

相控真空断路器的最佳燃弧区间研究

舒胜文¹, 阮江军¹, 黄道春¹, 吴高波¹, 刘兵²

(1. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072; 2. 华中电网有限公司, 武汉 430077)

摘要: 最佳燃弧区间的确定是相控真空断路器应用于短路电流开断时必须解决的问题之一。针对真空断路器弧后介质强度恢复过程的2个主要阶段:鞘层发展阶段和金属蒸气衰减阶段,分别建立了数学模型,提出了采用特征参数来表征它在2个不同阶段的开断能力。仿真分析了燃弧时间对这些特征参数即开断能力的影响,从而得到了最佳燃弧区间。通过对比10 kV和35 kV系统用真空断路器最佳燃弧区间的试验研究结果,证明了仿真分析的有效性。

关键词: 真空断路器;相控;最佳燃弧区间;开断能力;鞘层;金属蒸气

中图分类号: TM561.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)08-0001-06

Optimal Arcing Interval of Phase-controlled Vacuum Circuit Breaker

SHU Sheng-wen¹, RUAN Jiang-jun¹, HUANG Dao-chun¹, WU Gao-bo¹, LIU Bing²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430077, China)

Abstract: Determination of optimal arcing interval is one of the problems which must be solved in applying phase-controlled vacuum circuit breaker (VCB) to break short-circuit current. For two major periods of post-arc dielectric strength recovery process of VCB, i.e. sheath expanding period and metal vapor decaying period, mathematical models were established in this paper, and characteristic parameters were used to represent breaking capacity. Influence of arcing time on these characteristic parameters was simulated and analyzed, thus the optimal arcing interval was obtained. By comparing simulation and test results of VCBs used in 10 kV and 35 kV power systems, the validity of simulation was proved.

Key words: vacuum circuit breaker (VCB); phase-controlled; optimal arcing interval; breaking capacity; sheath; metal vapor

0 引言

真空断路器(vacuum circuit breaker, VCB)具有安全可靠和灭弧性能好的优点,被广泛用于电力系统^[1]。真空断路器最主要的性能参数是极限短路开断电流,影响其开断能力的因素有很多,如电极结构、电极材料、电极直径、电极开距和分闸速度特性等^[2-4]。其中,电极开距是影响真空断路器开断能力

的重要因素之一。对于一定的短路电流,存在1个最佳触头开距区^[5];当真空断路器的分闸速度一定时,对应一个最佳燃弧区间。

相控断路器技术是根据线路电压或电流相位控制断路器的合分以抑制电网中的浪涌技术^[6]。目前,在额定负荷下的相控断路器技术在高压和超高压领域得到越来越广泛的使用,并取得了较好的效果^[7]。短路电流选相开断尚未见实用报道,这主要是由于相关的非周期、不对称暂态过程导致目标相位

收稿日期:2012-02-15; 修回日期:2012-03-17

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2009BAA19B05);国家电网公司科技项目(SG0846);中央高校基本科研业务费专项资金资助(20102070101000069)。

Project Supported by the National Eleventh-five Year Research Program of China (2009BAA19B05), Science and Technology Project of SGCC (SG0846), Fundamental Research Funds for the Central Universities (20102070101000069).

难以有效地预测与控制^[8]。而对于高压大电流真空断路器而言,如能解决选相分闸问题,就能大大提高其短路电流开断能力、使用寿命和可靠性^[9]。

真空断路器相控的主要任务是确定过零之前的动作相位或最佳燃弧区间^[9],这主要包括短路电流过零点预测和最佳燃弧区间确定等2个方面。针对真空断路器的开断能力与燃弧时间(对应电流过零时的触头开距)的关系,国内外进行了大量的试验研究。文[10]的试验结果表明,随着电极开距的增大,电弧逐渐向不稳定态发展且电弧电压逐渐增大,阳极表面熔池半径及金属液体旋转速度也逐渐增大,开断能力逐渐降低。文[2,11]研究了杯状纵磁真空灭弧室的极限电流开断能力与触头直径和开距间的规律,并总结出了相应的计算公式。文[5]得到了直径为60 mm的10 kV系统用杯状纵磁真空断路器开断25 kA时的最佳开距区为3~8 mm。文[9]得到了12 kV、25 kA真空断路器开断额定短路电流时的临界燃弧时间为2.5 ms,对应的临界开距为3.2 mm。文[12]得到了35 kV系统用真空灭弧室在开距为15~18 mm时弧后重燃率最低。以上研究成果均表明了最佳燃弧区间的存在,且为真空断路器应用于选相开断短路电流提供了参考。

