第 50 卷 第 2 期：570-578 高电压技术 Vol.50, No.2: 570-578
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230373

金属罐体对真空灭弧室内部电场分布的影响

李 烁[1]，修士新[1]，贾申利[1]，罗海洋[2]，田志强[2]，陈军平[2]
（1. 西安交通大学电气工程学院，西安 710049；2. 成都旭光电子股份有限公司，成都 610500）

摘 要：利用真空开断技术以及环保气体绝缘技术开发罐式真空断路器是高压真空断路器的一个重要发展方向。为此，建立了 126 kV 单断口真空灭弧室以及罐式断路器的电场仿真模型，分别从触头表面电场分布、触头间隙有效击穿面积以及内部电场分布对称性三个方面，探究了布置在金属罐中的真空灭弧室内部电场的变化。结果表明，金属罐体引起真空灭弧室内部动、静两侧的电场分布不对称，出现高电位侧电场强度增大，而低电位侧电场强度减小的情况。针对这一情况，建立等效电路模型，从电路层面分析。结果表明，对地杂散电容增大引起了主屏蔽罩的电位降低。进一步地，通过将主屏蔽罩电位设置为一系列的固定值，研究了主屏蔽罩电位对于真空灭弧室内部电场分布的影响。当控制主屏蔽罩电位相同时，布置在金属罐中的真空灭弧室与单个真空灭弧室相比，两者内部电场分布基本一致，这为罐式断路器中的真空灭弧室内部电场的优化提供了参考。

关键词：高压真空灭弧室；气体绝缘开关设备；电场仿真；等效电路；主屏蔽罩电位

Influence of Metal Tank on the Internal Electric Field Distribution of Vacuum Interrupter

LI Shuo[1], XIU Shixin[1], JIA Shenli[1], LUO Haiyang[2], TIAN Zhiqiang[2], CHEN Junping[2]
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Chengdu Xuguang Electronics Co., Ltd., Chengdu 610500, China)

Abstract: The development of tank vacuum circuit breaker based on vacuum breaking technology and environmental protection gas insulation technology is an important direction for the development of high-voltage vacuum circuit breaker. In this paper, an electric field model of 126 kV single-break vacuum interrupter and tank circuit breaker is established. The changes of the electric field inside the vacuum interrupter in the tank were explored from three aspects: electric field distribution on the con-tact, effective area of the contact, and symmetry of electric field distribution. The results show that the electric field distribution on the moving and fixed sides of the vacuum interrupter is asymmetrical in the tank, and the electric field strength on the high potential side increases and the electric field strength on the low potential side decreases. In view of this situation, an equivalent circuit model is established to analyze from the circuit level. The results show that the increase of stray capacitance to ground causes the potential of the main shield to decrease. Furthermore, by setting the potential of the main shield to a series of fixed values, the influence of the potential of the main shield on the electric field distribution inside the vacuum interrupter was studied. When the potential of the main shield is the same, the internal electric field distribution of the vacuum interrupter in the metal tank and the single vacuum interrupter is basically the same, which provides a reference for the optimization of the internal electric field of the vacuum interrupter in the tank circuit breaker.

Key words: high voltage vacuum interrupter; gas insulated switchgear; electric field simulation; equivalent circuit; main shield potential

0 引言

SF_6 气体是一种具有强温室效应的气体，随着《京都议定书》的出台以及我国“双碳”目标的提出，开发能够替代 SF_6 开关的环境友好型开关成为国内外研究的热点[1-5]。采用真空灭弧室作为开断单元+环保气体作为绝缘介质的技术路线具有很好的应用前景[6]。真空断路器和以真空灭弧室作为开断单元的气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)，具有对环境影响小、易于维护、体积小等优点[7]，已经在中压领域得到了广泛应用，并且不断

基金资助项目：中国南方电网公司科技项目（080037KK52200020/GZHKJXM-20200086）。
Project supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (080037KK52200020/GZHKJXM20200086).

向着更高电压等级发展[8-10]。

目前，环保型绝缘气体的相关研究取得较大突破，N_2和压缩空气已经被用作中压开关设备中的绝缘气体[11-13]。基于真空开断+洁净空气的技术路线，西门子公司就曾开发出72.5 kV的blue GIS产品[6]。这种采用洁净空气作为绝缘介质、利用真空灭弧技术实现开断的环保型高压组合电器可实现完全无氟化，并且具有占地面积小的优点，满足新一代高压变电站的需求，具有可观的发展前景[14]。

真空灭弧室是真空断路器的核心部件之一，确保其在开断状态下有足够的绝缘强度是研发高压真空断路器需要考虑的一个重要方面。一般来说，当电压等级≤100 kV 范围时，真空灭弧室的绝缘设计主要考虑解决其内部电场均匀分布的问题[15-16]，因此，如何使真空灭弧室内部电场均匀分布是重要的研究课题。真空灭弧室内部电场分布主要与其内部几何结构有关[17]，通过合理配置屏蔽罩的形状、采用多重悬浮屏蔽罩技术可实现对真空灭弧室内部电场的优化[18-21]。对于上述优化电场的措施，其本质上是通过改变真空灭弧室内部多导体系统的电容分布，进而改变电位分布。但是，罐式断路器由于罐体接地，真空灭弧室内部各导体对地电容会明显增大，这会对真空灭弧室内部电场分布产生影响。因此，有必要探明金属罐体对于真空灭弧室内部电场分布的具体影响以及引起真空灭弧室内部电场分布发生变化的关键因素。

基于上述背景，本文建立了126 kV三相共罐式真空断路器的电场仿真模型，对比分析了将真空灭弧室布置在金属罐体中灭弧室内部电场分布发生的变化。针对这一变化，建立等效电路模型并计算出各等效电容的参数，从电路层面分析引起灭弧室内部电场分布变化的原因；基于等效电路模型的分析结果，进一步研究了真空灭弧室主屏蔽罩的电位对于其内部电场的影响，提出了真空灭弧室内部电场优化的新思路。上述工作可以为真空开断型高压组合电器的绝缘设计提供参考。

