

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190514

## 电能质量综合评估研究现状及发展趋势

刘颖英<sup>1</sup>, 冯丹丹<sup>1</sup>, 林才华<sup>2</sup>, 张逸<sup>2</sup>

(1. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209; 2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 电能质量综合评估对实施有效的电能质量管控和电力市场环境下合理的依质定价至关重要。根据评估指标、评估权重及评估模型三方面的特性进行了分类, 概述了电能质量综合评估的研究现状。在此基础上, 总结了现有方法所存在的问题: 无法适应不同应用需求、尚未针对长时间尺度进行评估、未综合考虑评估结果的治理成本和经济效益、较少考虑暂稳态指标融合等。最后指出考虑经济效益的评估方法、DG 并网条件下的综合评估、数据驱动的电能质量评估及能源互联网电能质量综合评估是未来此领域可能的研究方向。

**关键词:** 电能质量综合评估; 研究现状; 评估模型; 发展趋势

### Current status and development trend of power quality comprehensive assessment

LIU Yingying<sup>1</sup>, FENG Dandan<sup>1</sup>, LIN Caihua<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The comprehensive assessment of power quality is essential for the implementation of effective power quality control and reasonable pricing in the power market environment. According to the characteristics of evaluation index, evaluation weight and evaluation model, this paper classifies and summarizes the research status of power quality comprehensive evaluation. On this basis, it summarizes the problems in existing methods including it cannot adapt to different application requirements, has not been evaluated long-term scales, has not considered the governance costs and economic benefits of the evaluation results comprehensively, and has less consideration of the integration of transient steady-state indicators. Finally, this paper points out that the evaluation method considering economic benefits, the comprehensive evaluation under DG grid-connected conditions, the data-driven power quality assessment and the comprehensive evaluation of energy internet power quality are the future research directions in this field.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777035) and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGGR0000DLJS1800467).

**Key words:** power quality comprehensive assessment; research status; evaluation model; development trend

## 0 引言

随着电力系统的发展, 特别是非线性、冲击负荷容量及数量的大量增加, 电能质量问题日益突出, 不仅关系到电网企业的安全经济运行, 也会影响到用电设备的正常工作<sup>[1]</sup>。如何实现更加科学客观的电能质量综合评估, 对电力市场环境下全面考核电能质量、修正电价和电能质量管控模型研究具有重要意义<sup>[2]</sup>。

电能质量是一个多指标的综合体, 单纯判断某项指标是否合格, 不能反映电能质量的整体状况, 也不便于量化扰动引起的损失和未来电力市场环境下的“依质定价”<sup>[3]</sup>, 因此需要对电能质量进行综合性的评估。电能质量综合评估是在对系统电气运行参数进行实际测量或通过建模仿真获得基本数据后, 再对电能质量各项特性指标做出评价以及和标准等级进行比较的过程<sup>[4]</sup>。国内外相关研究机构已经在此方面做了大量的研究。

本文首先从评估指标、评估权重及评估模型三方面的特性出发, 综述了电能质量综合评估的研究现状; 其次, 在此基础上, 分析总结了现有研究所

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777035); 国家电网公司总部科技项目资助(SGGR0000DLJS1800467)

存在的问题；最后，针对现有的问题，结合电力行业的发展趋势展望了未来电能质量综合评估的发展方向。

### 1 电能质量综合评估研究现状

#### 1.1 研究分类

在针对电能质量综合评估的研究中，国内外已有大量文献围绕着评估指标的模糊性和随机性、评估权重的主观性和客观性、评估模型的复杂性和抽象性等方面展开研究，研究分类如图 1 所示。其中，不同区域的交集分别表示同时考虑多种不同特性组合的评估方法。

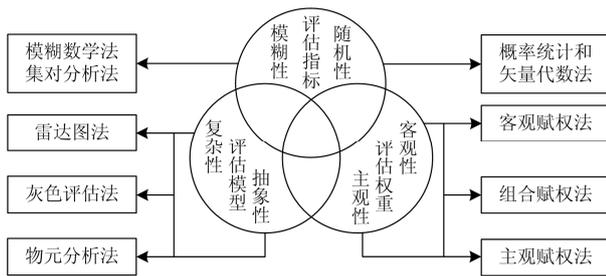


图 1 电能质量综合评估现有研究分类图

Fig. 1 Classified current researches of power quality comprehensive assessment

#### 1.2 基于指标特性的评估方法

##### 1.2.1 模糊数学法

电能质量中的一些指标对问题的描述具有模糊性，很难用定量关系表示，模糊理论为解决这类问题的有效手段。该方法首先对各项指标进行模糊化，建立隶属度函数；然后利用电能质量监测数据确定各指标相应的隶属度，形成模糊集；最后采用概率和来实现模糊集的整合。其中，概率和用“ $\hat{+}$ ”表示，定义为

