

# 考虑分布参数的三相绝缘管型母线接地 屏蔽层故障下电场特性分析

徐海洋, 赵玉顺, 贾博涵, 任大伟, 鲍晓华\*  
(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

## Analysis on Electric Field Characteristics of Three-Phase Insulated Tube-Type Busbar Under Grounding Shield Layer Fault Considering Distributed Parameters

Xu Haiyang, Zhao Yushun, Jia Bohan, Ren Dawei, Bao Xiaohua\*

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** [Objective] Aiming at the problems that the grounding shield layer of three-phase insulated tube-type busbars is prone to floating or degradation faults during operation, which further threatens equipment insulation and personal safety, this paper intends to deeply reveal the potential evolution mechanism under such faults and provide theoretical support for the analysis of electric field characteristics under fault conditions. [Methods] First, a field-circuit coupled finite element model of 35 kV three-phase insulated tube-type busbar was established, and the electric field distortion characteristics and potential distribution under the shield floating state were analyzed. Meanwhile, a three-phase coupled equivalent circuit model considering distributed parameters was constructed to calculate the variation law of the floating potential of the shielding layer with respect to the stray capacitance to ground and the grounding resistance. Furthermore, combined with a 1 km line model in practical engineering, the influence of distributed parameters on the induced voltage was analyzed. [Results] The results show that, compared with normal operating conditions, the surface potential of the faulty phase rises with the conductor under the floating shield layer, and electric field distortion occurred in the interphase air domain. The main insulation capacitance was significantly larger than the stray capacitance to ground, causing the shield layer to lose its potential clamping function. Under the resistance grounding condition where the shield layer is grounded

through a resistor, the accumulation of displacement current caused by distributed parameters made long-distance busbar more sensitive to changes in grounding resistance.

[Conclusion] Floating of the grounding shield layer results in a sustained and stable high-voltage state, and the associated electric field distortion severely damages the full shielding characteristic of insulated tube-type busbars. To ensure personal safety and equipment insulation safety, based on the parametric analytical model derived in this paper for estimating the safety threshold of grounding resistance, it is recommended that the grounding resistance of 1 km long insulated tube-type busbars at the 35 kV voltage level be controlled within  $12.3 \Omega$  to maintain sufficient safety margin.

**Key words:** tube-type busbar; grounding shield layer; field-circuit coupling; electric field; distributed parameter

**摘 要:** 【目的】针对三相绝缘管型母线在运行过程中易发生的接地屏蔽层悬浮故障或劣化故障,进而威胁设备绝缘以及人身安全的问题,本文旨在深度揭示该故障下的电位演化机理,并为故障下电场特性分析提供理论支撑。【方法】首先建立 35 kV 三相绝缘管型母线的场路耦合有限元模型,分析了屏蔽层悬浮状态下的电场畸变特征以及电位分布。同时,构建了考虑分布参数的三相耦合等效电路模型,计算了屏蔽层悬浮电位随对地杂散电容及接地电阻的变化规律,并进一步结合工程实际中 1 km 线路模型分析分布参数对感应电压的影响。【结果】结果表明,与正常工况下相比,屏蔽层悬浮状态下故障相的表面电位随导体升高,相间空气域出现电场畸变现象;主绝缘电容显著大于对地杂散电容,屏蔽层丧失电位钳位作用。屏蔽层在电阻接地工况下,分布参数带来的位移电流累积导致长距离母线对接地电阻变化更为敏感。

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(PA2024AGXC0123)

Collaborative Innovation Project of Universities in Anhui Province (PA2024AGXC0123)

**【结论】**接地屏蔽层悬浮将导致持续稳定的高电压状态,其电场畸变会严重破坏绝缘管型母线的全屏蔽特性。为确保人身安全以及设备绝缘安全,基于本文推导出的估算接地电阻安全阈值的参数化解析模型,建议将 35 kV 电压等级下 1 km 长线路绝缘管型母线接地电阻值控制在  $12.3 \Omega$  以内,以留有充足的安全裕度。

**关键词:** 管型母线; 接地屏蔽层; 场路耦合; 电场; 分布参数

## 0 引言

随着城市电网改造与紧凑型变电站建设的推进,社会对于发电用电的需求与日俱增,作为承载电流的导体,绝缘管型母线因其具有载流量大、机械强度高以及集肤效应小等显著优势,在 35 kV 及以下电压等级的输配电系统中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。随着投运年限增加,以及制造、安装工艺水平的参差不齐,绝缘管型母线的运行故障时有发生,严重威胁了电力系统的安全稳定运行。

目前国内外学者对于绝缘管型母线典型缺陷的研究主要集中在以下几个方面:文献[2]研究了 10 kV 绝缘管型母线接头在潮湿以及导电颗粒影响下的电场畸变现象,发现绝缘界面残留导电颗粒时电场畸变情况比水分侵入时更加严重。文献[3]对 35 kV 稳态电场下的单相管型母线进行了研究。针对绝缘偏心问题进行了仿真,结果表明,随着偏心率由 2% 增加至 20%,绝缘区内部的电场分布会变得越发不均匀。偏移区域的最大电场强度显著提高,增加了母线在实际运行中发生故障的概率。文献[4]对 35 kV 绝缘管型母线的绝缘击穿与烧蚀现象进行了研究,结果表明,母线半导体层与金属屏蔽层之间的施工工艺缺陷造成了半导体层发生机械损伤。此类屏蔽层缺陷会导致母线内部电场严重畸变,缺陷处的最大场强达到了  $3.403 \text{ kV/mm}$ ,进而诱发局部放电。文献[5]通过对 110 kV 全绝缘管型母线的击穿现象进行研究,明确了其原因是由于金属屏蔽层出现了毛刺、错位等缺陷。文献[6]基于多物理场的耦合对 35 kV 管型母线的接触面进行分析,证明了接触面的温升随电流的增大而增大;并且采用接触面增加金属镀层的方式可以降低接触面的发热温度。文献[7]以环氧树脂浇注类绝缘管型母线的生产和现场安装工艺为切入点,分析各环节可能

