

文章编号: 1001-1455 (2000)02-0125-06

开关柜内部电弧故障产生力和热的计算模型

黄 锐¹, 胡毅亭¹, 马炳烈², 陈网桦¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

(2. 甘肃天水长城开关厂, 甘肃 天水 741018)

摘要: 开关柜内部电弧故障会引起许多效应。在电弧周围引起压力升高, 并在柜体内和空气中引起温度升高。建立的模型对内部电弧故障引起的力和热的效应规律进行研究, 并对这两种效应进行了数值求解。结果表明, 对于持续时间为 1s 的电弧故障, 柜体内部压力在最初阶段上升很快, 在达到一个峰值后下降直至消失, 但热效应持续时间较长。

关键词: 开关柜; 内部电弧故障; 压力上升; 热效应; 计算模型

中图分类号: TM591 文献标识码: A

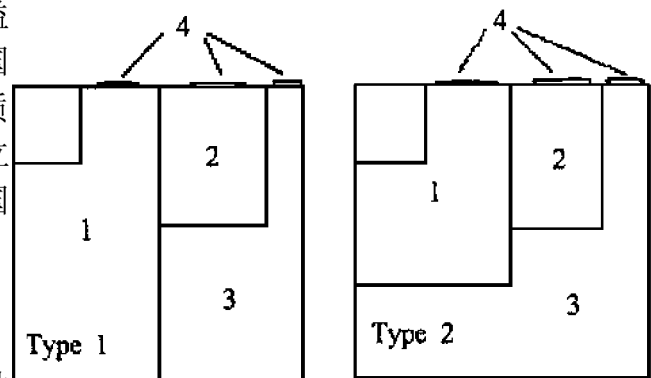
1 引 言

中、低压开关柜大量应用于电力系统的电路保护中。当开关柜内部电极发生故障产生电弧时, 电能转化为热能, 引起周围空气温度升高, 压力增大。空气介质的不断膨胀又进一步对柜体产生力的冲击。对内部电弧产生的力与热的作用进行建模、计算, 有利于柜体结构的改进和完善, 并可对柜外物体的安全研究提供有益的参考。关于柜内电弧产生的力与热作用, 国外研究得较多^[1~3]。目前, 随着国内对产品质量、安全性能等要求的提高及相应制度的建立健全, 开关柜在使用过程中的安全问题在我国开始得到重视。

2 开关柜的柜体结构

开关柜的外形是六方体, 内部分隔有两种类型, 其平面结构如图 1 所示。

图中的各室之间的隔板上分布有小孔或缝隙。各室上方在顶板处都设有压力释放通道, 当内部气体的压力高于外部大气一定数值时, 泄压装置的盖板将被打开并不会自动关闭。当某一室发生电弧故障时, 该室内气体除可以从



1. Front compartment; 2. Back-upper compartment;
3. Back-lower compartment; 4. Gas relief sheet

图 1 两种结构类型开关柜

Fig. 1 Structure scheme of the switchgear cabinets of two type

* 收稿日期: 1999-09-14

作者简介: 黄 锐 (1975—), 男, 硕士研究生。

顶部排气口泄出,还会通过上述小孔或缝隙流向其它室。开关柜用材皆为 2.5mm 厚的普通钢板。电弧能量的释放功率量级为 10^7W ,电弧故障持续作用时间取 1s。

3 模型的建立

3.1 开关柜泄压结构矩阵及排气质量矩阵的建立

当开关柜某室发生电弧故障时,故障室内的气体可以通过顶部泄压装置来泄压,也可以通过室与室之间的排气孔或缝隙来泄压。反之,当该室的气体压力小于周围环境或邻室的压力时,气体将反向流动。为了正确简明地表示出故障室与环境及相邻室之间的气体流动,我们对开关柜的泄压结构及排气质量用一种数据结构来表示。对各类型开关柜,统一用 1 代表前室,2 代表后上室,3 代表后下室,则开关柜各室之间的气流通道有效截面积用 a_{ij} 表示。如 a_{12} 表示前室与后上室之间气流通道有效截面积,显然 $a_{21}=a_{12}$ 。当 $i=j$ 时, a_{ii} 则表示该小室上方泄压通道有效截面积。于是开关柜泄压结构可以用矩阵 \mathbf{A} 表示如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

