

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.006

中压开关柜内部电弧压力升计算——模型简化方法研究

吴 田¹, 杨 东¹, 黎 鹏¹, 黎子晋¹, 吴泳聪², 方 雯¹

(1. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 宜昌 443002; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 中压开关柜内部电弧故障时有发生,其短时间释放出的巨大能量引起隔室内部压力迅速上升,对设备、建筑物以及工作人员的安全造成了严重威胁。基于零部件规则化和隔室等容积替代的简化原则,提出了开关柜复杂模型简化方法;利用CFD法计算了不同简化模型的压力分布规律,给出了模型最优简化方法;对SCM法与CFD法获得的计算结果进行了对比,分析了两者的差异。结果表明:采用规则化—等容积替代混合方式简化模型获得的结果与原始模型吻合较好,计算时间缩短了约54.39%;当泄压板打开后,隔室内部的压强分布差异较大,采用SCM法获得的结果误差较大,应采用CFD法进行求解。

关键词: 开关柜; 电弧故障; 压力升; SCM; CFD

Study on the Model Simplification Method for the Calculation of Arc Pressure Rise in MV Switchgear

WU Tian¹, YANG Dong¹, LI Peng¹, LI Zijin¹, WU Yongcong², FANG Wen¹

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The arcing fault inside medium-voltage (MV) switchgear happened occasionally. The great energy is released in a short time in the switchgear, resulting in pressure rise rapidly, which caused a serious threat to the safety of the equipment, buildings and personnel. Based on the simplified principles such as regularization replacement of the parts and isovolumetric replacement of the compartment, the simplified methods for the switchgear complex model are proposed in the paper. The pressure distribution for the different simplified models are calculated by the CFD, and the best simplified method for the model is given. The results are calculated by the pressure rise standard calculation method (SCM) and CFD, and the difference of both is analyzed. The results show that the model obtained by combined with the regularization replacement of the parts and the isovolumetric replacement of the compartment can get similar results with the original model, and the computation time is reduced by 54.39%. After the pressure relief cover is open, the pressure distribution has a great difference in the compartment. The result error is big by using SMC, and the CFD should be adopted for the switchgear.

Key words: switchgear; arcing fault; pressure rise; SCM; CFD

0 引言

中压开关柜距离居民区较近,操作频繁,其安全问题相比于其他高压开关设备更应重点关注^[1]。开关柜在诸如粉尘、污秽、凝露、异物、接触不良等因素影响下^[2-3],柜体内部绝缘强度大幅度下降,使

得内部电弧故障时有发生^[4-6],其按发生类型分为串型和并型电弧故障两类^[7],而并型电弧故障的危害最为严重。

电弧燃烧在短时间内释放巨大能量,加热并压缩周围气体,造成隔室内部气体膨胀、压力骤增^[8-9],易引发柜门、外壳出现爆裂等事故。为此,IEC

收稿日期:2019-09-28; 修回日期:2019-11-26

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2042016gf0008)。

Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2042016gf0008).

62271-200:2003和GB/T 3906—2006均将内部电弧故障试验列为强制性的型式试验^[10],但型式试验只能对开关柜的强度进行定性验证,无法定量揭示内部电弧故障的影响机制,且试验成本高使得试验次数有限,对指导开关柜的设计与安全防护具有一定的局限性,因此,开展开关柜内部电弧故障时压力升仿真研究具有重要意义。

国内外学者针对简易模拟开关设备内部电弧故障时压力升的试验与仿真开展了较多研究^[11-18]。文[11-13]提出了开关设备内部电弧故障时压力升的多种数值计算方法,比较了不同方法的差异,并通过试验与计算分析了模型内部的压力升情况;CIGRE A3.24工作组^[14]在假设隔室内压力及温度均匀分布的条件下,提出了简化数值计算模型,对不同介质下开关设备内部电弧故障时的压力升进行了计算,并通过试验对计算结果进行了验证;文[15-17]对简易封闭容器内部电弧故障引起的压力升进行了仿真与试验研究,分析了热转换系数随初始压强、密度、电流、电极材料等参数的变化规律。文[19-20]开展了模拟开关柜相间电弧故障试验,测量了燃弧过程中柜体内部的压强变化,并利用简化算法对柜体整体的压力升进行了计算;文[21-22]建立了实际电弧等离子体模型,利用磁流体动力学法(MHD)计算了密封容器内部电弧引起的压力升,并开展了实际燃弧试验验证了计算的准确性。文[23-24]开展了封闭容器内部电弧试验,分析了电弧的燃弧特性,并利用基于电弧能量热等效的压力升计算方法对压力的分布规律进行了研究。目前,对简单封闭容器内部电弧故障引起的压力升研究较多;而针对实际开关柜的仿真计算主要以标准算法(SCM)获得柜体内部整体的压力升为主^[8-9],虽然基于流体动力学(CFD)的场仿真可得到柜体内部局部压力升大小,但实际开关柜尺度较大且结构复杂导致计算量较大,因此,有必要对开关柜复杂模型的简化方法和适应于开关柜内部电弧故障时压力升的计算方法开展进一步研究。

