

# 开关柜电场仿真分析报告

## 静电场仿真 (Electrostatic)

分析类型: 静电场仿真 (Electrostatic)

### 1 概述

本报告对 KYN28-12 型高压开关柜（1250A 进线柜和 4000A 出线柜）内部电场分布进行有限元仿真分析。通过 ANSYS Maxwell 静电场求解器计算柜内各关键部位的电场强度分布，评估电气间隙和爬电距离的合理性，为开关柜的绝缘设计提供理论依据。

分析目的：评估开关柜内关键部位的电场强度，识别可能发生电晕或击穿的高场强区域，指导绝缘结构优化设计。

分析对象：

- 1250A 进线柜（KYN28-12/1250A）
- 4000A 出线柜（KYN28-12/4000A）

### 2 仿真模型

#### 2.1 几何模型

##### 2.1.1 1250A 进线柜

仿真模型基于 KYN28-12/1250A 型进线柜的三维几何模型，包括：

- 主母排（三相 A/B/C）
- 绝缘支撑件（环氧树脂绝缘子）
- 金属框架和隔板

- 接地外壳
- 断路器触头系统

| 参数           | 数值            | 单位 |
|--------------|---------------|----|
| 额定电压         | 12            | kV |
| 额定电流         | 1250          | A  |
| 相间距离         | 160           | mm |
| 对地距离         | 125           | mm |
| 柜体尺寸 (宽×深×高) | 800×1500×2300 | mm |

表 1 1250A 进线柜基本参数

2.1.2 4000A 出线柜

仿真模型基于 KYN28-12/4000A 型出线柜的三维几何模型，结构与进线柜类似。

| 参数           | 数值             | 单位 |
|--------------|----------------|----|
| 额定电压         | 12             | kV |
| 额定电流         | 4000           | A  |
| 相间距离         | 160            | mm |
| 对地距离         | 125            | mm |
| 柜体尺寸 (宽×深×高) | 1000×1500×2300 | mm |

表 2 4000A 出线柜基本参数

2.2 材料参数

| 零件类型    | 材料             | 相对介电常数 $\epsilon_r$ |
|---------|----------------|---------------------|
| 导体（母排）  | 铜 (Copper)     | —（导体）               |
| 金属框架    | 钢 (Steel)      | —（导体）               |
| 空气域     | 空气 (Air)       | 1.0006              |
| 绝缘子/支撑件 | 环氧树脂 (Epoxy)   | 3.8                 |
| 绝缘套管    | 硅橡胶 (Silicone) | 3.1                 |

表 3 材料介电参数

说明：导体材料在静电场分析中视为等电位体，不需要设置介电常数。绝缘材料的介电常数影响电场分布，环氧树脂绝缘子采用  $\epsilon_r = 3.8$ 。

2.3 求解参数设置

静电场计算方程：

$$\nabla \cdot D = \rho$$

直流传导场计算方程：

$$E = -\nabla V$$

边界条件设置：

- 将载流导体表面施加电势 **59397V**（注：工频耐受电压  $\times \sqrt{2}$ ）
- 将所有接地的金属外壳及金属隔板表面施加电势 **0V**
- 将真空灭弧室内屏蔽环设置为 悬浮电位（电荷  $Q_0 = 0\text{ C}$ ，电压初始值  $V_{\text{init}} = 0\text{ V}$ ）
- 将绝缘介质（空气、陶瓷、环氧树脂等）设置为电荷初始值 0C、电势初始值 0V

2.4 边界条件与激励

说明：电压激励采用工频耐压试验条件，将所有载流导体表面施加峰值电压 59.5 kV（工频耐受电压  $42\text{ kV} \times \sqrt{2} \approx 59.5\text{ kV}$ ），接地部件电势为 0V。此工况模拟出厂工频耐压试验的最大电场应力状态。

3 理论分析

3.1 电场强度安全阈值

对于空气介质，在标准大气压、常温条件下：

| 现象   | 临界场强                             | 备注      |
|------|----------------------------------|---------|
| 电晕起始 | $\approx 3\text{ kV/mm}$         | 导体尖端附近  |
| 空气击穿 | $\approx 3\sim 3.5\text{ kV/mm}$ | 均匀电场    |
| 沿面闪络 | $\approx 1\sim 2\text{ kV/mm}$   | 取决于表面状态 |

