

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.024

脉冲电流延弧回路的参数计算及运行条件分析

庄稼人¹, 杨海芳², 王昊晴²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 断路器在按额定操作顺序进行短路开断试验时,其燃弧时间应覆盖最短、中间和最长3种时长,对于某些断路器,需要采取延长电弧燃烧时间的措施,以进行长燃弧时间甚至中燃弧时间的试验。文中针对脉冲电流延弧回路的参数进行了计算,给出了延弧回路参数的计算式,并对其运行条件进行了分析,叙述了克服这些问题的方法,提出了建议的延弧支路接线以及可能结构形式。

关键词: 合成试验; 延弧回路; 脉冲电流延弧法

Parameter Calculation and Operation Condition Analysis on Prolong Arc Circuit of Impulse Current

ZHUANG Jiaren¹, YANG Haifang², WANG Haoqing²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the short circuit breaking test of circuit breakers in accordance with rated operation sequence, its arcing time shall cover such three intervals as the minimum, medium and maximum arcing times. For certain circuit breaker, the measures of prolonging arcing time shall be taken to perform the test at maximum and even medium arcing time. In this paper, the parameters of prolonging arc circuit of impulse current are calculated and the calculation formula of the prolonging arc circuit are given. Its operation conditions are analyzed and the method on how to overcome above problems are described. The wiring and possible structure form of the suggested prolonging arc branch are proposed.

Key words: synthetic test; prolonging arc circuit; prolonging arc method of impulse current

0 引言

断路器在按额定操作顺序进行短路开断试验时,其燃弧时间应覆盖最短、中间和最长3种时长。在进行中间和最长燃弧时间的试验时,短路电流在预定开断的电流零点前,至少会有一次过零的情况。在此零点,断路器已具有相当长的燃弧时间,即触头已有了相当大的开距,已能开断降低了电压的电流回路。例如对压气式SF₆高压断路器,其最短燃弧时间一般不会小于9 ms。按标准要求^[1-8],运行在不接地或接地系统中的断路器做单相合成试验的,其有效开断的最长燃弧时间是最短燃弧时间分别加上7.33 ms或9 ms,即达到16.33 ms或18 ms。

短路电流在触头分离后6.33 ms或8 ms时第1次过零,但此时断路器不应开断。只有在16.33 ms或18 ms处第2次过零时,才是预定的电流开断零点,才会施加电压回路。可见,如不采取延长电弧燃烧时间的措施,长燃弧时间甚至中燃弧时间的试验将无法进行。

文中针对脉冲电流延弧回路的参数进行了计算,并对其运行条件进行了分析,提出了建议的延弧支路接线以及可能结构形式。

1 输出反向电流脉冲的延弧回路

1.1 回路原理

多年的实践证明,此法为最有效且经济的延弧方法,并为几乎所有的试验室采用。

研究断路器开断机理时发现, 电流过零时的变率即 di/dt , 是影响断路器能否开断的重要因素。多年后, 此原理被应用到了电流脉冲延弧回路中, 其简化原理图见图 1 (a)。

在投入延弧回路的那个电流零点 O 前 t_0 时间, 间隙 G_r 触发贯通, 将预先充有电压 U_r 的延弧电容 C_r 经延弧电阻 R_r 和辅助断路器 AB (出于多种考虑, 此时可能尚未燃弧) 接向试品 TB , 产生一极性与短路电流 i_c 相反的 RC 放电脉冲电流 $i_r = -I_{r0}e^{-\frac{t'}{C_r R_r}}$ 叠加到电流回路电流 i_c 上, 使流经 TB 的电流 i 快速过零而不熄弧见图 1(b)。当电流脉冲具有足够大的幅值 I_{r0} 和时间常数 $\tau_r = R_r C_r$, 使此后 $(i_c + i_r)$ 不再出现过零的情况, i_c 将流动至下一个电流零点, 达到了延弧的目的。