文中提出了开关柜复杂模型简化方法,对简化方法的可行性进行了仿真验证,采用SCM和CFD法对隔室内部电弧故障时的压力升进行了计算,对比了两种方法获得结果的差异,研究可为后续开关柜内部电弧故障时压力升分布规律的仿真计算提供参考。

1 开关柜内部电弧故障时压力升计算方法

封闭容器内部电弧故障时压力升的计算方法

主要包括:标准算法(SCM)、改进标准算法(ISCN)、计算流体动力学(CFD)和磁流体动力学(MHD)。其中,SCM与ISCN获得的结果较为接近,MHD建立了实际电弧模型,可获得较为准确的压力分布,但计算量较大,目前主要应用于二维模型。因此,本文采用SCM和CFD法对开关柜内部电弧故障时的压力分布进行计算。

1.1 基于电弧能量热等效的压力升计算(CFD)

文[23-24]采用基于电弧能量热等效的方法对开关柜内部电弧故障时的压力升进行计算,即将电弧等离子体等效为热源,忽略电弧本身的物理特性,根据实际电弧电流和弧压等参数,计算得到电弧功率的变化规律,结合热转换系数“ k_p -因子”(引起压力上升的能量占电弧总能量的比例)^[11],可获得开关柜内部电弧故障时引起压力上升的热源功率大小。具体计算流程见图1。计算过程中,假设电弧区域的能量均匀分布,其功率 P_{therm} 为:

$$P_{\text{therm}} = k_p \times u_{\text{arc}} \times I \quad (1)$$

式(1)中: u_{arc} 为弧压; I 为电弧电流; k_p 为热转换系数。

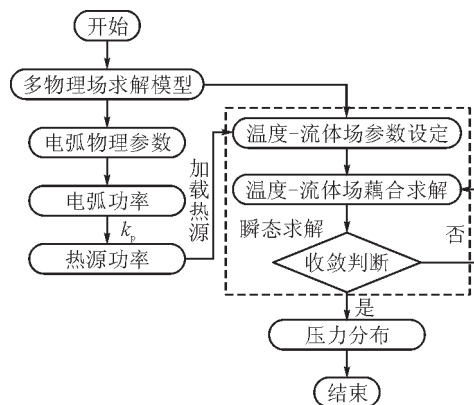


图1 基于电弧能量热等效的压力升计算流程

Fig. 1 Flowchart of pressure rise calculation based on arc energy thermal equivalent method

施加电弧功率后,采用理想气体模型,通过温度-流体场瞬态全隐式耦合求解获得开关柜内部的压力分布规律。由于该方法未建立实际电弧模型,忽略了电弧在磁场、流体场中的运动特性,仅将电弧功率作为热源输入量,采用有限体积法进行温度-流体场耦合求解;未考虑电磁场、温度场和流体场的相互耦合作用,与MHD法相比,可大大减少计算量,并可实现对开关柜内部的压力升进行局部化求解。

1.2 考虑泄压口的SCM压力升计算

SCM主要依据能量守恒定律和理想气体定律,在假设气体参数恒定、电弧能量均匀输入的情况下,封闭隔室内部的整体压力升可由式(2)确定

$$dp = \frac{R}{M \cdot c_v} \cdot \frac{k_p \cdot P_{arc} \cdot dt}{V} \quad (2)$$

式(2)中: M 为气体摩尔质量; R 为摩尔气体常数; V 为隔室体积; c_v 恒定体积下气体的比热容; P_{arc} 为电弧功率; m 为气体质量; k_p 为热转换系数。

当隔室有泄压口时, 需考虑隔室内气体的流动, 可用图2进行描述^[25]。假设燃弧室(AR)体积为 V_{AR} , 泄压口表面积为 A ; 泄压室(RR)体积为 V_{RR} , 燃弧室 AR 中的热气体通过泄压口进入泄压室 RR。单位时间 dt 内从燃弧室中排出的气体质量为 dm 。