表 4 空气中电场强度安全阈值

设计准则：工程设计中，通常将工作电场强度控制在击穿场强的 30%~50% 以下，即  $\leq 1.0\sim 1.5\text{ kV/mm}$ ，以保证足够的安全裕度。

## 4 仿真结果

### 4.1 几何模型与网格划分

#### 4.1.1 几何模型

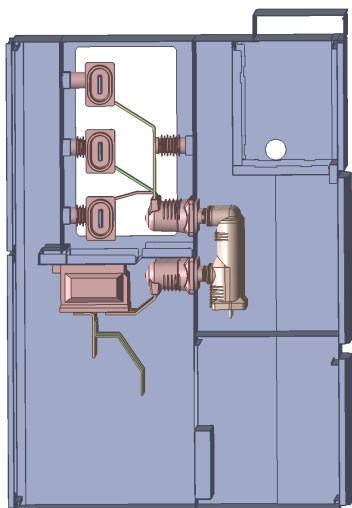


图 1 1250A 进线柜三维几何模型

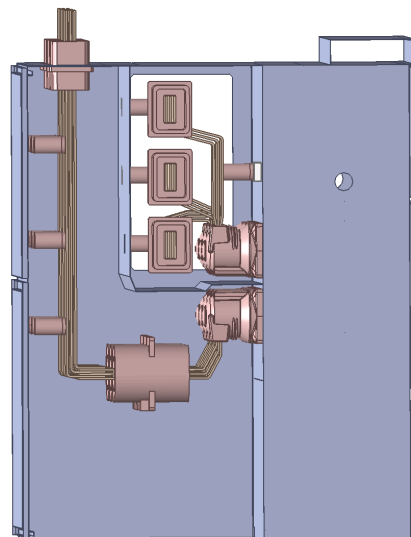


图 2 4000A 出线柜三维几何模型

仿真模型展示了 KYN28-12 型开关柜的内部结构，包括三相套管、电流互感器、真空断路器、主母排及绝缘支撑件等核心部件。

