

文章编号:1001-1609(2003)01-0008-04

研究与分析

中压开关柜中内部电弧故障的计算方法和防护措施

蔡彬, 陈德桂

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

THE CALCULATION AND PROTECTION MEASURES OF INTERNAL ARCING FAULTS IN MV METAL-CLAD SWITCHGEAR

CAI Bin, CHEN De-gui

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要:采用合适的计算方法模拟开关柜内部电弧故障,不仅可以缩短新品开发周期,而且可大大节省费用,同时可为开发耐内部电弧故障的成套设备提供科学依据,以便采取相应措施,确保操作人员、配电设备,甚至配电房的安全。笔者简单叙述了内部电弧故障的基本物理现象,讨论了几种数学计算模型,并提出了一些防护内部电弧故障的措施。

关键词:计算方法; 内部电弧故障; 防护措施

中图分类号: TM591

文献标识码: A

Abstract: To simulate the internal arcing faults in metal-clad switchgear based on appropriate calculation method can not only shorten the development period of new products, but also save the cost dramatically. In addition, some measures can be checked to ensure the safety of personnel, equipment and distribution room. This paper describes briefly the physical phenomenon of internal arcing fault, and discusses some mathematic models for calculation. Finally, some protection measures against the internal arcing faults are proposed.

Key words: calculation method; internal arcing fault; protection measure

1 引言

近年来,随着我国经济的发展和社会的进步,人们对开关设备的安全性越来越重视,要求也越来越高,尤其是国家重点工程,如三峡电站等,率先对开关柜内部电弧故障提出要求。配电设备开关柜中内部电弧故障问题已日益得到重视。

内部电弧故障时间短,但能量大,破坏力极强。为了操作人员和设备的安全,必须确保内部电弧只能从压力释放通道泄放,必须确保柜门、封板不得飞出,确保不能影响其它功能隔室,更不能影响邻柜。

下面以中压开关柜为例,简要叙述内部电弧故障产生的机理,建立数学模型,分析几种典型的计算方法,找出防止内部电弧故障产生的措施、排除故障的方法,从而达到优化开关柜设计的目的。

2 基本物理现象

在金属封闭壳体中一旦发生内部电弧故障,则电弧能量将会转移给其周围的气体,导致壳体中的压力上升。如压力过高,压力释放装置打开可避免壳体的破坏。灼热气体通过压力释放口进入配电室,从而也会使室内压力上升,墙壁受到应力。

内部电弧故障产生的影响和破坏程度与壳体大小、电弧电压(电弧长度)、电弧持续时间以及短路电流大小有关。一般来说,开关柜中内部电弧故障经历压缩、膨胀、发射和热效应4个阶段^[1]。

在封闭小室的能量平衡中,大电弧电流及其周围之间有几种不同的能量转移。电弧功率 P_a 的一部分导致弧根加热、弧根材料的熔化和蒸发,一部分作为电弧的辐射功率散至外界,另一部分使气体加热,导致压力上升,另外尚需考虑蒸发的弧根材料和周围气体的化学反应产生的功率。

3 计算方法

3.1 标准计算法

标准计算法的基础是能量守恒定律和理想气体状态方程,且假设使压力上升的那部分电弧能量是均匀的,气体作一元等熵流动,并假定封闭小室内的气体为理想气体,其摩尔数不变,物理性质(如比热 c_v, c_p)不变,体积不变。功率 P_a 迅速加热整个气体。通过壳体的气流、压力波、冲击波以及热导皆忽略不计。

收稿日期:2002-09-01; 修回日期:2002-11-24

设在时间 dt 内,电弧提供的导致气体压力上升的那部分能量为 dQ ,气体通过释放口消耗的能量为 dE 。根据能量方程有:

$$dQ - dE = d(m \cdot c_v \cdot T)$$

由气体状态方程 $pV = mRT$,求导得:

$$V \cdot dp + p \cdot dV = m \cdot R \cdot dT + R \cdot T \cdot dm$$

(1) 在压力释放装置打开前,没有能量损失,

$dE=0, dm=0$,则有:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{R}{c_v} \cdot \frac{k_p \cdot P_{e1}}{V} \\ \frac{dT}{dt} = \frac{k_p \cdot P_{e1}}{m \cdot c_v} \end{cases}$$

式中: R 为气体常数, V 为小室的体积, m 为小室内的气体质量; k_p 为 P_{e1} 导致压力上升的系数,或称能量转换系数。可用4阶龙格-库塔数值方法进行计算。

