

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.03.014

基于拓展 Volume-Time 理论的串联空气间隙非同期 击穿过程分析

姚晓飞, 常晓雪, 丁健刚, 陈佳莉, 刘 学, 王建华,
刘志远, 耿英三

(西安交通大学电气工程学院电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 为了认识串联空气间隙的击穿过程,以球—球间隙为研究对象,设计了“非对称组合间隙”,即总间隙距离不变的条件下分别单独调整两个间隙的距离使上下间隙距离不一致。采用拓展 Volume-Time 理论计算了串联双间隙的 $U_{50\%}$,并解释了雷电冲击电压下非对称组合空气间隙的非同期击穿物理过程。实验结果表明,上下间隙距离分布不均匀程度对串联空气间隙击穿电压和击穿延时的影响;不均匀程度较大时,较低电压下存在单个间隙放电、总体不击穿的现象,较高电压下两间隙将出现非同期击穿;不均匀程度较小时,两间隙同期击穿。为了解释这种现象,文中采用拓展 Volume-Time 理论,通过确定临界体积、临界面积等关键参数来计算串联双间隙的击穿电压。并把串联双空气间隙击穿的原因解释为,空气间隙电场的有效体积与有效面积超过临界值。因此,双间隙非同期击穿的产生是由于当一个间隙达到了击穿起始条件,而另一个间隙还未达到击穿起始条件。

关键词: 双断口开关; 串联空气间隙; 雷电冲击电压; 非同期击穿特性; Volume-Time 理论

Analysis of Non-simultaneous Breakdown Process of Series Air Gap Based on Extended Volume-Time Theory

YAO Xiaofei, CHANG Xiaoxue, DING Jiangang, CHEN Jiali, LIU Xue, WANG Jianhua,
LIU Zhiyuan, GENG Yingsan

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to understand the breakdown process of air clearance in series, an ‘asymmetric combined clearance’ was designed by taking the ball-sphere clearance as the research object. In other words, under the condition of constant total clearance distance, the distances of two clearance were adjusted separately to make the distances of upper and lower clearance inconsistent. In this paper, the extended Volume-Time theory is used to calculate the $U_{50\%}$ of the tandem double clearance and explain the physical breakdown process of the asymmetric combined air clearance under lightning impulse voltage. The experimental results show that the effect of the uneven distribution of the upper and lower clearance distance on the breakdown voltage and the breakdown delay of the series air clearance is studied. When the degree of unevenness is large, the phenomenon of single gap discharge and overall non-breakdown occurs at the lower voltage, and the non-simultaneous breakdown occurs at the higher voltage. When the unevenness is small, the two gaps break down at the same time. In order to explain this phenomenon, the extended Volume-Time theory is adopted in this paper to calculate the breakdown voltage of series double clearance by determining key parameters such as critical volume and critical area. The effective volume and area of the electric field in the air gap exceed the critical value. Therefore, double-gap anchronous breakdown occurs when one gap meets the initial break-

收稿日期:2024-09-25; 修回日期:2024-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2403700); 电工材料电气绝缘全国重点实验室基金项目(EIPE22121); 直流输电技术全国重点实验室开放基金(SKLHVDC-2024-KF-10)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFB2403700), the National Key Laboratory of Electrical Materials and Electrical Insulation Fund Project(EIPE22121), the State Key Laboratory of HVDC(SKLHVDC-2024-KF-10).

down condition, while the other gap does not.

Key words: double-break circuit breaker; series air gap; lightning impulse voltage; non-simultaneous breakdown characteristics; Volume-Time theory

0 引言

串联空气间隙广泛存在于高压输变电工程中,大到带电作业检修、输电线路中的异物掉落,小到GIS中的金属微粒,在绝缘研究中均可被等效为串联空气间隙^[1-3]。了解串联空气间隙的击穿特性,具有重要的工程价值和理论意义^[4-5]。

双断口开关的出现对电力系统向更高电压等级发展具有重大意义,关于其绝缘特性、均压特性和击穿机理研究对开关电压等级和开断性能的提升具有重要意义。多断口开关的灭弧介质多采用气体介质如压缩空气、SF₆气体或者混合气体,还有少油介质和真空介质等,往往采用两个或者多个灭弧室串联而成。由于SF₆限制使用,出现了SF₆气体和其他气体如CO₂、N₂、空气等组合的多断口混合气体开关,Kameyama^[6]提出了将真空间隙和空气间隙串联组成的双断口开关;Harrold^[7]提出将油开关和真空开关串联组成混合开关;Senda^[8]将72.5 kV的SF₆气体灭弧室和15 kV的真空灭弧室串联组成混合开关,用于更高电压等级。

目前国内外对串联空气间隙的击穿特性已有较多的实验和理论研究。王胜辉^[9-10]等人实验研究了棒板电极间存在棒状金属导体时的工频击穿电压,并提出了考虑击穿过程中电压动态分配的击穿电压计算方法。Rizk^[11-12]等人研究了空气间隙中存在金属导体时的击穿现象,并给出了击穿电压的经验计算公式。Kubuki^[13-14]等人研究了针板电极中放入多种导体时的直流击穿电压,发现间隙宽度和导体形状均会对击穿产生影响。阮江军^[15-16]等人提出基于流注起始判据和基于支持向量机两种组合空气间隙击穿电压计算方法,取得了一定的效果。

相比于单一空气间隙,串联空气间隙的绝缘特性和击穿过程更加复杂,不仅要考虑各间隙自身的击穿电压,还要考虑到间隙的非同期击穿现象。断口不同步现象是真空断路器的关键问题之一。葛国伟^[17-18]等人通过设置双断口真空断路器不同距离的真空间隙和不同触头结构的灭弧室组合,得到了双断口真空断路器最佳间隙组合方案和最佳配合特性。Betz^[19-20]等人在双断口真空断路器的同步开断基础上进一步研究了非同步开断能力,通过控制上断口比下断口延迟2 ms开断,使短路电流过零时

