

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.007

基于改进 TOPSIS-RSR 法的电能质量综合评价

邱玉婷¹, 李济沅², 邓旭³, 邓国军⁴, 周浩²

(1. 上海市电力公司市区供电公司, 上海 200080; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 3. 湖南省电力公司长沙供电公司, 长沙 410000; 4. 江苏省电力公司扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:为解决现有电能质量评价模型的复杂性以及分级评价时的随机性和模糊性,提出了基于改进 TOPSIS-RSR 法的电能质量综合评价方法。采用熵权法客观计算电能质量指标的权重,运用理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)对电能质量进行综合评价;提出相对贴近距离的概念,对传统理想解法中存在的某些情况不能比较评价目标优劣性的问题进行改进;用相对贴近距离结合秩和比(rank sum ratio, RSR)法,对评价结果进一步扩展分析,根据标准正态离差分档,客观科学地对评价目标进行分级评价。通过对某 380 V 观测站 5 个观测点的电能质量数据进行实例验证以及与其他评价方法进行对比分析,分析结果表明,改进 TOPSIS 法结合 RSR 法可以对评价点的电能质量优劣情况进行合理的评价及分级排序,准确性高、可拓展性强。

关键词: 电能质量; 综合评价; TOPSIS 法; RSR 法; 熵权法; 相对贴近距离

Comprehensive Evaluation of Power Quality Based on Improved TOPSIS-RSR Method

QIU Yuting¹, LI Jiyuan², DENG Xu³, DENG Guojun⁴, ZHOU Hao²

(1. Shanghai Urban Power Supply Company of SGCC, Shanghai 200080, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. State Grid Changsha Power Supply Company, Changsha 410000, China; 4. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Yangzhou 225000, China)

Abstract: To solve the complexity of the existing power quality evaluation model as well as the randomness and fuzziness in the grading evaluation of power quality, a comprehensive evaluation method of power quality based on the improved TOPSIS-RSR method is proposed. Entropy method is used to calculate the weight of the power quality index, and the TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) method is used for comprehensive evaluation of power quality. The concept of relative similarity distance is raised to deal with the problem existing in traditional TOPSIS method, that is, in some cases the evaluated objects cannot be compared with each other effectively. Combination of the relative similarity distance with RSR (rank sum ratio) is adopted to further analyze the evaluation results for expansion. The evaluated objects are graded according to the normal equivalent deviation. Example verification of the power quality data from five observation points in a 380 V observation station is carried out, and the results are compared with those of other methods. It is shown that the improved TOPSIS method combined with RSR method can make reasonable evaluation and grading for power quality of evaluated objects with high accuracy and expansibility.

Key words: power quality; comprehensive evaluation; TOPSIS method; RSR method; entropy method; relative similarity distance

0 引言

随着微电网的快速发展以及新能源并网对电

网的冲击,配电网侧电能质量受到极大挑战。智能电网的兴起使得电力市场也在日益成熟的发展当中^[1-3],用户自由选择供电和优化用电的需求大大增加。电能作为一种特殊的商品,它的质量问题已受到越来越多的关注,合理准确地对电能质量进行综合评价是规范电能质量的前提^[4]。国内外先后颁布

了一系列标准文件对电网中可能出现的电能质量问题及其指标值加以限定^[5],但对其综合评价还没有做出明确规范。电能质量是一个涵盖了多指标的综合体,电能质量综合评价即是把多个指标量按一定权重合成,依据特定算法对其整体进行评价^[6]。

