

# 中压配电网遭受雷电灾害的易损性评估方法

段力铭, 刘 念, 刘宗歧

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

## A Lightning Vulnerability Evaluation Method in Medium Voltage Distribution Networks

DUAN Liming, LIU Nian, LIU Zongqi

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘 要:** 提出一种基于层次分析法(AHP)的配电网遭受雷电灾害的易损性评估方法, 以指导配电网运营商制定运行维护计划和开展差异性抗灾规划。文章主要分为 3 部分: 首先, 总结雷电灾害对配电网的影响机理, 提出配电网雷电易损性指标, 同时建立相应的综合评价指标体系; 其次, 将配电网雷电易损性指标划分出轻微、中等和严重 3 个等级, 并提出配电网雷电易损性评估法的应用流程; 最后, 对 4 个地区 15 年间的配电网遭受雷电灾害并发生故障的风险进行评估, 验证了本文提出方法的有效性。

**关键词:** 配电网; 综合评估; AHP; 雷电灾害易损性

**Abstract:** In this paper, a lightning vulnerability evaluation method for MV distribution networks based on the Analytic Hierarchy Process is proposed to help the decision-makers formulate the maintenance schedules and difference planning. This paper can be divided into three parts. Firstly, the impact mechanism of lightning on distribution networks is summarized, the lightning vulnerability indicator is proposed, and the corresponding comprehensive evaluation index system is established at the same time. Secondly, the lightning vulnerability index is classified into mild, moderate and severe level, and the application process is presented to assess lightning vulnerability evaluation method for MV distribution network. In the end, the fault risks that 4 distribution networks being simultaneously struck by lightning during the period from 1996 to 2015 are assessed, which verifies the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** distribution networks; comprehensive assessment; AHP; lightning vulnerability

## 0 引 言

配电网因其绝缘水平较低, 容易受到雷电灾害的影响: 架空线路由雷电引起的跳闸事故占总跳闸

次数的 70%~80%<sup>[1]</sup>。不同地域的配电网遭受雷电灾害的影响程度又呈现一定的差异, 这差异取决于配电网所处地区的环境因素、雷电活动特性以及配电网的防雷水平。为确保配电网防雷水平, 兼顾资源的优化配置, 差异性规划是当今业界普遍采用的抗灾规划方法。

进行配电网防雷差异性规划, 关键在于对“差异”的准确评估。文献 [2]、[3-4] 分别采用配电网的可靠性计算、风险评估的方法对配电网的防雷性能做出定量的描述。雷电灾害对配电网的影响涉及众多的因素, 仅用落雷密度指标分析雷电灾害对配电网的影响略显不足。文献 [5]、[6] 通过全面分析雷电对配电网故障的影响机理, 提出灾害下配电网故障率的计算模型。然而, 文献 [5] 提出的模型更适用于局部配电线路的防雷设计改进, 文献 [6] 提出的模型仅讨论了由直击雷电造成的配电网故障率, 分析结果均不足以在配电网宏观的防雷决策过程中提供相应的参考。

2008 年全国电力系统遭到冰灾重创, 国内学者开始对如何提高电网的抗灾能力展开深入的研究。文献 [7] 提出了“抗灾型电力系统”规划的思路、方法和机制。文献 [8] 提出了考虑自然灾害场景约束的抗灾型电网规划方法, 以实现电网抗灾投资的精细化决策。文献 [9] 对冰灾条件下输电线路停运率进行模糊建模得到冰灾下系统的可靠性水平, 建议以该指标作为提高电网设计标准的参考依据。由上述文献可见国内对配电网抗灾能力的研究都仅停留在对冰灾的讨论。

本文主要以国内外相关标准为参考, 提出了综合反映配电网遭受雷电灾害并发生故障的风险的配电网雷电易损性指标; 另外, 提出了包括配电网雷

电灾害易损性的综合评估法、雷电易损性等级划分方法和规划远景年雷电易损性评价指标修正法一系列实用的配电网雷电易损性评估方法。将该方法应用于4个地区的配电网雷电易损性评估表明,本文提出的评估方法能量化反映当前及规划远景年配电网遭受雷电灾害影响并发生故障的风险,为配电网的运行维护计划、抗灾规划提供重要的理论支持。