上断口的开距小于下断口开距。

Volume-Time理论是通过讨论电场分布的时空变化来计算初始电子的产生概率的模型,最早由W. knorr^[21]等人提出,用于估算脉冲电压下气态电介质中电压时间特性,广泛应用于SF₆及混合空气在脉冲电压下的起始放电特性。而在空气长间隙区域中,该理论假设当单个电子雪崩形成流注时发生了空气击穿或者电晕放电,雪崩中的电子数到达一个临界值时满足了从雪崩到流注发展的条件。Naoki Hayakawa^[22]等人通过研究空气间隙在不同脉冲电压下的局部放电起始电压,将Volume-Time理论扩展到空气间隙中,计算任意电压波形作用下在击穿起始时延之内空气间隙初始电子生成概率。

通过以上对串联空气间隙击穿特性的分析,可以发现目前的研究主要集中在其绝缘特性和击穿统计概率特性。在击穿机理研究方面,关于串联断口中可能存在的击穿类型,非同期击穿延时与击穿电压关联性,以及非同期击穿时各个间隙之间如何互相影响等击穿机理尚不明确。因此,为控制变量、简化模型,文中在研究中搭建了相距较远的两个串联球-球间隙,文中的研究目标是采用拓展Volume-Time理论计算串联双间隙的 $U_{50\%}$,并解释雷电冲击电压下非对称组合空气间隙的非同期击穿物理过程。实验结果有助于深入理解串联空气间隙的击穿过程,揭示其击穿机理。

1 实验设置

1.1 双断口开关简化模型

文中将双断口开关简化为串联双空气间隙。这是一种最简化的双断口模型,满足以下假设:

- 1)将可动断口简化成固定间隙,不考虑开断时断口运动情况;
- 2)不考虑开断时的燃弧过程和零后暂态恢复电压(TRV)施加情况;
- 3)仅考虑双断口串联的静态绝缘问题;
- 4)将气体开关中的绝缘介质简化为标准大气压下的空气介质,该化简有利于对空气间隙进行光学观测;
- 5)双断口的断口电场为稍不均匀电场,因此文中采用间隙化简触头结构。

为避免杂散电容引起的分压不均影响实验结

果,单独研究间隙大小对击穿特性的影响,上下球隙各并联容值为 500 pF 均压电容。其中下球隙并联的均压电容替换为等效电容值为 500 pF 的分压器,实现对悬浮导体电位的测量。

将双断口开关简化为串联双空气间隙模型见图 1。可动断口简化成固定间隙,只考虑静态绝缘问题,使得模型最为简化。该模型采用“非对称组合间隙”设计,在实验中,始终保持上间隙距离 d_1 和下间隙距离 d_2 之和为 50 mm 不变。

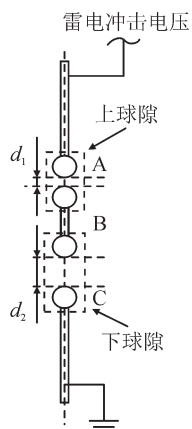


图 1 串联双间隙简化模型

Fig. 1 Simplified model of double ball gap in series

1.2 实验设置

串联双空气间隙雷电冲击电压实验等效实验电路图见图 2。图 2 中: C_1 为冲击电容; L 为线路电感; R_f 为波前电阻; R_r 为波尾电阻; C_2 为均压电容。实验中测量总电压的分压器 1 和测量下间隙电压的分压器 2 都为弱阻尼分压器。测得分压器 2 的等效电容值为 500 pF。为了使上下间隙并联件相同,上间隙并联 500 pF 均压电容。由于上间隙存在悬浮电位,用 Pearson 线圈测量下间隙电流,只有下间隙被击穿时, Pearson 线圈才会有电流流过,可以直观地判断下间隙是否发生击穿。只有上间隙被击穿或者双间隙均被击穿时,通过分压器 1、2 的电压波形即可判断。

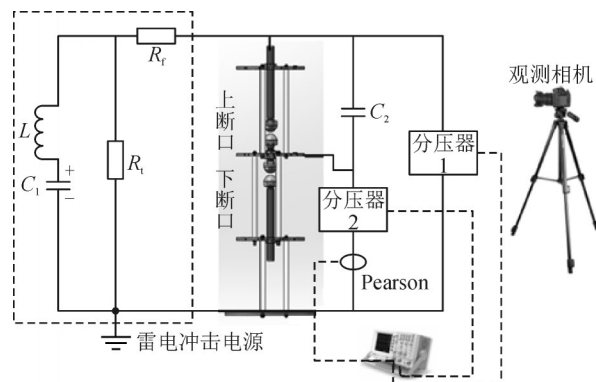


图 2 等效实验电路

Fig. 2 Equivalent experimental circuit

文中设计了“非对称组合间隙”观察串联双空气间隙的击穿类型,保持上下间隙的总距离为 50 mm 不变,上间隙的初始值为 2.5 mm,并以 2.5 mm 的步长逐渐增加至 47.5 mm,对应的,下间隙距离初始值为 47.5 mm 逐渐减小至 2.5 mm。分别进行正极性和负极性雷电冲击电压实验。在上下间隙分压极不均匀的情况下,两间隙的击穿电压差别较大,串联双空气间隙会出现较小间隙先被击穿的现象,因此先控制施加电压为小距离间隙击穿电压值附近,再逐步增加电压至串联双空气间隙均击穿,观察上下空气间隙的分布对击穿的影响。

实验中击穿发光现象用佳能 EOS-80D 相机记录,相机曝光时间设置为 4 s,分辨率为 6 000×4 000,拍摄时距离试品 3 m。实验室内为标准大气压环境,压强范围为 101.1~101.3 kPa,室内相对湿度为 60%~70%,室内温度为 0~3 ℃。

采用恒压升降法得到串联双间隙的 50% 雷电击穿电压 $U_{50\%}$ 。由于上下间隙距离不同,先大致估计较小间隙的 50% 击穿电压 U_k ,以 U_k 的 5% 作为电压差 ΔU , U_k 为初始电压。若串联双间隙能够承受住施加电压,则下一次实验施加 $U_k + \Delta U$,若串联双间隙出现总体击穿,则下一次实验施加 $U_k - \Delta U$ 。第 i 次施加的电压记作 U_i 。考虑到空气介质恢复需要一定的时间,连续两次电压施加间隔 1~2 min; 每组间隙距离的实验次数不小于 30 次。