目前中国针对电能质量综合评价的研究已有很多,文[7]对几种常见的电能质量综合评价方法进行比较分析,分析表明概率统计与矢量代数法、模糊理论、物元理论在不同程度上受人为主观因素影响较大,评价结果具有不确定性;文[8]对人工神经网络法、基于突变决策的评价方法所存在的不足进行了阐述;文[9]提出的自主式决策理论减少了主观因素对电能质量评价结果的影响,但在确定指标权重时将权重尽可能分配到最大的指标值上,没有体现出重要指标对评价结果的影响;文[10]采用的秩和比法引入秩和比的概念将指标数据无量纲化,但在综合评价过程中易丢失原始数据所包含的信息,可能使评价结果失真;文[11]采用物元理论与证据理论相结合的方法进行电能质量综合评价,减少了综合评价过程中的不确定性,但该方法中的归一化过程可能造成部分有用的信息丢失,同时也增加了评价的复杂性;用证据理论对数据进行融合时计算量较大。

基于对上述评价方法的分析,文中提出基于改进TOPSIS-RSR法的综合评价方法,对配电网电能质量进行综合评价。改进理想解法依然采用双基准值,评价结果具有较高可信度;对传统理想解法中相对贴进度存在的缺陷进行改进,引入相对贴进距离,结合熵权法得到的客观权重,更准确地确定各评价目标的优劣;用相对贴进距离结合秩和比法,采用秩和比的思想对评价结果进一步扩展分析,避免了评价过程中的信息丢失;根据相对贴进距离的标准正态离差分档,克服了传统电能质量分级评价中随机性和模糊性的问题。

1 电能质量指标及权重确定

1.1 电能质量指标体系

中国先后发布了一系列文件用来规范电网中出现的电能质量问题,截至目前,已经制定并颁布了8类关于电能质量的国家标准,分别是电压偏差、频率偏差、电压三相不平衡、电压波动与闪变、公用电网谐波、电压暂降与短时中断、公用电网间谐波、暂时过电压和瞬态过电压。除了间谐波及暂态过电压,现有的电能质量监测仪能够对前6项电能质量指标进行采集数据分析其是否满足规程要求。

除此之外,供电可靠性指标和服务性指标反映了用户用电体验,也应被列入电能质量综合评价指标中来^[5,12]。

文中采用的电能质量评价指标体系见图1^[13]。

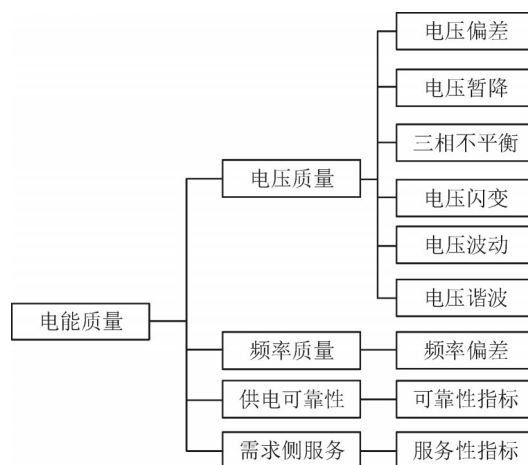


图1 电能质量评价指标体系

Fig. 1 The index system for power quality evaluation

1.2 电能质量指标权重确定

在综合评价中,正确地确定每个指标的权重对整个评价的有效性由很大影响。权重的确定分为主观赋权和客观赋权,主观赋权主要有层次分析法、专家打分法,在一定程度上依赖于专家的经验;客观赋权主要有熵权法、主成分分析法。文中采用熵权法客观计算确定各个指标的权重^[14-15]。

现假设有 m 个评价目标,每个评价目标分别有 n 个电能质量监测指标,第 i 个评价目标的第 j 个指标值为 x_{ij} 。

1)各个指标的度量单位不同,又分为成本型指标(指标值越小越好)和收益型指标(指标值越大越好),在综合评价之前需对其进行归一化处理。

对于成本型指标,则

$$x_{ij}^* = \frac{\max_j x_{ij} - x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

对于收益型指标,则

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

指标原始数据归一化之后,指标单位数值化,成本型及收益型指标均变为正向指标,值越大越优。

2)计算第 i 个评价目标的第 j 个指标的比重。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

3)计算第 j 个指标的熵值。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

4) 计算第 j 个指标的熵权。

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

2 传统理想解法及其改进

2.1 理想解法基本思想

理想解法(TOPSIS法),是一种基于双基准值的多目标综合评价方法。其基本原理是通过构造正理想解和负理想解,并选取距正理想解最近且距负理想解最远的目标为最优解^[8],步骤如下。