出现的隐患,发现屏蔽筒的安装工艺不当以及金属屏蔽层的尖端毛刺都会引发管型母线故障。文献[8]对全绝缘管型母线中间接头部分的受潮现象进行了研究,发现由于现场安装工艺不良等问题导致屏蔽筒内连接不稳定,存在潜在隐患,长期户外运行下容易导致载流能力下降,引发过热故障。文献[9]设计了带有气泡缺陷的环氧树脂浸渍纸绝缘管型母线的全尺寸模型,并通过耐压试验研究了其电击穿过程,在试验中首次发现了由气体膨胀引起的击穿失效模式。研究还得出,局部放电所产生的电、热和高能粒子的综合作用,会导致气泡壁周围绝缘材料的分子链发生断裂和碳化,进而侵蚀绝缘材料造成贯穿性的绝缘击穿。

尽管现有研究已对绝缘管型母线的故障情况进行了较为详尽的研究,但大多局限于单相分析或简单的单物理场定性观察,缺乏对长距离母线单相故障下的相间干涉机制以及分布参数效应的定量推导。目前也没有对绝缘管型母线服役状态的有效监测和评估手段,因此难以实现将状态检修体系覆盖应用到此类设备<sup>[10-14]</sup>。三相绝缘管型母线的单相接地屏蔽层悬浮及经电阻接地工况下的电场畸变现象及分布规律的研究较为缺乏,有待进一步研究。

## 1 基于场路耦合理论的有限元计算方法

### 1.1 电场理论基础

本文所研究的三相绝缘管型母线的结构为每相独立同轴管型,且母线沿轴向长度远大于横截面特征尺寸。材料与结构沿轴向视为均匀,端部效应可忽略,因此电场主要由横截面分布决定,可在二维截面内求解标量电势。

在三相绝缘管型母线所处电场中,根据麦克斯韦方程组,在无空间自由电荷的绝缘介质区域内,电位分布由拉普拉斯方程描述为

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -\nabla\varphi \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \\ \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\nabla$ 为哈密顿算子; $\varphi$ 为电位; $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量; $\varepsilon_0$ 为真空介电常数; $\varepsilon_r$ 为绝缘材料的相对介电常数。

通过式(1)可以得到计算域内标量电位控制方程为

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi) = 0 \quad (2)$$

三相绝缘管型母线采用三相交流电供电。在仿真模型中,分别对 A、B、C 三相导体施加电流密度载荷。设电流为正弦波,且三相之间存在  $120^\circ$  的相位差,其数学表达式为

$$\begin{cases} i_A(t) = I_m \sin(\omega t) \\ i_B(t) = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_C(t) = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_m$  为电流幅值;  $\omega = 2\pi f$  为角频率,取工频 50 Hz。

为了模拟开放空间同时限制计算域大小,本文采用截断边界法,在距离 A 相母线中心  $8R$  (半径)处设置空气域外边界,在空气域的最外层设置接地边界条件。

## 1.2 场路耦合理论

在建立接地屏蔽层与外部电路连接的过程中需引入场路耦合边界条件,在有限元计算中,该耦合需要通过两个物理量的双向传递实现。

由场到路:

$$I_{\text{leak}} = \iint_{\Gamma_s} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \, dS = \iint_{\Gamma_s} (\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r) \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS \quad (4)$$

式中:  $I_{\text{leak}}$  为注入外部电路的等效电流;  $\mathbf{n}$  为表面的单位法向量;  $\Gamma$  为场路耦合边界;  $\mathbf{J}$  为边界上的总电流密度矢量;  $\sigma$  为材料电导率;  $j$  为电流密度。

式(4)表示由场域耦合边界积分得到注入外部电路的等效电流。

由路到场:

$$\dot{\varphi}|_{\Gamma_s} = \dot{U}_{\text{shield}} \quad (5)$$

式中:  $\dot{\varphi}|_{\Gamma_s}$  为耦合边界上的电位;  $\dot{U}_{\text{shield}}$  为外部电路中屏蔽层节点电压。

式(5)表示耦合边界上的电位与外部电路中屏蔽层节点电压相等,即电路侧求得的屏蔽层节点电压作为边界条件反馈到场域,实现由路到场的双向耦合。

在有限元计算中,上述过程并非简单迭代,而是构建了包含有限元离散方程与电路节点方程的全耦合系统矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\text{FEM}} & \mathbf{C}_{\text{couple}} \\ \mathbf{C}_{\text{couple}}^T & \mathbf{R}_{\text{circuit}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{K}_{\text{FEM}}$  为场域刚度矩阵,用于描述场域节点电位自由度之间的耦合关系;  $\mathbf{R}_{\text{circuit}}$  为电路拓扑矩阵,用于表示接地支路及相关电路元件之间的拓扑与约束关系;  $\mathbf{C}_{\text{couple}}$  为耦合矩阵,用于实现边界电流与节点电压在场域和电路之间的双向映射;  $\boldsymbol{\Phi}$  为场域节点电位向量;  $\mathbf{I}$  为电路支路电流向量;  $\mathbf{F}$  为场域激励载荷向量;  $\mathbf{S}$  为电路激励载荷向量。

通过全耦合系统矩阵的构建实现了场方程与电路方程的同步求解。具体流程为:建立三相绝缘管型母线二维模型→设置材料参数和边界条件→引入外部电路建立接地屏蔽层与接地支路间的场路耦合关系→离散场域控制方程与电路节点方程并组装成全耦合矩阵→联立求解。

## 2 模型搭建

### 2.1 仿真模型绘制

本文以 35 kV 变电站常用的绝缘管型母线模型为研究对象,考虑到绝缘管型母线在轴向方向上的结构与材料内部结构的高度一致性,其内部电场分布主要呈现径向特征,因此本文采用二维多物理场仿真几何模型进行求解,其典型结构如图 1 所示。

