

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.013

## 基于APDL与GUI动态电场计算方法研究

冯亮亮, 南振乐, 张延超, 王 玺

(西安西电高压开关有限责任公司, 西安 710077)

**摘要:** 开断容性电流是高压断路器一项重要而且严格考核的试验项目。由于容性开断电流非常小,灭弧室内气流状态对开断过程影响较小,开断过程可近似为空载开断。此时断路器性能主要决定于灭弧室的动态电场分布,因此计算断路器在开断容性小电流时的动态电场分布有很大的工程意义。文中结合断路器灭弧室结构特点,提出了基于APDL参数化编程为主、GUI为辅进行断路器开断容性小电流过程中动态电场的计算方法。通过研究动态电场计算数学模型、动态数据模型及电场最大值的动态提取及曲线绘制等关键技术,实现断路器灭弧室的动态电场计算和绘制关键零件电场最大值的变化曲线。通过一种典型瓷柱式断路器的灭弧室动态电场计算,获得关键零件电场最大值并绘制变化曲线,以此判断动态电场分布是否满足设计要求。该方法效率高、通用性强,对开断容性小电流的断路器设计和研发具有指导意义。

**关键词:** 容性电流; 动态电场; 断路器; 灭弧室; APDL

### Research on Dynamic Electric Field Calculation Method Based on APDL and GUI

FENG Liangliang, NAN Zhenle, ZHANG Yanchao, WANG Xi

(Xi'an XD High Voltage Switchgear Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** It is very import and severe test to switch the capacitive current for circuit breaker. Flow condition of the gas in arcing extinguishing chamber is little influence on the switching current because the capacitive switching current is too low, and the switching process can be approximately no-load condition. Therefore, it is of great engineering significance to calculate the dynamic electric field distribution of circuit breakers when switching capacitive small current. Combining the construction characteristics of the circuit-breaker, the method has been given that dynamic electric field of arcing extinguishing chamber, in the switching process the capacitive switching current, is simulated by APDL and GUI. The key technology, including simulation model for dynamic electric field, dynamic datum model, max values fetch of electric field intensity for key parts, and plotting curve by APDL and GUI, are researched. By these key technologies, it can complete dynamic electric field simulation and get the tendency of the max values of electric field intensity for key parts. Finally, there is a typical live tank circuit-breaker, as an example, by the method, it has completed dynamic electric field simulation and plotted the curve of the changes of electric field intensity for every key parts, and then it can be used to judge if it is requirement of design. This method has high efficiency and universal property; it can guide the design for high voltage circuit-breaker, especially for the circuit-breaker which need switch the capacitive switching current.

**Key words:** capacitive current; dynamic electric field; circuit-breaker; arc extinguish chamber; APDL

## 0 引言

大机组、远距离、超/特高压及交直流并用的发展,对高压开关电器提出了更高要求。高压断路器除了具有开断故障大电流的功能外,常常要开断容

性负载小电流<sup>[1-4]</sup>。开合容性负载电流时,尽管电流不大,但可能会引起严重的过电压和关合涌流,对电网造成威胁。开合容性电流成了高压断路器一项重要的、必须严格考核的试验项目<sup>[5-6]</sup>。有些容性负载开合工况,日频可达3-5次,开断容性小电流时

发生重击穿概率高,导致开断失败,研究频繁开断小电流过程中灭弧室内的电场特性具有重要意义<sup>[7]</sup>。当断路器在开断极小电流或不开断电流的情况下,断路器开断具有冷态介质恢复特性<sup>[11,8-9]</sup>。断路器开断容性小电流的情况下,可以忽略电弧对介质恢复特性的影响,近似于冷态介质恢复特性。此种情况下的开断过程中,电弧对灭弧室内气流状态影响很小,可近似认为空载开断。冷态介质恢复特性由断路器触头分闸机械特性、气体压力和灭弧室结构等因素决定<sup>[10-13]</sup>。因此在气体压力不变的情况,断路器分闸机械特性和灭弧室结构成为影响断路器开断容性小电流的决定因素。在给定分闸机械特性时,灭弧室动态电场分布就决定了断路器开断容性小电流的能力。因此对断路器灭弧室的动态电场研究具有很大的工程意义。

