

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.025

双断口 40.5 kV 真空容性开断最佳燃弧时间确定试验研究

刘 波¹, 田利民², 翟小社³, 陈榆秀⁴, 兰贞波¹

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院), 武汉 430074; 2. 宝鸡四方华能电气有限公司, 西安 710049;
3. 西安交通大学电气学院, 西安 710049; 4. 麦克奥迪(厦门)电气股份有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要: 为了分析双断口真空容性开断在断口非同期动作条件下的最佳燃弧时间, 文中分析了双断口真空容性开断断口电压分布特性, 研究了开断过程断口过电压计算表达式。采用电路原理分析方法, 从理论上计算了不同燃弧时间下的断口过电压值。并对实际样机真空开断重燃特性进行了试验验证。基于理论计算结果及试验结果, 给出了 40.5 kV 双断口真空永磁机构容性负载投切真空断路器燃弧时间参考值。

关键词: 双断口; 真空断路器; 容性开断; 燃弧区间

Experimental Research on Optimal Arcing Time of 40.5 kV Double-break Vacuum Circuit Breaker During Capacitive Interruption Process

LIU Bo¹, TIAN Limin², ZHAI Xiaoshe³, CHEN Yuxiu⁴, LAN Zhenbo¹

(1. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. Baoji Sifang Huaneng Electrical Co., Ltd., Xi'an 710049, China; 3. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Motic(Xiamen)Electric Group Co., Ltd., Fujian Xiamen 361101, China)

Abstract: To reveal the optimal arcing time of a 40.5 kV double-break vacuum circuit breaker during capacitive interruption when two breaks function non-simultaneously, the voltage distribution characteristics between the two breaks during capacitive interruption were briefly discussed, and the mathematical expression of over-voltage was derived. The values of over-voltage between two breaks in different arcing time were calculated. And a laboratory test was performed on a real 40.5 kV double-break vacuum circuit breaker to verify its re-ignition characteristics during capacitive interruption. As a result, based on the theoretical and test results obtained in this study, the optimal arcing time of the 40.5 kV double-break vacuum circuit breaker with permanent magnet actuator during capacitive interruption is suggested.

Key words: double-break; VCB; capacitive interruption; arcing time

0 引言

国内当前用于 40.5 kV 电压等级及以上电容投切 SF₆ 断路器或单断口真空断路器, 普遍电气寿命不高^[1-3]。由于容性开断重击穿概率高, 严重损坏开关绝缘性能, 导致开断失败, 严重影响电力生产与运行。真空断路器投切无功补偿电容器组, 是电力系统无功补偿的一个重要课题, 然而自 1977 年首次应用真空断路器投切电容器组至今, 仍有许多难关没有攻克^[2-6]。

为解决容性开断重击穿问题, 国内外学者及研究机构都做了诸多尝试, 最常见的包括: 改善触头材料(针对容性投切采用特定的触头材料), 改善电极表面电场分布(包括电流老练、电压老练等), 采用永磁机构选相投切技术等^[7-10]。以上方法虽然从实际效果上降低了重燃概率, 但仍未达到容性投切 C2 级要求。以大连理工为代表的国内高校最早提出选相控制策略用于容性负载投切领域, 但仍未通过试验验证。早在 2009 年国内国网电科院项目组已提出采用多断口串并联的技术解决 126 kV 及以上真空开

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2016-12-27

关高电压、大容量开断难题^[11-14]。近年来以国网电科院、麦克奥迪为代表的科研机构及企业提出了多断口容性开断思路, 充分利用真空短间隙击穿特性以降低容性开断重燃概率。

采用多断口串联, 需要解决断口非同期开断条件下最佳燃弧时间设定的难题, 因不同的燃弧时间所导致的单个断口承压不一样, 当任一断口承压超过其击穿电压时均会导致后开断口击穿^[15-17]。文中主要从理论上分析了燃弧时间对断口承压特性的影响, 从实验角度研究了双断口容性开断燃弧时间, 得到了 40.5 kV 双断口真空永磁机构容性负载投切真空断路器分闸速度范围参考值。

1 理论分析

实际应用中多断口断路器通常需安装均压电容^[18-19], 实际对应的电路原理见图 1。图 1 中: CB_1 、 CB_2 为 2 个真空断路器或 1 个真空断路器的 2 个断口; U_{CB_1} 、 U_{CB_2} 分别为断口电压 (取如图所示正向参考方向), CB_1 、 CB_2 分别在 t_0 、 t_1 时刻打开。 L_s 、 R_s 分别为系统回路等值电阻与电感; C_0 为负载电容; U_s 为交流电压幅值; ω 为工频角频率。