1　基于电场仿真的对比分析

1.1　电场仿真模型

为确保计算结果接近实际情况，均采用三维模型进行仿真分析，考虑到本文主要探究金属罐体对真空灭弧室内部电场的影响，并且触头开槽对远离触头区域的电场以及触头电场整体分布趋势影响较小，本文触头进行了合理简化。

图1为简化后的126 kV单断口真空灭弧室三维几何模型，其中主要尺寸如下：触头直径为130 mm，触头开距为60 mm，真空灭弧室的高度为750 mm。进一步建立了三相共罐式真空断路器的几何模型，如图2所示，将三相真空灭弧室按照品字形布置在金属罐体中，罐体内部采用干燥的压缩空气作为绝缘介质。

图2中各部件的材料为：金属罐体，各屏蔽罩以及波纹管(不锈钢)，罐体内部母线等导电部件(铜)，触头(铜铬合金)，瓷壳(氧化铝陶瓷)，绝缘支撑、绝缘拉杆以及GIS盆式绝缘子—环氧树脂。

基于图1和图2所示的几何模型，分别建立电场仿真模型。

1）单个真空灭弧室

即未将真空灭弧室布置在金属罐体中的仿真模型，对应于图1所示的几何模型。真空灭弧室实

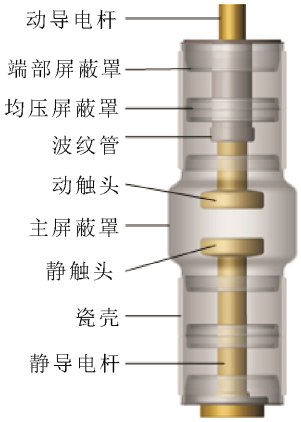


图1　126 kV真空灭弧室

Fig.1　126 kV vacuum interrupter

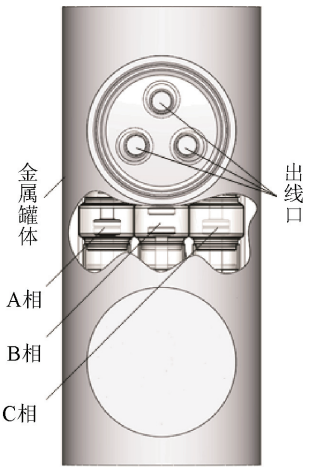


图2　三相共罐式真空断路器

Fig.2　Three-phase common tank vacuum circuit breaker

际工作在工频电压下，并且运行中可能受雷电冲击以及内部暂态过电压 TRV 的影响，但是在这些工况下，内部场强最大值是在断口间的电压处于峰值时刻达到的[22]，考虑最严苛的情况，施加电压按雷电冲击电压的峰值确定。将真空灭弧室的动导电杆以及与之相连的金属部件的电势设置为 653 kV，静导电杆以及与之相连的金属部件的电势设置为 0 V。主屏蔽罩以及均压屏蔽罩处于悬浮电位，边界条件设置为无限远处的电势等于零[23]。

2）三相共罐式真空断路器

即将三相真空灭弧室布置在金属罐体中的仿真模型，对应于图 2 所示的几何模型。A 相和 C 相真空灭弧室的触头为闭合状态，其电势设置为 0 V；B 相真空灭弧室触头为打开状态，其激励条件与单个真空灭弧室仿真模型保持一致；均压屏蔽罩以及主屏蔽罩分别设置为悬浮电位；罐体设置为接地。

1.2 电场分布情况

对上述电场仿真模型进行求解，真空灭弧室内部三维电场强度分布如图 3 所示。可以看出，对于未放置于金属罐体里的单个真空灭弧室，其内部电场强度较大的地方主要存在于触头正面的边缘处，电场强度最大为 24.4 kV/mm，位于静触头正面的边缘。而对于被布置在金属罐里的真空灭弧室，最大电场强度则为 30.5 kV/mm，位于动触头正面的边缘。此外，屏蔽罩表面电场强度较大的地方主要集中于圆弧卷边处。有罐体存在时，主屏蔽罩以及动侧均压屏蔽罩的圆弧卷边处的最大电场强度分别由 13.4、6.63 kV/mm 增加至 18.2、12.0 kV/mm，而静侧均压屏蔽罩的圆弧卷边处电场强度最大值则由 6.65 kV/mm 减小至 3.41 kV/mm。