1) 对归一化后的指标矩阵进行加权,得到加权规范阵。

2) 找出每个指标的最优值 x_j^+ 、最劣值 x_j^- ,确定正理想解和负理想解。

3) 计算各评价目标到正理想解和负理想解的欧氏距离 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^+)^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^-)^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad (7)$$

4) 计算每个目标的相对贴近度 C_i , 相对贴近度越大,目标越优。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad i=1,2,\dots,m \quad (8)$$

2.2 改进理想解法

传统理想解法是通过单纯的比例公式即式(8)来计算相对贴近度,从而对电能质量进行综合评价的。在评价的过程中存在一定缺陷,见图2。

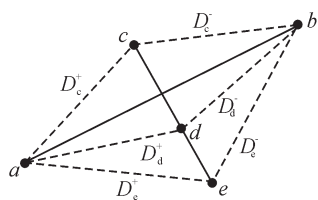


图2 TOPSIS法缺陷描述

Fig. 2 The defect of TOPSIS method

图2中, a 、 b 分别代表正理想解与负理想解, c 、 d 、 e 表示落在 ab 线段垂直平分线上的3个评价目标,可以看出,它们到正理想解和负理想解的距离

分别相等,即 $D_c^+ = D_c^-$, $D_d^+ = D_d^-$, $D_e^+ = D_e^-$ 。尽管三者到正、负理想解的距离各不相同,但相对贴近度均为0.5,无法比较三者的优劣情况。

改进理想解法的中心思想是用相对贴近距离 D_i 来取代相对贴近度 C_i 。基于所有指标归一化后的原始数据矩阵,选出正理想解(各指标最优)和负理想解(各指标最劣),分别计算各评价目标的与正理想解的距离 D_i^+ 和负理想解间的距离 D_i^- 。在此基础上以各评价目标坐标值(D_i^+ , D_i^-)构建二维数据空间,并设点 $A(\min(D_i^+), \max(D_i^-))$ 为最理想参照点,计算各方案与该点的相对贴近距离 D_i 为

$$D_i = \sqrt{[D_i^+ - \min(D_i^+)]^2 + [D_i^- - \max(D_i^-)]^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad (9)$$

改进 TOPSIS 法原理描述见图3。点 C 、 D 、 E 分别对应图2中的方案 c 、 d 、 e , 线段 AC 、 AD 、 AE 的长度表示各方案与最理想参照点的相对贴近距离,根据 D_i 的值对各评价目标进行由小到大的排序, D_i 值越小的目标越优,即与参照点相对贴近距离较近的点较优^[14],因此可以很方便地比较出方案 $d >$ 方案 $c >$ 方案 e (“ $>$ ”表示优于,下同)。若出现评价目标到最理想参照点的相对贴近距离一致的情况,如图3中点 E 与点 F ,则可以采取比较 D_i^-/D_i^+ 的值(即方案所对应点到原点的斜率)来判定,值越大表示距正理想解越近,距负理想解越远,进而能快速比较出方案 $e >$ 方案 f 。

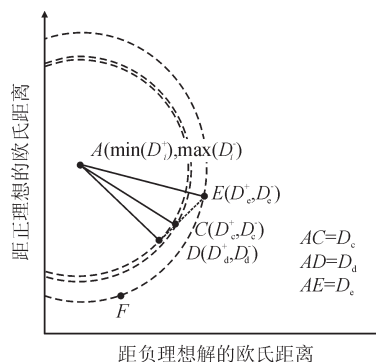


图3 改进 TOPSIS 法原理描述

Fig. 3 Description of the improved TOPSIS method

在实际运用中,若按比例精确画出各个评价目标在二维数据空间的(D_i^+ , D_i^-)分布图,则可以直接进行点对点的测距来得到排序结果,省去了繁冗的计算过程,有较好的实用性。