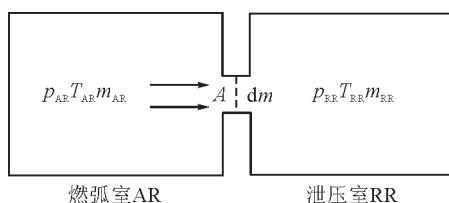


图2 压力释放过程

Fig. 2 Process of the pressure release

结合伯努利方程^[26]、理想气体状态方程和式(2), 可推导出某一时刻 AR 和 RR 内部的压强为^[11]:

$$\begin{cases} p_{AR} + dp_{AR} = \frac{(m_{AR} - dm) \cdot R \cdot (T_{AR} + dT_{AR})}{M_{AR}(T_{AR}) \cdot V_{AR}} \\ p_{RR} + dp_{RR} = \frac{(m_{RR} + dm) \cdot R \cdot (T_{RR} + dT_{RR})}{M_{RR}(T_{RR}) \cdot V_{RR}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} dm = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{2p_{AR}\rho_{AR}} \cdot \psi \cdot dt \\ \psi = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_{RR}}{p_{AR}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{RR}}{p_{AR}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right] \\ A = \pi \cdot \left(\frac{a \cdot b}{a + b} \right)^2 \cdot (1 - \cos \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: α 为流量系数, 其大小与泄压口的形状、摩擦阻力等有关; a 和 b 为泄压板的长和宽; φ 为泄压板开启的角度; γ 为比热比 ($\gamma = c_p/c_v$), 又称绝热系数, 对于空气介质一般为 1.4。

对上述一阶微分方程的求解, 可采用欧拉数值法和龙格库塔算法, 为了提高求解精度, 文中采用四阶龙格库塔算法进行求解^[27]。

2 开关柜模型简化方法

2.1 简化基本原则

开关柜内部电弧故障时的压力分布与各隔室内部空气的流通情况密切相关, 因此, 对气体流动影响较小的部位均可作简化处理, 基本简化原则如下:

1) 去掉对隔室气体流动影响较小的零部件(例如, 螺母、螺栓、母排套管等), 同时将这些零件去掉后剩余的孔隙作封闭处理;

2) 将体积较大零部件的尖角及对计算影响不大的部位去掉或者转变为方形等较为简单、规则的零件, 如将泄压板简化为与泄压口尺寸一致的长方体, 断路器手车简化为规则的方形体等。同时去掉柜体附近体积较小的横梁以及手车导轨等;

3) 由于仿真计算过程, 不考虑外壳与外界的热交换过程。因此, 忽略外壳的厚度, 取开关柜柜体内壁面之间的垂直距离作为柜体的最终尺寸。

参考上述简化原则, 得到初步简化后的某 7.2 kV 开关柜整体模型见图3。整个开关柜被隔板分隔为 5 个隔室, 即: 电缆室、母线室、断路器室、仪表室、机组屏室, 其中可能发生电弧故障的隔室主要为电缆室、断路器室和母线室。因此, 重点对这 3 个隔室进行简化处理。电缆室主要包括: 电压互感器(VT)、电流互感器(CT)、零序互感器、出线母排、接地刀闸等。母线室主要包括: 三相进线母排、静触头盒。断路器室主要包括: 手车和断路器。隔室顶部均装有泄压板, 其两端分别由金属螺栓和尼龙螺栓固定, 当发生内部电弧故障时产生的过压力作用于泄压板上, 尼龙螺栓断裂, 泄压板翻转, 释放隔室内部的过压力。

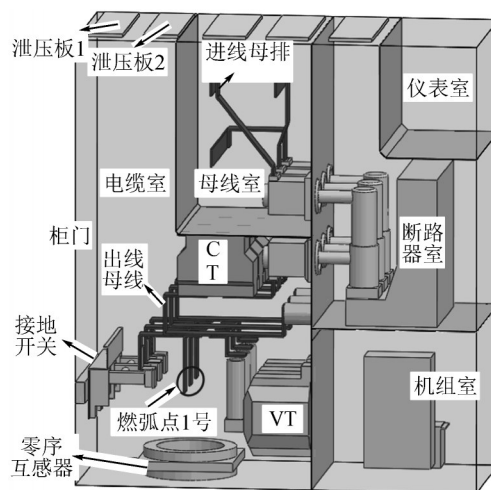


图3 开关柜模型

Fig. 3 Switchgear model

2.2 模型规则化替代方法

开关柜中的断路器、互感器和接地刀闸等元件、部件结构复杂, 如直接对其进行剖分计算, 将导致计算量过大; 为减少网格剖分量, 提高计算效率, 需对复杂部位的结构进行进一步简化, 由标准计算法(SCM)可知, 容器内部的压强与气体的膨胀体积成反比, 据此, 提出了两种模型规则化替代方法。

2.2.1 复杂部件等体积规则化替代方法

在不影响整体布局的前提下, 对复杂结构利用等体积的规则结构进行替代, 如可将 CT、VT 和零序

互感器替换成规则的长方体或圆柱体,并保证所占体积不变。该三部分简化后结构改变较小,对柜体整体的布局和柜体内部的压强分布影响均较小;而接地刀闸与其他部位相比结构复杂,利用等体积的规则长方体进行替换后,引起的结构改变较大。因此,后续将对复杂部位等体积替换的可行性进行验证。