## 1 动态电场计算数学模型及流程

### 1.1 动态电场计算数学模型

灭弧室内的电场计算均满足 Laplace 方程及边界条件,表达式为

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 \\ \varphi|_{B_1(t)} = \varphi_1(s(t)) \\ \varphi|_{B_2(t)} = \varphi_2(s(t)) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{B_3} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\varphi$ 为电位; $j_1(s(t))-j_2(s(t))$ 为容性电流开断过程中的瞬态恢复电压  $U_c(\text{TRV})$ ;  $s(t)$ 为开断过程中不同时刻,运动部分的移动位移; $B_1(t), B_2(t), B_3$ 为静触头系统、动触头系统及其他边界。

由于灭弧室内结构复杂,边界形状不规则,电场分布很不均匀,无法用解析的方法进行计算,所以采用有限元仿真计算方法求解断路器灭弧室的动态电场分布。

### 1.2 动态电场有限元计算流程

断路器动态电场的有限元计算流程见图1。首先建立断路器灭弧室的CAD模型,去除非关键特征,合并材料属性相同的零部件,将CAD模型简化为电场计算的物理模型,为建立有限元模型提供基础。然后采用 APDL 参数化编程为主、GUI为辅的方法进行断路器灭弧室的动态电场有限元计算。包括模型导入、静止和运动部分的单元及材料定义、网格剖分、边界条件设置及求解、后处理、电场强度的读取及存储和各零件最大场强不同时刻的曲线绘制等。

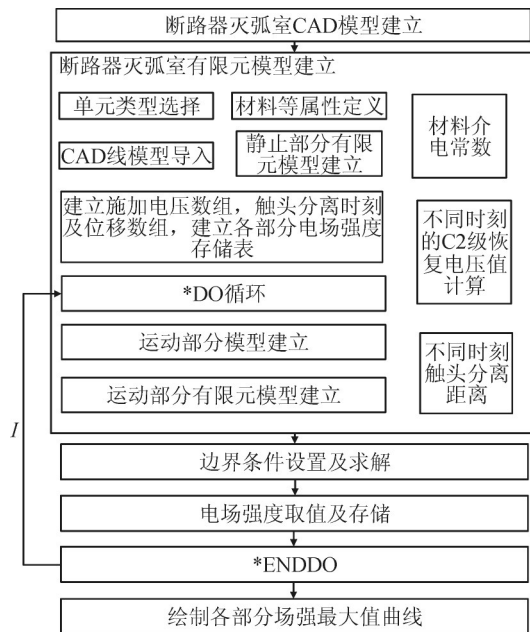


图1 断路器灭弧室动态电场有限元计算流程

Fig. 1 Flow chart of FEA for arc-extinguishing chamber of circuit-breaker

### 1.3 动态电场计算关键技术

对于只对某一时刻点进行电场计算时,模型处理和计算过程简单,无重复性工作,按照常规电场计算流程,采用GUI方式即可完成,后处理中也只需手动提取一次电场值,工作量不大。但是对于按照一定运动规律的动态电场计算,若仍按照常规计算方法手动计算,则重复性工作多,耗时长且取值不准确,工作量大。因此寻求一种高度自动化的动态电场计算方法对于灭弧室设计和研发具有重大意义。

因此,同时使用 ADPL 参数化编程语言和 GUI 的方法计算动态电场,取长补短,自动化程度高,工作量少,提高设计和研发效率。

采用该方法的动态电场计算及自动提取参数值有3个关键技术:①电场物理模型的动态运动;②电场计算边界条件的动态设置;③后处理中电场值的动态提取。

#### 1.3.1 有限元计算模型的动态运动

在动态电场计算中,建立断路器灭弧室有限元模型时,需要特殊的建模方法。首先,按照常规有限元模型建立方法对灭弧室静止部分进行建模,为了节省计算时间和降低计算负载,静止部分有限元模型建立后不再改变;其次,对于运动部分有限元模型的建立,与常规方法不同,主要有4个步骤:①按照运动的起始位置(触头分离时刻)进行建模;②将运动曲线离散化,将离散数据存储至数组中;③删除静止与运动间的连接部分,采用 APDL 命令方式添加所删除的线段,重新定义连接线;④采用 APDL

命令移动移动线命令, 且将位移数据赋予相应的命令参数。采用方法见图 2。



图 2 有限元计算模型的动态运动

Fig. 2 FES model of dynamic moving

### 1.3.2 电场边界条件动态设置

在动态电场计算中, 由于边界条件 VOLT 为容性电流开断试验的 TRV 值, 该 TRV 值随时间不断变化, 因此边界条件的设置也需要动态变化。采用方法见图 3。

