

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.018

均压环断裂倾斜对复合绝缘子电场影响的研究

左立昕^{1,2}, 余成波^{1,2}, 陈超^{1,2}

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术中心, 重庆 400054)

摘要: 为了研究均压环断裂和倾斜对复合绝缘子电场和电位的影响,以FXB3-110/100型复合绝缘子为研究对象,采用有限元分析法在ANSYS中建立复合绝缘子物理模型并进行仿真。通过改变均压环断裂位置和倾斜角度对其进行建模,再通过有限元分析法研究其对电场分布的影响。结果表明:不论高压侧还是低压侧的均压环的断裂和缺失,都会使该侧的场强激增而对侧的场强骤降。均压环断裂使得电位向两端集中,当均压环全部断裂致使脱落时,高低压侧前3%~5%的泄露距离承担了60%的电压降。发生复合绝缘子均压环的倾斜时,对电场的影响主要向绝缘子串中部集中而并非高低压两端,高角度的均压环倾斜会使场强增大40%左右,不利于复合绝缘子的安全运行。

关键词: 均压环; 断裂; 倾斜; 有限元; 电场分布

Research on the Influence of Grading Ring Fracture and Inclination on Electric Field of Composite Insulators

ZUO Lixin^{1,2}, YU Chengbo^{1,2}, CHEN Chao^{1,2}

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Energy Internet Engineering Technology Research Center, Chongqing 400054, China)

Abstract: To study the influence of grading ring fracture and inclination on electric field and potential distribution of composite insulators, the FXB3-110/100 composite insulator is taken as the research object. A physical model of the composite insulator is set up in ANSYS using the finite element method, and simulations are performed. The grading ring is modeled by changing its fracture position and inclination angle, and its influence on electric field distribution is then studied by the finite element analysis method. The results show that the fracture and absence of the grading ring on either high-voltage side or low-voltage side will cause the field strength of that side to increase and the field strength of the opposite side to drop abruptly. The grading ring fracture makes the potential concentrate on both sides. When the grading ring is completely fractured and falls off, the first 3% to 5% of the leakage distance on the high and low voltage sides carries 60% of the voltage drop. In case of inclination of the grading ring of composite insulator, the influence to the electric field mainly concentrates in the middle of the insulator string rather than the high and low voltage ends. A large inclination angle of the grading ring will increase the electric field intensity by about 40%, which is detrimental to the safe operation of the composite insulators.

Key words: grading ring; fracture; inclination; finite element; electric field distribution

收稿日期:2025-11-15; 修回日期:2026-01-25

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0251);重庆市教育委员会科学技术研究计划(KJQN202101115, KJQN202201157)。

Project Supported by General Program of Chongqing Natural Science Foundation(cstc2021jcyj-msxmX0251), Scientific and Technological Research Plan of Chongqing Education Committee(KJQN202101115, KJQN202201157).

0 引言

随着中国电网规模的扩大和电力系统的高速发展,输电工程的安全就显得愈发重要。自然环境中各种因素如强风、雷雨、鸟啄等时刻影响着高压输电线路的安全,威胁着供电系统的正常运行。而常用于高压输电线路和变电站的复合绝缘子扮演着保护和隔离的角色^[1-3]。

由于长期暴露在户外,绝缘子均压环可能会发生故障,导致其性能下降或失效。长期的材料疲劳、外力冲击、振动和电力负荷变化等会使得绝缘子均压环断裂或者脱落。同时伴随着绝缘子承受着机械载荷,如重力、风载荷、冰载荷等。如果这些载荷超出了绝缘子均压环的最大承载能力,也会使得均压环出现倾斜。这些情况将会导致绝缘子伞裙和芯棒的电场分布不均匀,增加了局部放电的风险。因此,对均压环故障的研究,尤其是绝缘子均压环断裂和倾斜的研究具有重要意义^[4-5]。

近年来国内外对均压环的故障进行了较多的研究,张凯等对某 330 kV 变电站隔离开关均压环断裂原因进行了分析,从结构、载荷和焊接方面分析均压环断裂的原因^[6]。秦睿等对甘肃河西地区多起均压环断裂的原因进行全面分析,通过金相检验和电镜端口的扫描结果给出断裂原因。得出由于局部疲劳撕裂,导致均压环断裂截面逐渐增加到全部断裂的结论^[7]。王益博等基于 Workbench 对绝缘子均压环上风载荷建模,计算出迎风面积和风压,提出均压环连接板和环体处应力最大,进而由裂纹扩张最终发生均压环断裂^[8]。戴勇东等对输电线路均压环采用金字塔网络(CPN)和文本检测(TB),定量计算出均压环的位置信息和倾斜角度^[9]。这些故障导致复合绝缘子串发生闪络,通过有限元分析法对整个复合绝缘子串的电场分布进行研究,这对于均压环的结构优化与防止局部放电有重要意义。

文中使用 ANSYS MEXWELL 软件,建立了 110 kV 复合绝缘子的物理模型,采用有限元法进行仿真分析,对复合绝缘子均压环不同程度的断裂和倾斜进行电场分布的研究^[10]。

1 复合绝缘子模型建立

1.1 110 kV 仿真模型的建立

以 FXB3-110/100 复合绝缘子作为研究对象,复合绝缘子由高低压侧金具、伞裙、芯棒、均压环构成,包括 17 片伞裙组成,其详细的技术参数见表 1。

表 1 FXB3-110/100 复合绝缘子参数

Table 1 Parameters of FXB3-110/100 composite insulator

参数	数值
额定电压/kV	110
结构高度/mm	1 180
爬电距离/mm	3 150
大伞直径/mm	160
小伞直径/mm	120
额定机械负荷/kN	100