2.2.2 隔室等容积替代方法

上述提出了对复杂部件采用等体积规则形状进行替代的模型简化思路,虽然该方法可在一定程度上减少网格剖分量,但仍可能存在计算量过大的问题。文[18]通过试验初步验证了当容器内部单位空气体积所含的电弧能量不变时,容器内部的压力升基本不变。因此,如能直接将部分复杂部件去除,并通过改变隔室尺寸(由于柜门为关注的重点部位,主要改变非柜门面的位置来缩小隔室尺寸)来保证模型中空气所占的体积不变,将使计算模型更为简单,网格数量将大幅度减少。

2.3 不同简化方法下电缆室简化模型

根据上述提出的模型简化方法,以电缆室为例,分别采用不同的简化方法,获得对应简化模型见图4。隔室尺寸的缩小方式见图4中箭头所示,并分析不同简化模型获得压力分布的差异性,从而提出开关柜模型的最优简化方法。

1)复杂部位等体积规则化替代,将CT、VT、零序互感器以及接地开关等部位利用规则的长方体、圆柱体模型替代简化,具体见图4(a);

2)隔室等容积替代一只含母排,去掉隔室中的部件只剩位于隔室中间的母排,将隔室体积缩小(将 $zy-x+$ 平面向 $x-$ 方向平移130 mm,同时将 $zy-x-$ 平面向 $x+$ 方向平移14.48 mm),保持空气所占体积不变,见图4(b);

3)隔室等容积替代,去掉隔室中的所有部件(仅将 $zy-x+$ 平面向 $x-$ 方向平移157.17 mm),并保持空气所占的体积不变,见图4(c);

4)等体积规则化—等容积替代混合模型,对隔室中的触头盒、CT、VT和接地刀闸用等体积的规则化形状进行替代,保证其位于柜内的位置不变,同时去掉体积较小的支撑绝缘子和零序电流互感器等,将柜壁($yz-x+$ 平面)向 $x-$ 方向移动14.45 mm,以保持空气所占的体积不变,见图4(d)。

4种简化方式下,隔室中空气所占的体积与原模型差异较小,相对误差均在1%以内,因此,计算过程中可忽略空气体积差异带来的影响。

2.4 不同简化模型内部电弧故障时压力升对比

电缆室被简化后,模型均为对称模型;虽然三相短路电弧故障时,AB相与BC相间的电弧功率并

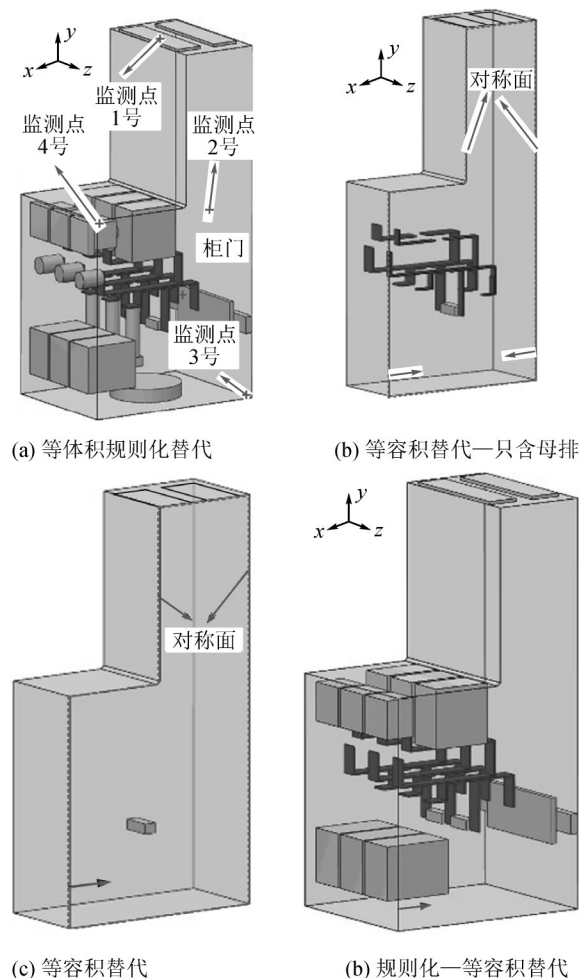


图4 电缆室简化模型

Fig. 4 Simplified models of the cable compartment

不相同,但文[23]研究表明:当电弧尺寸占容器的体积较小时,电弧尺寸对压强分布的影响较小,即电弧区域功率的分布对压强分布的影响较小。因此,为简化计算,计算过程中,保持三相电弧的总功率不变,认为其与计算模型一样呈对称分布,采用1/2模型进行计算。三相短路电流为40 kA(有效值),根据实际电弧故障试验结果,弧压取固定值1558 V,且不考虑直流分量的影响, k_p 取值0.449,电弧功率的计算如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_a = 40 \times \sqrt{2} \times \sin(100\pi t) \text{ kA} \\ i_b = 40 \times \sqrt{2} \times \sin(100\pi t - 120^\circ) \text{ kA} \\ P = (|i_a| + |i_a + i_b|) \cdot k_p \cdot u_{\text{arc}} / 2 \end{cases} \quad (5)$$