改进理想解法通过比较评价目标与最理想参照点的距离,等权重地考虑了各评价目标与最理想参照点($\min(D_i^+)$, $\max(D_i^-)$)的相对接近度,比理想解法中采用的相对贴近度更加合理。

3 基于改进TOPSIS-RSR法的综合评价方法

3.1 改进理想解法与秩和比法结合的合理性分析

秩和比(rank sum ration, RSR)法的基本原理是,在得到原始数据矩阵后,对每个指标量的 m 个评价目标进行1~ m 的简单编秩,得到一个无量纲统计量矩阵,从而计算得到每个评价目标的RSR值。基于上述计算结果,利用参数统计的思想研究RSR值的分布,客观确定分档排序的界限值,用RSR值作为评价指标直接对评价目标进行排序或分档^[16]。但运用秩和比法进行综合评价时,抛弃了原始数据,掩盖了2个评价目标在某指标上的细微差别,会对评价结果的准确性造成一定影响。

秩和比(RSR值)是一种粗略的归一化结果,但运用参数统计的思想进行分档排序的思想可以借鉴。相对贴进度和相对贴近距离都是对原始数据进行归一化得到的无量纲统计数据,且基于文2.2节的分析可知,相对贴近距离更能反映各个评价目标的优劣性。因此,采用相对贴近距离结合秩和比法的概念思想进行扩展分析可以得到满意的结果。

改进TOPSIS-RSR法结合了理想解法基于双基准值评价的准确性以及秩和比法分档排序的客观性。

3.2 应用步骤

1)运用熵权法求得各指标权重,并对归一化后的原始数据矩阵进行加权处理,得到加权规范化评价目标矩阵。

2)找出各指标的最优解和最劣解,从而构造出正理想解向量和负理想解向量,并计算各评价目标到正理想解和负理想解的欧氏距离 D_i^+ 、 D_i^- ;建立

各评价目标的(D_i^+ , D_i^-)二维数据空间,计算其与最理想参照点($\min(D_i^+)$, $\max(D_i^-)$)之间的欧氏距离,即相对贴近距离 D_i 。

3)将 D_i 值由小到大排序,列出不同组段的频数 f 、累计频数 $\sum f$,得到各组段的秩次 R 和平均秩次 $\bar{R}$;再向下计算累计频率 $p=\bar{R}/m$ (以%表示),基于《百分率与概率单位换算表》的相关数据,得到对应的概率单位值(*Probit*)。

4)以概率单位值(*Probit*)为自变量, D_i 值为因变量,用相关软件拟合出回归方程 $\hat{D}_i=a+b\times Probit$ 。根据实际情况确定分档数,常用的分档数及对应的概率单位临界值见表1^[10]。估算临界概率单位值(*Probit*)所对应的临界 D_i 值,进而对各目标 D_i 值进行排序分档。

表1 常用分档对应的概率单位临界值

Table 1 Critical probit values for different commonly-used grade numbers

分档数	<i>Probit</i>
3	4.00, 6.00
4	3.50, 5.00, 6.50
5	3.20, 4.40, 5.60, 6.80
6	3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00
7	2.86, 3.72, 4.57, 5.44, 6.28, 7.14

4 算例分析

选取文[17]中某观测站(电压等级为380 V)5个点的电能质量原始测量数据,采用上述算法进行算例分析,实测数据见表2。

表2 观测站电能质量实测数据

Table 2 Practical values of index at the observation station

观测点	电压偏差/%	电压暂降/%	三相不平衡/%	电压波动/%	电压闪变/%	电压谐波/%	频率偏差/Hz	可靠性指标	服务性指标
1	3.212	79.63	0.83	1.33	47.3	1.72	0.092 2	0.833	0.832
2	6.68	15.89	1.36	1.53	84.7	4.28	0.156 2	0.762	0.713
3	4.35	51.56	1.35	1.95	63.4	2.67	0.118 0	0.796	0.864
4	5.33	58.56	1.74	1.37	82.6	3.36	0.178 7	0.740	0.684
5	4.22	48.63	1.83	1.58	82.8	4.57	0.189 2	0.764	0.783

