个值用户当然欢迎。

3 断路器电寿命的在线监测技术

为实现按断路器状态维护的科学目标, 开发和推广使用电寿命监测仪是件很有经济价值和社会意义的事情。只有在确定了不同开断电流的等效电磨损折算式和断路器电寿命限值之后, 开发和使用这种仪器才成为可能。华中科技大学与湖南省电力公司联合对电寿命监测仪进行过研究, 并获得了积极的成果^[6]。

用于 GCB 和 VCB 的电寿命监测仪应具有不同的电寿命分析软件。

3.1 GCB 用剩余电寿命计算式

已知某 GCB 允许连续开断 I_m 的次数为 N , 对应 I_m 一次开断的触头烧损量为 $1/N$ 。在任意开断电流 $I_s < 0.35I_m$ 时, 由式(2)及式(3)可算出与一次 I_m 开断烧损等效的 I_s 开断次数 N_{s1} :

$$N_{s1} = 1.83(0.35 \times I_m / I_s)^3 \times (0.5 \times I_m / I_s)^{-1.7} = 5.95 \times (0.35 \times I_m / I_s)^3$$

与一次 I_s 开断对应的触头烧损量应为:

$$Q_{s1} = \frac{1}{N_{s1}} \times \frac{1}{N} = \frac{1}{5.95} \times (0.35 \times I_m / I_s)^{-3} \times \frac{1}{N} \quad (14a)$$

在任意开断电流 $I_s \geq 0.35I_m$ 时, 与一次 I_m 开断烧损等效的 I_s 开断次数 N_{s2} 由式(3)计算:

$$N_{s2} = (0.5 \times I_m / I_s)^{1.7} \times (0.5 \times I_m / I_m)^{-1.7} = 3.25 \times (0.5 \times I_m / I_s)^{1.7}$$

与一次 I_s 开断对应的触头烧损为:

$$Q_{s2} = \frac{1}{N_{s2}} \times \frac{1}{N} = \frac{1}{3.25} \times (0.5 \times I_m / I_s)^{-1.7} \times \frac{1}{N} \quad (14b)$$

令新开关的相对电寿命为 1, 运行一段时间累计相对烧损量 (电寿命相对损耗量) 为 $\sum Q_{si}$, 相对剩余电寿命则为:

$$L = L_0 - \sum Q_{si} \quad (15)$$

式中: L_0 为开关初始相对电寿命, 新开关 $L_0 = 1$; Q_{si} 为由式(14a)和式(14b)计算的触头电磨损量。

3.2 VCB 用剩余电寿命计算式

VCB 触头结构的特点导致了等效电寿命折算式随额定电流的变化稍有一些差异, 其变化规律是, 随额定电流的增大, 触头热容量也增大, 触头耐烧性能也相应增强, 对于某一开断电流 I_m , 其等效一次 I_m 开断电磨损的开断次数也随之增多。

3.2.1 当 $L_0 = 1\,600$ 时, 由式(6)~式(7):

$I_s < 0.35I_{sn}$ 时,与一次 I_s 开断对应的触头烧损量为:

$$Q_{s1} = \frac{1}{N_{s1}} \times \frac{1}{N} = \frac{1}{1.3} \times (I_{sn}/I_s)^{-2} \times \frac{1}{N} = 0.769 \times (I_{sn}/I_s)^{-2} \times \frac{1}{N} \quad (16a)$$

当 $I_s \geq 0.35I_{sn}$ 时,与一次 I_s 开断对应的触头烧损量为:

$$Q_{s2} = \frac{1}{N_{s2}} \times \frac{1}{N} = (I_{sn}/I_s)^{-2.2} \times \frac{1}{N} \quad (16b)$$

3.2.2 当 $L_n=2000$ 时,由式(8)~式(9)

$I_s < 0.35I_{sn}$ 时,

$$Q_{s1} = \frac{1}{1.8} \times (I_{sn}/I_s)^{-2} \times \frac{1}{N} = 0.556 (I_{sn}/I_s)^{-2} \times \frac{1}{N} \quad (17a)$$

$I_s \geq 0.35I_{sn}$ 时,

$$Q_{s2} = (I_{sn}/I_s)^{-2.3} \times \frac{1}{N} \quad (17b)$$

3.2.3 当 $L_n=2500$ 时,由式(10)~式(11):

$I_s < 0.35I_{sn}$ 时,

$$Q_{s1} = \frac{1}{1.6} \times (I_{sn}/I_s)^{-2.2} \times \frac{1}{N} = 0.625 (I_{sn}/I_s)^{-2.2} \times \frac{1}{N} \quad (18a)$$

