

多种布设方式下交流 220 kV 线路瓷绝缘子劣化判别的仿真与实测研究

刘 嵘¹, 戴建强², 李 珊², 赵 龙², 林 建², 刘 洋², 王 浩³, 刘学忠³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网山东省电力公司临沂供电公司, 山东 临沂 276000; 3. 西安交通大学 电工材料电气绝缘全国重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:为提高线路瓷质绝缘子劣化带电检测的准确性,本文研究了布设方式和劣化程度对高压交流绝缘子串电压分布特征的影响。首先,建立交流 220 kV 瓷绝缘子串在不同布设方式下单电压分布的有限元仿真计算模型,并仿真分析绝缘子串电压分布的特征。然后,结合实际测量得到的山东省交流 220 kV 输电线路绝缘子串电压分布,验证仿真计算结果与实测结果的一致性。结果表明:输电电路杆塔塔型、绝缘子串片数及布置方式、劣化绝缘子位置及劣化程度等因素对绝缘子串电压分布特征及劣化判别有较大影响,其中不同塔型最大分布电压差可达到 35%。不同布置方式最大分布电压差可达到 18%,通过分布电压下降比例可判断不同位置绝缘子劣化情况。

关键词:线路瓷绝缘子;布设方式;劣化判别;电压分布

Simulation and measurement of deteriorated porcelain insulator discrimination for AC 220 kV transmission lines under multiple layout methods

LIU Rong¹, DAI Jianqiang², LI Shan², ZHAO Long²,
LIN Jian², LIU Yang², WANG Hao³, LIU Xuezhong³

(1. State Grid Shandong Electric Power Company Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Company Linyi Power Supply Company, Linyi 276000, China;
3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of live detection of line porcelain insulator degradation, the influences of layout methods and deterioration degree on the voltage distribution characteristics of high-voltage AC insulator strings were studied in this paper. Firstly, a finite element simulation calculation model with single voltage distribution of AC 220 kV porcelain insulator strings under different layout methods was established, and the voltage distribution characteristics of the insulator strings were simulated and analyzed. Then, combined with the actual measured voltage distribution of 220 kV AC transmission line insulator string in Shandong province, the consistency between simulation calculation and actual measurement was verified. The results show that the tower type of transmission circuit, the number and layout method of the insulator string, and the position and deterioration degree of the degraded insulator have great effects on the voltage distribution characteristics and deterioration discrimination of the insulator strings. Among them, the maximum distributed voltage difference of different tower types can reach 35%, and the maximum distributed voltage difference of different layout methods can reach 18%. The deterioration situation of insulators at different positions can be judged by the distribution voltage drop ratio.

Key words: line porcelain insulator; layout method; deterioration discrimination; voltage distribution

0 引言

在电力输电系统中,绝缘子承担着电气绝缘和机械支撑的关键作用,其性能的优劣是电力系统安

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520607220007)。

全运行的重要影响因素,对电力系统可靠性具有重要意义。其中瓷绝缘子作为一种常见且重要的绝缘子类型,被广泛应用于电力系统中。当瓷绝缘子串中存在零值或低值绝缘子时,整体爬电距离减小,闪络概率显著增加,严重时可能引发绝缘子炸

裂、掉串的事故^[1],对电网的安全稳定运行构成严重的威胁^[2]。近几年,线路瓷绝缘子断串事件时有发生,个别厂家的瓷绝缘子劣化率偏高,绝缘子带电检测的准确性至关重要。在实际检测中劣化判别是根据标准值进行的,然而不同布置方式下绝缘子串的分布电压存在较大差异,对所有情况下的绝缘子都使用同一标准进行劣化判定容易造成误判。同时随着机器人、无人机等智能带电检测设备的开发应用^[3]以及检测准确度要求的提高,多种布置方式下的电压分布数据对于劣化判别变得尤为重要。

目前国内外研究者对输电线路中绝缘子串的电压分布进行了广泛研究。其中,一些研究利用数值仿真和计算方法,通过建立绝缘子的等效电路模型来计算和分析绝缘子的电场分布情况^[4-6],但等效电路模型需要通过实测或仿真得到杂散电容和泄漏电导,工作量和结果误差都比较大;另一些研究则着重于改进劣化判别方法和优化算法。文献[7]提出了改变绝缘子中气隙区域大小模拟不同劣化程度的方法;文献[8]建立了多种因素影响下基于大数据分类与SVDD模型的500 kV劣化绝缘子判定模型,但未考虑绝缘子串布置方式的影响;文献[9]对220 kV猫头塔悬垂瓷绝缘子串的电场分布特性进行了仿真计算;文献[10]给出了特高压交流输电线路杆塔及相导体模型简化方法;文献[11]计算了杆塔横担的电位分布,但未考虑杆塔对绝缘子电压分布的影响。一些学者还对特定环境条件下绝缘子的电场分布做了研究,如不同劣化方式、不同污秽成分、不同环境湿度下绝缘子串的电场分布特性^[12-17],以及不同海拔下的仿真参数修正及绝缘子串电压分布^[18-19]。此外,针对非接触的电场检测法也有大量有限元仿真研究^[20-26],这些研究表明在不同情况下绝缘子串的电压分布有很大差异,杆塔类型、绝缘子串片数、绝缘子劣化情况等均会影响绝缘子的电压分布检测结果,若使用同一标准对绝缘子进行劣化判别会产生较大的误差。