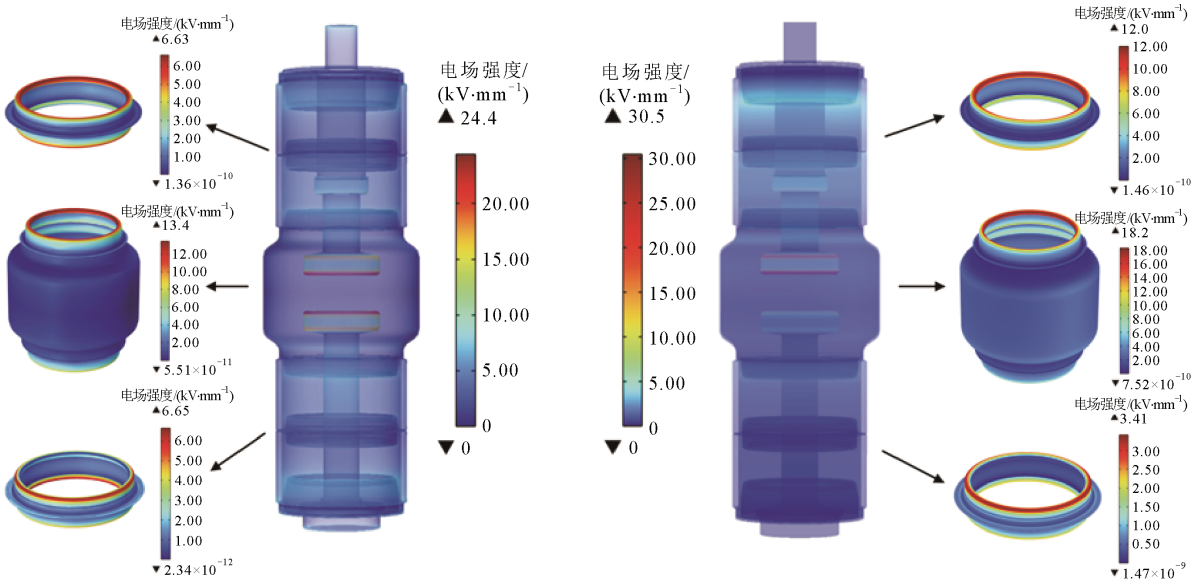
图 4、图 5 为瓷壳内、外表面的沿面切向电场的分布情况，图中的数值均表示切向电场的模值。从图中可以看出，无罐体时，沿面切向电场较大的区域主要分布于第 II、III 段瓷壳，并且瓷壳内表面上的切向场强最大值位于主屏蔽罩的圆弧卷边附近，其值为 2.0 kV/mm，瓷壳外表面上切向场强最大值比内表面略低 0.2 kV/mm。但当存在金属罐体时，第 I 到 IV 段瓷壳上的沿面切向电场分布的均匀性明显下降，切向电场较大的区域主要集中于第 I 段瓷壳表面上，并且沿瓷壳内表面切向场强的最大值由无罐体时的 2.0 kV/mm 增大到 3.2 kV/mm。

1.3 结果分析

1.3.1 触头表面电场强度分布曲线

以图 6 所示意的触头中心到触头背部的沿面距离为横坐标，触头表面对应处的电场强度为纵坐标，分别绘制出有罐体和无罐体 2 种情形下动、静触头表面电场强度的分布曲线，如图 7 所示。

从图 7 可以看出，一方面，对于未布置在金属罐体中的单个真空灭弧室，其动、静触头表面的电场强度分布基本一致；但对于布置在金属罐体中的真空灭弧室，其动触头表面的电场强度明显比静触头高，尤其在触头正面边缘处，电场强度的差值可



(a) 无罐体　　(b) 有罐体

图 3　有、无金属罐体情况下真空灭弧室内部场强分布

Fig.3　Distribution of electric field inside vacuum interrupter with and without metal tank

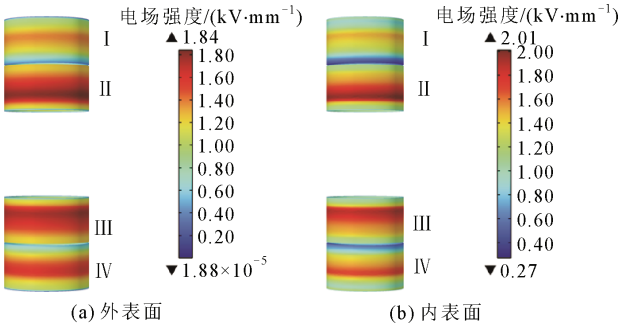


图 4　瓷壳表面切向电场分布(无罐体)

Fig.4　Tangential electric field distribution on the surface of the porcelain shell (without tank)

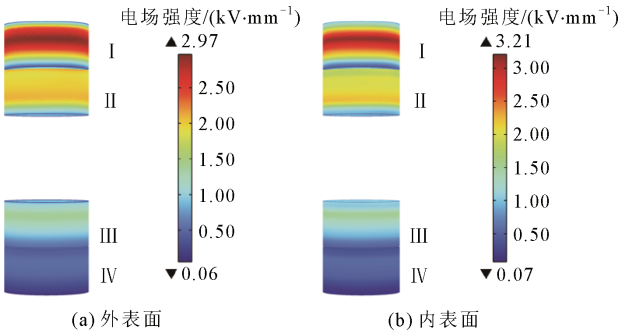


图 5　瓷壳表面切向电场分布(有罐体)

Fig.5　Tangential electric field distribution on the surface of porcelain shell (with tank)

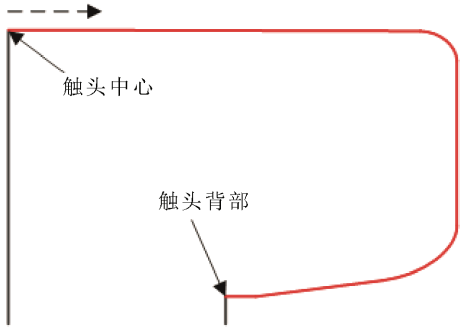


图 6　触头中心到触头背部的沿面距离示意图

Fig.6　Distance along the surface from the center of the contacts to the back of the contacts

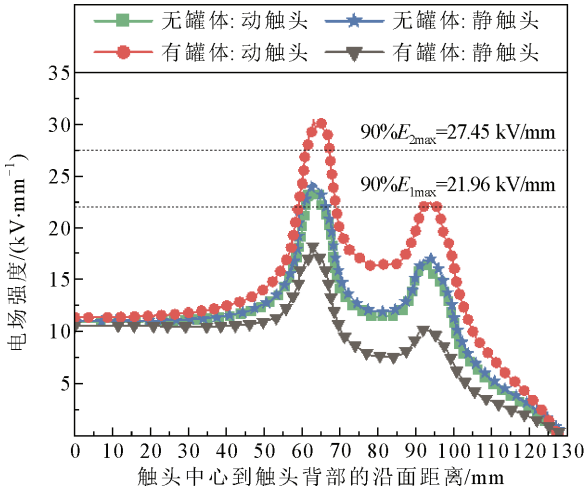


图 7　有、无罐体时触头表面电场强度分布对比

Fig.7　Comparison of electric field strength on contacts sur-face with and without tank