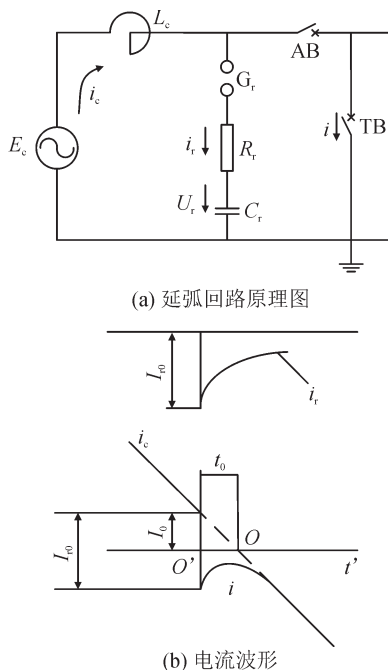


图 1 延弧回路原理图及电流波形

Fig. 1 Reignition circuit and current waveshapes

事实上, 在自然零点前 t_0 时短路电流瞬时值 I_0 仍相当大, 例如令 $t_0 = 100 \mu s$, 短路开断电流为 $63 kA$ 时达到 $2.8 kA$, 还有之前的燃弧时间中残存的能量, 弧隙的游离程度仍相当高。如果是断路器自然开断, 在这 t_0 时间内, 断路器的去游离持续不变。随着电流趋零, 游离能力减弱, 弧隙的游离程度在自然零点时已非常低, 近似绝缘间隙, 弧隙对试验线路中的过程已基本无影响。但在 t_0 时加上脉冲电流的情况下, 由于 di/dt 很大, 叠加电流通常在 i_c 加上后数 μs 内过零, 去游离时间极短。又因此时离正常开断的电流零点还有 $10 ms$, 断路器的去游离能力尚不充分, 因此过零时弧隙远非绝缘间隙, 弧隙电压由它的伏安特性决定。电流过零后, 不会有任何恢复

电压出现在它两端。另外此时的弧隙相当于一个低电阻, 对试验线路中的高频过程有强烈的阻尼。

一个在叠加电流过零时游离度足够的弧隙, 之后弧隙电流又不再有过零的机会, 这应是脉冲电流延弧法的原理。

从以上分析也可看出, t_0 大时, 叠加电流过零时弧隙游离程度更高, 延弧也将更容易, 但延弧设备的费用将按平方增加。

1.2 回路参数计算

正弦形短路电流 $i = I_m \sin \omega t$ 在电流零点前数百 μs 内, 可视为直线下降, 其斜率为 ωI_m 。 t_0 一般不会超过 $200 \mu s$, 符合这一条件。零前 t_0 时的短路电流瞬时值 $I_0 = \omega I_m t_0$ 。以脉冲电流 i_r 加上的时刻 O' (即短路电流自然零点前 t_0) 作为计算的新时间座标 t' 的起始点。由相似三角形定理可知, 时间 t' 时短路电流的瞬时值 i_c 为 $\frac{i_c}{t_0 - t'} = \frac{I_0}{t_0}$, 即 $i_c = I_0(1 - \frac{t'}{t_0})$ 。于是, 流过试品的叠加电流 $i = i_c + i_r = I_0(1 - \frac{t'}{t_0}) - I_{r0}e^{-\frac{t'}{\tau_r}}$ 。由原理知, 为使电流 i 瞬时反向过零, $|I_{r0}|$ 必须大于 $|I_0|$ 。令 $|I_{r0}| = K|I_0| (K > 1)$ 。又为使电流在 $0 \sim t_0$ 时间内 $i < 0$, 得不等式

$$Ke^{-\frac{t'}{\tau_r}} > 1 - \frac{t'}{t_0} \quad (1)$$

这是一个超越方程, 给出了 K, τ_r 和 t_0 三者间的关系。为解此方程, 设 $t' = At_0$ 。 A 的变化范围为 $0 \sim 1$ 。

式 (1) 成为 $e^{-\frac{At_0}{\tau_r}} > \frac{1-A}{K}$ 。两边取自然对数 $-A \frac{t_0}{\tau_r} > \ln(\frac{1-A}{K})$ 。由于 $\ln(\frac{1-A}{K}) < 0$, 故

$$\frac{\tau_r}{t_0} > \frac{-A}{\ln(\frac{1-A}{K})} \quad (2)$$

式 (2) 是保证 $i < 0$ 的条件。在 K 取定的情况下, $\frac{\tau_r}{t_0}$ 仅是 A 的函数, 即在 $0 \sim 1$ 范围内, 为满足 $i < 0$, 不同的 A 值点要求不同的 $\frac{\tau_r}{t_0}$ 。计算表明, 在某一 A 值上, $\frac{\tau_r}{t_0}$ 有一极大值, 见表 1。

表 1 K, A, B 之间的关系

Table 1 Relationships of K, A , and B

$K(I_{r0}/I_0)$	$(\frac{\tau_r}{t_0} \text{ 有极大值时的 }) A$	$B = \frac{\tau_r}{t_0} \text{ 的极大值}$
1.5	0.54	0.46
2.0	0.63	0.38

显然,要保证在A的整个范围内叠加电流*i*不会第二次过零即*i*<0, $\frac{\tau_r}{t_0}$ 应大于上表中的极大值,*K*大, $\frac{\tau_r}{t_0}$ 极大值减小,符合物理意义。应指出,表1中的*B*值是它的下限。

由表1可知,*t*₀的大小,既决定了延弧脉冲加上时短路电流瞬时值*I*₀,从而在*K*不变时决定了脉冲电流的幅值 $I_{r0} = KI_0 = K\omega I_m t_0$;也决定了延弧回路的最小时间常数 $\tau_r > Bt_0$ 。这就是说,在短路电流确定的情况下,*t*₀的大小决定了延弧回路设备的规模和费用。

*t*₀的取值决定于同步控制的精度。*t*₀一般取100 μs,也有小至50 μs(荷兰KEMA)。

确定回路参数的步骤为:

