

基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估

雷 潇¹, 陈梦军², 刘小江¹, 廖文龙¹, 刘 强¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 613000)

摘要: 感应雷过电压是10 kV配电网跳闸和停运的主要原因。为评估其风险, 首先, 建立了感应雷过电压的电磁暂态仿真模型, 分析了雷击距离、雷电流幅值、土壤电阻率对过电压幅值的影响, 据此提出了一种感应雷过电压幅值简化计算方法; 然后, 根据输电线路杆塔坐标、土壤电阻率和雷电流幅值概率密度, 建立配电网杆塔闪络概率计算模型; 最后, 结合地闪密度构建感应雷闪络风险评估模型。

关键词: 地理信息; 配电网; 感应雷过电压; 风险评估

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2021)01-0001-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210101

Risk Assessment on Induced Lightning Flashover of Distribution Network Based on Geography Information

Lei Xiao¹, Chen Mengjun², Liu Xiaojiang¹, Liao Wenlong¹, Liu Qiang¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 613000, Sichuan, China)

Abstract: Induced lightning overvoltage is the main reason for the tripping and shutdown of 10 kV distribution network. In order to assess the risk, the electromagnetic transient simulation model of induced lightning overvoltage is established firstly. The influences of lightning distance, lightning current amplitude and soil resistivity on the overvoltage amplitude are analyzed, and a simplified calculation method for induced lightning overvoltage amplitude is proposed. And then, according to the tower coordinates, soil resistivity and probability density of lightning current amplitude of transmission and distribution lines, the calculation model for lightning flashover probability of distribution network tower is established. Finally, the risk assessment model of induced lightning flashover is constructed combined with the lightning density.

Key words: geography information; distribution network; induced lightning overvoltage; risk assessment

0 引言

四川是中国雷电活动最为频繁的地区之一, 输电线路极易发生雷击跳闸。据部分地市公司的10 kV配电网故障统计数据, 雷击跳闸占比超过50%, 且存在大量雷击设备损坏故障。根据10 kV配电架空线路的典型绝缘配置^[1], 雷电冲击50%闪络电压一般小于200 kV。目前国网四川省电力公司采购的柱式绝缘子雷电冲击50%闪络电压一般

为105 kV和125 kV。在此绝缘强度下直击雷和感应雷均易造成绝缘闪络。由于10 kV配电网线路易受周边引雷设施, 尤其是输电线路杆塔的屏蔽, 更易发生感应雷跳闸。已有的研究数据表明, 感应雷引起的雷害故障占绝大部分^[2]。

目前国内外学者对感应雷过电压进行了系统性的研究, 发现雷击距离、雷电流幅值、土壤电阻率是主要影响因素^[3-6]。文献[5]建立了电磁暂态仿真方法, 文献[7]提出了简化模型。在此基础上, 电力公司可进行差异化的10 kV配电网防雷评估和治理。然而, 配电网运维能力并不能匹配庞大的资产数量, 依靠科研部门和供电所以“一线一案”的方式

开展防雷改造,存在工作量大、效率低下的问题。

而另一方面,电力公司经过近年来在大数据基础建设上的投入,已建立了各类基础数据库和管控系统。调研发现,通过整合各类数据信息,可实现配电网感应雷过电压的自动计算,进而完成感应雷闪络风险评估。

鉴于此,下面根据感应雷过电压计算方法和影响因素,利用输电线路基础信息、雷电定位系统信息和运维经验,提出基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估模型。

1 感应雷过电压

1.1 电磁暂态仿真模型

根据文献[5-6]的方法,利用 ATP-EMTP 软件中的用户自定义 MODELS 搭建了一套计算配电网感应雷过电压的仿真模型,如图 1 所示。可调参数包括雷击距离、雷电流幅值、土壤电阻率等,便于分析各因素对感应过电压的影响。雷电流采用标准波形,即波前时间 $2.6 \mu\text{s}$,半波时间 $50 \mu\text{s}$ 。

