

DOI: 10.7667/PSPC161402

基于组合赋权与 TOPSIS 模型的节点电压 暂降严重程度综合评估方法

杨家莉¹, 徐永海²

(1. 国网兰州供电公司, 甘肃 兰州 730300; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 提出了一种基于组合赋权与 TOPSIS 模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法。以 SARFI 指标、平均暂降能量指标 ASEI 与暂降严重性指标 SSI 为元素建立属性集合。采用熵权法与变异系数法计算各指标组合权值, 结合 TOPSIS 模型提出了电压暂降严重程度综合评估方法。通过比较各节点与 TOPSIS 模型中正理想解相对近似度大小, 判断暂降严重程度。使用该方法对某城市电网电压暂降进行评估, 利用节点分级方法将模型评估结果与各指标评估结果进行对比分析。结果证明, 该方法既能凸显指标间评估结果的一致性, 又能缩小其差异性, 所得结果客观和准确, 更符合实际。

关键词: 电压暂降; 熵权法; 变异系数法; 组合权值; TOPSIS 模型; 相对近似度

Comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on TOPSIS model and combination weights

YANG Jiali¹, XU Yonghai²

(1. State Grid Lanzhou Electric Power Supply Company, Lanzhou 730300, China; 2. State Key Laboratory Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: This paper proposes a comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on combination weights and TOPSIS model. The SARFI, average temporarily reduced energy index ASEI and sag severity index SSI are regarded as elements to establish the set of attributes. Entropy weight method and coefficient of variation method are used to calculate combination weights of indexes and the voltage sag severity comprehensive evaluation method based on TOPSIS model is established. The sags severity is determined by comparing size of the relative approximate degree of various nodes distance from the positive ideal solution of TOPSIS model. The model is used to assess the grid voltage sag for a certain city. Model assessment results and the index evaluation results are compared from the aspect of the node classification. The results show that the model can highlight the consistency of index evaluation results and reduce the difference, and the results are objective, accurate and more realistic.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277069).

Key words: voltage sag; entropy method; variation coefficient method; combination weights; TOPSIS model; relative approximate degree

0 引言

电压暂降是指供电电压方均根值在短时间突然下降的变化情况, 是电力系统运行不可避免的短时扰动现象^[1-2]。在许多地区, 电压暂降已成为影响工业用户最主要的电能质量问题, 电压暂降引起的危害及其带来的巨大经济损失是很多用户面临的重要

问题^[3-5]。因此, 准确评估电压暂降严重程度对于改善电网供电质量、降低经济损失和提高用户满意度具有重要意义^[6]。

电压暂降幅值和持续时间是标称电压暂降的重要特征量^[1], 因此, 大多数评估指标是根据这两个特征量延伸得到的。例如, IEEE P1564 及相关文献中给出的评估单个事件的暂降严重性指标 $Se^{[7-9]}$ 、电压损失指标 $LV^{[10]}$ 、能量损失指标 $LE^{[10]}$ 和严重性指标^[8,11]MSI、DSI、MDSI 等。对于节点电压暂降评

估主要有 SARFI 指数指标^[9]、暂降事件次数指标^[12-13]、能量指标^[8-9]、严重性指标^[14-15]、电压暂降性能指标^[14]和统计表格^[9,16-17]等。由于单一评估指标所包含的信息量有限,其评估结果可能并不准确,如:暂降次数指标仅以暂降发生次数的多少衡量其严重性,并未考虑持续时间与幅值的影响;电压损失指标、能量损失指标与严重性指标 MDSI 均是持续时间与幅值相乘的形式,对于非矩形波的暂降会造成过度评估。

基于经济损失与敏感设备特性的电压暂降严重程度评估方法也得到了广泛研究。文献[18-19]给出了一种因电压暂降引起的经济损失计算方法,通过损失的大小来判断暂降严重程度,该方法虽能直观反映暂降严重性,但受行业、设备类型以及市场等不确定因素的影响,各损失计算结果可能出现较大的波动。电压暂降可能会引起设备失效甚至故障,因而通常采用设备故障水平或免疫力来衡量其严重程度^[8,20]。对于敏感设备通常采用概率法^[21-24]或模糊法^[8,25-26]描述电压暂降过程中的不确定性,并且建立相应的故障水平评估模型,如文献[21-22]提出了概率评估法,文献[25-26]提出了模糊评估法。然而,大量实验证明,由于对设备失效事件的不确定性缺乏科学刻画与准确度量,概率法或模糊法仍会造成过度评估或欠估计等问题,并且这类模型是以敏感设备电压耐受曲线为基础建立的,对于设备连接状况未知的节点,该类方法并不适用。

