

# 大型水轮发电机绝缘参数对定子线棒端部电场和电位分布的影响

李寅伟<sup>1</sup>, 李强<sup>1</sup>, 李岩<sup>1</sup>, 汪江昆<sup>2</sup>, 胡建林<sup>3</sup>, 谭恢林<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**应用COMSOL软件建立了定子线棒端部的有限元仿真模型,分析了绝缘材料电性能参数对线棒端部表面电场及电位分布的影响。结果表明:随着主绝缘相对介电常数的增大,线棒端部表面最大电场增大,主绝缘材料的相对介电常数选择偏小为佳;主绝缘材料电阻率对线棒端部表面最大电场的影响不显著。各级防晕层的相对介电常数对线棒表面最大电场变化影响很小。中阻防晕层非线性电阻系数取较大值时为佳;中高阻防晕层非线性电阻系数对线棒表面最大电场影响很小,但取值为1时最佳;高阻防晕层非线性电阻系数对线棒表面最大电场基本没有影响。不同防晕层初始电阻率对线棒表面最大电场的影响程度不同,通过偏相关分析,得到绝缘材料电性能参数对端部电场最大值的影响程度排序,其中中阻防晕层的初始电阻率和非线性电阻系数为主导因素。

**关键词:**定子线棒端部;有限元分析;绝缘参数;电场强度;电位分布

中图分类号:TM853 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)01-0073-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.01.012

## Influence of Insulation Parameters on Electric Field and Potential Distribution at Stator Bar End of Large Hydro-generator

LI Yinwei<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, WANG Jiangkun<sup>2</sup>, HU Jianlin<sup>3</sup>, TAN Huilin<sup>3</sup>

(1. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;

2. Yalong River Hydropower Development Corporation Limited, Chengdu 610051, China;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A finite element simulating model of stator bar end was established by COMSOL software, and the influences of electrical properties parameters of insulating material on the electric field and potential distribution of bar end were analyzed. The results show that with the increase of relative permittivity of main insulation, the maximum electric field on stator bar end surface increases, therefore it is better to choose smaller relative permittivity of main insulating material. The resistivity of main insulation material has no significant effect on the maximum electric field on bar end surface. The relative permittivity of each anti corona layer has little effect on the maximum electric field on bar surface. It is better to choose larger nonlinear resistance coefficient of medium resistance anti corona layer. The nonlinear resistance coefficients of medium and high resistance anti corona layer have little effect on the maximum electric field on bar surface, and it is best to choose 1. The nonlinear resistance coefficient of high resistance anti corona layer has no effect on the maximum electric field on bar surface. The influence degree of initial resistivity of different anti corona layers on the maximum electric field of bar surface is different. Through partial correlation analysis, the influence degree of electrical properties parameters of insulating material on the maximum electric field at bar end is ranked, and the initial resistivity and nonlinear resistance

收稿日期:2021-03-12 修回日期:2021-04-20

作者简介:李寅伟(1986-),男(汉族),山西朔州人,高级工程师,主要从事水电站的电气一次设计。

coefficient of the medium resistance anti corona layer are the dominant factors.

**Key words:** stator bar end; finite element analysis; insulation parameters; electric field strength; potential distribution

## 0 引言

随着我国水电开发的进程,水电工程逐步向高海拔地区转移,水轮发电机的容量及电压等级不断提高,对发电机的绝缘性能提出了更高的要求。大型水轮发电机定子线棒端部是电场的薄弱环节<sup>[1-2]</sup>,长期的电晕、电腐蚀引起线棒绝缘失效<sup>[3-4]</sup>而发生击穿事故常有报道。

目前的研究一般在定子线棒表面涂刷多级非线性防晕层<sup>[5-7]</sup>来降低线棒端部的电场,但由于电场分布不均<sup>[5-6]</sup>及各级防晕层搭接处电阻率的差异,仍会发生电晕放电。漆临生等<sup>[5]</sup>利用 ANSYS 计算了防晕层材料参数对定子线棒端部电位分布的影响,但未考虑 SiC 材料的非线性电阻特性。孙永鑫等<sup>[7-8]</sup>利用有限元弱解形式计算得到 26 kV 线棒端部电位分布和电场分布,并计算了防晕层的损耗,但其绝缘配合形式单一。HU H T 等<sup>[9]</sup>、张芳芳<sup>[10]</sup>利用 COMSOL 建立端部有限元模型计算了防晕层参数对线棒端部电场强度和损耗的影响,但还需研究更多绝缘材料参数的推荐值。