达 12.3 kV/mm。另一方面，金属罐体的存在使得动触头表面的电场强度增加，静触头表面的电场强度减小，其中触头正面边缘处的电场强度变化幅度最大：动触头正面边缘处的电场强度由 24.1 kV/mm 增加到 30.5 kV/mm，而静触头正面边缘处的电场强度则由 24.4 kV/mm 减小到 18.2 kV/mm。

上述变化均是基于动触头为高电位时仿真得到的，笔者根据原有的仿真模型，将静触头设置为高电位，再次仿真分析。结果显示，金属罐体的存在使得静触头表面的电场强度增加，而动触头表面的电场强度减小。

上述分析表明将真空灭弧室布置在金属罐体中会造成动、静触头表面电场强度分布不对称，具体表现为阳极触头表面的电场强度增大，而阴极触头表面的电场强度减小。

1.3.2　触头间隙的有效击穿面积

有相关研究指出，真空中触头间隙的击穿通常发生在电场强度大于 90% 最大电场强度(即 E>90%E_{max})的区域内，这一区域的面积也被定义为有效击穿面积[24-26]。触头间隙的面积效应是真空灭弧室绝缘设计中需要考虑的一个重要因素。因此，基于电场的仿真结果，下面进一步研究金属罐体对触头间隙有效击穿面积的影响。

图 8 为触头间隙的电场分布情况，可见，无金属罐体时，触头间隙的最大电场强度 E_{1max} 出现在静触头的正面边缘处，因此，可以计算出有效击穿面积所对应的临界场强 90%E_{1max}=21.96 kV/mm。有金属罐体时，触头间隙的最大电场强度 E_{2max} 出现在动触头的正面边缘处，有效击穿面积所对应的临界场强 90%E_{2max}=27.45 kV/mm。进一步结合图 7 所示的触头表面电场强度分布曲线，可计算出 2 种情况下触头间隙的有效击穿面积区域均位于触头表面的圆弧倒角处。

有效击穿面积的计算方法如图 9 所示。图 9 中的 B 点对应触头表面的最大电场强 E_{max}，A、C 点

对应 90%E_{max}，圆弧段 ABC 对应电场强度大于 90%E_{max} 的部分。有效击穿面积即为圆弧 ABC 绕 y 轴旋转所得曲面的面积，可通过旋转曲面的计算式求得，即：

$$S = 2\pi\int_{y_1}^{y_2} f(y)\sqrt{1+(f'(y))^2}\,\mathrm{d}y \tag{1}$$

式中：S 为触头表面的有效击穿面积；y_1、y_2 分别为点 A、C 到圆弧中心的竖直距离；$f(y)$为圆弧 MABCN 段对应的曲线方程；$f'(y)$为 $f(y)$的导数。

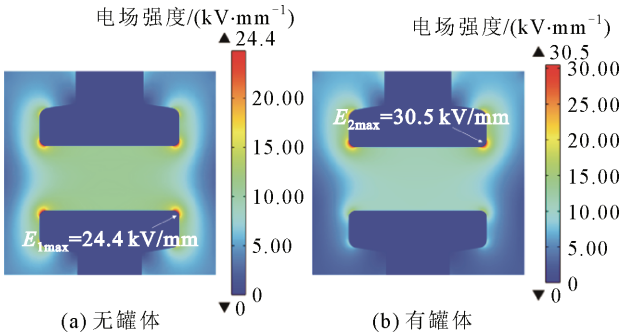
经过计算，无金属罐体时，触头间隙的有效击穿面积 S_1=261.27 mm²；有金属罐体时，有效击穿面积 S_2=292.76 mm²。这表明将真空灭弧室布置于金属罐体里不仅会引起触头表面电场强度分布不对称，也会引起触头间隙的有效击穿面积增加。此外，触头间隙的有效击穿面积增幅为 12.1%，小于触头表面最大电场强度的增幅 25.0%。

1.3.3 真空灭弧室内部电场分布的对称性分析

真空灭弧室可以看作多间隙系统，其内部的绝缘性能主要取决于 4 种绝缘间隙[27]：一是触头间隙；二是触头背部与主屏蔽罩之间的真空间隙；三是主屏蔽罩与均压屏蔽罩之间的真空间隙；四是均压屏蔽罩与端部屏蔽罩之间的真空间隙。根据临界击穿场强理论，间隙中电场强度的最大值是影响各个真空间隙绝缘强度的关键，将动触头以及与其相连的动导电系统设置为高电位进行仿真，并选取如图 10 所示的几个关键区域进行分析。

各区域内的最大电场强度如图 11 所示，结果显示，将真空灭弧室布置在金属罐体中使得灭弧室内部动侧区域(编号 1—5 以及 11)的电场强度增大，静侧区域(编号 6—10)的电场强度减小。当将动触头设置为低电位时，得到与图 11 相反的结果。这表明将真空灭弧室布置在金属罐体中造成了灭弧室内部电场强度分布的不对称，具体表现为：真空灭弧室内部高电位侧各处电场强度增大，而低电位侧各处电场强度减小。

上述分析表明，当真空灭弧内部电场分布不对称时，电场强度较大的区域主要集中于真空灭弧室的高电位侧，这种情况下，真空灭弧室内部电场分布的不均匀程度较大。而对于电场分布对称的情况，真空灭弧室的内部空间可以得到充分利用，不至于使真空灭弧室内部场强较大的区域都集中在一侧，此外，真空灭弧室内部电场强度最大值也将进一步减小。