虽然众多学者对绝缘子串电压分布进行了多方面的研究,但针对交流220 kV瓷绝缘子在多种布置方式下的劣化判别研究相对较少,对于不同环境条件和设备布置下的劣化特征了解不足。因此,本文通过仿真与实测相结合的方法,对交流220 kV瓷绝缘子在多种布置方式下的电压分布进行研究,为

绝缘子的劣化提供判别和评估依据,同时为电力系统的安全运行和可靠性提供支持和保障。

1 仿真模型与方法

依据山东省交流220 kV典型输电线路结构以及线路用XPW2-70型悬式瓷绝缘子(双伞型)的实际结构,在有限元软件COMSOL Multiphysics中搭建了交流220 kV线路耐张塔及双串瓷绝缘子的三维仿真计算模型。单片绝缘子模型剖面图如图1(a)所示,其中不同颜色分别代表钢帽(蓝色)、水泥粘合剂(灰色)、绝缘瓷件(橙色)、钢脚(绿色)。双串绝缘子与金具模型如图1(b)所示,包括金具、导线和绝缘子串等。从导线侧开始到横担侧的每片绝缘子依次编号为1~15。

在模型外设置了一个尺寸约为整体模型5倍的长方体空气域,并在该空气域外额外设置了一层无限元域来模拟无限远边界。此外,为了在不影响研究精度的情况下减少计算时间,本文采用子模型法对绝缘子串、杆塔和空气域部分分别建模,同时对各子模型采用不同尺度的四面体网格进行划分,尤

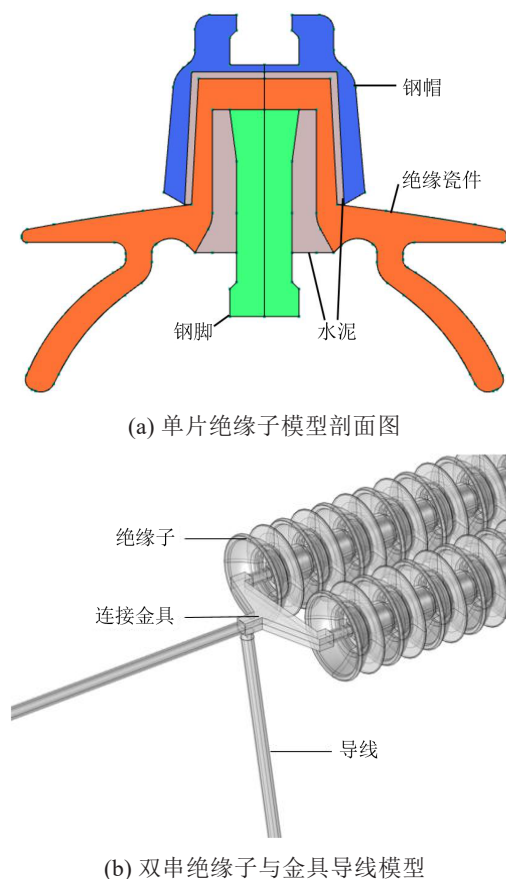


图1 绝缘子仿真计算模型图

Fig.1 The simulation calculation model diagrams of insulator

其对电场变化较大的绝缘子串头部、钢脚以及水泥层等区域进行极细划分。导线施加 220 kV 输电线路相电压有效值，杆塔接地。

杆塔选取了交流 220 kV 线路中常见的 3 种塔型：门字塔、干字塔和鼓型双回路塔。由于电磁屏蔽效应，杆塔内部不受外部电场的影响，可不做镂空处理；忽略防风偏绝缘子，以耐张型杆塔为例，整体仿真计算模型如图 2 所示。根据现场实测杆塔参数建立仿真模型，其中门字塔长度为 14 m，高度为 22.8 m，悬挂点高度为 20.2 m；干字塔长度 12 m，高度为 30 m，悬挂点高度为 20.5 m；鼓型塔长度为 7.8 m，高度为 24.6 m，悬挂点高度为 13.6 m。

2 绝缘子串电压分布影响因素分析

2.1 杆塔塔型的影响

对 220 kV 交流线路中常见的 3 种杆塔塔型仿真计算其边相/下相绝缘子串电压分布，对于某片绝缘子取钢帽与钢脚的电压差作为该绝缘子的电压分布，不同塔型的绝缘子串电压分布如图 3 所示。由图 3 可知，不同塔型导线侧绝缘子电压分布较为接近，电压分布受杆塔塔型影响最为显著的是最靠近横担的 15 号绝缘子，其中门字塔 15 号绝缘子承担的电压为 6.9 kV；鼓型塔 15 号绝缘子承担的电压为 8.5 kV，比门字塔提高了 23%；干字塔 15 号绝缘子承担的电压为 9.3 kV，比门字塔提高了 35%。

正常绝缘子串的电压分布由极间电容 C_{0i} 、对地杂散电容 C_{gi} 、对导线杂散电容 C_{li} 决定，如图 4 所示。由于横担侧绝缘子与杆塔之间的杂散电容 C_{gi} 受塔型影响更大，横担侧绝缘子电压分布受塔型的影响较大。正常情况下绝缘子串的绝缘电阻很大，电压分布主要受绝缘子极间电容 C_{0i} 的影响，而 C_{gi} 越大，第 $(i+1)$ 片绝缘子与杆塔间总电容就越大，其总电抗值与分布电压值就越小。仿真计算得到 3 种塔型靠近横担侧 3 片绝缘子与杆塔间的杂散电容如表 1 所示，该杂散电容是影响不同塔型电压分布的关键因素。

