

温度梯度下直流 GIL 三支柱绝缘子电荷积聚 对电场分布的影响分析

胡琦¹, 李庆民¹, 刘智鹏², 刘衡¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
2. 北京市高电压与电磁兼容重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要:在直流电压和温度梯度作用下,气体绝缘输电管道的三支柱绝缘子表面及内部容易积聚电荷,引起局部电场畸变,易诱发三支柱绝缘子沿面闪络和支腿炸裂。通过建立直流三支柱绝缘子电-热-流多物理场的电荷积聚模型,研究了不同运行电流下直流三支柱绝缘子的电场畸变特征。在最大允许电流下,三支柱绝缘子的表面切向电场强度主要集中在支腿底部,最大切向电场强度可达 2.87 kV/mm,而三支柱绝缘子金属嵌件-环氧界面的电场强度可达 5.96 kV/mm。直流三支柱绝缘子支腿底部特别是与金属嵌件的交界面,是电场畸变的薄弱环节,在优化设计时需重点考虑温度梯度下支腿底部和金属嵌件的表面电场均匀分布。该研究结果可为高压直流气体绝缘输电管道三支柱绝缘子研发提供参考。

关键词:直流 GIL; 三支柱绝缘子; 电荷积聚; 温度梯度; 电场强度

DOI: 10.12067/ATEEE2101006

文章编号: 1003-3076(2021)07-0020-08

中图分类号: TM216

1 引言

随着非石化能源消费比例的快速增加,能源生产和消费领域之间的距离不断增大,直流输电由于在远距离大容量输电方面具有经济性、稳定性和灵活性等独特优势,在我国得到了迅猛发展^[1]。而气体绝缘金属封闭输电线路(Gas Insulated metal-enclosed transmission Line, GIL)作为一种新型输电方式,具有输送容量大、电能损耗低、电磁辐射小、敷设灵活性强等天然优势,弥补了架空线路和电缆的局限性。因此,直流 GIL 具有很高的应用前景和推广价值^[2, 3]。

目前, GIL 设备已经广泛应用于交流电网中,但在直流输电系统中的应用却鲜见报道,其主要原因在于 GIL 设备在直流电压应力下电场会由初始的电容场分布向稳定的电阻场分布过渡,这种容阻场转变的过程伴随着绝缘子表面及内部的电荷积聚^[4],引发局部的电场畸变,造成直流绝缘件闪络电压显

著降低^[5]。此外,直流电压下 GIL 内电阻性分布电场由材料的电导率决定,而材料电导率受温度的影响极大,当考虑 GIL 载流形成的温度梯度分布时,电场畸变愈加严重^[6]。因此,掌握温度梯度下绝缘子电荷积聚对电场分布的影响对指导新型直流绝缘子设计具有重要意义。

为此,国内外研究学者针对温度梯度下绝缘子表面电荷积聚现象开展了广泛的研究。张周胜等人通过仿真对温度梯度长期影响下直流盆式绝缘子表面电荷积聚进行观测^[7, 8]。研究表明:当考虑温度与绝缘子固体电导率的非线性关系时,盆式绝缘子表面电荷密度显著增加,最大表面电荷密度是不考虑温度影响的 5.85 倍。马国明等人建立了电-热耦合应力下直流盆式绝缘子表面电荷积聚仿真模型与测试平台^[9, 10]。其研究成果表明:温度梯度分布会导致直流盆式绝缘子内部空间电荷和表面电荷积聚加剧,绝缘子表面切向电场强度显著增大。Hering 等人开展了温度对直流 GIS 支柱绝缘子的沿面电场

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51737005, 51807060)、北京市自然科学基金项目(3202031)

作者简介: 胡琦(1996-),男,江西籍,博士研究生,研究方向为直流 GIL 气固界面电荷积聚特性;

李庆民(1968-),男,山东籍,教授,博导,博士,研究方向为高电压与绝缘技术、放电物理。

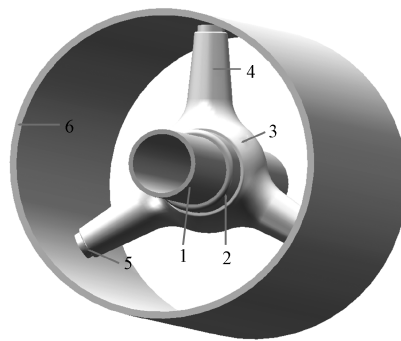
分布以及闪络电压的影响的实验研究^[11, 12],发现:当绝缘子存在温度梯度时,其表面最大电场强度所在位置将向低温侧移动;而且温度越高,绝缘子闪络电压下降越显著。李传扬等人采用了“近似失效绝缘区”的概念解释了温度梯度下电荷行为与沿面闪络的关联性^[13, 14]。