笔者在深入分析真空断路器的介质强度恢复过程后,对其中的2个主要阶段:鞘层发展阶段和金属蒸气衰减阶段,分别建立了数学模型,采用阴极表面电场强度及耗散功率密度、金属蒸气密度与触头开距的乘积来表征2个不同阶段真空断路器的开断能力;在PSCAD/EMTDC中构建了其电磁暂态模型;仿真分析了燃弧时间对这些特征参数即开断能力的影响,得到了最佳燃弧区间;并与10 kV和35 kV系统用真空断路器最佳燃弧区间的试验研究结果进行了对比,以证明仿真分析的有效性。

1 弧后介质恢复过程的数学模型

1.1 鞘层发展阶段

1.1.1 鞘层厚度模型

Andrews和Varey将泊松方程、连续性方程及动量守恒方程应用到不断生长的离子鞘层,得到了描述离子鞘层厚度的连续过渡模型(continuous transition model, CTM)^[13]

$$l^2 = \frac{4\varepsilon_0 U_0}{9eZN_i} \left[\left(1 + \frac{u_{TRV}}{U_0}\right)^{3/2} + \frac{3u_{TRV}}{U_0} - 1 \right] \quad (1)$$

$$U_0 = \frac{M_i}{2e} \left(v_i - \frac{dl}{dt}\right)^2 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: l 为鞘层厚度; U_0 为鞘层边界上的

离子电位; ε_0 为真空介电常数; e 为单位电荷量; Z 为平均电荷多重常数; N_i 为鞘层边界上离子的平均体积分数; u_{TRV} 为断路器两端的瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV); M_i 为离子质量; v_i 为鞘层边界上离子的平均速度。

1.1.2 弧后电流模型^[13]

$$i_{pa} = \frac{\pi D^2 Z N_i e}{4} \left(v_i - \frac{dl}{dt}\right) \quad (3)$$

式(3)中, D 为电弧有效直径。

1.1.3 弧后电阻模型

$$R_{pa} = u_{TRV}/i_{pa} \quad (4)$$

1.1.4 离子体积分数模型

鞘层边界上离子的平均体积分数 N_i 随时间和空间变化^[14]

$$N_i = N_{i0} \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \left(AMP \frac{l^2}{gap^2} + 1\right) \quad (5)$$

式(5)中: N_{i0} 为 N_i 的初始值,即 $t=t_0$ (弧后阶段开始时刻)时, $N_i=N_{i0}$; τ 为离子体积分数的衰减时间常数; AMP 是离子体积分数从弧后阴极到阳极的空间分布控制因子; gap 是触头开距。

由式(3)可知, N_{i0} 由弧后电流初始值 i_{pa0} 决定

$$N_{i0} = \frac{4i_{pa0}}{v_i \pi D^2 Z e} \quad (6)$$

1.1.5 电弧有效直径及动态开距模型

文[15]的试验结果表明,电弧电流一定时,电弧面积随开距的增加而增加。为此,若已知触头开距 gap_1 、 gap_2 (额定开距)处电弧面积与触头总面积(可由触头直径 D_0 求得)的比值 b_{z_1} 、 b_{z_2} ,则可根据分段线性假设(以 gap_1 为分界),得到任意开距 gap 处的电弧有效直径 D

$$D = \begin{cases} D_0 \sqrt{\frac{gap \cdot b_{z_1}}{gap_1}} & gap \leq gap_1 \\ D_0 \sqrt{\frac{(gap - gap_1) \cdot (b_{z_2} - b_{z_1})}{gap_2 - gap_1} + b_{z_1}} & gap_1 < gap \leq gap_2 \end{cases} \quad (7)$$

触头开距 gap 随着燃弧时间 t_0 不断增加

$$gap = v \times t_0 \quad (8)$$

式(8)中, v 为动触头的平均分闸速度。

1.1.6 弧后初始值模型

电弧电流过零(current zero, CZ)后,电子速度逐渐减小,而离子速度基本保持不变,从而TRV开始时刻(t_0)距电弧电流过零时刻(t_{CZ})存在一时间差 t_{v0} ,见图1,该阶段可定义为弧后电子电流衰减阶段。对10 mm的真空间隙而言, t_{v0} 的典型值为50~100 ns^[16],该阶段中,电流变化率 di/dt 可近似为常数,与电弧