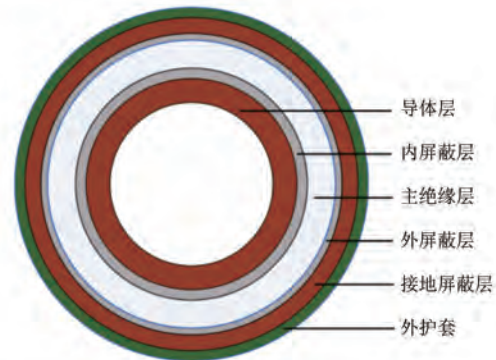


图 1 绝缘管型母线结构图

Fig. 1 Structure diagram of the insulated tube-type busbar

绝缘管型母线的主绝缘系统基于同轴圆柱体电场模型设计,采用多层复合介质结构来优化高场强下的绝缘性能。其径向绝缘结构由内至外依次为导体层、内半导体屏蔽层、主绝缘层、外半导体屏蔽层、金属接地屏蔽层以及外护套。其中,主绝缘层作为绝缘结构的核心,承担着母线运行电压下的绝缘强度。根据同轴圆柱电极理论,绝缘层内部电

场强度  $E$  沿径向分布并不均匀,其分布函数为

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{out}}}{R_{\text{in}}}\right)} \quad (7)$$

式中:  $U$  为施加电压;  $r$  为计算点半径;  $R_{\text{out}}$  和  $R_{\text{in}}$  分别为主绝缘的外半径和内半径,其值分别为 45.5 mm 和 30 mm。

## 2.2 网格剖分及参数设定

采用映射网格技术进行扫掠划分,强制在薄层内生成规则的高质量矩形网格单元。规整的矩形映射网格能精准控制壁面法向的网格厚度,为后续非线性求解提供较高的稳定性。

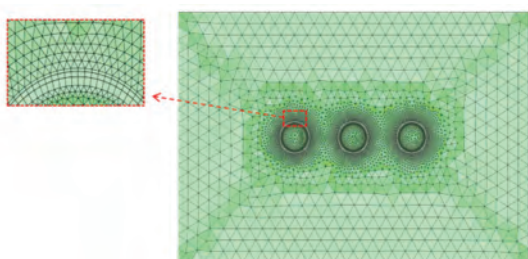


图2 三相绝缘管型母线网格剖分图

Fig. 2 Mesh generation diagram of the three-phase insulated tube-type busbar

材料参数设定如表 1 所示,导体层及金属接地屏蔽层的材料选用铜,其电导率取  $5.998 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,用于近似理想导体的等势性能;对于金属材料,电场分布主要由其高电导率决定,因此介电常数不作为主导参数。外护套材料采用聚乙烯,主绝缘层采用交联聚乙烯。内外屏蔽层均采用乙丙橡胶,其介电常数统一取 3.0,电导率分别取  $1.0 \times 10^{-2}$  与  $2.0 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ ,以反映半导体屏蔽层在导体与绝缘、绝缘与金属屏蔽之间的均压与电荷泄放作用。

表 1 材料参数设定

Tab. 1 Setting of material parameters

| 材料      | 电导率/<br>( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 相对介<br>电常数 | 导热系数/<br>[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|---------|--------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 聚乙烯     | $2.74 \times 10^{-18}$                     | 2.25       | 0.4                                                          | 935                                        |
| 铜       | $5.998 \times 10^7$                        | /          | 400                                                          | 8 960                                      |
| 乙丙橡胶(外) | $2.0 \times 10^{-2}$                       | 3.0        | 0.5                                                          | 1 055                                      |
| 交联聚乙烯   | $1.0 \times 10^{-18}$                      | 2.3        | 0.35                                                         | 930                                        |
| 乙丙橡胶(内) | $1.0 \times 10^{-2}$                       | 3.0        | 0.5                                                          | 1 055                                      |
| 空气      | $1.0 \times 10^{-15}$                      | 1.0        | /                                                            | /                                          |

## 2.3 屏蔽层悬浮电位的模型建立

在三相绝缘管型母线的正常运行中,金属屏蔽层通常处于可靠接地状态,当发生接地屏蔽层断裂或失效的悬浮故障时,该屏蔽层不再具有固定参考电位,而是转变为一个电位未知但表面等势的浮置导体。为了在有限元中准确求解该悬浮电位,必需引入基于电荷守恒的悬浮电位边界条件。

### (1) 等势面约束

在工频准静态条件下,金属屏蔽层内部具有极高的电导率,在外部交变电场的作用下,其表面及内部的自由电荷会迅速重新分布以达到静电平衡。因此,悬浮状态下的屏蔽层表面  $\Gamma_f$  必定是一个等势面。设其未知的悬浮电位为  $V_f$ ,则在该边界上满足第一类狄利克雷边界条件:

$$V(x, y) = V_f(x, y) \in \Gamma_f \quad (8)$$

### (2) 电荷守恒方程

由于屏蔽层接地线断开后处于电气孤立的状态,根据电荷守恒定律,若忽略初始带电量,该悬浮导体在任意时刻的净电荷量  $Q_f$  必需为零。根据高斯定理,穿过闭合等势面  $\Gamma_f$  的电位移矢量  $\mathbf{D}$  的法向通量等于该面包围的自由电荷总量:

$$Q_f = \oint_{\Gamma_f} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{\Gamma_f} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial n} dS \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$  为屏蔽层外侧相邻绝缘介质的介电常数;  $n$  为等势面  $\Gamma_f$  的单位外法向矢量。

当发生完全悬浮故障且无外部电荷注入时,  $Q_f = 0$ ,因此必需满足以下积分形式的诺伊曼边界约束:

$$\oint_{\Gamma_f} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial n} dS = 0 \quad (10)$$

### (3) 有限元数值分析

在场路耦合的有限元矩阵求解中,由于  $V_f$  是未知变量,常规的强加电位边界条件无法直接适用。此时,有限元算法通过“节点自由度耦合”技术来实现:将边界  $\Gamma_f$  上所有的离散节点的电位自由度强行绑定为一个独立的主自由度  $V_f$ 。同时将上述积分为零的电荷守恒方程作为一个附加的代数方程,以拉格朗日乘子法扩充到系统的整体刚度矩阵中进行联立求解,从而在每次迭代中自适应地确定浮置导体的唯一悬浮电位  $V_f$ 。