(a) 无罐体 (b) 有罐体

图 8 触头间隙的电场分布

Fig.8 Electric field distribution of the contact gap

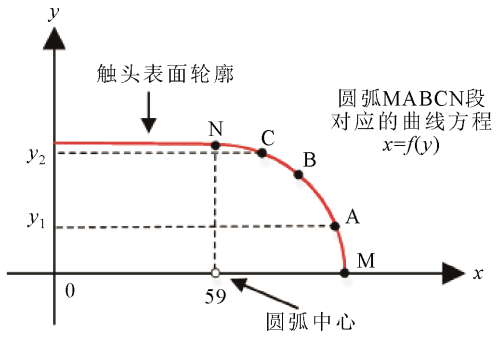
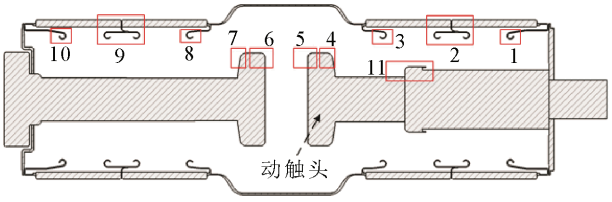


图 9 计算有效击穿面积的示意图

Fig.9 Schematic diagram of calculating the effective area



1—端部屏蔽罩(动侧)；2—均压屏蔽罩(动侧)；3—主屏蔽罩(动侧)；4—动触头背部；5—动触头正面边缘；6—静触头正面边缘；7—静触头背部；8—主屏蔽罩(静侧)；9—均压屏蔽罩(静侧)；10—端部屏蔽罩(静侧)；11—波纹管屏蔽罩

图 10 区域编号示意图

Fig.10 Diagram of area numbers

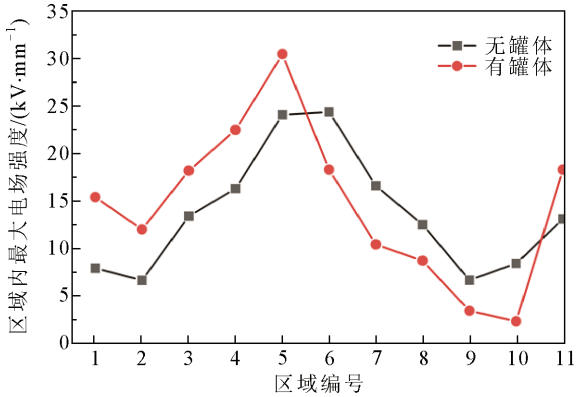


图 11 有无罐体时真空灭弧室内各区域最大电场强度对比

Fig.11 Comparison of maximum electric field strength in each area with and without tank

为表征金属罐体对真空灭弧室内部电场分布对称程度的影响，定义参数 P 进行量化分析，表示为：

$$P=1-\frac{\sum_{i=1,j=11-i}^{i=n}\left|E_{\max}^{i}-E_{\max}^{j}\right|}{n\times\max(E_{\max}^{i},E_{\max}^{j})} \tag{2}$$

式中：i、j 表示真空灭弧室动、静侧关于断口中心平面对称的一对区域的编号(如图 10 所示的区域 5 与区域 6)；n 表示对称的区域的对数；$E_{\max}^{i}$ 表示编号为 i 的区域内电场强度的最大值。

利用式(2)，可计算得到无金属罐体时的单个真空灭弧室对称性系数 P=95.6%，而布置在金属罐体中的真空灭弧室对称性系数 P=39.5%。进一步说明将真空灭弧室布置在金属罐体中，不仅引起动、静触头表面的电场强度不对称分布，也会造成灭弧室内部电场强度分布的对称程度下降，这对真空灭弧室内部绝缘强度是不利的。

2　基于等效电路模型的分析

上述基于电场仿真分析了金属罐体对真空灭弧室的内部电场分布的影响，为探究引起真空灭弧室内部电场变化的原因，现建立等效电路模型进一步分析。

根据电场强度是电位的负梯度可知，真空灭弧室内部电场的分布主要取决于其内部电位的分布，而内部电位的分布与触头的电位以及各悬浮屏蔽罩的电位密切相关。在静电场模型中，真空灭弧室可以看作是多导体系统，其内部的 1 个真空间隙对应 1 个等效电容，内部电位的分布可以通过多个真空间隙构成的电容网络体现出来。

图 1 所对应的单个真空灭弧室其等效电路如图 12 所示。其中，C_{15} 是断口间的等效电容，C_{12} 是主屏蔽罩与动触头之间的等效电容，C_{25} 是主屏蔽罩与静触头之间的等效电容，C_{14} 是动触头与动端均压屏蔽罩之间的等效电容，C_{24} 是主屏蔽罩与动端均压屏蔽罩之间的等效电容，C_{23} 是主屏蔽罩与静端均压屏蔽罩之间的等效电容，C_{35} 是静触头与静端均压屏蔽罩之间的等效电容。

将三相真空灭弧室布置在金属罐体中，等效电路则如图 13 所示，其中，C_{i0} 为导体 i 与金属罐体形成的自电容即对地电容。

基于 1.1 节建立的仿真模型，可计算出图 12 以及图 13 中各等效电容的大小，如表 1 所示。

根据表 1 中的数据，将其分别代入相应的电路模型中计算可得：对于单个真空灭弧室，其主屏蔽罩的悬浮电位 U_2=52.25%U(U 为断口间的电压)；而对于布置在金属罐体中的真空灭弧室，其主屏蔽罩的电位 U_{g2}=29.6%U。上述基于电容电路的计算结果与通过有限元仿真得到的 U_2=345 kV(52.8%U)、U_{g2}=192 kV(29.4%U)相符。