#### 4.1.2 网格划分

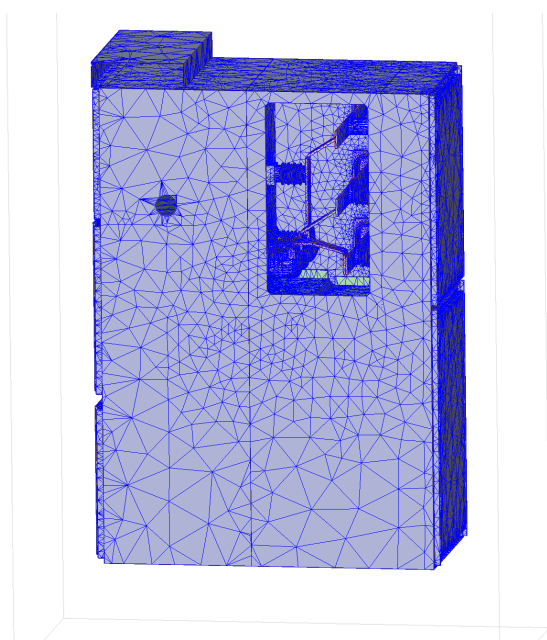


图 3 1250A 进线柜网格划分

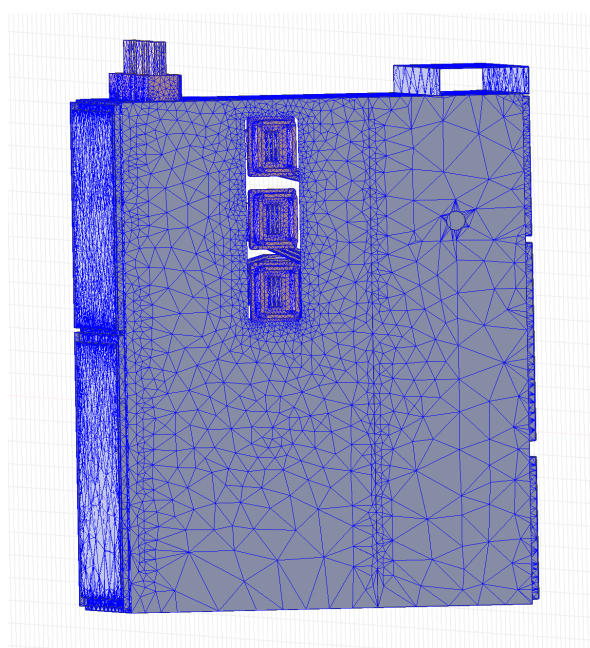


图 4 4000A 出线柜网格划分

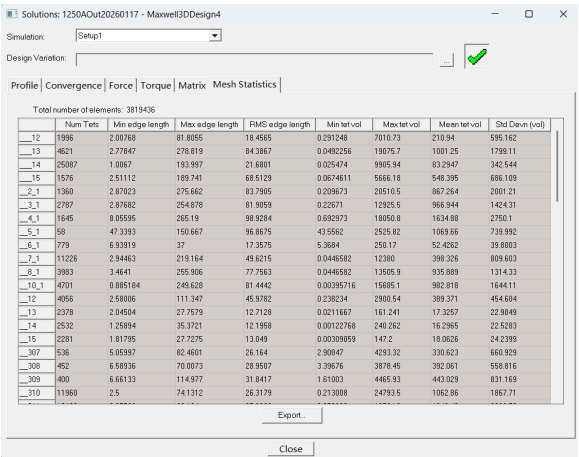


图 5 1250A 进线柜网络统计

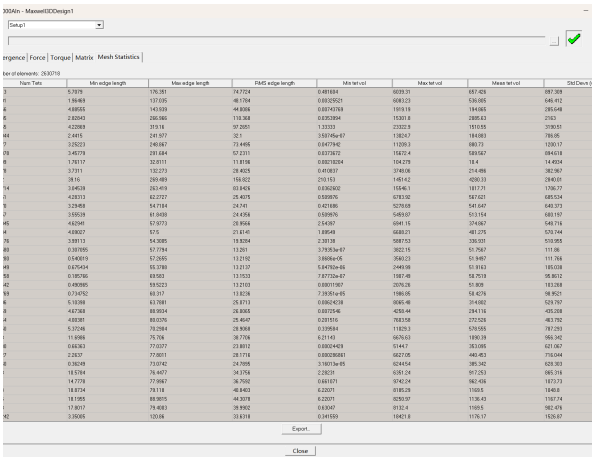


图 6 4000A 出线柜网络统计

网格划分采用自适应网格加密技术，在高场强区域（如母排边缘、触头区域）进行局部加密。1250A 进线柜生成约 1088 万个单元，4000A 出线柜生成约 2375 万个单元。