在 ANSYS MAXWELL 中建立复合绝缘子的二维模型,通过沿 Z 轴旋转得到 1:1 的 110 kV 复合绝缘子的三维物理模型。其二维结构图见图 1。

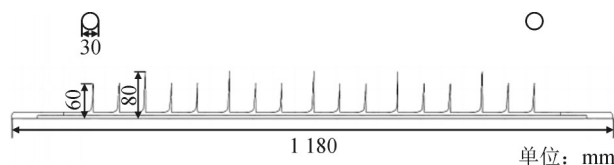


图 1 复合绝缘子二维界面图

Fig. 1 Two-dimensional cross-section of a composite insulator

将复合绝缘子二维模型导入 MAXWELL 三维场中进行模拟仿真,并把复合绝缘子三维物理模型为中心,建立一个半径 2 000 mm 的球形空气域。

1.2 数值模拟

复合绝缘子由芯棒、伞裙、高低压侧均压环(金具)构成。绝缘子的外部环境给定为空气,各部位的相对介电常数见表 2。

表 2 相对介电常数

Table 2 Relative permittivity

材料	芯棒	伞裙	金具	空气
ϵ_m	5.5	3.0	1.0×10^{12}	1.0

在 MAXWELL 中对复合绝缘子进行网格划分见图 2,为了保证仿真结果的精度和准确性,将曲面近似等级调高,用较多的曲面片来近似曲面,最小的离散单元仅为 3 mm,网格数量达到 6 882 829 个,能够更精确的捕捉模型中的细节和特征^[11-15]。

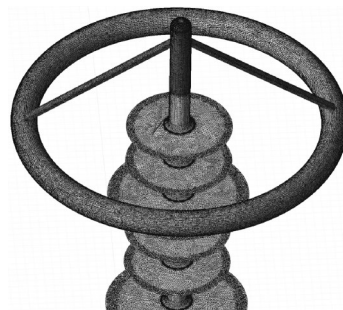


图 2 复合绝缘子网格划分

Fig. 2 Mesh division of composite insulators

1.3 复合绝缘子电场的数学模型

$$\nabla \times E = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \epsilon E = \rho \tag{2}$$

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon \tag{3}$$

式(1)-(3)中： E 为电场强度； ρ 为自由电荷密度， C/m^3 ； ϵ 为相对介电常数； φ 为电位函数。

2 复合绝缘子电场分布的研究

假设复合绝缘子串清洁且忽略空间电荷对绝缘子串电场分布的影响,对复合绝缘子串进行仿真计算^[16]。在高压端的金具和均压环施加最大幅值为110 kV电压,低压段处金具和均压环激励设为0 kV,得到复合绝缘子电压分布见图3。

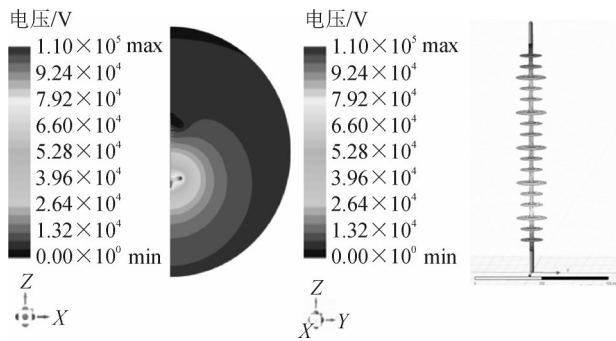


图3 110 kV复合绝缘子电压分布图

Fig. 3 110 kV composite insulator voltage distribution diagram

选取复合绝缘子沿面距离作为伞裙表面电场的分布,同时选取芯棒中心作为绝缘子内部电场的

分布,得到正常状态下绝缘子表面电场分布见图4。

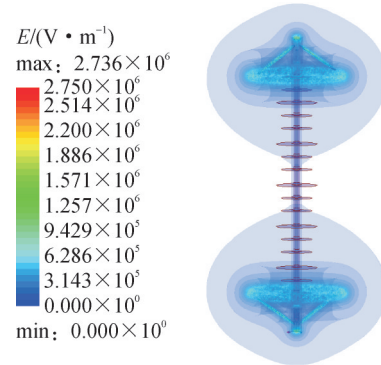


图4 正常状态下绝缘子表面电场分布

Fig. 4 Distribution of electric field on insulator surface under normal condition

从仿真结果可以得出,正常状态下的绝缘子在高低压侧会分别形成一个球形电场,由绝缘子两端向中心收缩。电场强度表现为由高压侧向绝缘子中心降低,又沿着伞裙中部向低压侧逐渐升高的过程,最大处电场强度可达2 736 kV/m。

2.1 均压环断裂电场分析

针对实际情况出现过的均压环支撑筋的断裂以及焊口处的断裂导致均压环脱落,通过MAXWELL分别对高压侧和低压侧均压环建模,建立不同破损程度与不同位置的均压环缺陷模型,并对复合绝缘子均压环缺陷模型进行分析,得到缺陷沿面距离和干弧距离的电位与电场强度分布情况。高低压侧电场情况见图5。

