

操作冲击电压下长空气间隙击穿电压特性研究

张宇博, 孙 梅, 谢瑞涛

(西安高压电器研究院有限责任公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 基于现有长间隙放电理论和静电场方法, 建立流注-先导放电数值仿真模型, 并采用该模型研究操作冲击下长空气间隙放电特性。在绝缘设计中, 一般参考棒-板间隙击穿电压来确定其他电极结构击穿电压。同时, 实验结果表明棒-板间隙的正极性操作冲击击穿电压低于负极性操作冲击击穿电压。因此, 通过建立操作冲击下棒-板长空气间隙模型, 研究其击穿电压特性。

关键词: 仿真模型; 棒-板长空气间隙模型; 击穿电压特性

Research on discharge characteristics of long air gap under switching impulse voltage

ZHANG Yubo, SUN Mei, XIE Ruitao

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Based on the existing long gap discharge theory and electrostatic field method, a streamer leader discharge numerical simulation model is established. The model is used to study the discharge characteristics of long air gap under switching impact. In insulation design, the breakdown voltage of other electrode structures is usually determined by referring to the breakdown voltage of rod plate gap. At the same time, the experimental results show that the positive switching impulse breakdown voltage of the rod plate gap is lower than the negative switching impulse breakdown voltage. Therefore, the discharge characteristics of rod-plate long air gap under switching impact by establishing a model is studied.

Key words: simulation model; rod-plate long air gap model; discharge characteristics

0 引言

由于我国能源和负荷中心分布特点, 决定了电网需发展远距离、大容量和高电压输电, 电网运行电压等级正在不断提高。随着电压等级升高, 空气绝缘距离明显增大, 间隙放电特性也将发生变化。特别是在标准大气条件下, 当间隙距离大于 2 m 时, 间隙放电过程中会出现先导放电过程。因此, 长空气间隙放电特性

已成为电力系统外绝缘研究的热点问题, 也是输变电系统绝缘配合设计的基础。

1 棒-板长空气间隙放电特性仿真模型

实验研究表明, 操作冲击下长空气间隙放电过程遵循一定的物理规律, 它包括电晕起始、流注发展、先导起始、先导发展及末跃等放电阶段。当外施电压达到电晕起始电压时, 电极周围出现电晕放电, 放电通道呈细丝状光

丝。电晕放电会在极短的时间内转化为流注放电。放电产生的空间电荷削弱了电极附近电场强度,并抑制流注发展。若电极曲率半径较小,则放电会停止,出现“暗期”。随着外施电压继续升高,流注通道将重新向前发展,同时放电电流产生大量的焦耳热,导致流注通道根部出现茎先导。随着外施电压继续升高,先导及先导头部流注电晕不断往前延伸。当先导头部流注电晕发展至另一侧电极时,放电进入末跃阶段,先导的发展速度呈指数增加,并伴随有强烈的放电现象,间隙击穿形成,此过程完成时间极为短暂。因此,可将间隙放电过程主要分为流注放电和先导放电两个阶段。

分别建立流注放电和先导放电的计算模型,然后把二者组合起来构成操作冲击电压下长空气间隙步进发展计算模型,能够计算电压随时间变化情况下的间隙放电过程。可采用该模型预测不同条件下长空气间隙放电特性,计算流程图如图1所示。

已知外施电压与时间之间的函数关系式,为了简化模型的数值计算过程,将时间均匀离散化,计算间隔为 Δt 。

临界电子崩长度判据计算式为

$$e^{\int_0^{l_{cr}} (\alpha - \eta) dx} = 10^8 \quad (1)$$

式中, l_{cr} 为电离区域边界临界电子崩长度; α 为碰撞电离系数; η 为附着系数。

流注起始强度计算公式为^[2]

$$E_i = 23 \left(1 + \frac{0.224}{r^{0.37}} \right) + 9.93 \log \left(10 \times \frac{dU}{dt} \times f/d + 1 \right) \quad (2)$$

