

电能质量等级综合评估方法及其应用

电能质量问题日益受到供电企业与电力用户双方的重视，电能质量评估可衡量电能质量问题的严重性，对电能质量治理以及电力市场交易等方面工作具有重要意义。针对地区电网的电能质量综合评估问题提出一种等级综合评估方法，增强了评估方法的实用价值。首先建立电能质量评估指标体系并进行等级分类，其次设计了基于区间数逼近的电能质量综合等级评估模型，通过判断评估对象与相应电能质量等级的距离关系从而直观地反映其电能质量水平。最终将所提出的电能质量综合评估方法在地区电网进行实际应用，基于实测电能质量数据验证了提出方法的合理性与有效性。

周 刚 谢善益 范 颖 杨 强/广东电网电力科学研究院

0 引言

随着经济和技术的快速发展，非线性负荷的广泛应用，给电力系统带来越来越多电能质量问题^[1]，电压暂降以及短时中断等电能质量问题造成的影响已不得不在电能质量评估当中加以考虑^[2-3]。传统的只考核频率偏差、电压偏差和电压总谐波畸变率的工作模式已不能满足目前供电企业与电力用户对电能质量评估的需求。进行电力系统电能质量综合评估研究一方面有利于提高供电企业的电能质量管理水平与服务水平；另一方面在电力市场运营机制下，电能可实现按质定价，电能质量评估可能成为交易中重要的一环。

国内外学者针对电能质量评估问题开展了大量研究，目前的评估方式主要是根据现有的电能质量标准进行多指标评估，结果形式主要是综合量化评估和综合等级评估。综合量化评估的结果是一个具体的数值，可用于水平相近的评估对象之间的比较，进行电能质量排序；而综合等级评估则是对各单项指标

分别进行等级划分，然后通过具体的算法判断评估对象的指标集与电能质量各等级的隶属关系，其结果能直观地反映质量水平、适应大众需求。文献[4]明确提出了地区电网电能质量综合评估的概念。综合等级评估有两个主要的难题：

①各项电能质量评估指标的分级方法；
②各项评估指标是否需要赋权的问题。
在评估等级时，目前已使用的方法甚多，如模糊数学法、人工神经网络法、考虑用户需求的方法、区间数逼近法、基于云模型的物元理论法、雷达图法和灰色聚类法^[5-9]等。模糊数学评价方法是利用指标模糊化与隶属度对评估指标值矩阵进行隶属关系判断，实现等级划分^[8]。而人工神经网络模型具有很好的自学习、高速寻找优化解的能力，能够实现对某种电能质量等级的逼近，可用于电能质量综合等级评估的研究^[9-10]。但这两类算法难以在操作过程中考虑电能质量评估指标权重或很好地控制指标的权重分配问题。

本文将建立电能质量综合评估指标体系，将电压暂降与短时中断纳入电能质量综合评估指标体系中，使电能质量综合评估结果亦能反映短时电压变动问题。考虑各评估指标的国家标准限值和特殊行业要求对10 kV电压等级的各项电能质量进行等级划分，并以各项电能质量评估指标的国家标准限值和特殊行业要求为基础进行分析。提出基于区间数逼近的电能质量综合等级评估模型，并根据某地区电网的多个变电站电能质量监测数据对本文所提出的评估方法的有效性进行分析。



周 刚/高级工程师

关键词/Keywords

电能质量 ·
综合评估 ·
等级分类法 ·
区间数 ·

1 电能质量评估指标及其等级分类法

目前应用较广泛的电能质量指标体系包括电压偏差、电压波动和闪变、电压不平衡、谐波及频率偏差五项指标，也有文献已将电压暂降和短时中断列入指标体系，但未在综合评估模型中实现量化计算。

本文首次将系统平均有效值变化频率（System Average RMS Variation Frequency Index, SARFI）指标应用于综合评估模型中，使电能质量综合评估能反映短时电压变动问题。对于电压暂降与短时中断现象，参考我国电力系统的实际监测统计数据，采用 $SARFI_{90-T}$ 作为电压暂降与短时中断的评估指标。