### 3 屏蔽层悬浮故障下的电场特性

#### 3.1 正常工况

图 3 为绝缘管型母线在工频 (50 Hz) 电压激励下的位移电流密度模分布仿真结果。由图 3 可知, 位移电流密度主要集中分布于绝缘管型母线的主绝缘层区域, 呈现出高度对称的环状分布特征。

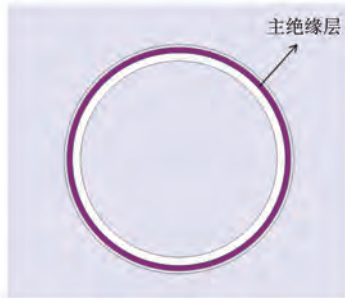


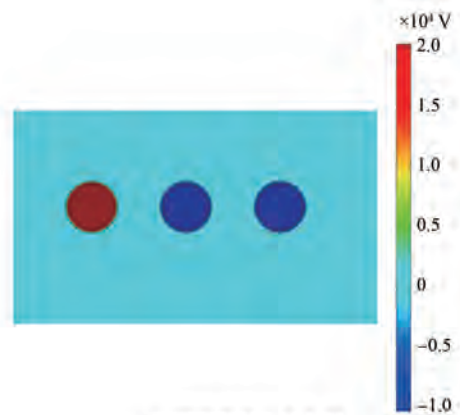
图 3 单相位移电流密度分布图

Fig. 3 Single-phase displacement current density distribution diagram

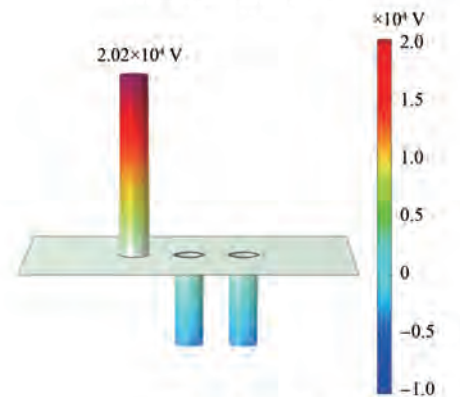
仿真结果显示, 位移电流密度最大值约为  $2.11 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ , 由于电流密度与电场强度之间以及角频率是成正比的, 所以该云图实际上也反映了母线绝缘层内部的电场分布情况。由于绝缘层内部位移电流密度较高, 说明该区域承受了主要的交变电场应力, 且分布较为均匀, 未见明显的局部畸变。

选取时间节点为 A 相电压达到正极性峰值的时刻, 即电角度  $\omega t = 0$ 。设置各相绝缘层的外表面为接地边界条件, 模拟实际工程中分相屏蔽接地的运行方式。三相绝缘管型母线的电势分布图如图 4 所示。由图 4 可知, 电势分布呈现出典型的同轴圆柱场, 且完全限制在各相绝缘层内, 相间未出现电场干涉。在  $\omega t = 0$  时刻, A 相电位达到正峰值约 20 kV, B、C 相电位约 -10 kV, 满足三相平衡关系。该分布结果表明屏蔽结构设计可以有效实现三相绝缘管型母线电场的径向约束。

为量化正常工况下每相母线电势较高处的分布特性, 沿 A 相内屏蔽层-主绝缘层-外屏蔽层作水平截线提取电势值, 绘制分布曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 电势在截线起点处即内屏蔽层处约为 -10 kV, 随后在主绝缘层范围内呈现近似线性单调上升的趋势, 并在外屏蔽层位置趋近于 0。



(a) 三相电势截面分布图



(b) 三相电势柱状分布图

图 4 三相绝缘管型母线电势分布云图

Fig. 4 Potential distribution cloud map of the three-phase insulated tube-type busbar

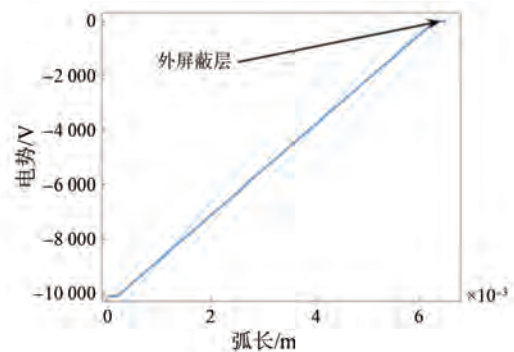


图 5 A 相 (非故障相) 局部电势分布曲线图

Fig. 5 Local potential distribution curve of phase A (healthy phase)

该结果表明, 在正常接地条件下, 外屏蔽层会稳定钳制对地电位, 电压主要落在主绝缘层内, 并形成由内向外逐渐递减的电位梯度。

#### 3.2 接地屏蔽层悬浮下电场分布特性

图 6 模拟了 A 相外屏蔽层接地线断裂后的

电势分布结果。与正常运行工况相比,电场分布出现明显畸变,故障相的电势不再局限于绝缘层内部,而是向周围空气域扩散。由于屏蔽层失去地电位钳制,其通过电容耦合感应出与内部导体同极性的高悬浮电位差,导致相间空气气隙承受了较高的电压梯度。当屏蔽层悬浮时,电位抬升将显著改变绝缘外部空间的电势分布,进而增加外护套表面电场水平以及相间干扰的风险。

根据静电感应原理,悬浮后的接地屏蔽层对地电位  $U_{\text{shield}}$  取决于主绝缘层电容  $C_{\text{in}}$  与外部杂散电容  $C_{\text{out}}$  的分压比:

$$U_{\text{shield}} = U_c \cdot \frac{C_{\text{in}}}{C_{\text{in}} + C_{\text{out}}} \quad (11)$$