依据电容计算公式 $C = \epsilon S / 4\pi kd$ ，当某片绝缘子与杆塔间距 d 不变时， C_{gi} 主要受该片绝缘子周围的杆塔面积 S 影响。在仿真过程中发现，随着计算半径增大，杂散电容增量逐渐减小，在本研究绝缘子串模型中，半径增大到 2 m 后杂散电容几乎不变，以绝缘子轴线一点为圆心取半径 1.5 m 圆与杆塔交集的面积为 S' 最能代表影响杂散电容的面积。计算得到干字塔的 S' 为 0.45 m²，鼓型塔的 S' 为 0.59 m²，门

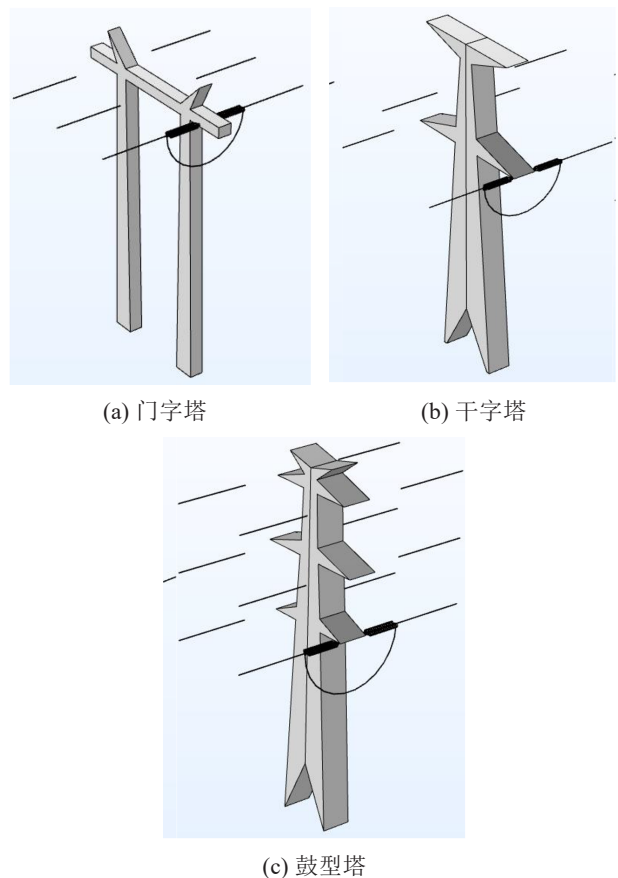


图 2 不同杆塔仿真计算模型

Fig.2 Simulation calculation models of different towers

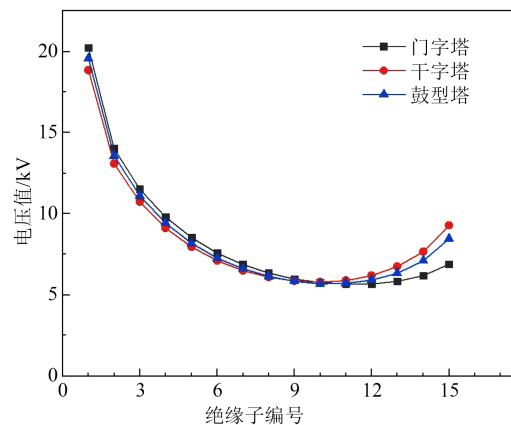


图 3 不同塔型下绝缘子串电压分布曲线

Fig.3 Voltage distribution curves of insulator strings under different tower types

字塔的 S' 为 2.85 m²。对比 S' 与表 1 中 C_{gi} 大小发现， S' 与横担侧的 C_{gi} 呈现很强的正相关性，前者是后者的主要影响因素，且前者越大，后者也越大，横担侧绝缘子分布电压越小。

2.2 绝缘子串布置方式的影响

直线杆塔绝缘子串是垂直布置的，而耐张杆塔绝缘子串大多是水平布置的，易受污秽和雨水影

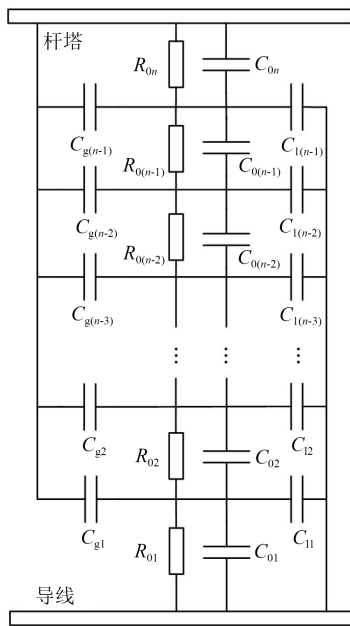


图4 绝缘子串的等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of insulator string

表1 横担侧3片绝缘子与杆塔间杂散电容

Table 1 Stray capacitance between the three insulators on the cross arm side and the tower