2 实验结果

在实验中发现,随间隙大小比例和施加电压大小不同,可以根据测得的电流电压波形和拍摄的击穿图像将串联间隙的击穿现象分成 3 种类型。

2.1 单个间隙击穿

当 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 12.5 \text{ mm}$, 或 $35 \text{ mm} \leq d_1 \leq 47.5 \text{ mm}$, 且施加电压较低时,会出现只有单个间隙击穿、总体不击穿的现象,其典型波形图和击穿图像见图 3。

由图 3 可以看出,在此种击穿类型中,较小的间隙先被击穿,导致悬浮电极电位发生相应变化。当上间隙先被击穿时,悬浮电极电位将跃升至总电压附近,下间隙独自承受总电压;当下间隙先被击穿时,悬浮电极电位将跌落至地电位附近,上间隙独自承受总电压。之后,由于未击穿间隙间距较大,且施加电压较低,较大的间隙未被击穿。在此过程中,整个串联间隙系统表现为未击穿。从击穿图像中也可以看出,只有较小的间隙出现了光亮较为微弱的电弧连接两个电极,较大的间隙则未出现。这是由于只有一个间隙击穿时,击穿能量仅来自于其

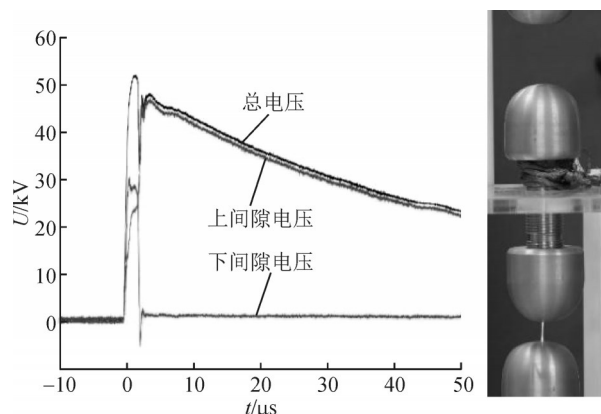


图3 单个间隙击穿的典型波形图和击穿图像($d_1=42.5$ mm, $U_{\text{peak}}=51.9$ kV)

Fig. 3 Typical oscillogram and breakdown photo of a single-gap-breakdown($d_1=42.5$ mm, $U_{\text{peak}}=51.9$ kV)

并联的电容,相较于冲击源能量较低,因而弧光较为微弱。

2.2 两间隙非同期击穿

当 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 15 \text{ mm}$ 或 $32.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 47.5 \text{ mm}$, 且施加电压较高时,会出现两间隙非同期击穿的现象,其典型波形图和击穿图像见图4。

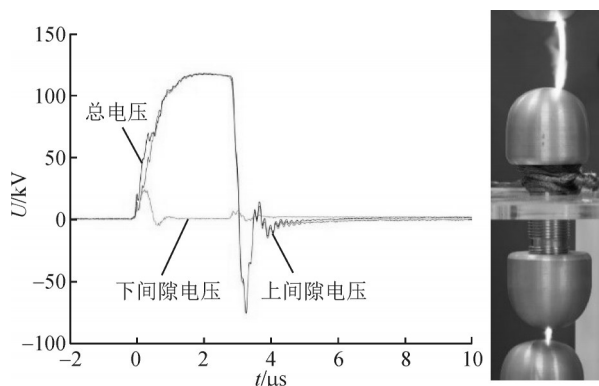


图4 两间隙非同期击穿的典型波形图和击穿图像($d_1=42.5$ mm, $U_{\text{peak}}=117.8$ kV)

Fig. 4 Typical oscillogram and breakdown photo of an asynchronous breakdown($d_1=42.5$ mm, $U_{\text{peak}}=117.8$ kV)

由图4可以看出,在此种击穿类型中,较小的间隙先被击穿,导致悬浮电极电位发生相应变化。之后,由未击穿间隙独自承受施加电压。由于施加电压较高,较大的间隙在一段时间之后也被击穿,并引起整个串联间隙的击穿。由图4还可以看出,两个间隙之间均出现了明亮的电弧连接两个电极。这是由于整个串联间隙击穿后,冲击源的能量得以供给电弧,使得弧光较为明亮。

2.3 两间隙同期击穿

当 $17.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 30 \text{ mm}$ 时,会出现两间隙几乎同时击穿的现象,其典型波形图和击穿图像见图5。由图5可以看出,在此种击穿类型中,两间隙电压跌

落开始的时间几乎一致。虽然电压下降速度存在差异,但不存在一个间隙电压升高、另一个间隙电压下降的现象。因此,认为在此种类型中,两间隙同时击穿。值得注意的是,在这一间距分布范围内,即使降低施加电压,也观察不到单个间隙击穿的现象。

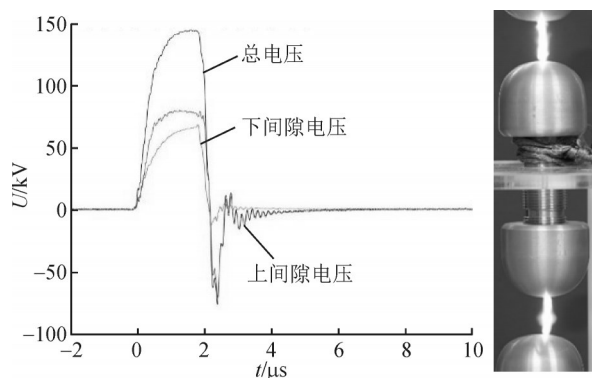


图5 两间隙同期击穿的典型波形图和击穿图像($d_1=25$ mm, $U_{\text{peak}}=144.1$ kV)

Fig. 5 Typical oscillogram and breakdown photo of a synchronous breakdown($d_1=25$ mm, $U_{\text{peak}}=144.1$ kV)

3 分析讨论

3.1 Volume-Time 理论空气间隙击穿电压原理

Volume-Time 理论是通过讨论电场分布的时空变化来计算初始电子的产生概率的模型,将 Volume-Time 理论扩展到空气间隙中,可计算任意电压波形作用下在击穿起始时延之内空气间隙初始电子生成概率。

$$P = 1 - \exp \int (V_w + S_w) dt \quad (1)$$

$$V_w = \int_{V_{cr}} \frac{dn_g}{dt} \left(1 - \frac{\eta}{\alpha} \right) dV \quad (2)$$

$$S_w = \int_{S_{cr}} \frac{dn_i}{dt} \left(1 - \frac{\eta}{\alpha} \right) dS \quad (3)$$