$$A(x) \hat{+} B(x) = A(x) + B(x) - A(x)B(x) \quad (1)$$

式中， $A(x)$ 、 $B(x)$  分别表示同一指标不同影响因素的隶属度。

目前，模糊理论在电能质量综合评估方面得到了广泛的应用。文献[5]采用择近原则来判断电能质量的综合等级，但贴近度对模糊关系的刻划不够细致，最大隶属度原则掩盖了介于两个隶属度之间的差别，可能导致严重的判断偏差。文献[6]在对电能质量各项指标进行模糊判断的同时引入权重系数，避免了最大隶属度原则的片面性，但层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 为主观赋权法，客观性差。在此基础上，文献[7]从模糊理论出发，结合小波分析法，提出了一种新的基于模糊小波变换

的电能质量综合评估方法，实现了非稳态不平衡配电网的电能质量评估。

模糊理论在处理电能质量的模糊性问题上具有明显优势，但是隶属度函数的确定和权重的选择受人为因素影响过大，且其计算复杂，不利于电能质量的客观评价和实际推广应用。

##### 1.2.2 集对分析法

集对分析法是处理系统确定性与不确定性相互作用的数学方法。该方法从同异反三方面研究事物之间的联系与转化，并用联系度来描述模糊、随机和信息不完全导致的各种不确定性。文献[8-9]应用集对分析法，即联系度概念，对每一指标做联系度分析，结合指标权重，建立集对分析模型，以解决电能质量综合评估指标的不确定性。

集对分析法是解决指标不确定性问题的新方法，但是现有研究对同异反的定义不唯一，导致差异度系数的取值具有差异性。因此，需要对集对分析法进一步研究。

##### 1.2.3 概率统计和矢量代数法

概率统计和矢量代数法是一种将各项指标的模糊性具体量化的方法。该方法首先将各项指标依据国标和实际情况的要求平均划分为若干等级；然后在确定电能质量评估考察期的基础上，获得各项指标处于第  $k$  级的概率分布；最后求出各项指标概率分布的期望值和方差，从而确定电能质量所处的等级。文献[10]提出了基于日周期应用的概率统计和矢量代数的电能质量量化和评估方法。

该方法能综合考虑各项评估指标的特性，基本不受人为主观因素的影响，但是不同分项指标归一量化过程中基准值选取是否得当，会严重影响评估结果的准确性，且该方法很难满足用户或实际情况的特殊需求。

#### 1.3 基于权重特性的评估方法

##### 1.3.1 主观赋权法

主观赋权法是根据决策分析者对各项指标的主观重视程度而赋权的一类方法，其中应用最广泛的是 AHP。AHP 是一种将定性分析与定量分析相结合的多目标决策方法，采用的是先分解后综合的系统思想，其实现步骤如图 2(a) 所示。文献[11]基于 AHP 实现了电能质量的综合评估。在此基础上，文献[12]针对不同分布式电源 (Distributed Generator, DG) 系统，提出了电能质量评估的综合指标，为不同系统在不同运行条件下的电能质量综合评估提供依据。

传统 AHP 是应用特征向量法来确定主观权重，需要对判断矩阵进行一致性校验，然而对复杂事物的各因素进行两两比较时，不可能做到完全一致，

很难在实际中应用。因此, 国内外学者采用 D-S 证据理论<sup>[13]</sup>或通过构建比较矩阵<sup>[14]</sup>等方式, 解决了判断矩阵不一致性的问题, 实现了考虑不同类型负荷敏感程度的电能质量综合评估。除此之外, 文献[15]根据模糊理论和变异系数法对 AHP 进行改进, 还实现了不同 DG 并网条件下的电能质量综合评估。值得注意的是, 当多位专家同时确定权重时, 通常需运用灰色关联理论<sup>[8]</sup>和熵值法<sup>[9]</sup>对多位专家应用 AHP 得到的权重进行调整, 避免各专家意见不统一造成权重分配错误。