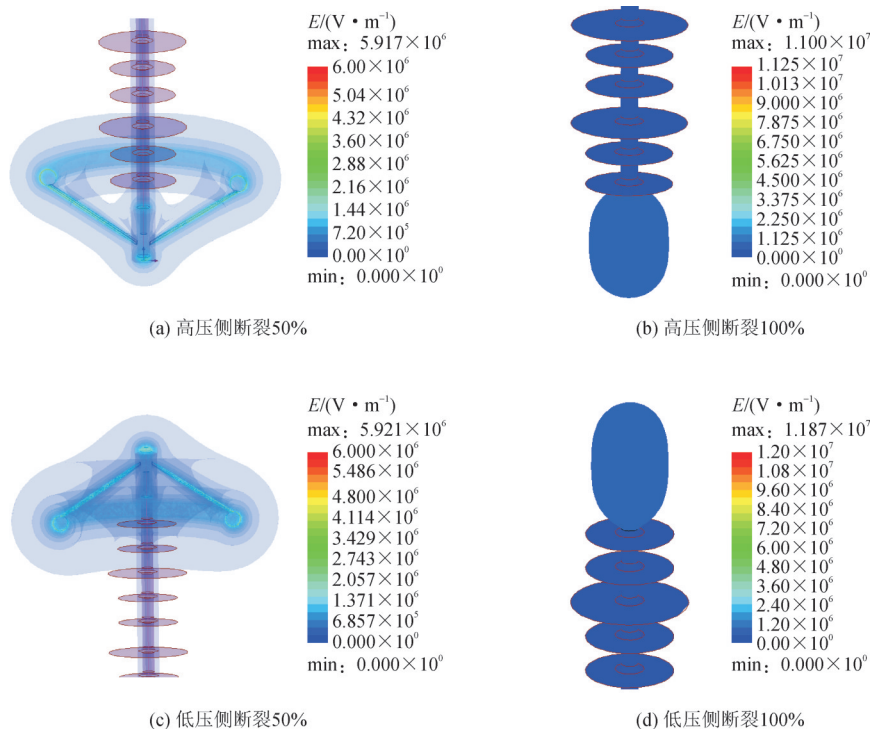


图5 高压侧与低压侧不同程度缺失电场分布

Fig. 5 Varying degrees of missing electric field distribution on the HV and LV side

由图5仿真结果可知,高压侧与低压侧出现较大场强,电场强度沿伞面迅速下降,在各伞裙与芯棒链接处发生电场畸变。当高压侧均压环缺失50%时最大电场为5 917 kV/m,而高压侧均压环脱落时最大电场可达11 000 kV/m。当低压侧均压环缺失50%时最大电场为5 921 kV/m,低压侧均压环脱落时最大电场可达11 870 kV/m。相比于正常状态的最大场强,分别增大了216%、402%、216.4%、433%。

最大场强可以在一定程度上反应电场畸变对放电产生的影响,如果需要更加准确的结果,就需要对沿面距离和干弧距离的电场和电位进行分析。考虑到均压环缺陷使得绝缘子串分布并不对称,这里取沿大小伞面每旋转 90° 得到一条沿面路径,取4条路径的电场和电位的平均值为沿面路径的电场和电位分布曲线^[17-20]。沿面路径的绝缘子均压环缺陷电场和电位分别见图6、7。

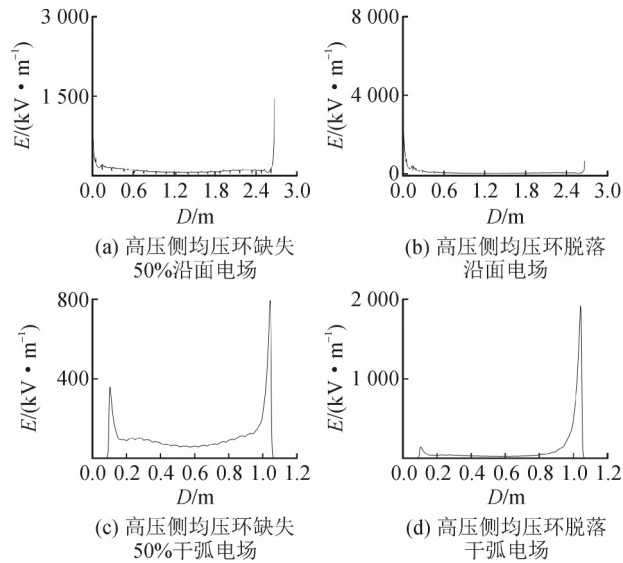


图6 高压侧均压环不同程度缺失电场分布

Fig. 6 Electric field distribution in the grading ring on the high-voltage side with different degrees of deficiency

由图6可知,高压侧不同程度缺失的沿面电场与干弧电场有相似性,高低侧压均出现较高场强,由高压侧沿面迅速下降,每个伞裙处由上表面到下表面场强逐渐减小,经过下一个伞裙又再次升高,形成循环。当高压侧均压环缺失达到50%时,高压侧最高处场强为3 000 kV/m,集中在高压侧金具处和绝缘子串前端,低压侧场强也达到了1 300 kV/m。当高压侧全部脱落时影响更为剧烈,高压侧场强达到8 000 kV/m,低压侧场强骤降,说明高压侧均压环全部脱落对高低压侧场强均有较强影响,低压侧的电场更加向高压侧集中。干弧电场在正常状态下应该由高压侧向低压侧整体呈现高一低一高的趋

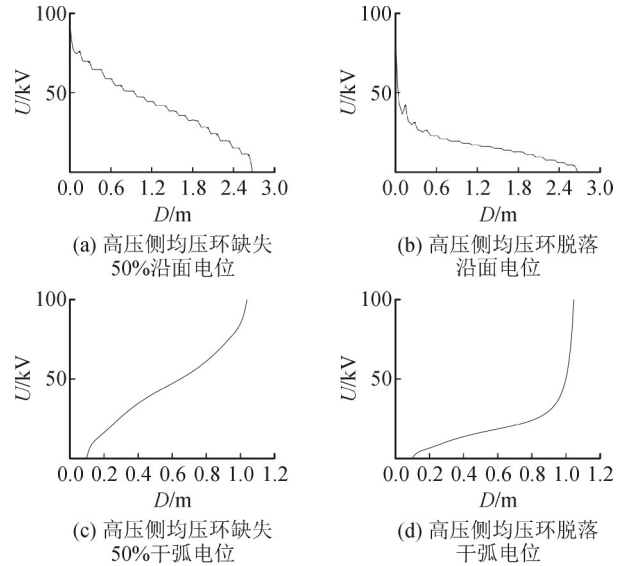


图7 高压侧均压环不同程度缺失电位分布

Fig. 7 Potential distribution in the grading ring on the high-voltage side with different degrees of deficiency