式中:  $U_c$  为屏蔽层悬浮电位。

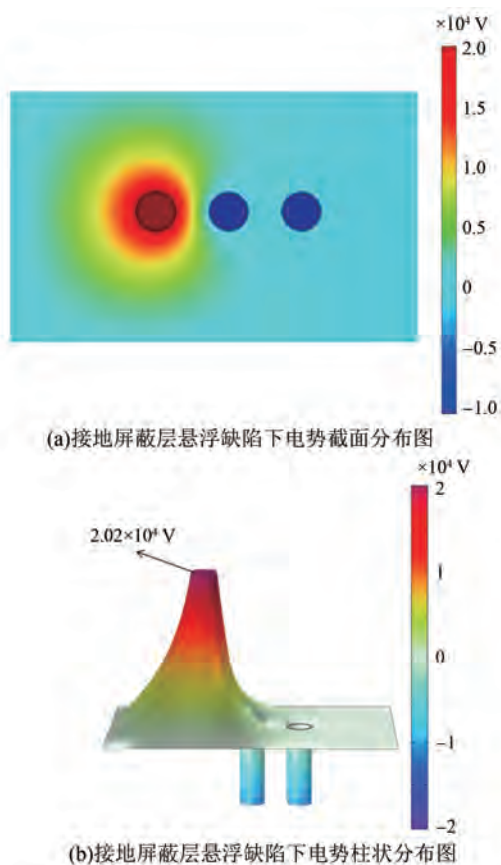


图6 A相屏蔽层接地失效下的电位分布云图

Fig. 6 Potential distribution contour plot of phase A under grounding failure of the shield layer

图7展示了A相屏蔽层接地失效后的位移电流密度分布情况。可以观察到故障相周围的位移电流流线发生重构,与正常工况下电场被限制

在屏蔽层内部不同,接地失效后导致屏蔽层电位悬浮,使得位移电流穿过外护套进入空气域,并向邻近相和大地发散。

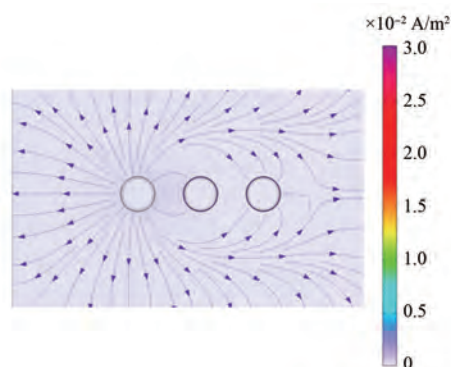


图7 A相屏蔽层悬浮下的位移电流密度分布图

Fig. 7 Displacement current density distribution of Phase A under floating condition of the shield layer

正常工况下,管型母线的外护套仅用于机械保护和防腐蚀作用,但故障期间会承受较大的位移电流分量。由于外护套材料大部分情况非针对高频或高压绝缘设计,长期的位移电流作用可能导致介质损耗发热增加,加速材料老化。

根据麦克斯韦方程组,位移电流密度大小与电场强度的变化率成正比:

$$J_d = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \approx j\omega \varepsilon E \quad (12)$$

式中:  $J_d$  为位移电流密度;  $E$  为电场强度。

仿真结果中空气域出现的非零位移电流密度,本质上反映了该区域电场强度的强烈畸变。这种畸变不仅改变了绝缘管型母线的电容耦合结构,更导致杂散电容电流路径的改变,这是诱发局部放电的根本原因。

### 3.3 考虑分布参数的三相等效电路模型构建

为揭示屏蔽层悬浮导致电位畸变的物理机理,首先基于电容分压的等效电路模型,通过计算不同对地杂散电容  $C_{\text{stray}}$  下的屏蔽层电压,得到如图8所示的特性曲线。由图8可知,当  $C_{\text{stray}}$  在 0~100 pF 范围内变化时,屏蔽层悬浮电位  $U_{\text{shield}}$  始终维持在 90% 相电压以上。这与前文屏蔽层呈现高电位的现象相符,说明屏蔽层接地失效故障下会导致极高且稳定的悬浮电位。

为了探究屏蔽层单相接地不良引发的相间干涉机制,解决单相分析模型的局限性,本文构建了考虑分布参数效应的三相耦合等效电路模

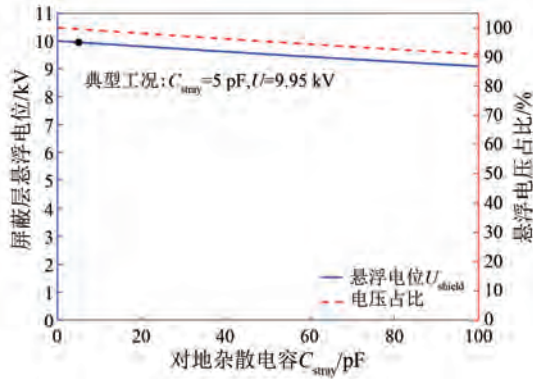


图 8 屏蔽层悬浮电位随对地杂散电容的变化规律

Fig. 8 Variation law of floating potential of the shield layer with stray capacitance to ground

型,如图 9 所示。在该模型中, $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  分别代表 A、B、C 三相高压导体激励, $C_{in,A}, C_{in,B}, C_{in,C}$  分别为 A、B、C 三相主绝缘等效分布电容。模型引入  $C_{mAB}, C_{mBC}, C_{mAC}$  来表征三相屏蔽层之间通过空气气隙形成的杂散互容。