为克服采用单一指标以及概率法或模糊法等进行电压暂降严重程度评估的缺点,根据多属性决策思想,本文提出了一种基于组合赋权与 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法。根据现有的节点电压暂降评估指标建立属性集合,结合熵权法与变异系数法对各指标组合赋权后,计算 TOPSIS 模型中各方案分别与正、负理想解的加权距离,进而得到与正理想解的相对近似度,通过比较各方案相对近似度的大小,得到最优方案排序结果,即为各节点电压暂降严重程度排序结果。最后,采用所提出方法对某城市电网 8 个典型监测节点的电压暂降监测数据进行评估,通过节点分级对模型评估结果与单一指标评估结果的对比分析验证了本文方法的正确性与有效性。

1 属性集合及其权值计算

1.1 属性集合

在对多个节点的电压暂降严重程度进行评估时,为得到合理的评估结果,应考虑暂降频次、幅值与持续时间 3 个典型特征,此外,还应从局部性

以及整体性两个方面来分析各节点的暂降严重性。所谓局部性是指仅利用单个节点本身的特征信息进行严重性评估,不考虑能够反映多个节点间相互联系及影响的共有信息;所谓整体性则是同时考虑了以上两种信息,体现了各指标间的相对严重程度。局部性强调的是各节点的“个性”特点,而整体性则能凸显“共性”特点。

SARFI 指标是较为典型的节点电压暂降评估指标,虽在电压暂降严重程度的评估中有着广泛应用,但仍存在许多问题。SARFI 指标没有考虑时间特性,只反映不同幅值阈值下的电压暂降频次;平均暂降能量指标 ASEI 的优点是综合考虑了持续时间与幅值特征,且能够反映影响敏感设备正常工作的频次,缺点是当单一事件能量指标在总暂降能量指标中占主要地位时,可能把电压暂降平均损失能量提高,造成过度评估;严重性指标 SSI 兼顾持续时间与幅值,但对于幅值较小而持续时间较长的暂降,其计算结果较大,所反映的暂降严重程度与实际情况可能并不相符。其中: SARFI 指标以及 ASEI 指标仅利用了节点自身的信息,属于局部性指标; SSI 指标中除节点本身的能量信息外,还包括节点间平均暂降次数信息,因而该指标具有整体性。将上述 3 种指标综合考虑,既兼顾了频次、幅值和持续时间 3 个影响因素,又能从局部以及整体两个角度反映各节点的电压暂降严重程度。因此,本文以这 3 个指标为元素构造属性集合 $S = \{s_1, s_2, s_3\}$, 其中 s_1 表示 SARFI 指标, s_2 表示平均暂降能量指标 ASEI, s_3 表示暂严重性指标 SSI。

1) SARFI 指标

SARFI 指标即为系统平均方均根值波动频率指标,用来描述特定时间内单一测量点方均根值波动情况,该指标用于衡量电力公司在电压方均根值变动方面的供电服务质量^[1]。SARFI 包括两种形式:一种是基于某一阈值电压的统计指标 $SARFI_X$,另一种是基于敏感设备曲线的统计指标 $SARFI_{curve}$ ^[9]。

$SARFI_X$ 的计算方式如式(1)所示。

$$SARFI_X = \frac{N_i}{N_T} \quad (1)$$

式中: X 为方均根值电压阈值,用百分制形式表示,可能的取值为 180、140、120、110、90、80、70、50 或 10 等;若 $X < 100$, N_i 表示第 i 次事件造成的电压幅值小于 $X\%$ 的暂降用户数,若 $X > 100$, N_i 表示第 i 次事件造成的电压幅值大于 $X\%$ 的暂降用户数; N_T 表示由所评估节点供电的总用户数。

$SARFI_{curve}$ 指标表示超出某类敏感设备参考曲

线范围的电压暂降事件的频度，且不同的参考曲线对应不同的 SARFI_{curve} 指标。根据设备类型，常用的参考曲线主要有 CBEMA、ITIC、SEMI 曲线等。

2) 平均暂降能量指标

针对单次电压暂降事件，其能量指标 E_{VS} 如式(2)所示。

$$E_{VS} = \int_0^T [1 - \left\{ \frac{U(t)}{U_{\text{mon}}} \right\}^2] dt \quad (2)$$