塔型	pF		
	C_{g14}	C_{g13}	C_{g12}
干字塔	2.12	1.74	1.52
鼓型塔	2.23	1.82	1.62
门字塔	2.65	2.16	1.91

响,而且承受着较大的机械拉力,其劣化问题不可忽视。根据线路常用的布置方式,对鼓型塔下相分别进行水平双串耐张绝缘子和垂悬单串绝缘子进行仿真,得到电压分布曲线如图5所示。

仿真表明,不同布置方式之间电压分布的差异较大,取最大和最小分布电压之比为不均匀系数,得到悬垂串的不均匀系数为4.00,水平串的不均匀系数为3.44。由图5可以看出,两种布置方式电压分布的差异在中间较小,在两端较大,且越靠近两端绝缘子,电压分布差异越大。垂悬串绝缘子在导线侧承受电压较高,其中1号绝缘子分布电压较水平串1号绝缘子高8.8%,即1.7 kV;在横担侧承受电压较低,其中15号绝缘子分布电压较水平串15号绝缘子低18.8%,即1.6 kV。因此在线路检测中对于水平串和垂悬串不宜使用同一标准进行劣化判别。

2.3 绝缘子串片数的影响

由DL/T 626—2015《劣化悬式绝缘子检测规

程》规范性附录^[27]可知,35~500 kV 交流送电线路绝缘子串的片数中,220 kV 绝缘子串为12~14片,但目前线路调爬后的绝缘子型号与片数变动较大,在220 kV 线路设计中会根据实际需求决定绝缘子片数,如果原用XP-70型绝缘子变更为XWP2-70型绝缘子,其片数也会相应地增加到13~18片,很难套用之前的标准。以鼓型塔为例,仿真目前线路中最常见的15~17片绝缘子串的电电压分布情况,结果如图6所示。从图6可以看出,15、16、17片绝缘子串中最大分布电压分别为19.6、19.2、18.5 kV,最小分布电压分别为5.7、5.2、4.8 kV,取绝缘子串中最大分布电压与最小分布电压的比值为不均匀系数,得到15片绝缘子串的不均匀系数为3.44,16片绝缘子串的不均匀系数为3.69,17片绝缘子串的不均匀系数为3.85。可见,绝缘子片数对电压分布有较大的影响,绝缘子串片数越多,其电压分布越不均匀。

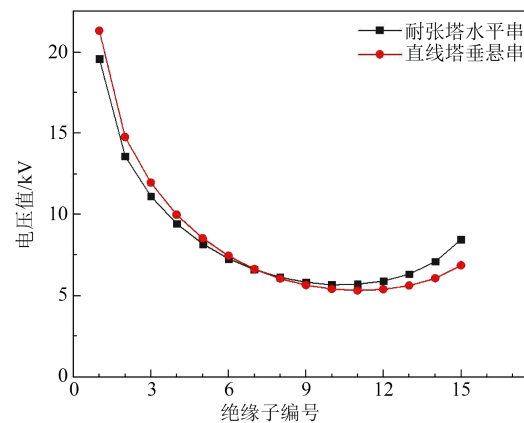


图5 绝缘子串不同布置方式下的电压分布曲线

Fig.5 Voltage distribution curves of insulator strings under different arrangements

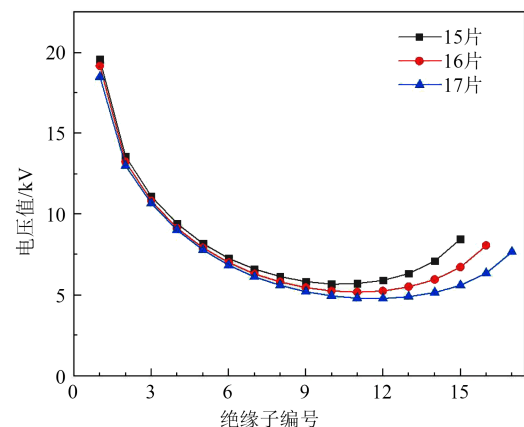


图6 不同片数绝缘子串的电电压分布曲线

Fig.6 Voltage distribution curves of different number of insulator strings

2.4 绝缘子串相位的影响

以鼓型塔为例,仿真计算了上、中、下相绝缘子串电压分布情况,结果如图7所示。从图7可以看出,同种塔型下不同相位绝缘子串电压分布差异不明显,中、下相之间第8片绝缘子电压差异最大,分别为6.1 kV、6.2 kV,最大差异仅1.6%;而最大电压差异出现在中、上两相15号绝缘子之间,分布电压分别为8.9 kV、8.5 kV,最大差异为4.7%。

2.5 不同劣化程度绝缘子的影响

根据DL/T 626—2015的相关规定,500 kV以下电压等级运行的绝缘子绝缘电阻低于300 M Ω 为低零值绝缘子。在测量时被测绝缘子电压值低于标准规定值50%或同时明显低于相邻两侧合格绝缘子的电压值,则判定为劣化绝缘子。为研究绝缘子不同劣化程度对绝缘子串电压分布的影响,分别将劣化绝缘子的绝缘电阻设置为0、30、50、100、150、300 M Ω ,以鼓型塔下相为例,仿真了不同位置不同程度的劣化绝缘子对绝缘子串电压分布的影响。

