

750 kV 变电站末端门架绝缘子串均压特性 多参数差异性研究

刘闯¹, 刘鹏¹, 范玥霖¹, 张军¹, 韩文², 吴健³, 彭宗仁¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院,

711000, 西安; 3. 国网陕西省电力有限公司, 710100, 西安)

摘要: 变电站紫外观测发现, 750 kV 变电站末端门型架绝缘子串相对其他位置电晕现象较为严重, 因此对不同类型绝缘子串的均压特性进行差异性分析。搭建 750 kV 变电站三维模型, 对带跳线和不带跳线绝缘子串的均压特性进行对比, 利用子模型网格技术和模型细节简化技术对整体模型进行简化, 计算结果显示, 简化之后的模型误差为 0.5%, 计算时间下降了 78.9%。利用两参数和四参数结构分析方法对均压环、屏蔽环的相对距离和管径、环径进行同步分析, 得到带跳线和不带跳线的绝缘子串均压环、屏蔽环的最佳参数配置。计算结果显示, 对于不带跳线的绝缘子串, 需要配置屏蔽环的中心距增加 100 mm、环径增加 210 mm、管径增加 10 mm, 均压环的抬高距增加 270 mm、环径增加 40 mm, 才可以达到与带跳线绝缘子串相同的屏蔽效果。研究结果表明, 变电站末端门架绝缘子串需要配置更大尺寸的均压环和屏蔽环, 多参数结构分析方法有效。

关键词: 变电站; 门型架; 绝缘子串; 电场; 结构优化; 多参数

中图分类号: TM854 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202308019 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0194-12

Study on the Multiparameter Difference of Voltage Equalization Characteristics of Insulator Strings of 750 kV Substation End Portal Frame

LIU Chuang¹, LIU Peng¹, FAN Yuelin¹, ZHANG Jun¹,

HAN Wen², WU Jian³, PENG Zongren¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 711000, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: For the severe corona, found through ultraviolet observation, at insulator strings of the 750 kV substation end portal frame, which is more severe than that in other positions, a difference analysis on the voltage equalization characteristics of different types of insulator strings is proposed. Firstly, a three-dimensional model of 750 kV substation is built, and the voltage equalization characteristics of insulator strings with and without jumpers are compared. The overall model is simplified by the submodel mesh and detail simplification technology. Calculation results show that the error of the simplified model is only 0.5%, and the calculation time decreases by 78.9%. Then, two-parameter and four-parameter structural analysis methods are used to syn-

chronously analyze the relative distances, pipe diameters and ring diameters of shielding rings and grading ring. Finally, the optimal parameter configuration of the insulator string grading ring and shielding rings with and without jumpers is obtained. According to the results, to achieve the same shielding effect as insulator strings with jumpers, insulator strings without jumpers require an increase in center distance, ring diameter and pipe diameter of the shielding ring by 100 mm, 210 mm and 10 mm respectively, and an increase in the lifting distance and ring diameter of the grading ring by 270 mm and 40 mm, respectively. The study results indicate that the insulator strings of the substation end portal frame need to be equipped with larger grading rings and shielding rings. The structural optimization process also verifies the effectiveness of the multiparameter structural analysis method.

Keywords: substation; portal frame; insulator string; electric field; structural optimization; multiparameter

西北地区拥有丰富的风电和光伏资源,是我国重要的新能源生产和外送基地,为我国能源转型发展提供了重要依托。西北电网 750 kV 超高压输电工程可以保障西北地区新能源输送效率,加快新能源消纳,减少弃风弃光的现象,为实现“双碳”目标提供助力^[1-5]。

750 kV 变电站层架结构复杂,电磁环境控制至关重要。绝缘子串在变电站中起着控制高压导线绝缘距离和高压导线的固定引导作用。绝缘子串的长度一般随着电压等级的升高而逐渐增加,由于杂散电容的影响,绝缘子串的电位分布呈浅 U 型,且高压端前几片绝缘子承受着较高的分布电压,因此需要在绝缘子串高压端配置均压环来控制端部过高的电位梯度^[6]。

20 世纪 80 年代到 21 世纪初,研究人员通过实际测量和数值计算的手段获得了变电站和各电压等级输电线路绝缘子串的电压分布规律^[7-8]。随着计算机的普及和计算性能的大幅度提高,有限元方法与实验结果相结合,获得了更加丰富和准确的绝缘子串电压分布规律^[9]。对绝缘子均压特性的研究多集中在各电压等级的输电线路中,利用控制变量的研究手段对均压环相对距离、环径、管径进行逐一计算分析,得到了很多有意义的结论^[10-11]。对变电站内部绝缘子串的均压特性研究相对较少,多集中在带跳线绝缘子串的均压环参数分析^[12-14],几乎没有变电站末端门架不带跳线绝缘子串均压特性的研究。日前,通过紫外观测发现某 750 kV 变电站末端门架绝缘子串高压端电晕放电现象严重,而装配有相同尺寸均压环、屏蔽环的其他类型绝缘子串却极

少发生电晕放电,因此迫切地需要对变电站末端门架绝缘子串的均压特性进行更加细致的研究,得到其与一般跳线绝缘子串的均压特性差异。

本文建立了 750 kV 变电站的整体模型,并对末端门架带跳线绝缘子串与不带跳线绝缘子串的电场分布特性进行了差异性研究,采用两参数和四参数结构优化方法分别得到带跳线和不带跳线绝缘子串的均压环、屏蔽环最佳参数配置。本文的研究成果可为超/特高压变电站的均压环结构参数配置提供指导性方案。

1 模型搭建与简化

1.1 750 kV 变电站模型

750 kV 变电站末端门型架一般处于变电站的边缘,如图 1 中所示。750 kV 变电站门型架的绝缘子悬垂形式可以分为带引线、带跳线和不带跳线的绝缘子串 3 种,如图 2(a)、(b)、(c)所示。由图 3 中的紫外观测电晕可以看出,在均压环、屏蔽环尺寸配置相同的情况下,不带跳线的绝缘子串高压端部更容易产生电晕。

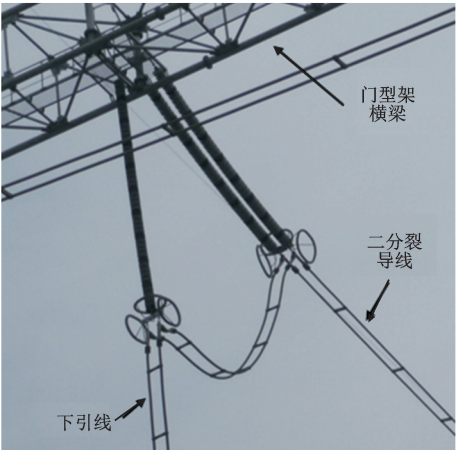


图 1 某 750 kV 变电站末端门型架实物

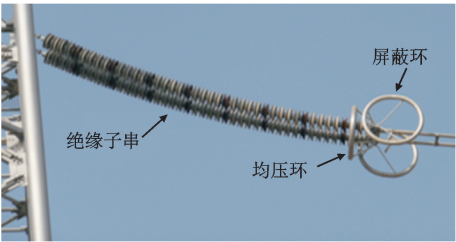
Fig. 1 Picture of a 750 kV substation portal frame