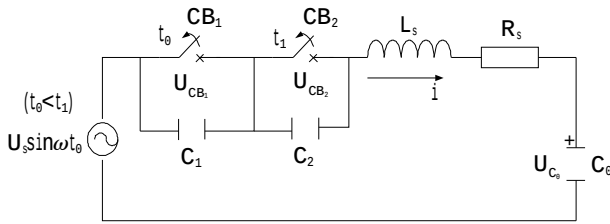


图 1 双断口电路原理图

Fig. 1 Double-break circuit scheme

在 t_0 时刻回路电压方程为

$$U_{CB_1} + U_{CB_2} + L_s \frac{di}{dt} + R_s i + U_{C_0} = U_s \sin \omega t_0 \quad (1)$$

图 1 中: C_1 、 C_2 为断口均压电容 (通常 $C_1 = C_2$), 以下分析均不考虑真空电弧重燃。

考虑开关动作不同期影响 (即 $t_0 < t_1$), 计真空断路器燃弧时间为 Δt 。通常断口间不同期小于 3 ms, 而真空电弧燃弧时间通常在 3 ms 以上, 可见断口间不同期小于燃弧时间即 $t_1 - t_0 < \Delta t$, 即在 CB_1 燃弧过程尚未结束 CB_2 开始分断^[20]。

在 $[t_0, t_1]$ 时段内: 从 CB_1 触头开始动作至电流过零熄弧, 由于电弧压降很小断口间电压接近为零, CB_1 断口间电压接近为零, 电容电压与电源电压相

等即 $U_{CB_1} = U_{CB_2} = 0$, $U_{C_0} = U_s \sin \omega t_0$ 。

在 $[t_1, t_0 + \Delta t]$ 时段内: CB_1 燃弧过程尚未结束 CB_2 开始燃弧, 故 $U_{CB_1} = U_{CB_2} = 0$, $U_{C_0} = U_s \sin \omega t_0$ 。

在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内: 由于在 $t_0 + \Delta t$ 时刻电流过零熄弧此后 CB_1 断开, CB_2 开始燃弧, U_{CB_2} 初始电压为零。当电流过零熄弧后, 由于电感电流为零电路无能量交换过程, 电容电压维持在 $t_0 + \Delta t$ 时刻的值, 即在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 U_{C_0} 初始电压维持在 $U_s \sin \omega (t_0 + \Delta t)$ 。

为方便计算 U_{CB_1} ($U_{CB_1}(t) = U_{C_1}(t)$) 采用拉斯变换求解电路方程。

电路总阻抗和断口 1 电压分别为

$$\begin{cases} Z(s) = R_s + sL_s + \frac{1}{s} \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} \right) \\ U_{C_1}(s) = \frac{\left(\frac{U_s \omega}{s^2 + \omega^2} - \frac{U_{C_0}}{s} \right)}{Z(s)} \cdot \frac{1}{C_1 s} \end{cases} \quad (2)$$

$U_{C_1}(s)$ 特征方程为

$$D(s) = sL_s C_1 (s^2 + \omega^2) \left(s^2 + \frac{R_s}{L_s} s + \frac{1}{C_{eq} L_s} \right) = 0 \quad (3)$$

取 $C_1 = C_2 = C$ 且实际应用中 $C \ll C_0$ 则

$$C_{eq} = 1 / \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} \right) = C_0 \quad (4)$$

式(3)的根为: $p_1 = 0$; $p_{23} = \pm j\omega$ 。实际情况 $\left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2 <$

$\frac{1}{L_s C_{eq}}$, 则 $p_{45} = \frac{R_s}{2L_s} \pm j \sqrt{\frac{1}{L_s C_{eq}} - \left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2}$, 则相应根所对应特征值系数分别为:

$$K_1 = \frac{-U_{C_0} C_{eq}}{C}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{0.5 U_s}{C \sqrt{\left(L_s \omega^2 - \frac{1}{C_{eq}} \right)^2 + (R_s \omega)^2}} e^{j(90^\circ + \theta)} = \\ &0.5 U_s \frac{C_{eq}}{C} e^{j(90^\circ + \theta)}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_3 &= \frac{0.5 U_s}{C \sqrt{\left(L_s \omega^2 - \frac{1}{C_{eq}} \right)^2 + (R_s \omega)^2}} e^{-j(90^\circ + \theta)} = \\ &0.5 U_s \frac{C_{eq}}{C} e^{-j(90^\circ + \theta)}. \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)、(7)中,

$$\tan \theta = \frac{C_{eq} R_s \omega}{C_{eq} L_s \omega^2 - 1} \quad (8)$$

令 $\alpha = \frac{R_s}{L_s}$, $\beta = \frac{1}{L_s C_{eq}}$, 当 $\beta > \frac{\alpha^2}{2}$, 式(9)、(10)成立。

