

DOI: 10.7667/PSPC160058

基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路 综合运行风险评估

邓红雷, 戴 栋, 李述文

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对当前多种气象灾害对架空输电线路的共同影响研究的不足, 提出采用层次分析-熵权组合法综合评估各气象灾害对架空输电线路的影响程度。通过层次分析法确定主观权重, 熵权法确定客观权重, 主客观结合, 并利用最小二乘法组合优化, 确定各风险权重。由此建立了采用风险权重、风险概率、风险后果来表征线路综合运行风险的评估模型。最后, 将该模型应用于某区域电网线路, 通过具体实例验证了该评估模型的可行性。

关键词: 综合运行; 风险评估; 架空输电线路; 层次分析法; 熵权法

Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method

DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of current study of mutual impact on varied meteorological disasters on the overhead transmission line, a comprehensive evaluation on the impact degree of varied meteorological disasters on transmission line based on the proposed hierarchical analysis-entropy weight method is introduced. Where the subjective weight is determined by the analytic hierarchy, the objective weight is determined by the entropy weight method and the risk weight is determined by means of least square method, so the evaluation model for comprehensive operation risk of transmission line with risk weight, risk probability and risk consequence is established naturally. Finally, its feasibility is verified by applying it to transmission lines of some regional power network.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050209 and No. 2011AA05A120).

Key words: comprehensive operation; risk evaluation; overhead transmission line; analytic hierarchy; entropy weight method

0 引言

架空输电线路运行环境恶劣, 时常遭遇覆冰、雷击、强风、鸟害、污秽、山火、泥石流、滑坡沉陷等恶劣气象灾害的影响。随着全球气候变化的日益反常, 气象灾害对输电线路的影响越加显著, 由此引发的线路故障更加频繁, 进而导致的电网安全和稳定性问题日益突出^[1]。

多年来, 国内外对架空输电线路状态监控和运

行风险评估一直非常重视, 多个网省公司现已建成雷电、覆冰、污秽、气象、微风振动等线路运行状态监测相关系统, 根据监测数据, 对线路各种运行风险进行评估。美国电力科学研究院利用 EMTP 程序开发了架空输电线路防雷性能仿真平台, 并利用雷电监测数据进行线路防雷性能评估^[2]。赵淳等基于改进的层次分析法, 建立了“电网→线路→杆塔区段→杆塔”的电网雷害风险评估模型^[3]。Tom 等利用故障树分析法搭建了电力系统覆冰风险评估模型, 实现了输电线路风险、线路断线与杆塔倒塌等情况的有效评估^[4]。朱斌分析了融冰因素对导线冰载荷的影响, 通过实测气象信息、电网运行信息以

及当前监测覆冰厚度等信息建立了输电线覆冰厚度增长预测模型, 并计算了输电线路故障概率^[5]。林铭瀚开发了基于无线 mesh 网络的输电线路山火预警监视系统, 并在福建电网部分区段挂网运行, 为线路的山火预警提供了一种有效的手段^[6]。李长看等遴选了鸟害区域等级的关键影响因子, 将涉鸟故障等级划分为 4 级, 并绘制了涉鸟故障区域及等级分布图^[7]。文习山等建立了基于马尔可夫过程的输电线路绝缘子运行状态评估模型^[8]。段涛等在考虑恶劣天气对输电线路故障概率影响的情况下, 建立了考虑输电线路在线监测数据和当前气象条件的输电线路故障概率的实时评估模型^[9]。宋晓喆等考虑台风天气条件对输电线路运行可靠性的影响, 建立了电网风险评估的预想故障集, 提出了一种台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估方法^[10]。胡文平提出了基于云推理的输变电设备故障率预测模型和电网综合风险评估指标体系^[11]。刘珂宏等根据历史故障与缺陷信息, 建立了输电线路风险评估模型, 推导出了各部件状态量的量化值和输电线路风险评估结果的概率值^[12]。