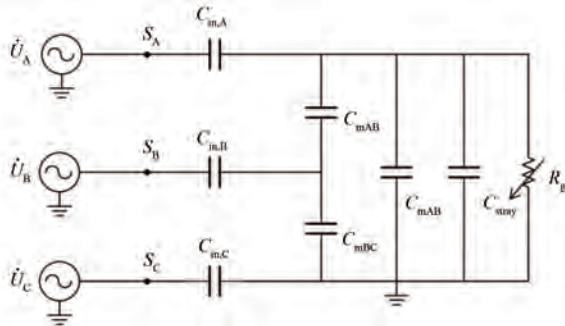


图 9 考虑分布参数的三相等效电路模型

Fig. 9 Three-phase equivalent circuit model considering distributed parameters

在正常工况下,三相屏蔽层节点  $S_A, S_B, S_C$  均可可靠接地,相间互容两端等电位,不产生漏电流。当 A 相发生接地阻抗  $R_g$  增大的故障时,A 相屏蔽层节点的电位抬升。根据基尔霍夫电流定律,原本应流入大地的位移电流发生分流:一部分流经故障相电阻  $R_g$  和对地杂散电容  $C_{stray}$ ,另一部分则被迫通过相间互容  $C_{mAB}, C_{mAC}$  流至非故障相的屏蔽层回路中。

基于上述三相耦合等效电路,对故障相的屏蔽层节点  $S_A$  应用基尔霍夫电流定律。在工频稳态下,流入节点  $S_A$  的电容耦合位移电流等于流出该节点的电流与相间互容分流之和:

$$j\omega C_{in}(\dot{U}_A - \dot{U}_{SA}) = \left(\frac{1}{R_g} + j\omega C_{stray}\right)\dot{U}_{SA} + j\omega C_{mAB}(\dot{U}_{SA} - \dot{U}_{SB}) + j\omega C_{mAC}(\dot{U}_{SA} - \dot{U}_{SC}) \quad (13)$$

式中: $\dot{U}_{SA}$  为 A 相的稳态感应电压; $\dot{U}_{SB}$  为 B 相的稳态感应电压; $\dot{U}_{SC}$  为 C 相的稳态感应电压。

在单相接地不良工况中,非故障相的屏蔽层保持良好的地电位钳制,即:

$$\dot{U}_{SB} - \dot{U}_{SC} = 0 \quad (14)$$

将此边界条件代入式(13),可解析出故障相屏蔽层的稳态感应电压  $\dot{U}_{SA}$  为

$$\dot{U}_{SA} = \frac{j\omega C_{in}}{\frac{1}{R_g} + j\omega(C_{in} + C_{stray} + C_{mAB} + C_{mAC})}\dot{U}_A \quad (15)$$

考虑到在实际工程中绝缘管型母线的电容参数具有明显的长度累积效应。等效总杂散电容为

$$C_{\Sigma} = C_{stray} + C_{mAB} + C_{mAC} \quad (16)$$

线路总长度为  $l$ ,则式(15)可改写为分布参数形式:

$$\dot{U}_{SA} = \frac{j\omega C_{in}l}{\frac{1}{R_g} + j\omega(C_{in} + C_{\Sigma})l}\dot{U}_A \quad (17)$$

### 3.4 屏蔽层感应电压随接地电阻的变化规律

屏蔽层完全悬浮状态可等效为接地电阻  $R_g$  无穷大。然而在实际工况下,大部分故障表现为  $R_g$  由接近于零到不断增大的渐变过程。在工频 50 Hz 下,导体对屏蔽层的电场耦合等效为电容  $C$ ,屏蔽层对地通过接地电阻  $R_g$  泄放。屏蔽层上的感应电压由电容耦合电流与接地阻抗共同决定,呈现出典型的一阶分压特性:

$$\begin{cases} U_s = U_{ph} \frac{R_g}{\sqrt{R_g^2 + X_c^2}} \\ X_c = \frac{1}{\omega C} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $U_{ph}$  为相电压; $X_c$  为等效电容阻抗。

式(18)表明,当  $R_g \gg X_c$  时,屏蔽层趋于悬浮状态,当  $U_s$  逐渐逼近相电压时,进入饱和区。

图 10 为屏蔽层感应电压随接地电阻的变化,对比仿真模型与工程实际曲线可知,在三相绝缘管型母线的轴向方向上,导体-屏蔽层电容耦合

属于分布参数,其等效电容随长度增加呈近似线性增长。当母线长度从仿真模型的 1 m 扩展至工程实际的 1 km 时,其对地总杂散电容  $C_{\Sigma}$  将增大  $10^3$  倍,流经屏蔽层接地点的位移电流也将按比例激增。这说明长度效应是影响绝缘管型母线屏蔽层感应电压的关键因素。

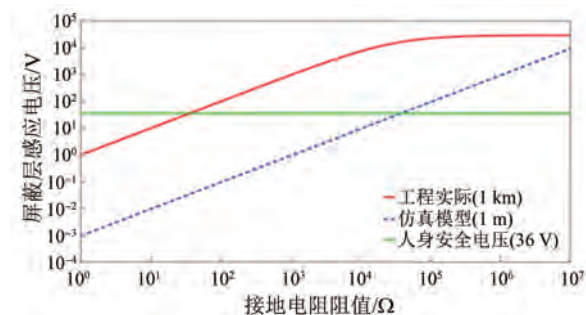


图 10 屏蔽层感应电压随接地电阻的变化规律

Fig. 10 Variation law of shield layer induced voltage with grounding resistance

### 3.5 接地电阻安全阈值的推导与计算

基于分布参数解析式,当  $\frac{1}{R_g} \gg j\omega(C_{in} + C_{\Sigma})l$  时,系统处于接地不良状态初期阶段,此时接地电阻远小于系统容抗,分母中的电阻项可以忽略,屏蔽层感应电压的幅值近似为

$$|\dot{U}_{SA}| \approx \omega C_{in} l R_g |\dot{U}_A| \quad (19)$$

为确保人身与设备绝缘安全,屏蔽层最高感应电压必需严格限制在安全电压临界值  $U_{safe}$  内,同时为应对电网电压波动以及环境因素,须引入 1.3~1.5 倍可靠性系数  $k$  以留有充足的安全裕度。因此安全电压边界条件为

$$|\dot{U}_{SA}| \leq \frac{U_{safe}}{k} \quad (20)$$

绝缘管型母线的主绝缘分布电容可由同轴圆柱电容解析式计算:

$$C_{in} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{out}}{R_{in}}\right)} \quad (21)$$