$$K_4 = \frac{1}{L_s C} \frac{-U_{C_0} \alpha^2 - \omega U_s \alpha + 2 U_{C_0} \beta - 2 U_{C_0} \omega^2 + j 2 (U_{C_0} \alpha + \omega U_s) \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}}{\alpha^4 + (-5\beta + \omega^2) \alpha^2 - 4\omega^2 \beta + 4\beta^2 + j 2 (-\alpha^3 + 3\alpha\beta - \alpha\omega^2) \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}} = \frac{U_{C_0}}{2} \frac{C_{eq}}{C}; \quad (9)$$

$$K_5 = \frac{1}{L_s C} \frac{-U_{c_0} \alpha^2 - \omega U_s \alpha + 2U_{c_0} \beta - 2U_{c_0} \omega^2 - 2j(U_{c_0} \alpha + \omega U_s) \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}}{\alpha^4 + (-5\beta + \omega^2)\alpha^2 - 4\omega^2 \beta + 4\beta^2 - j2(-\alpha^3 + 3\alpha\beta - \alpha\omega^2) \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}} = \frac{U_{c_0}}{2} \frac{C_{eq}}{C}; \quad (10)$$

故 $U_{c_i}(t)$ 可以表示为

$$U_{c_i}(t) = K_1 - |K_{23}| \sin(\sin \omega t + \theta) + |K_4| e^{-\frac{\alpha}{2}t} \cos(\sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}} t + \theta_1 - \theta_2). \quad (11)$$

其中:

$$\tan \theta_1 = \frac{2(U_{c_0} \alpha + \omega U_s) \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}}{-U_{c_0} \alpha^2 - \omega U_s \alpha + 2U_{c_0} \beta - 2U_{c_0} \omega^2}; \quad (12)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{2(-\alpha^3 + 3\alpha\beta - \alpha\omega^2) \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}}{\alpha^4 + (-5\beta + \omega^2)\alpha^2 - 4\omega^2 \beta + 4\beta^2}. \quad (13)$$

记式(11) $U_{c_i}(t)$ 的全电流表达式为 $f(t)$, 则在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 $U_{c_i}(t) = f[t - (t_0 + \Delta t)]$ 。

$[t_1 + \Delta t, +\infty]$ 时段内: 由于 CB_1 、 CB_2 均已断开, CB_2 初始断口电压为零, CB_1 初始断口电压为 $U_{c_i}(t_1 + \Delta t)$, 负载电容电压仍维持在 $U_s \sin \omega(t_0 + \Delta t)$ 。电路总阻抗变为

$$Z(s) = R_s + sL_s + \frac{1}{s} \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right). \quad (14)$$

等值电容变为

$$C_{eq} = 1 / \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{C}{2}. \quad (15)$$

断口 1 电压表达式为

$$U_{c_i}(s) = \frac{\left[\frac{U_s \omega}{s^2 + \omega^2} - \frac{U_{c_0}(t_1) + U_{c_i}(t_1)}{s} \right]}{Z(s)} \frac{1}{C_1 s}. \quad (16)$$

分析过程如前所述一致, 计算结果只需将式(11)中 U_{c_0} 更新为 $U_s \sin \omega(t_0 + \Delta t) + U_{c_i}(t_1 + \Delta t)$ 即可。记此时 $U_{c_i}(t)$ 的全电流表达式为 $g(t)$, 则 $U_{c_i}(t) = g[t - (t_1 + \Delta t)]$, $U_{c_2}(t)$ 计算结果与 $U_{c_i}(t)$ 一致。

考虑到容性负载电流与电压的相位关系在电流过零时电压为峰值故 $U_{c_0} = \pm U_s$ 。且当电流正向(由正向负)过零时 $U_{c_0} = U_s$, 电流负向(由负向正)过零时 $U_{c_0} = -U_s$ 。考虑到在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 U_{c_0} 初始电压维持在 $U_s \sin \omega(t_0 + \Delta t)$, $[t_1 + \Delta t, +\infty]$ 时段内负载电容电压仍维持在 $U_s \sin \omega(t_0 + \Delta t)$ 。即在 $[t_0 + \Delta t, +\infty]$ 时段内断路器断口电压及电容电压与断路器分断相位有关。

当分断相位位于电流正向过零点前半个周期内: 在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 $U_{c_0} = U_s$, $U_{CB_2} = 0$, $U_{CB_1} = f[t - (t_0 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = U_s$; 在 $[t_1 + \Delta t, +\infty]$ 时段内 $U_{c_0} = U_s$, $U_{CB_1} = U_{CB_2} = g[t - (t_1 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = [U_s +$