1) $I_0 = I_m \sin \omega t_0 = I_m \omega t_0$, 其中 *I*_m为试验站预定的最大试验电流幅值;

2) $I_{r0} = KI_0$, 考虑到试品的电弧电压,延弧脉冲电流会有一部分流入电流回路。又由于控制精度的偏差,*t*₀可能会大于100 μs,实际的*I*₀将大于步骤1)中算得的值。还因为放电回路寄生电感的加入,使过零时的di/dt减小,故*K*宜稍大,例如*K*≥2;

3)确定延弧电容*C*_r的充电电压。由于延弧脉冲电流通路中存在母线寄生电感*L*₀,间隙*G*,每次正常贯通初瞬间,*U*_r的大部分降落在*L*₀上,也加在*L*_c上,见图2。不过此时它与电流源电压峰值相向相减。如*G*贯通发生在非正常瞬间或如2.2节所述在额定操作顺序的无电流时间中误动,则最严的情况发生在两电压相反相加地降在*L*_c上。合成试验时为保护发电机安全,通常电流回路都是经过变压器后接到试品的。为防止辅助断路器AB重燃时电压回路的高电压打到电流回路,变压器的高低电压侧均设有完善的过电压保护装置。因此,*U*_r值的上限取决于电流回路母线、电抗器、变压器等的绝缘水平,即过电压保护装置的整定电压。现在已无每断口弧压高达3~5 kV的油断路器试品,每断口弧压一千多伏的多断口SF₆断路器整极试验时(有时还要加上AB的弧压)总的弧压仍相当高。如下文所述,*U*_r取高还能提高过零时的di/dt。取决于电流源电压大小,一般*U*_r不低于50 kV,电流源电压高时还可增加;

4)延弧电阻 $R_r = \frac{U_r}{I_{r0}}$ 。这里未计及试品电弧电压;

5)延弧电容 *C*_r。 $\tau_r = C_r R_r > Bt_0$, 为保守计,可取 $B \geq 1$, $\tau_r \geq t_0$, 于是 $C_r \geq \frac{t_0}{R_r}$;

6) 延弧电容器的贮能,应满足 $W_{Cr} = \frac{1}{2} C_r U_r^2 =$

$\frac{1}{2} K \omega I_m U_r t_0^2$ 。可以看出,*t*₀对*W*_{Cr}的影响最大。

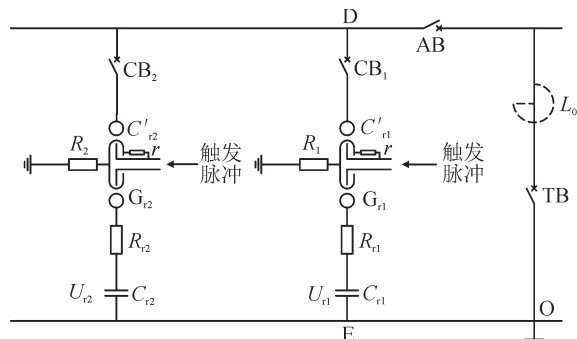


图2 延弧支路详细原理图

Fig. 2 Detailed principal diagram of reignition circuit

回路参数应留的裕度由各试验站根据自己的控制精度等确定。

2 延弧支路工作条件分析及采取的对策

为了以下说明方便,预先给出了延弧支路的完整原理图见图2。详细说明分别在以下各节叙述。

2.1 回路母线电感使电流脉冲波前变缓

延弧回路放电回路母线(包括AB和TB的导电部分)具有固有电感*L*₀。当试验特高压断路器时母线更长。因此,延弧脉冲电流的波形并非理想的、具有极陡波前的RC放电指数波,而是有很强阻尼的RLC回路放电电流波形,其波前将变缓,电流峰值也减小,使叠加电流过零时的di/dt减小,但衰减将稍小,见图3。图3中曲线1是某一组回路参数中*K*=2, *L*₀=0和*τ*_r=*t*₀=100 μs时的纯RC放电电流波形;曲线2是*L*₀=100 μH时的脉冲电流波形;直线3是开断电流为63 kA时开断前100 μs以内的下降波形。计算表明,曲线2电流峰值由曲线1的5 600 A降至4 626 A,到达*i*_m的时间*t*_m=28.9 μs。曲线2与直线3的交点*P*是叠加电流过零时刻,约为7 μs,此时的di/dt=261 A/μs。曲线2在*i*_m时的di/dt=0,交点*P*越靠近*i*_m,di/dt越小。在1.2节中叙述了*K*大*τ*_r小,或*K*小(*K*>1)*τ*_r大两种情况均可保证叠加电流不再过零,但并未涉及(因假定*L*₀=0故不必涉及)过零时的di/dt。由图3可知,当有了*L*₀后,取*K*大可保证上述交点位于脉冲电流di/dt值较大的电流急剧上升部分,对延弧成功率有利。作为比较,开断电流63 kA过零时的最大di/dt为28 A/μs。为了减小延弧脉冲放电回路的电感*L*₀,宜将延弧回路设备布置在靠近试品的地方。计算还表明,当取较高的*U*_r即较大的*R*_r时,在保持*K*,*τ*_r相同的条件下,过零时刻将减小,过零时的di/dt将显著提高。