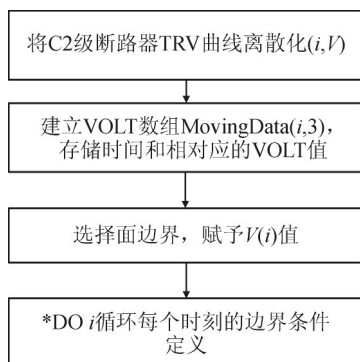


图 3 电场边界条件的动态设置

Fig. 3 Excitation dynamic sets of electric field boundary condition

### 1.3.3 电场值的动态提取

在断路器容性电流开断过程的电场分析时, 需要获得关键零件例如触头、喷口等每个时刻最大电场值随时间变化的趋势, 以便对断路器结构设计的合理性做出判断。电场值动态提取方法见图 4。

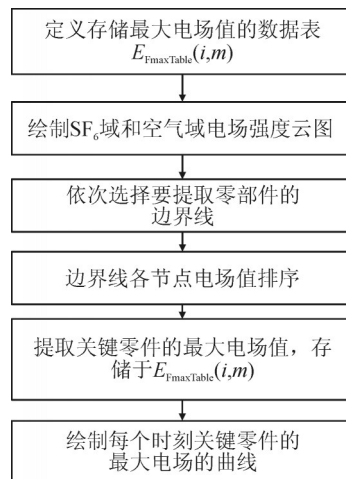


图 4 电场值的动态提取

Fig. 4 Get the electric field value

质量、传动结构和操作机构共同作用决定的。当断路器运动部件的结构、传动结构及操作机构确定后其机械特性随之确定, 机械特性为运动部分的位移时间曲线。某断路器在空载过程中, 机械特性记录仪测得的断路器运动部分的分闸机械特性曲线见图 5。

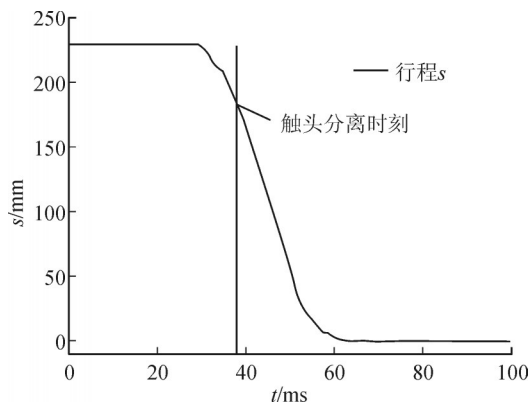


图 5 分闸机械特性曲线

Fig. 5 Mechanical characteristics for opening operation

由于容性开断电流非常小, 空载机械特性曲线可近似替代容性电流开断过程中的负载机械特性曲线。动态电场计算时, 需要将机械特性记录仪测得的特性曲线离散化, 获得触头分离时刻至  $n$  毫秒时的运动部分的运动位移。

### 2.1.2 边界条件离散值

容性电流开断过程中的动态电场计算时, 其电压值边界条件为标准规定的容性电流开断时的瞬态恢复电压值  $U_c$  (TRV 值)。标准规定<sup>[14-16]</sup>的容性电流开断时的 TRV 曲线近似为  $(1-\cos)$  曲线, 见图 6。

在开断过程中, 断路器在零秒开断 (即最短燃弧时间为 0 ms) 时, 施加图 6 的  $U_c$  电压, 相同开距下所耐受的电压值最高, 试验工况最为严酷 (试验中最短燃弧时间一般大于 0 ms)。文中计算工况为: 燃弧时间

