

真空断路器动热稳定试验分析及电动斥力仿真计算

杨 光

(ABB (中国) 有限公司, 北京 100015)

摘要: 基于真空断路器在做动热稳定试验时触头经常出现熔焊的情况, 分析了动稳定和热稳定对动热稳定试验的影响。根据动热稳定试验的实际情况, 结合电接触理论计算了热稳定时的触头温度和动稳定时触头间的电动斥力, 给出了不同耐受电流情况下所需要的触头压力值。并用有限元法对电动斥力进行了仿真分析, 从而验证了用经验公式计算触头所需压力的正确性。

关键词: 真空断路器; 动热稳定试验; 电动斥力; 触头压力

Short-time withstand current and peak withstand current tests analysis and the electro-dynamic repulsion force simulation calculation of vacuum circuit breakers

YANG Guang

(ABB (China) Limited EPDS, Beijing 100015, China)

Abstract: The contacts of vacuum circuit breaker often appear fusion in the short-time withstand current and peak withstand current test. The influence of short-time withstand current and peak withstand current on the test is analyzed. According to the actual situation of the test and the electric contact theory, the contacts temperature under the short-time withstand current and the electric repulsion force between the contacts under the peak withstand current are calculated. The contact force values under different withstand current are given. The electric repulsion force is simulated by the finite element method, which verifies the correctness of using the empirical formula to calculate the contact force.

Key words: vacuum circuit breaker; short-time withstand current and peak withstand current; electric repulsion force; contact force

0 引言

现代工业的迅速发展, 使得供电网络的容量日益增大, 发生短路的电流可能达到几十千安甚至更大。过大的短路电流已严重危害到线路及电气设备的安全, 所以需要断路器能承受

更大的短路电流值^[1]。因此, 电动斥力的计算成为断路器设计中的一个重要部分, 电动斥力的大小关系到断路器触头压力和超程的设计。本文对于断路器在做动热稳定时所产生的触头间的电动斥力进行了理论分析, 并考虑了断路

器触头间的熔焊情况,从而给出不同短路电流等级下所需的触头压力值。并利用有限元法对断路器导电部分的电流密度和磁场进行仿真,计算了电动斥力的大小。

1 动热稳定试验分析及触头压力的确定

中压断路器在做动热稳定试验时,其峰值电流很高,例如50 kA的动热稳定试验其峰值电流会达到150 kA,其触头间的电动斥力非常大。中压断路器在做动热稳定试验时,主要分为两个阶段:首先断路器要承受0.3 s的峰值耐受电流;然后是3 s的耐受电流。这就要求动静触头在开始的0.3 s要有足够大的触头压力来克服电动斥力,而不会使动触头在电动斥力的作用下弹开;在后3 s要有足够小的接触电阻来确保动静触头不会过热而熔焊^[2]。因此,要求断路器要有一个足够大的触头压力,所以计算出触头间的电动斥力和接触电阻值,并以此为依据设计出断路器的触头压力是十分重要的。

1.1 动热稳定中的动稳定分析

在做动热稳定试验时,首先施加的是0.3 s的峰值耐受电流。尽管断路器动静触头的接触面看起来很平坦光滑,但实际上它们仅在一些接触斑点上相互接触。当电流通过触头时,由于电流线在接触面附近发生收缩,因而在触头间会出现很大的电动斥力。这是一种电流自身磁场作用下的电动力,与电流的二次方成正比,与触头回路结构以及触头材料有关。

触头间的电动斥力计算公式为

$$F_d = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{D}{2\alpha} \quad (1)$$

式中, F_d 为触头间的电动斥力; μ_0 为真空磁导率; I 为流过触头的峰值电流; D 为触头接触面的直径; α 为触头接触斑点的半径。

从式(1)可以看出,只要触头接触斑点的半径已知,就可以计算出触头间的电动斥力。根据电接触理论,当断路器的动静触头在

外力 F 的作用下相互接触时,其接触形式如图1所示。在外力 F 的作用下,两触头的实际接触面将会发生变形,当实际接触面产生的变形力与外力达到平衡时,这时实际接触面将不再扩大,而实际接触面的面积计算公式为^[3]