式(1)-(3)中: V_w 为气隙中与 O_2^- 离子分离电子的加权体积; S_w 为 Volume-Time 理论扩展的新参数,代表材料表面附着电子的加权面积; α 为电离碰撞系数, mm^{-1} ; η 为电子附着系数, mm^{-1} ; $1 - \frac{\eta}{\alpha}$ 代表空气中 O_2 分子附着电子; $\frac{dn_g}{dt}$ 代表每单位时间和每单位体积气隙中与 O_2^- 离子脱离产生的电子数的期望值, $\mu\text{s}^{-1} \text{mm}^{-3}$; $\frac{dn_i}{dt}$ 代表每单位时间和每单位面积从负电极表面的材料通过电子发射产生的电子数的期望值, $\mu\text{s}^{-1} \text{mm}^{-2}$ 。 V_{cr} 代表临界体积,满足 $\alpha > \eta$; S_{cr} 代表临界面积,满足 $\alpha > \eta$ 。 V_{cr} 和 S_{cr} 通过舒曼方程确定为

$$\int_{x_{cr}} (\alpha - \eta) dx = K \quad (4)$$

式(4)中: x_{cr} 为沿电力线路径; K 是常数,随气体种类而变化; $\alpha - \eta$ 定义为有效电离系数,代表电子在场方向上每单位路径长度产生的电子数。

3.2 空气间隙临界体积与临界面积计算

关于流注理论起始临界电场判据公式,最早由 Peek^[23]在 20 世纪 20 年代通过大量的实验而得出的经验公式,但该方法存在一定的局限性,因为其推导的方法没有物理基础。Abdel-Salam M^[24]等人基于 Peek 判据,提出在雷电冲击电压下除电极头部电场强度达流注发展最小电场外,还要满足两点:一是阴极电极头部附近形成电场临界体积 V_{cr} ;二是临界体积内部出现有效自由电子,该有效电子能进一步形成电子崩。阴极头部附近的临界体积 V_{cr} 示意图见图 6。图 6 中, X_{cr} 代表从阴极表面至临界电场体积外边界的距离,当自由电子出现在大于 X_{cr} 的区域时,空间电场没有达到流注起始电场,不能发展为电子崩。临界体积的大小与施加电场有关,当临界体积形成后,此时施加的电场为流注起始临界电场 E_{cr} ,在空气介质中, E_{cr} 的经验值为 24.4 kV/cm^[18]。

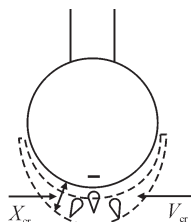


图 6 冲击电压下临界体积示意图

Fig. 6 Schematic diagram of critical volume under impulse voltage

基于 Volume-Time 理论,文中引入了临界面积变量。与临界体积原理类似,初始电子也可能由电极表面材料电离形成。Naoki Hayakawa 发现,临界体积和临界面积随着施加电压的增加而增加,但电压高于一定值后,临界体积的增长幅度小于临界面积的幅度,此时初始电子主要来源于负电极面而不是空气中的 O_2 离子,因此在空气间隙中计算初始击穿电压还需要考虑电极表面材料的影响^[25]。铜球电极表面形成临界面积 S_{cr} 示意图见图 7。电场的临界面积为电极表面大于临界电场 E_{cr} 区域的面积。

文中中间隙的临界体积和临界面积可以由 Maxwell 有限元仿真得到。开距为 5 mm 球-球空气间隙临界体积和临界面积仿真图见图 8。所得球间隙仿真电场的范围为 24.4 ~ 32.21 kV/cm,可以计算得到电场的临界体积和阴极表面电场的临界面积。开距从 2.5 mm 至 25 mm 时,临界体积 V_{cr} 和临界

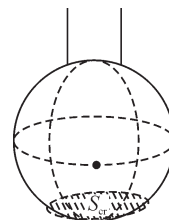


图 7 冲击电压下临界面积示意图

Fig. 7 Schematic diagram of critical area under impulse voltage

面积 S_{cr} 的变化趋势见图 9。 V_{cr} 和 S_{cr} 均呈整体增加,间隙距离小于 35 mm, S_{cr} 的值大于 V_{cr} 的值,间隙距离大于 35 mm 时, V_{cr} 的值超过 S_{cr} , 因此空气间隙中计算击穿电压需要同时考虑空间电场和电极表面的影响。

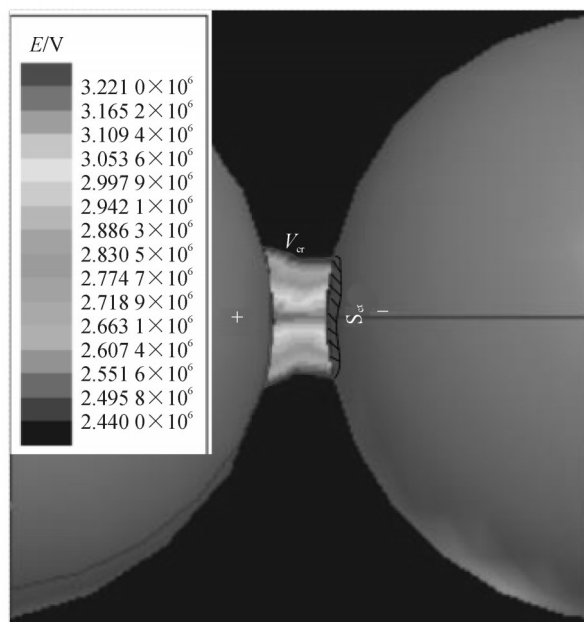


图 8 5 mm 空气间隙电场临界体积和临界面积仿真图

Fig. 8 Simulation of critical volume and critical area of electric field in air gap with area of 5 mm

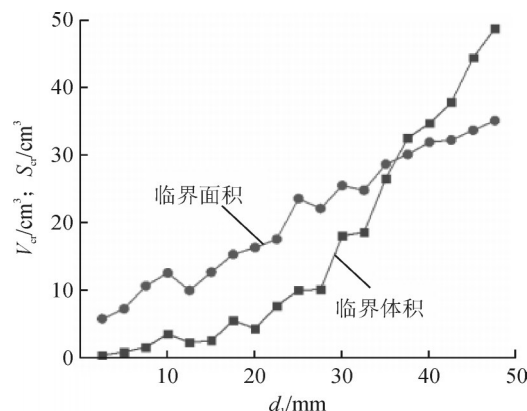


图 9 空气间隙临界体与临界面积随间隙距离变化

Fig. 9 The critical body and critical area of the air sphere gap vary with the gap distance