1号绝缘子不同程度劣化时的绝缘子串电压分布如图8所示。由图8可以看出,1号绝缘子劣化时,该绝缘子分布电压显著下降,相邻的绝缘子分布电压有较大幅度的升高,其他绝缘子的分布电压也有一定的升高,但升高比例往后依次减小,至靠近横担侧的绝缘子分布电压基本不变。1号绝缘子正常分布电压为19.6 kV,当其绝缘电阻值劣化至300 M Ω 时,根据判别标准可以判定其为低零值绝缘子,此时该绝缘子分布电压为16.3 kV,下降了16.8%;2号绝缘子分布电压升高最为明显,分布电压由正常值13.6 kV上升为14.3 kV,升高了5.1%;通过计算得到其他绝缘子分布电压与正常值的差别都小于2号绝缘子,变化不超过5%。1号绝缘子的绝缘电阻劣化至150 M Ω 时,该绝缘子的分布电压为14.0 kV,下降了28.6%;2号绝缘子的分布电压为15.0 kV,升高了10.1%。1号绝缘子的绝缘电阻劣化至100 M Ω 时,该绝缘子的分布电压为12.3 kV,下降了37.4%;2号绝缘子分布电压为15.4 kV,升高了13.3%。1号绝缘子的绝缘电阻劣化至50 M Ω 时,该绝缘子的分布电压为8.9 kV,下降了54.6%;2号绝缘子的分布电压为16.3 kV,升高了19.6%。1号绝缘子的绝缘电阻劣化至30 M Ω 时,该绝缘子的分布电压为6.6 kV,下降了66.2%;2号绝缘子的分布电压为16.8 kV,升高了23.8%。1号绝

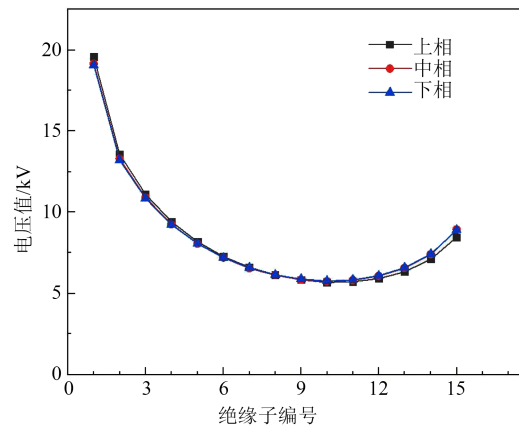


图7 相位对绝缘子串电压分布的影响

Fig.7 The influence of phase on the voltage distribution of insulator strings

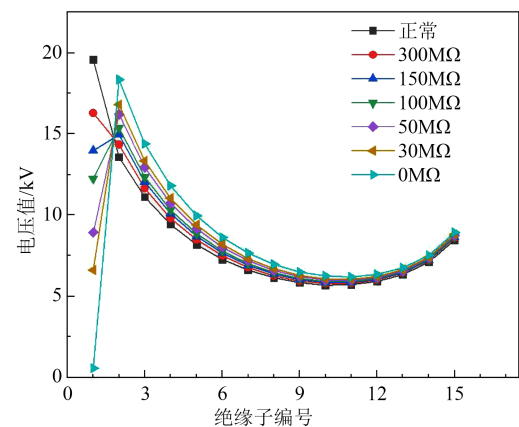


图8 1号绝缘子不同程度劣化时绝缘子串电压分布
Fig.8 The voltage distribution of insulator string when the No.1 insulator deterioration to different degress

缘子的绝缘电阻劣化至零值时,该绝缘子的分布电压接近于零;2号绝缘子的分布电压为18.4 kV,升高了35.3%。

研究位于绝缘子串最中间的7号绝缘子劣化不同程度时对电压分布的影响,结果如图9所示。从图9可以看出,7号绝缘子的分布电压明显下降,其余绝缘子的电压稍有升高,升高百分比从中间到两边依次减小。6、7、8号绝缘子的正常分布电压分别为7.3、6.6、6.1 kV,由仿真数据得到,7号绝缘子的绝缘电阻劣化至300 M Ω 时,该绝缘子的分布电压仅下降了1.1 kV,下降百分比为17.2%,6号和8号绝缘子的分布电压上升最大,上升了0.2 kV。7号绝缘子的绝缘电阻劣化至150 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了2.0 kV,下降百分比为30.1%;6、8号绝缘子的电压稍有上升,升高幅度不超过5%。7号绝缘子的绝缘电阻劣化至100 M Ω 时,该绝缘子的

分布电压下降了2.6 kV,下降百分比为40.0%;6、8号绝缘子的分布电压上升0.4 kV,6号绝缘子升高了5.5%,8号绝缘子升高了6.6%。7号绝缘子的绝缘电阻劣化至50 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了3.7 kV,电压下降幅度达到正常分布电压值的50%以上,约为57.2%;6号绝缘子的电压上升0.5 kV,升高了6.8%;8号绝缘子的电压上升0.6 kV,升高了9.8%。7号绝缘子的绝缘电阻劣化至30 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了4.5 kV,下降百分比为68.0%;6号绝缘子的分布电压上升0.6 kV,升高了8.2%;8号绝缘子的分布电压上升0.7 kV,升高了11.4%。7号绝缘子的绝缘电阻劣化至0 M Ω 时,该绝缘子的分布电压接近于0;相邻绝缘子的分布电压上升1.0 kV,6号绝缘子升高了13.7%;8号绝缘子升高了16.4%。