由于SCM与隔室内布局无关,仅与热源功率与空气体积有关,因此,采用文中1.1所述的CFD法对4种简化模型的压力升计算结果进行对比分析,计算参数设置与文[23]一致。

为了分析不同简化方式对隔室内压强分布的影响,取图4(a)中监测点的压强变化进行分析。由于主要考虑内部电弧产生的过压力对隔室壁面的影响,因此选择的监测点均位于壁面附近;其中,

监测点1号位于泄压板的中部,监测点2号位于柜门的中部,监测点3号和4号分别位于隔室的拐角处,各监测点的压强随时间的变化关系见图5。

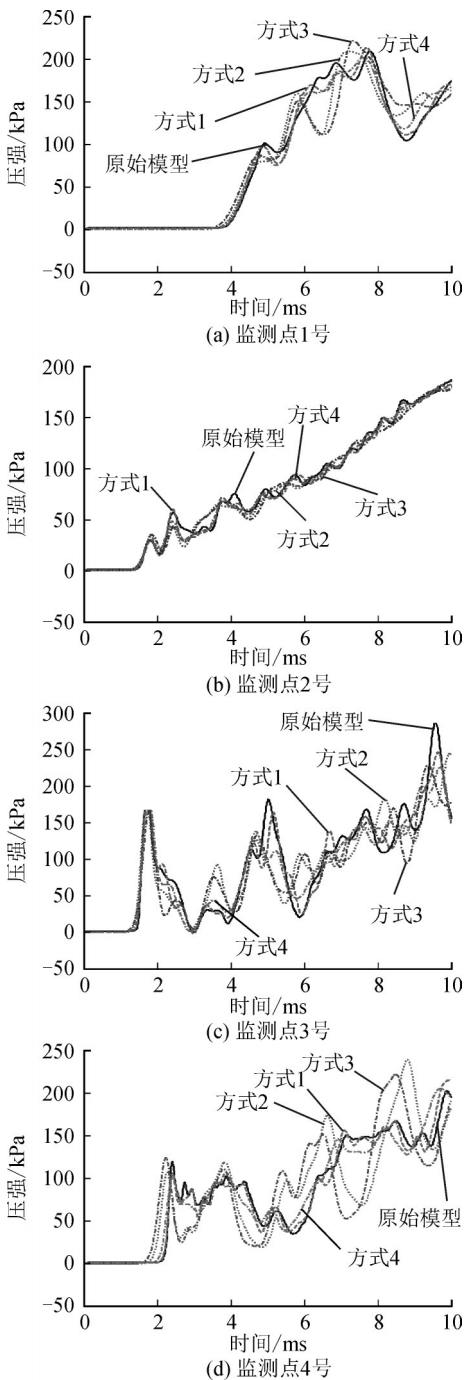


图5 不同简化模型压力升变化规律

Fig. 5 Change of the pressure rise for different simplified models

由图5可知,方式1和方式4简化模型获得的压强变化规律与原始模型基本一致,各监测点压强曲线重合度较高,证明了采用方式1和方式4简化复杂模型的可行性和有效性。

而采用等容积替代的方法(方式2和方式3)简化模型后,获得的压强与原模型有较大差异,除监测

点2号的结果差异较小外,其余各点的压强变化有较大不同,特别是拐角处(如监测点3号和4号)压强的振荡频率和幅值均差异较大。分析认为:监测点2号位于隔室的壁面,其与热源之间的距离以及附近布局并无较大改变,所以该位置的压强变化与原始模型基本一致。而监测点1号位于泄压板顶部,由于方式2和3将泄压板去除,且其附近柜门的位置改变较大,使得该处的压强变化有所不同。监测点4号位于柜体 $zy-x+$ 平面,采用等容积方法简化后,使该面的位置发生了较大改变,导致位于拐角处监测点4号的压强差异较监测点3号明显。拐角处的压强变化与压力波的反射叠加作用密切相关^[23]。由于隔室结构复杂,将柜体中的大部分部件去掉后,对压力波的传播特性造成了较大影响,导致拐角处的压强波动与原模型的差异增大,振荡频率有所减小。可见,单纯采用等容积替代的方式简化模型,当柜体结构改变较大时,会对柜体内部压力波的传播规律造成影响,发生改变的位置和柜体拐角处的压强会发生较大变化,与原始模型有较大差异。