(a)带跳线绝缘子串



(b)带引线绝缘子串



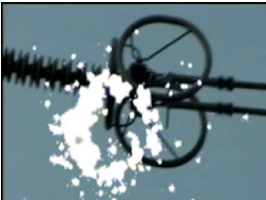
(c)不带跳线绝缘子串

图 2 带跳线、带引线和不带跳线绝缘子串

Fig. 2 Insulator strings with leads, with jumpers and without jumpers



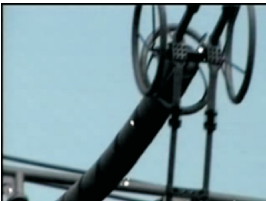
(a)不带跳线位置 1 电晕



(b)不带跳线位置 2 电晕



(c)不带跳线位置 3 电晕



(d)带跳线无电晕

图 3 带跳线和不带跳线的绝缘子串电晕对比

Fig. 3 Corona comparison of insulator strings with and without jumpers

为了研究产生这种差异的原因,建立典型 750 kV 变电站三维仿真模型,如图 4 所示。模型包含复杂的行架结构和断路器、支柱绝缘子、管母、导线、绝缘子串等关键电气设备。

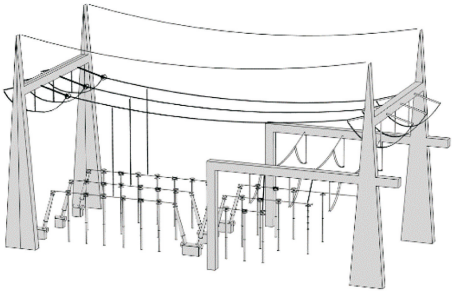


图 4 750 kV 变电站整体图

Fig. 4 Overall picture of 750 kV substation

1.2 电场计算

变电站的整体布置主要包含门架结构和通过下引线与导线连接的电力设备。由于管母的屏蔽作用,管母下侧的设备对上侧绝缘子串的电场分布影响很小。计算时只考虑左侧门架绝缘子的电场,左侧门架右侧的引线对右侧的门架有一定屏蔽作用,因此为了简化计算,删除断路器、隔离开关、支柱绝缘子和右侧门架绝缘子、右侧引线等对左侧绝缘子串电场分布影响很小的设备,简化之后的计算模型如图 5 所示。

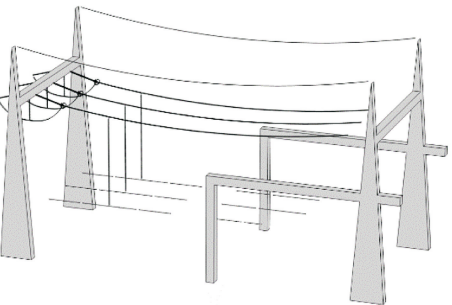


图 5 750 kV 变电站仿真模型简化结果

Fig. 5 Simplified simulation model for 750 kV substation

对关注的左侧绝缘子串进行精细化建模,750 kV 末端门型架带跳线绝缘子串和不带跳线绝缘子串端部金具的具体细节如图 6 所示。计算时,不考虑环境影响,假设各金具表面清洁、干燥。对一相的高压端导体施加系统最高运行相电压峰值 $U_m = 800 \times \sqrt{2} \div \sqrt{3} \text{ kV} = 653.2 \text{ kV}$, 其余两相高压端导体施加 $-0.5U_m$, 门型架、避雷线等导体接地,空气底面接地,将未知电位的导体设置为悬浮电位。空气和瓷绝缘子的相对介电常数分别设置为 1 和 5.7。

本文电场仿真计算使用 COMSOL Multiphysics 软件的 6.0 版本,在一台处理器为 Intel(R) Core (TM) i9-10900X、3.70 GHz,运行内存为 192 GB 的高

性能工作站上完成。

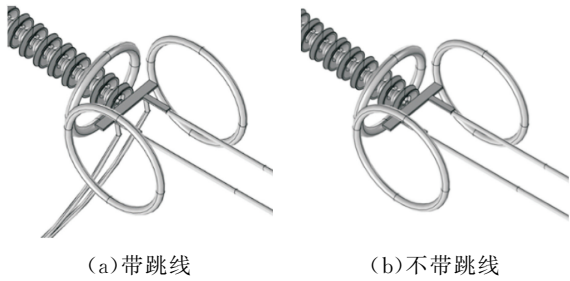


图 6 绝缘子串端部金具放大图

Fig. 6 Enlarged view of end fittings of insulator strings

B 相峰值条件下带跳线的绝缘子串仿真计算结果如图 7 所示,各相峰值条件下,带跳线和不带跳线绝缘子串均压环、屏蔽环表面最大电场强度如表 1 所示。

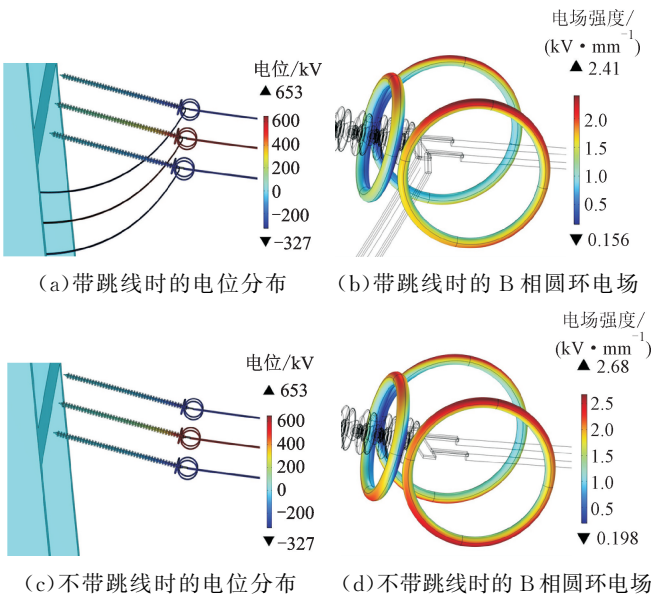


图 7 750 kV 变电站简化模型 B 相峰值电场计算结果

Fig. 7 Electric field calculation results of peak value of phase B in 750 kV substation simplified model

表 1 各相峰值下均压环和屏蔽环表面的电场强度最大值

Table 1 Maximum surface field strength of grading ring and shielding rings under peak value of each phase

峰值 相位	配置	均压环表面	屏蔽环表面
		电场强度最大值 /(kV·mm ⁻¹)	电场强度最大值 /(kV·mm ⁻¹)
A 相	带跳线	1.93	2.27
	不带跳线	2.23	2.55
B 相	带跳线	2.07	2.41
	不带跳线	2.35	2.68
C 相	带跳线	1.93	2.28
	不带跳线	2.23	2.55

由表 1 可知,B 相峰值时,带跳线和不带跳线绝缘子串的均压环、屏蔽环表面电场强度最大值均比 A 相峰值和 C 相峰值时的大。这是由于 B 相为中相,A 相、C 相为边相,两侧边相对中相有一定的电场叠加作用,因此中相峰值时的均压环和屏蔽环表面电场强度最大值比边相的大。由于跳线和绝缘子串高压端金具等电位之间有一定的相互屏蔽作用,跳线的存在改善了绝缘子串端部的电场分布。因此,各相峰值条件下,不带跳线绝缘子串端部的均压环和屏蔽环表面电场强度最大值均比带跳线的高。