选取最靠近横担侧的15号绝缘子作为研究对象,得到其不同劣化程度对绝缘子串电压分布的影响如图10所示。从图10可以看出,该绝缘子的分布电压明显下降,其他绝缘子的分布电压都有所上升,且越靠近横担侧电压上升越明显。正常情况下15号绝缘子的分布电压为8.5 kV,14号绝缘子的分布电压为7.1 kV。15号绝缘子绝缘电阻劣化至300 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了1.3 kV,下降百分比为13.3%;14号绝缘子的分布电压上升0.4 kV,升高了5.5%。15号绝缘子的绝缘电阻劣化至100 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了3.0 kV,下降百分比为39.4%;14号绝缘子的分布电压上升0.8 kV,升高了11.9%。15号绝缘子的绝缘电阻劣化至50 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了4.5 kV,下降百分比为52.9%,达到下降至正常值50%的劣化判定标准;此时14号绝缘子的分布电压上升1.2 kV,升高了17.1%。15号绝缘子的绝缘电阻劣化至30 M Ω 时,该绝缘子的分布电压下降了5.3 kV,下降百分比为63.8%;14号绝缘子的分布电压上升1.5 kV,升高了20.1%。15号绝缘子的绝缘电阻劣化至零值时,该绝缘子的分布电压接近于零;相邻绝缘子分布电压上升2.2 kV,升高了31.0%。

上述数据表明,交流220 kV瓷绝缘子绝缘电阻值劣化至300 M Ω 时,其分布电压下降不超过20%;而低值绝缘子的分布电压值下降至正常值50%时,其劣化绝缘电阻阻值为50~100 M Ω 。不同位置绝缘子发生相同程度劣化时,电压下降百分比相近,可以通过该比例判断绝缘子片的劣化情况,同时绝

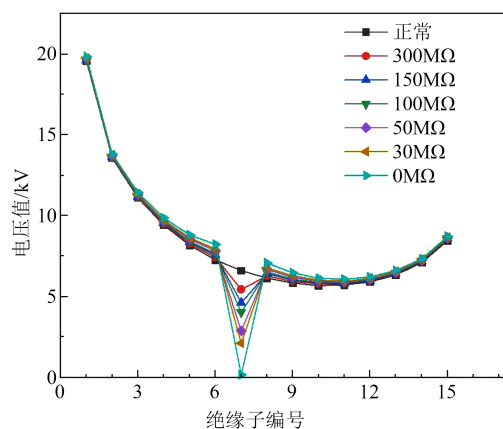


图9 7号绝缘子不同程度劣化时绝缘子串电压分布
Fig.9 The voltage distribution of insulator string when the No.7 insulator deterioration to different degree

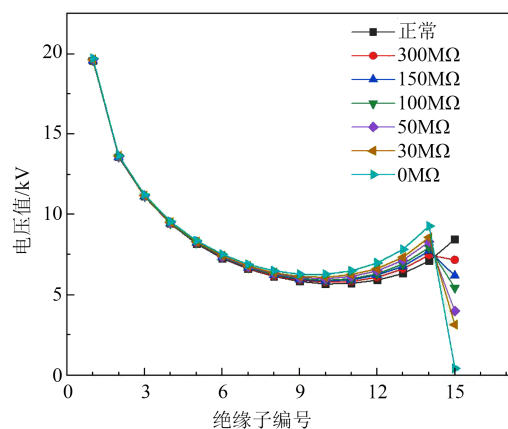


图10 15号绝缘子不同程度劣化时绝缘子串电压分布
Fig.10 The voltage distribution of insulator string when the No.15 insulator deterioration to different degree

缘子劣化时相邻绝缘子片分布电压有较为明显的上升,为检测中的劣化判别提供了辅助参考值。

3 电压分布仿真的实测验证

为了验证本文采用的仿真模型与计算方法的准确性,使用HDHL-BD-500零值绝缘子带电无线检测仪对多种布设方式下的山东交流220 kV输电线路鼓型耐张塔的瓷绝缘子串进行了带电测量。

现场实际测量了门字塔、鼓型塔、干字塔3种不同塔型的电压分布数据,包括左中右或上中下3相电压值、左右串数据值以及大小号绝缘子两侧的电压值,涵盖绝缘子串为15~17片的不同情况。以绝缘子串为15片的鼓型耐张塔为例,忽略相位的影响,在只考虑电压分布规律、不计线路首端升压的情况下,运用文中仿真结果与实际交流220 kV线路瓷绝缘子串电压测量平均值分布曲线进行对比,如图11所示。由图11可以看出,仿真计算所得的电压