## 1 配电网雷电易损性影响因素

配电网在雷电灾害条件下的表现取决于诸多因素,主要有:落雷密度、雷电流/电压幅值、土壤特性、屏蔽因素、是否存在架空地线、接地极的间距、避雷器的安装间隔、线路与其附近导体的间距以及配电线路的绝缘水平等<sup>[10]</sup>。上述诸多因素可以归纳为:雷电强度因素、环境因素和配电网的状态。

### 1.1 雷电强度因素

当配电网遭受雷击时,雷电的强度决定了其对配电网造成破坏的程度。本文选取落雷密度和雷电流幅值作为衡量雷电强度的关键指标。

落雷密度是对一定区域内单位时间单位面积受到的平均雷击次数的统计。显然,落雷密度与雷电的发生频率成正比。在一定程度上,该指标与配电网架空线的雷击闪络概率存在某种关联<sup>[3]</sup>。类似的,平均雷电流幅值也与配电网雷击闪络率呈现一定的正相关。配电网通常具有一定的绝缘水平,当雷电流幅值超过绝缘安全值时,绝缘失效在所难免。目前,IEEE、CIGRE等多家机构均给出了雷电流幅值概率密度计算公式<sup>[11]</sup>。并且,配电线路雷击闪络率与雷电流幅值的概率密度在统计层面表现出一定的相关性<sup>[12]</sup>。

落雷密度和雷电流幅值都是反映雷电强度的关键指标,这两个指标的增加意味着雷电强度的增加,即配电网遭受雷击故障风险的增加。

### 1.2 环境因素

统计结果表明:随着架空线路密度的增加,配电网的直击雷电闪络事故越发频繁<sup>[6]</sup>。另外,配电线路周围结构的屏蔽效应能显著降低配电网直击雷故障的概率。IEEE标准推荐采用屏蔽系数(取值范围0到1)来衡量周围结构对配电线路的屏蔽效率。屏蔽系数是配电线路周围物体(树、房屋等)的平均高度、配电线路与周围物体平均间距的函数<sup>[10]</sup>。

配电架空线密度和屏蔽系数是反映配电线路遭

受雷击风险的关键环境因素,前者与配电网雷电故障率成反比,后者则正好相反。

### 1.3 配电网状态

当雷击杆塔时,杆塔接地电阻决定了雷击杆塔时杆塔顶端电位的高低。接地电阻越大,则杆塔顶与导线之间的电位差越大,绝缘子越容易发生闪络,配电线路的耐雷水平越低<sup>[13]</sup>。基本雷电冲击绝缘水平(basic impulse insulation level, BIL)或者临界闪络电压代表了配电网的绝缘水平,在一定条件下,它们对降低配电网雷击闪络率表现出良好的灵敏性<sup>[10, 14]</sup>。此外,研究表明:直击雷电造成的配电架空线闪络概率直接受避雷器安装率(或者避雷器安装间隔)的影响<sup>[6]</sup>。避雷器和架空避雷线的组合应用大大减低了架空线路的雷击故障率,尤其是防止感应雷击过电压,这种组合应用的效果尤为明显。

通常,高绝缘水平、避雷线和避雷器安装率,低接地电阻对于改善配电网防雷性能具有至关重要的作用。

## 2 基于AHP的配电网雷电易损性评估

配电网遭受雷电灾害的易损性评估是一个复杂的问题。因其涉及较多变量,变量之间复杂而不确定的关系以及单位的不一致,使得对配电网雷电灾害易损性进行直接的定量分析不易实现。但AHP通过指标的权重设置和无量纲化处理,可以很好解决上述难题。同时,相比无序的调研和人为经验的判断,采用综合评价结果以辅助配电网的抗灾规划、运行维护等宏观决策在精度上足以满足实际的工程需要。

为了综合反映配电网遭受雷电灾害并发生故障的风险,本文提出配电网雷电易损性指标 $v$ 。 $v$ 的取值范围为0~1, $v=0$ 表示配电网遭受雷电灾害并发生故障的风险为零,完全没有必要对配电网进行防雷改进;相反, $v=1$ 意味着配电网遭受雷电侵袭并且发生故障的风险很大,这时亟需对配电网进行防雷的改进。

### 2.1 评价指标体系

如上文所述,本文将雷电强度因素、环境因素、配电网状态作为配电网雷电灾害易损性评估的主要影响因素。配电网雷电易损性评估指标体系结构如图1所示,包括3个1级指标和8个2级指标。

### 2.2 权重计算

计算指标权重的5个主要步骤<sup>[15]</sup>如下所示:

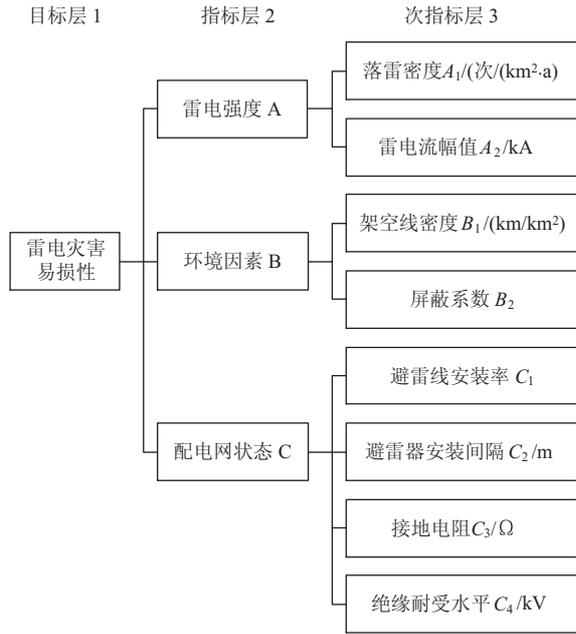


图 1 配电网雷电易损性评价指标体系

① 构造判断矩阵

同一准则下的所有指标两两比较形成该准则下的判断矩阵，专家  $k$  给出的判断矩阵  $J_k$  的形式如下所示：

$$J_k = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_N \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdots \\ C_N \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & a_{12k} & \cdots & a_{1Nk} \\ 1/a_{12k} & 1 & \cdots & a_{2Nk} \\ \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ 1/a_{1Nk} & 1/a_{2Nk} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

其中： $C_i(i=1\sim N)$ 为同一准则  $C$  下的指标； $N$  为  $C$  准则下的指标数；

$a_{ijk}$ 反映了专家  $k$  针对同一准则  $C$  就  $C_i$ 、 $C_j$  指标的相对重要性的判断， $a_{ijk}$  的具体含义如表 1 所示。

表 1  $J_k$  矩阵中  $a_{ijk}$  的含义

标度	含义
1	同样重要
3	前者比后者稍重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者强烈重要
9	前者比后者极端重要
2、4、6、8	上述相邻判断的中间值

② 整合专家权重

设  $s$  个专家给出的判断矩阵分别为  $J_1$ 、 $J_2$ 、

$\cdots$ 、 $J_s$ ，则通过加权平均可得到综合判断矩阵  $J=(a_{ij})$ ，其中：

$$\begin{cases} a_{ij} = (a_{ij1})^{\beta_1} (a_{ij2})^{\beta_2} \cdots (a_{ijs})^{\beta_s} \\ \sum_{k=1}^s \beta_k = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\beta_k$ 为各专家的权重系数。

③ 同一准则下指标的权重计算

采用几何平均法计算同一准则下各指标的相对权重。以本文  $C_i$  指标相对  $C$  准则的权重计算为例，评价指标体系第 3 层  $C_i$  指标的权重  $w_{C_i}^3$  为

$$w_{C_i}^3 = \frac{(\prod_{j=1}^4 a_{ij})^{1/4}}{\sum_{k=1}^4 (\prod_{j=1}^4 a_{kj})^{1/n}}, \sum_{i=1}^4 w_{C_i}^3 = 1 \quad (2)$$

④ 一致性检验

同一准则层下的指标权重一致性比率  $RC$  计算公式如下：

$$RC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{RI} \quad (3)$$

式中： $\lambda_{\max}$ 为  $J$  矩阵的最大特征根； $RI$  为平均随机一致性指标。

⑤ 合成指标权重

按式(2)的计算准则，由最高层到最低层逐层计算具有从属关系的指标权重，最后生成底层指标相对目标层指标的合成指标权重。以  $C_i$  指标合成权重计算为例，合成指标权重如下所示：

$$w_{C_i} = w_{C_i}^2 w_{C_i}^3 \quad (4)$$

最终，所有指标相对目标层指标的合成权重向量为  $W=(w_{A_1}, w_{A_2}, w_{B_1}, w_{B_2}, w_{C_1}, \cdots, w_{C_4})^T$ 。