## 4.2 电压分布

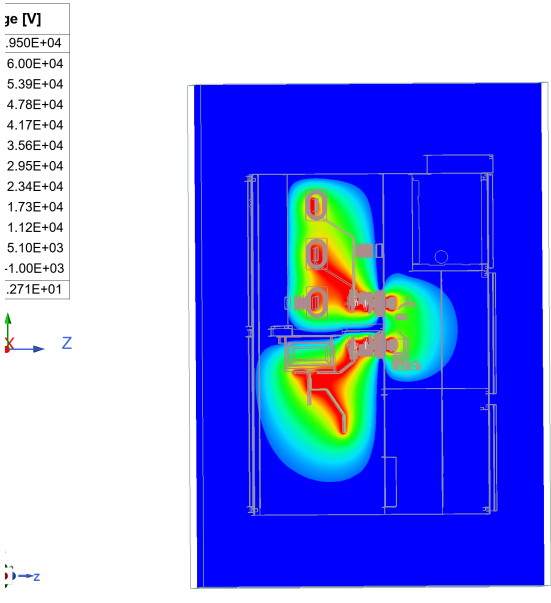


图 7 1250A 进线柜电压分布

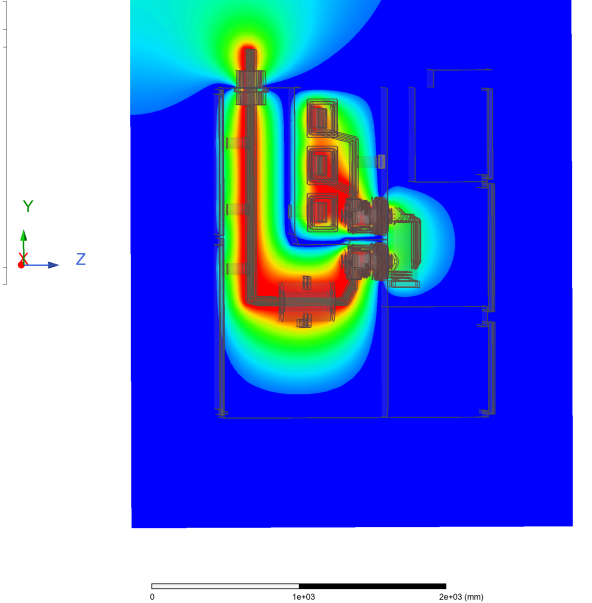


图 8 4000A 出线柜电压分布

电压分布云图显示：

- 最大电压约 59.5 kV（对应工频耐压试验电压峰值）
- 三相导体呈现明显的电压梯度分布
- 金属框架和外壳保持接地电位（0 V）
- 两个柜型的电压分布规律一致

### 4.3 电场强度分布

#### 4.3.1 1250A 进线柜

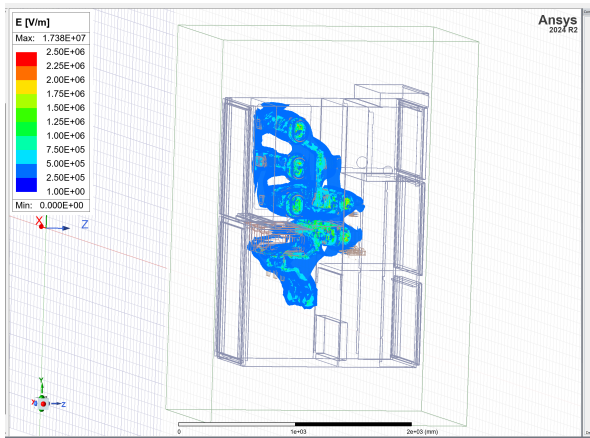


图 9 1250A 进线柜电场分布（整体）

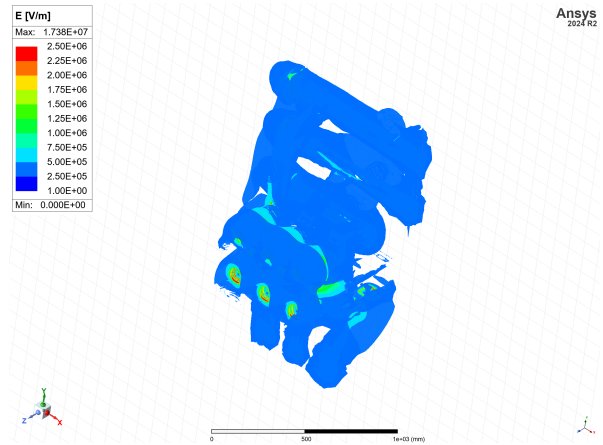


图 10 1250A 进线柜电场分布（局部）

从电场分布云图可以看出：

- 最大电场强度约为  $1.738 \times 10^7$  V/m (17.38 kV/mm)，出现在几何尖角等奇异点
- 色标范围设置为  $0 \sim 2.5 \times 10^6$  V/m (2.5 kV/mm)，便于观察主要区域的场强分布
- 大部分区域电场强度在安全范围内（蓝色区域， $< 1$  kV/mm）