然而,以上研究主要集中于温度梯度下盆式和单支柱绝缘子电荷积聚特性及其对电场分布的影响。实际上,为补偿通流导体的热延伸和机械应变,GIL 设备内除盆式绝缘子外,还大量使用了可以滑动的三支柱绝缘子^[15, 16]。与盆式绝缘子相比,三支柱绝缘子电场分布极不均匀,法向场强集中于腹部,切向场强集中于支腿处,接地嵌件表面电场强度也更大^[17, 18]。而绝缘子空间及表面电荷积聚过程受电场分布影响极大,三支柱绝缘子的不均匀电场分布将导致局部电荷积聚严重。此外,绝缘子的形状对直流 GIL 内部热对流过程有很大的影响^[10, 19],三支柱绝缘子的温度场分布也与盆式绝缘子有较大差异。因此,现有研究无法分析温度梯度下直流三支柱绝缘子电荷积聚对电场分布的影响,难以直接指导直流三支柱绝缘子的优化设计。

为解决上述问题,本文研究了三支柱绝缘子的热传导、热对流和热辐射过程,针对性地建立了直流三支柱绝缘子电-热-流多物理场电荷积聚仿真模型,研究了温度梯度下直流三支柱绝缘子表面及空间电荷积聚特性,以及电荷积聚对三支柱绝缘子电场畸变的规律;找出了直流三支柱绝缘子的绝缘薄弱环节,为直流三支柱绝缘子设计奠定基础。

2 直流三支柱绝缘子电-热-流多物理场电荷积聚模型

本文建立的 GIL 三支柱绝缘子的几何模型如图 1 所示,由中心导杆、嵌筒、绝缘子腹部、绝缘子支腿、嵌件和接地外壳组成。中心导杆外半径为 30 mm,长度为 400 mm;嵌筒包覆导杆,外半径为 36 mm,长度为 140 mm;环氧树脂包覆嵌筒形成三支柱绝缘子,具体可以分为腹部及 3 个支腿,由支腿内的金属嵌件固定;嵌件通过螺栓连接金属外壳接地;接地外壳内半径为 130 mm,厚度为 8 mm;导杆与接地外壳之间充有 0.4 MPa 的 SF₆ 绝缘气体。在仿真研究中,设定中心导杆、嵌筒、嵌件、外壳材料为铝合金。出于简化计算考虑,本研究中忽略了对电场影响很小的微粒收集器和金属连接件。



1—中心导杆;2—嵌筒;3—绝缘子腹部;
4—绝缘子支腿;5—嵌件;6—接地外壳

图 1 三支柱绝缘子几何模型

Fig.1 Geometric model of tri-post insulator

基于上述几何模型,本文构建了直流三支柱绝缘子电-热-流多物理场电荷积聚模型,数据传递示意图如图 2 所示。首先,自然对流是 GIL 内重要的传热方式,需要考虑气体流动对温度分布的影响,而温度的梯度分布是引发自然对流的驱动力,因此需要进行热场-流场双向耦合数据传递。其次,中心导杆在电流作用下的焦耳热损耗是热场计算时的热源,而温度升高导致材料热导率增大,提升绝缘子的电荷运输能力,从而影响电场分布,GIL 电场和热场计算也是双向耦合的过程。

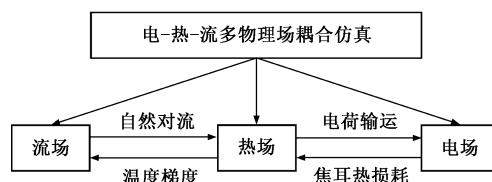


图 2 电-热-流多场耦合仿真数据传递示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrical-thermal-flow multi-field coupled simulation data transmission

2.1 三支柱绝缘子热传递过程

直流 GIL 三支柱绝缘子的热量传递包括热传导、热对流及热辐射三种传热方式,涉及到热场和流场的双向耦合计算。

(1) 热传导

根据傅里叶导热定律,GIL 固体可直接通过热传导交换热量。其中,中心导杆因焦耳损耗发热,作为热源项;绝缘子和接地外壳自身损耗可以忽略不计,可以视为无热源区域。本文中三支柱绝缘子热导率设置为 0.25 W/(m·K),中心导杆的热导率为 209 W/(m·K),接地外壳的热导率为 167 W/(m·K)。

(2) 热对流

对流是 GIL 内最为重要的传热方式, 不仅包括腔体内 SF_6 气体与中心导体、绝缘子和外壳的对流传热, 也包括接地外壳与外界空气的对流传热; 其中, GIL 内部 SF_6 气体流动是由于导体发热引起的, 属于自然对流。针对本文模型尺寸和气体属性算得雷诺数 $Re > 2\,300$, 故采用湍流 $k-\varepsilon$ 模型对三支柱绝缘子附近流场分布进行计算^[19, 20]。接地外壳外表面与空气的对流传热可以用对流热通量 $h(T_0 - T_1)$ 表示, 其中 h 为对流换热系数, 本文设置为 $3\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, T_0 为环境温度, T_1 为外壳温度。

