

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.014

基于综合集成赋权法的输电线路动态综合评估

孙国强¹, 朱超¹, 卫志农¹, 孙永辉¹, 倪明², 过浩¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 为更好地掌握输电线路的运行状态, 需要准确地对其进行综合评估。创建一种基于综合集成赋权法的架空输电线路动态综合评估模型, 模型的评估流程: 首先根据评价指标的重要性用序关系法对各指标进行主观赋权; 然后采用拉开档次法再次对指标进行客观赋权, 并计算线路的综合评价函数值; 最后根据综合评价函数值对架空输电线路的运行状态进行综合评估。采用该模型对某条架空输电线路进行实证分析和评估, 并将评估结果与实际的监控情况进行比较, 结果表明该方法具有一定的可靠性和可行性。

关键词: 架空输电线路; 动态综合评估; 综合集成赋权法; 主观权重; 客观权重

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)03-0272-06

Dynamic comprehensive evaluation of transmission lines based on integrated weighting method

SUN Guoqiang¹, ZHU Chao¹, WEI Zhinong¹, SUN Yonghui¹, NI Ming², GUO Hao¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to obtain the operation state of transmission lines, comprehensive evaluation of the lines is needed. This paper proposes a dynamic comprehensive evaluation model for overhead transmission lines based on the integrated weighting method. The evaluation process is as follows: first, the order relation method is used to determine the subjective weight of each index according to the importance of each index; second, the scatter degree method is used to calculate the objective weight of each index and the comprehensive evaluation function value of the line; finally, the operation state of the overhead transmission line is evaluated according to the comprehensive evaluation function value. The model was applied to evaluation of an overhead transmission line, and the evaluation results are compared with the actual results. The results show that the model is effective and feasible.

Key words: overhead transmission line; dynamic comprehensive evaluation; integrated weighting method; subjective weight; objective weight

架空输电线路是电力系统的重要组成部分, 其运行状态的好坏将会对整个系统运行的可靠性产生较大影响。目前, 有关架空输电线路状态评估的研究已经取得了一定的研究成果。文献[1-4]基于线路元件可靠性模型对架空输电线路进行了研究, 其分析过程由状态选择、状态估计和指标计算3个步骤组成。文献[5-9]建立相对于线路元件可靠性的线路系统风险评估模型, 是一种短时间尺度的评估模型。它通过将时变的线路元件故障率模型代入线路系统风险评估模型中得到线路系统风险评估指标, 以风险评估指标值表征线路的运行状况好坏。然而, 可靠性模型和风险评估模型都是以单一的线路元件模型代替整个评估系统, 难以完全体现架空输电线路这样的多层次多指标的复杂系统的真实状态。韩富春等^[10]提出一种基于贝叶斯网络的架空输电线路状态评估模型, 它不仅能够得出架空输电线路及其各部件的运行状态概率, 而且还可以利

收稿日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51277052, 51107032, 61104045)

作者简介: 孙国强(1978—), 男, 江苏无锡人, 副教授, 博士, 主要从事电力系统运行与分析研究。E-mail: hhusunguoqiang@163.com

用贝叶斯网络的双向推理技术方便地求解各部件对整条线路运行状态的影响。但是,基于贝叶斯网络的评估模型,是一种在概率统计基础上的评估模型,它对原始数据的要求较高,且在模型训练时,容易陷入局部最优解。

基于此,本文提出了一种基于综合集成赋权法的架空输电线路动态评估模型。首先将线路动态评估转化为静态评估,然后利用序关系法求出各评价指标和线路单元的主观权重,再用拉开档次法求出它们的客观权重,最后采用线性评价函数计算线路综合评价函数值并根据综合评价函数值对线路运行状态进行评估。