根据我国超(特)输电工程的建设经验,为了满足防晕降噪和电磁安全的要求,圆环金具表面电场强度控制值取 2.2 kV/mm^[15]。B 相峰值时,带跳线耐张绝缘子串屏蔽环表面电场强度最大值达 2.41 kV/mm。不带跳线耐张绝缘子串屏蔽环表面电场强度最大值更是高达 2.68 kV/mm,均超过控制值要求。

带跳线和不带跳线绝缘子串分布电压如图 8 所示。可以看出,门型架耐张绝缘子串电位分布呈现两边高中间低的“v+U”形,由于没有跳线的屏蔽作用,不带跳线的绝缘子串分布电压更不均匀。带跳线绝缘子串端部前 5 片绝缘子承担了 25~30 kV 的高电压,而相同位置不带跳线绝缘子则承受着 30~35 kV 的高电压。自第 5 片绝缘子起,单片绝缘子承压呈现先逐渐减小后缓慢增加的趋势。各相峰值下分布电压对比可知,A 相和 C 相同属于边相,其变化规律基本相同,A 相、C 相的分布电压基本重叠在一起。B 相是中相,其高压端部绝缘子分布电压略高于边相,在接地端的分布电压略低于边相,这与实际测量值规律相同^[16]。

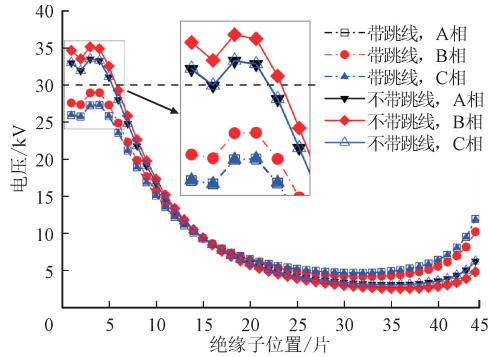


图 8 带跳线和不带跳线绝缘子串分布电压

Fig. 8 Distribution voltage of insulator strings with and without jumpers

为了保障绝缘子的稳定运行,工程上要求各相峰值条件下单片绝缘子承受电压不超过 30 kV^[17]。带跳线的绝缘子串基本符合要求,而不带跳线的绝缘子串端部前 5 片均高于 30 kV,为了改善不带跳

线绝缘子串端部的电场分布,需要对带跳线和不带跳线绝缘子串进行差异性研究。

1.3 子模型网格和模型简化技术

由于 750 kV 整体模型巨大,即使使用高性能工作站也需要 2~3 h 的计算时间,而结构优化需要上千次计算,按照整体模型进行优化不太现实。借助子模型网格技术和合理的模型简化技术可以大大提升计算速度^[18-19]。由于整体模型的复杂度主要集中在绝缘子串上,因此可以在各相绝缘子串范围内建立一个子模型,这样不仅可以限制网格的绘制规模,同时保证局部的计算精度。而且,从 1.2 小节的计算结果可以看出,B 相绝缘子串上的均压环、屏蔽环的表面最大电场强度值和绝缘子分布电压均高于 A、C 相的,因此可以仅对 B 相进行优化即可满足设计要求。为了降低模型复杂度,可以将除 B 相子模型内部以外的其他零部件模型按照方形替换圆形的基本原则进行替换,保持材料参数和边界条件设置不变。根据以上原则建立子模型区域,并对模型进行简化。应用子模型网格和模型简化之后的仿真模型如图 9 所示。

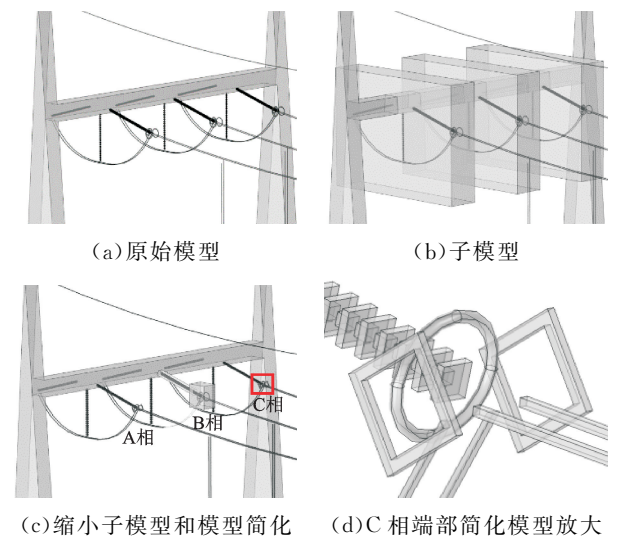


图 9 应用子模型网格和模型简化之后的仿真模型
Fig. 9 Simulation model after applying submodel mesh and model simplification

子模型网格技术是对关心部件建立一个包裹区域,包裹区域内部网格绘制完成之后,对包裹区域外部进行网格粗化操作不会影响包裹区域内部的网格精度,外部网格粗化可以大大减小整体模型生成网格的数量,从而达到减小计算量、提高计算速度的目的。子模型外部空气域网格粗化对子模型内部网格质量的影响如图 10 所示。

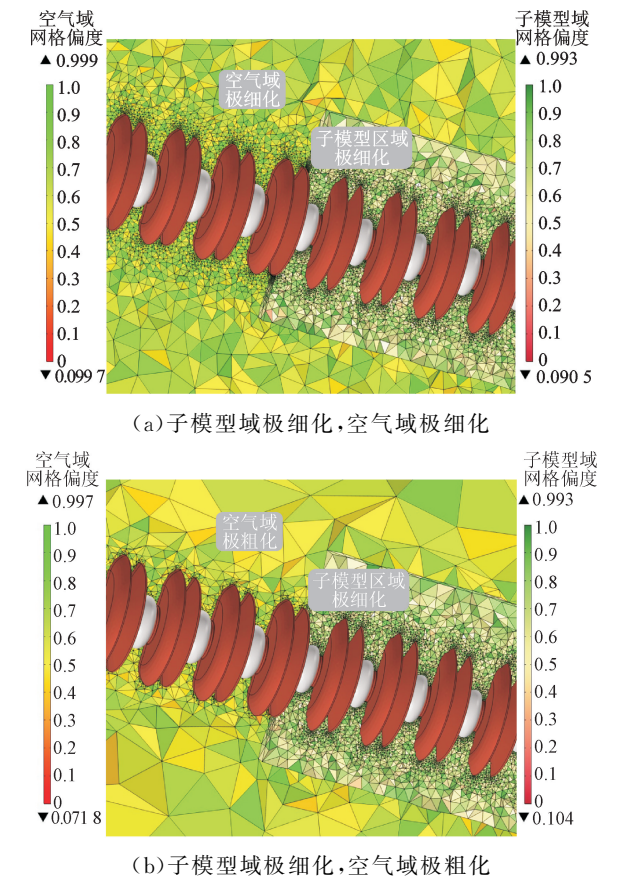


图 10 子模型网格对网格精度绘制的影响
Fig. 10 The influence of submodel mesh on mesh precision rendering