电流过零时刻的 di/dt 相同。由此可得到弧后电流初始值 i_{pa0} 为

$$i_{pa0} = di/dt \Big|_{t=t_{cz}} \times t_{V0D} \quad (9)$$

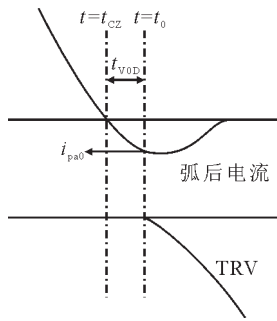


图1 弧后电子电流衰减阶段

Fig. 1 Decaying period of post-arc electronic current

燃弧阶段, 阴极斑点喷射出大量的快速离子, 它们在运动过程中与真空间隙中的慢速中性金属粒子碰撞, 产生电荷交换现象, 形成慢速离子和快速中性金属粒子。间隙中金属蒸气体积分数越大, 电荷交换的比例越大。数学模型构建如下^[17]

$$\eta = 1 - e^{-gap \cdot N_n \cdot \Gamma} \quad (10)$$

$$v_{if} = \eta \cdot v_{thermal} + (1 - \eta) \cdot v_{cathode} \quad (11)$$

$$v_{is} = \eta \cdot v_{thermal} + (1 - \eta) \cdot v_{anode} \quad (12)$$

式(10)–(12)中: η 为电荷交换比例因子; N_n 为中性金属蒸气体积分数; Γ 为电荷交换交叉截面; v_{if} 、 v_{is} 分别为快、慢速离子速度; $v_{thermal}$ 为平均热速度; $v_{cathode}$ 为阴极喷射出的离子速度; v_{anode} 为阳极蒸发出的金属蒸气速度。

在式(6)中, 引入快、慢速离子后可得

$$i_{pa0} = \frac{1}{4} \pi D^2 Ze (N_{if0} \cdot v_{if} + N_{is0} \cdot v_{is}) \quad (13)$$

显然,

$$\frac{N_{if0}}{N_{is0}} = \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (14)$$

联立式(13)、(14), 可得快、慢速离子体积分数初始值 N_{if0} 、 N_{is0} 分别为

$$N_{if0} = \frac{4i_{pa0}}{(v_{is} + \frac{1-\eta}{\eta} v_{if}) Ze \pi D^2} \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \quad (15)$$

$$N_{is0} = \frac{4i_{pa0}}{(v_{is} + \frac{1-\eta}{\eta} v_{if}) Ze \pi D^2} \quad (16)$$

求得 N_{is0} 、 N_{if0} 后, 根据式(5)可对离子体积分数模型进行改进, 即快、慢速离子体积分数 N_{if} 、 N_{is} 分别为

$$N_{if} = N_{if0} \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_f}\right) \left(AMP \frac{l^2}{gap^2} + 1\right) \quad (17)$$

$$N_{is} = N_{is0} \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_s}\right) \left(AMP \frac{l^2}{gap^2} + 1\right) \quad (18)$$

式(17)、(18)中, τ_f 、 τ_s 分别为快、慢速离子体积分数衰减时间常数。

1.1.7 开断能力特征参数模型

文[14]提出了真空间隙弧后鞘层发展阶段的重燃判据: 弧后阴极表面电场强度 E_c 或耗散功率密度 P_d 超过某个临界值。为此, 采用 E_c 、 P_d 来表征真空断路器鞘层发展阶段开断能力, E_c 、 P_d 越大, 开断能力越小。 E_c 、 P_d 的计算公式为^[14]

$$E_c = 2 \sqrt{\frac{Ze(N_{if} + N_{is})}{\epsilon_0} (\sqrt{u_{TRV} U_0 + U_0^2} - U_0)} \quad (19)$$

$$P_d = N_{is} \cdot v_{is} \cdot \left(\frac{M_i v_{is}^2}{2} + Ze u_{TRV}\right) + N_{if} \cdot v_{if} \cdot \left(\frac{M_i v_{if}^2}{2} + Ze u_{TRV}\right) \quad (20)$$

1.2 金属蒸气衰减阶段

当弧后电流消失后, 全部的带电粒子也已经被吸收的情况下, 介质强度恢复的鞘层发展阶段(快速恢复阶段)就结束了; 之后金属蒸气开始起决定性作用, 即进入金属蒸气衰减阶段^[18]。文[18]指出, 到目前为止, 根据 Paschen 曲线(即真空断路器的击穿电压与金属蒸气密度 N_n 和触头开距 gap 的乘积 $N_n \cdot gap$ 呈 U 型曲线^[19])来解释击穿特性是一个合理的近似。在触头材料为 Cu 或 CuCr 时, 文[19–20]给出的 Paschen 曲线最低点对应的 $N_n \cdot gap$ 值略有不同, 分别为 $1.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$ 和 $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$ 。因此, 采用 $N_n \cdot gap$ 来表征真空断路器在金属蒸气衰减阶段的短路电流开断能力, 在 Paschen 曲线的左半支, $N_n \cdot gap$ 越大, 开断能力越小。