(2) 压力释放装置打开后,必须考虑压力释放口的气体流动。气体交换的模型是:一维理想绝热气流通过喉部截面为 S 的喷管,且假设流体通过出口截面的速度是均匀的。在时间 dt 内转移的气体质量 dm 为:

$$dm = \alpha \cdot S \cdot \rho_n \cdot v_n \cdot dt$$

根据等熵和绝热气流的能量方程和等熵绝热过程关系,得:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{k_p \cdot R \cdot P_{e1}}{c_v \cdot V} - \frac{\alpha \cdot S \cdot k \cdot p \cdot \sqrt{RT}}{V} \cdot \Psi \\ \frac{dT}{dt} = \frac{k_p \cdot R \cdot T \cdot P_{e1}}{c_v \cdot p \cdot V} - \frac{\alpha \cdot S \cdot (k+1) \cdot T \cdot \sqrt{RT}}{V} \cdot \Psi \\ \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{\frac{12 \cdot \alpha \cdot (1 - \cos\varphi) \cdot (p - p_c)}{m_r}} \end{cases}$$

其中:

$$\Psi = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_n}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_n}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

式中: α 为气流摩擦和收缩系数, S 为出气口有效面积, p_n, ρ_n, v_n 分别为气流通过压力释放口时的压力、密度、速度, k 为气体绝热指数, p 为小室内气体压力, p_c 为压力释放板打开时的临界压强, m_r 为释放板的质量, φ 为释放板打开的角度。

以下讨论公式中几个参数的确定方法。

p_n :当喷管内气流速度达到音速时,质量流量最大。在收缩管内,只有在最小面积处才有可能使气流速度达到音速,即临界状态,因此,当出口处流速达到音速时,通过喷管的质量流量将达到最大值,此时出口截面的压力为:

$$p_n = p \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = p^*$$

称 p^* 为临界压力。令:

$$\left(\frac{p}{p^*}\right)_{crit} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{1-k}}$$

气体流出释放口期间,气体压力的变化取决于隔室内、外的压力比。设压力释放口外面的气压为 p_c (称为背压),则有:

$$\frac{p}{p_c} \leq \left(\frac{p}{p^*}\right)_{crit} \Rightarrow p_n = p_c$$

$$\frac{p}{p_c} > \left(\frac{p}{p^*}\right)_{crit} \Rightarrow p_n > p_c \Rightarrow p_n = p^*$$

上式说明, p_n 有两种取值:如果比值 p/p_c 小于或等于临界压力比,则释放口气体将膨胀,直至压力与背压 p_c 同,此时可取 $p_n = p_c$ 。如 p/p_c 比值大,气体压力不可能降到 p_c ,只能降至 p^* ,此时 p_n 取值为 p^* 。在该模型中,背压 p_c 等于标准大气压 p_0 ,取 1.013×10^5 Pa。

α :与气流的摩擦和收缩有关^[2]。由于气流的收缩,高速气流的 α 比低速气流的小。由于空气绝缘的气流速度高,所以对空气绝缘, α 设为 0.8;而对于 SF_6 ,其流出速度低的多,其 α 设为 1。

S :出气口有效面积。流体通过出口截面的速度是均匀的这一假设仅适用于圆形截面上的紊流^[3]。对于高、宽比低的矩形截面导管(即 $a/b < 8$),可用 Massey 给出的“等效水力直径”概念来计算有效出口面积。对于高为 a ,宽为 b 的矩形截面,有效面积为^[4]:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{a \cdot b}{a+b}\right)^2 \cdot (1 - \cos\varphi)$$

3.2 新标准计算法

在小隔室内,故障电弧加热气体,其温度将达到气体的离解温度。这时,在标准方法中使用的简单的理想气体定理和理想气体内能方程就不再适用,因而必须修改气体模型。考虑到气体离解和电离,引入影响气体混合物性质的温度和压力。在压力释放口打开之前的 dp 应作如下修改:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R}{c_v(p, T) + T \frac{\partial c_v}{\partial T}} \cdot \frac{k_p \cdot P_{e1}}{V}$$

新标准计算法适用于与标准计算法相同的情况。然而,由于使用了更复杂的气体模型,虽然计算时间略长些,但其计算结果更可靠。

3.3 CFD 计算法

CFD 计算法基于基本的流体动力学守恒定理,即连续性方程、运动方程(动量方程)、能量守恒方程和气体状态方程。

为了数字处理,将整个研究区域离散化,按几何结构划分为许多带有有限体元(微元体)的网格。守恒变量 ϕ (ϕ 表示质量 m ,动量 p ,焓 h) 的微分方程可写成如下一般形式^[5,6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla(\rho v\phi) = \nabla(\Gamma_{\phi}\nabla\phi) + S_{\phi}$$

上式又称为非稳态的对流-扩散方程。式中： ρ 为气体密度， ϕ 为守恒变量， v 为气体速度， Γ_{ϕ} 为相应于 ϕ 的扩散系数， S_{ϕ} 为相应于 ϕ 的源项。