势。破损和脱落均使低压侧场强骤降,高压侧剧烈增加^[21-23]。且脱落对干弧电场的绝缘子串影响更多,电场畸变更为严重,尤其在绝缘子串中部基本降为0。

由图7可知,对于高压侧均压环缺失50%时,电位在整串绝缘子上整体逐级下降的趋势,但在前3片还是存在沿面电位会升高的情况。当高压侧均压环脱落时,在复合绝缘子串前端电位迅速下降,第一片绝缘子电位约为47 kV,之后每片电位逐渐降低。在整串前4.4%的泄露距离承担了约60%的电压降,此时电位分布极不均匀,加速了绝缘子串前部老化程度。干弧电位也表现出相似的特性,高压侧均压环脱落相比于部分缺失,前1/6处承担了约70%的电压降,而整个中后段只分得16%的电压降,同样不利于电压的均匀分布。

低压侧均压环不同程度缺失电场分布见图8。在图8中当低压侧均压环50%缺失时,高压侧沿面电场最大为1 500 kV/m,低压侧沿面电场峰值可达3 500 kV/m,相比高压侧增大2.33倍。而低压侧均压环脱落时与高压侧均压环脱落表现相同,分别在低/高压侧达到最大场强8 000 kV/m。均压环结构的变化使得低压侧电场出现锯齿状的畸变,电场振动幅度增大。干弧电场低压侧均压环的缺失和脱落与高压侧的情况基本对称,产生的最大场强也基本一致,均出现在低/高压侧两端。而对于同样破损程度的均压环,低压侧破损的沿面场强幅值要比高压侧破损的约增加17%。

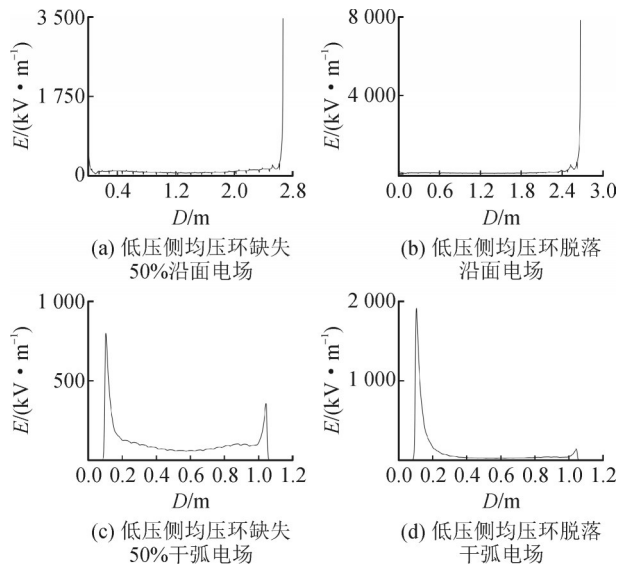


图8 低压侧均压环不同程度缺失电场分布

Fig. 8 Potential distribution in the grading ring on the low-voltage side with different degrees of deficiency

低压侧均压环不同程度缺失电位分布见图9。由图9可知,低压侧均压环缺失50%时电位由高压侧均匀下降,在靠近低压侧时出现锯齿状波形,靠近低压侧端4%的泄漏距离承担了26%的电压降。当低压侧均压环脱落时现象更为明显,高压侧和中部每片绝缘子电位继续增加,导致低压侧电位剧烈集中,前2.7%的泄漏距离分得60%电压降。干弧电位在低压侧均压环部分缺失影响较小,电位降落相对均匀,而全部脱落时低压侧电位骤降,靠近低压侧14%的距离的占整串电位的60%,严重影响电位的均匀分布。

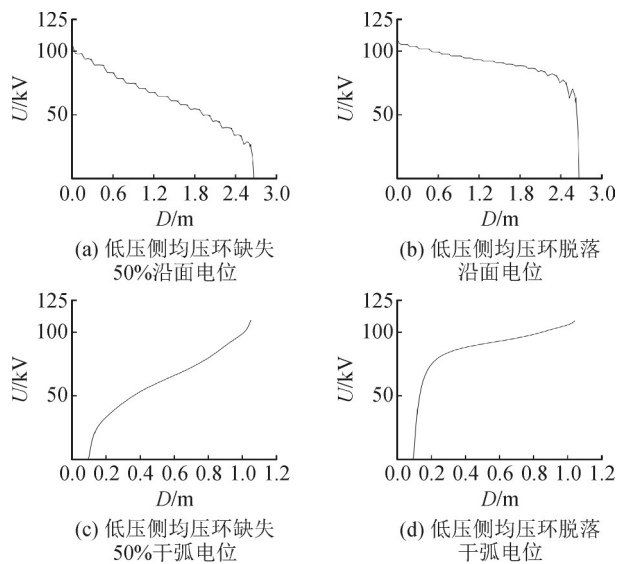


图9 低压侧均压环不同程度缺失电位分布

Fig. 9 Potential distribution in the grading ring on the low-voltage side with different degrees of deficiency

双侧均压环脱落电场、电位分布见图10、11。

当高低压侧的均压环均出现脱落的情况,此时复合绝缘子串无论是沿面电场还是干弧电场均产生较大的场强,沿面电场的高压侧电场强度为4000 kV/m,而低压侧达到了5228 kV/m。干弧电场则是双侧都达到了1146 kV/m。可见双侧均压环的脱落相较于均压环单一破损,沿面电场并不会使电场向一侧剧烈集中。虽然峰值相较于单侧的破损降低但在复合绝缘子串两侧的电场强度仍然较大。而在双侧均压环脱落时沿面电位与干弧电位均集中在复合绝缘子串两端,在高低压侧两端4%的距离承担了38%的压降。

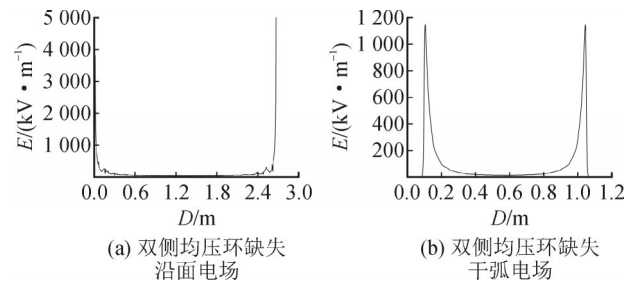


图10 双侧均压环脱落电场分布

Fig. 10 Distribution of electric field off the grading ring on the HV side and LV side