$SARFI_{X-T}$ 描述的是特定周期内电压暂降与短时中断事件的发生频度，其计算公式如下

$$SARFI_{X-T} = \frac{ND}{D_T} \quad (1)$$

式中， X 为电压方均根阈值，可能的取值为90，80，70，50和10； N 为监测时间段内残余电压小于 $X\%$ 的电压暂降或短时中断的发生次数； D_T 为监测时间段内的总天数； D 为指标计算周期天数，可按月（30天）或年（365天）为周期。

综合等级评估模型需要将电能质量干扰程度划分为若干个区间，然后根据评估对象的实际各项干扰水平进行评定、判断，才能得到综合等级评估结果。因此，将电能质量干扰程度划分为若干个区间的等级分类法是综合等级评估模型的基础。目前，等级分类法不一，主要是根据国家标准的限值要求进行等区间划分；或根据干扰发射程度和电气设备抗扰能力以及特殊需求群体的要求，将电能质量分为五个等级，以设备免疫力（测试）水平、兼容水平、规划水平及特殊高需

求水平作为各等级之间的界限。

本文采用电压偏差、频率偏差、长时闪变、负序电压不平衡度、电压总谐波畸变率和 $SARFI_{X-T}$ 六个评估指标。建立六项电能质量指标的等级分类表如表1所示，各电能质量等级所表达的水平及其分类依据如下。

1) III级表示各项评估指标基本符合我国电能质量国家标准，即各评估指标区间的上限对应于我国国家标准对10 kV电压等级的公共连接点的限值要求。

2) II级表示在符合我国国家标准的基础上，电能质量进一步满足大部分行业的要求。

3) I级表示在II级的基础上，能够满足特殊行业的高水平的电能质量需求。

4) IV级表示电能质量已不符合我国国家标准，但部分设备还可以实现基本功能。

5) V级表示电能质量水平很差，各项评估指标已超出世界各国和地区的电能质量标准范围，需要进行电能质量治理。

2 基于区间数逼近的评估模型

每一个电能质量等级所对应的各项评估指标值是一个区间，因此本文采用基于区间数逼近^[11]的方法建立综合等级评估模型。

2.1 多指标区间数决策矩阵

设 C_k ($k=1, 2, \dots, Q$) 为电能质量等级， X_j ($j=1, 2, \dots, n$) 为评估指标， $\{e_{kj}^L\}$ 为等级 k 对应的评估指标 X_j 的区间下限值， $\{e_{kj}^U\}$ 为等级 k 对应的评估指标 X_j 的区间上限值，则表1可以表示为如表2所示。

设评估对象的电能质量指标集为 $\{[x_{01}^L, x_{01}^U], [x_{02}^L, x_{02}^U], \dots, [x_{0n}^L, x_{0n}^U]\}$ ，并用 $\{x_{kj}^L\}$ 和 $\{x_{kj}^U\}$ 分别表

表1 电能质量六个指标等级分类表

电能质量等级	电压偏差(%)	频率偏差/Hz	长时闪变值	负序电压不平衡度(%)	电压总谐波畸变率THDu(%)	$SARFI_{90-T}$
I级	[0, 3]	[0, 0.1]	[0, 0.7]	[0, 1.3]	[0, 3]	[0, 0.082]
II级	[3, 5]	[0.1, 0.2]	[0, 0.7]	[0, 1.3]	[0, 3]	[0.082, 0.164]
III级	[5, 7]	[0.2, 0.5]	[0.7, 1]	[1.3, 2]	[3, 4]	[0.164, 0.781]
IV级	[7, 10]	[0.5, 1]	[1, 1.3]	[2, 3]	[4, 5]	[0.781, 1.397]
V级	≥ 10	≥ 1	≥ 1.3	≥ 3	≥ 5	≥ 1.397