(3) 热辐射

根据斯特藩-玻尔兹曼定律, GIL 中心导杆、三支柱绝缘子、接地外壳的热辐射过程可以用如下方程表示:

$$Q = \omega S_b A (T_1^4 - T_0^4) \quad (1)$$

式中, Q 为辐射热通量; S_b 为 Stefan-Boltzmann 常数; A 为换热面等效面积; T_1 和 T_0 分别为换热面内、外温度; ω 为表面发射率。

本文中三支柱绝缘子的表面辐射率取为 0.15, 中心导体和外壳的表面辐射率取 0.85。

将 GIL 中心导杆的焦耳热损耗作为热-流耦合场的热源, 环境温度设为 293.15 K, 仿真计算得到 GIL 导杆通过最大允许电流 (导杆温度不超过 363 K^[21, 22]) 时三支柱绝缘子温度分布, GIL 轴截面温度分布如图 3 所示, 三支柱绝缘子温度分布如图 4 所示。三支柱绝缘子温度从中心导体附近到接地外壳附近呈梯度递减的趋势, 导杆温度为 363 K 时, 接地外壳温度为 309 K, 最大温差 ΔT 达到 54 K。

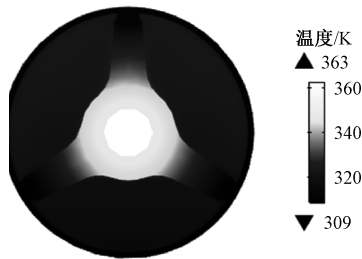


图3 GIL 轴截面温度分布

Fig.3 Temperature distribution of GIL axis section

2.2 直流三支柱绝缘子电-热耦合电荷积聚模型

2.2.1 绝缘子空间电荷

在恒定电场建立过程中, GIL 任一瞬间的电场可以近似看作静电场, 于是电场强度 E 与电位 ϕ 的关系为:

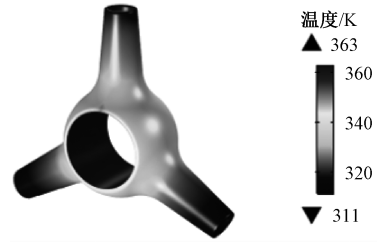


图4 三支柱绝缘子温度分布

Fig.4 Temperature distribution of tri-post insulator

$$E = -\nabla \phi \quad (2)$$

根据高斯定理, 电场强度与空间电荷密度 ρ_i 的关系可表示为:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E) = \rho_i \quad (3)$$

式中, ε_0 为真空介电常数; ε_r 为绝缘子相对介电常数。由于环氧树脂的介电常数在 GIL 运行温度和场强范围内变化较小, 故可近似看作常数。

由电流连续性方程可知绝缘子内空间电荷密度与电流密度 J_i 关系如下所示:

$$\nabla \cdot J_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

根据欧姆定律, 电流密度 J_i 和电场强度 E 之间的关系如下:

$$J_i = \gamma_i E \quad (5)$$

式中, γ_i 为绝缘子体电导率。

结合式(2)~式(5)可得:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -E \cdot \nabla \gamma_i - \frac{\gamma_i}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \rho_i \quad (6)$$

由式(6)可知, 当绝缘子温度相同、电导率保持恒定的条件下, 绝缘子内部没有空间电荷积聚; 当绝缘子存在温度梯度时, 电导率的梯度分布导致空间电荷积聚, 当绝缘子空间电荷积聚达到饱和状态时:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

2.2.2 绝缘子表面电荷

本文建立的绝缘子表面电荷模型包括三种电荷积聚机制: 绝缘子体传导电流、气体侧电流和绝缘子沿面传导电流, 表面电荷积聚暂态方程可表示为:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = n \cdot J_i - n \cdot J_g - \nabla \cdot (J_s) \quad (8)$$

式中, σ 为表面电荷密度; t 为时间; n 为绝缘子表面指向气体侧的法向矢量; J_g 为气体侧电流密度; J_s 为绝缘子表面电流密度。

绝缘子表面电流密度 J_s 和气体侧电流密度可

以利用表面电导率和气体电导率计算得到:

$$J_s = \gamma_s E_r \quad (9)$$

$$J_g = \gamma_g E_g \quad (10)$$

式中, γ_s 为绝缘子表面电导率; E_r 为绝缘子表面切向电场强度; E_g 为气体侧电场强度; γ_g 为气体电导率, 本文设为定值 2×10^{-18} S/m, 符合理想清洁条件下 SF₆ 气体电导率分布范围 ($10^{-20} \sim 10^{-18}$ S/m) [23]。