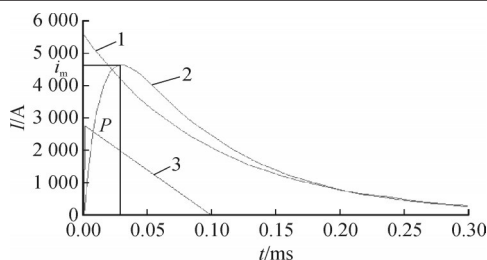


图3 各电流曲线对比

Fig. 3 Comparison of current curves

2.2 合分试验和自动重合闸试验时触发球 G_r 两端的电压

合分试验CdOs中电流源已经升压但TB尚未关合之前以及自动重合闸Od-t-CdOs试验中无电流时间 $t(=0.3\text{ s})$ 内,交流的电流源电压 u_c 将加到 G_r 上,参见图1,与 U_r 极性相反的那些半波, G_r 将承受两电压之和。另外,如Od开断零点的 u_c 峰值 $\sqrt{2} U_c$ 正好与 U_r 极性相反,电流源TRV中还有大于该峰值的过冲。如 G_r 间距不足,将发生误动作。为此必须加大 G_r 的间距。但如电流源电压较高, $\sqrt{2} U_c$ 与 U_r 可比,间距加大至安全值后,可能导致加上触发后 G_r 不工作或工作不稳定。解决的办法有二:①与延弧支路串联一断路器CB,在Cd前处于分开位置,在Cd后闭合。此时,延弧支路两端只有短路电流在母线DOE上的压降以及AB和TB的弧压;②如图2所示加一隔离间隙 G_r' 。曾有报导, G_r' 用的是普通火花间隙^[9-17],但如使用触发间隙则效果更好,尤其是电流源电压较高与 U_r 可比时。 G_r 和 G_r' 的中间球为两端球面的腰鼓状,可两端触发。球体经一高电阻 R 接地($C.R >$ 数秒)。Cd前 G_r 和 G_r' 分别耐受 U_r 和电流源电压 u_c ,它们的间距整定也分别由此二电压决定。两个触发极中的一个与球体间接一不大的电阻 r (数千欧),当触发脉冲电压加上时因电压分布不均,不接电阻的触发极小间隙首先击穿,接电阻的接着几乎同时击穿。Cd时间中,加在 G_r' 上的电压见方法①。 G_r 在 U_r 下首先击穿, C_r 对 R 放电,中间球带电压 U_r ,成为 G_r' 的工作电压,于是 G_r' 同时触发贯穿。也可用两对触发球代替图中的三球双间隙结构。此方法操作相对简单。

2.3 辅助断路器AB开断后,延弧支路成了电流回路的负载

间隙 G_r (加 G_r')并无熄弧能力,在单分合成试验Os中,从 G_r 动作到AB将电流回路开断只有10 ms。AB开断后,电流回路的TRV将立刻加到 $G_r(+G_r')$ 上,去游离尚不充分的 $G_r(+G_r')$ 将在此TRV作用下继续贯通,延弧支路成了电流源的负载。实际的试验示波图表明,电流回路的TRV确已被延弧支路的接入

显著改变。这产生了如下问题:如果试验回路是串联电压引入回路,则电流源的TRV是总的TRV的起始部分,是预先计算好的,是不允许被改变的,所以必须用CB在短路电流开断零点前将延弧支路与电流回路隔开。

2.4 一次分断试验中进行两次延弧时两延弧支路间的相互影响

经验表明,当最长燃弧时间达到23 ms以上时,一次单相Os试验常需使用两次延弧。这两个支路并联运行,它们相互之间有下列的影响:

1)由于延弧支路本身的接线不长,故脉冲电流放电回路的电感主要是支路外部的母线电感 L_0 ,它成了两个支路间的耦合元件。在 G_{r1} (加 G_{r1}')于前一个电流零点贯通瞬间, U_{r1} 绝大部分降在外母线DOE上,其中DO上的压降加到 G_{r2}' 上,其值可能超过电流源电压。OE上的压降与 U_{r2} 极性相反,叠加后加到 G_{r2} 上。由于CB₂要在随后 G_{r2} 动作后10 ms内分开以隔离电流源,故之前只能处在闭合位置,想用它来隔离此电压是不可能的,而且也隔离不了OE上的电压。过分拉大 G_{r2} 和 G_{r2}' 的间距可能会降低它们的触发贯穿性能。为解决这一矛盾,可根据 L_0 的大小在第一支路中串入适当的电感,增大内阻抗,以适当降低 G_{r1} (加 G_{r2}')动作瞬间DOE上的压降,但又不过分减小延弧脉冲过零时的 di/dt 。由于施加第一次延弧脉冲时试品的燃弧时间尚短,延弧并不困难。通常,母线DO的长度比OE长得多,压降亦然。