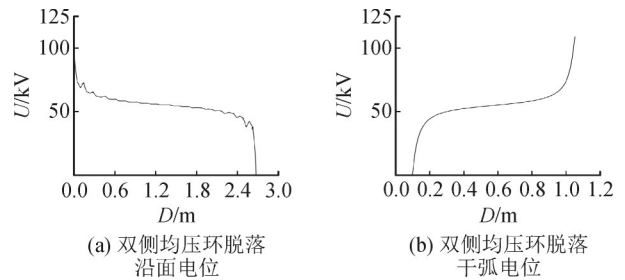


图11 双侧均压环脱落电位分布

Fig. 11 Potential distribution of grading ring shedding on HV side and LV side

图12、13反应出高低压侧均压环不同程度的缺失时复合绝缘子串伞裙电场的峰值。从图12、13中可以看出,不论高压侧还是低压侧的均压环缺失,绝缘子串上伞裙电场最值整体呈上升趋势。当缺失程度增加,伞裙电场的最值随之增大,且电场峰值的变化速率加剧,电场畸变严重。低压侧的缺失时相比于高压侧均压环缺失伞裙电场变化更为严重,在缺失程度到达90%后更为强烈。

2.2 均压环倾斜电场分析

为了能更好的还原复合绝缘子均压环的倾斜状态,考虑到长期暴露于自然条件的复合绝缘子的自然老化与外力冲击,将复合绝缘子均压环倾斜15°、30°、45°三种角度,分别对应低角度、中角度、高角度倾斜进行建模仿真见图14。

同时考虑到杆塔倾斜、风载荷和冰载荷超出最

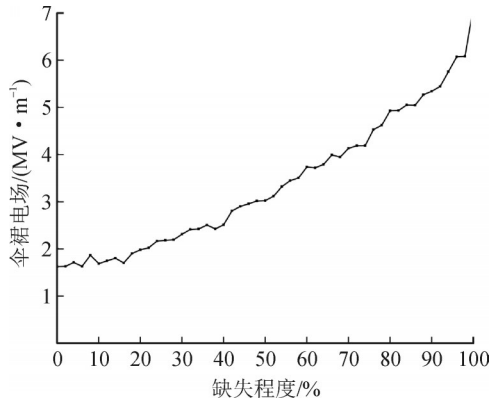


图 12 高压侧均压环不同程度缺失伞裙电场的最大值
Fig. 12 Maximum value of the electric field in the umbrella skirt with varying degrees of missing grading rings on the high voltage side

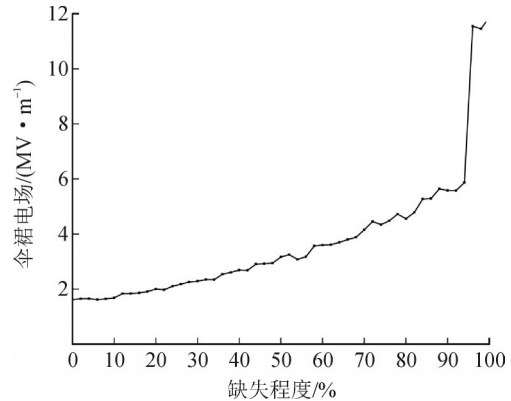


图 13 低压侧均压环不同程度缺失伞裙电场的最大值
Fig. 13 Maximum value of the electric field in the umbrella skirt with varying degrees of missing grading rings on the low voltage side

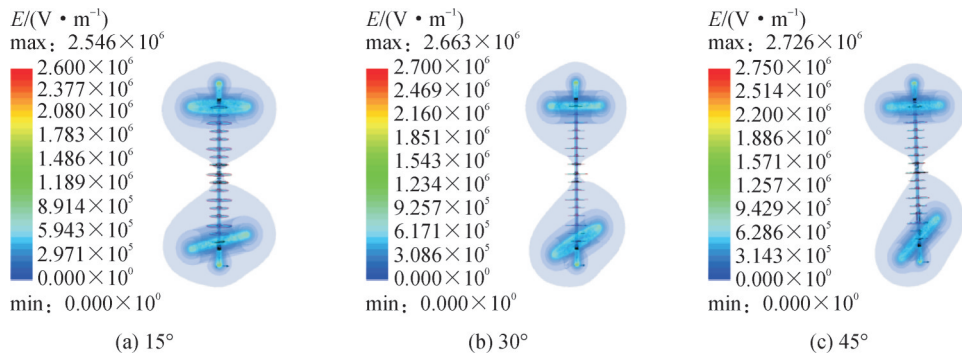


图 14 高压侧均压环不同程度倾斜电场图

Fig. 14 Electric field diagrams with different degrees of inclination of the grading ring on the HV side

大承载能力导致高低侧均压环产生同侧倾斜, 对同侧均压环倾斜模型进行分析。

沿面电场图像见图 15, 低角度、中度和高角度均压环倾斜的沿面电场的变化集中在整个复合绝缘子串的前中段。从高压侧端开始绝缘子随着倾角增大电场强度降低, 第 2 片处高角度均压环倾斜的沿面电场开始严重畸变, 此时随着角度增加沿面电场激增, 在第 3 片伞面处差值达到最大, 此时低角度、中角度和高角度倾斜的场强分别为正常状态场强的 1.03、1.13、1.4 倍, 直到靠近绝缘子串的中段电场逐渐恢复正常。可见, 低角度的倾斜几乎对绝缘子电场没有影响, 而中、高角度电场变化明显。且随着角度提升, 主要使电场剧烈的畸变向绝缘子串的中部集中, 伞裙中部沿面电场的激增加大了复合绝缘子串局部放电的风险^[24-25]。而从图 16 可知, 在倾斜角度增加后干弧距离的电场变化较小, 具体也表现在绝缘子中部电场小幅增加。由此可见, 高压侧均压环倾斜主要是对复合绝缘子串沿面电场产生影响。