金属蒸气密度 N_n 可由式(21)求得^[21]

$$N_n = (S/\beta) \exp(-\beta t') \{1 - \exp(-\beta t_0) + \frac{\beta}{\gamma - \beta} [1 - \exp(-(\gamma - \beta)t)]\} \quad (21)$$

式(22)中

$$S = \begin{cases} 0 & 0 < t < t_1 \\ S_0 & t_1 \leq t < t_2 \\ S_0 \exp[-\gamma(t-t_2)] & t_2 \leq t < \infty \end{cases} \quad (22)$$

$$S_0 = \frac{GI_0}{MV}, v_{thermal} = \left(\frac{8kT}{\pi M}\right)^{1/2}$$

$$\beta = \frac{v_{thermal} \sum_i c_i A_i}{4V} \quad (23)$$

式(21)–(23)中: G 为触头电磨损速率; I_0 为短路开断电流峰值; M 为原子质量; V 为真空间隙体积; k 为波尔兹曼常数; T 为熄弧时电极表面温度; c_i 为电极表面冷凝系数; A_i 为 V 的外包面积; γ 为衰减系数; t_1 为触头分离时刻; t_2 为电弧电流过零时刻; t_0 为 $t_2 - t_1$, 为燃弧时间; $t' = t - t_2$, 为弧后时刻。

2 弧后介质恢复过程的电磁暂态仿真模型

基于第 1 节构建的真空断路器弧后介质强度恢复过程的数学模型,在 PSCAD/EMTDC 中构建了其电磁暂态仿真模型,其结构框图见图 2。

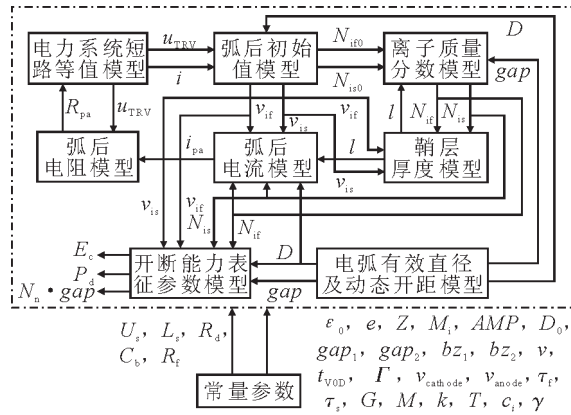


图 2 真空断路器 PSCAD/EMTDC 模型结构框图

Fig. 2 Structure diagram of VCB model in PSCAD/EMTDC

将真空断路器的 PSCAD/EMTDC 模型引入到图 3 所示的电力系统短路等效电路中,可分析不同系统参数下真空断路器的开断能力及其影响因素,如燃弧时间等。图 3 中, U_s 为系统电压(对应于真空断路器额定电压 U_r); L_s 为短路等值电抗(取决于 U_s 和断路器额定短路开断电流 I_r); R_d 、 C_b 为母线并联电阻; R_f 为短路过渡电阻。

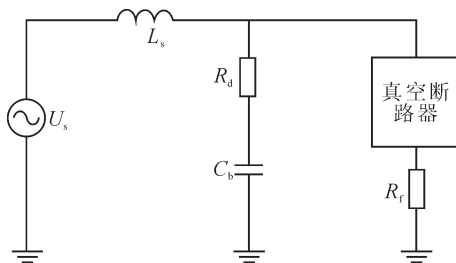


图 3 电力系统短路等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of short circuit in power system

3 最佳燃弧区间的仿真分析

3.1 仿真条件

笔者将针对系统电压 $U_s=10$ kV(对应 $U_r=12$ kV) 和 $U_s=35$ kV(对应 $U_r=40.5$ kV) 2 种情况下真空断路器的最佳燃弧区间进行分析。仿真用真空断路器的电气和机械参数见表 1,其他常量参数见表 2。

表 1 真空断路器的电气和机械参数

Tab. 1 Electrical and mechanical parameters of VCB

U_s/kV	U_r/kV	I_r/kA	gap_1/mm	gap_2/mm	bz_1	bz_2	D_0/mm	$v/(m \cdot s^{-1})$
10	12.0	25	6	10	0.64	0.81	60/75	1.1
35	40.5	20/25	15	25	0.64	0.81	60	2.5