表2 电能质量等级分类表

C	X_1	X_2	X_3	$\cdots$	X_n
C_1	$e_{11}^L \sim e_{11}^U$	$e_{12}^L \sim e_{12}^U$	$e_{13}^L \sim e_{13}^U$	$\cdots$	$e_{1n}^L \sim e_{1n}^U$
C_2	$e_{21}^L \sim e_{21}^U$	$e_{22}^L \sim e_{22}^U$	$e_{23}^L \sim e_{23}^U$	$\cdots$	$e_{2n}^L \sim e_{2n}^U$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
C_Q	$e_{Q1}^L \sim e_{Q1}^U$	$e_{Q2}^L \sim e_{Q2}^U$	$e_{Q3}^L \sim e_{Q3}^U$	$\cdots$	$e_{Qn}^L \sim e_{Qn}^U$

示表1的 $\{e_{kj}^L\}$ 和 $\{e_{kj}^U\}$ ，则多指标的决策矩阵为

$$X = \begin{pmatrix} [x_{01}^L, x_{01}^U] & [x_{02}^L, x_{02}^U] & \cdots & [x_{0n}^L, x_{0n}^U] \\ [x_{11}^L, x_{11}^U] & [x_{12}^L, x_{12}^U] & \cdots & [x_{1n}^L, x_{1n}^U] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [x_{Q1}^L, x_{Q1}^U] & [x_{Q2}^L, x_{Q2}^U] & \cdots & [x_{Qn}^L, x_{Qn}^U] \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 指标规范化处理

在式(2)的决策矩阵中，有 n 个评估指标，各自的量纲不同，因此需要对决策矩阵进行规范化处理，考虑到原始数据与电能质量等级分类表中有大量的零值数据，对于极大型指标与极小型指标分别使用下式进行预处理，即

$$b_{kij} = \frac{x_{kij} - \min_k \min_j x_{kij}}{\max_k \max_j x_{kij} - \min_k \min_j x_{kij}} \quad (3)$$

$$b_{kij} = \frac{\max_k \max_j x_{kij} - x_{kij}}{\max_k \max_j x_{kij} - \min_k \min_j x_{kij}} \quad (4)$$

可得 $b_{kj}^L, b_{kj}^U \in [0, 1]$ ，($k = 0, 1, 2, \cdots, Q; j = 0, 1, 2, \cdots, n$)，得到规范化的区间数决策矩阵

$$B = \begin{pmatrix} [b_{01}^L, b_{01}^U] & [b_{02}^L, b_{02}^U] & \cdots & [b_{0n}^L, b_{0n}^U] \\ [b_{11}^L, b_{11}^U] & [b_{12}^L, b_{12}^U] & \cdots & [b_{1n}^L, b_{1n}^U] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [b_{Q1}^L, b_{Q1}^U] & [b_{Q2}^L, b_{Q2}^U] & \cdots & [b_{Qn}^L, b_{Qn}^U] \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.3 区间数决策评价矩阵

本文根据文献[10]提出的改进熵权法获得电能质量评估指标权重相量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)^T$ ，与区间数决策矩阵 B 加权，得到区间数决策评价矩阵

$$Y = B\omega^* = \begin{pmatrix} [y_{01}^L, y_{01}^U] & [y_{02}^L, y_{02}^U] & \cdots & [y_{0n}^L, y_{0n}^U] \\ [y_{11}^L, y_{11}^U] & [y_{12}^L, y_{12}^U] & \cdots & [y_{1n}^L, y_{1n}^U] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [y_{Q1}^L, y_{Q1}^U] & [y_{Q2}^L, y_{Q2}^U] & \cdots & [y_{Qn}^L, y_{Qn}^U] \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.4 决策评价准则

以等级分类表为参照基准，从整体逼近的角度出发，建立区间数逼近决策的评定准则。本文采用欧式距离来度量评估对象的指标集与各电能质量等级之间的差异。评估对象的指标集到各等级的距离越短表示越接近，最小距离所在的等级即为评估对象的评估级别。评估对象 S_i 的指标集到各电能质量等级 C_k 的距离公式为

$$d_k = d(S_i, C_k) = \sqrt{(d_{k1}^+)^2 + (d_{k2}^+)^2 + \cdots + (d_{kn}^+)^2} \quad (7)$$