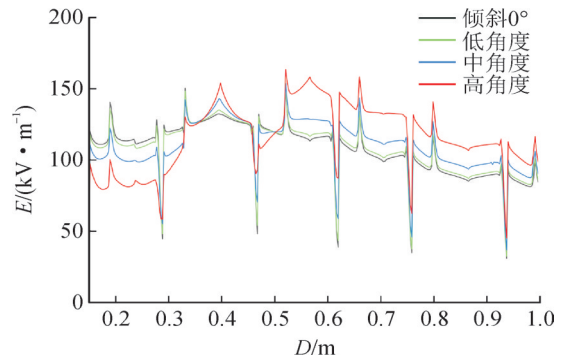


图 15 高压侧均压环不同程度倾斜沿面电场

Fig. 15 Electric field along the surface with different degrees of inclination of the grading ring on the high-voltage side

对于低压侧均压环倾斜的沿面、干弧电场见图 17、18, 不同倾斜角度的沿面电场从 1.5 m 处开始明显变化, 即在复合绝缘子中心处开始变化, 随着倾角的增加电场开始增大并出现较为严重的畸变, 在第 12 片处场强差值最大, 低角度、中角度、高角度的均压环倾斜在该点处场强分别为正常状态下场强的 1.03、1.14、1.40 倍。在干弧电场上也同样如此, 在复合绝缘子串两端电场没有发生畸变, 不同倾角

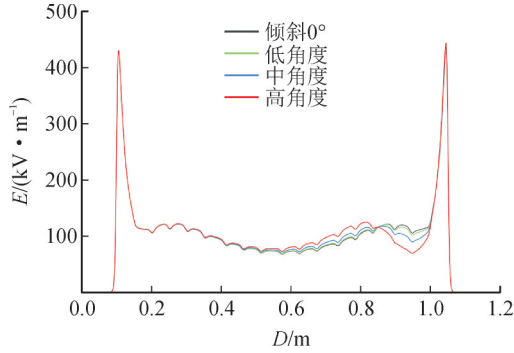


图16 高压侧均压环不同程度倾斜干弧电场

Fig. 16 High-voltage side voltage grading ring with different degrees of inclination dry arc electric field

的电场基本重合。低压侧均压环不同程度的倾斜与高压侧表现出相同的特性及差值,在靠近低压侧处沿面场强变化较小,倾角的增大导致绝缘子串中部的场强激增。显然,对于复合绝缘子均压环的倾斜而言,低角度的倾斜影响较小,而中高角度倾斜对电场的影响主要向绝缘子串中部集中而并非高低压两端。

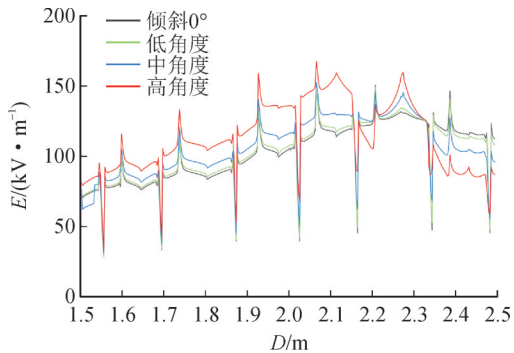


图17 低压侧均压环不同程度倾斜沿面电场

Fig. 17 Low-voltage side grading ring with different degrees of inclination along the surface electric field

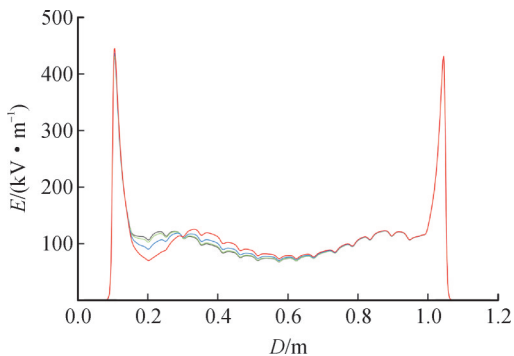
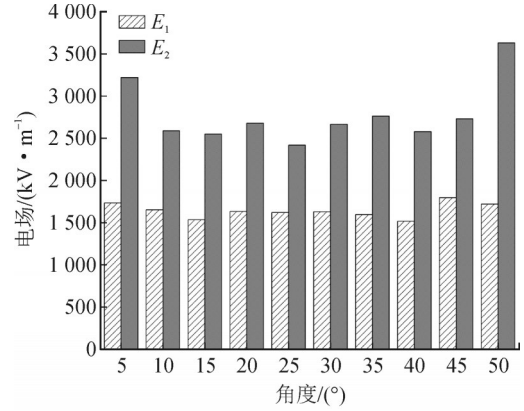


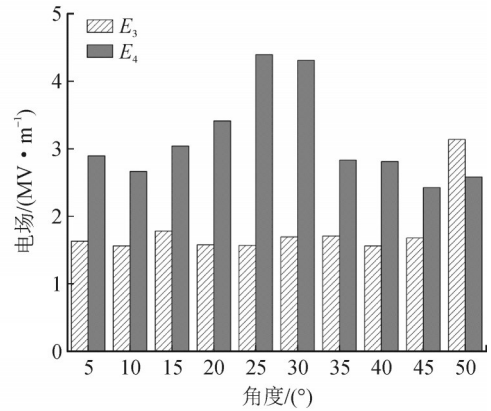
图18 低压侧均压环不同程度倾斜干弧电场

Fig. 18 Low-voltage side voltage grading ring with different degrees of inclination dry arc electric field

不同程度的高低压侧均压环倾斜的电场见图19,其中 E_1 、 E_3 为复合绝缘子串伞裙上场强最值, E_2 、 E_4 为复合绝缘子串场强最值。



(a) 高压侧均压环倾斜电场分布



(b) 低压侧均压环倾斜电场分布

图19 两侧均压环不同程度倾斜电场分布

Fig. 19 Electric field distribution with different degrees of inclination of the grading ring on the HV side and LV side