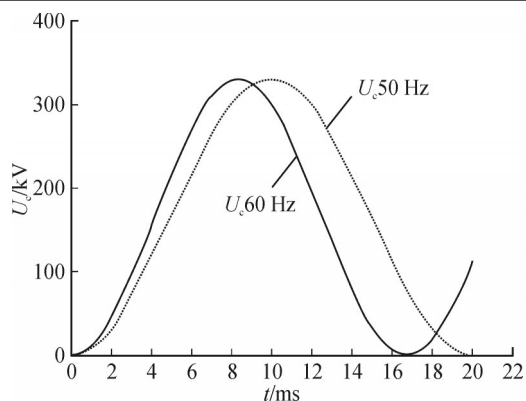
## 2 动态电场计算数据模型

动态电场计算时, 其运动特性、边界条件及电场值等数据都需要有存储媒介。在 APDL 参数化编程中, 数据存储采用数组和表的结构。

### 2.1 运动特性及边界条件动态数据结构

#### 2.1.1 机械分闸特性曲线离散

断路器的机械分闸特性由断路器的运动部件

图6 容性电流开断试验  $U_c$  曲线Fig. 6  $U_c$  curve of capacitive switching test

为 0 ms、频率选择 60 Hz(60 Hz 覆盖 50 Hz 的试验<sup>[17]</sup>)。 $U_c(t)$ 计算方法为

$$U_c(t) = \begin{cases} 0.816K_c U_r [1 - \cos(\omega t)] & t < 8.3(50 \text{ Hz})/7.3(60 \text{ Hz}) \\ 1.632K_c U_r & t \geq 8.3(50 \text{ Hz})/7.3(60 \text{ Hz}) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)<sup>[14-15]</sup>,计算从触头分离时刻即  $t_1=0$  ms 起至  $t_n$  毫秒时的  $U_c$  值,将曲线离散化。

### 2.1.3 动态数据结构

要实现动态电场计算,需将机械运动特性和边界条件的离散值存储,以便编程时赋给相应的参数。根据数据特点,选择以数组的形式存储  $n$  个时刻的离散值。建立一个  $n \times 3$  的数组结构 MovingData( $n, 3$ )。其动态数据结构见图 7。

| 行号 ↓  | $j=1$ | 2               | 3 ← 列号    |
|-------|-------|-----------------|-----------|
| $i=1$ | $t_1$ | $\Delta s_{11}$ | $U_{c11}$ |
| 2     | $t_2$ | $\Delta s_{12}$ | $U_{c12}$ |
| 3     | $t_3$ | $\Delta s_{13}$ | $U_{c13}$ |
| ⋮     | ⋮     | ⋮               | ⋮         |
| $n$   | $t_n$ | $\Delta s_{1n}$ | $U_{cn}$  |

图7 动态数组结构 MovingData( $n, 3$ )Fig. 7 Array structure of MovingData( $n, 3$ )

根据图 7 的数据结构,采用时间  $t$  将机械运动特性、边界条件的离散值关联起来。因此  $t_n$  时刻时的机械运动特性、边界条件的离散值分别存储在 MovingData( $n, 2$ )和 MovingData( $n, 3$ )中。

### 2.2 动态电场提取值的表存储结构

在进行容性电流开断能力时,其最重要的是计算在触头运动的各个时刻(位置)关键零部件上的最大场强值,比较各个时刻(位置)最大电场值变化趋势。因此获取各关键零件的最大电场值和各时刻(位置)最大电场值变化趋势十分重要。

在使用 APDL 绘制各时刻(位置)最大场强变化

趋势曲线时,数据必须存储在表结构中。因此需要建立表来存储获取的各零部件、各个时刻(位置)的最大电场值。建立一页  $n \times m$  的数据表  $E_{F\_maxTable}(n, m)$ ,其表结构见图 8。图 8 中:①和②表示标的行号和列号;③和④表示索引值。

|         | $j=0$ | 1                | 2                | ⋯ | $m$ ← ①              |
|---------|-------|------------------|------------------|---|----------------------|
| $i=0$   | $t_1$ | $E_{F\_max1t_1}$ | $E_{F\_max2t_1}$ | ⋯ | $E_{F\_maxmt_1}$ ← ② |
| 1       | $t_2$ | $E_{F\_max1t_2}$ | $E_{F\_max2t_2}$ | ⋯ | $E_{F\_maxmt_2}$     |
| 2       | $t_3$ | $E_{F\_max1t_3}$ | $E_{F\_max2t_3}$ | ⋯ | $E_{F\_maxmt_3}$     |
| ⋮       | ⋮     | ⋮                | ⋮                | ⋮ | ⋮                    |
| $n$ ↑ ③ | $t_n$ | $E_{F\_max1t_n}$ | $E_{F\_max2t_n}$ | ⋯ | $E_{F\_maxmt_n}$     |
|         | ④     |                  |                  |   |                      |