$I_s \geq 0.35I_{sn}$ 时,

$$Q_{s2} = (I_{sn}/I_s)^{-2.4} \times \frac{1}{N} \quad (18b)$$

3.2.4 VCB 相对剩余电寿命

运行中 VCB 的相对剩余电寿命计算同式(15),其中 Q_{si} 由式(16a)~式(16b),式(17a)~式(17b),式(18a)~式(18b)三组式计算,适于大、中、小不同额定电流的 VCB 选用。

3.3 关于开断电流的测量

由于影响触头电磨损的随机因素太多,因此对断路器电寿命预测时电流测量的准确度要求可以适当放宽尺度,根据需要与可能取电流采样误差为10%就可满足电寿命预测的工程要求^[10]。

目前电网几乎都使用电磁式电流互感器,在短路电流通过时,电流波形因磁饱和而畸变。文[11-12]研究表明,互感器即使在深度饱和(ALF=40倍)时,二次电流在过零前后1~2ms范围内波形没畸变,二次电流乘以变比折算到初级仍与初级电流有较好的吻合。因此,当电流采样频率为每隔1ms段采一点时,用最大斜率法就能算出 I_1 的真实值,即使在短路电流有较大直流分量情况下也能满足10%的准确度要求。

3.4 对电寿命分析软件的基本要求

对电寿命分析软件的基本要求:①统计累计开断电流、累计触头磨损量并永久保留;②保留近期故障档案(开断电流、开断时间等);③诊断断路器电寿命,当相对剩余电寿命为10%时发出报警,提示检修。④打印、显示、数据远传、数据查询等功能;⑤1台微机所能监控的断路器为30~50台。

4 结语

(1)引荐了法国高能试验室和意大利工程指导公司对 SF₆ 断路器电寿命多年研究试验的成果,经分析,它不仅适用于国外不同厂家生产的 SF₆ 断路器,也适于我国 SF₆ 断路器,借助该项研究提出的开断电流等效次数折算式(2)~式(3),推导出适于 SF₆ 断路器使用的电寿命计算式(14a),式(14b)~式(15)。

(2)选择了具有代表性的 VM1 型真空断路器的允许操作次数 n 与开断电流 I_s 的关系曲线,借助该曲线,推导出适于真空断路器使用的电寿命计算式(16a)~式(16b),式(17a)~式(17b)及式(18a)~式(18b)。

(3)由于影响触头电磨损的随机因素太多,上述电寿命计算式是比较粗略的。在目前无法找到更准确的电寿命折算式的情况下,笔者推荐的电寿命计算式以及按这些计算式所开发的电寿命监测仪具有工程适用价值。更准确的计算和监测仪有待于今后进一步的研究和通过现有监测仪在运行中不断积累经验而改进、完善和发展。

(4)我国关于电寿命限值的相关指标及行业标准,经分析是可行的,已执行了近20年,促进了我国断路器技术的进步,应予肯定。

参考文献:

- [1] 程礼椿. 电接触理论及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
- [2] 曹荣江. SN10-10型少油断路器的累计开断能力试验[J]. 高压电器, 1983, 19(2): 22-24.
- [3] 李建基(译). 少油断路器的电寿命[J]. 高压电器, 1974, 10(6): 35-39.
- [4] 金立湘. 高压 SF₆ 断路器的电寿命试验[J]. 高压电器, 1999, 35(2): 28-31.
- [5] Pons A. Electrical Endurance and Reliability of Circuit-breakers: Common Experience and Practice of Two Utilities[J]. IEEE Trans. on PWRD. 1993, 8(1): 168-172.
- [6] 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(3): 59-61.
- [7] 中国厦门 ABB 开关有限公司. VM1 真空断路器产品说明书[K].
- [8] 顾宽鸿. 高压交流断路器电寿命试验方法探讨[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 62-64.
- [9] Janssen A L J. 关于断路器寿命管理的确定[A]. 国际大电网会议开关设备学术委员会论文集[C]. CIGRE SC-13, 1998: 153-161.
- [10] Rovelli S, Mazza G P. Test Requirements and Facilities for HV Circuit Breakers Inst of Eng [J]. Australia, Nat. Conf. Publ.79/3.
- [11] 王章启. 高压断路器开断参数的监测与记录[J]. 电网技术, 1996(10): 22-25.
- [12] 王章启. 断路器预测中的实用电流采样及误差分析[J]. 高压电器, 2000, 36(2): 22-24.