1 架空输电线路评估指标体系的建立

1.1 线路状态评估指标体系的建立

线路状态评估指标体系的建立是进行综合评价的前提和基础^[11-12]。笔者根据2007年颁布实施的Q/GDW 173—2008《架空输电线路状态评价导则》^[13]和DL/T 1006—2006《架空输电线路巡检系统》^[14]中对架空输电线路的相关规定,将基础、杆塔、导地线、绝缘子、附属设施这5个主要的线路单元纳入架空输电线路状态评估指标体系中,指标体系如表1所示。

1.2 数据预处理

架空输电线路状态评估指标体系复杂,对各指标的监测主要依靠线路巡检和在线监测。为了将巡检数据与在线监测数据融合,需要对一些定性数据进行量化处理。

文献[13-14]中对线路状态量的劣化程度进行了0~10的扣分,扣分越多表明状态量的劣化程度越严重,指标的状态越差。基于此,将收集到的巡检数据与评价标准进行对比,将其量化为0~10之间的4段数值:[0,2)为正常状态,[2,4)为注意状态,[4,8)为异常状态,[8,10]为严重状态。

为了方便计算与分析,将所有指标统一为极小型指标,即指标值越小,线路的状态越好。对于极大型指标,采用式(1)进行指标一致化处理。

$$x' = M_x - x \quad (1)$$

式中: M_x ——指标 x 的允许上界,为方便公式书写,转化为极小型后 x' 仍记为 x 。

采用线性比例法对各指标进行无量纲化处理:

$$x^* = \frac{x}{x_s} \quad (2)$$

式中: x_s ——指标 x 的最小值、最大值或平均值等。

2 评估指标权重的确定

如何确定权重系数是综合评价的核心问题。笔者采用能同时考虑主客观因素的综合集成赋权法:首先利用序关系法求取各评价指标以及线路单元的主观权重;然后用拉开档次法确定它们的客观权重。

2.1 利用序关系法确定主观权重

序关系法是一种无需一致性检验的新方法,是一种先对评价指标进行定性排序,再对相邻指标进行重要性判断,最后进行定量计算的主观赋权法^[15]。该方法的优点在于无需构成判断矩阵,也无需进行一致性检验,与构造层次分析法判断矩阵相比计算量成倍减少,其计算过程如下:

a. 确定序关系。通过指标的序关系分析与位置编号调整,确定对于某评价准则具有的指标序关系为 $x_1 > x_2 > \dots > x_m$,则称各评估指标之间按“>”确定了序关系,其中, m 为指标数。

表1 架空输电线路状态评估指标体系
Table 1 State evaluation index system of overhead transmission line

子系统	子系统指标
架空输电线路状态评估指标体系	基础 $s_1^{(1)}$ - 杆塔基础表面损坏情况 x_1 - 基坑护坡及防洪设施损坏情况 x_2 - 金属基础锈蚀情况 x_3 - 防碰撞设施情况 x_4
	杆塔 $s_2^{(1)}$ - 杆塔倾斜情况 x_5 - 杆塔和钢管塔构建缺失情况 x_6 - 铁塔、钢管杆锈蚀情况 x_7 - 拉线锈蚀损伤情况 x_8 - 混凝土杆裂纹 x_9
	导地线 $s_3^{(1)}$ - 腐蚀、断股、损伤和闪络烧伤情况 x_{10} - 异物悬挂情况 x_{11} - 异常振动、舞动、覆冰情况 x_{12} - 导线弧垂 x_{13}
	绝缘子 $s_4^{(1)}$ - 绝缘子积污情况 x_{14} - 绝缘子串倾斜情况 x_{15} - 瓷绝缘子釉面破损情况 x_{16}
	附属设施 $s_5^{(1)}$ - 杆号牌缺损情况 x_{17} - 防雷设施损坏情况 x_{18} - 防鸟设施损坏情况 x_{19} - 爬梯、护栏缺损情况 x_{20}