本研究建立定子线棒三段式非线性端部防晕结构三维模型,深入计算和分析不同绝缘材料电性能参数对线棒端部电位和电场分布的影响和原因;根据不同绝缘材料电性能参数对线棒最大电场的影响,得到推荐的主绝缘、各级防晕层材料参数设计值;最后利用偏相关分析量化各个绝缘材料电性能参数对端部最大电场的影响程度,为电机定子线棒端部绝缘材料电性能参数设计提供指导。

## 1 模型的建立

### 1.1 仿真试样

以某水电站的 18 kV 水轮发电机定子线棒端部为研究对象,线棒端部的结构如图 1 所示。

### 1.2 控制方程

发电机流过工频电流时,时变电荷  $q(t)$  和时变磁场  $\partial \mathbf{B} / \partial t$  分别产生库伦电场  $\mathbf{E}_c$  和感应电场  $\mathbf{E}_{ind}$ 。在工频条件下,感应电场远小于库伦电场<sup>[11]</sup>,则式(1)成立。

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times (\mathbf{E}_c + \mathbf{E}_{ind}) \approx \nabla \times \mathbf{E}_c = 0 \quad (1)$$

工频电场的性质近似于呈无旋性的静态电场,

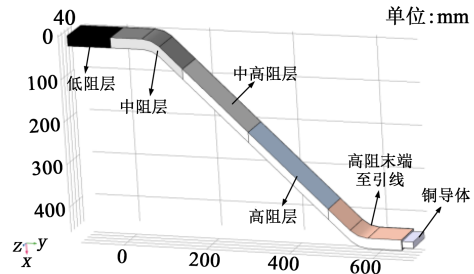


图1 某 18 kV 定子线棒端部示意图

Fig.1 Schematic diagram of an 18 kV stator bar end

根据麦克斯韦方程组,在工频(低频)下忽略电磁感应  $\partial \mathbf{B} / \partial t$  的作用,可得到式(2)~(5)的基本方程。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \approx 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (5)$$

将式(2)取散度,由高斯散度定理和斯托克斯定理,可得式(6)。

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla \cdot (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) = 0 \quad (6)$$

将  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{E} = -\nabla \phi$  代入式(6),得式(7)。

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi + \varepsilon \frac{\nabla \partial \phi}{\partial t}) = 0 \quad (7)$$

以上为定子线棒在工频下所满足的控制方程,将  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{D}$  与时间的关系转化为电位与时间的关系。

### 1.3 场的选择与参数设置

仿真需要同时考虑材料电阻率和相对介电常数,因此在 COMSOL 的 AC/DC 中选择电流接口以及瞬态场。本研究设置包围线棒端部的球体,如图 2 所示,形成封闭区域,将线棒开域问题转化为有限域求解<sup>[12]</sup>。为了满足良好的计算精度和计算时间,采用用户控制剖分网格,如图 2 所示。

定子线棒的导体为铜,主绝缘大多使用以云母、玻璃布和粘结剂等制备的复合材料,在仿真中假设主绝缘为单一的环氧粉云母材料。线棒端部的防晕层材料是具有非线性特性的半导体,它的电阻率会随着电场的增大而减小<sup>[13]</sup>。

模型各介质基本参数来自于实测数据和公开发表的文献<sup>[14-17]</sup>,如表 1 所示。

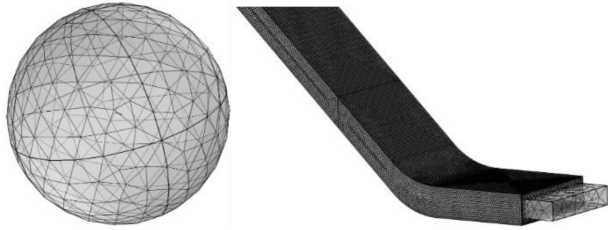


图2 定子线棒端部仿真计算模型

Fig.2 Simulation model of stator bar end

表1 仿真中各介质材料的基本参数

Tab.1 Basic parameters of the dielectric materials in simulation

材料	相对介电常数	初始电阻率 $\rho_0$ /( $\Omega \cdot m$ )	非线性电阻系数 /(cm/kV)
铜导体	$1 \times 10^{10}$	$1.667 \times 10^{-8}$	—
空气	1	$1 \times 10^{15}$	—
主绝缘	4	$1 \times 10^{14}$	—
低阻防晕层	25	$1 \times 10^3$	—
中阻防晕层	25	$1 \times 10^6$	1.5
中高阻防晕层	25	$1 \times 10^7$	1.0
高阻防晕层	25	$1 \times 10^{10}$	0.5