图8 动态电场提取值的表存储结构  $E_{F\_maxTable}(n, m)$ Fig. 8 Table structure of getting electric field value of  $E_{F\_maxTable}(n, m)$ 

根据表存储结构,对于第  $m$  零件、 $t_n$  时刻的最大场强值为  $E_{F\_maxm}(t_n, m)$ 。

### 2.3 动态电场计算的 APDL 整体结构

Ansys 参数化设计语言(APDL)是一种通过参数化变量方式建立分析模型的脚本语言,它用智能化分析的手段,为用户提供了自动完成有限分析过程的功能。APDL 允许复杂的数据输入,使使用者对任何涉及或分析的属性有控制权<sup>[18-19]</sup>。APDL 较 GUI 方式,有减少大量重复工作、便于保存、与操作平台无关、不受软件版本限制等优点。但是 APDL 也有如大量的命令需要记忆和操作不直观等缺点。因此文中采用以 APDL 为主、GUI 为辅助的方式进行 APDL 的文件编写<sup>[19-21]</sup>。主要有以下特点:①采用 CAD 建模,APDL 命令导入 Ansys 的方式获得计算模型。由于断路器灭弧室的结构复杂,直接用 APDL 建模工作量大。尤其瓷套伞裙,采用 APDL 建模工作量很大;②通过 GUI 的方式建立个面域。由于直接用 APDL 建立面域需要进行线的选择,断路器灭弧室有成百上千条线段,因此直接用 APDL 建立面域工作量大,容易出错;③对于模型运动部分的运动、边界条件、电场最大值获取及曲线绘制等需要使用 APDL 编程解决,避免大量的重复性工作。动态电场计算 APDL 结构形式见图 9。

## 3 断路器灭弧室动态电场计算

### 3.1 典型瓷柱式断路器灭弧室电场 CAD 模型

典型瓷柱式断路器灭弧室主要由静侧支持件、静主触头、静弧触头、喷口、动主触头、动弧触头、动

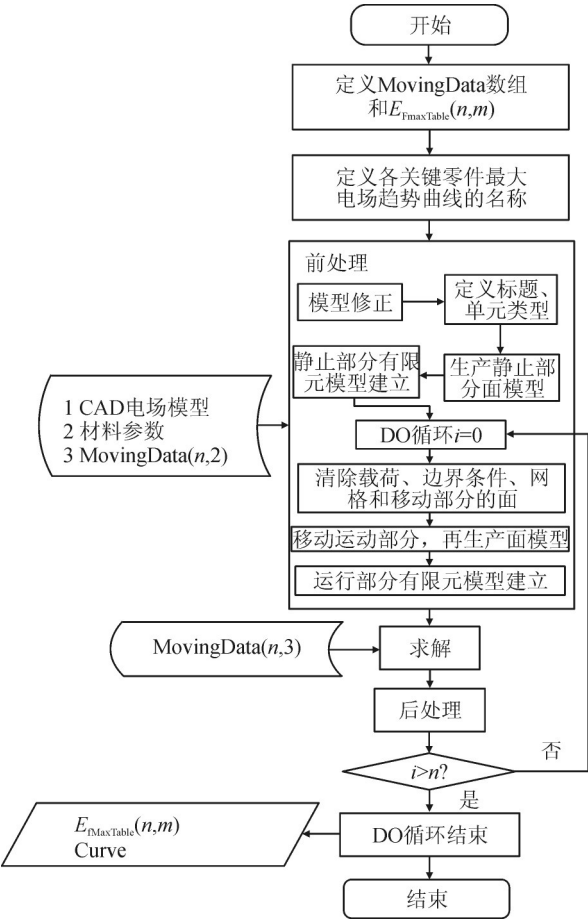


图9 动态电场 APDL 结构计算流程

Fig. 9 Flow chart of dynamic electric field calculation  
侧支持件、套管部分组成。在电场计算时将相同材料的零部件进行合并简化,添加空气域,获得断路器灭弧室的电场模型。典型的柱式断路器灭弧室的电场CAD模型见图10。