b. 确定相邻指标之间的相对重要程度。设专家关于评价指标 x_{j-1} 与 x_j 的重要程度之比 r_j 的理性判断为

$$r_j = \frac{w_{j-1}}{w_j} \quad (j = m, m-1, \dots, 2) \quad (3)$$

式中: w_j ——权重系数。其中 r_j 的赋值可参考表 2。

c. 权重系数 w_j 的计算。若专家给出对 r_j 理性判断后的赋值, 则:

$$w_j = (1 + \sum_{j=2}^m \prod_{k=j}^m r_k)^{-1} \quad (4)$$

2.2 利用拉开档次法确定客观权重

由表 1 可知, 每一条架空输电线路都可以作为一个大系统, 该系统共有 5 个子系统, 且每个子系统又对应着数目不等的状态量指标。

a. 现取 n 个大系统: $S_1, S_2, \dots, S_n$, 每个大系统均由基础、杆塔、导地线、绝缘子、附属设施这 5 个子系统构成。

b. n 个大系统的观察数据: $\{x_{ij}^{(1,t)}\}$ 表示第 i 个大系统第一层次的第 t 个子系统 $s_t^{(1)}$ 中第 j 项评价指标的观测值。这些观测值均假定为极小型、无量纲化后的标准观测值。

取第 i 条架空输电线路第 t 个子系统的指标观测值 $x_{i1}^{(1,t)}, x_{i2}^{(1,t)}, \dots, x_{im_t}^{(1,t)}$ 的线性加权函数为综合评价函数:

$$y_i^{(1,t)} = w_1 x_{i1}^{(1,t)} + \dots + w_{m_t} x_{im_t}^{(1,t)} = \mathbf{w}_{m_t}^T \mathbf{x}_i^{(1,t)} \quad (5)$$

式中: m_t ——第 t 个子系统的指标数目, $m_t = 1, 2, \dots, 5$; $\mathbf{w}_{m_t} = (w_1, w_2, \dots, w_{m_t})^T$ ——序关系法求得的第 t 个子系统的指标主观权重。

记

$$\mathbf{Y}^{(1,t)} = (y_1^{(1,t)}, y_2^{(1,t)}, \dots, y_n^{(1,t)})^T \quad (6)$$

$$\mathbf{X}^{(1,t)} = (\mathbf{x}_1^{(1,t)}, \mathbf{x}_2^{(1,t)}, \dots, \mathbf{x}_n^{(1,t)})^T \quad (7)$$

则有

$$\mathbf{Y}^{(1,t)} = \mathbf{w}_{m_t}^T \mathbf{X}^{(1,t)} \quad (8)$$

$\mathbf{x}_1^{(1,t)}, \mathbf{x}_2^{(1,t)}, \dots, \mathbf{x}_n^{(1,t)}$ 在 $\mathbf{X}^{(1,t)}$ 上的差异性可用 $y_i^{(1,t)}$ 的总离差平方和表示:

$$\max \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{(1,t)} - \bar{y}^{(1,t)})^2 \quad (9)$$

由于对原始数据已进行过标准化处理, 所以有 $\bar{y}^{(1,t)} = 0$ 。从而有

$$\max \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{(1,t)})^2 = \mathbf{w}_{m_t}^T \mathbf{H}^{(1,t)} \mathbf{w}_{m_t} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{H}^{(1,t)} = \mathbf{X}^{(1,t)} (\mathbf{X}^{(1,t)})^T$$

式中: $\mathbf{H}^{(1,t)}$ ——实对称矩阵。这里限定 $\mathbf{X}^{(1,t)} (\mathbf{X}^{(1,t)})^T = 1$, 求式 (10) 的最大值, 也就是选择 $\mathbf{w}_{m_t}$, 使得:

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{w}_{m_t}^T \mathbf{H}^{(1,t)} \mathbf{w}_{m_t} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{w}_{m_t}^T \mathbf{w}_{m_t} = 1 \\ & \mathbf{w}_{m_t} > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