2.2.3 电-热多物理场耦合

绝缘子电-热多物理场的耦合主要通过温度 T 和绝缘子材料体积电导率 γ_i 和表面电导率 γ_s 的关联关系构成, 电导率具体的计算公式 [21] 如式 (11) 和式 (12) 所示。在绝缘子处于 293.15 K 的温度时, 体积电导率 γ_i 为 4.26×10^{-15} S/m, 表面电导率 γ_s 为 1.17×10^{-18} S, 绝缘子体电导率与表面电导率及气体电导率相差 3~4 个数量级, 这符合理想洁净条件下绝缘材料电导率设置范围 [9, 10, 23, 24]。

$$\gamma_i = \frac{1}{6.85 \times 10^6 \exp\left(\frac{5086}{T}\right)} \quad (11)$$

$$\gamma_s = \frac{1}{1.88 \times 10^{11} \exp\left(\frac{4493}{T}\right)} \quad (12)$$

3 结果与分析

3.1 三支柱绝缘子表面及空间电荷积聚

基于上述模型, 本文研究了在 +110 kV 直流电压作用下, 高压导杆空载 (绝缘子温度均匀, 等同于环境温度 293.15 K) 和通过最大允许电流 (中心导杆温度达 363 K) 时三支柱绝缘子稳定状态下的表面及空间电荷积聚特性。不同负载条件下三支柱绝缘子表面电荷分布如图 5 所示。在直流电压作用下, 三支柱绝缘子表面大部分区域积聚了同极性的正电荷, 只有靠近接地嵌件的区域积聚有负电荷, 说明当不考虑气体侧局部放电等特殊影响时, 三支柱绝缘子体内传导电流比气体侧电流对表面电荷积聚的影响更大。此外, 由于绝缘子表面饱和电荷密度与沿面法向电场强度密切相关, 同极性正电荷主要集中于直流三支柱绝缘子腹部, 受运行电流的影响较小, 最大电荷密度由空载时的 $36.8 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 增加至最大负载时的 $37.3 \mu\text{C}/\text{m}^2$; 异极性负电荷集中于接地嵌件附近, 受运行电流影响较大, 最大电荷密度由空载时的 $-19.8 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 增加至最大负载时的 $-32.6 \mu\text{C}/\text{m}^2$, 峰值增大了 64.6%。

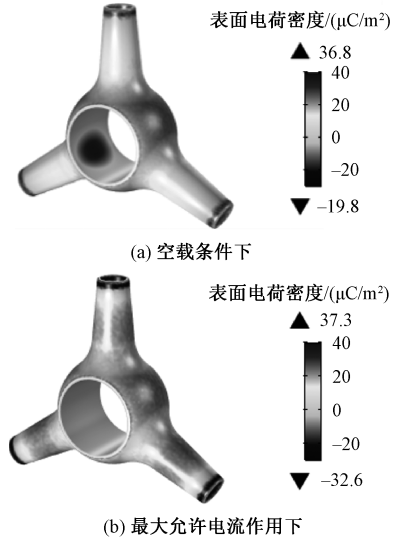


图 5 三支柱绝缘子表面电荷分布

Fig.5 Surface charge distribution of tri-post insulator

由于中心导杆通流发热, 直流 GIL 三支柱绝缘子存在温度梯度, 如图 4 所示。温度梯度的存在会引起绝缘子材料电导率空间梯度变化, 高温区域的电荷传输能力显著大于低温区域, 当高温区域的电荷迁移至低温区域时, 电导率的非均匀分布将导致空间电荷的积聚。最大负载条件下三支柱绝缘子空间电荷分布如图 6 所示。三支柱绝缘子内部积聚有正电荷, 电荷密度最大值为 $8.54 \text{ mC}/\text{m}^3$ 。此外, 由式 (6) 可知, 空间电荷密度与电场强度和温度梯度正相关, 由于接地嵌件-环氧界面电场强度和温度梯度都较大, 因此接地嵌件附近成为空间电荷积聚集中的区域。

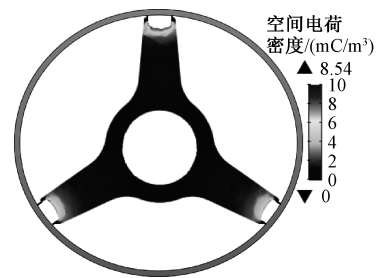


图 6 三支柱绝缘子空间电荷分布

Fig.6 Space charge distribution of tri-post insulator

3.2 直流三支柱绝缘子电场分布

GIL 运行经验表明, 三支柱绝缘子容易出现两种常见故障: 沿面闪络和支腿炸裂。其中, 三支柱绝缘子沿面闪络电压与沿面切向电场强度密切相关, 三支柱绝缘子支腿炸裂与金属嵌件表面电场强度密