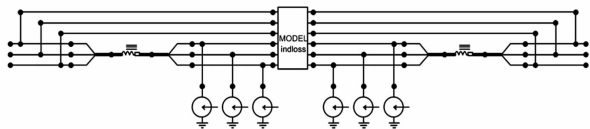


图 1 感应过电压计算模块

1.2 影响因素

影响感应雷过电压幅值的主要因素有雷电流幅值、雷击距离和土壤电阻率。图 2 展示了雷电流幅值与感应雷过电压的关系。可见,在不同土壤电阻率和雷击距离下,两者呈线性关系。雷击距离与感应雷过电压幅值的关系如图 3 所示。雷击距离越大,过电压幅值越小。由 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[8],过电压幅值与雷击距离呈反比关系,与仿真结果较为一致。图 4 展示了雷电流幅值 30 kA、雷击距离 65 m 时,感应雷过电压幅值与土壤电阻率的关系。

1.3 简化计算模型

虽然通过仿真建模可计算电网局部区域的感应雷过电压波形,但实际运行中感应雷大小和位置均具有随机性,在评估过程中难以实现大规模的随机性计算。对此,根据大量仿真数据,基于各主要影响因素的影响规律,提出了考虑土壤电阻率的感应雷

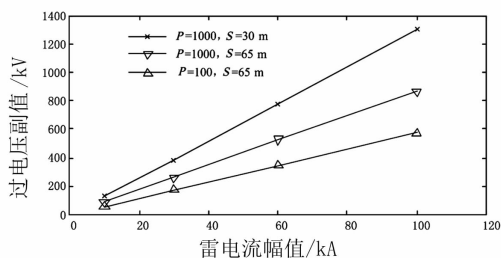


图 2 过电压幅值与雷电流幅值的关系

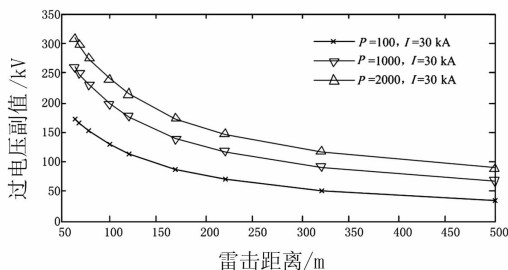


图 3 过电压幅值与雷击距离的关系

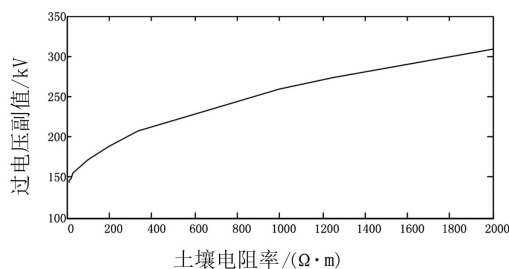


图 4 过电压幅值与土壤电阻率的关系

过电压幅值简化计算方法,如式(1)所示。

$$V = \begin{cases} I_m(A + B \cdot \frac{1}{S}) & S > 65 \text{ m} \\ I_m(P_1 \cdot \frac{1}{S^2} + P_2 \cdot \frac{1}{S} + P_3) & S < 65 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

$$A = 1.425 \ln(\rho + 819.8) - 9$$

$$B = 95.25 \ln(\rho + 169.3) - 200.75$$

$$P_1 = 1.39 \times 10^{-4} \rho^2 - 0.587 \rho - 966$$

$$P_2 = -3.16 \times 10^{-5} \rho^2 + 0.14 \rho - 193$$

$$P_3 = -4.04 \times 10^{-7} \rho^2 + 2.11 \times 10^{-3} \rho + 2.94$$

式中: S 为雷击点与线路的垂直距离,m; I_m 为雷电流幅值,kV; ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

2 地理信息数据

地理信息数据指输电线路所处地理位置及相关信息,主要包括输电杆塔 GPS 坐标、区域地闪密度、区域土壤电阻率等。目前,国网四川省电力公司运检管控系统集合了全省输电线路杆塔 GPS 坐

标、雷电定位系统落雷数据;PMS2.0 系统收集了全省 10 kV 配电网杆塔坐标,具备了 10 kV 配电网感应雷过电压闪络风险评估的数据基础。

输电线路杆塔可视为城郊和农村地区主要的引雷设施,其附近的 10 kV 配电网杆塔不易遭受直击雷,但易受感应雷过电压的威胁。通过分析输配电线路杆塔坐标,可自动识别输电线路杆塔附近的配电网杆塔,进而计算一旦输电线路杆塔遭受雷击时配电网的闪络概率。