$U_{c_i}(t_1 + \Delta t)]$ 。

当分断相位位于电流负向过零点前半个周期内: 在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 $U_{c_0} = -U_s$, $U_{CB_2} = 0$, $U_{CB_1} = f[t - (t_0 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = -U_s$; 在 $[t_1 + \Delta t, +\infty]$ 时段内 $U_{c_0} = -U_s$, $U_{CB_1} = U_{CB_2} = g[t - (t_1 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = [(-U_s + U_{c_i}(t_1 + \Delta t))]$ 。

综合以上分析结果得到非同期开断条件下断口电压分布情况为:

1) 分断相位位于电流正向过零点前半个周期内。在 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 时段内: $U_{CB_1} = U_{CB_2} = 0$, $U_{c_0} = U_s \sin \omega t$ 。在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 $U_{c_0} = U_s$, $U_{CB_2} = 0$, $U_{CB_1} = f[t - (t_0 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = U_s$; 在 $[t_1 + \Delta t, +\infty]$ 时段内 $U_{c_0} = U_s$, $U_{CB_1} = U_{CB_2} = g[t - (t_1 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = [U_s + U_{c_i}(t_1 + \Delta t)]$ 。

2) 分断相位位于电流负向过零点前半个周期内。在 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 时段内: $U_{CB_1} = U_{CB_2} = 0$, $U_{c_0} = -U_s \sin \omega t$ 。在 $[t_0 + \Delta t, t_1 + \Delta t]$ 时段内 $U_{c_0} = -U_s$, $U_{CB_2} = 0$, $U_{CB_1} = f[t - (t_0 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = -U_s$; 在 $[t_1 + \Delta t, +\infty]$ 时段内 $U_{c_0} = -U_s$, $U_{CB_1} = U_{CB_2} = g[t - (t_1 + \Delta t)]$, 表达式 K_1 中的 $U_{c_0} = [-U_s + U_{c_i}(t_1 + \Delta t)]$ 。

小结: 非同期开断条件下断口电压分布与燃弧时间关系很大。

2 数据计算

实际双断口 40.5 kV 样机参数: U_s 为 $40.5\sqrt{2} / \sqrt{3}$ kV; L_s 为 0.01 mH; R_s 为 0.002 Ω , C_0 为 10 μ F, C_1 、 C_2 为 200 pF。

将实际系统参数代入相应公式中得到: $C_{eq} = 200$ pF, $\alpha = 200$, $\beta = 5 \times 10^{14}$, 此时有: $K_1 = -U_{c_0}$, $\theta = 0$, $K_2 = -0.5 U_{c_0} e^{j90}$, $K_4 = -U_{c_0}/2$, $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 。所以

$$f(t) = -U_{c_0} + U_s \sin \omega t + \frac{U_{c_0}}{2} e^{-100t} \cos(\sqrt{20} \times 10^6 t). \quad (17)$$

同理将实际系统参数代入 $g(t)$ 表达式中得到: $C_{eq} = 100$ pF, $\alpha = 200$, $\beta = 5 \times 10^{12}$, 此时有: $K_1 = -0.5 U_{c_0}$, $\theta = 0$, $K_2 = -0.25 U_{c_0} e^{j90}$, $K_4 = -U_{c_0}/4$, $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 。所以

$$g(t) = -0.5[U_{c_0} + U_{c_i}(t_1 + \Delta t)] + 0.5 U_s \sin \omega t + \frac{U_{c_0}}{4} e^{-100t} \cos(2\sqrt{20} \times 10^6 t). \quad (18)$$

得到以下结果:

1) 当分断相位位于电流正向过零点前半周期内时: 在 $[t_0, t_0+\Delta t]$ 时段内: $U_{CB_1}=U_{CB_2}=0, U_{C_0}=U_s \sin \omega t_0$ 。在 $[t_0+\Delta t, t_1+\Delta t]$ 时段内 $U_{C_0}=U_s, U_{CB_2}=0, U_{CB_1}(t)=-U_s+U_s \sin \omega t + \frac{U_s}{2} e^{-100[t-(t_0+\Delta t)]} \cos\{\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_0+\Delta t)]\}$; 在 $[t_1+\Delta t, +\infty]$ 时段内 $U_{C_0}=U_s, U_{CB_1}(t)=U_{CB_2}(t)=-0.5[U_s+U_{CB_1}(t_1+\Delta t)]+0.5U_s \sin \omega t + \frac{U_s+U_{CB_1}(t_1+\Delta t)}{4} e^{-100[t-(t_1+\Delta t)]} \cos\{2\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_1+\Delta t)]\}$ 。