但现有研究大多是单独针对各个气象灾害进行线路运行风险评估, 而架空输电线路往往延伸数百上千公里, 很多情况下, 线路沿线可能会同时遭受到多种气象灾害的威胁。这些灾害的发生具有较大的不确定性、不相互独立性以及在整个输电系统中的传递性, 如何实现多气象灾害下架空输电线路运行风险的综合性、系统化分析, 成为当前亟待解决的一个问题。

针对上述问题, 本文提出了基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估方法, 建立了相应的风险评估模型, 以便及时了解多气象灾害下线运行的安全水平, 准确把握线路的风险状态。

1 综合风险评估方法理论基础

1.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是针对复杂的多目标决策问题, 将定性与定量分析方法相结合的综合决策方法, 具有定量数据信息需求少、简洁实用等优点。其基本思想是将复杂多目标问题拆分为若干目标, 并据此分解为多指标的若干层次, 通过定性指标和模糊量化方法计算各层次单排序以及综合总排序, 以此解决多目标、多方案优化决策问题^[13]。运用层次分析法解决多目标问题的基本步骤如下。

(1) 递推层次结构的建立

首先把目标决策问题条理化、层次化, 按照属

性的不同将相关的各个因素从高到低分解成若干层次, 形成多层次的指标结构模型。

(2) 各层次判断矩阵的构建

根据本层所有因素对上一层某一因素的相对重要性程度的比较, 通常采用九级标度法为判断矩阵的要素赋值。

(3) 判断矩阵一致性的检验

由于多阶判断的复杂性, 判断矩阵中某些数值可能会出现前后矛盾的情况, 为此需要对判断矩阵进行一致性检验, 可利用下述公式进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

其中: n 表示判断矩阵的阶数; λ_{\max} 表示最大的特征值; RI 表示平均随机一致性指标。

CI 的值越大, 则判断矩阵的一致性越差。且当 $CR < 0.1$ 时, 即可认为判断矩阵具有满意的一致性。在判断矩阵不能通过一致性检验时, 需要对各指标间相互重要性程度重新进行赋值, 直至其通过矩阵一致性检验。

(4) 层次权重的确定

判断矩阵若通过一致性检验, 则其最大特征值对应的特征向量即为该指标相对于上一级指标的重要性排序 ω 。

1.2 熵权法

熵权法是基于信息熵原理提出的一种客观评价指标权重方法^[14]。若某评价指标的信息熵越小, 则表明该指标所提供的信息量越大, 在系统综合评价中所发挥的作用按理应越大, 所赋给的权重值就应该越大^[15]。

假定有一个指标待评价体系, 有 m 个待评价对象, n 个评价指标, 其原始数据可用矩阵 $R_{m \times n}$ 表示, 则应用熵权法评估该指标体系权重的步骤如下。

(1) 原始数据的无量纲化处理

为去除各评估指标单位不同的影响, 需对原始数据进行无量纲化处理。一般可选定每列的最优值(最大值或最小值), 对原始数据进行无量纲化处理, 记结果为矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 数据的归一化处理

为减小数据过大或者过小对评价结果的影响, 需对上述无量纲化处理结果进行归一化处理, 使数据在 $[0, 1]$ 范围内, 记结果为矩阵 $S' = (s'_{ij})_{m \times n}$ 。

(3) 指标熵值的计算

根据熵的定义, 计算各评价指标的熵值如下

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m t_{ij} \ln t_{ij} \quad (3)$$

其中: $t_{ij} = \frac{s'_{ij}}{\sum_{i=1}^m s'_{ij}} (j=1, 2, \dots, n)$, $k = \frac{1}{\ln m}$ 。