地闪数据源自雷电定位系统,在数据量足够大的情况下,可获得单基杆塔所处局部区域的地闪密度,否则取线路所在县或地市的地闪密度。区域地闪密度表征雷电活动的频繁程度,可反映配电网杆塔附近区域落雷概率,是感应雷闪络风险的重要考虑因素。

区域土壤电阻率受微地形及气候影响,在无实测数据的情况下,无法准确估计单基杆塔所处位置的准确值。目前可通过区域土质进行大致估计。

3 风险评估指标

3.1 综合风险指标

10 kV 配电网绝缘的感应雷过电压闪络风险由雷击风险和过电压闪络风险共同构成。雷击风险体现配电网杆塔附近发生雷击的概率,取决于区域雷电活动频繁程度。过电压闪络风险是指配电网杆塔附近一旦遭受雷击,发生绝缘闪络的风险。一般而言,可将两者相乘以构造类似于跳闸率的综合风险指标。但地闪密度的绝对值通常很小,且各地市之间差别较大,会导致综合风险指标对地闪密度的差异过于灵敏,而运维单位更关心一旦发生雷击绝缘闪络的概率。因此,将雷击风险和过电压闪络风险以加权求和的方式构建综合风险指标,如式(2)所示。

$$F = \sigma \cdot F_1 + F_2 \tag{2}$$

式中: F_1 为雷击风险; F_2 为过电压闪络风险; σ 为雷击风险加权值,取 0.3。

3.2 雷击风险

雷击风险为反映雷电活动频繁程度的相对值,可通过对地闪密度进行归一化处理来量化。《雷区分级标准与雷区分布图绘制规则》(Q/GDW

10672—2017)将地闪放电频度从弱到强分为 8 个层级,如表 1 所示。^[9]

表 1 地闪层级

层级	地闪密度
A	$N_{sg} < 0.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
B1	$0.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
B2	$2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 2.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
C1	$2.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 5.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
C2	$5.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 7.98 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
D1	$7.98 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 11.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
D2	$11.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 15.5 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
E	$N_{sg} \geq 15.5 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$

根据该地闪密度层级,所构建的雷击风险指标计算方法如式(3)。

$$V = \begin{cases} 1 & N_{sg} > 15.5 \\ N_{sg}/15.5 & N_{sg} < 15.5 \end{cases} \tag{3}$$

式中, N_{sg} 为地闪密度值。

3.3 附近有引雷设施情况下的闪络概率

对于配电网杆塔附近有输电线路杆塔的情况,可认为一旦该局部区域发生雷击均击中输电线路杆塔。过电压闪络概率通过雷电流幅值累计概率密度、输配电杆塔距离和土壤电阻率进行计算,计算模型如图 5 所示。

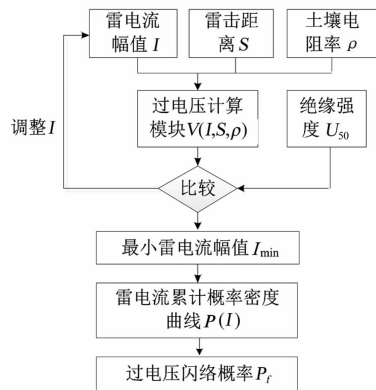


图 5 过电压闪络概率计算模型

其中,雷电流累计概率密度曲线为离散化数据,由雷电流幅值等差序列和其对应的累计概率序列构成。所采用的雷电流雷击概率密度曲线由雷电定位系统统计数据生成,其中某区域数据如图 6 所示。

