

文章编号:1001-1609(2004)01-0068-03

高压断路器开合空载架空线路的试验研究

杨英杰¹, 刘伯涛¹, 林 莘²

(1. 机械工业高压电器产品质量检测中心, 辽宁 沈阳 110025; 2. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110023)

Test and Research on Switching No-load Overhead Lines Using High Voltage Circuit Breaker

YANG Ying-jie¹, LIU Bo-tao¹, LIN Xin²

(1. High Voltage Apparatus Quality Testing Center of Machinery Industry, Shenyang 110025, China;

2. Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

摘要: 分析了开合空载架空线路时断口上恢复电压的变化及影响恢复电压的因素。在实验室建立了 252 kV 及以下断路器开合空载架空线的试验线路, 并对试验结果进行了分析。

关键词: 断路器; 空载架空线路; 恢复电压; 试验线路

中图分类号: TM51

文献标识码: A

Abstract: In this paper, the recovery voltage across circuit breaker is analyzed, and factors influencing TRV are discussed when switching no-load overhead lines using high voltage circuit breaker. Test facility on switching line-charging current in the laboratory has been established and the test results are discussed too.

Key words: circuit breaker; no-load overhead line; recovery voltage; test circuit

1 引言

高压断路器开合空载架空线路是电力系统中常见的操作, 操作过程中如果断路器发生重击穿, 会产生严重的过电压, 对系统的绝缘造成威胁。实验室进行开合空载架空线路试验是考核断路器重击穿性能最直接最有效的手段, 通过试验可以优化断路器的设计、提高断路器开合空载架空线路的性能。

笔者建立了试验线路, 分析了开合空载架空线路时断口恢复电压的变化。试验依据的标准是 JB5871-1991《交流高压断路器开合线路充电电流试验》。

2 开断空载架空线路时的恢复电压

空载架空线路属于分布参数^[1], 为简化分析, 采用集中参数, 单相等值线路见图 1。图中: 电源电压 $e(t) = E_m \cos \omega t$, L_0, R_0, C_0 为电源侧的电感、电阻、对地杂散电容, C 为线路侧的等效电容。SK 合闸状态下, 忽略 R_0 , 流过电容 C 的电流 i_c 超前 C 上的电压 U_c 90° , 电容电流过零开断后, a 点电压将发生跃变, 该跃变电压引起电源侧电压暂态过程的程度与该跃变

有密切关系。IEC 规定开断空载架空线路的试验电压是断路器熄弧前 a 点对地电压 U_a (即试验电压有效值为 $|U_a/\sqrt{2}|$), 跃变电压也应以 U_a 为相对值。

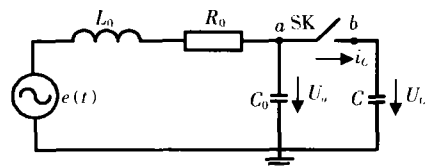


图 1 开断空载架空线路单相等值电路

a 点的电压升高是由于线路侧的电容效应造成的。通常用开断前后 a 点工频电压变化率 ΔU 表示:

$$\Delta U = (U_a - E_m) / U_a = \omega^2 L_0 C \quad (1)$$

由式(1)可见, 断路器开断前后 a 点的 ΔU 决定于电源侧电感和线路侧电容。

当 SK 分闸时, 电流 i_c 过零时刻断路器熄弧, 线路被开断, 由于 i_c 超前 U_c 90° , 此时 b 点电压 U_b 正好处于最大值, 熄弧后, $U_b = U_a = U_c$ 保持不变, 而 U_a 将以衰减振荡形式过渡到稳态, 此时电路的微分方程为:

$$L_0 C_0 \frac{d^2 U_a}{dt^2} + R_0 C_0 \frac{dU_a}{dt} + U_a = E_m \cos(\omega t + \pi) \quad (2)$$

令: $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0 C_0}$; $\delta_0 = R_0/(2L_0)$; $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_0^2}$, 方程(2)的解为:

$$U_a = a_1 \cos \omega t + a_2 \sin \omega t + e^{-\delta_0 t} (b_1 \cos \omega' t + b_2 \sin \omega' t) \quad (3)$$