式中： $U(t)$ 为暂降过程中的时变电压方均根值；

U_{mon} 为标准电压； T 为暂降持续时间。

假设在暂降持续时间内，电压方均根值保持不变，则暂降能量指标为

$$E_{VS} = \left\{ 1 - \left[\frac{U(t)}{U_{\text{mon}}} \right]^2 \right\} T \quad (3)$$

针对节点电压暂降评估，其总暂降能量指标 SEI 与平均暂降能量指标 ASEI 分别定义如式(4)和式(5)所示。

$$SEI = \sum_{i=1}^N E_{VS-i} \quad (4)$$

$$ASEI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{VS-i} \quad (5)$$

式中： E_{VS-i} 表示第 i 次事件的暂降能量； N 表示在给定时间内节点发生的总暂降事件次数。

3) 暂降严重性指标

计及电压暂降发生频率的暂降次数指标 SCI 和兼顾持续时间与幅值影响的暂降严重性指标 SSI 定义为^[1,15]

$$SCI = \frac{\text{电压暂降的发生次数}}{\text{总监测点数}} \quad (6)$$

$$SSI = \frac{SEI}{SCI} \quad (7)$$

1.2 基于熵权法与变异系数法的组合权值计算

由于各指标的意义与单位间的差异，导致相对权值难以确定^[27]。熵权法是一种以 Shannon 信息熵理论为基础，根据各指标包含的有效信息量确定权值的客观赋权方法，用各指标熵值反映评价指标的差异性，差异性越大，提供的信息量也就越多，则该指标的权值也越大^[28]。因此，本文首先采用熵权法计算各指标权值。

1) 熵权法赋权

假设要对 m 个监测节点单位时间内发生的电压暂降事件严重程度进行评估，根据属性集合中各节点 SARFI 指标、平均暂降能量指标 ASEI 及严重性指标 SSI 的计算结果，构造如式(8)所示的评价矩阵。

$$\mathbf{X}_{3 \times m} = (x_{ij}) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3m} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， x_{ij} 表示第 j 个监测节点的第 i 个属性值。

上述 1.1 节属性集合中的 3 个评价指标均为越小越好的成本型指标^[29]。不同性质的指标，其单位与数量级并不一致，为增强各指标间的可比性，消除指标性质、量纲及数量级对评价结果的影响，取得较好的评价结果，需对各指标的原始数据进行标准化处理^[30]，本文采用如式(9)所示的极差标准化法分别将各指标范围标准化至 0-1，并由此建立如式(10)所示的同趋势化矩阵 $\mathbf{Y}_{3 \times m}$ ，其同趋势化体现在矩阵 $\mathbf{Y}_{3 \times m}$ 中各评价指标的值越大越有利于评价结果。

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq j \leq m} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq m} x_{ij} - \min_{1 \leq j \leq m} x_{ij}}, \quad i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

同趋势化矩阵即为

$$\mathbf{Y}_{3 \times m} = (y_{ij})_{3 \times m} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ y_{31} & y_{32} & \cdots & y_{3m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， y_{ij} 即为 x_{ij} 的标准化值。

根据评价矩阵，各指标信息熵为

$$H_i = - \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln m}, \quad i=1, 2, 3 \quad (11)$$

其中， p_{ij} 的计算公式为

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^m y_{ij}}$$

式中， p_{ij} 表示第 j 个节点的第 i 个指标对评价结果产生影响的概率。当 $p_{ij} = 0$ 时，令 $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

各属性指标权值计算方式定义为

$$a_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^n (1 - H_i)}, \quad i=1, 2, 3 \quad (12)$$

上式满足条件： $\sum_{i=1}^n a_i = 1, 0 \leq a_i \leq 1, n=3$ 。

2) 变异系数法与熵权法组合赋权

由于熵权法赋权是将同一评价指标的所有监测数据综合考虑，虽然削弱了异常值的影响，但其权值分配存在均衡化的缺陷，而变异系数法赋权则完全是根据数据差异大小，直接利用各项指标所包含的信息计算权值^[31]，据此本文尝试采用变异系数法

与熵权法相结合确定各指标权值, 组合权值能够充分反映实际指标数据的客观特性^[32]。

根据评价矩阵 $X_{3 \times m}$ 计算各指标的变异系数:

$$z_i = \frac{\delta_i}{\bar{x}_i}, \quad i=1,2,3 \quad (13)$$

式中, z_i 、 \bar{x}_i 与 δ_i 分别为第 i 个评价指标的变异系数、平均值与标准差, 其中 \bar{x}_i 与 δ_i 的计算方式为

$$\begin{cases} \bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} \\ \delta_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \end{cases}, \quad i=1,2,3$$