2.3 评价指标的无量纲化

依据评价指标的具体情况，将次指标层指标分为 3 类：即极大型指标(指标值越大评价结果越大)、极小型指标(指标值越小评价结果越大)、中间型指标(指标值越靠近某一定值评价结果越大)。对本文涉及的评价指标简单归类如下：

极大型指标：落雷密度、雷电流幅值、土壤电阻率、避雷器安装间隔、配电线路密度。

极小型指标：屏蔽系数、避雷线安装率、BIL。

对两种指标进行线性无量纲化，则  $j$  地区电网的  $i$  指标无量纲化处理如下所示：

$$r_{ji} = \begin{cases} \frac{x_{ji} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}, x_{ji} \text{ 为极大型指标} \\ \frac{x_{i\max} - x_{ji}}{x_{i\max} - x_{i\min}}, x_{ji} \text{ 为极小型指标} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $x_{ji}$ 为j地区配电网i指标值； $r_{ji}$ 是 $x_{ji}$ 的线性化无量纲值； $x_{imax}$ 、 $x_{imin}$ 分别为i指标的最大值和最小值，最值的选取参考IEEE Std 1243 - 1997、1410 - 2004。

### 2.4 评价结果

综合评价结果为各评价指标的加权和：

$$v_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ji} \quad (6)$$

式中： $v_j$ 是j地区配电网的雷电易损性。

若有m个待评估配电网，那么待评估配电网的雷电易损性向量 $V_{m \times 1}$ 可通过以下矩阵运算获得

$$V_{m \times 1} = R_{m \times n} W \quad (7)$$

式中： $V_{m \times 1} = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ ， $R_{m \times n} = (r_{ji})$ 。

### 3 配电网雷电易损性等级划分

综合评价结果是对不同物理意义的评价指标的整合，其本身不具有任何量纲意义。为了最大限度地降低主观因素对配电网雷电易损性严重程度的划分，本文采用模拟实验的方法从概率的角度对雷电易损性等级做出划分。

设所有评价指标随机变量向量 $X = (X_{A_1}, X_{A_2}, X_{B_1}, X_{B_2}, X_{C_1}, X_{C_2}, X_{C_3}, X_{C_4})$ ，其中： $X_x$ 表示评价指标 $x(x = A_1, A_2, \dots, C_4)$ 的随机变量。已知雷电流幅值 $X_{A_2}$ 的概率密度函数 $f(X_{A_2})$ 为<sup>[11]</sup>

$$f(X_{A_2}) = \frac{2.6}{31^{2.6}} \times \frac{X^{(2.6-1)} A_2}{[1 + (X_{A_2}/31)^{2.6}]^2} \quad (8)$$

另外，根据全国多个地区的卫星观测地闪密度统计数据<sup>[16]</sup>可拟合出落雷密度 $X_{A_1}$ 服从对数正态分布： $X_{A_1} \sim \text{Log-N}(10.5, 0.75^2)$ 。假设其余评价指标均服从均匀分布： $X_x \sim U(x_{xmin}, x_{xmax})$ ， $x_{xmin}$ 、 $x_{xmax}$ 为评价指标的分布范围。

对满足上述分布规律的各评价指标样本随机抽样，进而随机构成500组模拟评估配电网的雷电易损性评价指标序列。结合式(5)~(7)以及专家得出的权重向量 $W$ ，雷电易损性样本的分布情况如图2所示。

图2显示：配电网雷电易损性 $v$ 近似服从正态分布，样本均值为 $\bar{\mu} = 0.466$ 。以样本均值及其经验分布函数 $\alpha = F_n(1/2)$ 为依据，对配电网雷电灾害易损性等级进行划分，雷电易损度的等级划分情况如表2所示。

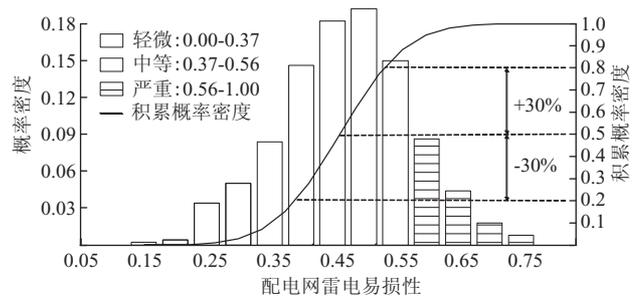


图2 雷电灾害易损性概率密度分布

表2 配电网雷电灾害易损性等级划分

等级	概率区间	雷害易损度
轻微	$[0, \alpha - 30\%]$	0~0.37
中等	$[\alpha - 30\%, \alpha + 30\%]$	0.37~0.56
严重	$[\alpha + 30\%, 1.0]$	0.56~1