式中, r 为电极曲率半径,m; f 为电极结构的不均匀系数; dU/dt 为电压上升速率,V/s; d 为间隙距离,m。

由式(1)和式(2)判断外施电压是否满足流注起始条件。由此可得到流注起始时刻 t_i ,流注起始电压 U_i 。此后引入流注放电发展模型,计算此时的流注通道轴向长度及空间注入电荷量。若空间注入电荷量不满足先导起始要求,则在 $t_i + \Delta t$ 时刻,需考虑电荷对电极表

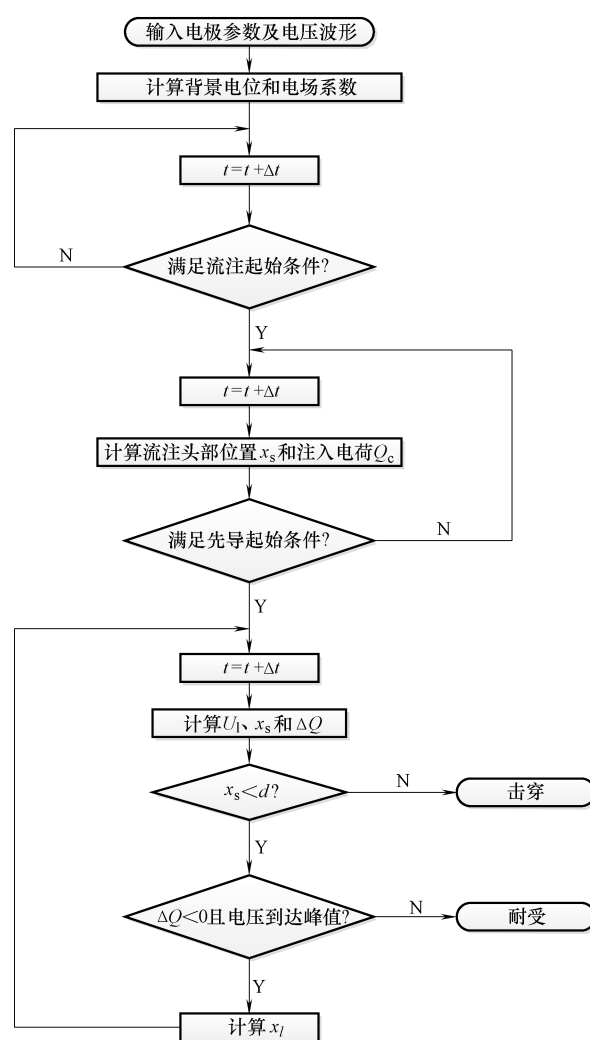


图1 长空气间隙放电步进发展模型计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of long air gap discharge step development model

面场强的削弱作用,判断是否出现“暗期”。若出现“暗期”,则随着电压上升及空间注入电荷的漂移运动,空间电场将得到恢复,二次流注放电起始,空间注入电荷不断增加。当先导起始后,引入先导放电发展模型。在计算过程中,若流注头部 x_s 到达板极,则间隙击穿,外施电压峰值为间隙最小击穿电压 U_B 。由于模型计算过程中假设放电通道沿间隙轴向发展,即放电路径最短,该峰值电压对应最小的击穿概率,电压峰值应为间隙最小击穿电压。当空间注入电荷增量 ΔQ 出现负值,且电压波形已过峰值时,流注头部仍不能到达板极,则

认为间隙能够耐受该电压。

2 操作冲击电压下棒-板长空气间隙击穿电压特性研究

在输变电系统中,外绝缘的失效主要表现为长空气间隙的击穿行为,因此对于工程实际中间隙绝缘尺寸的选择都是由其击穿电压决定。通常为了确定不同电极结构类型的击穿电压,又引入了间隙几何系数。在相同间隙距离及电压波形条件下,其他电极类型的击穿电压等于棒-板电极的击穿电压乘以间隙几何系数。因此,棒-板间隙击穿电压特性曲线是外绝缘工程设计的基础,准确确定该特性曲线是非常重要的。应用已建立的长空气间隙放电步进发展计算模型,求解了特定条件下间隙放电过程,并与其他实验数据和研究结论进行对比,验证了仿真模型的合理性。最后,应用该模型研究间隙距离、波前时间及电极曲率半径对间隙击穿电压的影响。