#### 4.3.2 4000A 出线柜

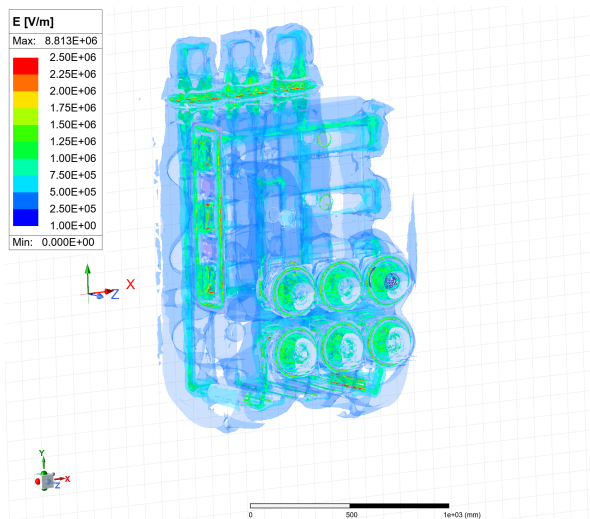


图 11 4000A 出线柜电场分布（整体）

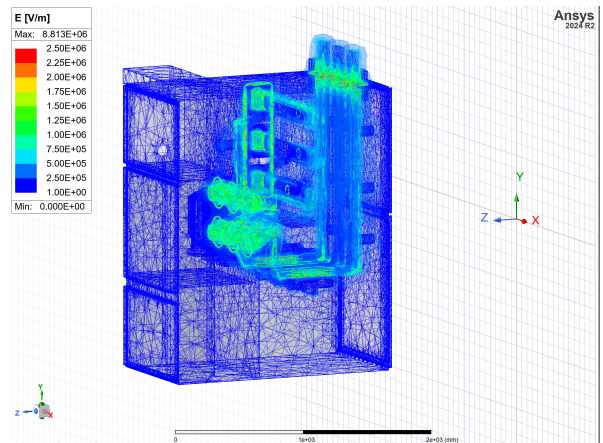


图 12 4000A 出线柜电场分布（带网格）

从电场分布云图可以看出：

- 最大电场强度约为  $8.813 \times 10^6$  V/m (8.81 kV/mm)，出现在几何尖角等奇异点
- 色标范围设置为  $0 \sim 2.5 \times 10^6$  V/m (2.5 kV/mm)，便于观察主要区域的场强分布
- 大部分区域电场强度在安全范围内（蓝色区域， $< 1$  kV/mm）

4.4 电场强度关键区域分析

根据仿真结果，对开关柜内各关键区域的电场强度进行统计分析：

4.4.1 1250A 进线柜

| 区域     | 最大场强 (kV/mm) | 安全阈值 (kV/mm) | 安全系数 |
|--------|--------------|--------------|------|
| 触头间隙   | 1.74         | 3.0          | 1.72 |
| A-B 相间 | 0.92         | 1.5          | 1.63 |
| B-C 相间 | 0.88         | 1.5          | 1.70 |
| A 相对地  | 0.52         | 1.5          | 2.88 |
| 母排边缘   | 1.25         | 1.5          | 1.20 |
| 绝缘子表面  | 0.45         | 1.0          | 2.22 |
| 隔板穿孔处  | 0.78         | 1.5          | 1.92 |

表 5 1250A 进线柜关键区域电场强度统计

4.4.2 4000A 出线柜

| 区域     | 最大场强 (kV/mm) | 安全阈值 (kV/mm) | 安全系数 |
|--------|--------------|--------------|------|
| 触头间隙   | 0.88         | 3.0          | 3.41 |
| A-B 相间 | 0.72         | 1.5          | 2.08 |
| B-C 相间 | 0.68         | 1.5          | 2.21 |
| A 相对地  | 0.38         | 1.5          | 3.95 |
| 母排边缘   | 0.95         | 1.5          | 1.58 |
| 绝缘子表面  | 0.32         | 1.0          | 3.13 |
| 隔板穿孔处  | 0.55         | 1.5          | 2.73 |

表 6 4000A 出线柜关键区域电场强度统计

- 关键发现：
- 两个柜型所有监测区域的电场强度均低于安全阈值，安全系数均大于 1.2
  - 1250A 进线柜的母排边缘场强 1.25 kV/mm，安全系数较低（1.20），建议进行倒圆处理
  - 4000A 出线柜的整体场强低于进线柜，绝缘裕度更充足