需要说明的是,若 $a_{ii}=0$,则表明 i 室上方无泄压通道或者泄压通道未打开,受热气体不能从此处排出。相应地,我们还建立了排气质量矩阵表示各室气体质量变化量,下标的含义同上。

$$d\mathbf{M} = \begin{bmatrix} dm_{11} & dm_{12} & dm_{13} \\ dm_{21} & dm_{22} & dm_{23} \\ dm_{31} & dm_{32} & dm_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

它与泄压结构矩阵 \mathbf{A} 有如下关系:

$$d\mathbf{M} = f \circ \mathbf{A} \quad (3)$$

式中 f 是与 i 室温度 T_i 、气压 p_i 及 j 室气压 p_j 有关的变系数,其物理意义为一段时间内通过单位面积的质量变化量,表达式为^[4]

$$f_{ij} = \xi p_i \left[\frac{2Y}{Y-1} \frac{1}{RT_i} \left[\left(\frac{p_i}{p_j} \right)^{2/Y} - \left(\frac{p_i}{p_j} \right)^{(Y+1)/Y} \right] \right]^{1/2} \circ dt \quad p_i > p_j \quad (4)$$

由(3)式可以得到

$$dm_{ij} = f_{ij} \circ a_{ij} \quad (5)$$

当 $i=j$ 时, $p_j=p_0$, p_0 是标准大气压,取 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

$$f_{ii} = \xi p_i \left[\frac{2Y}{Y-1} \frac{1}{RT_i} \left[\left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{2/Y} - \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{(Y+1)/Y} \right] \right]^{1/2} \circ dt \quad p_i > p_0 \quad (6)$$

式中: ξ 为排放系数,取 1.0; Y 为多方指数,对热流体取 1.3; R 为气体常数,其值等于 $287.4\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

根据条件我们可以知道,泄压结构矩阵 \mathbf{A} 是个对称矩阵, $a_{ij}=a_{ji}$;但排气质量矩阵则不一样,数值上是对称矩阵,但符号却相反,如从 i 室气体流到 j 室的质量为 Δm ,则 $dm_{ij}=\Delta m > 0$,但 j 室流入 i 室的气流量则显然是个负值,即 $dm_{ji}=\Delta m < 0$ 。

3.2 压力释放通道的临界开启压强 p_c 的计算

当发生电弧故障时, 气体受热膨胀会掀开顶部盖板进行泄压。盖板结构如图2所示, 其中实线框为盖板, 虚线框为排气口。盖板长为 L , 排气口宽为 B , 离翻动轴最近距离为 L_b , 最远距离为 L_e , 设掀盖临界压强为 p_c , 盖板所受重力为 G , 宽为 D , 面积为 A 。于是由力矩平衡条件得

$$\begin{aligned} G' \cdot \frac{L}{2} &= \int_{L_b}^{L_e} p_c x (B \cdot dx) - \int_0^L p_0 x (D \cdot dx) \\ &= \frac{1}{2} p_c B (L_e^2 - L_b^2) - \frac{1}{2} p_0 D L^2 \\ &= \frac{1}{2} p_c B (L_e^2 - L_b^2) - p_0 A \frac{L}{2} \end{aligned}$$

所以
$$p_c = \frac{(G' + p_0 A) \cdot L}{B (L_e^2 - L_b^2)} \quad (7)$$

又因为
$$G' = \lambda \cdot G = \lambda \rho_{\text{钢}} g A d \quad (8)$$

式中: G' 为动态翻盖时作用于盖板上的动载荷; 系数 λ 为翻盖所乘的动力系数^[5], 这里取 $\lambda = 2.5$; d 为钢板厚度; $\rho_{\text{钢}}$ 为钢板密度。则(7)式又可表示为

$$p_c = \frac{(\lambda \rho_{\text{钢}} g d + p_0) \cdot A \cdot L}{B (L_e^2 - L_b^2)} \quad (9)$$