式中， $k = 0, 1, 2, \cdots, Q; j = 0, 1, 2, \cdots, n$ ，且

$$d_{kj}^+ = \max(|y_{0j}^L - y_{kj}^L|, |y_{0j}^U - y_{kj}^U|) \quad (8)$$

评估对象 S_i 的电能质量评估级别由最小的 d_k 决定。

2.5 算法流程

本章提出的等级分类法以及基于区间数逼近的评估模型，本文提出一个电能质量综合等级评估模型，算法步骤如下。

- 1) 输入所有评估对象的各项评估指标数据。
- 2) 输入电能质量等级分类表的数据。
- 3) 根据式(3)或式(4)分别对各评估对象的评估指标集和等级分类表数据进行归一化处理，得到式(5)的规范化的区间数决策矩阵。
- 4) 根据评估指标权重相量和步骤3)的区间数决策矩阵，得到式(6)的区间数决策评价矩阵。
- 5) 根据式(7)计算各评估对象指标集与各电能质量等级的欧氏距离，并进行等级判断，得出综合等级评估结果。

3 算例分析

本章将应用本文所提出的方法对某地区供电范围内的某地区电网(10个变电站)2013年的电能质量进行综合等级评估分析。

数据来源于该地区的电能质量在线监测系统，该系统已于2013年投入正式运行。系统的运行概况界面以及相关电能质量数据查询统计界面如图1、图2所示。

所涉及的评估指标与相应的数据统计情况如表3所示，统计时间是2013年全年，以月为监测



图1 电能质量概况界面



图2 暂态事件统计界面

周期；既统计了所有变电站10 kV主变压器的各评估指标的CP95值，也统计了其最小值；因此共有 $10 \times 12 \times 2 = 240$ 组电能质量数据。

表3 评估指标体系及统计情况

评估指标	数据统计情况			
	分相/不分相测量	统计值	单位	监测周期
电压偏差	分相测量	CP95值、最小值	%	月
电压总谐波畸变率	分相测量	CP95值、最小值	%	月
长时闪变	分相测量	CP95值、最小值	—	月
负序电压不平衡度	不分相测量	CP95值、最小值	%	月
频率偏差	不分相测量	CP95值、最小值	Hz	月
SARFI ₉₀₋₇	分相测量	实际值	—	月

限于篇幅，此处仅给出单个变电站 (S_1) 2013 年的各项电能质量评估指标的统计值，如图3所示。

由表1可见，每一个等级的评估指标的范围是

一个区间，由于采用的是基于区间数逼近的评估模型，因此进行评估的原始数据也是对应的两组数据。以各变电站各项电能质量指标统计结果中的最大值和最小值分别作为两组数据，如表4、表5所示。

根据改进熵权法获得各项电能质量指标的权重分配结果如表6所示。

以表1作为多指标的决策矩阵，表6的权重分配结果作为式(6)的指标权重相量，建立基于区间数逼近的电能质量综合评估模型，对变电站 $S_1 \sim S_{10}$ 进行电能质量综合等级评估。计算得各变电站指标集与各电能质量等级指标集之间的距离及最终的电能质量综合等级评估结果，如表7

所示。

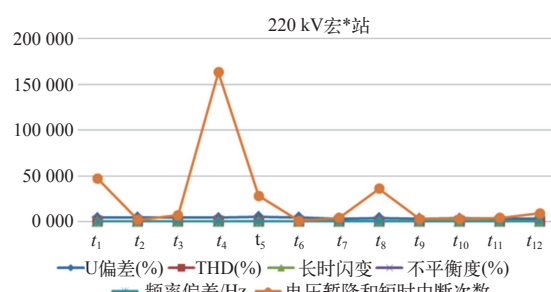


图3 变电站 S_1 各项电能质量评估指标统计值

尽管变电站 S_1 的最大值在V级范围，评估结果却仍是II级；变电站 S_3 的最大值在IV级，评估结果却仍是III级。原因是所有变电站中只有很少数量的 $SARFI_{90-7}$ 指标值较大，算例数据中87%的值都在0.74以下，因此总体有87%的值都是至少III级及以上。然而仅仅是基于区间数逼近的评估模型是无法考虑这些因素的，因为其仅关注区间的最大