(4) 指标熵权的确定

第 j 个评价指标的熵权为

$$\varphi_j = \frac{\alpha_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

其中, α_j 表示第 j 个评价指标的差异系数, 且 $\alpha_j = 1 - H_j (j=1, 2, \dots, n)$ 。

由此可逐个确定各个评价指标的熵权, 确定其在整个评价体系中的权重。

1.3 层次分析-熵权法组合优化

层次分析法是一种主观评价方法, 主要依靠专家经验知识的判断给定并计算得到指标权重, 虽然具有所需数据信息量少、计算简单等优点, 但是无论从层次化结构的建立到判断矩阵的构建, 人为地主观选择、偏好等对评价结果的影响很大, 极易造成决策失误, 且不同专家的评价结果差异性也很大, 难以对评价系统形成共识。而熵权法是一种客观评价方法, 是依据所给定的原始数据信息综合判断而来, 其权重评价结果与被评价指标有直接的关系, 但是易受原始数据影响, 若原始数据存在较大偏差, 将严重影响其评价效果, 所得结果与人们对该评价指标的认识可能出现不一致情况^[16]。

针对单一评价方法的不足, 本文提出将层次分析法和熵权法组合集成, 运用层次分析法确定主观权重, 运用熵法确定客观权重, 主客观结合, 弥补单一方法存在的不足, 并综合各自的优点, 从而提高权重评价结果的准确性^[17]。

通常算法组合的典型方法有幂平均合成法和最优化方法^[18], 本文采用最小二乘法进行评估算法的组合优化。

由层次分析法和熵权法得到的各指标权重分别为 ω_j 、 φ_j , 假设各评估指标的综合权重为 μ_j , 评价指标体系矩阵 R 无量纲化后的矩阵为 S , 则对于某一评价对象来说, 其评价值为

$$f_i = \sum_{j=1}^n \mu_j s_{ij}, j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

对于所有对象的评价指标来说, 基于层次分析法和熵权法的主客观权重的偏差理应越小越好, 建立最小二乘法优化组合权重模型如下

$$\min F(\mu) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{[(\omega_j - \mu_j)s_{ij}]^2 + [(\varphi_j - \mu_j)s_{ij}]^2\} \quad (6)$$

其中, $\sum_{j=1}^n \mu_j = 1$, $\mu_j \geq 0 (j=1, 2, \dots, n)$ 。

利用拉格朗日方法求解上述模型, 即可得到各评估指标的综合权重值。

2 综合运行风险评估方法及其实现

针对多种恶劣气象灾害下日益严峻的架空输电线路运行风险, 本文采用层次分析-熵权组合法, 分析各气象灾害对架空输电线路的影响程度, 同时考虑各风险发生概率以及风险后果, 综合计算多气象灾害下架空输电线路运行风险值, 实现过程如图 1 所示。

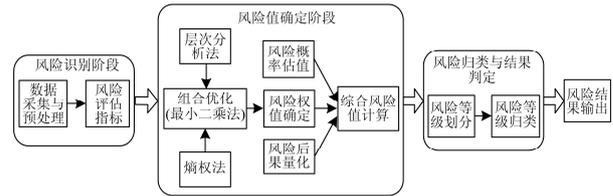


图 1 恶劣气象灾害下架空输电线路运行风险评估模型
Fig. 1 Operating risk evaluation model of overhead transmission line under bad weather disasters

上述评估模型主要包括以下几个阶段:

第一阶段是评估模型的输入阶段, 即风险识别阶段, 包括数据统计分析, 风险评估指标的选择, 评估模型的输入主要集中在这一部分;

第二阶段是综合风险值的计算过程, 包括风险权值的确定以及风险概率估值、风险产生的后果严重程度的量化三个部分;

第三阶段是风险判定阶段, 主要对综合风险值进行分析, 确定风险等级, 输出风险评估结果。

第二阶段即综合风险值的计算, 为风险评估模型的核心部分, 也是本文的主要论述点。架空输电线路综合运行风险值是风险权重、风险发生概率、风险后果严重程度的综合函数, 其计算式为

$$Risk = \sum_{i=1}^n P_i \times C_i \times V_i \quad (7)$$

其中: $Risk$ 表示线路综合运行风险值; P_i 表示某一子风险的发生概率(风险概率); C_i 表示某一子风险发生的后果(风险后果); V_i 表示某一子风险中的相对重要等级(风险权重)。