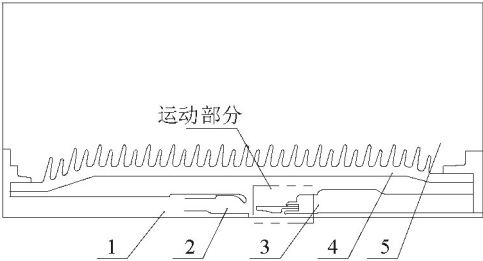


图10 典型瓷柱式断路器灭弧室电场 CAD 模型

Fig. 10 CAD electric model of typical live tank circuit-breaker

图10中:1表示静触头部分;2表示SF<sub>6</sub>域;3表示动触头部分;4表示套管;5表示空气域;双点划线中的部分为运动部分,运动部分按S(i,y)规律运动。在进行电场计算时,需要将运动部分移动至触头刚分离时刻的位置。

3.2 典型瓷柱式断路器灭弧室电场有限元模型

3.2.1 单元类型及材料属性

瓷柱式断路器灭弧室结构为同心圆柱结构,关

于中心轴对称,因此电场模型采用平面2D的1/2灭弧室模型,提高计算效率。其单元类型选择2D四边形单元PLANE121单元,单元行为K3设置为轴对称。其各部分材料参数见表1。

表1 材料参数

Table 1 Material parameter set

| 材料类型               | PERX               | 区域                |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| 金属区域               | 1×10 <sup>10</sup> | 静触头部分、动触头部分       |
| 喷口区域               | 2.300 0            | 喷口部分              |
| 瓷套                 | 5.500 0            | 套管部分              |
| SF <sub>6</sub> 气体 | 1.002 1            | SF <sub>6</sub> 域 |
| 空气                 | 1.000 5            | 空气域               |

3.2.2 边界条件及运动特性离散化

根据式(2)计算t=0~10 ms的电压U<sub>c</sub>值和根据分闸机械特性曲线取的触头分离时刻起至10 ms、每1 ms间隔的动触头运动位移见表2。

表2 离散数据表

Table 2 Discredited data

| 触头分离时间/ms | 触头分离距离/mm | 施加电压(动侧)/kV |
|-----------|-----------|-------------|
| 0         | 0.00      | 0.00        |
| 1         | 4.65      | 11.61       |
| 2         | 9.42      | 44.81       |
| 3         | 14.77     | 94.95       |
| 4         | 20.37     | 155.00      |
| 5         | 26.29     | 216.55      |
| 6         | 32.11     | 270.98      |
| 7         | 38.03     | 310.65      |
| 8         | 43.70     | 331.40      |
| 9         | 49.26     | 331.40      |
| 10        | 54.46     | 331.40      |