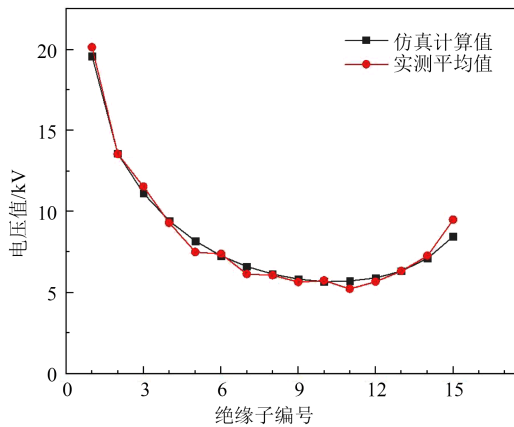


图 11 仿真与实测电压分布曲线图

Fig.11 Simulated and measured voltage distribution curves

分布曲线与线路实际测量的曲线基本吻合。由于任意一串绝缘子的电压分布都非恒定不变,而是随时间在一定范围内波动^[28],因此绝缘子测量值略有误差,但对 15 片绝缘子仿真与实测值计算比较发现,其中 11 片绝缘子分布电压的偏差值在 5% 以内,说明文中提出的仿真方法准确性较高,所得实验数据可靠。

4 结论

(1)不同布设方式下交流 220 kV 瓷绝缘子串的分布电压存在显著差异,不同杆塔塔型下最大分布电压差可达 35%。绝缘子串有限范围内对应的杆塔面积与横担侧绝缘子的对地杂散电容呈现很强的正相关性,与横担侧绝缘子的分布电压呈现负相关性。

(2)不同绝缘子片数及绝缘子串布置方式对绝缘子串两端电压分布有较大影响,不同布置方式下最大分布电压差可达 18.8%,使用电压分布法进行绝缘子劣化判定时不宜忽略;不同相位对绝缘子串电压分布的影响较小。依据现有标准对绝缘子串分布电压测量值进行劣化判定会有一定的误差。

(3)交流 220 kV 瓷绝缘子绝缘电阻劣化至 300 MΩ 与绝缘子电压低于 50% 标准规定值并没有直接对应关系。绝缘电阻劣化至 300 MΩ 时,其分布电压下降不超过 20%;而低值绝缘子的分布电压下降至正常值 50% 时,其劣化绝缘电阻为 50~100 MΩ。

(4)不同位置绝缘子发生相同程度劣化时,正常情况下分布电压高的绝缘子劣化时电压下降更大,如 1 号绝缘子正常情况分布电压最高,劣化时电压下降值最大。但相同程度劣化时,不同位置绝缘子的分布电压下降比例相近,可以根据该比例判断

绝缘子的劣化情况。

参考文献 References

- [1] 卢奇,周学明,张斌,等. 高压输电线路瓷质绝缘子炸裂分析及对策[J]. 湖北电力,2019,43(6):22-27.
LU Q, ZHOU X M, ZHANG B, et al. Analysis and countermeasures of porcelain insulator burst for high-voltage transmission lines[J]. Hubei Electric Power,2019,43(6):22-27.
- [2] SHEN H, JIA R, LIU H, et al. Study on fracture cause of porcelain insulator of 220 kV transmission line[C]//18th International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China: IET,2022.
- [3] WANG L, WANG H G. A survey on insulator inspection robots for power transmission lines[C]//2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Jinan, China: IEEE,2016.
- [4] 李家靖,董振,曲锴. 基于场路结合法的 500 kV 线路绝缘子串分布电压的计算[J]. 高压电器,2018,54(8):21-26.
LI J J, DONG Z, QU K. Calculation of the voltage distribution of insulator strings in 500 kV lines based on the combination of electrical field and road[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(8):21-26.
- [5] 范强,罗浩,曲锴,等. 500 kV 输电线路低零值绝缘子对绝缘子串电压分布的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(12):74-78.
FAN Q, LUO H, QU K, et al. Influence of low and zero resistance insulators on voltage distribution of insulator string in 500kV transmission lines[J]. Insulating Materials, 2018, 51(12): 74-78.
- [6] 陈瑶,邹德华,牛捷,等. 500 kV 输电线路中低零值绝缘子对长串绝缘子电位和电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器,2015(3):29-34.
CHEN Y, ZHOU D H, NIU J, et al. The impact of zero and low resistance insulator on potential and electric field distribution of long insulator strings in the 500 kV transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters,2015(3):29-34.
- [7] 蒋兴良,夏强峰,胡琴,等. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):118-124.
JIANG X L, XIA Q F, HU Q, et al. Influence of deteriorated insulator on the electric field distribution of overhang string[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(16):118-124.
- [8] 普子恒,彭朕,方春华,等. 基于大数据分类与 SVDD 模型的多场景 500 kV 劣化绝缘子判定研究[J]. 电瓷避雷器,2022(2): 189-196.
PU Z H, PENG Z, FANG C H, et al. Multi-scenario judgment of 500 kV deteriorated insulator based on big data classification and SVDD model[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(2):189-196.
- [9] 李凌,余佳佳,陈明德. 220 kV 劣化瓷绝缘子对猫头塔悬垂串电场分布影响仿真分析[J]. 中国水运,2017,17(8):163-166,170.
LI L, YU J J, CHEN M D. Simulation analysis of the influence of 220 kV deteriorated porcelain insulators on the electric field distribution of cat head tower suspension strings[J]. China Water Transport,2017,17(8):163-166,170.
- [10] HUANG D C, ZHENG Z, HUANG Z F, et al. Calculation model simplification study for porcelain insulator string poten-