切相关^[25],因此,仿真分析电荷积聚对直流三支柱绝缘子电场分布的影响意义重大。本文基于前述直流三支柱绝缘子电-热-流多物理场模型计算了电荷

积聚对三支柱绝缘子表面电场强度分布的影响,如图7所示。

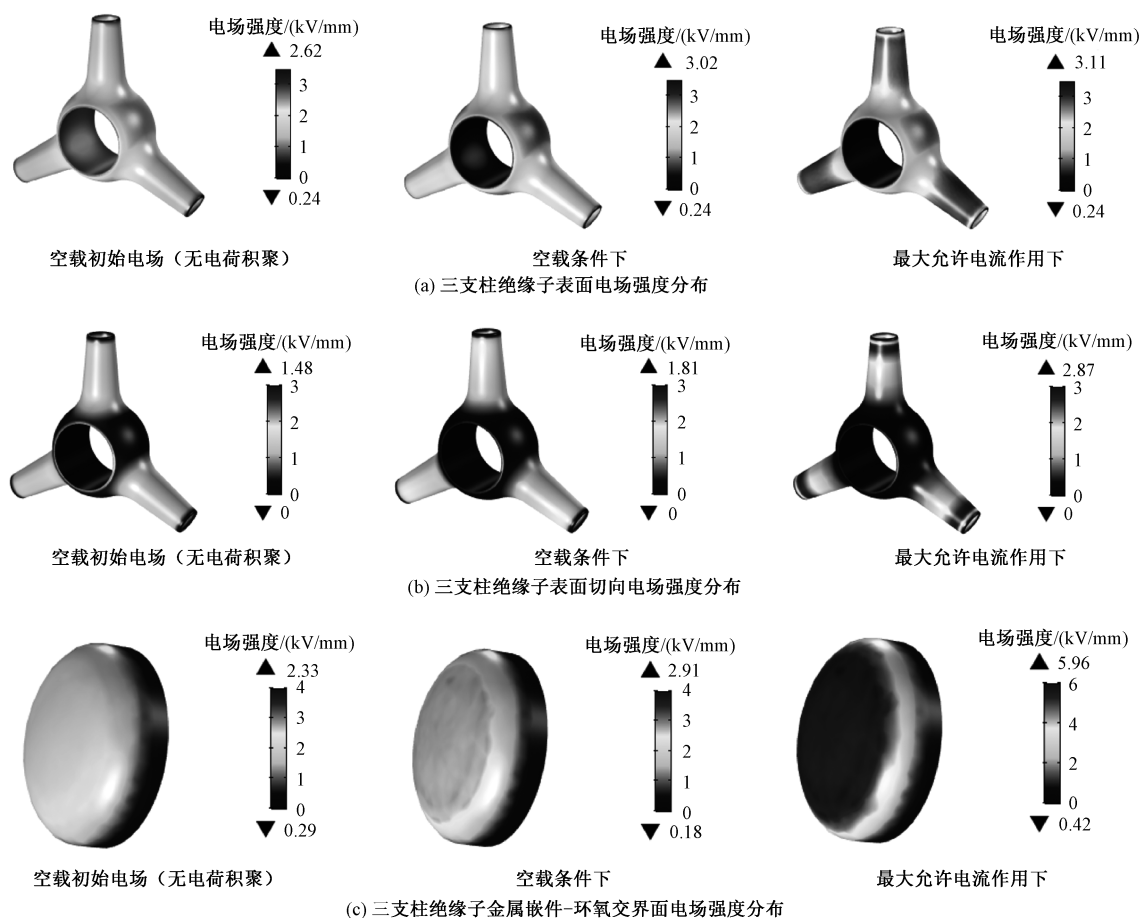


图7 三支柱绝缘子表面电场强度分布

Fig.7 Electric field intensity distribution of tri-post insulator

由图7(a)可知,在直流恒定电场建立过程中,绝缘子支腿处表面电场强度提升明显,表面最大电场强度值也由初始的2.62 kV/mm增加至稳定时的3.02 kV/mm,当考虑最大负载电流引起的温度梯度影响时,电场强度峰值进一步增加至3.11 kV/mm。由图7(b)可知,绝缘子表面切向电场强度较大的区域主要集中在支腿处,最大切向电场强度由初始的1.48 kV/mm增至最大负载电流时的2.87 kV/mm,增长了93.9%。由图7(c)可知,三支柱绝缘子金属嵌件-环氧界面电场强度由初始的2.33 kV/mm增至最大负载电流时的5.96 kV/mm,增长了155.8%。