3.3 灭弧室动态电场计算 APDL 编写

根据动态电场计算的 APDL 整体结构编写图 10 典型瓷柱式高压断路器灭弧室电场的动态计算 APDL 文件。

3.4 计算结果

将 APDL 文档读入 Ansysys 软件中,自动计算各个时刻(0~10 ms)的电场,其中 7 ms 时刻的电场分布见图 11。

通过自动提取间隔 1 ms 时刻关键零件表面电场的最大值,同时将这些最大值存储到表中,绘制每个关键零件、间隔 1 ms 时刻的电场最大值变化曲线,见图 12。

根据工程经验,气压为 0.5 MPa 时,灭弧室关键零部件在每个时刻的电场最大值不超过 29 kV/mm,认为该灭弧室结构的电场分布满足开断要求。根

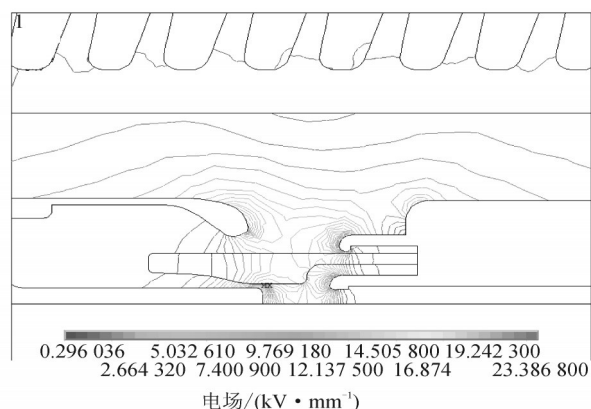


图11 7 ms时刻的电场分布

Fig. 11 The electric field distribution at 7 ms

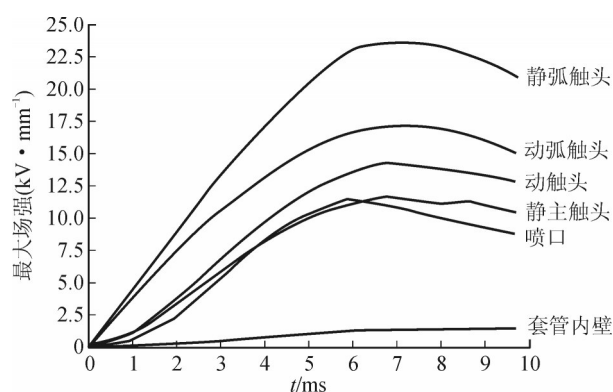


图12 不同时刻各零件最大场强值变化曲线

Fig. 12 Max electric field tendency curve of key parts in difficult time

据计算,该典型柱式断路器在计算容性电流开断过程中在0~10 ms内电场最大值小于24 kV/mm,满足工程要求并且具有一定裕度。该典型瓷柱式断路器已通过了C2级容性电流开合试验。

#### 4 结语

对基于APDL与GUI动态电场计算关键技术和数据结构进行的研究,形成了动态电场计算的整体结构形式。根据APDL与GUI的动态电场计算的整体结构形式,以典型瓷柱式断路器灭弧室结构为实例,编写了APDL计算文件并计算(0~10 ms)的电场分布,获得间隔1 ms时刻、关键零件的电场最大值并绘制在间隔1 ms时刻的电场最大值变化曲线。根据工程经验判据,对该典型瓷柱式断路器灭弧室开断容性电流能力进行评估和试验验证。验证了该方法具有工程指导意义。

#### 参考文献:

[1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 第2版. 北京:机械工业出版社,2011.

LIN Xin. The modern high voltage electrical technology[M]. 2nd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.

[2] 严 璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 第3版. 北京:中国电力出版社,2002.

YAN Zheng, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[3] 黎 斌. 高压电器设计[M]. 第4版. 北京:机械工业出版社,2015:350-353.

LI Bin. SF<sub>6</sub> high-voltage electrical design[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015:350-353.

[4] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 第3版. 北京:高等教育出版社,2016.

NI Guangzheng. Principle of engineering electromagnetic field[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2016.

[5] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000:177-180.

XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. The principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000:177-180.

[6] 刘 朴,刘 平,黄 实,等. 特高压断路器容性电流开合合成试验方法研究[J]. 高压电器,2014,50(5):87-98.

LIU Pu, LIU Ping, HUANG Shi, et al. Research of synthetic test method of capacitive current switching test for UHV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 87-98.

[7] 王 亮,林 莘. SF<sub>6</sub>断路器开断小电流介质临界击穿电压数值模拟计算分析[C]//输变电年会. 上海,中国:中国电工技术学会,2012:89-94.

WANG Liang, LIN Xin. Numerical simulation analysis of the small current media critical breakdown voltage on SF<sub>6</sub> circuit breaker[C]//Transmission Annual Meeting. Shanghai, China: CES, 2012: 89-94.

[8] 林 莘,吕祥鹏,韩书漠. SF<sub>6</sub>断路器空载开断的气压特性测试与研究[J]. 电工技术学报,2008,23(7):51-55.

LIN Xin, LYU Xiangpeng, HAN Shumo. Testing Investigations of pressure feature of no-load interrupting in SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2008, 23(7):51-55.

[9] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京:中国电力出版社,2008:33-37.

LIU Zhenya. over-voltage and insulation coordination of UHV AC transmission system[M]. Beijing: China Electric Power Publishing Press, 2008:33-37.

[10] 林 莘,狄 谦,韩书漠. 252 kV SF<sub>6</sub>断路器灭弧室压力特性试验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):130-135.

LIN Xin, DI Qian, HAN Shumo. Computation and experimental research of pressure character for 252 kV SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15):130-135.

[11] 林 莘,刘克彬,狄 谦. 智能式SF<sub>6</sub>断路器压力特性理论计算与实验研究[J]. 中国电力,2007,40(11):57-61.