分析对象为 18 kV 的线棒端部,对导体施加工频电压,如式(8)所示,并设置低阻防晕层接地, $U=0$ 。下文计算得到的电场分布和电位分布均为电压达到峰值时的情况。

$$U_{app} = \frac{18\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin(100\pi \cdot t) \quad (8)$$

## 2 绝缘材料电性能参数对线棒端部电场分布和电位分布的影响

### 2.1 主绝缘材料电性能参数的影响

固体介质的相对介电常数一般为 3~6,主绝缘主要采用云母材料,考虑不同云母材料、绝缘老化等因素,本研究考虑了相对介电常数和电阻率一些较为极端的情况,设置相对介电常数( $\epsilon_{rz}$ )为 2~8,主绝缘电阻率( $\rho_z$ )为  $10^{12}$ 、 $10^{13}$ 、 $10^{14}$ 、 $10^{15}$ 、 $10^{16} \Omega \cdot m$ ,仿真结果如表 2、图 3~4 所示。

由表 2 可见,随着主绝缘  $\epsilon_{rz}$  的增大,线棒端部表面最大电场随之增大;随着主绝缘材料  $\rho_z$  的增大,线棒端部表面最大电场略有减小,但可认为基本不变。

表 2 主绝缘参数对端部表面最大电场的影响 (单位:kV/cm)

Tab.2 Influence of main insulation material parameters on the maximum electric field at end surface

$\epsilon_{rz}$	$\rho_z / (\Omega \cdot m)$				
	$10^{12}$	$10^{13}$	$10^{14}$	$10^{15}$	$10^{16}$
2	1.248 6	1.2487	1.248 7	1.248 7	1.248 7
4	1.417 7	1.411 7	1.402 0	1.402 0	1.402 0
6	1.574 1	1.574 0	1.574 0	1.574 0	1.574 0
8	1.703 3	1.703 1	1.703 0	1.703 0	1.703 0

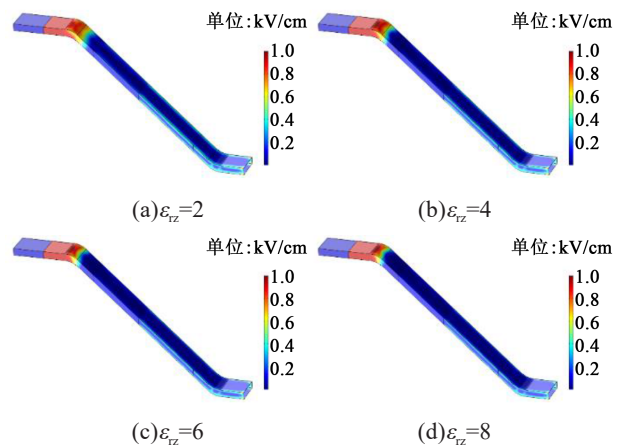


图 3 主绝缘相对介电常数对线棒端部电场分布的影响

Fig.3 Influence of main insulation relative permittivity on the electric field distribution at stator bar end

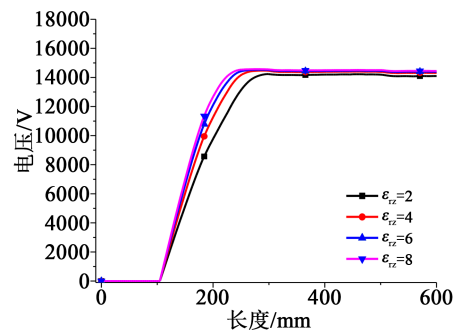


图 4 主绝缘相对介电常数  $\epsilon_{rz}$  对线棒端部电位分布的影响 ( $\rho_z=10^{14} \Omega \cdot m$ )

Fig.4 Influence of main insulation relative permittivity  $\epsilon_{rz}$  on the potential distribution at stator bar end ( $\rho_z=10^{14} \Omega \cdot m$ )