等容积替代方法中,方式2和方式3获得的结果差异较小,变化规律基本一致,但在监测点4号有较大差异,主要与方式3中监测点4号所在柜壁的位置改变更大有关,可见柜体改变处的压强变化较大。其他监测点的结果差异与监测点4号相比明显要小,说明在该结构下,母排对压力波的传播特性影响相对较小。当柜体只含母排时,母排占的体积较小,且与柜壁的距离较大,使得其影响较小。因此,当去掉的部件对柜体的整理布局影响较小时,对压强分布的影响相对较小。

不同简化模型的网格数量和计算时间见表1,其中原模型与方式4的计算过程中,计算机的参数设置完全一致,而方式1~3中计算采用的计算机配置较低,计算速度较慢,不具可比性。因此,此处仅列出了原模型和方式4的计算时间。由表1中可知,采用方式4简化模型后,计算时间缩短了约54.39%,单元数量与方式1相比减少了64%,而方式4获得的计算结果与原模型基本一致,且计算量适中。因此,推荐采用方式4对开关柜模型进行简化。

表1 不同简化模型的网格数量和计算时间

Table 1 Element numbers and computation time for different simplified models

简化方式	单元数量	物理时间/ms	计算时间/h
原模型	718 925	10	296
方式1	434 374	10	—
方式2	109 510	10	—
方式3	53 547	10	—
方式4	152 847	10	135

3 SCM与CFD压力升仿真结果对比

为对比SCM法与CFD法获得结果的差异性,采用该两种方法对电缆室泄压板封闭和开启条件下电缆室柜门的合力变化进行计算,该柜门所受合力可通过式(6)获得。经调研,泄压板尼龙螺栓的断裂拉力为1.8 kN,即当螺栓压接表面的轴上拉力达到1.8 kN时,泄压板开启。根据泄压板表面的受力,通过ANSYS动力学仿真计算获得泄压板的开启时刻和开启力^[19]。忽略泄压板开启旋转的动力学过程,认为达到开启力便翻转至最大角度。

$$F = \int p \cdot S_{\text{单元}} dS \quad (6)$$

式(6)中: p 为压力升; $S_{\text{单元}}$ 为单元面积。

燃弧20 ms时,柜门所受合力随时间的变化见图6。

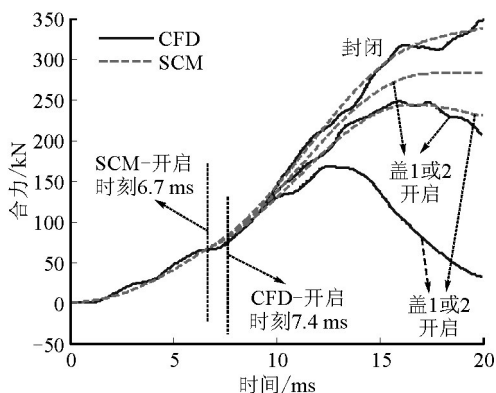


图6 电缆室柜门所受合力SCM和CFD对比

Fig. 6 Force on the door of the cable compartment obtained by the SCM and CFD

由图6可知,电缆室封闭状态下,采用SCM和CFD法获得的结果基本一致,差异较小。而当泄压板开启时,两种方法获得的结果差异较大,且随着泄压板开启数量增加差异逐渐增大。当燃弧至20 ms时,封闭、开启1个泄压板和开启2个泄压板的条件下,SCM与CFD法获得的压力数值相对误差分别约为:3.0%、26.0%、86.1%。这主要由于SCM法中假设隔室中的气体流速为0,而当泄压口面积增大时,隔室中的气体流动也会加剧。气体的流动对压强分布的影响较大,将导致隔室内部各位置的压强差异增大,特别是泄压口附近的部位,而电缆室柜门位于泄压通道一侧,其压力随气体的排出下降较其他部位明显。因此,采用SCM法获得的压力平均值无法反映空间的差异性,导致与CFD法的差异较大。同时,采用SCM法获得的泄压板开启时刻约为6.7 ms,小于CFD法获得的开启时间,这同样与SCM法无法考虑隔室内部压强的局部差异有关。

泄压板距电弧较远,压力波由电弧区域传递至泄压板附近需要4 ms左右,而SCM无法反映这一现象,泄压板从起弧时刻开始便受力的作用,从而导致SCM法计算获得的泄压板开启时间和开启力均有所减小。综上所述,当考虑隔室内部的平均压强变化时,可采用SCM法。而考虑隔室内部压强分布的差异性,如泄压板开启时隔室内部压强的分布时,应采用CFD法。因此,对于实际开关柜内部电弧故障时压力升的计算应采用更为精确的CFD法。

4 结论

文中提出了零部件等体积规则化和隔室等容积替代的开关柜复杂模型简化方法,采用CFD法计算了不同简化模型的压力升分布规律,对比了SCM和CFD法获得结果的差异,得到了如下结论:

1)当柜体结构改变较大时,会对柜体内部压力波的传播特性造成影响,发生改变的位置和柜体拐角处的压强会发生变化,与原始模型的差异较大。因此,推荐采用规则化—等容积替代的方式简化模型,简化后计算时间缩短了约54.39%。

2)隔室封闭条件下,采用SCM与CFD法获得的隔室柜门压力变化结果较为接近,差异较小。当泄压板开启时,SCM获得的结果与CFD法相差较大;封闭、开启1、2个泄压板的条件下,SCM与CFD法获得的压力数值相对误差分别约为:3.0%、26.0%和86.1%,随着泄压板开启数量的增加,误差逐渐增大。综合考虑,针对实际开关柜内部电弧故障时的压力升计算,应采用CFD法。

参考文献:

- [1] DAALDER J E, LILLEVIK O, REIN A, et al. Arc in SF₆-MV-switchgear pressure rise in equipment room[C]//14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED). [S.l.]: CIRED, 1989: 37-41.
- [2] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and counter-measures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [3] 阮江军,黎鹏,黄道春,等. 中压开关柜内部短路燃弧热-力效应研究综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3340-3351.
RUAN Jiangjun, LI Peng, HUANG Daochun, et al. Review on thermal-mechanical effects research of MV switchgear due to internal short circuit arcing[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3340-3351.

- [4] 李玲, 刘成学. 中压开关柜内部故障电弧计算及防护措施[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 131-138.
LI Ling, LIU Chengxue. Calculation and prevention of internal fault arc in medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 131-138.
- [5] 王伟. 12 kV 开关柜内部燃弧仿真及柜体强度优化[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
WANG Wei. Internal arcing simulation and cabinet strength optimum of 12 kV switchgear[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [6] 刘柱揆, 丁心志, 陈福明, 等. 开关柜电弧故障及其测量方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1345-1349.
LIU Zhukui, DING Xinshi, CHEN Fuming, et al. Research on switchgear arc discharge fault and its measurement[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1345-1349.
- [7] 刘官耕, 杜松怀, 苏娟, 等. 低压电弧故障防护技术研究与发展趋势[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 305-313.
LIU Guangeng, DU Songhuai, SU Juan, et al. Research on LV arc fault protection and its development trends[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 305-313.
- [8] 熊泰昌. 内部电弧故障试验情况下中压开关柜强度计算[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 42-44.
XIONG Taichang. Strength calculation of medium voltage switchgear under internal arc-fault test[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 42-44.
- [9] 黄锐, 胡毅亭, 马炳烈, 等. 开关柜内部电弧故障产生力和热的计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 125-130.
HUANG Rui, HU Yiting, MA Binglie, et al. Calculation model for the effects of force and heat produced by inner arc fault in switchgear cabinet[J]. Explosion and Shocks Waves, 2000, 20(2): 125-130.
- [10] 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备: GB 3906—2006[S]. 2006.
Alternating-current metal-enclosed switchgear and control-gear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: GB 3906—2006[S]. 2006.
- [11] FRIBERG G, PIETSCH G J. Calculation of pressure rise due to arcing faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 365-370.
- [12] LUTZ F, PIETSCH G. The calculation of overpressure in metal-enclosed switchgear due to internal arcing[J]. IEEE Transactions Power Apparatus and System, 1982, PAS-101(11): 4230-4236.
- [13] DASBACH A, PIETSCH G J. Calculation of pressure waves in substation buildings due to arcing faults[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1990(5): 1760-65.
- [14] NENAD U, EDGAR D, MARTIN K, et al. Application of simplified model for the calculation of the pressure rise in MV switchgear due to internal arc fault[C]//22nd International Conference on Electricity Distribution. Stockholm, Sweden: IET, 2013: 1-4.
- [15] IWATA M, ANANTAVANICH K, PIETSCH G. Influence of arc current on fraction k_p of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container[C]//17th International Conference on Gas Discharges and their Application. Cardiff, UK: IEEE, 2008: 189-192.
- [16] IWATA M, ANANTAVANICH K, PIETSCH G. Influence of current and electrode material on fraction k_p of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container during internal arcing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 2028-2029.
- [17] ZHANG X, PIETSCH G, GOCKENBACH E. Investigation of the thermal transfer coefficient by the energy balance of fault arcs in electrical installations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 425-431.
- [18] FJELD E, HAGEN S T. Small-scale arc fault testing of medium-voltage metal-enclosed switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 37-43.
- [19] 蔡彬, 陈德桂, 吴伟光, 等. 开关柜耐受最大冲击载荷的冲击动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 124-130.
CAI Bin, CHEN Degui, WU Weiguang, et al. Research of shock dynamics on withstanding the maximal shock load in switchgear assemblies[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 124-130.
- [20] CAI bin, CHEN Degui, LI Zhipeng. Simulation and experiments on internal arcing faults in MV metal-clad switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 3(3): 82-87.
- [21] RONG Mingzhe, LI Mei, WU Yi, et al. 3-D MHD modeling of internal fault arc in a closed container[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1220-1227.
- [22] WU Yi, RONG Mingzhe, YANG Fei, et al. Experimental and theoretical study of internal fault arc in a closed container[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 12(11): 1873-1886.
- [23] LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Analysis of pressure rise in a closed container due to internal arcing[J]. Energies, 2017, 10(3): 294-310.
- [24] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 封闭容器内部短路爆炸压力效应计算[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1065-1071.
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Pressure effect calculation of internal short-circuit arcing explosion in a closed container[J]. Explosion and Shocks Waves, 2017, 37(6): 1065-1071.
- [25] ANANTAVANICH K, PIETSCH G J. Calculation of overpressure in the surroundings of fault arcs in SF₆-air mixtures[C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Cardiff, UK: IEEE, 2008: 165-168.