综上所述,当中心导杆运行在空载条件时,直流三支柱绝缘子表面电荷积聚会增大支腿处的切向电场强度和接地嵌件表面电场强度,但电场强度最大值仍处于三支柱绝缘子腹部区域;当中心导杆通过

最大负载电流时,绝缘子表面及空间电荷的积聚会显著增大金属嵌件表面及附近的电场强度,绝缘子电场强度最大值由三支柱绝缘子腹部转变至金属嵌件处,如图8所示。

温度梯度下直流三支柱绝缘子电荷积聚会显著增大绝缘子局部电场强度,增大三支柱绝缘子绝缘故障风险。一方面,电荷积聚使三支柱绝缘子外表面最大切向电场强度位于支腿底部,而该位置更易受到GIL设备内金属微粒的干扰^[2],最大切向电场强度的增大可能诱导沿面闪络的发生;另一方面,电荷积聚使三支柱绝缘子电场强度最大值集中于金属嵌件-环氧界面,而该区域同样也是三支柱绝缘子机械应力较为集中的区域,电场强度的增大更易引发金属-环氧交界面的局放,从而导致三支柱绝缘子支腿炸裂^[25]。因此,在针对直流三支柱绝缘子进行优

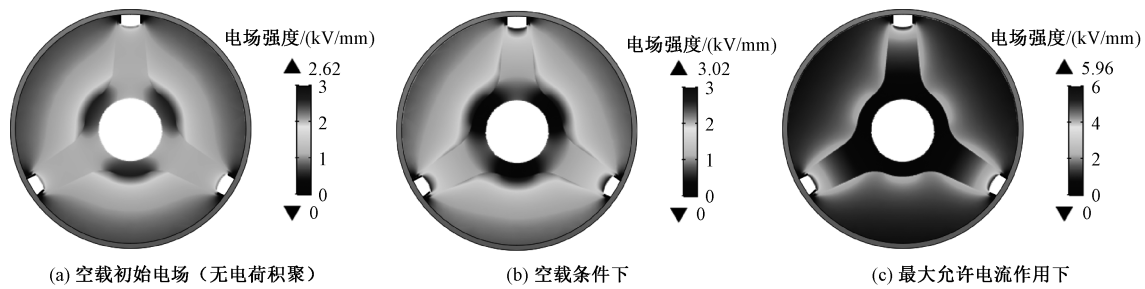


图 8 三支柱绝缘子轴截面电场强度分布

Fig.8 Electric field intensity distribution of tri-post insulator axis section

化设计时,需要考虑温度梯度下三支柱绝缘子电荷积聚对电场分布的影响,可以采用掺杂方法将三支柱绝缘子支腿材料改为非线性电导材料^[26],提高支腿材料电荷消散速率,降低三支柱绝缘子支腿表面及空间电荷密度;此外,在金属-环氧界面使用高介电常数的界面涂覆材料可以释缓界面处的场强集中效应^[27],从而提高直流三支柱绝缘子的运行可靠性。

4 结论

基于建立的直流三支柱绝缘子电-热-流多物理场电荷积聚模型,研究了温度梯度下电荷积聚对直流三支柱绝缘子电场分布的影响,得到如下结论:

(1) 直流正极性电压(+110 kV)作用下,三支柱绝缘子表面大部分区域积聚同极性电荷,只有接地嵌件邻近表面积聚异极性电荷;当 GIL 中心导杆通过最大长期允许电流时,三支柱绝缘子支腿处积聚的同极性电荷密度增大,接地嵌件附近的异极性电荷幅值也由空载时的 $-19.8 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 增至最大负载时的 $-32.6 \mu\text{C}/\text{m}^2$,增大了 64.6%。与此同时,温度梯度分布导致三支柱绝缘子内部积聚有正电荷,电荷密度最大值为 $8.54 \text{ mC}/\text{m}^3$,主要集中在金属嵌件-环氧界面附近。

(2) 受表面及空间电荷积聚的影响,直流三支柱绝缘子表面最大切向电场强度出现在靠近接地嵌件的支腿处,最大切向电场强度由初始 $1.48 \text{ kV}/\text{mm}$ 增至最大负载电流时的 $2.87 \text{ kV}/\text{mm}$,增长了 93.9%;金属嵌件-环氧界面电场强度由初始的 $2.33 \text{ kV}/\text{mm}$ 增至最大负载电流时的 $5.96 \text{ kV}/\text{mm}$,增长了 155.8%,成为直流三支柱绝缘子电场强度最大的区域。