由图 3 和图 4 的电场和电位分布可见,线棒表面电场最大值位于低阻和中阻防晕层搭接位置;较小的主绝缘相对介电常数可降低线棒表面电位,并且使得拐点斜率有一定的缓和,从而降低最大电场。

## 2.2 防晕层材料电性能参数的影响

### 2.2.1 防晕层相对介电常数的影响

文献[18]指出,在不同的环境温度下防晕层的相对介电常数会发生变化,并且不同厂家生产的防晕层相对介电常数也有所不同。本文选择相对介电常数为10~50的防晕层,研究各级不同相对介电常数防晕层条件下线棒表面最大电场的变化,不同防晕层相对介电常数配合方式见表3,计算结果如图5所示。

表3 不同防晕层相对介电常数配合  
Tab.3 Coordination of different anti-corona layer relative permittivity

组别	防晕层相对介电常数				
	低阻	中阻	中高阻	高阻	高阻末端
1	10	25	25	25	25
2	25	25	25	25	25
3	50	25	25	25	25
4	25	10	25	25	25
5	25	50	25	25	25
6	25	25	10	25	25
7	25	25	50	25	25
8	25	25	25	10	25
9	25	25	25	50	25
10	25	25	25	25	10
11	25	25	25	25	50

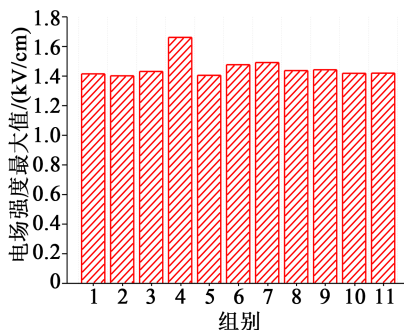


图5 不同防晕层相对介电常数配合下线棒表面的最大电场

Fig.5 Maximum electric field on the stator bar surface under the coordination of different anti-corona layer relative permittivity

从图5可以看出,各级防晕层不同相对介电常数对线棒表面最大电场变化影响很小,仅中阻防晕层相对介电常数取值相对较小时电场最大,但增幅十分有限。其原因在于最大电场发生在低阻和中阻防晕层搭接处,低阻和中阻防晕层的电阻率较小,在工频条件下传导电流 $J$ 起主要作用,防晕层的位移电流作用很小。

### 2.2.2 防晕层非线性电阻系数的影响

防晕层非线性电阻系数与电场及防晕层电阻率有关,因此开展了表4所示的不同防晕层非线性电阻系数配合下线棒表面最大电场的研究。其中,1~3组为中阻非线性电阻系数不同,4~6组为中高阻非线性电阻系数不同,7~9组为高阻非线性电阻系数不同,计算结果如图6所示。

表4 不同防晕层非线性电阻系数配合  
Tab.4 Coordination of different anti-corona layer nonlinear resistance coefficient

组别	非线性电阻系数 $\beta$ /(cm/kV)		
	中阻 $\beta_1$	中高阻 $\beta_2$	高阻 $\beta_3$
1	1.5	1.0	0.5
2	1.0	1.0	0.5
3	0.5	1.0	0.5
4	1.5	1.5	0.5
5	1.5	1.0	0.5
6	1.5	0.5	0.5
7	1.5	1.0	1.5
8	1.5	1.0	1.0
9	1.5	1.0	0.5

由图6可见:①中阻防晕层非线性电阻系数 $\beta_1$ 对线棒表面最大电场的影响最大,且中阻防晕层非线性电阻系数取较大值时为佳;②中高阻防晕层非线性电阻系数 $\beta_2$ 对线棒表面最大电场影响很小,但从结果看,取值为1时最佳;③高阻防晕层非线性电阻系数 $\beta_3$ 对线棒表面最大电场没有影响。产生以上结果的原因在于,如图3所示,最大电场发生在低阻和中阻防晕层搭接处,中高阻和高阻防晕层的影响逐渐减弱。

不同中阻防晕层非线性电阻系数下线棒表面电位分布如图7所示。从图7可知,较大的中阻防

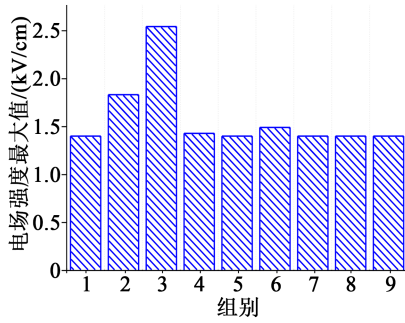


图6 不同防晕层非线性电阻系数配合下线棒表面的最大电场

Fig.6 Maximum electric field on the stator bar surface under the coordination of different anti-corona layer nonlinear resistance coefficient