表 2 真空断路器模型中的其他常量参数

Tab. 2 Other constants in the model of VCB

$\epsilon_0/(F \cdot m^{-1})$	e/C	Z	M_i/kg	AMP	t_{VOD}/ns
8.85×10^{-12}	1.062×10^{-19}	1.3~1.5 ^[14]	1.062×10^{-25}	5 ^[14]	100 ^[16]
Γ	$v_{cathode}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{anode}/(m \cdot s^{-1})$	$\tau_r/\mu s$	$\tau_s/\mu s$	$G/(\mu g \cdot C^{-1})$
10^{-18} ^[17]	5 000 ^[17]	800	5 ^[17]	25 ^[17]	120 ^[22]
M/kg	$k/(J \cdot K^{-1})$	T/K	c_i	γ	—
1.062×10^{-25}	1.38×10^{-23}	2 000 ^[18-19]	1 ^[21-22]	2.88×10^4	—

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 10 kV 系统用真空断路器

图 4 所示为 10 kV 系统用真空断路器的开断能力特征参数 E_c 、 P_d 和 $N_n \cdot gap$ 的最大值 E_{cmax} 、 P_{dmax} 和 $N_n \cdot gap_{max}$ 随燃弧时间($t_0=1\sim 9$ ms)的变化关系。

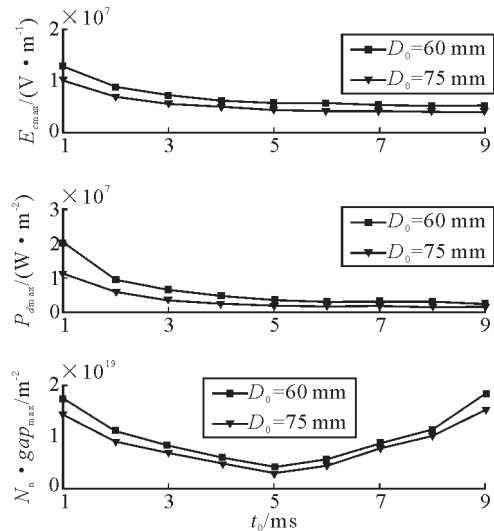


图 4 10 kV 系统用真空断路器的 E_{cmax} 、 P_{dmax} 和 $N_n \cdot gap_{max}$ 随燃弧时间($t_0=1\sim 9$ ms)的变化关系

Fig. 4 E_{cmax} , P_{dmax} and $N_n \cdot gap_{max}$ at different arcing times ($t_0=1\sim 9$ ms) for VCB used in 10 kV power system

由图 4 可以看出,当燃弧时间较短时($t_0 < 5$ ms), E_{cmax} 、 P_{dmax} 随燃弧时间的增加而迅速减小,表明真空断路器在鞘层发展阶段的开断能力迅速增大; $N_n \cdot gap_{max}$ 随燃弧时间的增加也迅速减小,且位于真空断路器 Paschen 曲线左半支急剧变化的部分^[9],表明真空断路器在金属蒸气衰减阶段的开断能力迅速增大。当燃弧时间较长时($t_0 > 5$ ms), E_{cmax} 、 P_{dmax} 随燃弧时间的增加缓慢减小,表明真空断路器在鞘层发展阶段的开断能力缓慢增大;而 $N_n \cdot gap_{max}$ 迅速增大,且仍位于 Paschen 曲线左半支急剧变化的部分,表明真空断路器在金属蒸气衰减阶段的开断能力迅速减小。因此,该 10 kV 系统用真空断路器在 $t_0=5$ ms 左右具有最大的开断能力,即其最佳燃弧区间为 5 ms 左右,平均分闸速度 $v=1.1$ m/s 时,对应的最佳开距区

为 5.5 mm 左右。

图 5 为试验得到的 10 kV 系统用真空断路器的极限开断电流与过零时开距的关系^[5]。

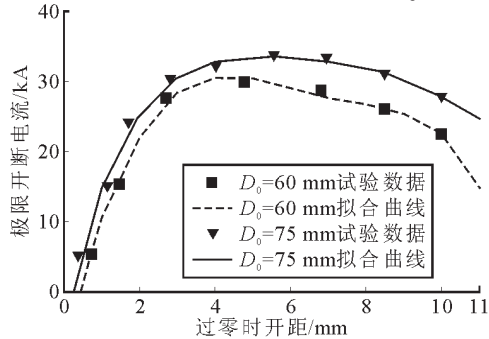


图 5 试验得到的 10 kV 系统用真空断路器的极限开断电流与过零时开距的关系

Fig. 5 Relationship between limit of breaking current and contact gap at current zero of VCB used in 10 kV power system obtained by tests

由图 5 可知,该 10 kV 系统用真空断路器开断 25 kA 短路电流时,其最佳开距区为 3~8 mm,对应的最佳燃弧区间为 2.7~7.3 ms;触头直径为 60 mm 比 75 mm 时的极限开断电流小,验证了仿真分析的有效性。从图 5 还可以看出,触头直径为 60 mm 和 75 mm 时真空断路器极限开断电流的差别在长燃弧时间(过零时大开距)下比短燃弧时间(过零时小开距)下要大,这点无法从仿真分析中得到体现。