当 $\mathbf{w}_{m_t}$ 为 $\mathbf{H}^{(1,t)}$ 的最大特征值所对应的标准特征向量时, 式 (11) 取得最大值, 求得新的指标权重 $\mathbf{w}_{m_t}'$ 即为用拉开档次法求得的第 t 个子系统的指标客观权重。需要注意的是, 用拉开档次法求得的客观权重 $\mathbf{w}_{m_t}'$ 不具有“可继承性”, 即随着指标值 $\mathbf{X}^{(1,t)}$ 的变化而变化。

表 2 r_j 赋值参考

Table 2 Reference table for assignment of r_j

r_j	说明
1.0	指标 x_{j-1} 与指标 x_j 具有相同的重要性
1.2	指标 x_{j-1} 比指标 x_j 稍微重要
1.4	指标 x_{j-1} 比指标 x_j 明显重要
1.6	指标 x_{j-1} 比指标 x_j 强烈重要
1.8	指标 x_{j-1} 比指标 x_j 极端重要

3 架空输电线路动态综合评估

3.1 线路静态综合评估

根据表1,以某地区 n 条架空输电线路为评估对象,分别记为 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。设某段时间内,这 n 条架空输电线路的指标观测值不再变化,分别对这 n 条输电线路及其子系统进行静态综合评估^[16]。

3.1.1 第一层子系统 $s_i^{(1)}$ 的综合评价函数

在建立综合评价函数之前,首先需要对各指标进行权化处理^[17],即令:

$$x_{ij}^{*(1,t)} = w_j^{(1,t)} x_{ij}^{(1,t)} \quad (12)$$

式中: $w_j^{(1,t)}$ ——式(4)求出的评估指标主权重。

仍然用指标 $x_{i1}^{*(1,t)}, x_{i2}^{*(1,t)}, \dots, x_{im_i}^{*(1,t)}$ 的线性函数作为子系统 $s_i^{(1)}$ 的综合评价函数。 $b_j^{(1,t)}$ 是待定常数,为利用拉开档次法求出的 $x_{ij}^{*(1,t)}$ 的客观权重,令:

$$y_i^{(1,t)} = \sum_{j=1}^{m_i} b_j^{(1,t)} x_{ij}^{*(1,t)} \quad (13)$$

$$\mathbf{b}^{(1,t)} = (b_1^{(1,t)}, \dots, b_{m_i}^{(1,t)})^T \quad (14)$$

$$\mathbf{A}^{(1,t)} = \begin{bmatrix} x_{11}^{(1,t)} & \cdots & x_{1m_1}^{(1,t)} \\ \vdots & & \vdots \\ x_n^{(1,t)} & \cdots & x_{nm_i}^{(1,t)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

则式(13)可简写成

$$y_i^{(1,t)} = \mathbf{A}^{(1,t)} \mathbf{b}^{(1,t)} \quad (16)$$

按拉开档次法可求得 $\mathbf{b}^{(1,t)}$ (即取 $\mathbf{b}^{(1,t)}$ 为正定矩阵 $\mathbf{H}^{(1,t)} = (\mathbf{A}^{(1,t)})^T \mathbf{A}^{(1,t)}$ 的最大特征值所对应的标准特征向量)。将 $\mathbf{b}^{(1,t)}$ 带入式(13),即可求得各个子系统 $s_i^{(1)}$ 的综合评价函数值 $y_i^{(1,t)}$ 。

3.1.2 大系统 S_i 的综合评价函数^[18]