式中各系数可根据初始条件求得。断路器断口间的恢复电压为:

$$U_{TRV} = U_a - U_b \quad (4)$$

开断空载架空线路时电流和电压波形见图 2, 断路器断口间暂态恢复电压 (TRV) 波形见图 3。

(1) 起始恢复电压峰值 u_1 和峰值时间 t_1

令 $\omega_0 \gg \omega$, 考虑衰减, 幅值系数为 k_0 , 则:

$$u_1 = k_0 E_m \frac{\Delta U}{1 - \Delta U} = k_0 U_a \Delta U \quad (5)$$

$k_0 = 1.4$ 时, $t_1 \approx 0.67\pi/\omega_0$

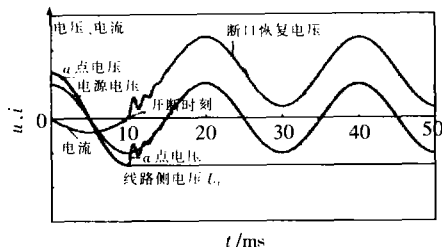


图2 开断空载架空线路时电流电压波形图

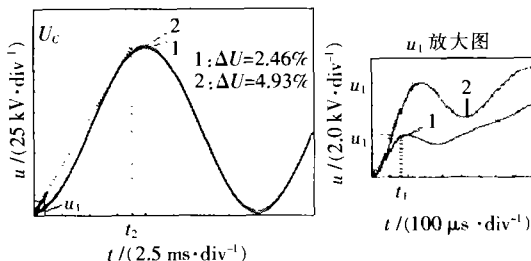


图3 断口恢复电压与ΔU的关系

(2) 恢复电压的最大值 U_c 和峰值时间 t_2

SK 开断后, 由于 C_0 上的电压迅速衰减并趋于稳态的电源电压, 经 $1/2$ 周波, 即 $t = \pi/\omega$ 时, 断口间的恢复电压达到最大值:

$$U_c = (2 + \frac{\Delta U}{1 - \Delta U}) E_m = U_a (2 - \Delta U) \quad (6)$$

按上升率确定的峰值时间 $t_2 = 8.7$ ms。

从以上的分析可以得出: 在线路参数一定时, 电源侧电感越大 $\rightarrow \Delta U$ 越大 $\rightarrow u_1$ 越大, t_1 越大, 电压的上升率 u_1/t_1 越大, U_c 越大。而 u_1 及 u_1/t_1 大时, 断口容易发生早期重燃, 导致燃弧时间变长, 再次熄弧后线路侧的电压降低, 在恢复电压上升到最大时, 断口开距增大, 因而断口重击穿的概率降低。但是, 如果断口没有发生早期重燃, U_c 增大会使断口重击穿的可能性增加。反之, 电源侧电感越小 $\rightarrow \Delta U$ 越小 $\rightarrow u_1$ 越小, t_1 越小, 电压的上升率 u_1/t_1 越小, U_c 越小。由于 u_1 及 u_1/t_1 较小, 在断口开距很小时就可以熄弧, 燃弧时间很短, 开断后容易发生重击穿。因此, 恢复电压对断路器重燃或重击穿的影响比较复杂, 不同的断路器对这些的反应也是不同的。为全面考核断路器的性能, 试验时, 应同时考虑大阻抗和小阻抗电源回路, 即对 ΔU 做出规定。开断空载架空线路断口间恢复电压与 ΔU 的关系见图 3。

3 开合空载架空线路试验

3.1 试验线路

为满足产品开发和试验的需求, 结合现有设备的情况, 建立了线路充电电流开合试验线路。

电源阻抗影响开断后的恢复电压, 因此, 标准中对 ΔU 做了规定 ($\Delta U \leq 5\%$ 和 $\Delta U \leq 10\%$), 并把电源回路分为大阻抗电源回路和小阻抗电源回路。试验线路中最关键的设备是用于提供试验电压的升压变压器, 要求变压器能提供各等级的试验电压, 并且为

满足 ΔU , 要求变压器必须具有足够大的短路容量, 而且短路阻抗不能过大。试验中心共有 3 组 9 台短路试验变压器, 利用 220 kV 电网作电源, 经过变压器 T_1 (220 kV) 和 (或) T_2 (35 kV) 降压, 把 T_3 (220 kV) 反接作升压变压器来提供各等级的试验电压, 并以集中电容器组模拟空载架空线路。线路充电电流开合试验线路原理见图 4。利用 3 组变压器的组合所提供的试验电压见表 1。