(1) 风险权值确定

本文采用层次分析-熵权组合法取代传统的层

次分析法计算权重,运用层次分析法确定主客观权重,运用熵权法确定客观全重,将主客观权重综合起来,并采用最小二乘法来优化权重模型,多重组合、逐层推理计算架空输电线路风险权值,形成一种主客观结合、自主优化的权值评估模型。

(2) 风险概率评估

风险概率是指基本风险事件出现的概率,可以根据历史数据、专家经验评估以及数学统计分析计算得出。本文根据历史观测数据,统计一段时间内某气象灾害引发架空输电线路跳闸的次数与线路总跳闸次数的比值,作为该气象灾害的风险概率,用公式表述为

$$P_i = \frac{m_i}{N} \quad (8)$$

其中: m_i 为一段时间内某气象灾害 i 引发的线路跳闸次数; N 为某段时间内线路总跳闸次数。

(3) 风险后果量化

本文充分考虑风险危害程度以及由此造成的社会影响,综合评价风险后果。

线路运行风险后果值采用下式进行计算。

$$C = \beta \times H \quad (9)$$

其中: C 为风险后果值; β 为社会影响系数; H 为危害严重程度分值。

风险危害严重程度分值可根据风险可能导致的负荷减少量来赋值,而社会影响系数则依据风险出现时刻所处的保供电级别进行赋值。本文参照南方某地区电网《电网运行安全风险管理规定》进行赋值,具体见表 1 和表 2。

表 1 架空输电线路运行风险危害严重程度分值

Table 1 Severity scores of overhead transmission line operation risk

序号	危害严重程度	分值
1	地区电网失去稳定或减供负荷 30%以上	3 000 以上
2	地区电网减供负荷 10%~30%	500~3 000
3	地区电网减供负荷 7%~10%	100~500
4	地区电网减供负荷 4%~7%	30~100
5	地区电网减供负荷在 4%及以下	0~30

表 2 架空输电线路运行风险社会影响系数

Table 2 Social influence coefficient of overhead transmission line operation risk

序号	风险发生所处时期	取值
1	特级保供电	2
2	一级保供电	1.6
3	二级保供电	1.4
4	特殊时期保供电	1.2
5	一般时期保供电	1

(4) 风险等级划分

根据架空输电线路运行风险值的大小,参照南方某地区电网《电网运行安全风险管理规定》,将评估得到的线路综合运行风险值分为五级,即 I、II、III、IV、V,对应的等级分值如表 3 所示。

表 3 架空输电线路运行风险等级划分

Table 3 Hierarchy of overhead transmission line operation risk

风险等级	风险影响程度	风险值
I 级风险	特大损失	风险值 $\geq 1 000$
II 级风险	重大损失	$300 \leq$ 风险值 $< 1 000$
III 级风险	较严重损失	$60 \leq$ 风险值 < 300
IV 级风险	较大损失	$20 \leq$ 风险值 < 60
V 级风险	较小损失	风险值 < 20

3 应用案例

为了阐述基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估模型的具体实现过程,本文将在实际运行数据的基础上进行展示。恶劣气象灾害下架空输电线路运行风险主要有覆冰、山火、雷击、大风、外力破坏(包括泥石流、滑坡等)等。某区域电网近 5 年 220 kV 和 500 kV 线路跳闸情况如表 4 所示。

表 4 某区域电网架空输电线路近 5 年跳闸分布情况

Table 4 A regional power grid trip distributions of overhead transmission lines in recent five years

年份	覆冰	山火	雷击	大风	外力破坏	合计
2009	2	10	47	1	3	63
2010	1	30	73	1	2	107
2011	9	15	31	2	3	60
2012	6	10	45	1	2	64
2013	7	11	48	4	2	72

(1) 层次分析-熵权法确定风险权重

① 层次分析法确定权重

根据专家经验知识,主观意识上认为各风险因素给线路带来的危害相对性大小排序为:雷击 $>$ 覆冰 $>$ 山火 $>$ 外力破坏 $>$ 大风。参照九级标度法,对风险因素相对重要性程度进行两两对比,如表 5 所示。