采用变异系数法对第 i 个评价指标的权值计算如式(14)所示。

$$b_i = \frac{z_i}{\sum_{i=1}^3 z_i}, \quad i=1,2,3 \quad (14)$$

为弥补单一赋权方法的不足, 采用式(15)将两种方式结合^[33], 从而得到更加合理的评价指标权值为

$$w_i = 0.5a_i + 0.5b_i, \quad i=1,2,3 \quad (15)$$

式中, w_i 即为结合变异系数法与熵权法的第 i 个指标的组合权值。

2 基于 TOPSIS 模型的电压暂降综合评估方法

TOPSIS 法又称双基点法, 是 Hwang 等人在 1981 年提出的一种多属性决策分析方法, 具有分析原理直观、计算简便和易于理解等优点^[34]。其中心思想是: 首先, 确定研究问题的方案集, 选择评价指标建立属性集合, 构造正、负理想解; 然后, 根据属性集合中各指标对评估结果影响能力的不同, 对各指标赋权; 最后, 计算各方案到正、负理想解的加权距离, 并将靠近正理想解远离负理想解作为评价方案选优的判断依据^[35]。其特点是通过属性集合可同时考虑多个评估指标, 本质上是一种综合性的评估方法。

本文采用 TOPSIS 模型评估 m 个监测节点的电压暂降严重程度, 构造方案集:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$$

其中, $f_i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示基于属性集合中各评估指标对第 i 个节点的电压暂降严重程度进行评估。

当所有指标都达到各方案中最好的值时称为正理想解, 反之即为负理想解。本文的评价方案是各监测节点的电压暂降状况, 评价规则为暂降越严重

表明该方案越差, 因此, 正理想解对应暂降最不严重的情况, 负理想解对应暂降最严重的情况。首先, 基于评价规则可以判断属性集合中各评价指标的性质, 然后进行标准化处理, 最后根据同趋势化矩阵 $Y_{3 \times m}$, 确定正理想解 v^+ 与负理想解 v^- 分别为

$$\begin{cases} v^+ = (v_1^+, v_2^+, v_3^+), v_i^+ = \max_j \{y_{ij}\} \\ v^- = (v_1^-, v_2^-, v_3^-), v_i^- = \min_j \{y_{ij}\} \end{cases} \quad (16)$$

$$i=1,2,3; j=1,2,\dots,m$$

采用式(17)将每个方案中各指标分别与正、负理想解的欧氏距离加权求和, 则可得到可选方案 i 与正、负理想解的距离 C_i^+ 和 C_i^- , 式中各指标对应的权值即为 1.2 节中的组合权值。

$$\begin{cases} C_j^+ = [\sum_{i=1}^3 (w_i * |y_{ij} - v_i^+|)^2]^{\frac{1}{2}} \\ C_j^- = [\sum_{i=1}^3 (w_i * |y_{ij} - v_i^-|)^2]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad j=1,2,\dots,m \quad (17)$$

进而通过式(18)能够得到方案 i 距离正理想解的相对近似度 R_i 为

$$R_j = \frac{C_j^-}{C_j^+ + C_j^-}, \quad j=1,2,\dots,m \quad (18)$$

由式(18)可知 $0 \leq R_j \leq 1$, 将这 m 个方案即 m 个节点的相对近似度排序, R_j 越大表明该方案越接近正理想解, 该节点的电压暂降越不严重。

3 应用实例与结果分析

国际电工委员会(IEC)定义的电压暂降为供电电压有效值快速下降至额定电压的 90%~1%, 本文以此为暂降事件的判断标准, 选取某城市电网电能质量监测系统中 8 个监测节点 2014 年监测到的 74 组电压暂降事件数据为研究对象进行分析计算。根据 IEC61000-2-8 统计表格对这 74 组暂降事件进行统计, 结果如图 1 所示。