$$A = \pi \alpha^2 = \frac{F}{H} \quad (2)$$

式中, A 为触头的实际接触面积; α 为触头接触斑点的半径; F 为触头压力; H 为触头的布氏硬度。

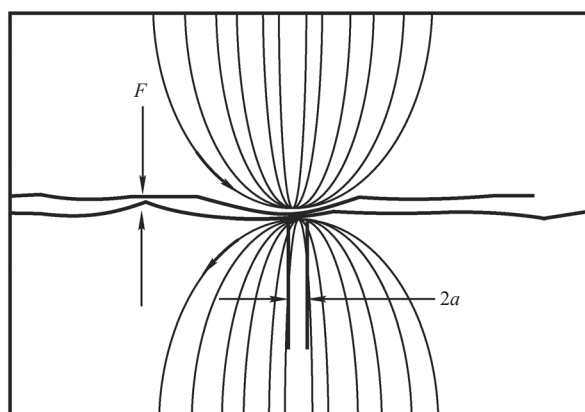


图1 动静触头在外力 F 下的接触

Fig. 1 Contact of dynamic and static contact under external force F

在设计断路器的触头压力时,一定要大于动稳定时的电动斥力并留有一定的裕度。

1.2 动热稳定中的热稳定分析

在做动热稳定试验时,动静触头要承受3 s的耐受电流,如果触头间的接触电阻过大,则动静触头会产生熔焊从而导致试验失败。接触电阻可看成由三部分组成,即两接触元件的收缩电阻和接触面间的膜电阻。计算公式为

$$R_j = R_{s1} + R_b + R_{s2} \quad (3)$$

式中, R_j 为触头间的接触电阻; R_{s1} 、 R_{s2} 为两接触元件的收缩电阻; R_b 为接触面间的膜电阻。

由于动静触头的工作环境为真空,所以膜电阻可以忽略不计。而接触电阻 R_s 可由下式确定^[4]

$$R_{s1} = \frac{\rho}{4\alpha} \quad (4)$$

式中, ρ 为接触材料的电阻率。

触头间熔焊是指由接触电阻的发热使导电斑点及其附近的金属熔化而焊接。由于两触头的工作环境为真空，而热稳定的时间很短只有3 s，所以触头在热稳定时对外热辐射可以忽略。触头在热稳定时温度的计算公式为

$$T = \frac{1}{\sqrt{\pi \lambda \rho C}} \times \frac{P_{el}}{\pi \alpha^2} \sqrt{t} \quad (5)$$

式中， λ 为触头材料的导热系数； ρ 为触头材料的密度； C 为触头材料的比热容； P_{el} 为接触电阻的损耗； t 为施加电流的时间。

为了使断路器能通过动热稳定试验，需确保在热稳定的时间内温度不超过其熔点的值。

1.3 触头压力和触头斥力的计算

真空灭弧室中两触头的实际接触为面接触，虽然用肉眼看起来两接触面很平坦光滑，但实际上接触面的表面是凹凸不平的。当两个凹凸不平的表面相互接触时，根据几何学上三点构成一个平面的原理，两表面开始接触时有三个起始实际接触点。随着触头压力的不断增大，起始接触点受压变形，使三个接触点变成三个接触面。假设这三个接触面为大小相等的圆面，则实际的接触电阻为这三个接触电阻的并联。

考虑到触头材料的主要成分为铜，所以在做热稳定试验时，其触头的温升不应超过铜的熔点1 083 ℃。根据式(2)、式(3)和式(5)，可计算出不同电流等级的断路器在做热稳定时所需要的临界触头压力值，即触头温升刚好为铜的熔点时的触头压力值。表1为热稳定的时间为3 s时，不同电流等级的触头压力临界值。

表1 触头压力临界值

Tab. 1 Contact pressure threshold

耐受电流/kA	触头温升/℃	触头压力/N
25	1 083	2 279
31.5	1 083	3 100
40	1 083	4 263
50	1 083	5 741

为了确保试验可以可靠地通过，在实际

生产中触头压力值可以留有300~400 N的裕度。然而在做动热稳定试验时，只保证触头不熔焊是不够的，还要确保在峰值电流时，触头压力要大于触头间的电动斥力。根据式(1)可以计算出不同电流等级下的电动斥力值。由于接触点所在的位置对电动斥力有一定的影响，假设接触点都集中在触头的中间，这样两触头间的电动斥力最大。表2列出了不同电流等级的触头斥力值。从表2中可以看出其触头间的电动斥力值要远小于表1中的触头压力值。

表2 触头间的电动斥力

Tab. 2 Electric repulsion force between contacts

耐受电流/kA	峰值电流/kA	电动斥力/N
25	62.5	719
31.5	80	1 075
40	100	1 520
50	150	3 105

2 电动斥力仿真计算

在上一节中给出了计算电动斥力的经验公式，为了能准确地计算出电动斥力的大小，可以用有限元法计算。设导体中传导电流密度为 J ，磁感应强度矢量为 B ，载流导体的体积为 V ，作用在导体上的总的力为

$$F_L = V \int_V B dV \quad (6)$$

而电流密度满足拉普拉斯方程^[5]

$$\begin{aligned} I &= J \int B dS \\ \operatorname{div} J &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