2) G_{r1} 动作后10 ms, G_{r2} 动作。但此时 G_{r1} 仍具导电性,第一支路将与 L_0 并联成为第二支路的放电回路,使得流经试品的延弧脉冲的 di/dt 大大降低(约50%)。在这个电流零点,试品的熄弧能力已显著高于前一个电流零点, di/dt 的减小将降低延弧效果。所以要求CB₁在 G_{r2} 动作前就将第一支路分开见图4(b)。

事实上,需要两次延弧的试品并不多,但作为试验站应当具备这种能力。

2.5 非T100试验时可能出现的问题

由前知,延弧回路的参数是按试验站可试验的最大短路开断电流(例如63 kA)的T100确定的,当进行非T100试验尤其是T10试验时将出现两个问题:

1) I_{r0} 与 I_m 可比。按63 kA, $t_0=100\text{ }\mu\text{s}$, $K=2$ 选取的参数, I_{r0} 理论上可达到5.6 kA。当进行额定短路开断电流40 kA的T10试验时,开断电流峰值 I_m 为 $\sqrt{2} \times 4=5.66\text{ kA}$,与 I_{r0} 相等,开断电流波形在 i_r 加上后其零点将明显变形。减小 I_{r0} 最简单的办法是降低此时的 U_r ,但因存在试品和辅助断路器的弧压,尤其是断口较多时,过分减小 U_r 会影响延弧效果。由

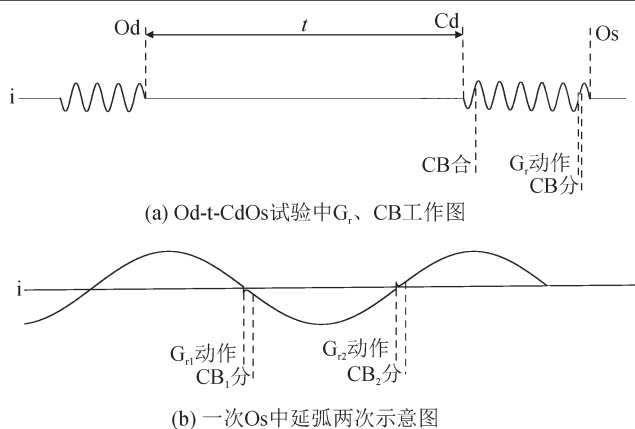


图4 两次延弧波形示意图

Fig. 4 Two reignition waveshapes

于离熄弧零点有 10 ms 的时间, i_r 使开断电流变形应当不会使开断条件变严。要想使非 T100 试验时的这种变形看起来在可接受的程度内, 办法之一是增大 R_r 值, 把它做成多抽头的, 以提供不同的阻值, 同时也可适当降低此时的 U_r ;

2) 延弧电容上的暂态过电压。在 2.2 节和 2.3 节所述的非正常条件下, 延弧支路与电流回路都可能出现串联的情况。2.3 节是延弧回路正常动作后电容器电压已由 U_r 降到零, 而此时的电流源电压正处在峰值 $u_{cm} = \sqrt{2}U_c$ 。2.2 节中最严重的条件发生在 U_r 与 U_{cm} 极性相反时间隙 G_r 误动作。这两种情况下, 延弧回路在电流回路作用下将从原来的稳态向新的稳态过渡, 从而产生暂态过程。暂态过程中, 延弧电容上可能出现超过 U_r 的过电压, 后一情况比前一情况严重, 其大小决定于暂态过程阻尼的强弱。串联回路中的电阻主要是 R_r , 电感则为电流源电感 L_c , 回路衰减系数 $\delta = R_r/2L_c$ 。 L_c 是由电流源电压和试验电流 I 决定的, $L_c = U_c/\omega I$ 。当 $U_c = 21$ kV 时, 40 kA T10 试验的 $L_c = 16.7$ mH, 是 63 kA T100 的 $L_c = 1.06$ mH 的 15.8 倍, δ 也按此倍数减小, 暂态过程的衰减小得多。按 2.1 节确定的回路参数 $U_c = 21$ kV, $U_r = 50$ kV, $I = 63$ kA, $t_0 = \tau_r = 100$ μ s, $K = 2$, 算得 $R_r = 8.9$ Ω , $C_r = 11.2$ μ F。 $I = 63$ kA 时延弧电容上的最高暂态电压 $U_{rm} = 55.4$ kV, $U_{rm}/U_r = 1.1$, 无过电压。但 $I = 4$ kA 时, $U_{rm} = 84.3$ kV, $U_{rm}/U_r = 1.69$, 已相当高。暂态电压的作用时间是毫秒级的。