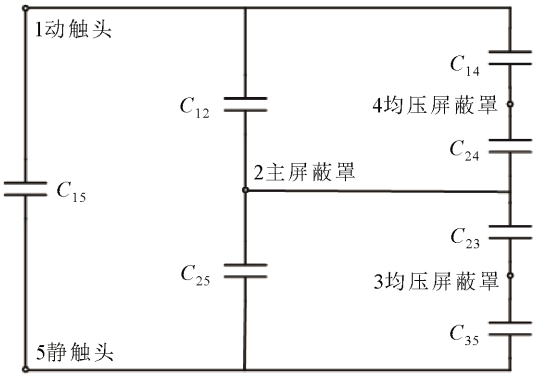


图 12　单个真空灭弧室等效电路

Fig.12　Equivalent circuit of single vacuum interrupter

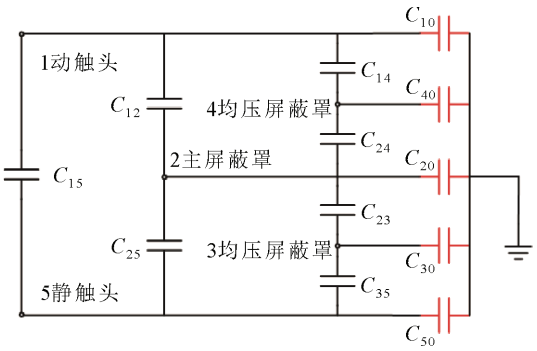


图 13　布置在金属罐体中真空灭弧室的等效电路

Fig.13　Equivalent circuit of vacuum interrupter arranged in metal tank

表 1　图 12 和图 13 电路模型中的等效电容参数

Table 1　Equivalent capacitance parameters in the circuit model of Fig.12 and Fig.13

电容	电容值/pF	
	单个真空灭弧室	布置在金属罐中
C_{12}	16.412	13.241
C_{14}	17.069	16.188
C_{15}	3.194	2.140
C_{23}	10.678	8.329
C_{24}	10.313	8.068
C_{25}	14.648	12.501
C_{35}	14.908	14.104
C_{10}	0.016	55.869
C_{20}	0.025	21.892
C_{30}	0.008	5.738
C_{40}	0.007	5.820
C_{50}	0.016	135.890

对比 2 种情况下各等效电容的参数可知：将三相真空灭弧室布置在金属罐体中，灭弧室中各金属导体之间的互电容基本不变，而灭弧室中各金属导体与地之间的自电容明显增大，即 C_{10}、C_{20}、C_{30}、C_{40}、C_{50} 由原来的 0.0156、0.025、0.008、0.007、0.016 pF 分别增加到 55.869、21.892、5.738、5.820、135.890 pF。这表明：罐体的存在使得各导体与地之间的距离大大减小，引起各导体与地之间的自电容增大，造成了真空灭弧室主屏蔽罩电位降低。

3 主屏蔽罩电位对真空灭弧室内部电场分布的影响

将真空灭弧室布置在金属罐体中会使真空灭弧室内部电场分布的对称程度降低，等效电路模型的分析表明罐体的存在引起真空灭弧室内部各导体的对地电容增大，进而造成主屏蔽罩的电位降低。为探究真空灭弧室主屏蔽罩的电位对灭弧室内部电场分布的影响，将主屏蔽罩的电位设置为一系列的固定值，进一步仿真分析。

图 14 以及图 15 分别给出了主屏蔽罩电位对真空灭弧室内部最大电场强度以及电场分布对称性的影响。可以看出，当主屏蔽罩电位为断口间电压的 50%附近时，真空灭弧室内部电场强度的最大值最小，内部电场分布的对称程度最高。

进一步仿真计算可以得到当主屏蔽罩处于不同电位时，图 10 所示的各区域内的最大电场强度。以主屏蔽罩电位为 50%U 的情况下各区域内最大电场强度为基准值，进行归一化处理，即：

$$E_i^w = \frac{e_i^w}{e_i^{50\%}} \tag{3}$$

式中：$e_i^{50\%}$ 表示主屏蔽罩电位等于断口电压的 50%时区域 i 内的最大场强，是归一化处理时的基准值；w 表示主屏蔽罩电位占断口电压的百分比；e_i^w 表示归一化前主屏蔽罩电位等于断口电压的 w 时区域 i 内的最大场强；E_i^w 表示归一化后主屏蔽罩电位等于断口电压的 w 时区域 i 内的最大场强。

图 16 给出了归一化后真空灭弧室内部各区域的最大电场强度，可以看出，随着主屏蔽罩电位占断口电压的百分比从 10%到 90%增大，高电位侧的各区域(区域编号为 1—5 以及 11)的最大电场强度逐渐减小，而低电位侧的各区域(区域编号为 6—10)的最大电场强度逐渐增大。

将三相灭弧室布置在金属罐体中的仿真模型

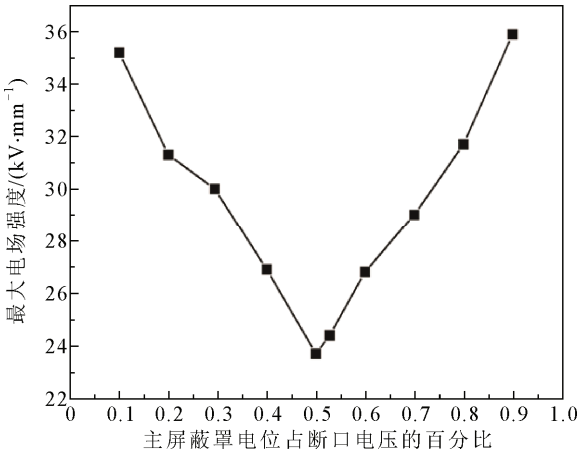


图 14 主屏蔽罩电位对灭弧室内部最大电场强度的影响

Fig.14 Effect of main shield potential on maximum electric field strength in vacuum interrupter