采用 TOPSIS 模型对 8 个监测节点的电压暂降严重程度进行评估, 则方案集为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_8\}$ 。由于缺乏各节点用户敏感设备信息, 所以本文采用 $SARFI_X$ 作为评估指标。图 1 中, 9 个幅值区间内区间 [80, 90) 中的暂降事件的严重程度相对最低, 且这 74 组暂降数据在该区间内发生的频次较高, 而在其余幅值范围内分布相对分散, 因而 80 是能较好地区分暂降情况的阈值, 则将 $SARFI_X$ 指标的电压阈值 X 取值为 80。因此, 本文的属性集合为

$$S = \{s_1, s_2, s_3\} = \{SARFI_{80}, ASEI, SSI\}$$

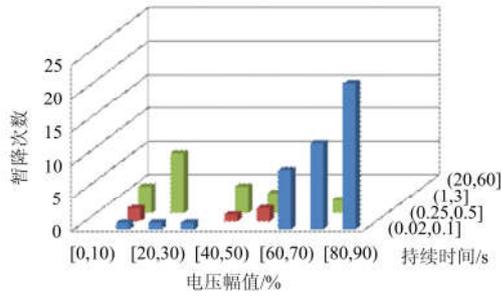


图 1 典型监测节点的电压暂降统计结果

Fig. 1 Monitoring result of voltage sags from typical site in a city

表 1 为 8 个监测节点 3 个评价指标的计算结果, 采用式(8)构造评价矩阵 $X_{3 \times 8}$ 。

表 1 各监测节点指标计算结果

Table 1 Calculation results of index for each monitoring point

监测节点	$SARFI_{80}$	$ASEI$	SSI
1	10	0.058	0.081
2	2	0.036	0.012
3	7	0.181	0.137
4	7	0.068	0.111
5	1	0.015	0.005
6	2	0.014	0.008
7	6	0.204	0.132
8	17	0.104	0.247

将 $SARFI_{80}$ 指标、 $ASEI$ 指标以及 SSI 指标采用式(9)进行标准化处理后得到同趋势化矩阵 $Y_{3 \times 8}$ 。

对于 TOPSIS 模型中各评价指标的权值, 首先, 基于同趋势化矩阵 $Y_{3 \times 8}$, 采用熵权法得到各评价指标权值 a_1 、 a_2 、 a_3 ; 然后, 根据评价矩阵 $X_{3 \times 8}$, 采用变异系数法得到权值 b_1 、 b_2 、 b_3 ; 最后, 采用式(15)计算组合权值 w_1 、 w_2 、 w_3 。各评价指标权值计算结果如表 2 所示。

表 2 各指标权值计算结果

Table 2 Each index weight calculation result

评价指标	熵权法	变异系数法	组合权值
$SARFI_{80}$	0.3094	0.3137	0.3115
$ASEI$	0.3841	0.3313	0.3577
SSI	0.3065	0.3550	0.3308

表 2 中, 熵权法的计算结果表明 $ASEI$ 指标对电压暂降评估的影响最大, 变异系数法的计算结果则是 SSI 指标影响略大于 $ASEI$ 指标, 在最终的组合权值中影响最大的指标为 $ASEI$ 指标, SSI 指标次之, $SARFI_{80}$ 指标的影响最小。

以矩阵 $Y_{3 \times m}$ 为基础, 利用式(16)可得模型正理想解为 $v^+ = (1, 1, 1)$, 负理想解为 $v^- = (0, 0, 0)$ 。

进而采用式(17)计算各方案与正、负理想解的

加权距离 C^+ 、 C^- , 并通过式(18)确定相对近似度 R 。计算结果如表 3 所示。

表 3 各监测节点与正、负理想解的加权距离及相对近似度

Table 3 Weighted distance between each monitoring node and the positive and negative ideal solutions and relative approximation degree of each monitoring node

监测节点	C^+	C^-	R
1	0.222	0.382	0.633
2	0.046	0.540	0.921
3	0.382	0.252	0.397
4	0.213	0.372	0.636
5	0.002	0.579	0.997
6	0.020	0.568	0.966
7	0.410	0.268	0.395
8	0.487	0.188	0.279

根据表 3 中的相对近似度对各方案排序, 相对近似度越大表明该方案越好, 相应监测点的电压暂降越不严重。利用 TOPSIS 模型对 8 个监测节点的电压暂降情况最终评估结果为

$$f_5 > f_6 > f_2 > f_4 > f_1 > f_3 > f_7 > f_8$$

式中, 符号“>”表示方案的优先顺序, 符号之前的方案优于之后的方案。各方案即为各监测点的电压暂降情况, 评估结果中各方案由好至差依次为方案 5、6、2、4、1、3、7、8, 方案 5 为最优方案, 方案 8 为最差方案。因此, 对 8 个监测点的电压暂降评估结果为监测点 5、6、2、4、1、3、7、8 的暂降严重程度从左至右依次增大, 其中监测点 5 暂降最不严重, 节点 8 暂降最严重。