由于是一般形式，对它们可以用相同的数值算法。考虑到基本方程是非线性的，所以用迭代法来解。

此外，还应考虑到灼热气体流过固体表面而得以冷却时，对流换热的能量^[7]：

$$Q = Ah\Delta t = Ah(T_f - T_s)$$

式中： A 为气流通过的气体冷却装置的表面积， h 是对流换热系数，单位是 $W/(m^2 \cdot K)$ ，与气流速度、密度、 λ 、 c_p 等，以及换热表面的形状、大小、布置有关， T_s 为固体温度， T_f 为气体温度。

CFD 算法考虑了气流、热传导、对流和压力波以及气体混合物、分解和离子化过程。它没有忽略和简化假设，也没有尺寸的限制。CFD 计算可依靠商业流场计算软件，但由于要综合电弧的数学模型，因而还需要在商品软件上进行二次开发。

用该方法，可以给出三维问题的模型，而解法可任意，且能得出最精确的压力上升的计算结果，但需要很长的计算时间。

4 计算举例

文[6]做了1个单相电弧故障试验，通过比较测量值和计算值来验证新标准算法，见图1。电弧故障电流为4.5 kA/0.1 s，采用空气绝缘。在两个相距10 cm的垂直铜电极之间引弧。

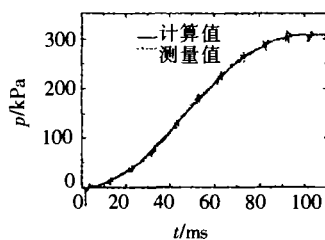


图1 计算值和测量值的比较(新标准算法)

为了验证 CFD 算法，文[5]还做了1个三相电弧故障试验，图2为计算值和测量值的比较结果。电弧在对称的铜电极之间引燃，故障电流10 kA/0.1 s，空气绝缘。由于尺寸相对较小，用标准算法也能得到较好的计算结果。

5 防护措施

内部电弧故障发生的原因有：①外部影响，如设备工作时，有动物、工具、有机物残渣等外物进入；②

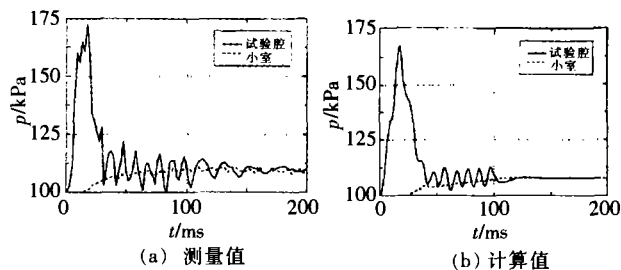


图2 计算值和测量值的比较(CFD 算法)

材料或机械缺陷，如母线系统的绝缘因老化受到破坏；③误操作；④未进行有效维护；⑤小的接地故障未及时解决而恶化等等。因此，在设计和操作过程中，应采取如下措施，避免内部电弧故障的发生，或降低其危害程度。

5.1 电气设计

因为故障电弧的能量大小由电流及其持续时间决定，所以用下列一些电气方法可以降低故障的损坏程度。

(1)阻抗接地系统(对相与地故障有效)：单相接地电弧故障往往会演变成两相，进而变成三相短路电弧故障，阻抗接地系统可减少单相接地电弧故障发生率。

(2)快速差分继电保护和分断：降低电弧故障释放能量的最有效方法之一是缩短电弧燃烧时间。采用快速差分继电器和新型断路器，总分断时间约70~100 ms。

(3)接地故障电流的检测和分断。

(4)绝缘系统完好：中压开关柜采用绝缘母线可降低电弧故障的发生率。因为如果电弧故障发生，绝缘完好的母线可阻止故障演变为三相电弧故障。

(5)光、声、压力检测：光、声、压力以及伴之而来的电流迅速上升，都是开关柜发生内部电弧故障的信号。其中一些现象可以观察到，且可在故障发生后几ms内检测到。

(6)使用快速短接开关：电弧故障发生后，快速短接开关迅速合闸，将电弧故障转化成三相短路电流，使上游开关分闸，达到迅速熄弧的目的。

(7)使用限流熔断器或分断器：降低电弧能量。

(8)局部放电监视：开关设备运行时，通过在线监测技术来检测开关柜绝缘系统的局放，从而确定是否有潜在问题。通过分析局放随时间的变化趋势，可预测故障是否会发生，以便采取措施，消除隐患。