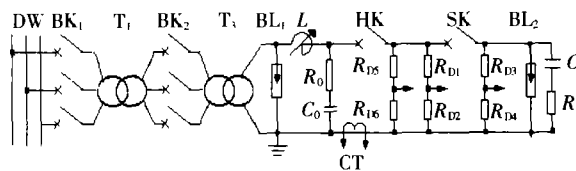


图4 线路充电电流开合直接试验线路原理图

| 断路器额定电压 | 要求的试验电压 | 试验电源电压 |
|---------|---------|--------|
| 72.5 | 50.2 | 50.1 |
| 126 | 87.3 | 83.5 |
| 145 | 100.5 | 108.5 |
| 252 | 174.6 | 181.4 |

用计算机计算出各电压等级断路器开合线路充电电流试验的参数, 同时该校核断口间暂态恢复电压, 计算机模拟的 126 kV 断路器开合空载长线方式 4 试验断口 TRV 波形见图 5, 实测的电源侧预期 TRV 见图 6。该线路理论上可进行 252 kV 及以下电压等级断路器开合线路充电电流试验, 考虑到变压器的绝缘性能, 暂控制在 145 kV 及以下产品试验。目前对较高电压等级断路器, 试验线路 ΔU 不能满足标准的要求, 可采用合成试验方法。

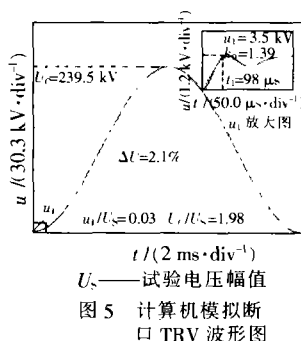


图5 计算机模拟断口 TRV 波形图

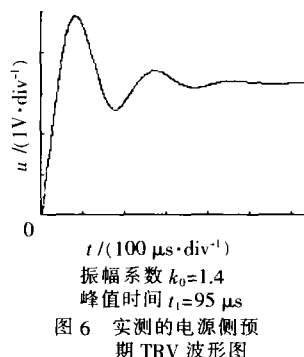


图6 实测的电源侧预期 TRV 波形图

3.2 试验结果分析

选用 LW-126/T2500-31.5 型 SF₆ 断路器为试品, 试验前测量试品的空载机械特性, 要求试品的分闸时间稳定。试验开始时根据试品的分闸时间调整程序控制器, 由程序控制器发出合分闸触发脉冲, 使试品按要求的相位分闸, 试品的燃弧时间分布在 1.7~10 ms 之间, 部分试验测量结果见表 2, 示波图见图 7。试验结果符合 JB5871 之规定。

表 2 126 kV 断路器开合线路充电电流试验测量结果

| 试验方式 | 工频电压变化/% | 操作顺序 | 试验电压/kV | 试验电流/A | 燃弧时间/ms | 断口最大恢复电压/kV | 恢复电压持续/s | 分闸相角/° |
|------|----------|------|---------|--------|---------|-------------|----------|--------|
| 1 | 1.87 | 0 | 88.9 | 12.3 | 8.3 | 249.1 | 0.33 | 150 |
| 2 | 2.15 | CO | 89.2 | 33.6 | 3.3 | 249.5 | 0.33 | 30 |
| 3 | 1.87 | 0 | 88.9 | 12.3 | 10 | 249.1 | 0.33 | 90 |
| 4 | 2.15 | CO | 89.2 | 32.7 | 10 | 249.5 | 0.33 | 90 |