3.2.2 35 kV 系统用真空断路器

图 6 为 35 kV 系统用真空断路器的开断能力特征参数 $N_n \cdot gap$ 的最大值 $N_n \cdot gap_{max}$ 随燃弧时间($t_0=1\sim 10$ ms)的变化关系(E_{cmax} 、 P_{dmax} 的变化趋势和 10 kV 情况下类似)。需要注意的是,为方便与试验结果对比,仿真中真空断路器的额定开距设定为 25 mm,平均分闸速度设定为 2.5 m/s,这和目前 35 kV 系统用真空断路器的参数有所不同。

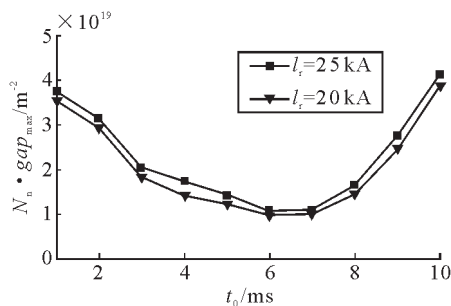


图 6 35 kV 系统用真空断路器的 $N_n \cdot gap_{max}$ 随燃弧时间($t_0=1\sim 10$ ms)的变化关系

Fig. 6 $N_n \cdot gap_{max}$ at different arcing times ($t_0=1\sim 10$ ms) for VCB used in 35 kV power system

从图 6 可以看出,该 35 kV 系统用真空断路器

的最佳燃弧区间为 6~7 ms,对应的最佳开距区为 15~17.5 mm。

图 7 所示为试验得到的 35 kV 系统用真空断路器的弧后重燃率与开距的关系^[12]。

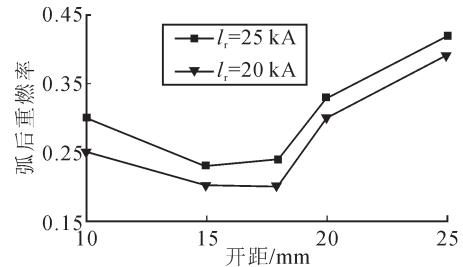


图 7 试验得到的 35 kV 系统用真空断路器的弧后重燃率与开距的关系

Fig. 7 Relationship between post-arc reignition rate and contact gap of VCB used in 35 kV power system obtained by tests

由图 7 可知,该 35 kV 系统用真空断路器在开距为 15~18 mm 时弧后重燃率最低,可认为开断性能最好,这与仿真结果基本一致。

3.3 机理分析

真空断路器的开断性能与间隙的介质恢复强度和电弧形态综合效应有关^[5]。过短的燃弧时间下,电弧电流过零时的触头开距过小,真空电弧处于粒子高密度和频繁碰撞状态,此时电极受粒子冲击次数明显增多,电弧电压并不高,电极熔化现象严重,真空间隙的介质恢复强度相对较低,在系统暂态恢复电压作用下,真空断路器可能发生重燃。过长的燃弧时间下应从电弧形态角度进行分析,燃弧时间越长,电弧电流过零时开距越大,电弧在阳极上的收缩越严重,电弧的严重收缩将导致阳极熔化,形成阳极斑点。阳极斑点的出现使阳极表面变得十分活跃,向真空间隙喷射大量金属蒸气,导致电弧在电流过零点不能熄弧。因此,真空断路器存在 1 个最佳燃弧区间,对应 1 个最佳过零开距区,在该区间内开断是最有利的。

4 结语

为得到相控真空断路器的最佳燃弧区间,针对其介质强度恢复过程的 2 个主要阶段分别建立了数学模型,提出采用特征参数来表征其开断能力,并在 PSCAD/EMTDC 中构建了其电磁暂态模型。仿真得到了 10 kV 和 35 kV 系统用真空断路器的最佳燃弧区间和对应的最佳开距,并采用相关的试验结果验证了仿真分析的有效性。为高压大电流真空断路器实现选相开断提供了一种仿真手段。需要指

出的是,文中引用对比的均为20世纪90年代产品的试验结果,现今真空断路器的开断能力已有显著提高,因此,文中仿真分析的有效性还需要最新真空断路器产品的试验结果来进一步验证。

参考文献:

- [1] 方春恩,段雄英,邹积岩.基于自适应神经元的短路电流参数提取[J].中国电机工程学报,2003,23(8):115-118.
FANG Chun-en,DUAN Xiong-ying,ZOU Ji-yan. Detection parameters of short-circuit currents based on adaptive neurons[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(8):115-118.
- [2] 刘志远,程少勇,王季梅,等.杯状纵磁真空灭弧室开断能力与触头直径和触头开距关系的试验对比[J].高压电器,2006,42(4):250-252.
LIU Zhi-yuan,CHENG Shao-yong,WANG Ji-mei,et al. Experimental validation of relationship between interrupting capacity of axial magnetic field vacuum interrupters with cup type contacts and their contact diameters and contact gaps[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(4):250-252.
- [3] 许沛丰,高军委,张予洛,等.对断路器电容器电容及介损测量预试方法的探讨[J].电力电容器,2007,28(4):53-56.
XU Pei-feng,GAO Jun-wei,ZHANG Yu-luo,et al. Discussion about the way to measure capacitance and dielectric loss of circuit breaker[J]. Power Capacitor,2007,28(4):53-56.
- [4] 李志兵,许沛丰,刘华伟,等.断路器电容器介损随电压变化关系研究[J].电力电容器,2007,28(6):26-30.
LI Zhi-bing,XU Pei-feng,LIU Hua-wei,et al. Research on dielectric loss variation of circuit-breaker capacitors with voltage[J]. Power Capacitor,2007,28(6):26-30.
- [5] 苑舜,王毅,王季梅.真空断路器触头分离时刻对开断性能影响的试验研究[J].中国电机工程学报,1993,13(5):10-13.
YUAN Shun,WANG Yi,WANG Ji-mei. Effects of separating moment of electrodes on interruption ability in vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,1993,13(5):10-13.
- [6] 钱家骊.相位控制高压断路器的动向[J].高压电器,2001,37(1):38-40.
QIAN Jia-li. Tendency on phase-controlled HV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2001,37(1):38-40.
- [7] 段雄英,黄智慧,李蕊,等.两种故障电流相控开断电流零点预测算法对比[J].高压电器,2011,47(1):5-9.
DUAN Xiong-ying,HUANG Zhi-hui,LI Rui,et al. Comparison between two methods of zero-cross point prediction for controlled fault current interruption[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):5-9.
- [8] 段雄英,廖敏夫,丁富华,等.相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J].高压电器,2007,43(2):113-117.
DUAN Xiong-ying,LIAO Min-fu,DING Fu-hua,et al. Application and key technology analysis of controlled switching[J]. High Voltage Apparatus,2007,43(2):113-117.
- [9] 方春恩,邹积岩,丁富华,等.相控真空开关中短间隙电弧介质恢复研究[J].大连理工大学学报,2003,43(5):619-622.
FANG Chun-en,ZOU Ji-yan,DING Fu-hua,et al. Research on dielectric recovery of short gap arc in phasing vacuum switches[J]. Journal of Dalian University of Technology,2003,43(5):619-622.
- [10] 王立军,王流火,贾申利,等.电极间距对真空电弧电压及阳极熔池旋转速度影响的实验研究[J].中国电机工程学报,2010,30(25):135-140.
WANG Li-jun,WANG Liu-huo,JIA Shen-li,et al. Experimental study on effects of electrode gaps on the high-current vacuum arc voltage and the rotation speed of anode melting pool[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):135-140.
- [11] 刘志远,王仲奕,张炫,等.杯状纵磁真空灭弧室开断能力与触头直径和触头开距的关系[J].高压电器,2006,42(3):169-171.
LIU Zhi-yuan,WANG Zhong-yi,ZHANG Xuan,et al. Relationship between interrupting capacity of axial magnetic field vacuum interrupters with cup type contacts and contact diameters and contact gaps[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(3):169-171.
- [12] 金黎,周锋,闫静,等.35 kV真空灭弧室最佳开距的研究[J].高压电器,1999,35(3):18-21.
JIN Li,ZHOU Feng,YAN Jing,et al. Research on the most efficient separation for 35 kV vacuum interrupters[J]. High Voltage Apparatus,1999,35(3):18-21.
- [13] ANDREWS J G,VAREY R H. Sheath growth in a low pressure plasma[J]. Physics of Fluids,1971,14(2):339-343.
- [14] MIETEK T G,PAUL S. Numerical modeling of vacuum arc interruption based on the simplified plasma equations[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1995,31(3):1924-1927.
- [15] 武建文,王毅,王季梅.不同触头开距下真空电弧现象的研究[J].高压电器,1997,33(4):22-25.
WU Jian-wen,WANG Yi,WANG Ji-mei. Research on vacuum arc phenomenon under different contact gaps[J]. High Voltage Apparatus,1997,33(4):22-25.
- [16] KAUMANN J. Measurements and modeling in the current zero region of vacuum circuit breakers for high current interruption[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1997,25(4):632-636.
- [17] GILLS R,SCHADE E,CLAESSENS M. Numerical simulation of residual charge of vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2001,29(5):754-758.