考虑到复合绝缘子均压环长期所处的环境,高压侧与低压侧均压环往往会同时受到相同条件的风载荷与冰载荷,而超出最大承载能力后高、低压两侧均压环会出现以同一角度同向倾斜,所以对两侧均压环同侧倾斜的电场研究有重要意义。同侧均压环不同程度倾斜电场分布见图20、21。

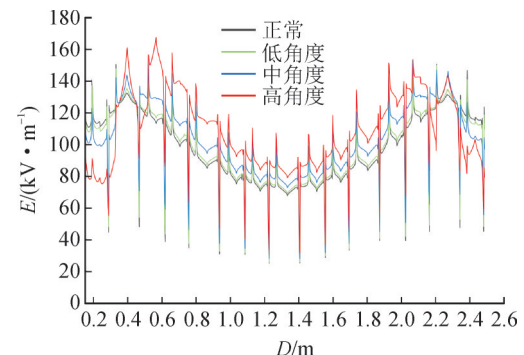


图20 均压环同向不同程度倾斜沿面电场

Fig. 20 The homogeneous pressure ring is tilted to different degrees in the same direction along the surface electric field

从图19结果得出,均压环不同程度的同侧倾斜的沿面电场整体分布仍满足高压侧向低压侧场强

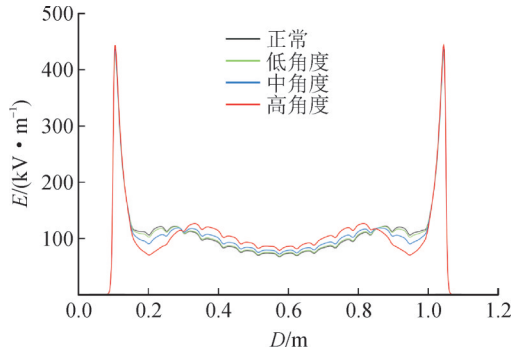


图 21 均压环同向不同程度倾斜干弧电场

Fig. 21 Pressure grading ring with different degrees of tilt in the same direction dry arc path electricity

呈现高一低一高的过程。与单一均压环倾斜结果不同的是,复合绝缘子均压环的同向倾斜并不完全是场强向绝缘子串中部集中,随着倾斜角度的增加在高压侧的绝缘子串电场畸变严重,对低压侧影响较小。电场第3片至第6片电场畸变最严重且在第3片处差值达到最大。低角度、中角度、高角度的均压环倾斜在该点处场强分别为正常状态下场强的1.03、1.12、1.43倍。而从图20可得出干弧路径场强变化较小,场强的增大发生在中部但并不剧烈。

3 结论

1)复合绝缘子均压环对整个绝缘子串的电场与电位都有严重影响。不论是高压侧的还是低压侧的均压环的破损和缺失,都会使该侧的场强激增而对侧的场强骤降,当高低压侧破损程度均为50%时,低压侧均压环场强的幅值高出高压侧17%。随着破损程度的增加这种情况会逐渐加剧。

2)不同程度的均压环破损或脱落使得电位向两端集中,当均压环脱落时,高低压侧前3%~5%的泄漏距离承担了60%的电压降,增加了局部放电的风险。

3)对于复合绝缘子均压环的倾斜而言,低角度的倾斜影响较小,而中高角度倾斜对电场的影响主要向绝缘子串中部集中而并非高低压两端。高角度的均压环倾斜会使场强增大40%左右。

4)发生绝缘子均压环的同侧倾斜时,电场向整个中部集中,高压侧低压侧两端的电场影响较小。沿面电场在整个绝缘子串的前中段发生畸变,随着倾斜程度增加畸变越剧烈。

参考文献:

[1] 刘悦,黄新波,刘天娇.基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(3):167-177.

LIU Yue, HUANG Xinbo, LIU Tianjiao. Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 167-177.

[2] 绳飞,曹留,刘玉龙,等.基于改进Mask R-CNN的复合绝缘子憎水性状态评估方法[J].电测与仪表,2025,62(4):73-80. SHENG Fei, CAO Liu, LIU Yulong, et al. Evaluation method of hydrophobicity of composite insulators based on improved Mask R-CNN[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(4): 73-80.

[3] 谢静,肖韩,刘志坚,等.基于多模态改进残差网络的输电线路绝缘子覆冰类型识别方法[J].电力系统保护与控制,2026,54(1):130-142. XIE Jing, XIAO Han, LIU Zhijian, et al. A multimodal enhanced ResNet-based method for identifying icing type on transmission line insulators[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(1): 130-142.

[4] 张方,韩俊雅.1000 kV特高压交流输电线路耐张串电位分布计算及均压环优化设计[J].智慧电力,2008,36(8):27-30. ZHANG Fang, HAN Junya. Voltage distribution calculation of tension strands and grading ring optimization design for 1000 kV UHVAC transmission line[J]. Smart Power, 2008, 36(8): 27-30.

[5] 乔新涵,张志劲,蒋正龙,等.10 kV复合避雷器组合绝缘子雷电冲击污闪特性及模型[J].电工技术学报,2024,39(21):6932-6940. QIAO Xinhan, ZHANG Zhijian, JIANG Zhenglong, et al. Lightning impulse pollution flashover characteristics and model of 10 kV composite arrester combined insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6932-6940.

[6] 张凯,冀东红,胡春江,等.某330 kV变电站隔离开关均压环断裂原因分析与建议[J].电工技术,2014(8):52-53. ZHANG Kai, JI Donghong, HU Chunjiang, et al. Analysis and suggestions on the causes of rupture of grading ring of a 330 kV substation disconnecting switch[J]. Electric Engineering, 2014(8): 52-53.

[7] 秦睿,高健,严丽,等.一起均压环断裂故障的分析与处理[J].高压电器,2014,50(7):117-122. QIN Rui, GAO Jian, YAN Li, et al. Dealing with a grading ring fracture failure[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 117-122.