减小过电压的办法与问题 1) 相同, 加大 R_r ; 也可用 3.1 节的办法提高电容器承受电压的能力。

2.6 在电流源操作开关切断电流源电压前承受电流源交流电压, 流过 50 Hz 容性电流

在上述暂态过程之后, 电流源电压将加在延弧支路上, C_r 将承受电流源的交流电压, R_r 将流过由 C_r

容抗决定的交流电流, 吸收额外的能量。

电容器制造厂要求, 如脉冲电容器工作在交流电压下, 允许的电压有效值是它的直流额定电压的三分之一。虽然 C_r 带交流电压的时间 t_r 不会长, 但仍应给以适当的考虑。延弧回路动作一次, 由 C_r 泄入 R_r 的能量 $W_{cr} = \frac{1}{2}C_r U_r^2$ 。在 t_r 时间内容性电流产生的能量 $W_r = (U_c \cdot \omega C_r)^2 \cdot R_r t_r$ 。

至此可知, C_r 的额定电压并不单由 U_r 的高低决定, 还应考虑可能出现在 C_r 两端的暂态和交流稳态电压的大小以及对它们的承受能力。

2.7 本节小结

对 CB 的操作要求以及双间隙触发球的作用等已分别列于以上各条, 至此可作如下讨论:

1) 如果不做电压引入合成试验, 或在一次 Os 中不必进行两次延弧, 而且允许延弧回路每次试验中可与电流回路串联, 承担 2.6 条的工作条件, 则 CB 的操作最简单: Os 试验时根本不必操作, 可一直处于闭合位置。CdOs 试验时, 在 Cd 前处于分开位置以隔离电流源电压, 仅在 Cd 后 G_r 动作前闭合;

2) 如果做电压引入或不允许与电流回路相串, 又要用它在 Cd 前隔离电流源电压, 则 CB 在 Cd 前处于分开位置, Cd 后闭合, 并在 G_r 动作后试品开断前分开。此时 CB 执行的是合一分操作, 如图 4(a) 所示。进一步考虑, 为了保证回路正常运行, CB 的触头应在 G_r 动作后尽早分开, 并在辅助断路器开断前达到足够的开距以耐受住电流回路 TRV 的作用。考虑到操作时间的分散性, CB 的合一分时间必须比所有试品的关合一开断时间短约 15 ~ 20 ms。可以看出, 对 CB 的操作时长、准确度和稳定性要求很高;

3) 如果用双间隙球来隔离电流源电压, 则可简化对 CB 的操作要求: G_r 动作前一直处于闭合位置, 仅在 G_r 动作后试品开断前分开。这种接线和运行方式可简化运行工作。但考虑到双间隙球误动作的可能性, 在回路设计时应采取文中提到的非 T100 试验时可能出现的过电压预防措施。

运行经验表明, 双间隙触发球的工作稳定性很高。因此, 延弧回路中通常既使用双间隙触发球, 又接有隔离断路器, 如图 2 所示, 具备可采用不同运行方式的可能性。

如使用真空触发间隙作为接通和隔离元件最为理想。它耐受电压高, 又可在很低的工作电压下在 200 μ s 内触发贯通。它去游离能力强, 能在延弧脉冲电流衰减后迅速恢复绝缘, 将支路与外部电路隔离。

3 延弧支路数及可能结构

如果试验站只做单相合成试验,则只需设置最多两个延弧回路。如果要做三相合成试验,则情况要复杂些,分析如下。文[18-23]6.102.10.1条中规定:进行三相T100s(b)试验时,为了试验方便,在3次有效开断操作中将接于A相中的开断极都作为首开极。目的是施加不同参数电压回路的极保持不变,在3次开断操作中不需改接线。为了做到这一点,必须在A极开断前对C、B相可能的电流零点施加延弧以保证它们不被开断。

第1次开断操作O_s是单分操作,首开极的燃弧时间为最短燃弧时间 t_{arcmin} 。在第1和第2次开断操作中其脱扣脉冲控制整定比第1次开断操作分别提前40°和20°(2.2 ms和1.1 ms)。第2次开断操作Od-t-CdOs的Od试验中,首开极的燃弧时间规定为 t_{arcmin} ;CdOs中首开极为最长燃弧时间 $t_{arcmax}=t_{arcmin}+40^\circ$ 。第3次开断操作CdOs中首开极为中燃弧时间 $t_{arcmed}=t_{arcmin}+20^\circ$ 。由于第2次开断操作中既有Od又有长燃弧时间的O_s,故需配置最多的延弧回路。

应特别指出,不管首开极的燃弧时间是短、中或长,在它开断以后,无论是不接地系统还是接地系统,第2、3开断极中电流过零时的燃弧时间均已长于首开极的,将相继开断。故延弧回路的施加都在首开极开断前。接地和不接地系统中第2、3相的电流波形在首开极开断前完全相同,故是否需要施加延弧回路与系统中性点接地情况无关,二者的分析完全相同。