2) 当分断相位位于电流负向过零点前半周期内时: 在 $[t_0, t_0+\Delta t]$ 时段内: $U_{CB_1}=U_{CB_2}=0, U_{C_0}=U_s \sin \omega t_0$ 。在 $[t_0+\Delta t, t_1+\Delta t]$ 时段内 $U_{C_0}=-U_s, U_{CB_2}=0, U_{CB_1}(t)=U_s+U_s \sin \omega t - \frac{U_s}{2} e^{-100[t-(t_0+\Delta t)]} \cos\{\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_0+\Delta t)]\}$; 在 $[t_1+\Delta t, +\infty]$ 时段内 $U_{C_0}=-U_s, U_{CB_1}(t)=U_{CB_2}(t)=-0.5[-U_s+U_{CB_1}(t_1+\Delta t)]+0.5U_s \sin \omega t + \frac{-U_s+U_{CB_1}(t_1+\Delta t)}{4} e^{-100[t-(t_1+\Delta t)]} \cos\{2\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_1+\Delta t)]\}$ 。

以下分析 $U_{CB}(t)$ 的最大值。以 t_0 时刻为参考零点 ($t_0=0$), Δt 取 3~10 ms, 断口间不同期取 1~3 ms。令:

$$f_1(t) = |-U_s + U_s \sin \omega t + \frac{U_s}{2} e^{-100[t-(t_0+\Delta t)]} \cos\{\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_0+\Delta t)]\} / U_s \quad t \in [t_0+\Delta t, t_1+\Delta t]; \quad (19)$$

$$g_1(t) = |-0.5[U_s + f_1(t_1+\Delta t)] + 0.5U_s \sin \omega t + \frac{U_s + f_1(t_1+\Delta t)}{4} e^{-100[t-(t_1+\Delta t)]} \cos\{2\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_1+\Delta t)]\} / U_s \quad t \in [t_1+\Delta t, +\infty]; \quad (20)$$

$$f_2(t) = |U_s + U_s \sin \omega t - \frac{U_s}{2} e^{-100[t-(t_0+\Delta t)]} \cos\{\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_0+\Delta t)]\} / U_s \quad t \in [t_0+\Delta t, t_1+\Delta t]; \quad (21)$$

$$g_2(t) = |-0.5[U_s + f_2(t_1+\Delta t)] + 0.5U_s \sin \omega t + \frac{U_s + f_2(t_1+\Delta t)}{4} e^{-100[t-(t_1+\Delta t)]} \cos\{2\sqrt{20} \times 10^6 [t-(t_1+\Delta t)]\} / U_s \quad t \in [t_1+\Delta t, +\infty]。 \quad (22)$$

式(19)-(21)中: $f_1(t)$ 、 $g_1(t)$ 分别为分断相位位于电流正向过零点前半周期内对应 $[t_0+\Delta t, t_1+\Delta t]$ 及 $[t_1+\Delta t, +\infty]$ 时段内断口过电压倍数; $f_2(t)$ 、 $g_2(t)$ 分别为分断相位位于电流负向过零点前半周期内对应 $[t_0+\Delta t, t_1+\Delta t]$ 及 $[t_1+\Delta t, +\infty]$ 时段内断口过电压倍数。分别对应求取 $f_1(t)$ 、 $g_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $g_2(t)$ 在各自区间内的最大值得到表 1。

表 1 断口电压最大值与燃弧时间的关系

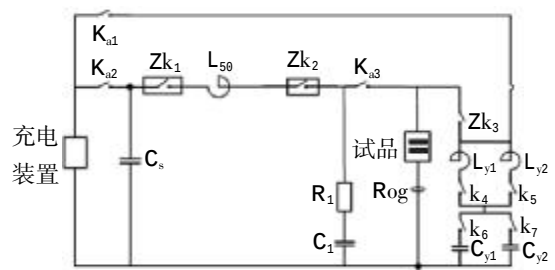
Table 1 The relationship between maximum voltage of break and arcing time

$\Delta t/\text{ms}$	不同期为 1 ms				不同期为 2 ms				不同期为 3 ms			
	$f_{1\max}$	$g_{1\max}$	$f_{2\max}$	$g_{2\max}$	$f_{1\max}$	$g_{1\max}$	$f_{2\max}$	$g_{2\max}$	$f_{1\max}$	$g_{1\max}$	$f_{2\max}$	$g_{2\max}$
3	0.48	1.02	2.47	2.76	0.59	1.36	2.86	2.70	0.64	1.33	2.77	1.95
4	0.57	1.36	2.39	2.65	0.82	1.33	2.68	2.65	0.78	1.31	2.49	1.55
5	0.77	1.33	2.06	2.30	1.09	1.31	2.21	2.55	1.21	1.64	2.06	1.52
6	1.05	1.31	2.49	1.69	1.40	1.65	1.99	1.52	1.69	2.02	1.99	1.52
7	1.36	1.66	2.41	1.43	1.71	2.02	1.69	1.52	1.81	2.05	1.70	1.42
8	2.20	2.17	2.10	1.52	1.99	2.36	1.27	1.32	2.18	2.59	1.38	1.38
9	2.56	2.72	1.97	1.41	2.21	2.62	1.12	1.25	2.46	2.74	1.24	1.24
10	2.83	2.86	1.85	1.23	2.68	2.79	1.06	1.16	2.78	2.83	1.14	1.12