2.1 长空气间隙击穿电压计算

在实际工程中,采用50%操作冲击击穿电压决定绝缘距离,并根据分散性大小,保留一定的裕度。因此,有必要根据模型计算结果确定出间隙的50%击穿电压。为了得到间隙的50%击穿电压,先由仿真模型计算间隙的最小击穿电压。假设向电极施加的电压波形为斜角波,操作冲击电压波形数学表达式为

$$U_1(t) = \frac{U_m}{T_{cr}} t \quad 0 < t \leq T_{cr} \quad (3)$$

$$U_1(t) = U_m \quad t > T_{cr} \quad (4)$$

式中, U_m 为电压峰值; T_{cr} 为波前时间。

在求解间隙击穿电压的过程中,随着电压上升出现不同的放电过程,如图2所示。图2中, U_i 为流注起始电压; U_{ic} 为先导起始电压。不断增加电压峰值并计算间隙击穿过程,当间隙不能耐受施加电压时,电压峰值为该波前时间下间隙的最小击穿电压 U_B , 即

$$U_B = U_m \quad (5)$$

通常长间隙放电通道是曲折发展的,且具有明显的分散性,而模型假设放电通道沿轴向发展,并忽略了各放电过程的分散性。因此,由式(5)得到的是最小击穿电压,其对应非常小的击穿概率。一般认为间隙的击穿电压服从高斯分布,当由仿真模型计算得到 U_B 后,可按式(6)计算间隙的50%击穿电压^[3]

$$U_{50} = \frac{U_B}{1 - 3\sigma} \quad (6)$$

式中, σ 为标准偏差,棒-板间隙取5%,导线-板间隙取2.5%。

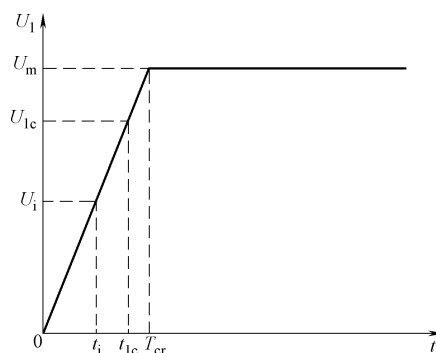


图2 间隙放电过程示意图

Fig. 2 Diagram of gap discharge process

当选取计算参数为 $d = 2 \text{ m}$, $r = 5 \text{ cm}$, $T_{cr} = 100 \mu\text{s}$, $U_m = 677 \text{ kV}$, $\Delta t = 1 \mu\text{s}$, $\theta = 60^\circ$ 时, 计算结果如图3所示。一次流注在施加电压后 $47.69 \mu\text{s}$ 起始, 流注起始电压为 323.3 kV 。

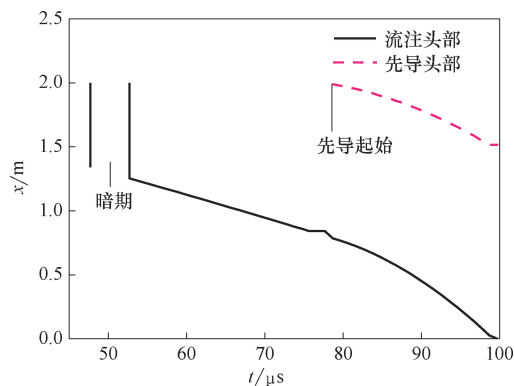


图3 空气间隙放电过程仿真结果

Fig. 3 Simulation results of air gap discharge process

但由于电极曲率半径较小,放电过程进入“暗期”。该过程持续至 $52.69 \mu\text{s}$, 二次流注

起始。随着二次流注的发展，空间注入电荷量满足先导起始条件。先导在 78.69 μs 时刻起始，电压为 513.18 kV。当流注头部到达板极时，放电过程进入末跃阶段，间隙击穿将不可避免。此时，电压刚好上升至峰值处，故该间隙结构的最小击穿电压为 677 kV。根据式 (6) 求得间隙 50% 击穿电压为 796 kV。间隙放电末跃高度为 1.51 m，先导通道轴向平均速度为 2.27 cm/μs。