对于开关柜, 临界压强 p_c 可看成向量 $\{(p_c)_i\}$, 即 $(p_c)_i$ 是 i 室顶部泄压通道的临界压强, 当 i 室内气体压强处于 $p_i < p_c$ 时, 相应 $a_{ii} = 0$, 当 $p_i > p_c$ 时, 通道开启, $a_{ii} > 0$ 。设 $L^* = L_e - L_b$, 则排气口有效面积为^[6]

$$a_{ii} = \pi \left[\frac{L_i^* \cdot B_i}{L_i^* + B_i} \right]^2 \quad (10)$$

当通道开启后, a_{ii} 始终大于 0, 即不会自动关闭。

3.3 电弧故障发生时压强、温度的计算

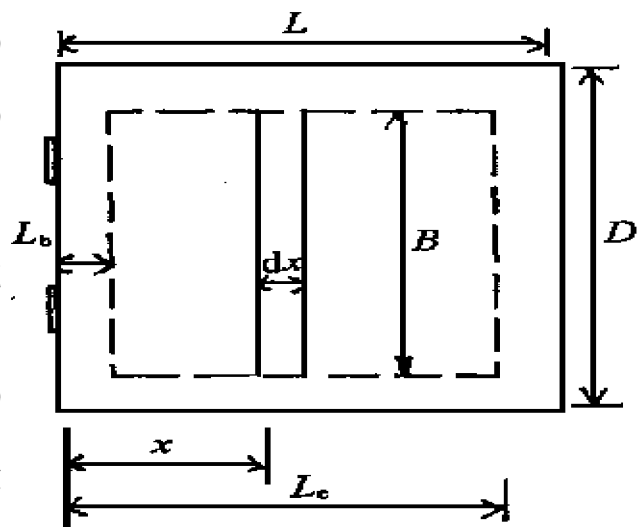
设起弧后某个小的时间间隔为 dt , 令电弧在这个时间间隔释放的能量为 dQ , 散失在气体与壳体壁中的能量为 dE , 则能量公式可表示为

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} (c_V m T) \quad (11)$$

对(11)式右边展开, 得

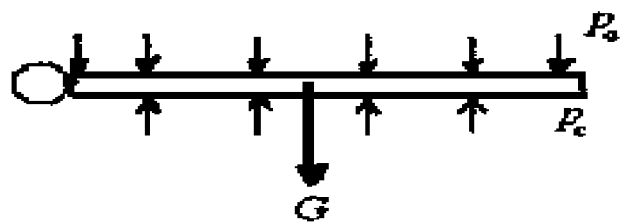
$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dE}{dt} = \frac{dm}{dt} c_V T + \frac{dT}{dt} \left[m T \frac{dc_V}{dT} + m c_V \right] \quad (12)$$

移项, 解得



(a) 盖板结构图

(a) Structure of the cover sheet



(b) 盖板受力示意图

(b) Forcing scheme of the cover sheet

图2 盖板结构及受力示意图

Fig.2 The structure and forcing scheme of the cover sheet

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc_V + mT} \left[\frac{dQ}{dt} - \frac{dE}{dt} - \frac{dm}{dt} c_V T \right] \quad (13)$$

式中

$$\frac{dE}{dt} = c_V T' \frac{dm}{dt} + \frac{1}{2} v_a^2 \frac{dm}{dt} + c_{V\text{钢}} m_{\text{钢}} dT \quad (14)$$

(14)式中: T' 为排出气体的温度, v_a 为排出气体的流动速度。前两项为排出气体能量散失项,后一项是壳体壁吸收的热量。计算时,我们对式中前两项气体能量损失项以总参(也叫滞止参数)的形式合并成一项,即相当于排出气体在柜体中处于静止状态时的能量。

3.4 冲击压力及冲量计算

当开关柜发生内部故障时,气体受热膨胀将分别对各室柜壁产生力的冲击。对于动态冲击,物体所承受的冲量(或比冲量)也是导致物体毁坏的原因之一。而柜体前后封板是通过两侧铰链与柜体相连,属易毁环节。所以有必要对封板所受的冲量及铰链所受的最大冲击力进行计算。

对封板两侧铰链的冲击力的计算可用如下计算式

$$f = (p_{\max} - p_0) A_b / n \quad (15)$$

式中: A_b 为封板面积, n 为固定该封板所用铰链数, p_{\max} 为室内气压最高值。

封板所受的比冲量为为

$$I_f = \int p dt \quad (16)$$

对应于本模型,利用已经求得的 p 数据,根据辛卜生积分法求得 I_f 。这可以认为是衡量压力瞬变时施加于壳体的冲击力的尺度。

3.5 计算过程

计算时对以上各式进行离散求解。温度离散为

$$T_{n,j+1} = T_{n,j} + \Delta T_{n,j} \quad (17)$$

式中:下标 n, j 表示 n 室第 j 个步长, n 室为故障发生室。由气体状态方程有

$$p_{n,j+1} = \frac{m_{n,j}}{V} R \cdot T_{n,j+1} \quad (18)$$

(18)式的意义在于:先考虑 n 故障室内气体状态参数 $T_{n,j}, p_{n,j}$ 变化到 $T_{n,j+1}, p_{n,j+1}$,再计算该时间步长内各室气体的相互流动情况。这可以用(5)式来计算。具体对某 i 室的质量变化有