由表 1 数据可知, 在当燃弧时间小于 4 ms 或大于 9 ms 时单断口最大过电压倍数均超过 2.7 p.u., 而 24 kV 真空断路器额定工频短时耐受电压为 2.7 p.u.^[9-10], 即单断口最大过电压倍数均超过 2.7 p.u. 时击穿概率较大。

3 试验分析

为更好确定 40.5 kV 双断口真空永磁机构容性负载投切真空断路器燃弧时间, 课题组对样机进行了研究性试验, 试验在某国家重点实验室(电器实验基地)开展。其中机构动作分散性在 3 ms 内。试验在图 2 所示的电流源回路上进行, 试验回路调节预期试验参数见表 2, 其中相次为单相。



L_{50} —工频电感; C_s —容性实验储能电容; R_1 —恢复电压充电电阻; C_1 —恢复电压充电电容; L_{y1} 、 L_{y2} —涌流源电容器; K_{a1} 、 K_{a2} —充电开关; K_{a3} —容性开断隔离开关; Zk_1 —容性回路合闸开关; Zk_2 —恢复电压充电开关; Zk_3 —涌流源隔离开关; k_4 、 k_5 、 k_6 、 k_7 —手闸投切开关。

图 2 容性负载电流开合试验回路

Fig. 2 Test circuit of switching capacitive load

表2 预期试验参数

Table 2 Prospective test parameters

参数	数值
试验电流频率/Hz	49.2
恢复电压峰值/kV	65.0
试验电流/A	630.0

分别对样机 A、B、C 三相开展了 42 次连续试验,试验结果统计见表 3。

表 3 中: U_1 为电压源电容器充电电压; I_b 为容性开断电流; t_a 为燃弧时间; U_c 为 TRV 峰值;○表示开断成功;●表示开断失败。

由表 3 数据可知,在当燃弧时间处于[4 ms, 7 ms]间时双断口样机无重击穿现象,对应断口刚分速度为[1.58 m/s, 2.75 m/s],与理论分析结果一致。

4 结语

文中对双断口容性开断(不考虑重击穿),在断口动作不同期条件下电压分布特性进行了理论分析。从理论上分析了燃弧时间对断口承压特性的影响,从实验角度研究了双断口容性开断燃弧时间,得到了 40.5 kV 双断口真空永磁机构容性负载投切真空断路器燃弧时间参考区间为[4 ms, 7 ms],对应断口刚分速度参考区间为[1.58 m/s, 2.75 m/s]。

参考文献:

- [1] 尹婷,陈轩恕,杜砚.采用高耦合度电抗器的大容量高压断路器设计[J].高电压技术,2010,36(6):1577-1582.
YIN Ting, CHEN Xuanshu, DU Yan, et al. Design of large-capacity high-voltage breakers using tightly-coupled reactor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1577-1582.
- [2] 廖敏夫,邹积岩,段雄英,等.多断口真空开关技术的发展与研究现状[J].高压电器,2006,42(6):456-459.
LIAO Minfu, ZOU Jiyan, DUAN Xiongying, et al. Development and current status of vacuum switch with multiple breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 456-459.
- [3] 廖敏夫,邹继斌,段雄英,等.多断口真空开关的绝缘与击穿统计特性[J].电网技术,2006,30(5):13-17.
LIAO Minfu, ZOU Jibin, DUAN Xiongying, et al. Dielectric strength and statistical property of single and multiple-breaker vacuum circuit breakers[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 13-17.
- [4] 廖敏夫,段雄英,邹积岩,等.多断口真空开关的动态介质恢复及统计特性分析[J].中国电机工程学报,2003,23(2):82-87.
LIAO Minfu, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Analysis of dynamic dielectric recover and statistacal properties for

vacuum circuit-breaker with multi-breaks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 82-87.