末跃时刻，先导通道轴向电场分布如图 4 所示，随着先导放电发展，先形成的先导通道内电场急剧下降，并出现电场饱和的趋势，此特性与电弧通道发展特性相似。

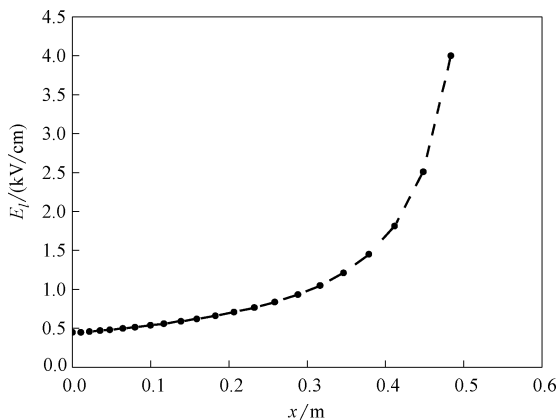


图 4 先导轴向电场分布

Fig. 4 Axial electric field distribution of leader

下表给出了操作冲击电压下棒-板长空气间隙放电步进发展模型的计算结果与相应的实验值，计算结果与文献中公布的实验值大致相近。其中，先导起始电压与实验值非常接近，验证了先导起始判据的合理性。

表 模型计算结果与实验结果比较

Tab. The comparison of the model results and the experimental results

	模型计算结果	实验结果 [8,35]
末跃高度/m	1.52	1.3
先导平均发展速度/(cm/μs)	2.27	1-2
先导通道内电场强度/(kV/cm)	0.4~4	0.5~4
先导起始电压/kV	513.18	512
末跃时刻先导通道压降/kV	59.18	45
先导起始时间/μs	78.69	53
50% 击穿电压/kV	796	680

2.2 长空气间隙击穿电压的影响因素研究

(1) 间隙距离对击穿电压的影响分析

间隙距离影响电极背景场强分布，空气间隙距离越长，电场分布越不均匀，电极附近电场能够迅速衰减。这样的间隙电场分布特性决定了间隙放电过程，间隙放电初期，流注电晕放电区域集中于电极附近，由于电场衰减迅速，流注放电不能引起直接击穿。当间隙距离不小于 2 m 时，间隙放电过程中会出现先导放电。因而，模型考虑间隙不小于 2 m 的情况。通常研究间隙距离与 50% 击穿电压的关系时，外施电压波形具有临界波前时间，这是因为该波前时间下对应的间隙击穿电压最小。实验研究表明正极性操作冲击下棒-板间隙距离与临界波前时间比值约为 50 μs/m [4]。

标准大气条件下，当选取计算参数为 $r = 10\text{ cm}$ ， $T_{cr} = 50\text{ μs}$ ， $\Delta t = 1\text{ μs}$ ， $\theta = 60^\circ$ 时，计算结果如图 5 所示。棒-板间隙 50% 击穿电压与间隙距离呈非线性关系，随着间隙距离增加，击穿电压增加，但击穿电压上升速率减小。图中 EDF 曲线是由法国研究者根据 1 ~ 23 m 间隙的击穿电压实验数据拟合得到的，拟合计算公式为

$$U_{50} = \frac{3\,400}{1 + \frac{8}{d}} \tag{7}$$

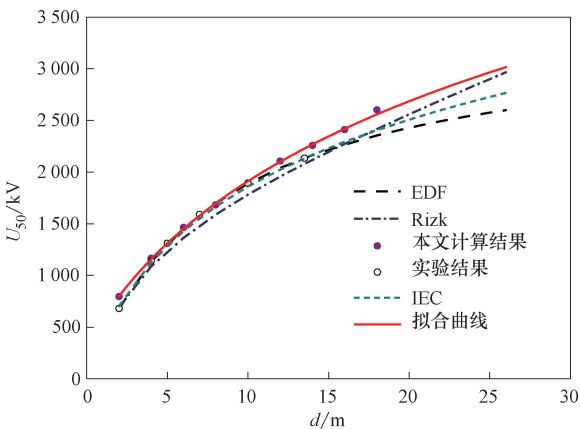


图 5 棒-板电极 50% 击穿电压与间隙距离关系

Fig. 5 Relationship between 50% breakdown voltage of rod plate electrode and gap distance