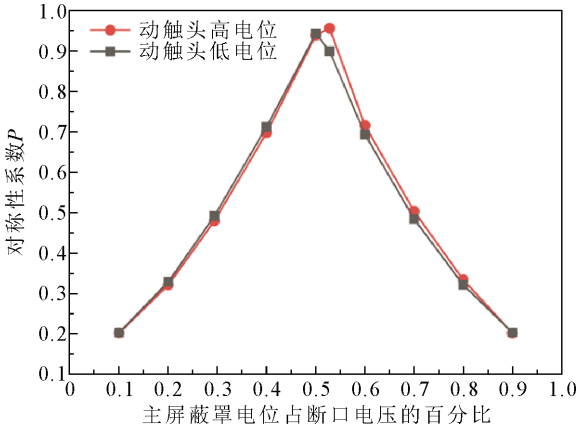


图 15 主屏蔽罩电位对灭弧室内部电场分布对称性的影响

Fig.15 Effect of main shield potential on symmetry of electric field distribution in vacuum interrupter

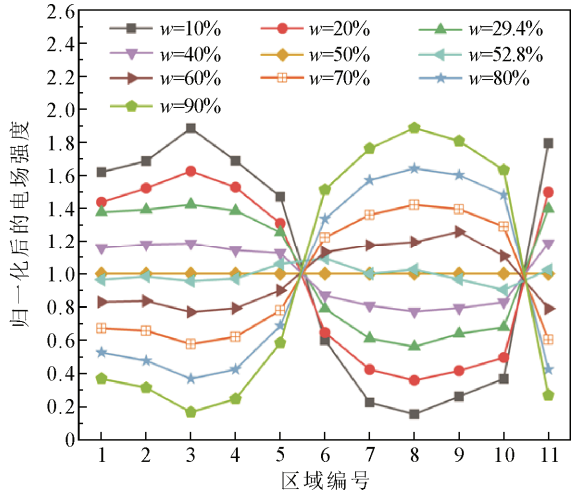


图 16 主屏蔽罩电位对各区域最大电场强度的影响

Fig.16 Effect of main shield potential on the maximum electric field strength of each area

中，B 相真空灭弧室的主屏蔽罩为悬浮电位，仿真得到的悬浮电位为 29.4%U。现基于单个真空灭弧室仿真模型，将主屏蔽罩电位设置为固定的 29.4%U 进行仿真，与真空灭弧室被布置在金属罐体中且主屏蔽罩为悬浮电位时的仿真结果对比。

图 17 为区域内的最大电场强度的对比情况。结果表明，2 种情况中相对应的各区域最大电场强度基本一致，这表明真空灭弧室主屏蔽罩的电位是影响内部电场强度的关键因素，通过控制真空灭弧室主屏蔽罩的电位可实现对内部电场调控，例如通过构造电容增大动、静触头与主屏蔽罩之间的电容或者通过设计外电路控制主屏蔽罩电位，实现将主屏蔽罩电位稳定在断口电压的 50%。

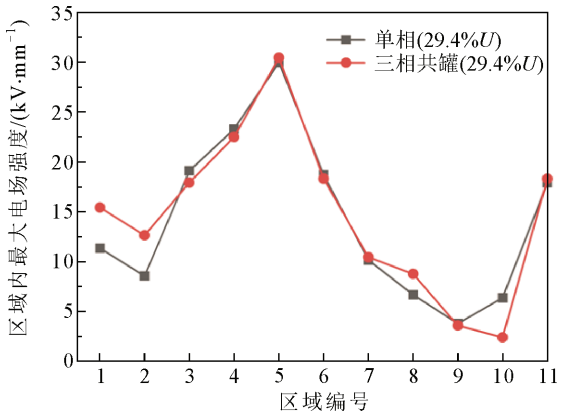


图 17　2 种情况下各区域最大电场强度对比

Fig.17　Contrast of maximum electric field strength within each region in the two cases

4　结论

1）仿真分析了 126 kV 真空灭弧室以及罐式断路器的电场分布。结果表明，罐体的存在使得真空灭弧室动、静两侧的电场分布不对称，出现高电位侧电场强度增大、而低电位侧电场强度减小的情况。并且内部场强最大值由 24.4 kV/mm 增大至 30.5 kV/mm，触头间隙的有效击穿面积由 261.27 mm^2 增大至 292.76 mm^2。

2）针对布置在金属罐体中的真空灭弧室内部电场分布的变化，建立了等效电路模型进行分析，并计算出多导体系统中各等效电容的大小。结果表明，导体与地之间形成的自电容增大引起了主屏蔽罩电位降低。

3）进一步研究了主屏蔽罩的电位对于真空灭弧室内部电场分布的影响。认为主屏蔽罩电位是影响真空灭弧室内部电场的关键因素，可以通过控制主屏蔽罩的电位来实现对罐式断路器中真空灭弧室内部电场的优化。

参考文献　References

[1] 钟建英，陈　刚，谭盛武，等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2769-2782.
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.

[2] 李德军，沈　威，KUSCHEL M，等. 一种采用洁净空气绝缘和真空灭弧技术的环境友好型 GIS 的研究和应用[J]. 高压电器，2019，55(2)：21-30.
LI Dejun, SHEN Wei, KUSCHEL M, et al. Development and application of environment-friendly GIS combined clean air and vacuum interruption technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 21-30.

[3] KATO K, KANEKO S, OKABE S, et al. Optimization technique for electrical insulation design of vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1456-1463.