3.3 拓展 Volume-Time 理论串联双间隙击穿非同期延时与电压分析

在串联双间隙中,一个间隙被击穿时,由于被击穿间隙电压急剧下降,未击穿间隙电压突然上升。施加在未击穿间隙上的电压波形发生突变,不再是标准雷电冲击波形,利用拓展 Volume-Time 理论可以计算任意电压波形下的空气间隙击穿电压。NaokiHayakawa 等人^[26]利用该理论计算了不同电压波形和不同电极材料下空气间隙的击穿起始电压,因此,文中利用拓展 Volume-Time 理论计算串联双间隙击穿电压,可以根据间隙击穿的先后顺序,基于 Volume-Time 理论,计算串联双间隙击穿电压。计算流程图见图 10。

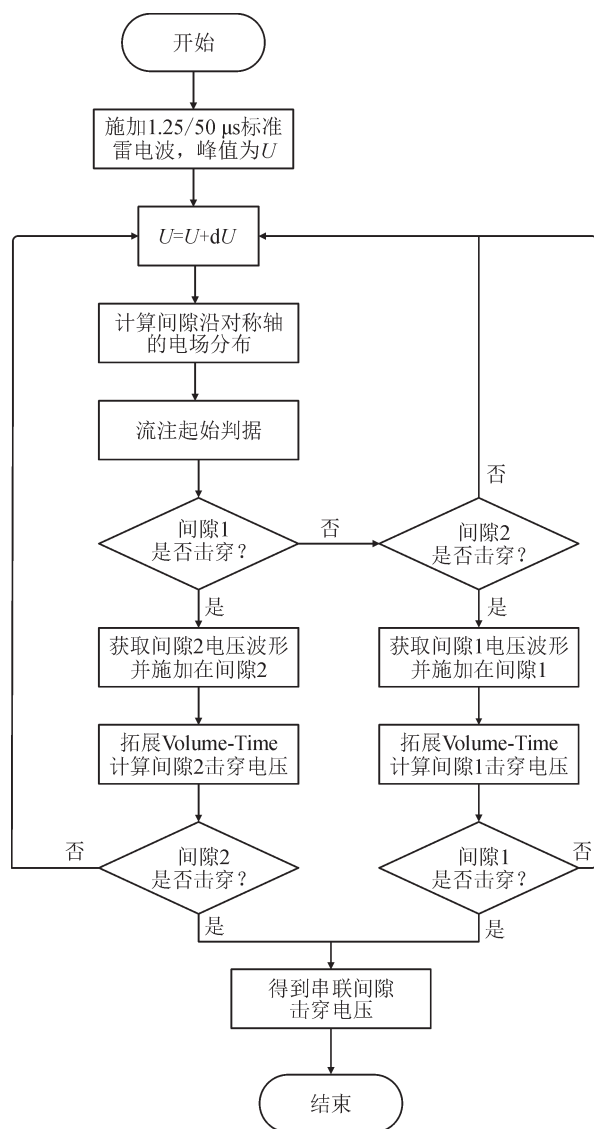


图 10 串联双间隙击穿电压计算流程

Fig. 10 Calculation flow of breakdown voltage of series double ball gap

首先对高压极施加 1.25/50 μs 标准雷电冲击电压,电压峰值为 U 。依据流注起始判据来判断间隙

1、2 是否达到流注最小起始电压。若间隙 1 达到最小起始电压,利用 Volume-Time 理论计算出击穿电压,并得到间隙 2 的电压波形。由于间隙 1 击穿,间隙 2 的电压波形发生突变,因此利用突变后的电压波形对间隙 2 进行计算。若达到流注起始条件,则计算间隙 2 的击穿电压。最后得到串联双间隙击穿电压。若间隙 2 先达到流注起始条件,则计算流程类似。

由图 10 可以得到基于拓展 Volume-Time 理论计算的串联双间隙击穿电压。串联双间隙击穿电压 $U_{50\%}$ 的实验值与理论值对比见图 11。计算值和实验值误差最大在 10% 以内,说明了拓展 Volume-Time 理论可用于计算任意电压波形下空气间隙击穿电压,验证了其在串联双间隙击穿电压计算中的有效性。

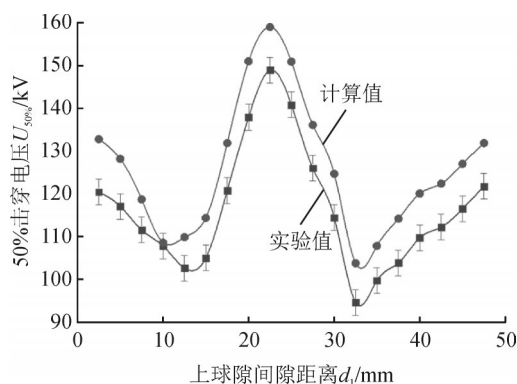


图 11 串联双间隙击穿电压实验值与理论值比较

Fig. 11 Comparison between experimental and theoretical breakdown voltage of series double ball gap

在 1.25/50 μs 标准雷电冲击电压下,串联双间隙根据间隙距离不同表现为 3 种击穿类型。当 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 12.5 \text{ mm}$ 和 $35 \text{ mm} \leq d_1 \leq 47.5 \text{ mm}$ 时表现为击穿类型 I,即只有单个间隙被击穿。随着施加电压升高,表现为击穿类型 II;当 $17.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 30 \text{ mm}$ 时只表现为击穿类型 III,即上下间隙发生同期击穿; d_1 为 15 mm 和 32.5 mm 为击穿类型 II 和击穿类型 III 的临界点,只发生击穿类型 II。雷电冲击电压下空气间隙击穿起始条件有两个(流注起始条件):一是电极头部需要达到起始击穿的最低电压或者临界电场,二是电极头部出现有效自由电子。对于第一个条件,文中定义在负电极头部大于临界电场强度值的电场所区域为电场有效体积,负电极表面大于临界电场强度的电场所区域为电场有效面积,电场强度临界值取 24.4 kV/cm。因此在电极头部附近大于临界电场的有效体积应大于临界体积,负电极表面有效面积也应大于临界面积;对第二个条件,流注起始时延具有分散性,与电极曲率半径、电压变