结合系统相电压与线电压有效值关系以及角频率与频率关系,可推导出适用于估算同轴管型绝缘母线的接地电阻安全阈值的理论模型:

$$R_{g,s} = \frac{\sqrt{3}U_{safe} \ln\left(\frac{R_{out}}{R_{in}}\right)}{4\pi^2 k f U_N \epsilon_0 \epsilon_r l} \quad (22)$$

式中:  $U_N$  为系统额定线电压;  $f$  为系统运行工频。

以本文研究的 35 kV 典型绝缘管型母线为例,在限制安全电压 36 V 下,可靠系数  $k$  取 1.5,根据前文材料几何参数尺寸,通过同轴圆柱电容解析公式计算单位长度主绝缘电容,可得  $C_{in} = 307.2$  pF/m,代入接地电阻安全阈值公式可得  $R_{g,s} = 12.3$  Ω。

## 4 结语

本文对三相绝缘管型母线的屏蔽层悬浮及经电阻接地特性进行了深入研究,综合利用了有限元仿真与三相耦合等效电路模型,分析了电场畸变现象及其故障机理,并进行了屏蔽层感应电压的量化分析与接地电阻安全阈值估算。主要结论如下:

(1) 当单相屏蔽层发生悬浮故障时,主绝缘电容远大于对地杂散电容,绝缘层失去电位约束作用,屏蔽层则会感应出较高的悬浮电位,其幅值始终维持在相电压的 90% 以上。在潮湿条件下畸变的电场极易诱发表面电晕放电,甚至造成相间空气沿面闪络击穿,威胁设备安全运行。

(2) 三相绝缘管型母线的导体-屏蔽层耦合具有典型的分布参数特征,其容性位移电流随线路长度的增加近似线性增长。通过仿真与计算可知,长距离工程线路在屏蔽层接地不良时的感应电压上升斜率高于短距离试验模型,因此在长距离输电中安全风险会高于短距离的仿真试验模型。

(3) 基于分布参数解析式,本文推导出用于估算绝缘管型母线接地电阻安全阈值的理论模型。经仿真与理论计算,本文研究的 35 kV 典型绝缘管型母线主绝缘分布电容约为 307.2 pF/m, 1 km 线路下的接地电阻安全估算阈值为 12.3 Ω。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

徐海洋进行了方案设计、内容总结与论文撰写,贾博涵、任大伟进行了仿真模型验证与数据分

析, 鲍晓华、赵玉顺参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Xu Haiyang was responsible for scheme design, content summarization and manuscript writing. Jia Bohan and Ren Dawei carried out the experimental research. Bao Xiaohua and Zhao Yushun participated in the review and revision of the paper. All authors have read and approved the submission of the final manuscript.

## 参考文献

- [ 1 ] 赵一平, 董晓博, 靳浩源, 等. 基于中压混合器件的 ANPC 母排绝缘与寄生参数优化设计[J]. 电力工程技术, 2025, 44(4): 52-61.
- [ 2 ] 孙丰睿, 咸日常, 咸峰, 等. 10 kV 管型绝缘母线典型缺陷下的电场畸变分析[J]. 绝缘材料, 2024, 57(9): 140-148.
- [ 3 ] Zhang D, Zheng Z, Wang Y, et al. Electric Field Simulation Study of Squeezed Insulated Tube Bus [ C ]// 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Nanjing, IEEE, 2019, 505-509.
- [ 4 ] Liu F L, Xue Z H, Deng Y S, et al. Researches on abnormal operating and condition assessment methods for insulating tubular bus-bar [ C ]// 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an, IEEE, 2016, 110-113.
- [ 5 ] 王仕伟. 110 kV 全绝缘管型母线研制及击穿原因分析验证[J]. 电工技术, 2025, (20): 211-213.
- [ 6 ] 余佐文, 马爱清, 高大崑. 基于多场耦合的 35 kV 管型母线接触面发热分析[J]. 电瓷避雷器, 2025 (2): 27-33.
- [ 7 ] 朱思瑞, 刘洋, 阮羚, 等. 环氧树脂浇注类绝缘管型母线易发缺陷分析及检测手段[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2664-2670.
- [ 8 ] 郝越峰, 马春雷, 陆禹初. 全绝缘管型母线缺陷分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 84-89.
- [ 9 ] Ren X, Ruan L, Jin H, et al. Electrical-mechanical model of electrical breakdown of epoxy-impregnated-paper insulated tubular busbar with bubble defects [J]. IEEE Access, 2020, 8: 197931-197938.
- [ 10 ] 阮羚, 李成磊, 杨帆, 等. 绝缘管型母线的发展现状及研究动向[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 43-53.
- [ 11 ] 黎斌, 于欣, 全志红, 等. 对中国有机绝缘管形母线的回顾与展望[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 9-17.
- [ 12 ] 张黛芳. 绝缘管型母线典型缺陷故障的多物理场耦合特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [ 13 ] 祝伟强, 付芸. 主变变低绝缘管型母线故障分析[J]. 电气技术, 2019, 20(5): 96-99.
- [ 14 ] 张文超, 张婧. 一起 10 kV 全绝缘管型母线故障综合分析及防范措施[J]. 电力设备管理, 2025