将各评价指标值分别由小到大进行排序, 由于各指标均为成本型指标, 因此指标值越大, 暂降越严重, 方案越差, 各指标对应的方案排序结果如表 4 所示。

表 4 各评价方法对应的方案排序结果

Table 4 Program ranking results under various evaluation indexes

评价方法	方案排序结果
$SARFI_{80}$	$f_5 > f_2 > f_6 > f_7 > f_3 > f_4 > f_1 > f_8$
$ASEI$	$f_6 > f_5 > f_2 > f_1 > f_4 > f_8 > f_3 > f_7$
SSI	$f_5 > f_6 > f_2 > f_1 > f_4 > f_7 > f_3 > f_8$
TOPSIS 模型	$f_5 > f_6 > f_2 > f_4 > f_1 > f_3 > f_7 > f_8$

由表 4 可知, 根据 $SARFI_{80}$ 指标和 SSI 指标, 监测点 8 暂降最严重, 监测点 5 暂降最不严重, 然而采用 $ASEI$ 指标的评估结果却为监测点 7 暂降最严重, 监测点 6 暂降最不严重。利用这 3 个指标对各监测点的评估结果虽然并不是完全相同, 但却非常相似。利用 $SARFI_{80}$ 指标、 $ASEI$ 指标和 SSI 指标

的 3 种评估结果一致表明: 监测点 1、3、4、7、8 的电压暂降较监测点 2、5、6 严重; 监测点 8 暂降较监测点 1、4 严重; 监测点 2 暂降较监测点 5 严重。该结论在 TOPSIS 模型的评比结果中也成立, 说明 TOPSIS 模型能将不同指标下评估结果的共同之处准确提取出来, 体现了模型的合理性与正确性。

为进一步分析 SARFI₈₀ 指标、ASEI 指标、SSI 指标以及 TOPSIS 模型的优劣, 将表 4 中对 8 个监测点在这 4 种方式下电压暂降情况的评估结果划分为 8 个等级, 等级数包括 1、2、3、4、5、6、7、8, 划分原则为暂降越严重等级数越大, 具体方法为评估结果越差, 即各评价指标值越大, 近似度越小, 则等级数越大。分级结果如图 2 所示。

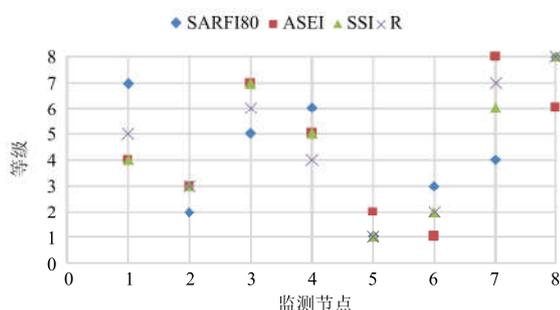


图 2 不同方式下各监测节点等级划分结果

Fig. 2 Grading results of each monitoring node in different ways

由图 2 可知, 每个监测点与等级均包括 4 个分级结果, 对于各监测点其分级结点越集中, 表明评估结果越相似, 准确性越高。图中监测点 2、5 的分级结点集中程度最高, 每个监测点所包含的 4 个分级结果中有 3 个分级结果相同, 另一分级结果为其相邻等级, 说明相对近似度 R 和各指标的暂降评估结果较一致。监测点 3、4、6、8 中各监测点分级结果的最大等级差为 2, 其中监测点 3、4、6 的分级结点分布相对均匀, 监测点 8 中除 ASEI 指标外, 其余 3 个分级结果相同, 由此可以判断 ASEI 指标低估了监测点 8 的暂降严重程度。对于监测点 1、7, 其分级结点相对分散, 同一监测点下 ASEI 指标、SSI 指标以及近似度 R 的分级结果相近, 而 SARFI₈₀ 指标的分级结果与它们相差较大, 在监测点 1 中表现为过度评估, 监测点 7 中为欠估计。基于上述分析, 可以得到以下结论: 针对某一监测点, 如果各评估指标的分级结果较一致, 则相对近似度 R 的分级结果与之接近, 凸显了各指标的一致性; 如果各评估指标的分级结果并不一致, 则相对近似度 R 的分级结果趋于与各指标分级结果相对最靠近的位置, 平衡了各指标间的差异。