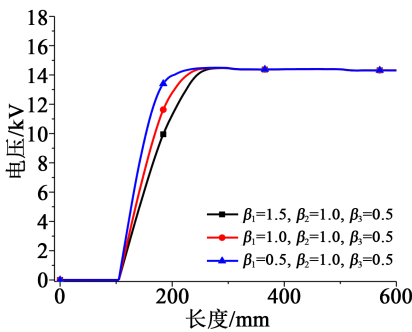


图7 不同中阻层非线性电阻系数下线棒表面电位分布  
Fig.7 Potential distribution of stator bar under different nonlinear resistance coefficient of middle-resistance layer

晕层非线性电阻系数 $\beta_1$ 可使电位上升沿较缓,以此缓和最大电场。

2.2.3 防晕层初始电阻率的影响

各级不同防晕层初始电阻率对线棒表面最大电场的影响如表5所示。其中,1~3组为低阻防晕层初始电阻率不同,4~6组为中阻防晕层初始电阻率不同,7~9组为中高阻防晕层初始电阻率不同,10~12组为高阻防晕层初始电阻率不同,13~15组为高阻末端防晕层初始电阻率不同。计算结果如图8所示。从图8可知:①不同中高阻、高阻、高阻末端防晕层初始电阻率(第7组及之后)对线棒表面最大电场基本没有影响;②低阻防晕层初始电阻率 $\rho_1$ 取 $10^3 \Omega \cdot m$ 时最佳;③中阻防晕层初始电阻率 $\rho_2$ 取 $10^6 \Omega \cdot m$ 时最佳,过大过小都将导致电场强度过大。

由图8还可知,中阻防晕层初始电阻率对线棒表面最大电场的影响最大,因此对不同中阻防晕层初始电阻率 $\rho_2$ 进行了分析。图9~10为不同中阻防晕层初始电阻率下线棒表面的电位和电场分布情

表5 不同防晕层初始电阻率配合  
Tab.5 Coordination of different anti-corona layer initial resistivity

组别	防晕层初始电阻率/( $\Omega \cdot m$ )				
	低阻	中阻	中高阻	高阻	高阻末端
1	$1 \times 10^3$				
2	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$
3	$1 \times 10^5$				
4		$1 \times 10^5$			
5	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$
6		$1 \times 10^7$			
7			$1 \times 10^7$		
8	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$
9			$1 \times 10^9$		
10				$1 \times 10^9$	
11	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$5 \times 10^9$	$5 \times 10^{10}$
12				$1 \times 10^{10}$	
13					$5 \times 10^{10}$
14	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{11}$
15					$5 \times 10^{11}$

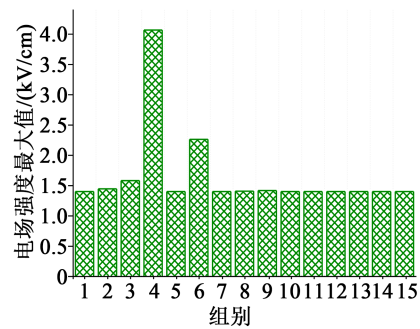


图8 不同防晕层初始电阻率配合下线棒表面最大电场  
Fig.8 Maximum electric field on the stator bar surface under different initial resistivity of anti-corona layer

况。从图9~10可以看出,当中阻防晕层初始电阻率 $\rho_2$ 为 $10^5 \Omega \cdot m$ 时,低阻和中阻防晕层搭接位置附近电位上升最为缓慢,但在300 mm位置电位发生突变,即如图10(a)所示,线棒表面最大电场位于中阻和中高阻搭接位置处;随着中阻防晕层初始电阻率 $\rho_2$ 增大,低阻和中阻防晕层搭接位置附近电位上升斜率逐渐增大,中阻层和中高阻层的电位突变点