[8] 王益博,杨乐,孟忠,等.基于ANSYS Workbench的均压环断裂分析[J].新技术新工艺,2018(4):67-69. WANG Yibo, YANG Le, MENG Zhong, et al. Grading ring fracture analysis based on ANSYS Workbench[J]. New Technology & New Process, 2018(4): 67-69.

[9] 戴永东,蒋中军,王茂飞,等.基于深度学习的输电线路均压环倾斜识别[J].自动化仪表,2022,43(9):106-110. DAI Yongdong, JIANG Zhongjun, WANG Maofei, et al. Deep learning based transmission line mean-voltage ring tilt identification[J]. Process Automation Instrumentation, 2022, 43(9): 106-110.

[10] 陈蔚,黎卫国,欣振宇,等. GIL三支柱绝缘子电场仿真与表面电荷测量[J].高压电器,2021,57(11):42-50. CHEN Wei, LI Weiguo, XIN Zhenyu, et al. Electric field simulation and surface charge measurement of tri-post insulator in

- GH[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 42-50.
- [11] 李刚, 李彦哲, 李宝学. 积雪腕臂绝缘子电场有限元仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 209-216.
LI Gang, LI Yanzhe, LI Baoxue. Electric field distribution characteristics of snow-covered overhead lines cantilever insulator based on finite element method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 209-216.
- [12] 孙庆峰, 华正轩, 梅简, 等. 高压支柱瓷绝缘子异常发热原因分析及预防措施[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 232-236.
SUN Qingfeng, HUA Zhengxuan, MEI Jian, et al. Analysis on the abnormal heating of high voltage post insulator with ceramic material and preventive measures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 232-236.
- [13] 张志劲, 姬雅晴, 许军, 等. 沿海台风环境复合绝缘子风偏特性及修正[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2977-2985.
ZHANG Zhijin, JI Yaqing, XU Jun, et al. Wind deflection characteristics and correction of composite insulator in coastal typhoon environment[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2977-2985.
- [14] 周吉刚, 李希元, 徐中凯, 等. 基于有限元的瓷绝缘子劣化对输电线路绝缘子串轴向电场分布影响研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(10): 79-83.
ZHOU Jigang, LI Xiyuan, XU Zhongkai, et al. Influence of porcelain insulator deterioration on axial electric field distribution of transmission line insulator string based on finite element method[J]. Insulating Materials, 2021, 54(10): 79-83.
- [15] 王思华, 陈龙, 王军军, 等. 复合绝缘子伞套老化状态模糊综合评估[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 156-165.
WANG Sihua, CHEN Long, WANG Junjun, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of aging state of silicone rubber sheds of composite insulators[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 156-165.
- [16] 罗奕, 翟少磊, 肖勇, 等. 基于SPRGA遗传算法的高压直流分压器均压环结构优化设计[J]. 武汉大学学报, 2022, 55(12): 1256-1262.
LUO Yi, ZHAI Shaolei, XIAO Yong, et al. Optimization design of grading ring structure of HVDC voltage divider based on SPRGA[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(12): 1256-1262.
- [17] 魏远, 张欢畅, 黄正勇. 110 kV 覆雪绝缘子串电场有限元仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 68-73.
WEI Yuan, ZHANG Huanchang, HUANG Zhengyong. Finite element simulation of electric field of 110 kV snow-covered insulators string[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 68-73.
- [18] 吕玉坤, 王佳文, 宋庆壮, 等. 水珠对复合绝缘子表面电场畸变特性的影响[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1201-1207.
LYU Yukun, WANG Jiawen, SONG Qingzhuang, et al. Effect of water drop on electric field distortion of composite insulator[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1201-1207.
- [19] 孙传铭, 张作钦, 范超, 等. 风沙环境下绝缘子闪络特性及机理研究[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 182-188.
SUN Chuanming, ZHANG Zuoqin, FAN Chao, et al. Study on flashover characteristics and mechanism of insulator in wind-sand environment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 182-188.
- [20] 刘映龙, 李如锋, 马飞林, 等. 均压环对复合绝缘子电场分布的影响分析[J]. 智慧电力, 2013, 41(8): 88-90.
LIU Yinglong, LI Rufeng, MA Feilin, et al. Probe into effect of grading ring on electric field distribution of composite insulator[J]. Smart Power, 2013, 41(8): 88-90.
- [21] 胡琦, 李庆民, 刘智鹏, 等. 基于表层梯度电导调控的直流三支柱绝缘子界面电场优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1856-1865.
HU Qi, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Interfacial electric field optimization of DC tri-post insulator based on gradient surface conductance regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1856-1865.
- [22] 刘洪吉, 耿三平, 王军, 等. 特高压交流输电线路瓷绝缘子劣化分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 159-164.
LIU Hongji, GENG Sanping, WANG Jun, et al. Aging analysis of porcelain insulators used in UHV AC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 159-164.
- [23] 曾磊磊, 张宇, 李唐兵, 等. 复合绝缘子芯棒发热的热传导特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 219-224.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, LI Tangbing, et al. Study on heat conduction characteristics of FRP rod heating of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 219-224.
- [24] 张东东, 刘锦, 黄宵宁, 等. 基于空间电场的复合绝缘子非接触式覆冰监测方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(4): 99-106.
ZHANG Dongdong, LIU Jin, HUANG Xiaoning, et al. Non-contact icing monitoring method for composite insulators based on spatial electric field[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(4): 99-106.
- [25] 王刚, 张鹏程, 张辉. 伞裙破损对双串复合绝缘子电场分布影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 165-173.
WANG Gang, ZHANG Pengcheng, ZHANG Hui. Influence of umbrella skirt damage on electric field distribution of double-string composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 165-173.

左立昕(1999—), 男, 硕士, 主要研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: zlx2969@stu.cqut.edu.cn)。

余成波(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为信息获取与处理技术、远程测试与控制技术(无线传感网络)及电气设备物联网技术(通信作者)(E-mail: yuchengbo@cqut.edu.cn)。