$$dm_i = \sum_{j=1}^3 dm_{ij} \quad (19)$$

(19)式中,若 $dm_{ij} > 0$,则表示室内气体有部分向 j 室排出,若 $dm_{ij} < 0$,则表示 j 室有气体流入此室。故 i 室的气体质量变为

$$m_{i,j+1} = m_{i,j} - dm_i \quad (20)$$

考虑气体流动后, i 室的气体实际状态参数 $T_{i,j+1}, p_{i,j+1}$ 为

$$T_{i,j+1} = \frac{c_V m_{i,j} T_{i,j} - \sum_{k=1}^3 c_V dm_{j,k} T_{k,j} - c_{V\text{钢}} m_{\text{钢}} \Delta T}{c_V m_{i,j+1}} \quad (21)$$

$$p_{i,j+1} = \frac{m_{i,j+1}}{V_i} R \cdot T_{i,j+1} \quad (22)$$

然后再以 $p_{i,j+1}$ 、 $T_{i,j+1}$ 、 $m_{i,j+1}$ 为已知量, 按同样的步骤计算下一时间步长的状态参数, 直到时间 $t=1\text{s}$, 本模型取时间步长 $\Delta t=0.0004\text{s}$ 。

3 计算结果

根据所建立的物理模型, 我们对两种结构类型的开关柜各室发生电弧故障时的情形进行了计算。图 3、4 分别为类型一中后下室发生故障时, 前室、后上室及后下室的压力、温度随时间的变化。其故障条件是功率恒为 17MW 的电弧在后下室有限空间中持续 0.8s。

从图 3、4 可以看出, 内部电弧可分为以下 3 个阶段。

第一阶段, 压缩阶段。在最初一段时间 (5~10ms) 内, 温度上升, 并引起压力升高。在这个阶段, 由于故障室内部压力升高, 与周围空气产生压力差, 在压力差的作用下, 受热气体向相邻室流动, 顶部释压活门打开进行泄压, 并带走大量的能量。故障室内部压力突然升高是该阶段的特征。

第二阶段, 膨胀排放阶段。柜内气体压力开始下降。由于不断有电能输入弧根处, 内部形成空气流、气体流与微粒流, 这种高速气体炽热且含有一定量的灼热微粒, 是内部电弧所产生的外部效应。

第三阶段, 热效应阶段。当大多数空气被排出时, 电弧周围的空气温度最终几乎达到电弧温度。从这个时刻起, 绝大部分电弧能量作用到周围开关设备中的固体元件上, 开关柜有被烧穿的危险。