第2次开断操作中从触头分离起弧到首开极开断时刻各相电流过零时的燃弧时间见表2,为叙述方便,称之为“评估”燃弧时间 t_e ,据此可判断在哪些电流零点需施加延弧回路。表中的6.7 ms和3.3 ms是C相和B相电流与A相电流零点间的相位差(120°和60°)。

表2 第二次开断操作中首开极开断时各极的 t_e

Table 2 t_e of individual pole at breaking instance of first-pole-to-clear during second breaking operation

操作	“评估”燃弧时间 t_e /ms		
	首开极 A	第二开断极 C	最后开断极 B
Od	t_{arcmin}	$t_{arcmin}-6.7$	$t_{arcmin}-3.3$
-t-CdOs	$t_{arcmin}+2.2$	$t_{arcmin}-4.5$	$t_{arcmin}-1.1$

由表2可以看出,首开极的 $t_e < 10$ ms或2、3开断极的 $t_e < 0$,则首开极开断前三相电流都无过零机会。 t_e 与断路器的最短燃弧时间有关:理论上, $t_{arcmin} \leq 7.8$ ms,A相电流无过零机会,首开相不必施加延弧

回路。实际上,根据试验经验,燃弧时间 < 2 ms,不施加延弧时断路器也不会开断电流回路,故 $t_{arcmin} \leq 9$ ms的断路器,首开极一般不需延弧,只需为2、3开断极设置4个延弧回路,这是压气式SF₆断路器的情况。如 $t_{arcmin} \leq 6.7$ ms,Od中第二开断极中的电流在首开极开断前无过零机会,故不需延弧; $t_{arcmin} \leq 4.5$ ms,CdOs中第2开断极也不需延弧。 $t_{arcmin} \leq 3.3$ ms,Od中第3开断极不需延弧。尚未见到 $t_{arcmin} \leq 1.1$ ms的断路器,故CdOs中第3开断极肯定要用延弧,这是共机构三相真空断路器的情况,此时仅需2个甚至一个延弧回路即可。近年,SF₆自能灭弧式结构已用于额定电压达252 kV的共箱式断路器,其 t_{arcmin} 约在11~13 ms之间,理论上首开极也需施加延弧回路。也就是说,试品类型广泛的试验站应当设置6个延弧回路,在Od和CdOs中各用3个,试验控制将相当复杂。

共箱式断路器的额定短路开断电流通常比分箱式的小,故延弧支路的 I_{ϕ} 可按三相试验参数选定。单相试验时用两个支路并联,以提高输出脉冲电流的幅值,此时时间常数不变。4个支路两两并联后提供单相试验时的两次延弧。

将6个延弧支路中的电容器和电阻器在结构上分成3组,每组上下两层,每层为一独立的、参数相同的支路,以做三相T100(或单相T60)试验。上下层可并联,做单相T100试验。也可串联,此时总的充电电压和时间常数不变,电阻加倍因而减半,用来做T30和T10试验,且由于电容器两台串,承受暂态电压和稳态交流电压的能力将大大提高。如果C_r的并联台数可调,组间高压端再加一并联线,则参数的调节将更加灵活。