- tial and grading ring surface electric field distribution of UHV AC transmission line[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Shenzhen, China:IEEE,2013.
- [11] 王灿灿,岳平,郑泞康,等. 110 kV 复合材料杆塔静电场仿真研究[J]. 绝缘材料,2015,48(4):40-44,51.
WANG C C, YUE P, ZHENG N K, et al. Electrostatic field simulation of 110 kV composite tower[J]. *Insulating Materials*,2015, 48(4):40-44,51.
- [12] 王欣,李凯迪,陈凡辉,等. 污秽对红外成像法测零值绝缘子影响的有限元分析[J]. 绝缘材料,2019,52(1):84-90.
WANG X, LI K D, CHEN F H, et al. Finite element analysis on influence of pollution on detecting faulty insulators by infrared imaging method[J]. *Insulating Materials*,2019,52(1):84-90.
- [13] 王远东,史文江,杨忠毅,等. 典型不溶污秽污染绝缘子在不同环境湿度下的吸水和闪络特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(5): 92-97.
WANG Y D, SHI W J, YANG Z Y, et al. Moisture absorption and flashover properties of insulators polluted with typical non-soluble contaminants in various environment humidity[J]. *Insulating Materials*,2021,54(5):92-97.
- [14] 龚宇清. 500 kV 户外绝缘子染污下电场有限元分析[J]. 中国新技术新产品,2009(19):17.
GONG Y Q. Finite element analysis of electric field under 500 kV outdoor insulator contamination[J]. *China New Technologies and Products*,2009(19):17.
- [15] 张青杰. 基于有限元的污秽绝缘子电场分布的分析[D]. 石家庄:河北科技大学,2014.
ZHANG Q J. Based on the finite element analysis of the electric field distribution of contaminated insulator[D]. Shijiazhuang:Hebei University of Science and Technology,2014.
- [16] 王欣. 污秽对绝缘子串电压分布影响的仿真与实验研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
WANG X. Simulation and experimental research on the influence of contamination on voltage distribution of insulator strings [D]. Changsha:Hunan University,2019.
- [17] 刘云鹏,刘嘉硕,裴少通,等. 雾室环境下污秽度和湿度对瓷质绝缘子放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(4):86-90.
LIU Y P, LIU J S, PEI S T, et al. Effects of pollution and humidity on discharge characteristics of porcelain insulators in fog chamber environment[J]. *Insulating Materials*,2021,54(4):86-90.
- [18] 杨艳,李钊年. 高海拔地区 750 kV 复合绝缘子均压环电场仿真及结构优化[J]. 绝缘材料,2015,48(1):70-73.
LIU Y, LI Z N. Electric field simulation and optimization of 750 kV composite insulators with grading ring in high altitude area [J]. *Insulating Materials*,2015,48(1):70-73.
- [19] 罗浩,郑雷,董振,等. 高低海拔 500 kV 绝缘子串分布电压的对比研究[J]. 电瓷避雷器,2018(6):172-176,181.
LUO H, ZHENG L, DONG Z, et al. Comparative study on distribution voltage of insulator strings for 500 kV between high and low altitude[J]. *Insulators and Surge Arresters*,2018(6): 172-176,181.
- [20] REDDY B S, SULTAN N A, MONIKA P M, et al. Potential and electric field distribution in a ceramic disc insulator string with faulty insulators[C]//2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Bangalore, India:IEEE,2012.
- [21] 王平,李抗,耿江海,等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表,2020,57(14):93-98.
WANG P, LI K, GENG J H, et al. Study on space electric field of 110 kV faulty porcelain suspension insulator[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2020,57(14):93-98.
- [22] 李明磊,汪从敏,刘岩,等. 不同劣化方式下复合绝缘子表面电场特性研究[J]. 绝缘材料,2022,55(11):79-85.
LI M L, WANG C M, LIU Y, et al. Study on surface electric field characteristics of composite insulator under different deterioration modes[J]. *Insulating Materials*,2022,55(11):79-85.
- [23] 王乐淼,何柏娜,颜雅迪,等. 雷电过电压下绝缘子串电场分布特性研究[J]. 绝缘材料,2019,52(3):63-68.
WANG L M, HE B N, XIE Y D, et al. Electric field distribution characteristics of insulator string under lightning overvoltage[J]. *Insulating Materials*,2019,52(3):63-68.
- [24] 王力农,李小春,宋斌,等. 输电线路劣化绝缘子电场分布仿真与检测研究[J]. 高压电器,2018,54(10):49-55,62.
WANG L N, LI X C, SONG B, et al. Researches of simulation and detection for electric field distribution along faulty insulator on transmission line[J]. *High Voltage Apparatus*,2018,54(10):49-55,62.
- [25] HE W, YANG F, WANG J G, et al. Inverse application of charge simulation method in detecting faulty ceramic insulators and processing influence from tower[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,2006,42(4):723-726.
- [26] 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 J G, LI X Y, XU Z K, 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.
- [27] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. 劣化悬式绝缘子检测规程:DL/T 626—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
Electric Power Industry Insulator Standardization Technical Committee. Aging suspension insulators inspection rule: DL/T 626—2015[S]. Beijing:China Electric Power Press,2015.
- [28] 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(2):45-47.
DING Y Z, ZHANG J L, CHEN X Y, et al., Field measurement and analysis of voltage distribution on 500 kV transmission line insulator strings[J]. *Electric Power*,2000(2):45-47.

收稿日期:2023-07-26;修回日期:2023-09-22。

作者简介:

刘嵘(1984-),男(汉族),山东德州人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。