(9)电缆应下进线/出线，从而使位于柜顶的压力释放装置可自由打开，因电弧引起的灼热气体可顺利排出。

5.2 机械设计

开关设备应按标准设计和安装。此外,正确的机械设计可以降低电弧故障引起的损坏。

(1) 联锁:有效的联锁可以防止误操作,防止人员进入带电间隔。联锁非常重要,原因有:①操作次数很少,因而操作人员操作经验有限;②配电房内的开关柜种类多,操作方式不同;③操作往往是在电网发生故障时进行,操作人员必须快速处理。但这时操作人员压力大、紧张,且操作环境差,如光线暗、深夜、雨天等。

(2) 绝缘和隔室:母排绝缘和各种高压隔室是防止电弧故障发生的非常有效的方法。这些技术大大减少了与带电部件意外接触的机会,也限制了引起电弧故障的可能性。所以,要尽可能将导体全部绝缘、覆盖,特别是母线系统和开关小室,那里常常由于污染而引起故障。此外,所有高压隔室应采用高度完整的密封,以避免在故障期间灼热气体的扩散。

(3) 设备隔离:因为高压设备通常一直带电,所以确保人员安全的有效方法是隔离。措施是:用栅栏(对户外设备)或将门锁好(对户内设备),只有操作人员才能进入。

(4) 远方操作:采用远方控制,达到操作人员与高压设备隔离的目的。

(5) 采用导向装置:将灼热气体引至安全区。

(6) 压力释放装置:释放装置应具有足够的强度,不会受到意外损坏或变形,动作可靠,可自由、灵活地开启。

(7) 气体冷却装置:使气体迅速冷却。

6 结论

对于体积不大的小室,标准算法是一种经济、

高效的方法,计算结果也较为准确;新标准算法是建立在标准算法基础上的,但包括一个改进的气体模型,它考虑了离子化的气体混合物;CFD 算法可计算压力波,还考虑了物理现象,如气流、改进的气体模型,以及研究对象的精确几何数据,该计算方法能给出三维空间计算结果,也是一种最精确的计算方法,其缺点是计算耗时长。

在开关柜设计中,应用上述计算结果,通过采取一些有效措施,可有效避免内部电弧故障的发生,或减少其危害程度。

参考文献:

- [1] M Wactor, etc. Strategies for Mitigation the Effects of Internal Arcing Faults in Medium-voltage Metal-enclosed Switchgear [J]. IEEE, 2001, 9(1): 323-328.
- [2] G Friberg, G J Pietsch, M Schumacher. On the Description of Pressure Rise in the Surroundings of High Current Arcs in Metal-enclosed Compartments with Pressure Relief[A]. The 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications[C]. Tokyo, 1995.
- [3] M Desbororough, D W Klaus, etc. Internal Faults in Distribution Switchgear-modeling Implementation and Testing of New Switchgear Design[A]. CIGRE[C]. 1997.
- [4] B S Massey. Mechanics of Fluids (the 4th ed.)(M]. Van Nostrand Reinhold, 1979.
- [5] G Friberg, G J Pietsch. Calculation of Pressure Rise due to Arcing Faults[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 365-370.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

作者简介:蔡彬(1964-),男,高级工程师,博士生,从事开关柜内部电弧故障研究等。

(上接第3页)电流调节器拉回。在此期间,55 Hz 交流电流分量超过 300 A,使 50 Hz 分量 1 段保护启动,如果该保护出口动作延时为原设定值 20 ms,则会多次导致 Z 侧移相急停机动作。为了有可能进一步查找误触发原因,将该保护延时增大到 50 ms,避免了阀误触发引起系统急停机,保持稳定运行后,再经多方测试发现,VBE 柜内光纤外皮接地不良,有轻微局部放电。阀换相振荡时,局部放电最强,产生的干扰最大,同相阀间距离最近,最为敏感,所以集中表现为, V_3 在 V_6 开通振荡时误触发。当清除这一不易查明的缺陷后,运行几个月,均未再出现类似问题。

5 结语

嵊泗直流工程容量虽小,但弱受端及动负荷为直

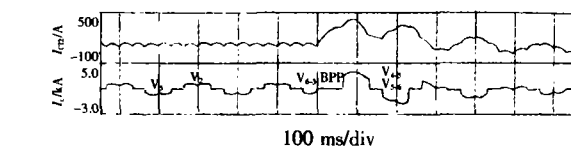


图5 2002-04-02,极1N站 V_3 在 V_6 触发时
误导通时的 C 相阀侧电流及直流过电流

流难题,系统动态性能及控制保护对策与常规大直流工程差别很大,双极直流接线及运行方式切换的复杂性又是国内初次尝试,这些困难在系统调试过程中都充分表现出来。上述技术问题仅为其中一部分,调频精度及稳定性等深层次问题还有待进一步研究。

作者简介:尚金城(1938-),男,高级工程师,长期从事流国产化工工作,嵊泗直流工程主要技术负责人。