- [5] 刘波,陈轩恕,兰贞波,等.新一代 110 kV 真空断路器挂网试运行研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(16):126-130.
LIU Bo, CHEN Xuanshu, LAN Zhenbo, et al. Research on trial operation for a new generation of 110 kV vacuum circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 126-130.
- [6] 段雄英,邹积岩,方春恩,等.相控真空开关同步关合电容器组控制策略及其实现[J].大连理工大学学报,2003,43(4):457-465.
DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, FANG Chun'en, et al. Synchronized control tactics of phasing vacuum switches when closing capacitor banks[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(4): 457-465.
- [7] 黄道春,阮江军,吴高波,等.模块化多断口真空断路器电位和电场分布研究[J].高电压技术,2011,37(1):124-129.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WU Gaobo, et al. Potential and electric field distribution of modular multi-break vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 124-129.
- [8] JIANG W, WU G N, WANG S X, et al. The survey of insulation problems of ultra-high voltage transmission system [C]//2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, Canada: IEEE, 2008: 518-523.
- [9] FENG Guihong, SHAO Jiayun, ZHANG Bingyi, et al. Study on a novel controllable reactor using in ultra-high voltage system [C]//Power System Technology and IEEE Power India Conference. New Delhi, India: IEEE, 2008: 1-4.
- [10] 吴祎琼,黄宝营,燕立,等.1 000 kV 变电站主变 110 kV 侧并联电容器装置的参数选择[J].电网技术,2009,29(5):42-47.
WU Weiqiong, HUANG Baoying, YAN Li, et al. Parameters selection of shunt capacitor device at 110 kV side of main transformer in 1 000 kV substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 42-47.
- [11] 郑祥,邹积岩,程卓.并联真空发电机断路器的电流转移过程[J].高电压技术,2009,35(12):2709-2714.
ZHENG Xiang, ZOU Jiyan, CHEN Zhuo. Current transfer process of parallel vacuum generator circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2009, 37(12): 2709-2714.
- [12] 陈轩恕,王泽文,邹积岩,等.真空断路器并联开断过程的实验研究[J].高电压技术,1998,34(5):33-37.
CHEN Xuanshu, WANG Zewen, ZOU Jiyan, et al. Experimental research of interrupting process of parallel vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 1998, 34(5): 33-37.
- [13] 王政,费广成.大容量发电机用真空灭弧室[J].高压电器,2005,41(4):295-298.

表 3 实验记录

Table 3 Experiment records

试验 序号	A 相					B 相					C 相				
	U/kV	I _b /A	t _a /ms	U _o /kV	备注	U/kV	I _b /A	t _a /ms	U _o /kV	备注	U/kV	I _b /A	t _a /ms	U _o /kV	备注
1	46	620.8	3.6	55.2	●	46	613.1	7.5	60.3	○	46	635.7	1.1	—	●
2	46	623.7	3.0	—	●	46	613.1	5.4	60.1	○	46	621.5	4.9	64.9	○
3	46	623.7	4.1	55.0	○	46	613.1	6.0	60.3	○	46	591.1	4.0	65.3	○
4	46	632.2	3.6	—	●	46	608.8	6.8	60.3	○	46	624.4	2.3	—	●
5	46	637.1	6.3	55.0	○	46	615.2	7.0	60.3	○	46	601.7	2.5	—	●
6	46	633.6	8.3	55.0	●	46	615.2	6.1	60.6	○	46	604.6	1.0	—	●
7	46	645.6	6.3	55.0	○	46	622.3	3.8	60.6	●	46	641.3	3.2	—	●
8	46	643.5	4.6	55.2	○	46	628.6	6.0	60.6	○	46	562.9	3.4	64.6	○
9	46	644.9	5.0	57.3	○	46	628.6	5.4	60.8	○	46	640.6	5.1	64.6	○
10	46	643.5	7.7	57.3	○	46	629.3	5.9	60.8	○	46	639.9	7.0	64.5	○
11	46	643.5	5.3	57.4	○	46	651.2	5.9	61.2	○	46	639.9	6.9	64.5	○
12	46	659.0	5.8	57.4	○	46	651.2	6.3	61.0	○	46	652.0	4.8	64.9	○
13	46	598.9	6.7	57.5	○	46	644.9	4.1	61.1	○	46	605.3	2.2	—	●
14	46	598.9	5.3	57.6	○	46	656.2	6.6	61.0	○	46	636.4	4.5	64.9	○
15	46	579.8	7.0	57.7	○	46	656.2	6.4	61.0	○	46	605.3	4.9	64.6	○
16	46	579.8	5.2	57.7	○	46	655.5	5.9	59.7	○	46	636.4	4.5	64.9	○
17	46	579.8	6.2	57.7	○	46	632.2	8.1	58.7	○	46	605.3	4.9	64.6	○
18	46	565.7	7.8	57.7	○	46	632.2	5.3	60.0	○	46	618.0	4.1	64.9	○
19	46	590.4	6.3	57.7	○	46	642.8	6.0	60.1	○	46	637.8	4.9	64.5	○
20	46	598.2	4.9	60.6	○	46	642.8	4.3	60.2	○	46	613.8	3.4	64.8	○
21	46	598.2	4.4	60.6	○	46	642.8	4.0	60.2	○	46	627.9	4.3	64.8	○
22	46	598.2	8.5	60.6	●	46	652.0	7.5	60.2	●	46	622.3	6.5	64.5	○
23	46	594.0	4.6	60.1	○	46	652.0	7.5	60.2	○	46	596.1	3.4	—	●
24	46	594.0	3.8	60.2	○	46	652.0	6.8	60.2	○	46	586.9	4.1	64.6	○
25	46	594.0	4.4	60.2	○	46	652.0	6.8	60.4	○	46	582.7	7.8	64.5	○
26	46	594.0	3.7	60.4	○	46	653.4	5.3	60.4	○	46	583.4	4.9	64.9	○
27	46	595.4	4.7	60.4	○	46	653.4	6.3	60.6	○	46	488.6	1.8	—	●
28	46	596.8	7.0	60.6	○	46	665.4	6.3	60.6	○	46	562.1	1.9	64.3	●
29	46	594.0	5.4	60.6	○	46	665.4	3.6	60.4	○	46	502.2	2.5	64.3	●
30	46	594.0	60.1	60.6	○	46	666.8	4.2	60.4	○	46	569.2	3.4	64.9	○
31	46	603.9	3.4	60.6	○	46	664.7	6.9	60.5	○	46	545.2	7.6	64.2	○
32	46	603.9	6.8	60.7	○	46	642.8	4.8	64.7	○	46	548.0	5.3	64.9	○
33	46	601.0	8.5	—	●	46	654.8	3.6	—	●	46	526.8	1.4	—	●
34	46	601.0	5.5	65.4	○	46	673.9	3.7	—	●	46	565.7	5.0	63.9	○
35	46	601.0	7.0	65.2	○	46	610.2	4.0	64.4	○	46	630.7	4.5	65.1	○
36	46	636.4	7.8	—	●	46	595.4	5.0	64.3	○	46	654.1	5.2	65.2	○
37	46	642.1	8.0	—	●	46	565.7	6.8	64.2	○	46	663.3	5.0	65.2	○
38	46	652.0	8.6	—	●	46	624.3	8.2	—	●	46	670.3	5.1	65.0	—
39	46	670.3	6.8	64.8	○	46	660.4	3.2	—	●	46	673.2	5.2	65.1	—
40	46	652.0	5.0	65.4	○	46	660.4	3.9	—	●	46	678.1	3.9	—	●
41	46	673.2	3.9	—	●	46	667.5	7.8	65.4	○	46	616.6	6.3	65.3	○
42	46	675.3	8.0	65.1	○	46	667.5	8.3	—	●	46	613.8	5.4	65.2	○