化率等密切相关。而对于串联间隙结构,虽然间隙之间存在相互影响,但其击穿起始条件(流注起始判据)是不变的。在串联双间隙中,当其中一个间隙被击穿时,另一个间隙的击穿电压存在突变,可根据突变后的电压施加在未被击穿断口上判断其是否符合流注起始条件,进而解释串联双间隙3种击穿类型形成机理。对于击穿类型 I,在上间隙为 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 12.5 \text{ mm}$ 时,随着施加电压升高,上间隙电场强度超过临界值时,并且电场有效体积和有效面积超过临界值时,上间隙被击穿。此时上间隙出现电弧连接,由高阻状态转为导通状态。此时下间隙电压迅速上升,由于此时下间隙电极附近还未达到临界电场或者临界体积内部有效电子数量未超过临界值,最终下间隙未被击穿。当上间隙被击穿时上、下间隙的电场有效体积与有效面积与临界值的对比见图 12。上间隙被击穿时,可以看出其间隙内电场的有效体积比临界值高,而对应下间隙的电场要么未达到临界值,要么虽然电场达到临界值了,但其有效体积和有效面积远小于临界值,因此下间隙未达到击穿起始条件,所以串联双间隙表现为击穿类型 I。

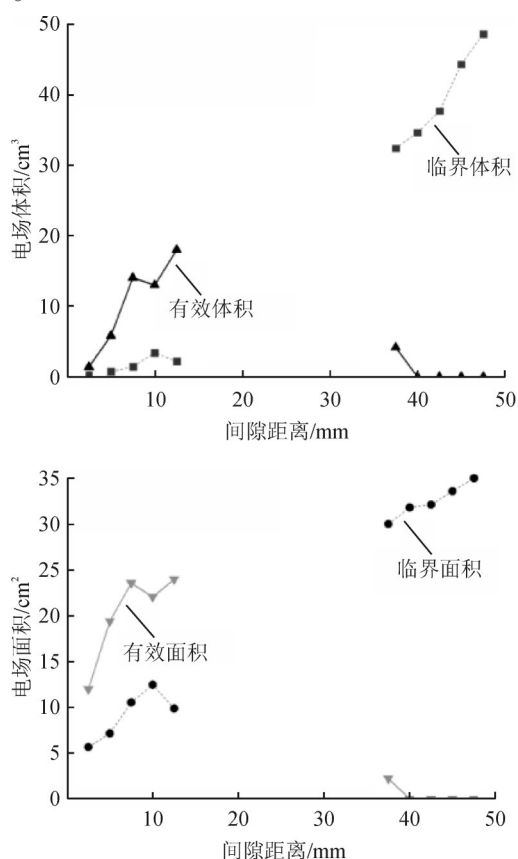


图 12 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 12.5 \text{ mm}$ 时击穿类型 I 组合间隙电场有效体积与有效面积

Fig. 12 Effective volume breakdown type I combined gap electric field and the effective area ($2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 12.5 \text{ mm}$)

串联双间隙随着施加电压不断升高,上下间隙均会被击穿。根据是否出现击穿非同期现象,分为非同期击穿的击穿类型 II 和同期击穿的击穿类型 III。对于击穿类型 II,对应的间隙距离为 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 15 \text{ mm}$ 和 $32.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 47.5 \text{ mm}$ 。此时较小间隙先发生击穿,较小间隙击穿后电压突然施加到较大间隙上,较大间隙电场的有效体积和有效面积还未超过临界值,因此未击穿。但经过一段延时的电压增加,大间隙电场的有效体积和有效面积超过临界值,因此大间隙也发生了击穿。 $2.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 15 \text{ mm}$ 情况下,在上间隙击穿时刻,上、下间隙电场的有效体积与有效面积与临界值的比较见图 13。

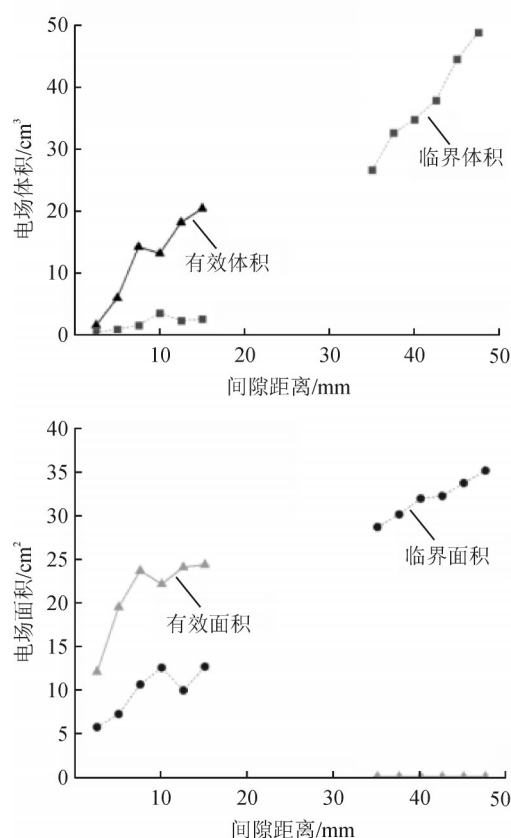


图 13 击穿类型 II 上下间隙电场有效体积与有效面积在非同期起始时刻与临界值比较

Fig. 13 Electric field effective volume and the effective area in the beginning time compared with the critical value of breakdown type II

由图 13 可以看出,上间隙击穿时刻,其电场有效体积和有效面积均大于临界值,而此刻下间隙的电场尚未达到临界值,因此对应的有效体积和有效面积均为零;随着电压突增,下间隙电场的有效体积与有效面积不断增大,在最终其击穿时刻,电场的有效体积与有效面积大于临界值,说明此时串联双间隙发生了非同期击穿。 $32.5 \text{ mm} \leq d_1 \leq 47.5 \text{ mm}$ 时发生击穿类型,此时下间隙为较小间隙,见图 14。

下间隙击穿时刻其电场有效体积与有效面积均超过临界值,而上间隙此时的电场小于临界值,因此电场的有效体积与有效面积为0,经过一个延时,随着电压升高至击穿时刻,其电场的有效体积与有效面积均超过临界值,达到击穿条件,出现非同期击穿。