- MA Jiafu, ZHANG Haijun, ZHU Sihong, et al. Gaussian model of the equivalent stiffness and damping for air spring with auxiliary chamber[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(5): 880-886.
- [15] 李 宁, 王 东, 王 宇, 等. 曲线拟合算法对光纤光栅传感解调性能的影响研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(5): 711-714. .
- LI Ning, WANG Dong, WANG Yu, et al. Research on influence of curve fitting algorithm on demodulation performance of fiber bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(5): 711-714.
- [16] LI SH, ZHOU M, YANG Y. Broken wires diagnosis method numerical simulation based on smart cable structure[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(4): 366-372.
- [17] TENG W, CHENG H, DING X, et al. DNN-based approach for fault detection in a direct drive wind turbine[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(10): 1164-1171.
- [18] WANG H L, ZHOU G B. State of charge prediction of supercapacitors via combination of Kalman filtering and back-propagation neural network[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 588-594.
- [19] BACN P D, KIM J. Non-mutually exclusive deep neural network classifier for combined modes of bearing fault diagnose[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1129.
- [20] 谢 敏, 吴亚雄, 闫圆圆, 等. 基于改进动态自适应模糊 Petri 网与 BP 算法的电网故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3009-3017.
- XIE Min, WU Yaxiong, YAN Yuanyuan, et al. Power system fault diagnosis based on improved dynamic adaptive fuzzy Petri nets and back propagation algorithm[J]. Processing of the CSEE, 2015, 35(12): 3009-3017.
- [21] 刘云鹏, 付浩川, 许自强, 等. 基于 AdaBoost-RBF 算法与 DSMT 的变压器故障诊断技术[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 166-172.
- LIU Yunpeng, FU Haochuan, XU Ziqiang, et al. Transformer fault diagnosis technology based on AdaBoost-RBF algorithm and DSMT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 166-172.
- [22] 陈敬德, 高兆丽, 罗林根, 等. 基于 BP 神经网络的特高频局部放电定位误差分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 2040-2047.
- CHEN Jingde, GAO Zhaoli, LUO Lingen, et al. Error correction of UHF partial discharge location method based on BP network[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2040-2047.
- [23] 余 峰, 许开熙, 黄 俊, 等. 基于 BP 神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(3): 249-253.
- YU Feng, XU Kaixi, HUANG Jun, et al. Novel BP neural network model for fault diagnosis of high voltage circuit breaker[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(3): 249-253.
- 王 刚(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电器智能化技术及其应用。
- 彭彦卿(1966—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为智能控制、复杂系统的建模与优化、电力电子与电力传动。
- 庄志坚(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智能中压断路器。
- 孙利杰(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电器智能化技术及其应用。
- 熊逸伟(1991—), 男, 工程师, 本科, 研究方向为高电压设备健康诊断。

(上接第 45 页)

- [26] 严导淦. 流体力学中的总流伯努利方程[J]. 物理与工程, 2014, 24(4): 47-53.
- YAN Daogan. The total flow Bernoulli equation in fluid mechanics[J]. Physics and Engineering, 2014, 24(4): 47-53.
- [27] 张 力, 阮江军, 黄道春, 等. 双盘式线圈结构快速斥力机构设计与运动特性仿真研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 255-264.
- ZHANG Li, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on the design and movement characteristics simulation of a fast repulsion mechanism based on double-coil structure[J]. Transactions of China Electrotech-Nical Society, 2018, 33(2): 255-264.
- 吴 田(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为带电作业、输电线路外绝缘等。
- 杨 东(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 黎 鹏(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为高压电器、电工装备多物理场分析等(通讯作者)。
- 黎子晋(2000—), 男, 本科生, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 吴泳聪(1991—), 男, 博士生, 研究方向为电磁多物理场分析与高压设备状态评估。
- 方 雯(1989—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为高电压与绝缘技术。