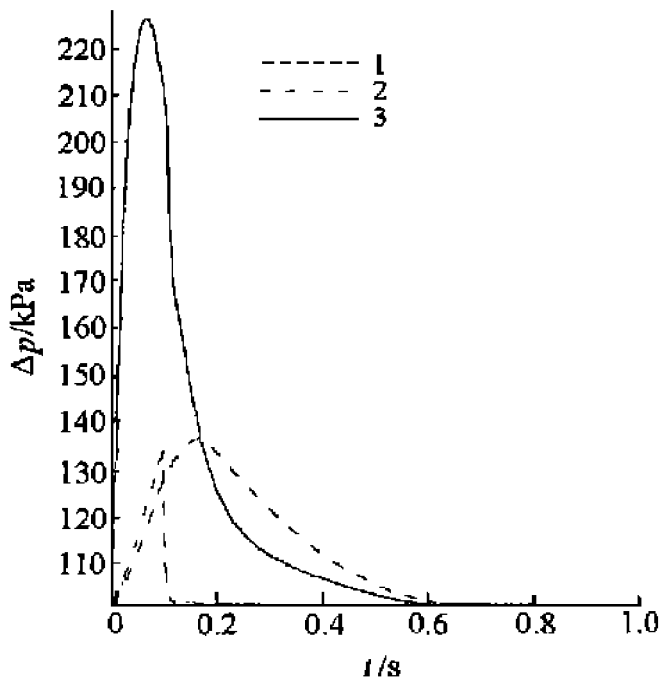


图 3 三室压力随时间的变化

Fig.3 Pressure histories of the three compartments

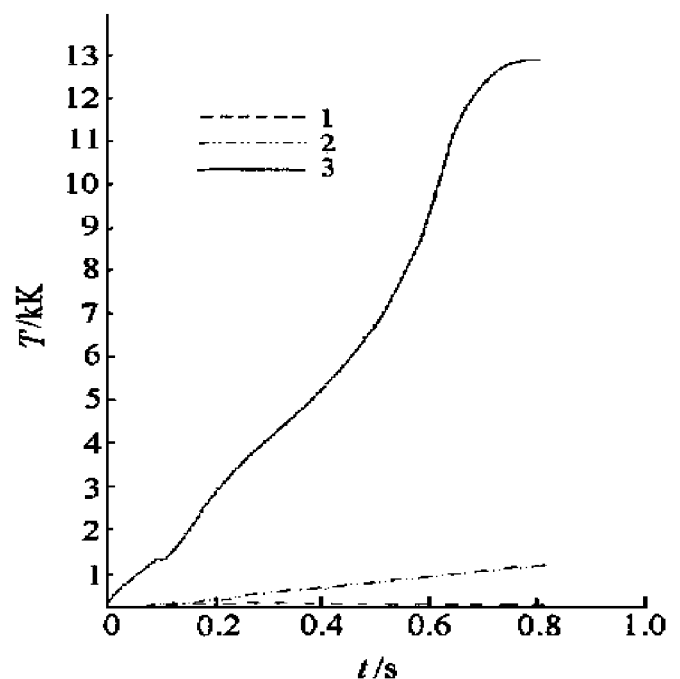


图 4 三室温度随时间的变化

Fig.4 Temperature histories of the three compartments

6 结 论

当开关柜内部某室发生电弧故障时, 高功率电弧所放出的能量主要消耗在该室气体的升温和柜体的吸热。该室气体受热膨胀后, 将通过顶部泄压装置向环境泄压并带走大量的能量, 同时该室气体也将向其邻室排气。柜体内部复杂的泄压结构和内部各室之间的气体贯穿作用可以用矩阵进行巧妙的描述。这样所建立的模型可以对内部电弧故障发生时对柜体产生的力与热的效应进行数值求解。

参考文献:

- [1] Pettinga J A J. Pressure Rise due to a High Current Internal Arc in an MV Cubicle Model [A]. CIREN [C]. 1989. 32 ~ 36.
- [2] Dasbach A, Pietsch G. A Calculation Method for Pressure Waves due to Fault Arcs [A]. Proc 8th int Conf on Gas Discharges and Their Applications [C]. Oxford, 1985. 91 ~ 94.
- [3] Friberg G, Pietsch G, Schumacher M. Pressure Rise in the Surroundings of High Current Arcs in Metal-enclosed Compartments with Pressure Relief [A]. Proc 11th Conf on Gas Discharges and Their Applications [C]. Tokyo, 1995. 18 ~ 21.
- [4] Rogers G F C, Mayhew Y R. Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer [M]. 2nd ed. New York: Longman, 1976.
- [5] 导弹强度设计手册编写组. 导弹强度设计手册 [S]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [6] Massey B S. Mechanics of Fluid [M]. 4th ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979.

Calculation Model for the Effects of Force and Heat Produced by Inner Arc Fault in Switchgear Cabinet

HUANG Rui¹, HU Yi-ting¹, MA Bing-lie², CHEN Wang-hua¹

(1. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(2. *Tianshui Changcheng Switchgear Plant, Tianshui 741018, China*)

Abstract: The inner arc faults in switchgear cabinet cause many effects. Both the temperature of air around the arc and the cabinet shell and the pressure of air will increase. This model mainly studies the effects of force and heat caused by inner arc faults and the numerical solution of the effects are given out. For an arc fault with duration of 1s, the calculation results show that the inner pressure increases rapidly within the first several millisecond, and decreases after getting to a summit value, while the heat effect will last for a relatively long period.

Key words: switchgear cabinet; inner arc fault; pressure rise; heat effect; calculating model