建立断路器在做动热稳定试验时的简化3D模型，如图2所示。

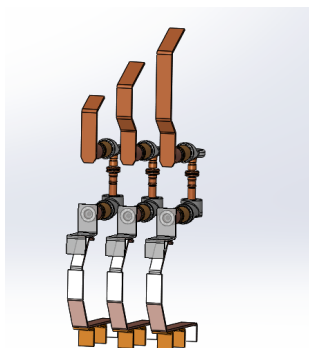


图2 动热稳定试验简化3D模型

Fig. 2 Simplified 3D model of dynamic thermal stability test

在做动热稳定试验时,线路电流的加载如图3所示。当A相的电流达到峰值时,B、C两相为峰值电流的一半,而方向与A相相反。当某一相的电流达到峰值时,该相触头间的电动斥力最大。以50 kA的动热稳定试验为例,其最大的峰值电流为150 kA,所以在仿真计算时A相加载峰值电流为150 kA,B、C两相加载峰值电流的一半,即为75 kA,电流的方向要与A相的相反。

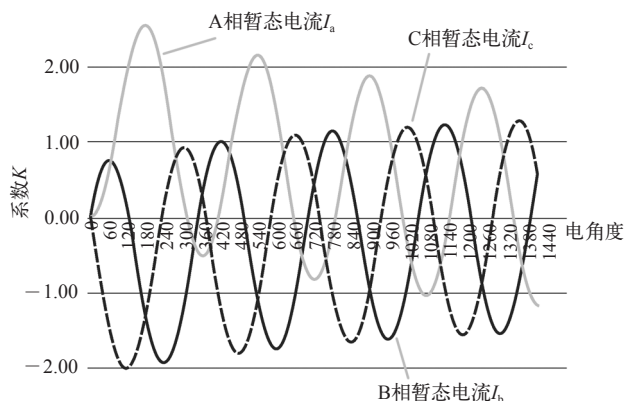


图3 动热稳定试验线路电流

Fig. 3 Dynamic thermal stability test line current

在计算电动斥力之前,首先要计算流经导体的电流密度。图4为A相流经动静触头电流密度的截面分布图。从图4中可以看出,在触头的中心点电流非常集中,发生电流收缩,其电流密度值最大。图5为计算出的动触头所受电动力的值为2 780 N,和经验公式计算出的差别不大。

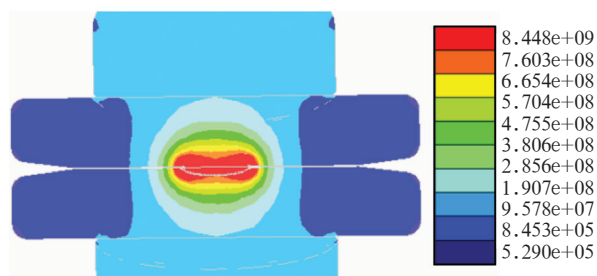


图4 流经触头的电流密度分布

Fig. 4 Current density distribution through contacts

3 结束语

本文分析了中压断路器在做动热稳定试验时触头熔焊的实际情况,并给出了计算电动斥

Material DOWNCONTACTERA in Domain 21			
	x	y	z
Center of gravity := G	4.166898E-01	4.008894E-01	2.209292E+00
Total force := F	-3.175553E+03	-2.780713E+03	-1.279598E+03
Moment around G := M_G	1.113761E+01	-4.244505E-01	-4.994538E+01
New point := R			
Moment around R := M_R			
Calculate			
LOSSES 7.441056E+04			

图5 动触头所受电动力的值

Fig. 5 Value of electric repulsion force received by moving contact

力和触头温度的经验公式。通过计算给出了不同耐受电流情况下所需要的触头压力值。根据本文推荐的触头压力值,考虑到触头压力对其他型式试验(如机械寿命)的影响,将断路器的触头压力设定在5 500 N,成功地通过了耐受电流50 kA、峰值电流150 kA的动热稳定试验,从而验证了经验公式的正确性。

参考文献

- [1] 张节容,钱家骊,王伯翰,等. 高压电器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,1989.
- [2] 林莘,闫鸿魁,张浩. 基于户外柱上真空断路器的电动力分析[J]. 华通技术,2006(4): 11-15.
- [3] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [4] 孟庆龙,颜威利. 电器数值分析[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [5] 李兴文,陈德贵,刘洪武,等. 触头间电动斥力的三维有限元分析[J]. 高压电器,2004,40(1): 53-55.

作者简介



杨 光

杨光(1983-),男,工程师,主要研究方向为中压断路器的设计及仿真分析。

(收稿日期:2019-12-23)EA