按照子模型网格技术和模型简化技术处理之后的两种模型与原始模型的计算结果对比如表 2 和图 11 所示。

表 2 3 种模型 B 相均压环、屏蔽环、绝缘子片的均压特性和计算时间对比						
Table 2 Comparison of voltage sharing characteristics of grading ring, shielding rings, insulator and calculation time of three models						
模型	均压环表面电场强度 最大值/(kV·mm ⁻¹)	屏蔽环表面电场强度 最大值/(kV·mm ⁻¹)	绝缘子 1 电压/kV	绝缘子 2 电压/kV	绝缘子 3 电压/kV	计算时间/s
原模型	2.07	2.41	27.57	27.34	28.93	8 482
子模型	2.06	2.41	27.58	27.34	28.93	8 257
子模型+简化	2.06	2.42	27.56	27.32	28.91	1 789

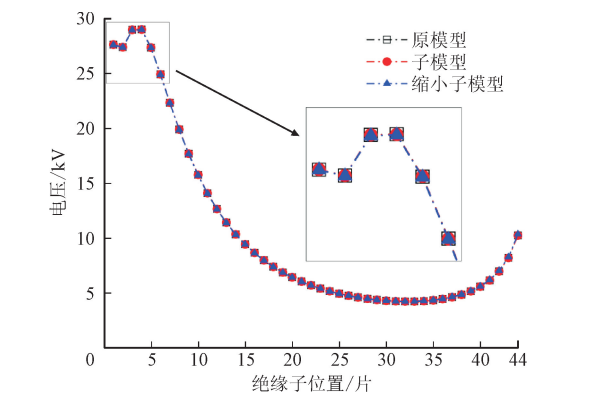


图 11 3 种模型对 B 相绝缘子串分布电压的影响
Fig. 11 The influence of three models on the distributed voltage of B-phase insulator string

由表 2 和图 11 可以看出,使用子模型网格技术之后,计算时间下降了 2.7%,使用缩小子模型结合模型简化技术之后,计算时间下降了 78.9%,均压环、屏蔽环表面电场强度最大值和绝缘子分布电压的计算误差均在 0.5% 以内。可以看出,使用子模型网格技术和模型简化技术可以在不影响计算精度的同时大幅度提高计算速度。由于多参数分析所需的数据量呈指数增加,使用以上模型简化技术结合高性能工作站的并行计算可以大大提高结构优化效率。

2 多参数结构优化

以往的均压环结构优化分析一般采用单参数控制变量的枚举法^[11, 20],也有采用两参数的结构优化方法^[21-23],还有使用智能算法进行结构优化^[24-25],但是对关联参数很多的结构进行结构优化分析时,很难通过一次迭代得到其最佳参数配置,智能算法的封闭性决定了其无法对优化过程进行分析。多参数结构优化通过构建多个变量的正交数据集,利用多维图形的展示方式对多个关联参数进行优化分析,多参数结构优化不需要进行迭代就可以快速求得多个参数取值范围内的最佳配置。多参数结构优化分析还可以更加清楚地展示多个参数之间的变化关系,为研究参数变化对优化目标的影响提供多个维度的参考,具有很强的实用价值。

750 kV 门架绝缘子串端部一般配置 3 个铝环,其中安装在绝缘子串上的铝环起到对绝缘子串高压端较高电位梯度的均压作用,在绝缘子串高压端两侧对称安装的铝环起到对端部金具和绝缘子串上铝环的电场屏蔽作用。一个均压环、两个对称的屏蔽环共有 6 个关联参数。均压环抬高距(JYH,用符号

H_{JY} 表示)和屏蔽环中心距(PBH,用符号 H_{PB} 表示)通过调整空间位置来调节均压屏蔽效果,关联程度较高,可以进行两参数结构优化分析。均压环管径(JYr,用符号 r_{JY} 表示)和环径(JYR,用符号 R_{JY} 表示)、屏蔽环的管径(PBr,用符号 r_{PB} 表示)和环径(PBR,用符号 R_{PB} 表示)都是通过改变圆环自身形状来调节均压屏蔽效果,关联程度很高,可以进行四参数结构优化分析。COMSOL 软件中求解器自带的参数化扫描功能可以用于多个参数正交数据集的构建。

为了更好地对比带跳线和不带跳线的绝缘子串均压环和屏蔽环的优化过程,对两种结构进行同步分析。

2.1 相对距离的两参数结构优化分析

分别对带跳线和不带跳线绝缘子串的均压环参数 JYH 和屏蔽环参数 PBH 进行两参数结构优化对比分析,得到 JYH 和 PBH 两个参数对绝缘子片分布电压最大值和均压环、屏蔽环表面电场强度最大值的影响规律,如图 12~14 所示。

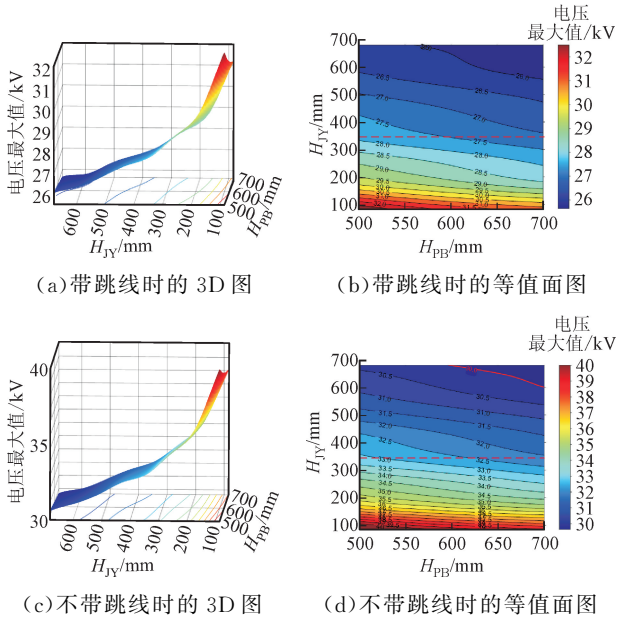
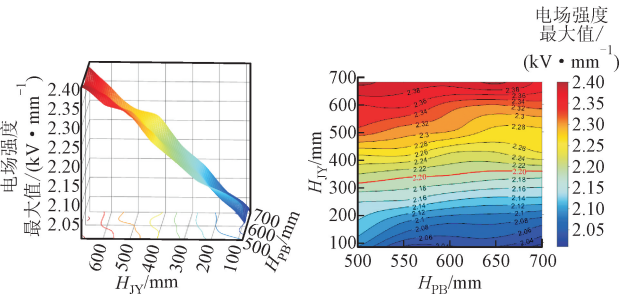


图 12 JYH 和 PBH 对绝缘子串分布电压最大值的影响
Fig. 12 The influence of JYH and PBH on the maximum distributed voltage of insulator string

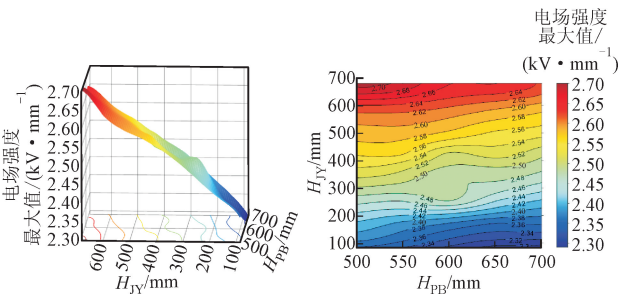
由图 12 可以看出,对于相同位置的均压环、屏蔽环,不带跳线的绝缘子串分布电压最大值比带跳线的高,PBH 对分布电压的影响很小,仅有小幅度的减小,而随着 JYH 的增加,分布电压最大值先快速减小,随后缓慢减小。这是因为均压环对屏蔽环有一定的屏蔽作用,屏蔽环相对距离 PBH 的增加对绝缘子分布电压的影响有限,而均压环的 JYH 增加可以增强绝缘子端部均压效果,但是当均压环的