1)表2所列出的9项电能质量评价指标中前7项均为成本型指标,可靠性与服务性指标为收益型指标。根据式(1)和(2)分别进行归一化处理,用熵权法

计算得到各指标的权重向量为 $w=[0.075\ 0.087\ 0.122\ 0.068\ 0.197\ 0.118\ 0.123\ 0.108\ 0.084\ 0.122\ 0.068\ 0.197\ 0.118\ 0.123\ 0.108\ 0.102]^T$ 。加权之后的规范化评价目标矩阵如下。

$$Z = \begin{bmatrix} 0.075 & 0 & 0.122 & 0.068 & 0.197 & 0.118 & 0.123 & 0.108 & 0.084 \\ 0 & 0.087 & 0.057 & 0.046 & 0 & 0.012 & 0.042 & 0.026 & 0.016 \\ 0.051 & 0.039 & 0.059 & 0 & 0.112 & 0.079 & 0.091 & 0.065 & 0.102 \\ 0.029 & 0.029 & 0.011 & 0.063 & 0.011 & 0.050 & 0.013 & 0 & 0 \\ 0.053 & 0.043 & 0 & 0.040 & 0.001 & 0 & 0 & 0.028 & 0.056 \end{bmatrix}$$

2)找到每个指标的最优、最劣解,构成正理想解和负理想解向量: $Z_i^+=[0.075\ 0.087\ 0.122\ 0.068\ 0.197\ 0.118\ 0.123\ 0.108\ 0.102]$; $Z_i^-=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 。根据式(6)、(7)、(8)计算各评价目标到正理想解和负理想解的欧氏距离 D_i^+ 、 D_i^- 和相对贴近距离 D_i ,结果见表3。

表3 改进理想解法评价结果

Table 3 The results of improved TOPSIS method

观测点	D_i^+	D_i^-	相对贴近距离 D_i
1	0.089 3	0.334 0	0.000 0
2	0.284 5	0.125 9	0.285 3
3	0.152 4	0.221 3	0.129 2
4	0.301 8	0.092 8	0.321 4
5	0.300 9	0.101 5	0.314 4

相对贴近距离越小,评价目标性能越优,可以很直观地发现,电能质量的排序结果为:观测点1>观测点3>观测点2>观测点5>观测点4。

3)以相对贴近距离 D_i 结合秩和比(RSR)法,对改进理想解法的评价结果进一步分档处理。将 D_i 值由小到大排序,按照文3.2节所述方法,求出相应的概率单位值(*Probit*),见表4。

表4 相对贴近距离分布

Table 4 Distribution of relative similarity distance

观测点	D_i	f_i	Σf_i	R	$\bar{R}$	$\bar{R}/m$	<i>Probit</i>
1	0.000 0	1	1	1	1	0.20	4.16
3	0.129 2	1	2	2	2	0.40	4.75
2	0.285 3	1	3	3	3	0.60	5.25
5	0.314 4	1	4	4	4	0.80	5.84
4	0.321 4	1	5	5	5	0.95*	6.64

注:按 $(1 - \frac{1}{4 \times m})$ 估算。

4)以表4中的 *Probit* 为自变量, D_i 为因变量,用MATLAB等软件拟合出线性回归方程,即

$$\hat{D}_i = -0.491\ 67 + 0.13171 \times \text{Probit} \quad (10)$$

为避免分级过少导致无法有效区分各观测点电能质量优劣,以及分级过多导致失去分级评价的意义,将电能质量分为5个等级^[17],优质(1级)、良好(2级)、中等(3级)、合格(4级)、不合格(5级)。根据表1选定相应的 *Probit* 临界值(即3.20, 4.40, 5.60, 6.80),由式(10)计算得到5个等级对应的临界相对贴近距离,再根据表3所列出的每个观测点的 D_i 值,将各点分入不同的等级,见表5。