综上所述, 基于 TOPSIS 模型的电压暂降综合

评估方法既能凸显各指标评估结果的一致性, 又能平衡其差异, 其评估结果较单一指标更加合理和准确。

4 结论

本文提出了一种基于熵权法与变异系数法对 TOPSIS 模型组合赋权的电压暂降综合评估方法。采用某城市电网电能质量监测系统中 8 个典型监测节点的电压暂降数据对模型进行验证, 得到如下结论:

1) 采用熵权法与变异系数法组合赋权, 同时考虑了数据的整体联系与局部差异, 所得权值能够更加真实地反映实际数据的客观特性。

2) 所提出的基于 TOPSIS 模型的电压暂降综合评估方法通过节点相对近似度将 3 个典型的节点电压暂降评估指标综合考虑, 既从频次、持续时间与幅值角度反映了电压暂降的严重性, 又从局部性与整体性角度反映了暂降次数对电压暂降严重程度的影响特性, 有效避免了使用单一指标评估时所带来的误判, 能够更加全面和准确地反映各节点电压暂降情况。

3) 采用节点分级的方式将模型评估结果与 3 个指标的评估结果进行对比分析, 结果显示利用 TOPSIS 模型的电压暂降综合评估方法能够准确提取各指标评估结果的相同点, 减小不同结果间的差异性, 可以更有效地综合衡量各节点电压暂降严重程度。

参考文献

- [1] 徐永海, 陶顺, 肖湘宁. 电网中电压暂降和短时间中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 194-197.
- [2] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.
- [3] XU Yunfei, XIAO Xiangning, SUN Yamin, et al. Voltage sag compensation strategy for unified power quality conditioner with simultaneous reactive power injection[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 113-122.
- [4] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0024-7

- [5] 程志友, 王雪菲, 徐佳. 一种基于复阻抗的电压暂降定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 149-154.
CHENG Zhiyou, WANG Xuefei, XU Jia. A voltage sag detection method based on complex impedance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 149-154.
- [6] 肖助力, 龚仁喜, 陈双. 一种改进不完全S变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 62-68.
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.
- [7] ARIAS-GUZMAN S, USTARIZ-FARFAN A J, PLATA E A C, et al. Implementation of IEEE Std 1564-2014 for voltage sag severity analysis on a medium voltage substation[C] // IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications. IEEE, 2015: 8-13.
- [8] 刘旭娜, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644-658.
LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sags severity and its measure and uncertainty evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 644-658.
- [9] SABIN D D, BOLLEN M H J. Overview of IEEE Std 1564-2014 guide for voltage sag indices[C] // International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2014: 497-501.
- [10] 袁媛, 吴丹岳, 林焱, 等. 电压暂降评估体系研究[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 128-133.
YUAN Yuan, WU Danyue, LIN Yan, et al. Study on assessment system of voltage sags[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 128-133.
- [11] CHAN J Y, MILANOVIC J V. Severity indices for assessment of equipment sensitivity to voltage sags and short interruptions[C] // Power Engineering Society General Meeting. IEEE Xplore, 2007: 1-7.
- [12] XIAO Xiangning, TAO Shun, BI Tianshu, et al. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1003-1008.
- [13] 陈礼频, 肖先勇, 张志, 等. 考虑保护时限特性的电压暂降频次评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 113-119.
CHEN Lipin, XIAO Xianyong, ZHANG Zhi, et al. Voltage sags frequency assessment considering the time characteristic of protection system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 113-119.
- [14] LIAO H, ABDELRAHMAN S, GUO Y, et al. Identification of weak areas of network based on exposure to voltage sags — part II: assessment of network performance using sag severity index[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2401-2409.
- [15] 林焱, 吴丹岳, 章雪萌, 等. 电压暂降指标的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 147-152.
LIN Yan, WU Danyue, ZHANG Xueming, et al. An exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 147-152.
- [16] BOLLEN M H J, SABIN D D. International coordination for voltage sag indices[C] // Power Engineering Society General Meeting. IEEE Xplore, 2005: 2217-2222.
- [17] GAO X K, LIU Y P. Influence of the inverse-time protection relays on the voltage dip index[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science), 2014, 19(3): 354-360.
- [18] CHAN J Y, MILANOVIC J V, DELAHUNTY A. Risk based assessment of financial losses due to voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 492-500.
- [19] 甄晓晨, 陶顺, 肖湘宁, 等. 电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 104-111.
ZHEN Xiaochen, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. An evaluation model of plant-level economic loss due to voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 104-111.
- [20] 孔祥雨, 徐永海, 陶顺. 基于一种电压暂降新型描述的敏感设备免疫能力评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 165-171.
KONG Xiangyu, XU Yonghai, TAO Shun. Sensitive equipment immunity assessment based on a new voltage sag description[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 165-171.
- [21] SHEN C C, LU C N. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 996-1002.
- [22] 曾江, 蔡东阳. 基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1469-1475.
ZENG Jiang, CAI Dongyang. A Monte Carlo assessment method of voltage sags based on combination weight[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1469-1475.
- [23] 王华伟, 李华强, 肖玲. 双重不确定性组合法评估敏感设备电压暂降故障概率[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 134-139.
WANG Huawei, LI Huaqiang, XIAO Ling. Twofold uncertainty combination based probability evaluation of