Rizk 曲线是 F. M. Rizk 教授基于击穿电压计算模型得到棒-板间隙 50% 击穿电压, 计算公式为

$$U_{50} = \frac{1\ 830 + 59d}{1 + \frac{3.89}{d}} + 44 \ln \left[8 - 7e^{\frac{-1.33d}{1 + \frac{3.89}{d}}} \right] \quad (8)$$

当间隙距离大于 4 m 时, 式 (8) 可近似为

$$U_{50} = \frac{1\ 830 + 59d}{1 + \frac{3.89}{d}} + 92 \quad (9)$$

IEC 曲线是由日本电中研改进 EDF 公式得到的, 适用范围为 1~25 m, 计算公式为

$$U_{50} = 1\ 080 \ln(0.46d + 1) \quad (10)$$

根据长间隙放电步进发展模型的计算结果拟合出 50% 击穿电压计算公式为

$$U_{50} = 1\ 580 \ln(d + 5.8) - 2\ 453 \quad (11)$$

对比上述公式可见, 间隙距离在 14 m 范围内时, 4 个公式的计算结果接近。间隙距离大于 14 m 时, EDF 公式预测的间隙击穿电压开始出现明显饱和现象, 其他三条曲线均有一定的饱和趋势, 模型计算结果与 Rizk 曲线更接近。出现上述结果的原因可能有三点: ①长间隙放电步进发展计算模型本身存在计算误差; ②间隙距离较大时, 由于实验分散性或是 EDF 实验数据点过少, 数据拟合不够准确, 导致 EDF 公式计算大间隙的击穿电压不准确; ③在推导 Rizk 计算公式过程中, 研究者仅用 4~13.5 m 间隙实验数据去校验模型所需的参数, 所以 Rizk 公式计算更长间隙距离的击穿电压的准确性需要进一步研究。

图 6 为间隙距离与末跃高度的关系曲线, 长间隙放电步进发展模型的计算结果与 Huztler 经验公式^[5] 计算结果相似, 末跃高度随着间隙距离增加会出现饱和现象。

(2) 波前时间对击穿电压的影响分析

在电力系统中, 由于操作断路器或是发生某些故障, 系统电气参数发生变化并引起电网

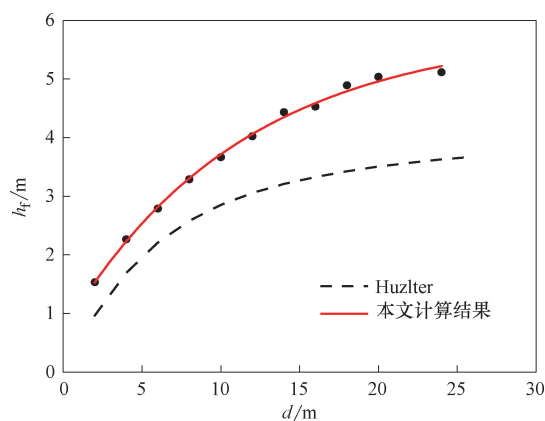


图 6 棒-板电极末跃高度与间隙距离关系仿真结果

Fig. 6 Simulation results of relationship between rod plate electrode terminal jump height and gap distance

内部电磁能量的转化和传递, 在系统中出现持续时间较短的操作过电压。不同的系统电气参数将导致操作过电压的幅值、振荡频率以及持续时间不完全相同。通常认为, 操作过电压波前时间在 20~5 000 μs 内变化, 半峰值时间小于 20 ms。本节仅考虑波前时间在 20~500 μs 内变化的击穿情况。