在利用子系统综合评价函数值 $s_i^{(1)}$ 建立其大系统 S_i 的综合评价函数之前,仍需要对 $y_i^{(1,t)}$ 进行权化处理,即令 $y_i^{*(1,t)} = w_i^{(1,t)} y_i^{(1,t)}$, $w_i^{(1,t)}$ 是与 $y_i^{(1,t)}$ 相对应的权化系数,其意义是表征子系统 $s_i^{(1)}$ 相对于大系统的重要性程度。令系统 S_i 的综合评价函数为

$$Y_i = \sum_{t=1}^5 b_t y_i^{*(1,t)} \quad (17)$$

式中: b_t ——待定常数; $y_i^{*(1,t)}$ ——子系统 $s_i^{(1)}$ 的综合评价函数值。

仿 $b_j^{(1,t)}$ 求得 b_t , 将 $y_i^{*(1,t)}$ 代入式(17)即得第 i 个大系统 S_i 的综合评价函数值 Y_i 。

3.2 线路动态综合评价

在工程实际中,架空输电线路的指标观测值是随着时间而变化的,即它是一个时序的指标。那么对架空输电线路进行综合评估就需要考虑时间因素。这种在静态评估基础上加入时间因素的电力综合评估称为动态综合评估。

如果将某段时间($t_0 \sim T$)分为 k 个时间段: $(t_0 \sim t_1), (t_1 \sim t_2), \dots, (t_{k-1} \sim T)$, 在每个时间段内,指标数据不再变化,那么就可以将($t_0 \sim T$)时间内的线路动态评估看成是由 k 个静态评估组成的。然后在这 k 个时间段内,分别对架空输电线路进行静态综合评估。这样就把动态综合评估转化为静态综合评估问题。

3.3 基于综合评价函数值的线路状态评估

由于架空输电线路各指标值均已无量纲化,且各指标权重都是标准化权重(即每个子系统的指标权重之和为1),所以求得的综合评价函数值也应该是一个0~1之间的数值,并且它是一个极小型的数,即数值越小,线路的总体运行状态越好。

$Q/GDW 173-2008$ 《架空输电线路状态评价导则》^[13]中将线路的运行状态划分为正常、注意、异常和严重4种状态。本文尝试将综合评价函数值与这4种运行状态联系起来。参考1.2节定性数据定量化的方法,将线路综合评价函数值在0~1之间划分为4段: $[0, 0.2)$ 、 $[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.8)$ 、 $[0.8, 1.0)$, 每一段数值分别对应线路的正常状态、注意状态、异常状态和严重状态。

4 算例分析

运用所提出的评估模型对江苏省某110 kV架空输电线路进行动态综合评估。设该条线路第一层共有5个子系统,分别为 $s_1^{(1)}$ 、 $s_2^{(1)}$ 、 $s_3^{(1)}$ 、 $s_4^{(1)}$ 、 $s_5^{(1)}$,第二层共有20项评价指标,指标体系如表1所示。

取某时间段($t_0 \sim T$)的数据,根据1.2节所述内容对数据进行预处理,归一化为极小型数据,并进行无量纲化处理。应用式(3)、式(4)建立基于序关系法的线路评估指标主观权重,分别为 $\omega_1 = (0.2609, 0.2609, 0.2603, 0.2173)$ 、 $\omega_2 = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$ 、 $\omega_3 = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$ 、 $\omega_4 = (0.4118, 0.2941, 0.2941)$ 、 $\omega_5 = (0.2728, 0.2728, 0.2272, 0.2272)$ 。

根据3.1.1节计算各子系统的综合评价函数值,由于是动态评估,所以每个采样时刻的评估值都不相同。再次应用式(3)、式(4)的序关系法建立子系统的主观权重分别为:0.1882、0.2258、0.2258、0.2258和0.1344。最后,根据3.1.2节和3.2节,计算整个大系统在时间段($t_0 \sim T$)内的综合评价函数值 Y_t 。

分别采用序关系法、拉开档次法和本文方法对上述算例中的架空输电线路进行动态综合评估,评估结果如图1所示。

由图1可以看出,采用序关系法和本文方法得到的综合评价函数值处于0~0.2之间,按3.3节所述,线路处于正常运行状态。而采用拉开档次法的评估结果却表明线路处于注意状态。根据架空输电线路在线监测平台的预警系统可知,虽然在评估时间段内,某些指标值出现了较大幅度的变化,但各项监测指标仍处于正常范围,所以整条架空输电线路是正常运行状态。