采用文[17-20]所用算法(模糊理论,遗传投影寻踪插值模型,可拓云理论,动态时间弯曲空间距离度量)对文中所选观测点电能质量进行综合评价,对

比结果见表6。

表5 基于改进 TOPSIS-RSR 法的电能质量评价结果

Table 5 The evaluation results based on improved TOPSIS-RSR method

等级	<i>Probit</i>	D_i	分档结果
1	<3.20	<-0.070 198	—
2	[3.20, 4.40)	[-0.070 198, 0.087 854)	观测点 1
3	[4.40, 5.60)	[0.087 854, 0.245 906)	观测点 3
4	[5.60, 6.80)	[0.245 906, 0.403 958)	观测点 2、4、5
5	≥ 6.80	$\geq 0.403\ 958$	—

表6 几种综合评价方法的比较

Table 6 Comparison of the evaluation results based on different evaluation methods

观测点	文[18]	文[17]	文[19]	文[20]	文中
	模糊理论	遗传投影寻踪	可拓云理论	空间距离度量	改进 TOPSIS-RSR 法
1	2级	2.05级	2级	2级	2级
2	4级	4.00级	4级	4级	4级
3	3级	3.00级	3级	3级	3级
4	3级	3.46级	4级	4级	4级
5	4级	4.00级	4级	4级	4级

由表6可知,采用文中所提方法对该观测站进行电能质量综合评价,其结果与文[19-20]一致,与文[17-18]相比,除观测点4外也相同。文[18]所采用的模糊理论在对电能质量进行综合评价时难以确定各指标的权重,对评价结果的准确性造成一定影响;文[17]建立的遗传投影寻踪插值模型较为复杂,通常需要大量的训练样本,在处理小样本模型时会有偏差。

相比于可拓云理论和动态时间弯曲空间距离度量,基于改进 TOPSIS-RSR 法的电能质量综合评价方法模型简单,原理清晰,工程实用性强;各地区用户对电能质量要求不同,某些地区对电能质量的分级只需要“优、中、差”3个等级,对照表1查出相应 *Probit* 临界值,即可灵活方便地将等级数改变为3个等级,可拓展性强。

5 结论

1)文中将改进理想解法与秩和比法相结合,采用熵权法确定电能质量指标权重,提出了一种新的电能质量综合评价方法。通过引入相对贴近距离,克服了传统理想解法的局限性和不足之处;以相对贴近距离结合秩和比法,运用秩和比法的理论进一步对评价结果进行处理,避免了可能出现的信息不准确问题,同时根据标准正态离差分档,克服了传

统电能质量分级评价的不确定性和随机性。

2)运用所提出的算法对某 380 V 观测站中 5 个观测点的电能质量实测数据进行综合评价,得到评价结果:① 电能质量:观测点 1 > 观测点 3 > 观测点 2 > 观测点 5 > 观测点 4;② 分级评价:观测点 1 为 2 级,观测点 3 为 3 级,观测点 2、4、5 为 4 级。通过与其他文献评价结果的对比分析,验证了采用改进理想解法结合秩和比法对电能质量进行综合评价的有效性、准确性和合理性。