表4 电能质量数据（最大值）

变电站	电压 偏差(%)	电压总谐波 畸变率(%)	长时 闪变	不平 衡度(%)	频率 偏差(%)	SARFI ₉₀₋₇
S ₁	5.25	0.71	0.43	0.10	0.17	13.40
S ₂	5.10	2.06	0.49	0.13	0.15	1.56
S ₃	7.49	3.98	3.39	0.44	0.16	1.15
S ₄	5.56	1.29	0.28	0.48	0.18	0.41
S ₅	4.44	1.11	0.34	0.26	0.23	0.90
S ₆	10.81	4.93	0.33	0.13	0.18	1.89
S ₇	6.92	1.52	0.25	0.41	0.18	1.40
S ₈	5.14	1.23	0.16	0.25	0.17	0.25
S ₉	5.64	1.66	0.27	0.26	0.15	0.58
S ₁₀	5.32	4.05	0.23	0.11	0.18	0.99

表5 电能质量数据（最小值）

变电站	电压 偏差(%)	电压总谐波 畸变率(%)	长时 闪变	不平 衡度(%)	频率 偏差(%)	SARFI ₉₀₋₇
S ₁	3.26	0.43	0.17	0.06	0.06	0.08
S ₂	3.00	1.15	0.12	0.08	0.06	0.00
S ₃	5.85	3.76	2.93	0.10	0.07	0.00
S ₄	4.31	0.75	0.08	0.06	0.06	0.00
S ₅	3.61	0.89	0.27	0.08	0.06	0.00
S ₆	8.58	4.43	0.10	0.08	0.06	0.00
S ₇	4.66	1.02	0.09	0.14	0.06	0.00
S ₈	3.50	0.75	0.06	0.07	0.06	0.00
S ₉	4.39	1.15	0.09	0.17	0.06	0.00
S ₁₀	4.45	3.79	0.09	0.06	0.06	0.00

表6 权重分配结果

评估 指标	电压 偏差(%)	电压总谐波 畸变率(%)	长时 闪变	不平衡度 (%)	频率偏差 (%)	SARFI ₉₀₋₇
权重	0.177	0.260	0.172	0.145	0.140	0.107

值和最小值，无法判断其分布情况，但是通过改进熵权法能够判断SARFI₉₀₋₇的分布差异，具体表现为给予该指标最小的权重，因此SARFI₉₀₋₇指标对总体结果的影响最小。

由于算例中10个变电站的各项电能质量评估指标绝大部分都在国家标准以上（与III级电能质量对应），因此只评出II级和III级两类电能质量的结果是符合事实的。

将通过改进熵权法赋权进行综合量化评估的结果与表7的综合等级评估结果进行对比，如图4所示。客观而言，电能质量水平越高，综合量化评估值越高，其对应的电能质量等级应越高，而

表7 电能质量综合等级评估结果

变电站	与各等级的距离					电能质量综合等级评估 结果
	I	II	III	IV	V	
S ₁	0.15	0.14	0.18	0.25	0.34	II
S ₂	0.08	0.07	0.13	0.21	0.33	II
S ₃	0.22	0.21	0.14	0.17	0.26	III
S ₄	0.11	0.09	0.15	0.23	0.34	II
S ₅	0.11	0.09	0.15	0.23	0.35	II
S ₆	0.22	0.20	0.13	0.17	0.26	III
S ₇	0.11	0.09	0.14	0.22	0.33	II
S ₈	0.11	0.10	0.16	0.24	0.35	II
S ₉	0.10	0.08	0.14	0.22	0.34	II
S ₁₀	0.17	0.16	0.12	0.19	0.30	III