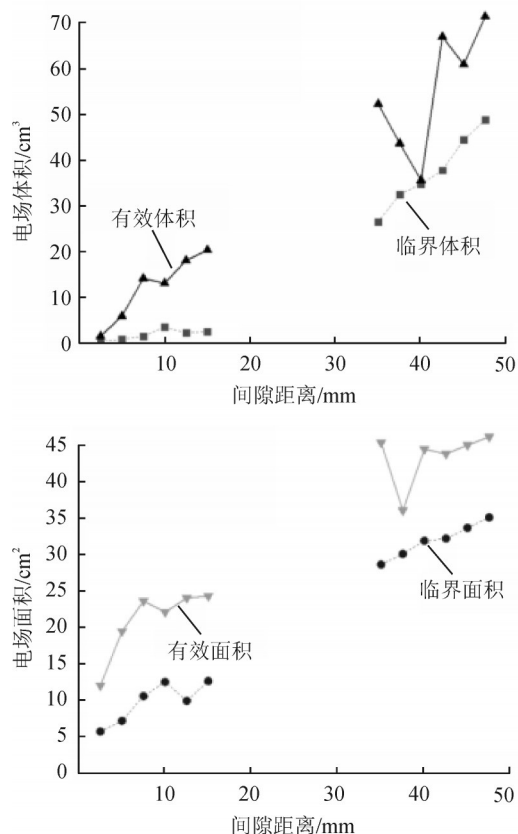


图14 击穿类型Ⅱ上下间隙电场有效体积与有效面积在非同期最终时刻与临界值比较

Fig. 14 Electric field effective volume and the effective area in the final time compared with the critical value of breakdown type II

在击穿类型Ⅱ中,上下间隙出现非同期现象时,在较小间隙击穿瞬间,较大间隙电场有效体积与有效面积为0,尚未达到击穿条件。经过一个延时后其电场的有效体积与有效超过了临界值而发生击穿。实验测得的从小间隙击穿时刻起至大间隙电场的有效体积与有效面积超过临界值统计时间见图15。可以看出击穿类型Ⅱ发生时在较小间隙被击穿时较大间隙经过了一段延时才达到击穿起始条件。

4 结论

文中用串联双空气间隙模型作为双断口开关的最简化模型,用拓展 Volume-Time 理论解释串联双断口的非同期击穿机理。本章得出的主要结论如下:

1)在文中的实验设置,即多断口断路器并联等

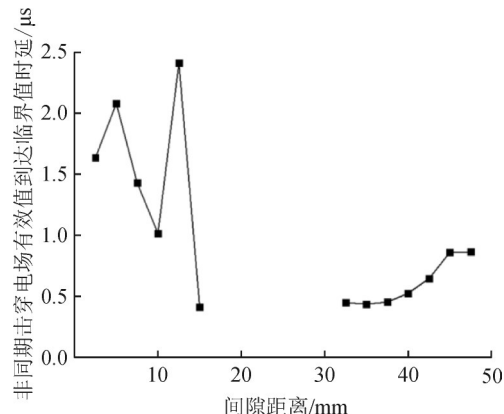


图15 击穿类型Ⅱ较大间隙到达击穿起始条件的非同期延时
Fig. 15 The non-synchronous delay of the larger ball gap to the initial condition of breakdown of type II

效均压电容下,雷电冲击电压下的串联空气间隙随施加电压和间隙大小的不同可能会出现3种击穿现象。当串联的两间隙大小差距较大、施加电压较低时,会出现单个间隙击穿的现象;当两间隙差距较大、施加电压较高时,会出现非同期击穿的现象;当两间隙大小差距较小时,不管施加电压如何变化,均只会出现同期击穿现象。

2)利用拓展 Volume-Time 理论,通过确定串联双空气间隙的临界体积、临界面积等相关参数,能够有效用于其击穿电压 $U_{50\%}$ 的计算。计算值与实验值误差在10%以内,说明该方法用于计算串联双空气间隙以及解释其击穿机理的有效性。

3)对串联双间隙3种击穿类型的形成进行解释,认为有效体积和有效面积是否达到临界值是作为空气间隙是否达到击穿起始条件的重要因素。

4)文中分类的3种击穿类型中,出现击穿延时是由于一个间隙的电场有效体积与有效面积超过临界值,因此达到击穿条件而被击穿,而另一个没有达到临界条件导致。

参考文献:

- [1] 卢明,谈发力,何正浩,等. 110 kV 输电线路鸟粪闪络机理研究[J]. 电瓷避雷器,2015(6):1-7.
LU Ming, TAN Fali, HE Zhenghao, et al. Research on the mechanism of guano flashover in 110 kV transmission lines [J]. Insulators and Surge Arresters 2015(6):1-7.
- [2] 胡峰. 长间隙鸟粪闪络机理及危险区域划分仿真研究[J]. 电瓷避雷器,2016(6):50-55.
HU Feng. Simulation research on long gap bird streamer flashover mechanism and its risk area compartment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(6): 50-55.
- [3] 张乔根,李晓昂,刘琳,等. GIS 中 SF₆ 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. 高电压技术,2019,45(9):2689-2698.