当向电极施加不同波形参数的操作冲击电压时, 间隙的 50% 击穿电压也会不相同。对于电压波前时间较短的情况而言, 当流注起始后, 由于有效电子出现位置的随机性及电压上升速率较快, 可能出现某些丝状流注通道较快形成, 并改变空间电场分布, 从而抑制了附近流注通道的发展, 整个流注放电区域范围就会比较小。若是电压波前时间较长, 由于电压上升速率慢, 流注电晕放电比较均匀, 各放电通道能够充分发展, 该情况下形成的流注放电区域会更大。类似于 SF₆ 短间隙电压上升速率对流注电晕放电形态的影响^[6]。因此, 电压波前时间不同时, 形成先导所需的注入电荷也将不同。用分支系数来衡量电压上升速率对先导起始条件的影响, 并假设分支系数 f_b 满足

$$f_b = \frac{2\ 000\ d - 800}{2.5d - 1.6 + \frac{30d}{T_{cr}}} \quad (12)$$

式中, d 为间隙距离, m; T_{cr} 为波前时间, μs 。

图 7 为棒-板间隙 50% 击穿电压与波前时间的关系曲线, 棒半径固定为 10 cm。采用模型计算了 2~6 m 的间隙距离, 结果表明不同间隙距离下间隙击穿电压与波前时间关系曲线呈 U 形。当波前时间较短时, 间隙击穿电压较高的主要原因是: ① 由于存在放电时延, 流注电晕起始电压较高, 空间电离强烈产生更多的空间电荷, 并改善了电极附件电场分布, 抑制了流注电晕进一步发展, 导致先导起始电压上升; ② 先导发展时间更短, 末跃高度增加, 所以需要更高电压才能维持先导头部电位并使得流注通道可以到达板电极。图 8 给出了当 $d=2$ m, $r=10$ cm, $T_{cr}=300$ μs 时, 先导放电的发展过程。可以看出, 当波前时间较长时, 在先导放电初期, 先导通道并未向前延伸, 经过了几次“第二暗期”之后, 连续先导放电通道才形成。这是因为过低的电压上升速率不能抵消先导通道的压降, 导致先导前方流注电晕不能产生足够的注入电荷维持先导通道的延伸。因此, 长波前时间情况下间隙的击穿电压会上升。

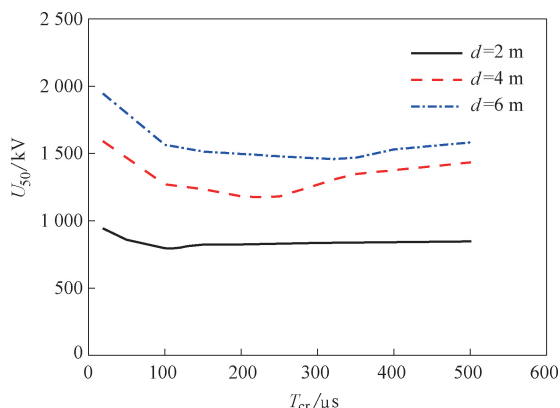


图 7 棒-板间隙 50% 击穿电压与波前时间关系仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the relationship between 50% breakdown voltage and wavefront time in rod plate gap

由图 7 可见, 随着间隙距离增加, 临界波前时间也相应增加。目前常用的临界波前时间

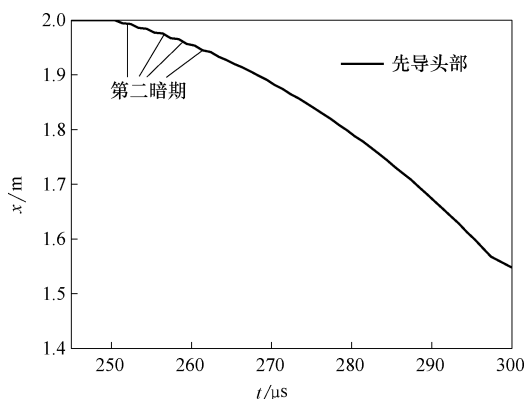


图 8 棒-板间隙先导放电过程仿真结果 ($T_{cr}=300$ μs)

Fig. 8 Simulation results of leader discharge process in rod plate gap ($T_{cr}=300$ μs)