### 4 配电网雷电易损性评估方法流程

对当前配电网雷电易损性的评估，有利于掌握配电网应对雷电灾害的能力，有利于对配电网制定相应的运行维护计划。当前配电网遭受雷电灾害的易损性评估内容主要包括：评估指标统计、指标权重计算、雷电易损性指标计算及在此基础上的雷电易损性等级划定。另外，对规划远景年配电网雷电易损性的评估还应考虑规划远景年配电网绝缘水平的衰减，结合既定规划方案就远景年的评估指标进行相应的修正。配电网遭受雷电灾害的易损性评估方法应用流程如图3所示。

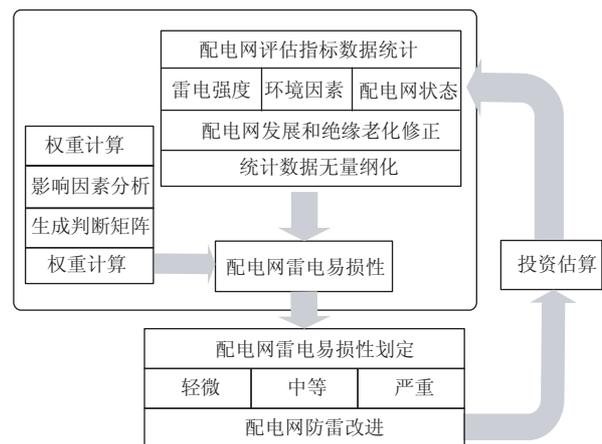


图3 配电网雷电易损性评估流程

对当前/规划远景年配电网进行雷电易损性的评估，5个关键的步骤如下所示：

- ① 收集资料

参照图 1，基于现有数据计算得到无量纲化评价指标。

### ② 修正

计及配电网发展以及绝缘老化因素造成的评价指标变化，就规划年的各评价指标值进行修正。为了简化分析，本文做出以下合理假设：

a) 规划年内，配电网供区内的雷电强度和环境影响因素基本不变，屏蔽系数、配电线路密度随着城市发展而进行相应的修正。

b) 规划年的避雷线安装率以及避雷器安装间隔需根据配电网的发展计划、绝缘改造计划进行相应修正。

c) 配电网的雷击故障主要发生在架空线路的绝缘子雷击闪络上，绝缘子的平均 BIL 即代表配电网的 BIL。

其中，对规划远景年配电网的 BIL 指标修正如下分析：

采用电气设备绝缘老化失效概率统计模型<sup>[17]</sup>，同时考虑电气老化和机械老化这两种典型的老化类型， $t$  年内电气设备老化引起的失效概率为

$$P(t > L) = \alpha_1 P_E(t > L) + \alpha_2 P_M(t > L) \quad (9)$$

式中： $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为电气老化与机械老化占电气设备绝缘老化的比重。

则规划年  $T$  的配电网 BIL 估算为

$$BIL_T = \sum_{T_1=1}^T \{ \eta_{T_1} BIL_{T_1} [1 - P(T - T_1) > L] \} \quad (10)$$

式中： $BIL_{T_1}$  为第  $T_1$  年新建架空线的设计基本雷电冲击绝缘水平； $\eta_{T_1}$  为第  $T_1$  年新建或改造配电线路占所有配电架空线的比例。

### ③ 评估

计算当前/规划远景年配电网雷电易损性，参考表 2 划定配电网的雷电易损性等级。

### ④ 防雷改进

分析造成该配电网雷电易损性严重的关键指标。针对关键指标，提高相应的设计标准或进行配电线路的优化选址布局，并做出相应的投资估算。

### ⑤ 再评估

对防雷改进后配电网的雷电易损性再评估，重复①~⑤步骤，直到获得兼顾配电网防雷安全性和建设投资经济性的配电网防雷改进方案。

## 5 应用举例

本文以 4 个地区为例，就其在 1996~2015 年

期间的配电网防雷状态进行分析，评估配电网在当年和规划远景年遭受雷电灾害并发生故障的风险。

A、B、C、D 为地理分布临近的 4 个中等城市配电网。A 配电网位于市中心，地处平原，具有较高的负荷密度，且配电线路建设标准相对较高；C、D 配电网位于城市远郊，地处山地，负荷密度较低，但配电网发展速度较快；B 配电网位于城市近郊，地处丘陵，雷暴日较多，配电网建设时间较早，亦采用相对较高的配电网设计标准。4 个配电网的概况统计如表 3 所示。