- ZHANG Qiaogen, LI Xiaoang, LIU Lin, et al. 'One-zero' phenomenon of discharge induced by defects in SF₆ insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2689-2698.
- [4] 王力农, 胡毅, 刘凯, 等. 特高压输电线路带电作业组合间隙的击穿机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1224-1231.
- WANG Linong, HU Yi, LIU Kai, et al. Complex gap breakdown mechanism of live working on ultra-high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1224-1231.
- [5] 刘凯, 付道睿, 吴田, 等. 1 000 kV 输电线路耐张塔带电作业电位转移电流时频特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 3863-3871.
- LIU Kai, FU Daorui, WU Tian, et al. Time - frequency characteristic of potential transfer current during live working on the 1 000 kV transmission line tension tower[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3863-3871.
- [6] KAMEYAMAS, OHKURAT. Circuit interrupter: US3244842[P]. 1966-04-05.
- [7] HARROLD R T. Hybrid circuit breaker: US3814882[P]. 1974-06-04.
- [8] SENDA T, TAMAGAWA T, HIGUCHI K, et al. Development of HVDC circuit breaker based on hybrid interruption scheme[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PER-4(3): 545-552.
- [9] 王胜辉, 杨广华, 陈维江, 等. 含有电位悬浮导体的组合空气间隙击穿特性实验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 1-7.
- WANG Shenghui, YANG Guanghua, CHEN Weijiang, et al. Experimental study on breakdown characteristics of combined air gap with floating potential conductor[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 1-7.
- [10] 杨广华, 王胜辉, 陈维江, 等. 组合空气间隙交流击穿电压计算方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 23-29.
- YANG Guanghua, WANG Shenghui, CHEN Weijiang, et al. Study on the calculation method of ac breakdown voltage of complex air gap[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 23-29.
- [11] RIZK F A M. Effect of floating conducting objects on critical switching impulse breakdown of air insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1360-1370.
- [12] RIZK F A M. Critical switching impulse strength of phase-to-phase air insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1492-1506.
- [13] KUBUKI M, YOSHIMOTO R, TANOUE K, et al. Breakdown characteristics in air gaps with artificial floating metals under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(1): 155-166.
- [14] KUBUKI M, YOSHIMOTO R, YOSHIZUMI K, et al. Estimation of dc breakdown mechanisms in air gaps containing floating metallic particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(1): 92-101.
- [15] 阮江军, 唐烈峥, 邱志斌, 等. 基于流注起始判据的球—板—球短空气间隙击穿电压计算[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 38-44.
- RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, QIU Zhibin, et al. Breakdown voltage calculation of short sphere-plane-sphere air gap based on streamer inception criteria[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 38-44.
- [16] 唐烈峥, 阮江军, 邱志斌, 等. 支持向量机在组合空气间隙击穿电压预测中的应用[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 175-187.
- TANG Liezheng, RUAN Jiangjun, QIU Zhibin, et al. Application of support vector machine in breakdown voltage prediction of complex air gap[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 175-187.
- [17] 葛国伟, 程显, 谢伟, 等. 多断口真空开关基础理论及技术综述[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4582-4590.
- GE Guowei, CHENG Xian, XIE Wei, et al. Review on basic theory and technology of multi - break VCBs[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4582-4590.
- [18] 葛国伟, 廖敏夫, 黄金强, 等. 双断口真空断路器配合特性仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2016(22): 57-65.
- GE Guowei, LIAO Minfu, HUANG Jinqiang, et al. Simulation and experimental of matching characteristics of vacuum circuit breakers with double-break[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016(22): 57-65.
- [19] 周凯, 金雷, 罗维. 一种双断口真空有载分接开关的研制及应用[J]. 变压器, 2022, 59(4): 6-10.
- ZHOU Kai, JIN Lei, LUO Wei. Development and application of a double - break vacuum on - load tap - changer[J]. Transformer, 2022, 59(4): 6-10.
- [20] BETZ T, KOENIG D. Influence of grading capacitors on the breaking capability of two vacuum circuit-breakers in series [C]//18th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Eindhoven, Netherlands: IEEE, 1998: 679-683.
- [21] BETZ T, KONIG D. Influence of grading capacitors on the breaking capacity of two vacuum interrupters in series[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 405-409.
- [22] CHAPPERT C, BEAUVILLAIN P, RENARD J P, et al. Low temperature a.c. susceptibility of amorphous holmium aluminosilicate (Al₂O₃)_{0.2}(Ho₂O₃)_{0.2}(SiO₂)_{0.6}. Frequency dependence of the spinreezing temperature[J]. Solid State Communications, 1979, 31(3): 213-218.
- [23] HAYAKAWA N, SHIMIZU F, OKUBO H. Estimation of partial discharge inception voltage of magnet wires under

- QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Phenomena and characteristics of partial discharge development along the surface of fixed metal particles on GIS insulator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(1): 101-108.
- [24] 孙廷玺, 陈浩, 钱森, 等. 光纤传感技术在局部放电检测的研究进展[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 1-8.
SUN Tingxi, CHEN Hao, QIAN Sen, et al. Research progress of optical fiber sensing technology in partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 1-8.
- [25] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 63-81.
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and fault diagnosis of power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 63-81.
- [26] MA G M, ZHOU H Y, ZHANG M, et al. A high sensitivity optical fiber sensor for GIS partial discharge detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20): 9235-9243.
- [27] ZHOU Hongyang, MA Guoming, WANG Yuan, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: A review[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 259-270.
- [28] JIANG Jun, SONG Yu, WANG Kai, et al. Partial discharge detection and sensitivity improvement for bushing based on optical interference technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 37(4): 2797-2804.
- [29] MA Guoming, WANG Yuan, QIN Weiqi, et al. Optical sensors for power transformer monitoring: A review[J]. High Voltage, 2020, 4(4): 216-227.
- [30] RODRIGUES A V, MONTEIRO C, SILVA S O, et al. A brief review on optical fiber sensing for the power grid[J]. U Porto Journal of Engineering, 2022, 8(3): 18-23.
- [31] 周宏扬. 基于Michelson光纤干涉仪的局部放电超声检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
ZHOU Hongyang. Research on partial discharge ultrasonic detection technology based on Michelson fiber interferometer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [32] WRIGHT W M. Propagation in air of N waves produced by sparks[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 73(6): 1948-1955.
- [33] LIM M. A corona-type point source for model studies in acoustics[J]. Applied Acoustics, 1981, 14(4): 245-252.

邢超(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为变压器类设备故障诊断与电气试验(通信作者)(E-mail: 409914929@qq.com)。

(上接第 127 页)

- inverter surge voltage by volume-time theory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 550-557.
- [24] 王季梅. 论开发 750 kV 超高压真空断路器的必要性[J]. 电力设备, 2004, 5(9): 1-5.
WANG Jimel. On the necessity of developing 750 kV UHV vacuum circuit breaker[J]. Power Equipment, 2004, 5(9): 1-5.
- [25] SENDA T, TAMAGAWA T, HIGUCHI K, et al. Development of HVDC circuit breaker based on hybrid interruption scheme[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PER-4(3): 545-552.
- 姚晓飞(1985—), 男, 副研究员, 主要从事相控快速真空开断理论和技术、高压断路器可靠性理论和技术等研究(通信作者)(E-mail: yaoxf85@mail.xjtu.edu.cn)。