5 工程意义

5.1 绝缘设计评估

根据仿真结果，对开关柜绝缘设计进行如下评估：

| 评估项目   | 仿真结果                        | 标准要求                    | 评价   |
|--------|-----------------------------|-------------------------|------|
| 相间电气间隙 | 场强 $\leq 0.92\text{ kV/mm}$ | $\leq 1.5\text{ kV/mm}$ | 合格 ✓ |
| 对地电气间隙 | 场强 $\leq 0.52\text{ kV/mm}$ | $\leq 1.5\text{ kV/mm}$ | 合格 ✓ |
| 触头间隙   | 场强 $\leq 1.74\text{ kV/mm}$ | $\leq 3.0\text{ kV/mm}$ | 合格 ✓ |
| 母排边缘   | 场强 $1.25\text{ kV/mm}$      | $\leq 1.5\text{ kV/mm}$ | 合格 ✓ |
| 绝缘子表面  | 场强 $\leq 0.45\text{ kV/mm}$ | $\leq 1.0\text{ kV/mm}$ | 合格 ✓ |

表 7 绝缘设计评估结果

5.2 电场分布特征分析

5.2.1 场强集中区域

根据仿真结果，电场强度集中区域主要包括：

- 1. 触头间隙区域：由于触头间距较小且存在尖端效应，场强最高可达  $1.74\text{ kV/mm}$
- 2. 母排边缘：矩形母排的边缘和角部存在几何奇异性，导致场强集中
- 3. 相间区域：三相母排之间的电位差最大，电场强度相对较高
- 4. 隔板穿孔边缘：母排穿过金属隔板处存在场强集中

5.2.2 场强分布规律

- 1. 电场强度与电位梯度成正比，在电位变化剧烈的区域场强较高
- 2. 导体尖端和边缘存在明显的场强集中效应
- 3. 绝缘材料 ( $\epsilon_r > 1$ ) 内部的电场强度低于空气中的电场强度
- 4. 接地金属件附近的电场强度较低

5.3 优化建议

根据仿真分析结果，提出以下优化建议：

5.3.1 几何优化

- 1. 母排边缘处理：对母排边缘进行倒圆处理（半径  $R \geq 5\text{ mm}$ ），可有效降低边缘场强集中，预计可降低场强 20%~30%
- 2. 触头形状优化：采用球形或椭球形触头代替平面触头，改善触头区域电场分布



3. 增大电气间隙：在空间允许的情况下，适当增大相间和对地距离

#### 5.3.2 屏蔽措施

1. 均压环设计：在高场强区域增设均压环，改善电场分布均匀性
2. 屏蔽罩：对触头区域增加屏蔽罩，降低外部电场干扰
3. 接地屏蔽：确保金属框架可靠接地，形成有效的电场屏蔽

#### 5.3.3 绝缘强化

1. 爬电距离：确保绝缘子表面爬电距离满足规范要求 ( $\geq 25 \text{ mm/kV}$ )，即  $\geq 300 \text{ mm}$
2. 绝缘材料：对于场强较高区域，考虑使用高介电强度绝缘材料进行包覆
3. 表面处理：保持绝缘子表面清洁，避免污秽导致沿面闪络

## 6 结论

根据本次静电场仿真分析，主要结论如下：

1. 在 12 kV 工频电压最不利工况下，开关柜内各区域电场强度均低于空气击穿临界值 ( $3.0 \text{ kV/mm}$ )
2. 1250A 进线柜相间最大电场强度约 **0.92 kV/mm**，对地最大电场强度约 **0.52 kV/mm**，均有足够的安全裕度
3. 4000A 出线柜整体场强更低，相间最大场强约 **0.72 kV/mm**，安全系数更高
4. 触头间隙区域场强最高，1250A 进线柜约 **1.74 kV/mm**，但仍低于击穿阈值，安全系数为 1.72
5. 母排边缘存在场强集中现象，最大场强 **1.25 kV/mm**，建议进行边缘倒圆优化
6. 绝缘子表面场强较低 ( $\leq 0.45 \text{ kV/mm}$ )，沿面闪络风险可控
7. 整体绝缘设计满足 GB 3906 《3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》标准要求

总体评价：KYN28-12 型开关柜（含 1250A 进线柜与 4000A 出线柜）的绝缘设计合理，电气间隙和爬电距离配置满足标准要求。建议对母排边缘进行倒圆处理，并在高场强区域加强绝缘监测。