逐渐消失,电场薄弱环节逐步转移到低阻和中阻防晕层搭接位置,且较大的 $\rho_2$ 使低阻防晕层末端电场更集中。

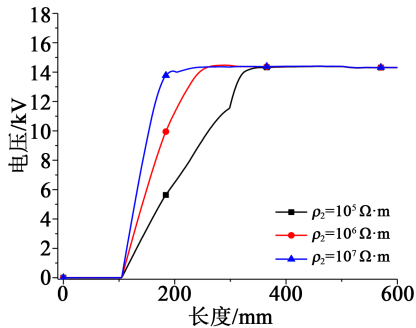


图9 不同中阻防晕层初始电阻率下线棒表面电位分布

Fig.9 Potential distribution on the stator bar surface under different initial resistivity of middle resistance anti-corona-layer

### 3 绝缘参数对端部电场最大值影响度分析

根据上述分析可知,主绝缘相对介电常数( $\epsilon_{rz}$ )、中阻防晕层非线性电阻系数( $\beta_1$ )、中高阻防晕层非线性电阻系数( $\beta_2$ )、低阻防晕层初始电阻率( $\rho_1$ )、中阻防晕层初始电阻率( $\rho_2$ )对线棒端部表面最大电场均存在影响。

为了客观地衡量多个绝缘参数变量对端部电场最大值的影响程度,采用SPSS Statistic软件进行相关性分析。由于不同绝缘参数对端部电场最大

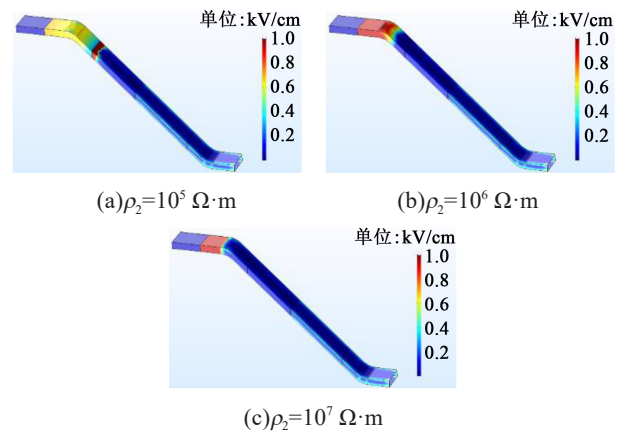


图10 不同中阻防晕层初始电阻率下线棒表面电场分布

Fig.10 Distribution of electric field on the stator bar surface under different initial resistivity of middle resistance anti-corona-layer

值是一种综合性的影响,在比较一个绝缘参数变量与端部最大电场的相关性时,需剔除其他变量的影响,因此采用偏相关分析。

统计分析的数据来自于本文不同绝缘材料电性能参数下的仿真数据。在统计分析中, $\alpha < 0.01$ 时为极显著, $0.01 \leq \alpha < 0.05$ 时为显著,其他情况为不显著;偏相关系数 $\gamma$ 取绝对值后, $\gamma \in [0, 0.1)$ 为无相关性, $\gamma \in [0.1, 0.3)$ 为弱相关, $\gamma \in [0.3, 0.5)$ 为中等相关, $\gamma \in [0.5, 1.0]$ 为强相关。表6为相关性分析结果,其中系数的正负值表示正相关和负相关,系数 $\gamma$ 的绝对值越大表示相关程度越强。

表6 绝缘材料参数与线棒端部最大电场的相关性

Tab.6 Correlation between insulating material parameters and maximum electric field at the stator bar end

项目	主绝缘 $\epsilon_{rz}$	中阻防晕层 $\beta_1$	中高阻防晕层 $\beta_2$	低阻防晕层 $\rho_1$	中阻防晕层 $\rho_2$
偏相关系数 $\gamma$	0.105	-0.38	-0.018	-0.009	-0.472
显著性系数 $\alpha$	0.313	0.034	0.467	0.483	0.01
性质	弱相关不显著	中等相关显著	无相关不显著	无相关不显著	中等相关显著

由表6可知,绝缘材料电性能参数对线棒端部电场最大值的影响程度从高到低依次为中阻防晕层初始电阻率 $\rho_2$ 、中阻防晕层非线性电阻系数 $\beta_1$ 、主绝缘相对介电常数 $\epsilon_{rz}$ 、中高阻防晕层非线性电阻系数 $\beta_2$ 、低阻防晕层初始电阻率 $\rho_1$ ,说明中阻防晕层电性能参数为主导因素。