JYH 过大,超过了屏蔽环的屏蔽范围,均压环的均压效果也相对减弱。因此,设计均压环的抬高距 JYH 应不大于 350 mm,以保持均压环和屏蔽环对绝缘子串的综合均压效果。



(a)带跳线时的 3D 图

(b)带跳线时的等值面图

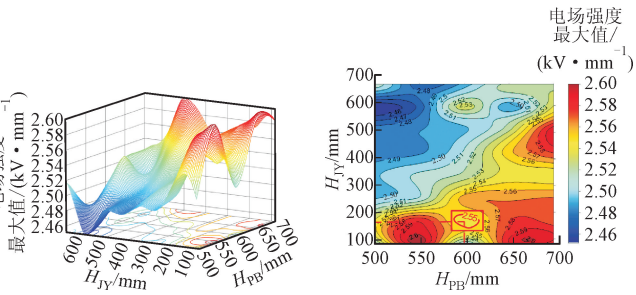


(c)不带跳线时的 3D 图

(d)不带跳线时的等值面图

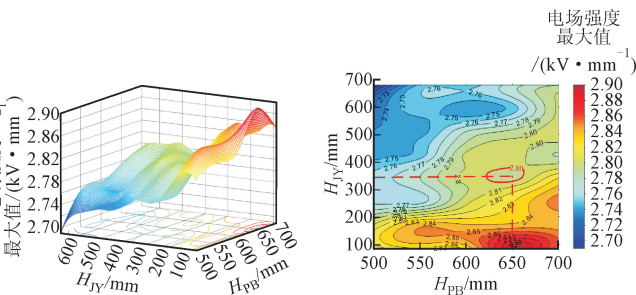
图 13 JYH 和 PBH 对均压环表面电场强度最大值的影响

Fig. 13 Influence of JYH and PBH on the maximum surface field strength of grading ring



(a)带跳线时的 3D 图

(b)带跳线时的等值面图



(c)不带跳线时的 3D 图

(d)不带跳线时的等值面图

图 14 JYH 和 PBH 对屏蔽环表面电场强度最大值的影响

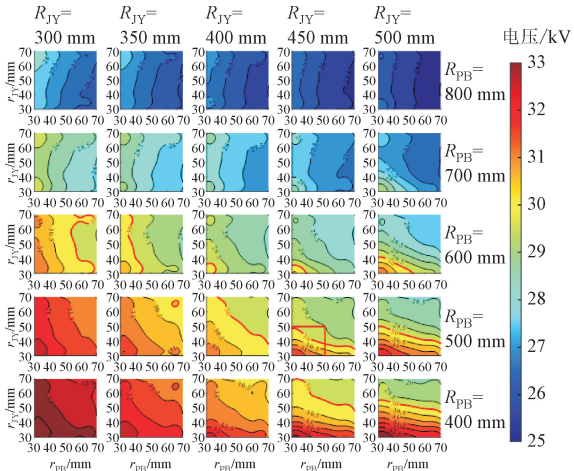
Fig. 14 Influence of JYH and PBH on the maximum surface field strength of shield ring

由图 13 和图 14 可以看出,随着 PBH 的增加,屏蔽环的表面最大电场强度增加,均压环的表面最大电场强度有小幅度的减小。这是因为当屏蔽环远离绝缘子串时,屏蔽环表面的电场强度不均匀程度增加,电场强度最大值变大,此时屏蔽环对均压环的屏蔽作用增强,内部的电场分布更加均匀。当均压环沿绝缘子串向上移动时,均压环逐渐脱离了屏蔽环的屏蔽范围,并一定程度上承担了一定的屏蔽作用。因此,随着 JYH 的增加,屏蔽环表面电场强度最大值逐渐减小,而均压环上的表面电场强度最大值逐渐增大。

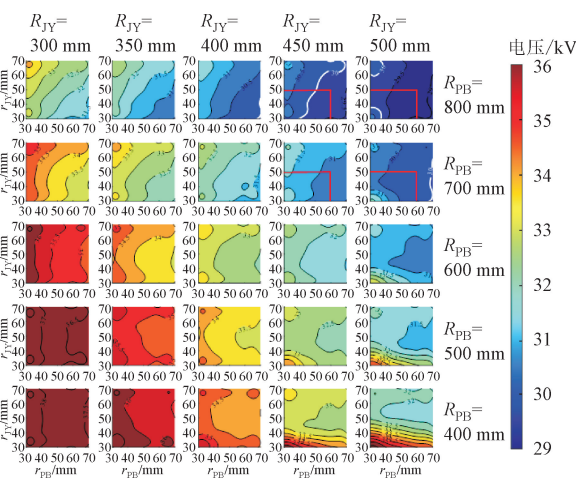
通过单一的相对距离调节很难满足均压环和屏蔽环表面电场强度最大值小于 2.2 kV/mm 和单片绝缘子分布电压小于 30 kV 的控制值要求,因此只需要在参数变化范围内选取最优的参数值即可。图 12 的绝缘子分布电压变化和图 13 的均压环表面电场强度最大值变化都有很强的规律性,而且两者的变化规律相反,从中很难获得最佳参数的取值,从规律中可以看出,最佳参数取值不应在参数变化范围的边缘。从图 14 屏蔽环表面电场强度变化规律可以看出,参数变化范围内部存在多个局部最小值。选取参数值最小的一组局部最小值,如图 14(b)中红色标注和图 14(d)中白色标注所示。此时,带跳线绝缘子串 PBH 取 600 mm,JYH 取 170 mm,不带跳线绝缘子串 PBH 取 650 mm,JYH 取 340 mm。

2.2 管径和环径的四参数优化分析

均压环和屏蔽环的管径、环径可以通过改变表面曲率调节自身的表面电场强度最大值,并且屏蔽面积的改变对绝缘子串分布电压也有调节作用,因此对 JYR、JYr、PBR、PBr 进行四参数结构优化分析,综合对比其均压屏蔽效果,结果如图 15~18 所示。