(3) 电荷积聚导致直流三支柱绝缘子支腿底部表面切向电场强度过大,使得三支柱绝缘子更易在

金属微粒的影响下触发沿面闪络;金属嵌件-环氧界面电场强度的大幅增大也使得三支柱绝缘子支腿在机械和电场复合应力下更易发生炸裂。直流三支柱绝缘子支腿底部特别是与金属嵌件的交界面是绝缘子的薄弱环节,可以通过对三支柱绝缘子支腿材料掺杂改性、在金属-环氧界面涂覆高介电常数界面涂层等方法提升直流三支柱绝缘子的运行可靠性。

参考文献 (References):

- [1] 饶宏, 冷祥彪, 潘雅娴, 等 (Rao Hong, Leng Xiangbiao, Pan Yaxian, et al.). 全球直流输电发展分析及国际化拓展建议 (Analysis of the global HVDC power transmission development and the suggestion of the HVDC export) [J]. 南方电网技术 (Southern Power System Technology), 2019, 13 (10): 1-7.
- [2] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等 (Li Qingmin, Wang Jian, Li Botao, et al.). GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展 (Review on metal particle contamination in GIS/GIL) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (3): 849-860.
- [3] 张博雅, 张贵新 (Zhang Boya, Zhang Guixin). 直流 GIL 中固-气界面电荷特性研究综述 I: 测量技术及积聚机理 (Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, Part I: measurement and mechanisms) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (20): 4649-4662.
- [4] Michael T, Hermann K, Denis I. Underground transmission lines for high power AC and DC transmission [A]. 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D) [C]. Dallas, TX, 2016. 1-4.
- [5] 齐波, 张贵新, 李成榕, 等 (Qi Bo, Zhang Guixin, Li Chengrong, et al.). 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景 (Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41

- (5): 1466-1473.
- [6] 李传扬, 林川杰, 陈庚, 等 (Li Chuanyang, Lin Chuanjie, Chen Geng, et al.). 高压直流盆式绝缘子气-固界面电荷行为研究综述 (Review of gas-solid interface charging phenomena of HVDC spacers) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2020, 40 (6): 2016-2026.
- [7] Yan W, Li C, Lei Z, et al. Surface charging on HVDC spacers considering time-varying effect of temperature and electric fields [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26 (4): 1316-1324.
- [8] 晏武, 张周胜, 邓保家, 等 (Yan Wu, Zhang Zhousheng, Deng Baojia, et al.). 温度和正极性电压对直流 GIL 盆式绝缘子表面电荷积聚的影响 (The influence of temperature and positive voltage on the surface charge accumulation of DC GIL basin insulator) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (12): 3889-3897.
- [9] Ma G M, Zhou H Y, Liu S P, et al. Measurement and simulation of charge accumulation on a disc spacer with electro-thermal stress in SF₆ gas [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25 (4): 1221-1229.
- [10] 周宏扬, 马国明, 刘姝嫔, 等 (Zhou Hongyang, Ma Guoming, Liu Shupin, et al.). 基于电-热多物理场耦合模型的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究 (Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC-GIL with electro-thermal coupling model) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (4): 1251-1260.
- [11] Hering M, Gremaud R, Speck J, et al. Flashover behaviour of insulators with inhomogeneous temperature distribution in gas insulated systems under DC voltage stress [A]. 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application [C]. Poznan, Poland, 2014. 1-4.
- [12] Hering M, Joachim S, Steffen G, et al. Influence of gas temperature on the breakdown voltage in gas-insulated systems [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24 (1): 401-408.
- [13] Li C Y, Hu J, Lin C J, et al. The potentially neglected culprit of DC surface flashover: electron migration under temperature gradients [J]. Scientific Reports, 2017, 7 (1): 3271.
- [14] Li C Y, Hu J, Lin C J, et al. Hot electron injection regulation in Al₂O₃-filled epoxy resin composite using Cr₂O₃ coatings [A]. 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) [C]. Toronto, ON, 2016. 101-104.
- [15] 鲁加明, 周振华, 曹伟伟 (Lu Jiaming, Zhou Zhenhua, Cao Weiwei). GIL 用三柱式支撑绝缘子结构研究 (The structure study of three columns support insulator with GIL) [J]. 机械设计与制造 (Machinery Design & Manufacture), 2015, (9): 52-55.
- [16] 贾云飞, 高璐, 汲胜昌, 等 (Jia Yunfei, Gao Lu, Ji Shengchang, et al.). 1 100 kV 气体绝缘金属封闭输电线路用三支柱绝缘子电气性能优化 (Electrical performance optimization for tri-post insulator on 1 100 kV gas-insulated metal-enclosed transmission line) [J]. 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2019, 45 (12): 3889-3897.
- [17] 吴泽华, 王浩然, 田汇冬, 等 (Wu Zehua, Wang Hوران, Tian Huidong, et al.). 特高压 GIL 三支柱绝缘子结构参数分析与优化 (Structural parameter analysis and optimization of tri-post insulator on UHVAC GIL) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (10): 3165-3173.
- [18] 汪建成, 谢文刚, 宫瑞磊, 等 (Wang Jiancheng, Xie Wengang, Gong Ruilei, et al.). 550 kV GIL 三支柱绝缘子设计 (Design of 550 kV GIL three post insulator) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2018, 54 (5): 114-118.
- [19] 高璐, 贾云飞, 汲胜昌, 等 (Gao Lu, Jia Yunfei, Ji Shengchang, et al.). 环保型 1 100 kV GIL 用三支柱绝缘子多物理场耦合仿真及校核 (Multi-physical field analysis and verification of tri-post insulator on environment-friendly 1 100kV GIL) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (3): 987-996.
- [20] 陈世萍, 丛浩熹, 李庆民 (Chen Shiping, Cong Haoxi, Li Qingmin). 基于屏蔽罩开孔的 GIS 隔离开关温度场散热优化设计 (Heat dissipation optimization design for temperature field of GIS disconnecting switch based on shield opening) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (5): 74-80.
- [21] Ma G M, Zhou H Y, Lu S J, et al. Effect of material volume conductivity on surface charges accumulation on spacers under dc electro-thermal coupling stress [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25 (4): 1211-1220.
- [22] 陆彪, 汤凯, 陈德敏, 等 (Lu Biao, Tang Kai, Chen Demin, et al.). 低压开关柜母线温度场数值计算与分析 (Thermal field calculation and analysis of low-voltage switchgear busbar) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020,