采用拉开档次法进行综合评估之所以会产生错误的评估结果,是因为采用单纯的拉开档次法计算综合评价函数值时,默认所有的指标权重是一样的,即认为所有的指标一样重要,这就造成了某些相对来说不重要,但是其变化程度比较大的指标,会对评估结果产生较大影响。

序关系法虽然能够依照指标的重要程度,人为地对其赋予权重,但是相比于本文方法,它对评价指标仅进行了一次赋权。从图1的评估结果可以看出,它的评估值变化幅度不大,无法拉开被评价对象的差异,且评估结果过于保守。

笔者提出的综合集成赋权法,既能够根据指标的重要性程度,对其赋予权重,避免了一些不重要的指标对评价结果产生的影响,又能拉开被评价对象之间的差异,使其便于比较。通过分析微气象在线监测数据(图2),发现由于突然的气象条件变化,风速突然增大,引起导线弧垂以及杆塔倾斜度、绝缘子风偏角等指标数据的变化,而这些变化综合作用的结果都能够在文中的线路动态综合评估模型中反映出来,这正是图1中曲线尾部陡然升高的原因,从而证明了本文方法的敏感性和实用性。

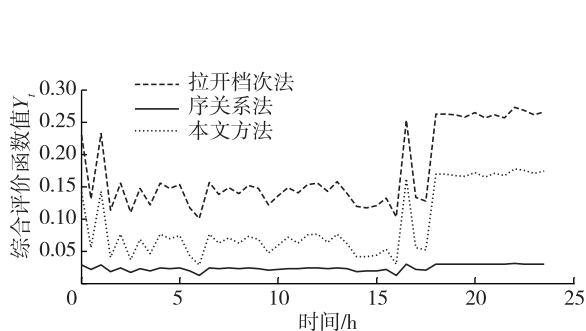


图1 对某地区架空输电线路的综合评估

Fig. 1 Comprehensive evaluation results of overhead transmission lines in a certain area

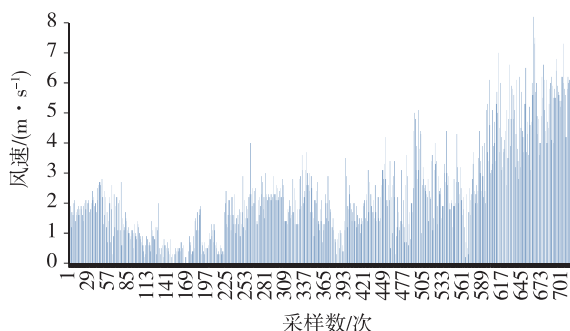


图2 线路微气象在线监测数据

Fig. 2 Micrometeorological online monitoring data of lines

5 结 语

创建一种基于综合集成赋权法的架空输电线路动态综合评估模型,并对该模型进行实例分析验证,结果表明该模型能有效地综合评估各指标,既能对架空输电线路各线路单元进行动态评估,又能综合地评估整条架空输电线路,对指标数据是敏感的。

参考文献:

- [1] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 赵渊,谢开贵.电网概率风险评估中元件可靠性参数的不确定性分析[J].电力系统自动化,2011,35(4):6-11.(ZHAO Yuan,XIE Kaigui.Uncertainty of reliability parameters in probability risk assessment of bulk power systems[J].Automation of Electric Power Systems,2011,35(4):6-11.(in Chinese))
- [3] 孙元章,刘海涛,程林.运行可靠性在线短期评估方案[J].电力系统自动化,2008,32(3):4-8.(SUN Yuanzhang,LIU Haitao,CHENG Lin.A scheme for online Short-term operational reliability evaluation[J].Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):4-8.(in Chinese))
- [4] 汲国强,张伯明,吴文传.一种适用于可靠性评估的电网设备时变停运模型[J].中国电机工程学报,2013,33(1):56-62.(JI Guoqiang,ZHANG Boming,WU Wenchuan.A new time-varying component outage model for power system reliability analysis[J].Proceedings of the CSEE,2013,33(1):56-62.(in Chinese))
- [5] 曹昕瑀,卫志农,孙国强.考虑电网结构脆弱性的配电网网架优化规划[J].河海大学学报(自然科学版),2015,42(2):178-183.(CAO Xinyu,WEI Zhinong,SUN Guoqiang.Planning for distribution network structure optimization in consideration of its vulnerability[J].Journal of Hohai University(Nature Science),2015,42(2):178-183.(in Chinese))
- [6] 吴文传,宁辽逸,张伯明.一种考虑二次设备模型的在线静态运行风险评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(7):10-15.(WU Wenchuan,NING Liaoyi,ZHANG Boming.Online operation risk assessment for power system static security considering secondary devices models[J].Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):10-15.(in Chinese))
- [7] 宁辽逸,吴文传,张伯明.电力系统运行风险评估中元件时变停运模型分析[J].电力系统自动化,2009,33(16):7-12.(NING Liaoyi,WU Wenchuan,ZHANG Boming.Analysis of a time-varying power component outage model for operation risk assessment[J].Automation of Electric Power Systems,2009,33(16):7-12.(in Chinese))
- [8] 冯永青,吴文传,孙宏斌.现代能量控制中心的运行风险评估研究初探[J].中国电机工程学报,2005,25(13):73-79.(FENG Yongqing,WU Wenchuan,SUN Hongbin.A preliminary investigation on power system operation risk evaluation in the modern energy control center[J].Proceedings of the CSEE,2005,25(13):73-79.(in Chinese))
- [9] 汲国强,吴文传,张伯明.一种适用于状态检修的电力设备时变停运模型[J].中国电机工程学报,2013,33(1):1-8.(JI Guoqiang,WU Wenchuan,ZHANG Boming.A time-varying component outage model used in power system condition-based maintenance[J].Proceedings of the CSEE,2013,33(1):1-8.(in Chinese))
- [10] 韩富春,董邦洲,贾雷亮.基于贝叶斯网络的架空输电线路运行状态评估[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(1):101-104.(HAN Fuchun,DONG Bangzhou,JIA Leiliang.Operation state evaluation of overhead transmission lines based on Bayesian network[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(1):101-104.(in Chinese))
- [11] SUNITA MALHARA.Mechanical state estimation of overhead transmission lines using tilt sensors[J].IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(3):1282-1290.
- [12] 何永秀.电力综合评价方法及应用[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [13] 江苏省电力公司.Q/GDW 173—2008 架空输电线路状态评价导则[S].北京:中国电力出版社,2008.
- [14] 中国南方电网广东电网公司、广州华微明天软件技术有限公司.DL/T 1006—2006 架空输电线路巡检系统[S].北京:中国电力出版社,2007.
- [15] 欧阳森,黄瑞艺,程小艺.基于逐层拉开档次法的电能质量综合评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(5):93-98.(OUYANG Sen,HUANG Ruiyi,CHENG Xiaoyi.Comprehensive evaluation for power quality based on stepwise scatter degree method[J].Journal of South China University of Technology(Nature Science Edition),2013,41(5):93-98.(in Chinese))
- [16] 陆子刚,卫志农,孙国强.计及负荷静态特性的电力系统静态状态评估算法[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):88-94.(LU Zigang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang.A state estimation algorithm for power system considering static characteristics of load[J].Journal of Hohai University(Nature Science),2014,42(1):88-94.(in Chinese))
- [17] 郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2007.
- [18] 陈楷,黄建勇.基于改进拉开档次法的配电网经济运行评价[J].华东电力,2014,42(6):1075-1078.(CHEN Kai,HUANG Jianyong.Economic operation evaluation for distribution network based on improved scatter degree method[J].East China Electric Power,2014,42(6):1075-1078.(in Chinese))