表 5 线路运行风险因素相对重要性程度对比

Table 5 Contrast of the degree of relative importance factor of overhead transmission line operation risk

对比	覆冰	山火	雷击	大风	外力破坏
覆冰	1	3	1/3	6	5
山火	1/3	1	1/4	5	4
雷击	3	4	1	8	7
大风	1/6	1/5	1/8	1	1/2
外力破坏	1/5	1/4	1/7	2	1

据此,建立判断矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 6 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/4 & 5 & 4 \\ 3 & 4 & 1 & 8 & 7 \\ 1/6 & 1/5 & 1/8 & 1 & 1/2 \\ 1/5 & 1/4 & 1/7 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用 Matlab 解得该矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.2369$, 其对应的特征向量为 $\zeta = (0.4541, 0.2546, 0.8458, 0.0662, 0.0962)$ 。

检验判断矩阵的一致性。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.2369 - 5}{5 - 1} = 0.0592 \quad (11)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0592}{1.12} = 0.0528 < 0.1 \quad (12)$$

说明判断矩阵满足一致性要求。

因此, 各风险指标的权重为 $\omega = \zeta = (0.4541, 0.2546, 0.8458, 0.0662, 0.0962)$, 即层次分析法认为各风险指标排序为: 雷击 > 覆冰 > 山火 > 外力破坏 > 大风。

② 熵权法确定权重

根据前述步骤, 首先对表 5 里面的原始数据进行无量纲化处理, 得到矩阵

$$S = \begin{bmatrix} 0.2222 & 0.3333 & 0.6438 & 0.2500 & 1 \\ 0.1111 & 1 & 1 & 0.2500 & 0.6667 \\ 1 & 0.5000 & 0.4247 & 0.5000 & 1 \\ 0.6667 & 0.3333 & 0.6164 & 0.2500 & 0.6667 \\ 0.7778 & 0.3667 & 0.6575 & 1 & 0.6667 \end{bmatrix} \quad (13)$$

对上述矩阵进行归一化处理得

$$S' = \begin{bmatrix} 0.0149 & 0.0224 & 0.0432 & 0.0168 & 0.0671 \\ 0.0075 & 0.0671 & 0.0671 & 0.0168 & 0.0447 \\ 0.0671 & 0.0335 & 0.0285 & 0.0335 & 0.0671 \\ 0.0447 & 0.0224 & 0.0414 & 0.0168 & 0.0447 \\ 0.0522 & 0.0246 & 0.0441 & 0.0671 & 0.0447 \end{bmatrix} \quad (14)$$

计算各风险指标的熵值为 $H = (0.8683, 0.9324, 0.9768, 0.8867, 0.9873)$ 。

由此, 计算各风险指标的熵权为 $\varphi = (0.3778, 0.1939, 0.0667, 0.3252, 0.0364)$ 。

即熵权法认为各风险指标排序为: 覆冰 > 大风 > 山火 > 雷击 > 外力破坏。

③ 最小二乘法组合优化

利用最小二乘法对上述两种方法进行组合优化。对最小二乘法组合优化模型求解, 作拉格朗日函数

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{[(\omega_j - \mu_j)s_{ij}]^2 + [(\varphi_j - \mu_j)s_{ij}]^2\} + 4\lambda(\sum_{j=1}^n \mu_j - 1) \quad (15)$$

进一步求解, 可得 $\mu = (0.3482, 0.1353, 0.3969, 0.0962, 0.0234)$

即经二乘法组合优化, 认为各风险指标排序为: 雷击 > 覆冰 > 山火 > 大风 > 外力破坏。

为了便于比较, 表 6 给出了层次分析法、熵权法以及最小二乘法组合优化排序结果。

表 6 架空输电线路运行风险因素权重排序结果对比

Table 6 Factor weight sorting result contrast of overhead transmission line operation risk