- 39 (10): 65-71.
- [23] 杜乾栋, 张乔根, 赵军平, 等 (Du Qiandong, Zhang Qiaogen, Zhao Junping, et al.). 材料电导率对盆式绝缘子沿面电场与电荷分布的影响 (Influence of electric conductivity of materials on field and surface charge distribution of basin-type insulator) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (12): 3865-3871.
- [24] 朱庆东, 潘子君, 潘成, 等 (Zhu Qingdong, Pan Zijun, Pan Cheng, et al.). 温度和电场引起绝缘子体积电导率非均匀性对表面电荷积聚特性的影响 (Effect of volume conductivity non-uniformity of insulator induced by temperature and electric field on accumulation characteristics of surface charge) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2019, 52 (10): 80-86.
- [25] 黎卫国, 张长虹, 杨旭, 等 (Li Weiguo, Zhang Changhong, Yang Xu, et al.). 500 kV GIL 三支柱绝缘子炸裂故障分析与防范措施 (Analysis and protecting measures on burst fault of three-pillar insulator of 500 kV GIL) [J]. 电瓷避雷器 (Insulators and Surge Arresters), 2019, (3): 221-227.
- [26] 李进, 梁虎成, 杜伯学, 等 (Li Jin, Liang Hucheng, Du Boxue, et al.). 气体绝缘直流设备气固界面电场分布特性与调控方法研究进展 (Progress in electrical field distribution along gas-solid interface in compact gas insulated system and its regulation methods) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (8): 2619-2628.
- [27] 王闯, 赵朗, 孙青, 等 (Wang Chuang, Zhao Lang, Sun Qing, et al.). 界面涂层对特高压 GIS 盆式绝缘子导体-绝缘盆体界面处电场调控 (Interface coating to regulate electric field at the interface of central conductor and insulation basin of UHV GIS spacer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (3): 799-806.

Impact analysis of charge accumulation on electric field distribution of DC GIL tri-post insulator under temperature gradients

HU Qi¹, LI Qing-min¹, LIU Zhi-peng², LIU Heng¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Lab of HV and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Under the action of DC voltage and temperature gradient, the surface and interior of the gas insulated metal-enclosed transmission line (GIL) tri-post insulator are prone to charge accumulation, and the electric field distribution is distorted, which easily induces surface flashover and outtrigger burst of the tri-post insulator. By establishing the electric-heat-flow multi-physics charge accumulation model of the DC tri-post insulator, the electric field distortion characteristics of the DC tri-post insulator under different operating currents are studied. Under the maximum allowable current, the surface tangential electric field strength of the tri-post insulator is mainly concentrated at the bottom of the leg, the maximum tangential electric field strength can reach 2.87kV/mm, and the electric field strength of the metal insert-epoxy interface of the tri-post insulator can reach 5.96kV/mm. The bottom of the legs of the DC tri-post insulator, especially the interface with the metal insert, is the weak link of the electric field distortion. In the optimization design, it is necessary to consider the uniform distribution of the surface electric field on the bottom of the leg and the metal insert under the temperature gradient. The research results can provide references for the development of high-voltage direct current GIL tri-post insulators.

Key words: DC GIL; tri-post insulator; charge accumulation; temperature gradient; electric field strength