[4] 田　阳，李志兵，田　宇，等. 超/特高压分接开关切换试验保护用大容量快速真空开断装置研制[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2616-2624.
TIAN Yang, LI Zhibing, TIAN Yu, et al. Development of large capacity and fast vacuum breaking device for switching test protection of UHV/EHV tap changer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2616-2624.

[5] 杨金望，谭　涛，修士新，等. 大开距条件下杯状纵磁触头间隙磁场特性[J]. 高电压技术，2023，49(7)：3125-3133.
YANG Jinwang, TAN Tao, XIU Shixin, et al. Magnetic field characteristics of cup-shaped axial magnetic field contact under the condition of large contact gap[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3125-3133.

[6] 贾申利，贾荣照，朱　璐. 真空开断型环保 GIS 发展现状及趋势[J]. 高压电器，2022，58(9)：1-12.
JIA Shenli, JIA Rongzhao ZHU Lu. Advances in the development of vacuum-based eco-friendly GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 1-12.

[7] 白志承. 有限元算法改进及中高压 C-GIS 产品设计[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2014：1-5.
BAI Zhicheng. Improvement research on FEM and design on medium and high voltage C-GIS[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2014: 1-5.

[8] NAKANO Y, SURGES B, HINRICHSEN V. Increasing the internal field strength of vacuum interrupters with vapor shield potential control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3155-3161.

[9] FALKINGHAM L T. Vacuum switchgear：past, present, and future[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan: IEEE, 2019: 788-793.

[10] SCHELLEKENS H, GAUDART G. Compact high-voltage vacuum circuit breaker, a feasibility study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3): 613-619.

[11] 李兴文，赵　虎. SF_6 替代气体的研究进展综述[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1695-1701.
LI Xingwen, ZHAO Hu. Review of research progress in SF_6 substitute

gases[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1695-1701.

[12] 颜湘莲，高克利，郑　宇，等. SF_6混合气体及替代气体研究进展[J]. 电网技术，2018，42(6)：1837-1844.
YAN Xianglian, GAO Keli, ZHENG Yu, et al. Progress of gas mixture and alternative gas of SF_6[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1837-1844.

[13] 张潮海，韩　冬，李　康，等. SF_6替代气体技术及其在GIL中的应用与发展[J]. 高电压技术，2017，43(3)：689-698.
ZHANG Chaohai, HAN Dong, LI Kang, et al. SF_6 alternative techniques and their applications and prospective developments in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 689-698.

[14] 冯俊宗，孙利雄，陈维维，等. 不同运行状态下GIS隔离开关的振动特性[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4314-4322.
FENG Junzong, SUN Lixiong, CHEN Weiwei, et al. Vibration characteristics of GIS isolating switch under different operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4314-4322.

[15] 修士新，王季梅. 发展高电压等级真空断路器的技术问题探讨[J]. 真空电子技术，1997(3)：1-7.
XIU Shixin, WANG Jimei. A study on developing high voltage vacuum circuit breakers[J]. Vacuum Electronics, 1997(3): 1-7.

[16] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试[M]. 西安：西安交通大学出版社，1993：105.
WANG Jimei. Theoretical research and test of vacuum arc[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 1993: 105.

[17] 修士新，王季梅. 关于高电压等级真空灭弧室研究与开发[J]. 高电压技术，2003，29(12)：7-9.
XIU Shixin, WANG Jimei. Research and development of the high voltage vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 7-9.

[18] CHEN H, LIU X M, JIA B Y, et al. Improved NSPSO algorithm and Its application in static insulation optimization of vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 5000704.

[19] SHEMSHADI A, AKBARI A, BATHAEE S M T. A novel approach for reduction of electric field stress in vacuum interrupter chamber using advanced soft computing algorithms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1951-1958.

[20] LEE H G, PARK J C, KANG J S, et al. Study on size reduction of 72.5kV vacuum interrupters used in metal enclosures[C]// 2014 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Mumbai, India: IEEE, 2014: 421-424.

[21] LAVRINOVICH V A, RYLSKAYA L A, SCHNEIDER A V, et al. Development of a vacuum arc extinguishing chamber for a single-break vacuum circuit breaker for 110 kV[C] // 2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Padova, Italy: IEEE, 2021: 396-400.

[22] 高有华，王尔智，李延斌. 40.5 kV真空断路器灭弧室内的暂态电场计算[J]. 电工技术学报，2004，19(4)：52-55，75.
GAO Youhua, WANG Erzhi, LI Yanbin. Calculation of transient electric field in 40.5 kV vacuum interrupter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 52-55, 75.

[23] 邱志斌，黄道春，阮江军. 72.5 kV真空灭弧室电位和电场分布研究[J]. 高压电器，2012，48(11)：36-42.
QIU Zhibin, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun. Potential and electric field distributions of 72.5 kV vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 36-42.

[24] OKAWA M, SHIOIRI T, OKUBO H, et al. Area effect on electric breakdown of copper and stainless steel electrodes in vacuum[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, 23(1): 77-81.

[25] KATO K, HAN X, OKUBO H. Insulation optimization by electrode contour modification based on breakdown area/volume effects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 162-167.

[26] SCHUMANN U, GIERE S, KURRAT M. Breakdown voltage of electrode arrangements in vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 557-562.

[27] OKUBO H. Development of electrical insulation techniques in vacuum for higher voltage vacuum interrupters[C] // 2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Matsue, Japan: IEEE, 2006: 7-12.



李　烁
1996—，男，硕士生
主要从事电器开关理论及应用方面的研究工作
E-mail: lishuo1@stu.xjtu.edu.cn

LI Shuo



修士新(通信作者)
1967—，男，博士，教授
主要从事真空电弧理论及应用、电器试验检测技术、电器仿真分析及电器新产品研发方面的研究工作
E-mail: xsx@mail.xjtu.edu.cn

XIU Shixin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-03-14　修回日期　2023-07-13　　编辑　曾文君