(a)带跳线



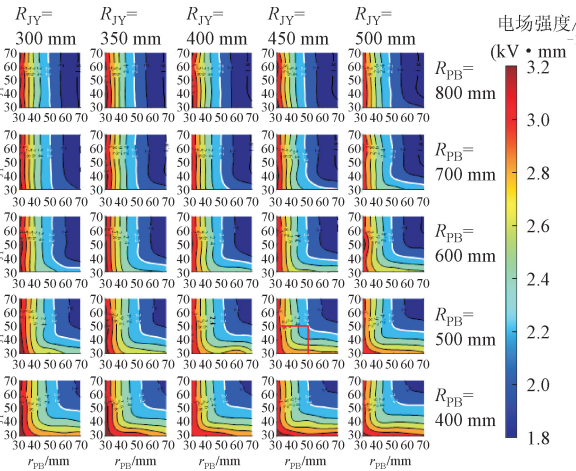
(b)不带跳线

图 15 JYR、JYr、PBR 和 PBr 对绝缘子串分布电压最大值的影响

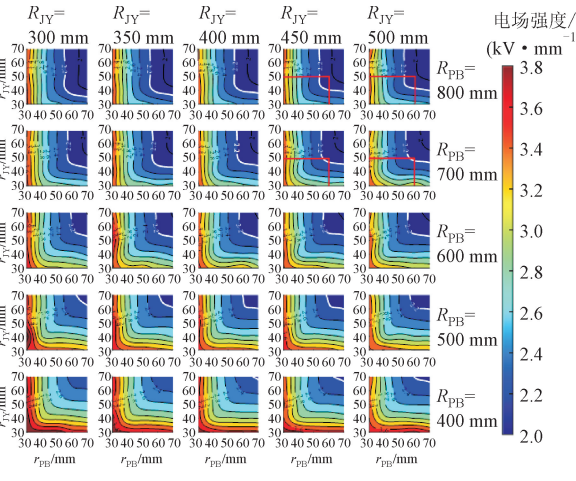
Fig. 15 The influence of JYR, JYr, PBR and PBr on the maximum distributed voltage of insulator string

由图 15 可以看出,JYR、JYr、PBR、PBr 的增加都有利于绝缘子串分布电压最大值的降低。根据图 15(a)中的 30 kV 红色等值曲线标识和图 15(b)中的 30 kV 白色等值曲线标识,考虑分布电压小于 30 kV 时,带跳线的绝缘子串所需的圆环尺寸小于不带跳线的。

由图 16 可以看出,JYR、JYr、PBR、PBr 的增加能有效降低均压环和屏蔽环表面电场强度最大值,因为这样可以增加其表面曲率,使其表面电场强度最大值下降。同样地,如图 16 中白色标识 2.2 kV/mm 的限制值等值曲线所示,要想达到相同的均压屏蔽效果,不带跳线的绝缘子串需要更大尺寸的圆环。



(a)带跳线



(b)不带跳线

图 16 JYR、JYr、PBR 和 PBr 对均压环和屏蔽环表面电场强度最大值的影响

Fig. 16 Effect of JYR, JYr, PBR and PBr on the maximum surface field strength of grading ring and shielding rings

图 15 和图 16 的四参数分析可以准确地获得 JYr 和 PBr 的参数取值,但是由于参数选取限制,很难获得 JYR 和 PBR 的准确取值,只能确定其大致范围。由图 16 中的变化规律可以看出,PBR 的尺寸固定时,满足小于 2.2 kV/mm 控制值要求的 JYr 和 PBr 的值变化不大,且随着 PBR 的增加,满足要求的 JYr 和 PBr 的值逐渐减小。根据均压环尺寸最小化选取的原则,对比图 15(a)中单片绝缘子分布电压小于 30 kV/mm 和图 16(a)中均压环、屏蔽环表面电场强度最大值小于 2.2 kV/mm 的控制值要求,红色折线标注位置为 JYr 为 50 mm、PBr 为 50 mm,即为带跳线时 JYr 和 PBr 的最佳参数取值。同理,对比图 15(b)中单片绝缘子分布电压小于 30 kV/mm 和图 16(b)中均压环、屏蔽环表面电场强度最大值小于 2.2 kV/mm 的控制值要求,红色折线标注位置为 JYr 为 50 mm、PBr 为 60 mm,即为不带跳线时 JYr 和 PBr 的最佳参数取值。

当 JYr 和 PBr 选定后,JYR 和 PBR 两个参数变化对带跳线和不带跳线圆环表面电场强度最大值和绝缘子片分布电压的影响规律如图 17~18 所示。

从图 17(a)的白色标注可以看出,带跳线绝缘子串满足均压环、屏蔽环表面电场强度最大值小于 2.2 kV/mm 控制值要求的最小尺寸为 PBR 为 530 mm、JYR 为 460 mm,此时的参数取值对应图 17(b)中绝缘子串分布电压最大值为 29.2 kV,满足控制值要求。从图 18(b)的白色标注可以看出,不带跳线绝缘子串满足分布电压最大值小于 30 kV 控制值要求

的最小尺寸为 PBR 为 740 mm、JYR 为 500 mm,此时的参数取值对应图 18(a)中均压环、屏蔽环表面电场强度最大值为 2.16 kV/mm,满足控制值要求。

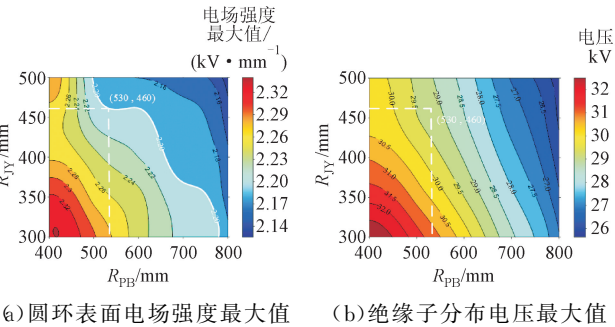


图 17 JYr 为 50 mm、PBr 为 50 mm 时 PBR 和 JYR 对带跳线均压环和屏蔽环表面电场强度最大值的影响

Fig. 17 Effect of PBR and JYR on the maximum surface field strength of grading ring and shielding rings with jumpers when JYr is 50 mm and PBr is 50 mm

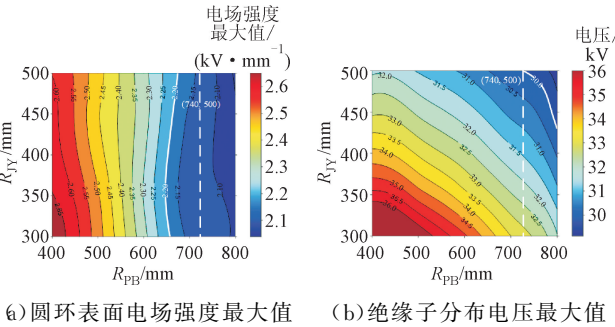


图 18 JYr 为 50 mm、PBr 为 60 mm 时 PBR 和 JYR 对不带跳线均压环和屏蔽环表面电场强度最大值的影响

Fig. 18 Effect of PBR and JYR on the maximum surface field strength of grading ring and shielding rings without jumpers when JYr is 50 mm and PBr is 60 mm

3 优化结果分析

3.1 圆环尺寸优化对比

750 kV 末端门架带跳线和不带跳线绝缘子串优化后均压环、屏蔽环的尺寸如图 19 所示。

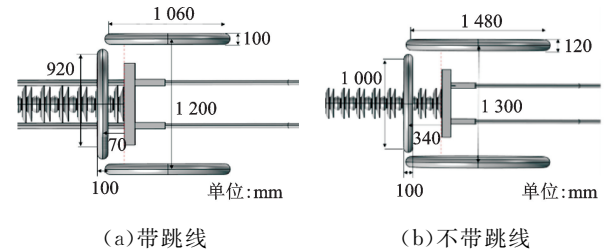


图 19 优化后均压环和屏蔽环的尺寸
Fig. 19 Size of grading ring and shielding rings after optimization

按照上述尺寸进行电场计算,结果如表 3 所示,优化前后 B 相峰值下 B 相绝缘子串的分布电压变化对比如图 20 所示。

表 3 优化后各相峰值下均压环和屏蔽环表面电场强度最大值

Table 3 Maximum surface field strength of grading ring and shielding rings under peak value of each phase after optimization