在给定雷击距离和土壤电阻率的情况下,根据式(1)由小到大计算雷电流序列中各数值下的过电压幅值,与杆塔绝缘的雷电闪络 50% 电压 U_{50} 比较,

获取能使杆塔闪络的雷电流幅值最小值 I_{\min} 。累计概率密度在 I_{\min} 时的概率即是过电压闪络概率。

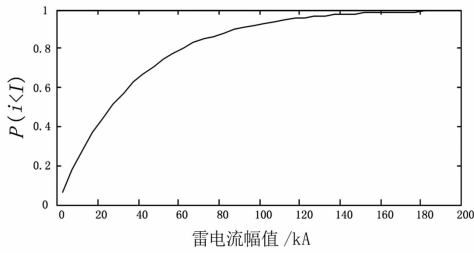


图 6 某区域雷电流幅值雷击概率密度曲线

3.4 附近无引雷设施情况下的闪络概率

对于配电网杆塔附近无输电线路杆塔的情况,认为落雷位置与线路垂直距离呈均匀分布。根究 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》,线路 65 m 以外的落雷为感应雷,而 200 m 以外的落雷几乎不会造成绝缘闪络。因此,雷击距离在 65 ~ 200 m 范围内呈均匀分布。

在其他参数确定的情况下,前面给出的闪络概率模型实际可看作雷击距离 S 的函数 $P(S)$ 。因此,通过计算 65 ~ 200 m 情况下的闪络概率并进行平均化处理,即可获取雷击距离均匀分布情况下的闪络概率。

4 风险等级划分

将配电网感应雷闪络风险划分为高、较高、中和低四等,如表 2 所示,研究各种情况下的综合风险指标,分析风险等级划分的合理性。其中,10 kV 配电网绝缘的雷电闪络 50% 电压以常用的柱式绝缘子型号为准,取 105 kV。

附近有输电线路杆塔的情况下,综合风险和雷击距离的关系如图 7 所示。地闪层级在 C1 区及以上,即地闪密度 $d > 2.78$ 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$) 的区域,附近 100 m 以内有输电线路杆塔的配电网杆塔,其风险等级均为较高及以上。除甘孜、阿坝地区,四川大部地区的地闪层级在 C1 及以上,因此将四川大部分地区中靠近输电线路杆塔的配电网杆塔的综合风险均划分为较高风险和高风险。

附近无输电线路杆塔的情况下,配电网杆塔综合风险和地闪密度的关系如图 8 所示。对于土壤电阻率较低且地闪层级在 C1、C2 的区域,如成都平原,风险等级一般为中或低。对于土壤电阻率较低且

地闪层级在 D1 及以上的区域,如宜宾地区,风险等级一般为较高。对于土壤电阻率较高且地闪层级在 D1 及以上的区域,如攀枝花和凉山,风险等级为高。

表 2 风险等级划分

风险等级	综合风险指标 f
高	$f > 0.7$
较高	$0.7 > f > 0.54$
中	$0.54 > f > 0.45$
低	$0.45 > f$

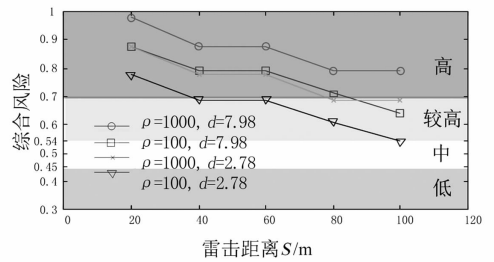


图 7 综合风险与雷击距离的关系

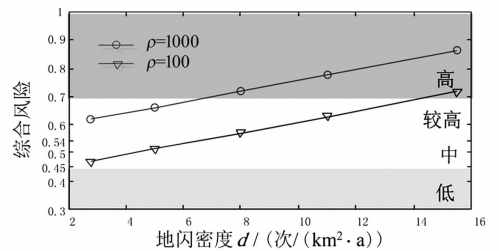


图 8 综合风险与地闪密度的关系

5 结语

上面提出了一种基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估方法,主要内容如下:

1) 采用雷击风险和过电压闪络概率,构造了综合风险指标,并以此划分了 4 个风险等级。雷击风险为反映雷电活动频繁程度的相对值,通过对地闪密度进行归一化后获取。过电压闪络概率为区域发生雷击后绝缘闪络的概率。

2) 根据电磁暂态仿真模型获取各种参数下的感应雷过电压幅值,以此拟合简化计算公式。结合雷电流幅值概率密度、雷击位置概率分布和绝缘强度,针对附近是否有输电线路杆塔,提出了闪络概率计算模型。

3) 根据所提出的风险评估方法,四川大部分区

(下转第 76 页)