### 4 结论

通过建立大型水轮发电机定子线棒端部的有

限元模型,研究了绝缘结构不同电性参数对线棒端部表面电场及电位分布的影响,主要得到以下结论:

(1)在常见的绝缘材料电性能参数范围内,随着主绝缘相对介电常数( $\epsilon_{rz}$ )的增大,线棒端部表面的最大电场增大,主绝缘材料相对介电常数选择偏小为佳;随着主绝缘材料电阻率( $\rho_2$ )的增加,线棒端部表面最大电场基本不变。

(2)各级防晕层的相对介电常数对线棒表面最

大电场变化的影响很小。

(3)中阻防晕层非线性电阻系数( $\beta_1$ )对线棒表面最大电场影响最大,在取较大值时为最佳;中高阻防晕层非线性电阻系数( $\beta_2$ )对线棒表面最大电场影响很小,但取值为1时最佳;高阻防晕层非线性电阻系数( $\beta_3$ )对线棒表面的最大电场基本没有影响。

(4)不同中高阻、高阻、高阻末端防晕层初始电阻率对线棒表面的最大电场基本没有影响;低阻防晕层初始电阻率 $\rho_1$ 取 $10^3 \Omega \cdot m$ 最佳;中阻防晕层初始电阻率 $\rho_2$ 取 $10^6 \Omega \cdot m$ 最佳。

(5)通过偏相关分析,得到绝缘材料电性参数对端部电场最大值的影响程度排序,其中中阻防晕层的初始电阻率 $\rho_2$ 和非线性电阻系数 $\beta_1$ 为主导因素。

### 参考文献:

- [1] 吴鹏,刘丽兵,陈志勇,等. 发电机定子线棒绝缘老化后不同部位参数比较[J]. 高电压技术,2004,30(5):23-24,49.
- [2] 贺正杰. 发电机定子线棒绝缘烧损原因及对策[J]. 高电压技术,2004,30(4):61-62.
- [3] DYMOND J H, STRANGES N, YOUNSI K, et al. Stator winding failures: Contamination, surface discharge, tracking[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2002,38(2):577-583.
- [4] WEIERS T. Symptoms of winding insulation aging after 37 years of service life in a hydrogenerator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(1):20-24.
- [5] 漆临生,梁智明,皮如贵. 发电机定子线棒导线绝缘结构试验研究[J]. 绝缘材料,2005,38(3):19-25,28.
- [6] KACEROVSKY J, KRPAL O, MACH F. Measured and simulated distributions of voltage and temperature along stator coils of synchronous generator[J]. Advances in Electrical and Electronic Engineering,2015,13(5):453-457.
- [7] 胡春秀,孙永鑫,石膏峰. 内屏蔽层对发电机定子线棒电性能的影响[J]. 绝缘材料,2013,46(2):49-52,56.
- [8] 孙永鑫,胡春秀,刘东. 大型电机定子线棒防晕层电场的有限元研究[J]. 大电机技术,2012(3):5-8.
- [9] HU H T, ZHANG X H, LIU Y L, et al. Optimization of the electric field distribution at the end of the stator in a large generator[J]. Energies,2018,11(10):2510.
- [10] 张芳芳. 大电机定子线圈端部防晕特性损耗仿真分析与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [11] 张瑞钧,刘上椿. 高压大容量发电机定子线圈槽部电场的数值分析[J]. 大电机技术,1994(4):26-30.
- [12] FABIANI D, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Aging investigation of motor winding insulation subjected to PWM-supply through PD measurements[C]//2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville, USA:IEEE,2005.
- [13] 咸哲龙,姜建国,曹海翔. 电机定子结构及其绝缘介电常数的频率特性对定子绕组电容值的影响[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):129-133.
- [14] 黄秀刚. 水轮发电机定子线棒故障原因及对策[J]. 水电与抽水蓄能,2014,38(1):15-18.
- [15] 姜宝君. 水轮发电机绝缘事故分析及处理[J]. 西北水电,2009(4):57-58.
- [16] 田晓雷. 高压电机定子线棒绝缘结构的电场研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
- [17] ZHANG J, WANG S, QIU J, et al. Finite element analysis and evaluation of stator insulation in high voltage synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(2):955-958.
- [18] 高波,郝长金,尹小兵,等. 温度对发电机主绝缘频域介电响应的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):915-923.