相位 峰值	配置	均压环表面 电场强度 最大值/ (kV · mm ⁻¹)	屏蔽环表面 电场强度 最大值/ (kV · mm ⁻¹)	相对原始尺寸 的表面电场强 度最大值之和 下降幅度/%
A 相 峰值	带跳线	1.90	2.02	6.7
	不带跳线	1.95	1.94	18.6
B 相 峰值	带跳线	2.04	2.14	6.5
	不带跳线	2.06	2.03	18.7
C 相 峰值	带跳线	1.90	2.03	6.7
	不带跳线	1.95	1.94	18.6

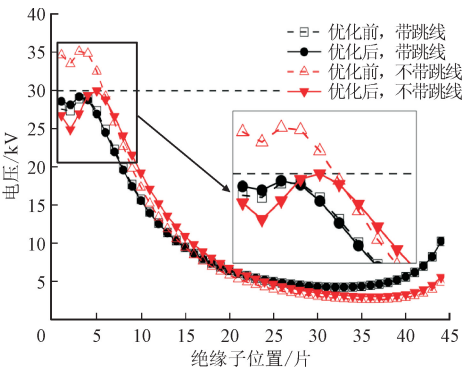


图 20 优化前后 B 相峰值下 B 相绝缘子串分布电压对比
Fig. 20 Comparison of distribution voltage of phase B insulator string under peak value of phase B before and after optimization

由表 3 和图 20 可见,不带跳线绝缘子串圆环的表面电场强度最大值有较大幅度降低,优化后的均压环、屏蔽环不仅满足自身电场强度小于 2.2 kV/mm 的控制值要求,绝缘子串的分布电压也下降到 30 kV 以下,满足了设计要求。

3.2 异形屏蔽环

屏蔽环一方面要对端部连接金具进行屏蔽,还要对均压环起到屏蔽作用,因此上下超出屏蔽范围的圆环可以适当削减。圆环可更改为跑道环,保证屏蔽作用的同时缩小屏蔽环的大小。按照管径和相对位置不变的情况下改变屏蔽环的形状为跑道型(以下简称跑道环),尺寸如图 21 所示。

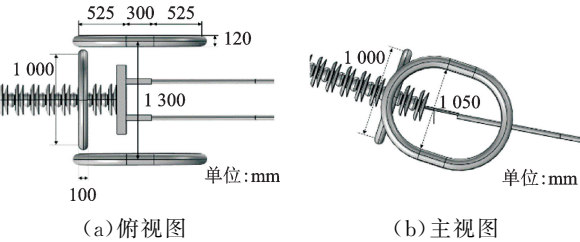


图 21 跑道型屏蔽环尺寸

Fig. 21 Size of runway type shielding rings

屏蔽环导线一侧所需的屏蔽面积比绝缘子串侧小,因此还可以将屏蔽圆环替换为马蹄形屏蔽环(以下简称马蹄环),进一步缩小屏蔽环尺寸,马蹄型屏蔽环如图 22 所示。

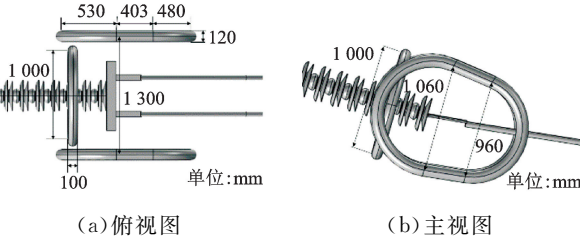


图 22 马蹄型屏蔽环尺寸

Fig. 22 Size of horseshoe type shielding rings

分别对各相峰值条件下的两种异形屏蔽环的均压特性进行计算,计算结果如表 4 所示,在 B 相峰值条件下两种异形屏蔽环对 B 相绝缘子分布电压的影响规律如图 23 所示。

表 4 各相峰值下均压环和异形屏蔽环表面电场强度最大值

Table 4 Maximum surface field strength of grading ring and special-shaped shielding rings under peak value of each phase

相位	异形屏蔽环	均压环表面	屏蔽环表面	相对原始尺寸的表面电场强度最大值之和下降幅度/%
		电场强度最大值/ (kV·mm ⁻¹)	电场强度最大值/ (kV·mm ⁻¹)	
A 相峰值	跑道型	1.95	1.94	18.6
	马蹄型	2.07	1.99	15.1
B 相峰值	跑道型	2.06	2.03	18.7
	马蹄型	2.18	2.08	15.3
C 相峰值	跑道型	1.95	1.94	18.6
	马蹄型	2.07	2.00	14.9

由于绝缘子串一侧均压环和屏蔽环之间有一定相互屏蔽作用,因此屏蔽环的表面电场强度最大值一般出现在导线一侧,均压环表面电场强度最大值则出现在上下两侧。由图 21 和图 22 的尺寸对比可以看出,

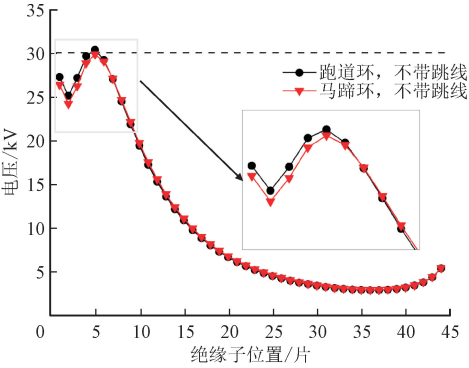


图 23 B 相峰值下跑道环和马蹄环对 B 相绝缘子分布电压的影响

Fig. 23 The influence of runway rings and horseshoe rings on the distributed voltage of phase B insulator at the peak value of phase B

马蹄环在导线侧尺寸略小于跑道环而在绝缘子侧略大于跑道环,因此马蹄环表面电场强度最大值比跑道型的稍高,均压环表面电场强度向上下端部集中,电场强度也略有增加。但是,由于马蹄环具有更大的高压端屏蔽面积,高压端部绝缘子的分布电压略低于跑道环,第 7 片以后屏蔽环的效果减弱,其后的分布电压几乎相同。3 种屏蔽环均采用直径 120 mm 的空心铝管制作,单个圆环、跑道环、马蹄环的周长分别为 4 649.6、3 758.6、3 727.6 mm。由此可见,跑道环、马蹄环可以在满足设计要求的同时减轻屏蔽环的质量。

4 结 论

本文对 750 kV 变电站中绝缘子串带跳线和不带跳线的均压屏蔽装置进行了电场计算,并利用多参数分析方法对其结构参数进行了差异性研究,得到如下结论:

- (1)为了达到同样的均压屏蔽效果,不带跳线绝缘子串的均压环、屏蔽环所需的圆环尺寸要比带跳线的大;
- (2)利用多参数结构优化方法可以通过同时展示多个参数变化对目标的影响,快速确定参数变化范围内的最佳参数取值;
- (3)带跳线和不带跳线绝缘子串优化配置之后的圆环均能满足表面电场强度最大值小于 2.2 kV/mm 和绝缘子分布电压最大值小于 30 kV 的设计要求;
- (4)跑道型屏蔽环和马蹄形屏蔽环能在缩小屏蔽环大小的同时满足设计要求,两种屏蔽环还能大幅度减轻端部金具的质量,具有很好的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671.
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Zhongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [3] 李庆民, 于万水, 赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术 [J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the “peak CO₂ emissions and carbon neutrality” policy [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.
- [4] 周远翔, 陈健宁, 张灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇 [J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [5] 童光毅. 基于双碳目标的智慧能源体系构建 [J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 1-6.
TONG Guangyi. Construction of smart energy system based on dual carbon goal [J]. Smart Power, 2021, 49(5): 1-6.
- [6] 李其莹, 郎需军, 陈鹏. ± 800 kV 特高压直流大跨越悬垂绝缘子串均压方案优化 [J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 202-206, 214.
LI Qiyang, LANG Xujun, CHEN Peng. Optimization of grading rings design for ± 800 kV HVDC large crossing transmission line suspension insulator string [J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(5): 202-206, 214.
- [7] 李明, 马仪. 高海拔 500 kV V 形绝缘子串工频电压分布研究 [J]. 云南电力技术, 2000(2): 25-26.
LI Ming, MA Yi. Study on Power frequency voltage distribution of 500 kV V-shaped insulator string at high altitude [J]. Yunnan Electric Power, 2000(2): 25-26.
- [8] 丁一正, 黄长学. 500 kV 平武线绝缘子串分布电压的现场测量 [J]. 高电压技术, 1986(2): 27-29.
DING Yizheng, HUANG Changxue. The measurement of voltage distribution of insulator string on 500 kV Pingwu transmission line [J]. High Voltage Engineering, 1986(2): 27-29.
- [9] 王斌, 彭宗仁. 500kV 线路绝缘子电压分布的有限元法计算 [J]. 电瓷避雷器, 2003(1): 13-15.
WANG Bin, PENG Zongren. A finite element method for the calculation of the voltage distribution along the 500 kV line insulators [J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(1): 13-15.
- [10] 庞金龄, 杨熙, 梁经龙. 基于子模型技术的 500 kV 复合杆塔横担电场分析及均压环结构参数优化 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 74-80.
PANG Jinling, YANG Xi, LIANG Jinglong. Electric field analysis of 500 kV composite cross-arm and structure parameters optimization of its grading rings based on submodeling technology [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 74-80.
- [11] 万康鸿, 吴昊, 韩彦华, 等. 交流 330 kV 分段式复合绝缘子均压特性研究 [J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 31-37, 46.
WAN Kanghong, WU Hao, HAN Yanhua, et al. Voltage-equalizing characteristics of the segmented composite insulator for AC 330 kV [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 31-37, 46.
- [12] 李靖, 彭宗仁, 廖晋陶, 等. 特高压变电站中带跳线 II 形耐张瓷绝缘子串的均压特性 [J]. 电网技术, 2012, 36(4): 16-21.
LI Jing, PENG Zongren, LIAO Jintao, et al. Voltage-sharing characteristics of II-shaped tension ceramic insulator string with jumpers in UHVAC substation [J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 16-21.
- [13] 李智琦, 罗日成, 吴东, 等. 500 kV 变电站绝缘子串均压环结构优化分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 171-176.
LI Zhiqi, LUO Richeng, WU Dong, et al. Optimization analysis of grading ring structure for insulator string in a 500 kV substation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 171-176.
- [14] 唐铭骏, 叶丽莎, 林春耀, 等. 500 kV 站用绝缘子串均压环优化设计 [J]. 高压电器, 2015, 51(5): 63-70.
TANG Mingjun, YE Lisha, LIN Chunyao, et al. Optimization of shielding ring of insulator string in 500 kV substation [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 63-70.

- [15] 杨林, 谭浩文, 王加龙, 等. 750 kV 酒杯型复合横担杆塔电场仿真计算及电晕试验 [J]. 电网技术, 2018, 42(6): 2009-2015.
YANG Lin, TAN Haowen, WANG Jialong, et al. Electric field computation and corona test for composite cross-arms in 750 kV cup type tower [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 2009-2015.
- [16] 丁一正, 张俊兰, 陈雄一, 等. 500 kV 线路绝缘子串分布电压的现场实测与分析 [J]. 中国电力, 2000, 33(2): 45-47.
DING Yizheng, ZHANG Junlan, CHEN Xiongyi, et al. Field measurement and analysis of voltage distribution on 500 kV transmission line insulator strings [J]. Electric Power, 2000, 33(2): 45-47.
- [17] 黄道春, 黄正芳, 王国利, 等. 特高压交流输电线路瓷绝缘子串电位和均压环电场分布计算模型的简化 [J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2163-2170.
HUANG Daochun, HUANG Zhengfang, WANG Guoli, et al. Calculation model simplification for porcelain insulator string potential and grading ring surface electric field distribution of UHV AC transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2163-2170.
- [18] 杜志叶, 田雨, 金硕, 等. 大规模复杂模型电场计算的快速精细化有限元数值建模 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7166-7173.
DU Zhiye, TIAN Yu, JIN Shuo, et al. A fast finite element numerical modeling method for the calculation of electric field in large scale complex model [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7166-7173.
- [19] 郑峥, 阮江军, 霍锋. 特高压紧凑型线路复合绝缘子电场计算有限元模型的简化 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(8): 710-715.
ZHENG Zheng, RUAN Jiangjun, HUO Feng. Simplification of finite element model for composite insulator electric field calculation of UHV compact transmission line [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(8): 710-715.
- [20] 毛艳, 丁玉剑, 郭贤珊, 等. ± 1100 kV PLC 电抗器均压屏蔽装置的结构优化 [J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1436-1442.
MAO Yan, DING Yujian, GUO Xianshan, et al. Structure optimization of grading and shielding devices for ± 1100 kV PLC reactor [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1436-1442.
- [21] 刘闯, 张欣宜, 刘鹏, 等. 同塔四回 500 kV 输电线路全复合横担与半复合横担均压特性 [J]. 电网技术, 2022, 46(10): 4131-4139.
LIU Chuang, ZHANG Xinyi, LIU Peng, et al. Voltage sharing characteristics of full composite cross arm and semi-composite cross arm of 500 kV four-circuit transmission lines [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4131-4139.
- [22] LIU Chuang, SONG Gang, YE Zhiwei, et al. Study on voltage sharing characteristics of composite insulator runway ring for 500 kV four-circuit transmission lines [C]//The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 109-119.
- [23] ALTI N, BAYADI A, BELHOUCHE K. Grading ring parameters optimization for 220 kV metal-oxide arrester using 3D-FEM method and bat algorithm [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2021, 15(1): 14-24.
- [24] 李斌, 柳超, 康颖, 等. 基于矩量法和蝴蝶交配优化算法的甚低频发射天线顶线绝缘子均压环优化设计 [J]. 高压电器, 2020, 56(5): 94-100, 106.
LI Bin, LIU Chao, KANG Ying, et al. Optimal design of top-wires insulator grading rings on VLF transmitting antenna based on the method of moments and butterfly mating optimization [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 94-100, 106.
- [25] 张施令. 基于 RBF 神经网络和有限元技术的高压支柱绝缘子机电模拟及均压结构优化研究 [J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 182-189.
ZHANG Shiling. Electro-mechanical simulation and voltage-sharing structure optimization of high voltage post insulator based on RBF neural network and finite element method [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 182-189.

(编辑 陶晴)