表 3 A~D 配电网概况统计

配电网	雷电动强度	负荷密度	接地条件	防雷设计标准	配网架空线年均增长率/%
A	低	较高	好	高	2.39
B	较高	中等	一般	较高	6.78
C	中等	较低	差	较低	6.18
D	中等	低	差	较低	6.05

评估过程中，3 名知识水平相近的专家对各指标进行成对比较，进而生成判断矩阵。经验表明，70% 的配电网雷击闪络事故由感应雷击造成，因此，我们取感应雷击事件的权重为 0.7，而直击雷电事件的权重为 0.3。通过计算，各指标的权重为

$$W = (0.093, 0.038, 0.15, 0.101, 0.148, 0.101, 0.147, 0.0195)^T。$$

1996~2015 年，因配电网发展、配电线路绝缘老化引起的架空线路密度、配电网 BIL 指标的修正如表 4、表 5 所示。

表 4 配电网架空线密度

km/km<sup>2</sup>

地区	1996	2005	2010	2015
地区 A	9.19	11.26	13.02	14.75
地区 B	3.29	6.97	10.06	12.22
地区 C	2.94	3.98	6.34	9.762
地区 D	3.32	4.97	7.46	10.75

表 5 配电网 BIL 修正

kV

地区	1996	2005	2010	2015
地区 A	159.287	162.161	157.125	127.994
地区 B	104.954	112.521	112.253	102.537
地区 C	82.600	84.107	83.957	77.870
地区 D	85.675	86.654	84.533	76.585

将各配电网的无量纲化指标代入(7)式计算得到4个配电网的雷电易损度,在此基础上进行的配电网雷电易损性等级划定结果如表6所示。

表6 配电网雷电易损性评估结果

地区	1996	2005	2010	2015
地区A	0.320	0.337	0.361	0.413
地区B	0.427	0.454	0.485	0.519
地区C	0.555	0.564	0.588	0.629
地区D	0.535	0.550	0.578	0.620

横向分析,计算结果显示:A配电网遭受雷电灾害并发生故障的风险最小,B、D、C配电网次之。A所代表的市区配电网具有较高的负荷密度和较密集的重要负荷,因此在配电网建设过程中普遍采用较高的设计标准,配电网具有良好的绝缘性能和耐雷电过电压能力。同时,该地区处于平原地形,雷暴日天数少,接地条件良好,所以配电网遭受雷电灾害的风险较低。4个评估年内,A配电网的雷电易损性均处于较低水平,因而在对A配电网的防雷规划设计中无需提高现有的执行标准。

B配电网处于丘陵地带,尽管执行了较高的防雷设计标准,接地条件仍不近理想。加上该地区多发雷电灾害,因而B配电网遭受雷电灾害并发生故障的风险较A配电网高。

C、D配电网负荷密度低,供区内配电线路少,配电网遭受直击雷电过电压的故障概率较低。然而,C、D地区雷电事件发生活跃,加上在配电网的设计过程中忽略了配电杆塔接地条件的改善,配电网内负荷水平不高影响了配网设计过程中对其防雷标准的提高。故C、D配电网具有较大的雷电易损性,在进行配电网规划设计过程中需提高相应的防雷设计标准,在配电走廊的选址过程中应尽量避免高接地电阻区域。

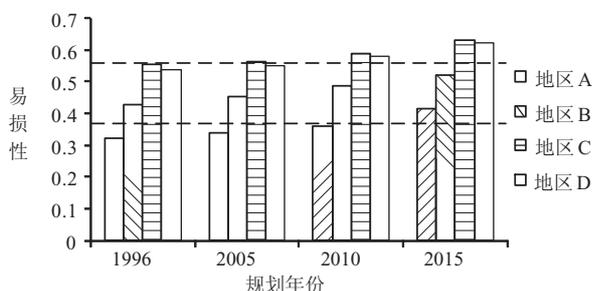


图4 配电网雷电易损性评估结果

纵向比较,图4反映了4地区配电网在1996~2015年间雷电易损性的变化趋势。以C、D配电网为例,两者的雷电易损性分别将在2005年、2010年达到“严重”的程度,主要原因在于2005~2010年间C、D配电网规模迅速扩张,增加了配电网遭受直击雷电故障的概率;同时,C、D配电网雷电绝缘水平低,也加剧了其发生雷电故障的风险。