4 结论

文中针对脉冲电流延弧回路的参数进行了计算,并对其运行条件进行了分析,得到的结论如下。

1)延弧回路参数计算简单,设备投资也不大,但它的可靠和稳定运行对试验成功率影响较大,所以设计会趋于保守。

2)考虑到延弧回路在运行中可能出现的各种工况,文中建议的支路接线以及可能结构能保证回路运行简单可靠。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] FLUSCHEIM C H. Power circuit breaker theory and design [M]. Shanghai: Peter Peregrinus Ltd., 1977.
- [3] 高压交流断路器的合成试验: GB/T 4473—2008[S]. 2008. Synthetic testing of high voltage alternating current circuit breakers: GB/T 4473—2008[S]. 2008
- [4] 马万成, 袁铁江, 张恒, 等. 超/特高压交直流混联电网中直流偏磁敏感源的预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 58-63.
MA Wancheng, YUAN Tiejiang, ZHANG Heng, et al. Research on the early warning method of DC bias sensitive source in ultra/extra high voltage AC/DC hybrid power grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 58-63.
- [5] 王海燕, 蒋成博, 卢健, 等. 局部放电特高频天线特性对信号拖尾现象的影响[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 145-152.
WANG Haiyan, JIANG Chengbo, LU Jian, et al. Influence of partial discharge UHF antenna characteristics on the signal tailing phenomenon[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 145-152.
- [6] 郜建良, 刘福锁, 吴雪莲, 等. 锅炉壁温在线监测系统的设计与实现[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 137-142.
GAO Jianliang, LIU Fusuo, WU Xuelian, et al. Design and application of on-line monitoring system of boiler wall temperature[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 137-142.
- [7] 王昆林, 邓云坤, 田增耀, 等. 金属颗粒对高空放电特性影响的实验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(2): 20-24.
WANG Kunlin, DENG Yunkun, TIAN Zengyao, et al. Experimental study on influences of metal particle on high-altitude discharge characteristics[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(2): 20-24.
- [8] 刘树鑫, 卓裕, 李津, 等. 基于随机森林算法的配电线路短路故障分类[J]. 电器与能效管理技术, 2020(8): 52-57.
LIU Shuxin, ZHUO Yu, LI Jin, et al. Classification of short circuit faults in distribution lines based on random forest algorithm[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(8): 52-57.
- [9] 金晶, 李清波, 郑峰. 基于混合型超导限流器的多源网络暂态特性分析[J]. 广东电力, 2020, 30(8): 18-26.
JIN Jing, LI Qingbo, ZHENG Feng. Analysis of transient characteristics of multi-source network based on hybrid superconducting current limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(8): 18-26.
- [10] 严志星, 徐铭康, 孙劼, 等. 用于微电网储能装置的新型双向变流器[J]. 广东电力, 2020, 30(7): 11-18.
YAN Zhixing, XU Mingkang, SUN Jie, et al. Novel bidirectional converter for energy storage devices in microgrid [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(7): 11-18.
- [11] 姜义虎, 张瀚驰, 范伟男, 等. 振荡波加压次数对电缆缺陷局部放电特性的影响[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 140-145.
JIANG Yihu, ZHANG Hanchi, FAN Weinan, et al. Influence of oscillating voltage exciting times on partial discharge characteristics of cable defects[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 140-145.
- [12] 杨帅, 夏明超, 陈奇芳. 计及源-网-荷互动的主动配电网实时动态孤岛划分策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 1-8.
YANG Shuai, XIA Mingchao, CHEN Qifang. Real-time dynamic island partitioning strategy of active distribution network considering interaction of source-network-load[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 1-8.
- [13] 陈永权, 王雄飞. 基于模糊层次分析法的我国电气化水平综合评价[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 24-28.
CHEN Yongquan, WANG Xiongfei. Comprehensive evaluation of China's electrification level based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 24-28.
- [14] 万天虎, 李华, 唐浩, 等. 基于全场控制的风电场一次调频控制方式及其工程化应用[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 41-46.
WAN Tianhu, LI Hua, TANG Hao, et al. Primary frequency regulation control method for wind farm and its engineering application based on full-field control[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 41-46.
- [15] 方云熠, 曾喆昭, 刘晴, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 145-151.
FANG Yunyi, ZENG Zhezao, LIU Qing, et al. Maximum power point tracking with nonlinear disturbance rejection control for DPMSG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 145-151.
- [16] 李晏君, 张章煌, 陈玮, 等. 兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 1-8.
LI Yanjun, ZHANG Zhanghuang, CHEN Wei, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration with wind power generators considering network invulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 1-8.
- [17] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51-57.
FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 51-57.
- [18] 蔚德申, 王景芹, 王丽, 等. 基于灰色理论的低压断路器寿命预测模型的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 35-41.
YU Deshen, WANG Jingqin, WANG Li, et al. Research on life prediction model of low-voltage circuit breaker model based on grey theory[J]. Journal of Electric Power

- Science and Technology, 2019, 34(4):35-41.
- [19] 夏玉剑, 李 敏, 向天堂, 等. 基于SOM的变压器绕组和铁芯故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 129-134.
- XIA Yujian, LI Min, XIANG Tiantang, et al. Fault diagnosis of transformer winding and core based on SOM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 129-134.
- [20] 甘俊文, 邵能灵. 基于机端电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3):3-9.
- GAN Junwen, TAI Nengling. Research on adaptive short circuit current calculation of DFIG considering the terminal voltage dip[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3):3-9.
- [21] 熊 壮, 胡小青, 柯 飒, 等. 高电压直流复合绝缘子表面电荷积聚的有限元数值模拟及影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(6):9-15.
- XIONG Zhuang, HU Xiaoqing, KE Sa, et al. Finite element numerical simulation and influence analysis of surface charge accumulation on HVDC composite insulator[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(6):9-15.
- [22] 吴佳洁, 黄峰慧, 柯 晔, 等. 基于不确定型网络图的建设工程造价模拟仿真方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7):10-17.
- WU Jiajie, HUANG Fenghui, KE Ye, et al. Research on simulation method of construction cost based on uncertain network graph[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7):10-17.
- [23] 黎学春, 高宇男, 李 磊, 等. 基于自适应神经网络系统聚类的特殊负荷分类研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1):8-15.
- LI Xuechun, GAO Yunan, LI Lei, et al. Research on special load classification based on self-adaptive neural network hierarchical cluster[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1):8-15.

庄稼人(1935—), 男, 正高级工程师, 从事高压断路器合成试验回路的研究和合成试验室的设计(E-mail: 719640024@qq.com)。

杨海芳(1974—), 女, 高级工程师, 从事高压开关检测和试验方法的研究工作。

王昊晴(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为交直流配电设备运行和试验检测技术以及真空开断技术(通信作者)(E-mail: wanghaoqing@epri.sgcc.com.cn)。