相对重要性程度	层次分析法	熵权法	层次分析-熵权组合法
覆冰	2	1	2
山火	3	3	3
雷击	1	4	1
大风	5	2	4
外力破坏	4	5	5

观察表 6, 对比熵权法与另外两种评判结果, 雷击和大风的顺序出现了较大变动, 而根据实际运行经验, 雷击的危害是大于大风的危害, 应该是受原始数据记录不全面或者出现偏差的影响而导致判断出现差错。而对于层次分析法, 大风和外力破坏顺序有所变动, 分析应该是由于专家的主观偏好造成外力破坏在权重对比中大于大风。

从上可以看出, 熵权法充分运用指标中的数据信息, 体现出的是完全客观的权重数值, 而层次分析法则完全体现了专家的主观人为因素。单纯的熵权法和层次分析法, 无法体现指标的实际重要程度和意义, 而将熵权法与 AHP 法相结合, 使权重不仅包含数据本身信息, 还能体现出专家的主观判断, 调和了层次分析法专家主观偏好以及熵权法客观数据偏差这两方面的影响, 其评定结果对风险因素排序做了进一步调整。因此, 相对于层次分析法和熵权法分别进行权重评定的结果, 经最小二乘法组合优化的层次分析-熵权法得到的评价结果更具合理性。

(2) 风险概率的评估

如表 5 所示, 2013 年该区域电网线路总跳闸次数为 72 次, 其中覆冰、山火、雷击、大风、外力破坏跳闸次数分别为 7、11、48、4、2 次, 对应的各气象灾害的发生概率分别为 9.72%、15.28%、66.67%、5.56%、2.78%。

(3) 风险后果量化

假定覆冰灾害发生时, 估计将导致线路减负荷 12%, 参照表 3 并做差值处理, 赋予分值 750 分。同时假定该区域内线路覆冰发生时处于二级保供电时期, 参照表 4, 赋予社会影响因素 1.4。

类似地, 对于山火, 分别取值 1 000 分、1.2; 对于雷击, 取 400 分、1.4; 对于大风, 取 80 分、1; 对于外力破坏, 取 650 分、1.6。

(4) 线路综合风险值的计算及风险等级的划定

以上分别确定了风险概率、风险权重和风险后果, 根据图 1 线路综合运行风险评估模型以及相应的计算方法, 可得到该区域内线路的综合风险值为

$$Risk = \sum_{i=1}^n P_i \times C_i \times V_i = 209.63 \quad (16)$$

因此, 该年各类恶劣气象灾害下该区域内架空输电线路的综合风险评估值为 209.63 分, 对应于表 5 中的 III 级风险, 需要加强该地区线路运行风险的防范。

以上算法是以年度为单位进行评估, 而每年中各个时期架空输电线路所遭受的气象灾害有所区别, 进一步地, 也可以季度甚至月度为单位, 对线路运行风险细化评估。

考虑到线路灾害具有季节性和区域性, 而且大多数灾害不具有并发性, 如华南地区 6-7 月是雷击跳闸高峰, 8 月中旬以后减少; 春季(2~4 月份)发生火灾次数最多, 3 月份是森林火灾发生次数最多、危害最严重的月份; 覆冰灾害主要发生在冬季。2013 年虽然跳闸次数较多, 但是大部分是由雷击、山火和覆冰引发的跳闸, 灾害持续时间占全年的时间不长, 其中雷击占到了概率的 66.67%, 因此该线路运行风险评估主要以雷击风险评估为主, 综合其他风险评估为辅, 而雷击风险后果分值为 400, 社会影响因素为 1.4, 所以总体综合风险分值为 209.63, 处在 III 级风险区, 是合理和可信的。

4 结论

针对恶劣气象灾害下架空输电线路运行过程中存在的风险, 本文提出了基于层次分析-熵权组合法的综合运行风险评估方法, 有效地评估了各气象灾害对架空输电线路的影响程度, 同时考虑各风险发生概率, 并量化风险后果, 从而形成了主客观结合、自主优化、考虑全面的综合风险评估模型, 实现了对架空输电线路运行风险的综合性、系统化的分析, 提高了线路风险评估的准确性和输电线路运行的可靠性, 有利于风险的分析、管理和决策。