3)改进理想解法结合秩和比法的综合评价方法不仅可以得到满意的评价结果,而且算法简单,适用性较强,便于工程实现,为电能质量综合评价提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 武星,殷晓刚,宋昕,等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器,2013,49(9):142-149.
WU Xing, YIN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [2] 丁明,石雪梅. 新能源接入对主动配电网的影响[J]. 电力建设,2015,36(1):76-84.
DING Ming, SHI Xuemei. Effect of new energy paralleling to the active distribution networks[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 76-84.
- [3] 鲁刚,魏玢,马莉. 智能电网建设与电力市场发展[J]. 电力系统自动化,2010, 38(9):1-6.
LU Gang, WEI Bin, MA Li. Smart grid and electricity market[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 38(9): 1-6.
- [4] 徐永海,肖湘宁. 电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电网技术,2004,28(22):48-52.
XU Yonghai, XIAO Xiangning. Power quality problems in deregulated power systems[J]. Power Systems Technology, 2004, 28(22): 48-52.
- [5] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5073-5079.
LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079.
- [6] 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,2008,35(2):25-29.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Individuation indices and global indicator of power quality[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(2): 25-29.
- [7] 刘颖英,戴平,徐永海,等. 电能质量综合评估方法比较[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):93-97.
LIU Yingying, DAI Ping, XU Yonghai, et al. Comparison of power quality comprehensive evaluation methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 93-97.
- [8] 付学谦,陈皓勇. 基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):26-30.
FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on TOPSIS approach[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 26-30.
- [9] 欧阳森,廖一键,刘洋,等. 基于自主式决策的综合评价方法在电能质量领域的分析与运用[J]. 电网技术,2012,36(2):70-74.
OUYANG Sen, LIAO Yijian, LIU Yang, et al. An autonomous decision-making based method for comprehensive evaluation of power quality and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 70-74.
- [10] 付学谦,陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):128-132.
FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sum ratio method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 128-132.
- [11] 李玲玲,刘敬杰,凌跃胜,等. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报,2015,30(12):383-391.
LI Lingling, LIU Jingjie, LING Yuesheng, et al. Power quality comprehensive evaluation based on matter-element theory and evidence theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391.
- [12] 陈晟. 电能质量与供电可靠性关系分析[J]. 高压电器,2013,49(12):99-103.
CHEN Sheng. Analysis of relationship between power quality and power supply reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 99-103.
- [13] 赵霞,赵成勇,贾秀芳,等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术,2005,29(6):11-16.
ZHAO Xia, ZHAO Chengyong, JIA Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power Systems Technology, 2005, 29(6): 11-16.
- [14] 杨志超,张成龙,葛乐,等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [15] 林良生,邹平国,陈红,等. 基于熵权的逼近理想解排序法在核电设备质量评价中的应用分析[J]. 电力建设,2014,35(2):91-94.
LIN Liangsheng, ZOU Pingguo, CHEN Hong, et al. Application of TOPSIS method based on entropy weight in nuclear power equipment quality evaluation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(2): 91-94.
- [16] 恽昊,肖海容,邓春燕,等. 应用秩和比法综合评价几

- 种促透剂的效果[J]. 广东药学院学报, 2016, 32(1): 1-5.
- YUN Hao, XIAO Hairong, DENG Chunyan, et al. Evaluation of promoting effect of several transdermal enhancers with RSR[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2016, 32(1): 1-5.
- [17] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 85-88.
- TANG Huizhi, PENG Jianchun. Research on synthetic and qualified appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power Systems Technology, 2003, 27(12): 85-88.
- [18] 周 林, 栗秋华, 张 凤. 遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 32-35.
- ZHOU Lin, LI Qiu Hua, ZHANG Feng. Application of genetic projection pursuit interpolation model on power quality synthetic evaluation[J]. Power Systems Technology, 2007, 31(7): 32-35.
- [19] 李如琦, 苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 66-70.
- LI Ruqi, SU Haoyi. A synthetic power quality evaluation model based on extension cloud theory[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(1): 66-70.
- [20] 林德清, 顾 伟, 王元凯, 等. 基于动态时间弯曲空间距离度量的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 562-567.
- LIN Deqing, GU Wei, WANG Yuankai, et al. Synthetic evaluation of power quality based on dynamic time warping spatial distance measurement[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 562-567.
- 邱玉婷(1992—), 女, 硕士, 研究方向为电能质量分析评价、电力市场。
- 李济沅(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析和新能源技术。
- 邓 旭(1990—), 男, 硕士, 研究方向为配网自动化和电力系统分析。
- 邓国军(1988—), 男, 硕士, 研究方向为配网电能质量。
- 周 浩(1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 从事电力市场、高电压技术应用方面的研究工作。