- WANG Zheng, FEI Guangcheng. Vacuum interrupter for generator circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 295-295.
- [14] 丁富华, 段雄英, 邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 30-35.
- DING Fuhua, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan. An intelligent reactive power compensator based on synchronous vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 30-34.
- [15] 方春恩, 邹积岩, 丛吉远, 等. 基于 DSP 的无功补偿电容器组同步投切装置[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 21-23.
- FANG Chun'en, ZOU Jiyan, CONG Jiyuan, et al. synchronous switching device based on DSP for reactive power compensation capacitor banks[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6): 21-23.
- [16] 黄胜利. 真空断路器过电压对发电机绝缘的影响及防护[D]. 成都: 四川大学, 1999.
- HUANG Shengli. The influence of overvoltage at breaking the generator by vacuum circuit-breakers on generator insulation and protection[D]. Chengdu: Sichuan University, 1999.
- [17] 邹积岩, 丛吉远, 董恩源. 真空开关的电子操动与同步开关技术[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 30-33.
- ZOU Jiyan, CONG Jiyuan, DONG Enyuan. Electronic actuator and synchronous switch technology for vacuum circuit breaker[J]. Electrotechnical Journal, 2001(4): 30-33.
- [18] 方春恩, 王佳颖, 邹积岩. 并联电容器组同步关合最佳目标相位的确定[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 24-27.
- FANG Chun'en, WANG Jiaying, ZOU Jiyan. The investigation on optimal making phase for synchronous closing shunt capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 24-27.
- [19] 淡淑恒, 王季梅, 阎静, 等. 提高真空断路器容性开断性能方法的研究[J]. 中国电力, 1999, 32(12): 69-72.
- DAN Shuheng, WANG Jimei, YAN Jing, et al. Survey on the method of improving the capacitance breaking capability of vacuum circuit breakers[J]. Electric Power, 1999, 32(12): 69-72.
- [20] 须雷, 李海涛, 王万亭. 智能变电站中断路器选相控制技术应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 63-68.
- XU Lei, LI Haitao, WANG Wanting. Application research on the technology of CB phase-controlled in smart substation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 63-68.
- 刘波(1987—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统仿真计算及智能高压电器。