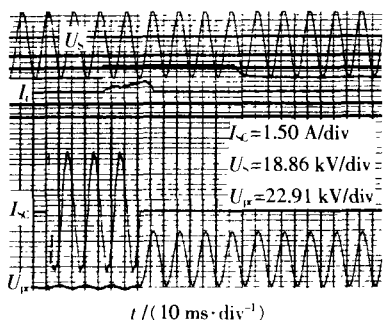


图 7 断路器开合线路充电电流试验示波图

U_s ——试验电压 U_r ——断口间恢复电压 I_s ——开断电流

至今,共对十多台 72.5~126 kV 断路器进行了该项试验。从试验结果看,多数产品能正常通过试验,但仍有个别产品出现过重燃或重击穿。从示波图上看,重燃一般发生在分闸相角 30°,210°,270°处,在该相角分闸时,燃弧时间很短,此时触头开距很小,如果触头或触指不均匀就会造成断口电场分布不均,容易发生重燃。而当燃弧时间较长时,由于触头间的介质强度已较高,比较容易开断,因此,断路器分闸相位影响断路器的重燃。另外,自能式 SF₆ 断路器较压气式 SF₆ 断路器易于重击穿,因为压气式灭弧室在处于合闸位置时压缩 SF₆ 气体,触头分离时,高压力的 SF₆ 气体在喷口处形成强烈气流吹弧,灭弧室的介质恢复强度上升很快,不易重击穿,而自能式灭弧室靠电弧自身能量加热 SF₆ 气体来形成压力差吹弧,适用于开断大电流,在开断小电流时一般采用带助推活塞的助吹装置来增强开断小电流的能力。相对而言,开断小电流时介质恢复强度不及压气式,开断线路充电电流的性能不及压气式 SF₆ 断路器。

4 JB5871 与 IEC62271-100(2001)

(1)由于运行中的断路器都有一定的重击穿概率,不可能定义一个无重击穿的断路器。IEC62271-100 取消了原有的“无重击穿断路器”的概念,引入重击穿概率的概念,以具有“较低重击穿”的 C₁ 级和“非常低重击穿”的 C₂ 级断路器代之^[2]。

(2)试验方式由 4 个减少为 2 个。

(3)对试验回路及 TRV 的规定

试验回路的特性应保证在开合时 ΔU 的变化,方式 1 小于 2%,方式 2 小于 5%,如果 ΔU 的变化超过规定值,可以用规定的瞬态恢复电压来替代。实际上,由于工频电压的变化取决于系统的短路容量和

容性负载,一般在 1%~2% 范围内,IEC 考虑到实验室的制约因素以及由于 ΔU 范围较大,容易造成对试品考核严酷程度不同,因此选取了折衷的数值(2%和 5%)。

(4) u_1 和 U_c

u_1 和 U_c 应该与 ΔU 密切相关,JB5871 中规定 $U_c/U_a \geq 1.98 (\Delta U \leq 10\%)$ 和 $U_c/U_a \geq 2.0 (\Delta U \leq 5\%)$,实际上由于 $U_c/U_a = 2 - \Delta U$,如果要达到规定的 U_c ,必须再提高试验电压 U_a ,这是不合理的;而 IEC62271 中规定 $U_c/U_a \geq 1.95 (\Delta U \leq 5\%)$ 和 $U_c/U_a \geq 1.98 (\Delta U \leq 2\%)$,同时规定 $u_1/U_a \leq 0.05k_0 (\Delta U \leq 5\%)$ 和 $u_1/U_a \leq 0.02k_0 (\Delta U \leq 2\%)$ 也与理论分析相符合。

(5) 合闸相位

IEC62271-100 规定了两个试验方式,每个试验方式进行 48 次开断,其中要求每个试验方式在正、负两个极性上各按最短的燃弧时间进行 6 次开断。由于断路器在最短燃弧时间开断最困难,通过在最短燃弧时间时增加开断次数来减少实际的试验次数,实际是增加了产品开合容性电流的难度。

总之,IEC62271-100 中关于开合容性电流的试验规定更加苛刻,KEMA 实验室根据 IEC62271-100 进行该项试验结果见表 3。

表 3 KEMA 实验室按不同标准进行线路充电电流开合试验结果比较^[3]

| 依据的标准 | 失败 | 成功 |
|----------------|-----|-----|
| IEC60056(1987) | 17% | 83% |
| IEC62271-100 | 64% | 36% |

5 结论

(1)断路器断口间的恢复电压决定了其开合线路充电电流时的重击穿性能,而参数 ΔU 所反映的电源阻抗和线路电容直接影响恢复电压,试验时必须规定 ΔU 。

(2)建立了试验线路,满足 252 kV 以下的断路器开合线路充电电流试验要求,试验结果符合标准规定。

(3)IEC62271-100 的规定更符合理论分析,接近系统实际工况,试验可操作性更强。

参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] IEC62271-100. High Voltage Alternating current Circuit Breaker[S]. 2001.
- [3] R P P Smeets, A G A Lathouwers. Capacitive Current Switching Duties of High Voltage Circuit Breakers: Background and Practice of New IEC Requirements[A]. IEEE PES Winter Meeting[C], Paris, 2000.

作者简介:杨英杰(1966-),男,沈阳市人,工程硕士,高级工程师,现主要从事高压电器产品试验研究工作。