(下转第12页)

- CHENG Yin-hui, ZHOU Hui, LI Bao-zhong, et al. Different EMP coupling to the thin wire structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(1):91-94.
- [9] 马良, 吴伟, 周辉, 等. 电磁脉冲对细线耦合的时域多分辨率分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8):1387-1390. MA Liang, WU Wei, ZHOU Hui, et al. Multiresolution time domain analysis of electromagnetic pulse coupling to thin wires[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8):1387-1390.
- [10] 刘顺坤, 聂鑫, 陈向跃. 电磁脉冲对电缆耦合问题的理论研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(2):348-352. LIU Shun-kun, NIE Xin, CHEN Xiang-yue. Numerical study on cable coupling effects excited by electromagnetic pulse[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2):348-352.
- [11] 倪谷炎, 罗建书, 袁乃昌. 平面电磁波对双导线传输线终端瞬态响应的求解[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007(6):568-571. NI Gu-yan, LUO Jian-shu, YUAN Nai-chang. Transient response of two-wire transmission lines excited by a plane electromagnetic field[J]. Journal of CAEIT, 2007(6):568-571.
- [12] 刘胜, 葛亚明, 李军. 平面波对传输线耦合效应的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6):1619-1622. LIU Sheng, GE Ya-ming, LI Jun. Coupling response simulation of transmission lines excited by plane wave[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6):1619-1622.
- [13] 安霆, 刘尚合, 孙国至, 等. 某型长线控制装备的强电磁脉冲实验与机理分析[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(2):263-266. AN Ting, LIU Shang-he, SUN Guo-zhi, et al. The test and mechanism analysis for the electromagnetic pulse effects of a kind of long transmission-line controlling equipment[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2009, 29(2):263-266.
- [14] 周星, 王书平, 魏光辉. 电磁脉冲对数字电路的辐照效应研究[J]. 高压电学, 2006, 32(10):46-49. ZHOU Xing, WANG Shu-ping, WEI Guang-hui. Study on radiation effects of EMP on digital circuits[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10):46-49.
- [15] 周星, 张成怀, 魏光辉. 电磁脉冲与连续波对数字电路的辐照效应比较[J]. 高压电学, 2010, 36(7):1761-1766. ZHOU Xing, ZHANG Cheng-huai, WEI Guang-hui. Comparison of radiation effects of CW and EMP on digital circuit[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7):1761-1766.
- [16] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲, 等. 超宽谱对无线电引信的作用效应实验研究[J]. 高压电学, 2006, 32(11):78-80. WANG Shao-guang, WEI Guang-hui, CHEN Ya-zhou, et al. Experiment research on the radiation effect of the UWS-HPM to radio fuze[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11):78-80.
- [17] 耿利飞, 魏光辉, 费支强, 等. 幅分米波对无线电引信的辐照效应研究[J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(6):29-32. GENG Li-fei, WEI Guang-hui, FEI Zhi-qiang, et al. Radiation effect of decimetric wave on radio fuze[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2008, 20(6):29-32.
- [18] ARMENTA R B. Terminal response of a twisted-wire pair excited by a plane-wave electromagnetic field: the role of twist period non-uniformities [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2007:801-804.
- [19] ARMENTA R B, SARRIS C D. Modeling the terminal response of a bundle of twisted-wire pairs excited by a plane-wave[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(4):901-913.
- [20] AGUETM, IANOVICIM, LINCC. Transient electromagnetic field coupling to long shield cables[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980, 22(4):276-282.
- 李新峰(1987—), 男, 博士生, 现从事电磁防护理论与技术研究。

(上接第6页)

- [18] SCHADE E. Physics of high-current interruption of vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5):1564-1575.
- [19] SLADE P G. The vacuum interrupter theory, design and application[M]. New York: CRC Press, 2008.
- [20] DULLNI E, SCHADE E. Investigations of high-current interruption of vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(8):607-620.
- [21] RICH J A, FARRALL G A. Vacuum arc recovery phenomena[J]. Proceedings of the IEEE, 1964, 52(11):1293-1301.
- [22] 王季梅. 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. WANG Ji-mei. High capacity vacuum switch and product development[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- 舒胜文(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为高压电器、电力系统内过电压及抑制技术。
- 阮江军(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场数值计算及其工程应用、高压电器、电磁兼容。
- 黄道春(1976—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为输变电设备外绝缘、高压电器、电磁场数值计算及其工程应用。