- failures occurred in voltage sensitive equipments due to voltage sag[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 134-139.
- [24] 杨晓东, 李庚银, 周明, 等. 不确定条件下的电压暂降概率评估[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 41-45.
YANG Xiaodong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Probability assessment of voltage sag under uncertain conditions[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 41-45.
- [25] GUPTA C P, MILANOVIC J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 711-718.
- [26] SHEN C C, LU C N. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 996-1002.
- [27] 陶顺, 肖湘宁. 电能质量单项指标和综合指标评估的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 25-29, 41.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Individuation indices and global indicator of power quality[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2008, 35(2): 25-29, 41.
- [28] 刘瑾, 冯瑛敏, 章辉, 等. 基于熵值分析和层次分析法的智能电网电力终端接入网综合效益评价[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 136-140.
LIU Jin, FENG Yingmin, ZHANG Hui, et al. Comprehensive benefit evaluation for power terminal access network in smart grid based on analytic hierarchy process and entropy analysis[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 136-140.
- [29] 管怀建, 唐亮, 邓志江. 基于正负理想点法的火炮武器系统作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2010, 29(3): 44-46.
GU Huaijian, TANG Liang, DENG Zhijiang. Operational effectiveness evaluating of gun weapon system based on positive and negative ideal point[J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(3): 44-46.
- [30] 潘润秋, 孙焕芳, 刘瑛慧. 基于 TOPSIS 模型的山东省土地生态安全评价[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(2): 509-514.
PAN Runqiu, SUN Huanfang, LIU Yinghui. Evaluation on the land ecological security of Shandong province based on TOPSIS model[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(2): 509-514.
- [31] 王建华, 杨静. 基于结构熵权法和改进 TOPSIS 法的可持续供应链绩效评价模型与算法[J]. 中国市场, 2013, 26(17): 15-20.
WANG Jianhua, YANG Jing. Performance evaluation model and algorithm of sustainable supply obtain based on structure entropy weight method and improved TOPSIS method[J]. China Market, 2013, 26(17): 15-20.
- [32] 张凤太, 苏维词, 周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1249-1254.
ZHANG Fengtai, SU Weici, ZHOU Jixia. Assessment of urban ecological security based on entropy-weighted gray correlation analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1249-1254.
- [33] 姜君. 基于熵权与变异系数组合赋权法的模糊综合评价模型[D]. 北京: 首都师范大学, 2011: 13-19.
JIANG Jun. Fuzzy comprehensive evaluation model based on combination weighting method of entropy weight and of variation[D]. Beijing: Capital Normal University, 2011: 13-19.
- [34] 杨宝臣, 陈跃. 基于组合赋权 TOPSIS 模型的项目评标方法研究[J]. 电子科技大学学报 (社科版), 2011, 13(1): 50-54, 62.
YANG Baochen, CHEN Yue. Study on project bidding evaluation method based on combination weighting TOPSIS[J]. Journal of UESTC (Social Sciences Edition), 2011, 13(1): 50-54, 62.
- [35] 尹承督, 贾红丽, 王新民. 基于多目标决策理想点法的装备保障人员能力分析[J]. 价值工程, 2016(2): 42-43.
YIN Chengdu, JIA Hongli, WANG Xinmin. Analysis of equipment staff capacity based on multi-objective decision ideal of point method[J]. Value Engineering, 2016(2): 42-43.

收稿日期: 2016-08-29; 修回日期: 2017-02-15

作者简介:

杨家莉(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量和电力系统分析与控制; E-mail: 1578027737@qq.com

徐永海(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统谐波和电能质量等方面的研究工作。E-mail: yonghaixu@263.net

(编辑 葛艳娜)