- LIN Xin, LIU Kebin, DI Qian. Theoretical calculation of pressure characteristics of intelligent SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Electric Power, 2007, 40(11):57-61.
- [12] 韩雪岩, 林 莘, 王 雷. 自能式 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室电场计算[J]. 沈阳工业大学学报, 2003, 25(5):398-400.  
HAN Xueyan, LIN Xin, WANG Lei. Calculation of electrical field for an auto-expansion type SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2003, 25(5): 398-400.
- [13] 林 莘, 王飞鸣, 刘卫东, 等. 高压 SF<sub>6</sub> 断路器冷态介质恢复特性试验研究[J]. 中国电机工报, 2016, 36(14): 3973-3980.  
LIN Xin, WANG Feiming, LIU Weidong, et al. Experiment researches on cold state dielectric recovery characteristics in high voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):3973-3980.
- [14] High-voltage switchgear and controlgear - Part 101: Synthetic testing: IEC 62271-100:2017[S]. 2017.
- [15] High-voltage switchgear and control gear-part 100: Alternating-current circuit-breakers: IEC 62271-100:2012[S]. 2012.
- [16] High-voltage switchgear and control gear-Part 1: Common specifications: IEC 62271-1:2012[S]. 2012.
- [17] Guide to the interpretation of high-voltage switchgear and control gear-Part 100: Alternating-current circuit breakers: IEC 62271-100:Ed. 2. 0:2008[S]. 2008.
- [18] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. Ansys 参数化编程与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- GONG Shuguang, XIE Guilan, HUANG Yunqing. Ansys parameter programming and commands manual[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016.
- [19] 高长银, 张心月, 刘鑫颖, 等. Ansys 参数化编程命令与实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.  
GAO Changyin, ZHANG Xinyue, LIU Xinying, et al. Ansys parameter programming commands and detailed annotation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [20] 徐东捷, 马爱清, 张周胜, 等. 基于 APDL 的特高压直流输电线路标称场强数值计算分析[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(2):109-112.  
XU Dongjie, MA Aiqing, ZHANG Zhousheng, et al. Analysis and calculation of nominal field strength of UHVDC transmission line based on APDL[J]. Journal of Shanghai University of Electrical Power, 2015, 31(2): 109-112.
- [21] 牛文豪, 张国强, 龙世熠, 等. 基于 APDL 语言的电力线自动绘制软件的开发及其应用[J]. 变压器, 2016, 53(3):12-15.  
NIU Wenhao, ZHANG Guoqiang, LONG Shiyi, et al. Development and application of automatic software for electric force lines plotting based on APDL[J]. Transformer, 2016, 53(3):12-15.
- 冯亮亮(1984—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为高压电气设备研发。
- ~~~~~
- (上接第 84 页)
- 号频谱特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(11):3849-3857.  
YE Haifeng, QIAN Yong, WANG Hongbin, et al. Spectrum characteristics of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3849-3857.
- [15] 王有元, 李寅伟, 陆国俊, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(07): 1683-1688.  
WANG Youyuan, LI Yanwei, LU Guojun, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7):1683-1688.
- [16] 律方成, 李海德, 王子建, 等. 基于 TEV 与超声波的开关柜局部放电检测及定位研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(11):73-78.  
LYU Fangcheng, LI Haide, WANG Zijian, et al. Research on partial discharge detection and location of switchgear based on TEV and ultrasonic wave methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(11):73-78.
- [17] 陈庆祺, 张伟平, 刘勤锋, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压的分布特性研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10):88-93.  
CHEN Qingqi, ZHANG Weiping, LIU Qinfeng, et al. Research of transient earth voltage distribution characteristics by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10):88-93.
- [18] 秦爱华, 王荣扬, 罗春潇. 基于 ZigBee 的高压开关柜温度监控系统设计[J]. 电气自动化, 2015, 37(1):52-54.  
QIN Aihua, WANG Rongyang, LUO Chunxiao. Design of a ZigBee-based temperature-monitoring system for high-voltage switch cabinets[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 52-54.
- [19] 刘云鹏, 王会斌, 王 娟, 等. 高压开关柜局部放电 UHF 在线监测系统研究[J]. 高压电器, 2009, 45(1):15-17.  
LIU Yunpeng, WANG Huibin, WANG Juan, et al. Research on on-line partial discharge UHF monitoring system for high voltage switchboard[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1):15-17.
- [20] 杨善林, 倪志伟, 赵 鹏, 等. 机器学习与智能决策支持系统[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
YANG Shanlin, NI Zhiwei, ZHAO Peng, et al. Machine learning and intelligent decision support system[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- 延 野(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 钱 勇(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为输变电设备状态监测与智能化。