参考文献

- [1] 罗日成, 李稳, 陆毅, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的 1000 kV 输电线路雷电绕击与反击识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 232-238.
LUO Richeng, LI Wen, LU Yi, et al. Identification method of shielding failure and back striking over-voltage of 1 000 kV transmission line based on Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 232-238.
- [2] MCDERMOTT T E, LONGO V J. Advance computational methods in lightning performance-the EPRI lightning protection design workstation[C] // Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE Power Engineering Society. New York, USA: IEEE, 2000: 48-55.
- [3] 赵淳, 陈家宏, 王剑, 等. 电网雷害风险评估技术研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3012-3021.
ZHAO Chun, CHEN Jiahong, WANG Jian, et al. Research on technology of lightning disaster risk assessment for power system[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3012-3021.
- [4] TOM B, GUTWIN P. Application of BCTC standardized risk estimation model to assess risk due to ice storms[C] // 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames: Iowa State University, 2004: 970-974.
- [5] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 79-84.
ZHU Bin, PAN Lingling, ZOU Yang, et al. Fault probability calculation of transmission line considering ice melting factors[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 79-84.
- [6] 林铭瀚, 胡永洪, 薛毓强, 等. 基于 mesh 网络的输电线路山火预警监视系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 134-138.
LIN Minghan, HU Yonghong, XUE Yuqiang, et al. Research and application of forest fire early-warning and monitor system based on wireless mesh network for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 134-138.
- [7] 李长看, 卢明, 庞锴, 等. 河南输电线路涉鸟故障分布特征及分级研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 48-54.
LI Changkan, LU Ming, PANG Kai, et al. Distribution characteristics and classification of bird fault in henan transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 48-54
- [8] 文习山, 蓝磊, 蒋日坤. 采用 Markov 模型的输电线路

- 及绝缘子运行风险评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1952-1959.
WEN Xishan, LAN Lei, JIANG Rikun. Operating risk assessment for transmission and line insulators using markovmodel[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1952-1959.
- [9] 段涛, 罗毅, 施琳, 等. 计及气象因素的输电线路故障概率的实时评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 59-67.
DUAN Tao, LUO Yi, SHI Lin, et al. A real-time fault probability evaluation model of transmission line considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 59-67.
- [10] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
SONG Xiaozhe, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [11] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.
- [12] 刘珂宏, 刘亚东, 盛戈峰, 等. 基于输电线路全工况信息的风险评估方法[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 23-28.
LIU Kehong, LIU Yadong, SHENG Gehao, et al. All conditions information based risk assessment method for transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 23-28.
- [13] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [14] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
ZHANG Sui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research during the 10 th Five-Year of China[J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7(1): 34-42.
- [15] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.
NIE Hongzhan, LÜ Pan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.
- [16] 费智聪. 熵权-层次分析法与灰色-层次分析法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
FEI Zhicong. Research on entropy weight-analytic hierarchy process and grey-analytic hierarchy process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [17] 苏为华, 陈骥, 朱发仓, 等. 综合评价技术的扩展与集成问题研究[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [18] 毛定祥. 一种最小二乘意义下主客观评价一致的组人评价方法[J]. 中国管理科学, 2002, 10(5): 95-97.
MAO Dingxiang. A combinational evaluation method resulting in consistency between subjective and objective evaluation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(5): 95-97.

收稿日期: 2016-01-11; 修回日期: 2016-03-24

作者简介:

邓红雷(1975-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力设备在线监控与故障诊断的研究; E-mail: denghl@scut.edu.cn

戴 栋(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能输变电关键技术、气体放电、非线性电路与系统等; E-mail: ddai@scut.edu.cn

李述文(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事输变电设备在线监控系统的研究。

(编辑 葛艳娜)