- (4): 53-55.
- Zhang W C, Zhang J. Comprehensive analysis and preventive measures of a 10 kV fully insulated tubular busbar fault [J]. Electric Power Equipment Management, 2025(4): 53-55.
- [15] 刘自达, 王俊飞. 绝缘管型母线在风电场中的应用与性能分析[J]. 中国高新科技, 2025(14): 59-61.
- Liu Z D, Wang J F. Application and performance analysis of insulated tubular busbars in wind farms [J]. China High-Tech, 2025(14): 59-61.
- [16] 吴志坤, 全年. 一起主变压器低压侧全绝缘管型母线击穿故障分析[J]. 农村电工, 2025, 33(5): 59-60.
- Wu Z K, Tong N. Analysis of a breakdown fault on the low-voltage side fully insulated tubular busbar of main transformer [J]. Rural Electrician, 2025, 33(5): 59-60.
- [17] 邵俊. 管型母线的选型以及聚酯薄膜机械绕包式管型母线的关键技术[J]. 电器工业, 2025(2): 67-71.
- Shao J. Type selection of tubular busbars and key technologies of polyester film mechanically wrapped tubular busbars [J]. Electrical Equipment Industry, 2025(2): 67-71.
- [18] 何梦, 徐楠, 庄璇, 等. 绝缘管母线中间接头的改进设计及应用[J]. 电力与能源, 2022(1): 37-40.
- He M, Xu N, Zhuang X, et al. Improved design and application of intermediate joints for insulated tubular busbars [J]. Electric Power and Energy, 2022(1): 37-40.
- [19] 任想, 刘洋, 艾良斌, 等. 含气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线电击穿机理研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 141-148.
- Ren X, Liu Y, Ai L B, et al. Study on electrical breakdown mechanism of epoxy cast insulated tubular busbars with void defects [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 141-148.
- [20] 周象贤, 曹俊平, 王少华, 等. 110 kV 电缆中间接头典型缺陷电场三维仿真分析[J]. 绝缘材料, 2018, 51(7): 49-53.
- Zhou X X, Cao J P, Wang S H, et al. 3D simulation analysis of electric field for typical defects in 110 kV cable intermediate joints [J]. Insulating Materials, 2018, 51(7): 49-53.
- [21] 邓稼屹, 王星华, 聂一雄. 10 kV XLPE 电缆中间接头复合缺陷电场分布仿真研究[J]. 电线电缆, 2023(5): 47-53.
- Deng J Y, Wang X H, Nie Y X. Simulation study on electric field distribution of composite defects in 10 kV XLPE cable intermediate joints [J]. Electric Wire & Cable, 2023(5): 47-53.
- [22] 沙伟燕, 罗艳, 马鹏欢, 等. 不同金属微粒缺陷下 GIS 盆式绝缘子表面放电与电场特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 89-93.
- Sha W Y, Luo Y, Ma P H, et al. Study on surface discharge and electric field characteristics of gis basin spacers under different metal particle defects [J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 89-93.
- [23] 潘璐瑶, 李卫东, 黄先状. 表面缺陷对复合绝缘子电场电势分布的影响[J]. 吉林电力, 2023, 51(3): 26-30.
- Pan L Y, Li W D, Huang X Z. Influence of surface defects on electric field and potential distribution of composite insulators [J]. Jilin Electric Power, 2023, 51(3): 26-30.
- [24] 何嘉弘, 何康, 董博文. 配网电缆接头内部缺陷电场特征研究及电树发展分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 154-161.
- He J H, He K, Dong B W. Study on electric field characteristics of internal defects in distribution network cable joints and analysis of electrical tree growth [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 154-161.
- [25] 夏俊峰, 施楠楠, 孙建生. 高压 XLPE 电缆主绝缘典型缺陷形态对电场畸变影响的仿真分析[J]. 电线电缆, 2022(6): 1-6.
- Xia J F, Shi N N, Sun J S. Simulation analysis of influence of typical defect morphology of high-voltage XLPE cable main insulation on electric field distortion [J]. Electric Wire & Cable, 2022(6): 1-6.
- [26] 李国倡, 梁箫剑, 魏艳慧, 等. 配电电缆附件复合绝缘界面缺陷类型和位置对电场分布的影响研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2707-2715.
- Li G C, Liang X J, Wei Y H, et al. Study on influence of composite insulation interface defect types and locations on electric field distribution of distribution cable accessories [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2707-2715.
- [27] 孟旋, 郭若琛, 袁文泽, 等. 空间电荷及金属颗粒对换流变阀侧套管的电场分布影响[J]. 电力工

- 程技术, 2022, 41(1): 48-55.
- Meng X, Guo R C, Yuan W Z, et al. Influence of space charge and metal particles on electric field distribution of converter transformer valve-side bushing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 48-55.
- [28] 朱孟华. 高压电机纯环氧绝缘系统的性能研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 59-66.
- Zhu M H. Research on performance of pure epoxy insulation system for high voltage motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 59-66.
- [29] 李园园. 风力发电机绝缘系统可靠性评定方法探讨[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(8): 90-97+105.
- Li Y Y. Discussion on reliability assessment method of wind generator insulation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(8): 90-97+105.
- [30] 张道朋. 双馈风力发电机转子绝缘结构优化研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 73-76+88.
- Zhang D P. Research on optimization of rotor insulation structure for doubly-fed wind generators [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(7): 73-76+88.
- [31] 冯相为, 张炳义. 高压电机定子采用散绕组的绝缘结构分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 55-61+67.
- Feng X W, Zhang B Y. Analysis of insulation structure for high voltage motor stator using random winding [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(3): 55-61+67.
- [32] 雷平振, 樊洁心, 刘冠芳, 等. 变频牵引电机定子绕组绝缘老化特性研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 33-37.
- Lei P Z, Fan J X, LIU G F, et al. Research on insulation aging characteristics of stator winding for variable frequency traction motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(6): 33-37.
- [33] 张生德, 高鑫, 马赫然. 普通散绕绕组绝缘结构优化试验研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 70-74.
- Zhang S D, Gao X, Ma H R. Experimental research on optimization of insulation structure for common random winding [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 70-74.

---

收稿日期:2026-01-31

收到修改稿日期:2026-04-15

作者简介:

徐海洋(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电机与电器,2023170463@mail.hfut.edu.cn;

赵玉顺(1980—),男,博士,教授,研究方向为高电压与绝缘技术,yushunzhao@126.com;

贾博涵(2002—),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术,ykyu7876@foxmail.com;

任大伟(2002—),男,硕士研究生,研究方向为电机与电器,rendw8105@163.com;

\* 通信作者:鲍晓华(1972—),男,博士,教授,研究方向为电机设计理论与技术,baoxh@hfut.edu.cn。