另外,4地区配电网建设初期,绝缘老化水平处于较低水平,2010年前后配电网绝缘老化概率开始显著增加。计算结果显示,2010年后,在BIL评价指标的主导作用下,配电网发生雷击故障的风险随其绝缘水平的下降明显上升。根据规划远景年配电网的雷电易损性情况,对处于绝缘老化活跃期的配电网进行规划时,应制定相应的配电网防雷改造计划以降低配电网在远景年遭受雷击故障的风险。

## 6 结束语

本文基于层次分析法,提出了一种包括“收资-修正-评估-改进-再评估”5个关键步骤的配电网遭受雷电灾害的易损性评估方法。与现有研究成果相比,文章主要做出以下独特工作:①提出了衡量配电网遭受雷电灾害影响并发生故障风险的雷电易损性指标,并建立了包含3个1级指标和8个2级指标的雷电易损性评价指标体系;②基于概率论和模拟实验法对配电网雷电易损性做出了等级划分;③计及配电网在规划远景年的发展状况和绝缘老化水平,提出了规划远景年评价指标的修正方法。

算例结果显示:采用本文提出的配电网雷电易损性评估方法,不仅能定量反映当前配电网遭受雷电故障的风险,通过对远景年的评价指标的修正亦能动态评估未来配电网存在的雷电故障风险,这对配电网的运行维护计划以及防雷规划决策提供了有力的数据参考。

## 参 考 文 献

- [1] 张利庭. 雷电对配电网安全运行的影响及防范研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [2] Nagaraj Balijepalli, Subrahmanyam S. Venkata, Charles W. Richter, Jr., et al. Distribution System Reliability Assessment Due to Lightning Storms

- [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2153 - 2159.
- [3] Riadh W Y Habash, Voicu Groza. Lightning Risk Assessment of Power Systems [C]. IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2010, Halifax, NS: 1 - 6.
- [4] Gan Chunyu, Zeng Wenlong, Yang Yufeng, et al. Study on Risk Assessment of Lightning Disaster Based on the Lightning Location Information on Campus [C]. Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE, 2010, San Diego, CA: 1 - 3.
- [5] Vilson Luiz Coelho, Adroaldo Raizer, José Osvaldo Saldanha Paulino, et al. Analysis of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1706 - 1712.
- [6] Miyazaki T, Okabe S. Experimental Investigation to Calculate the Lightning Outage Rate of a Distribution System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2913 - 2922.
- [7] 夏清, 徐国新, 康重庆. 抗灾型电力系统的规划 [J]. 电网技术, 2009, 33(3): 1 - 7.
- [8] 徐国新, 夏清, 康重庆. 抗灾型电网规划模式与模型 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 17 - 21.
- [9] 杨方, 孙荣富, 程林等. 基于恶劣气候条件的抗灾型电力系统规划 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 12 - 18.
- [10] IEEE Std 1410 - 2004. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines [S].
- [11] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌等. 雷电流幅值概率计算公式 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 161 - 167.
- [12] Shim E B, Woo J W, Han S O, et al. Lightning characteristics in Korea and lightning performance of power systems [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002; Asia Pacific. IEEE/PES, 2002, 1: 534 - 539.
- [13] 黄兰英. 10kV 配电线路防雷水平分析及提高方法的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [14] IEEE Std 1243 - 1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines [S].
- [15] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [16] 马金福, 冯志伟. 雷击地闪密度与雷暴日数的关系分析 [J]. 气象科学, 2009, 29(5): 674 - 678.
- [17] Zhang Xiang, Gockenbach Ernst, Volker Wasserberg, et al. Estimation of the Lifetime of the Electrical Components in Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 515 - 522.

收稿日期: 2013-07-17

作者简介:

段力铭(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划、微电网运行控制, E-mail: duanlm@ncepu.edu.cn;

刘念(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源与智能配用电系统, 电力系统规划, 电力信息安全, E-mail: nian\_liu@163.com;

刘宗歧(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为先进输变电技术、新能源发电与智能电网, E-mail: liuzq@163.com。

(责任编辑: 林海文)