经验计算公式有

$$T_{crit} = 50d \quad (13)$$

$$T_{crit} = 40(d+1) \quad (14)$$

(3) 电极曲率半径对击穿电压的影响分析

在电力系统中, 电力设备及线路的等效曲率半径和空气间隙距离共同决定了其绝缘强度。当间隙距离不变时, 电极曲率半径越小, 空间电场分布越不均匀, 这必然会影响间隙的放电过程。因此, 电极曲率半径也是影响间隙击穿电压的一个重要因素。选取参数 $d=2$ m, $T_{cr}=100$ μs , 并应用前文建立的棒-板长空气间隙放电步进发展模型计算不同棒半径下间隙的击穿电压, 计算结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 模型的计算结果验证了实验研究提出的“临界半径”现象^[7]。当电极半径不大于 10 cm 时, 间隙 50% 击穿电压并未随着间隙距离减小而减小, 而是保持不变; 当电极半径大于 10 cm 时, 间隙 50% 击穿电压随着电极半径增大而增大。因此, 计算结果表明间隙距离为 2 m 的棒-板电极结构的临界半径值是 10 cm, 这与 G. Carrara 得到的实验值 12.5 cm 基本接近。该现象表明, 在绝缘设计中若想通过增大绝缘结构的等效曲率半径来提高绝缘强度, 需保证绝缘结构的等效曲率半径大于临界半径值。

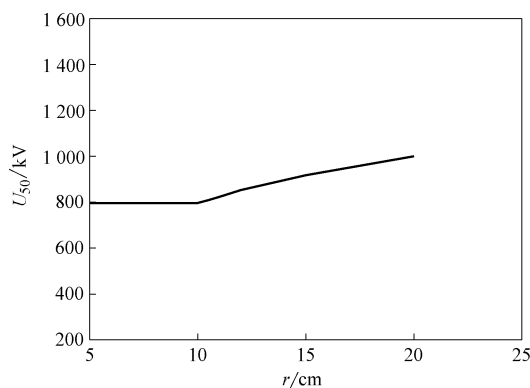


图9 棒-板间隙 50%击穿电压与电极半径关系仿真结果 ($d=2\text{ m}$)

Fig. 9 Simulation results of relationship between 50% breakdown voltage of rod plate gap and electrode radius ($d=2\text{ m}$)

3 结束语

本文介绍了利用长空气间隙放电步进发展模型计算间隙 50%击穿电压的方法。2 m 间隙放电特性计算结果与实验值相近,很好地验证了模型的合理性。应用模型研究了间隙距离对击穿电压的影响,计算结果表明随着间隙距离增加,击穿电压也增加。同时,得到了棒-板间隙 50%击穿电压计算公式、先导起始电压计算公式以及末跃高度计算公式。分析计算发现先导起始电压及末跃高度随着间隙距离增加会出现饱和现象。计算结果表明击穿电压与波前时间关系曲线呈 U 形,临界波前时间与间隙距离近似呈线性关系,根据模型计算结果拟合得到的临界波前时间计算公式符合经验公式。棒电极半径对间隙击穿电压的影响研究表明当电极半径小于某值时,间隙击穿电压基本不变。

参考文献

- [1] SALAMA M M A, PAREKH H, SRIVASTAVA K D. Model for switching surge breakdown of a point-to-plane air gap [J]. J Phys D: Appl Phys, 1976, 47(10): 4425-4429.
- [2] BALDO G, GALLIMBERTI I, GARCIA H N, et al. Breakdown phenomena of long gaps under switching impulse conditions influence of distance and voltage level [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(4): 1131-1140.
- [3] FAROUK A, RIZK M. A model for switching impulse leader inception and breakdown of long air gaps [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 596-606.
- [4] SCHNEIDER K. Positive discharges in air gap discharges at les renardieres—1975: results and conclusions [J]. Electra, 1977(53): 31-153.
- [5] HUTZLER B, HUTZLER D. A model of the breakdown in large air gaps [J]. Edf Bull Etudes et Recherches, 1982(4): 11-19.
- [6] ZHANG Q, KHAN Y, QIU Y, et al. Streamer corona propagation of an inhomogeneous field gap in SF₆ gas stressed by steep-fronted impulse [J]. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35(20): 2605-2607.
- [7] CARRARA G, THIONE L. Switching surge strength of large air gaps: a physical approach [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 512-524.

作者简介



张宇博

张宇博 (1982—), 男, 本科, 工程师, 主要从事高压电器类产品的检测工作。

(收稿日期: 2021-03-16)