图4正好符合了这个规律。

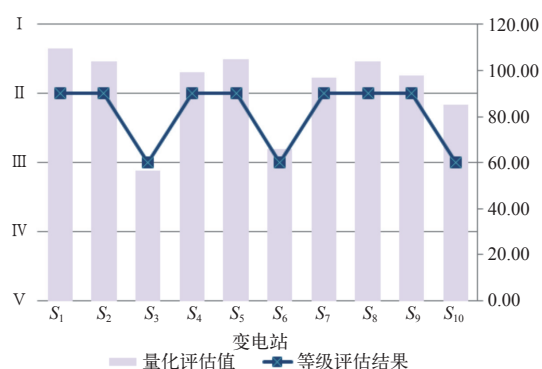


图4 综合量化评估与综合等级评估结果对比

图4中，综合量化评估值高的、排序前七名的变电站（S₁、S₅、S₂、S₈、S₄、S₉和S₇），均被评估为II级，而综合量化评估值较低的排序后三名的变电站（S₁₀、S₆和S₃）被评估为III级，两种评估结果的一致说明综合等级评估结果能客观反映该10个变电站的电能质量水平。

4 结束语

本文针对地区电网的电能质量综合评估问题提出一种等级综合评估方法，并应用于地区电网的电能质量评估，获得结论如下。

1) 本文首次提出将电压暂降与短时中断纳入综合评估模型，使用我国电能质量标准推荐的SARFI作为电压暂降与短时中断的评估指标，弥补了电压暂降与短时中断在电能质量综合评估中的空白。

2) 基于世界各国各机构的标准、部分行业的特殊需求提出了针对电力系统公共连接点(10 kV)的电能质量综合等级分类法,将电能质量分成五个等级,可更直观地反映电能质量等级评估的结果。

3) 算例分析实现了对某地区电网10个变电站的2013年电能质量的综合等级评估,其综合等级评估结果与综合量化评估结果实现了对应,说明本文的综合等级评估模型能客观反映评估对象的电能质量水平。

参考文献

- [1] 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(2):25-29,41.
- [2] 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.
- [3] 肖先勇,马超,杨洪耕,等.用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J].中国电机工程学报,2009,29(31):115-117.
- [4] 刘颖英,徐永海,肖湘宁.地区电网电能质量综合评估新方法[J].中国电机工程学报,2008(22):

130-136.

- [5] 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):93-97,100.
- [6] 康世崴,彭建春,何禹清.模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J].电网技术,2009,33(19):113-118.
- [7] 王宗耀,范莉,苏浩益.基于区间数理论的电能质量综合评估模型[J].电力系统保护与控制,2012,40(3):41-45,50.
- [8] 杨家豪,欧阳森,石怡理,等.一种组合隶属度函数及其在电能质量模糊评价中的应用[J].电工电能新技术,2014,33(2):63-69.
- [9] 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.
- [10] 欧阳森,石怡理.改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J].电力系统自动化,2013,37(21):156-159,164.
- [11] 盛海宁,赵亮,连旭磊.运用区间数逼近算法的电能质量评估研究[J].电力科学与工程,2010,26(6):19-23.

(收稿日期:2016-03-16) **EA**

(上接第22页)

- [5] 赵永昌,王振方,叶秀成.35 kV绝缘管母外绝缘护套烧损故障分析[C].虚拟运营与云计算——第十八届全国青年通信学术年会论文集,2013.
- [6] 姜庆密,亓富军,田纪法.复合屏蔽绝缘管母线局部发热成因及案例处理[J].电气技术,2013(9):53-57.
- [7] Tanaka T. Internal partial discharge and material degradation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(6):899-905.
- [8] Fabiani D, Montanari G C. The effect of voltage distortion on ageing acceleration of insulation systems under partial discharge activity[J]. IEEE Electrical

Insulation Magazine, 2001, 17(3):24-33.

- [9] 张亮,李军浩,谭家勇.绝缘铜管母线接头处沿面局部放电特性研究[J].高压电器,2013(11):94-98.
- [10] 郑云海,吴奇宝,何华琴.全绝缘管母线局部放电的检测与分析诊断[J].绝缘材料,2010,43(4):63-66.
- [11] Parr J E, Moruzzi J L. Electron attachment in water vapor and ammonia[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1972, 5(3):514-524.
- [12] 葛景滂,邱昌容,谢恒堃.局部放电测量[M].北京:机械工业出版社,1984.

(收稿日期:2015-07-30) **EA**