在实际电网中, 如果存在个别电能质量指标严重恶化, 而其他指标都非常好, 简单地采用 AHP 去加权计算各指标, 则可能会误判为合格, 而 D-S 证据理论恰好能在规则中反映未知信息, 在推理过程中区分不确定信息。因此, 文献[16]基于 D-S 证据理论, 结合 AHP 实现了考虑用户不同需求的电能质量综合评估。然而电力用户一般未对电能质量的评估体系进行深入研究, 单纯依据用户评价可能使评估结果缺乏科学性。因此, 文献[17]基于 D-S 证据理论, 提出了一种同时考虑不同用户需求和专家知识的电能质量综合评估方法。

主观赋权法不需要原始数据, 只需决策者根据自身经验来进行判断, 操作简单, 易于快速掌握和实践应用, 但其主观随意性较大, 评价结果不客观。

1.3.2 客观赋权法

客观赋权法是一种根据评估对象自身的数据特性对其进行客观赋权的方法。文献[18]基于快速独立元分析, 充分挖掘原始数据所包含的信息, 考虑电能指标的连续性和离散性, 实现了电能质量的客观评价。除此之外, 熵值法、主成分分析法、模

糊神经网络以及遗传投影寻踪法也是实现电能质量客观评估的常用方法。

熵值法是一种用来判断某个指标的离散程度的数学方法。该方法的原理是根据某项属性的数据序列的变异程度来确定它相对应的权系数, 其实现步骤如图 2(b)所示。

主成分分析法是在保持原变量信息基本不变的前提下, 用少数几个线性组合来代替原变量的一种方法, 然而主成分分析的出发点是相关系数矩阵, 它可能使得综合评估的实际结果与评估指标间相关程度的高低成正比, 从而导致主成分分析法的降维作用不明显, 而且主成分分析法是一种线性降维方法, 只能处理线性问题, 很难在实际应用中推广。因此, 文献[19]提出了非线性主成分分析法, 其实现步骤如图 2(c)所示。

模糊神经网络是模糊理论同神经网络相结合的产物, 是把人类的经验和知识进行数字化和模糊化处理, 把规则和推理转换成神经网络的映射处理的一类方法。文献[20]建立了模糊神经网络综合评估模型, 能客观地反映评估指标之间的内在关系, 但前提是需要大量的样本进行训练。

投影寻踪法具有逼近一般非线性映射和分类的能力, 是利用计算机技术把高维数据投影到低维子空间, 从而实现高维数据研究的一种方法, 然而投影寻踪法在处理小样本问题时易产生模型误差, 处理多元数据问题时很难找到最优投影方向。因此, 文献[21]采用了一种自由全局优化搜索算法, 有效地优化了投影寻踪评价函数, 避免陷入局部次优特性, 实现了电能质量客观评估。

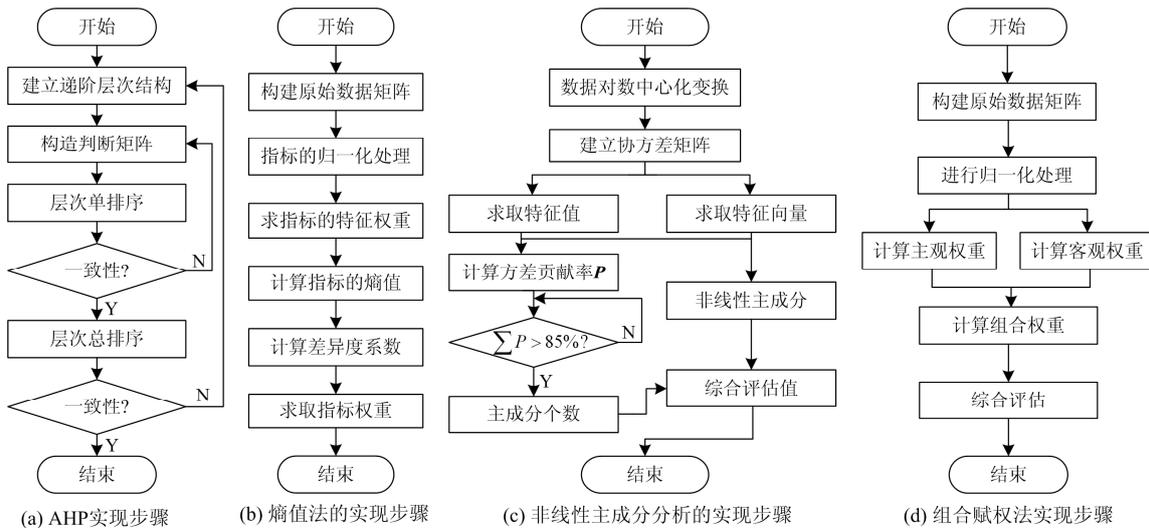


图 2 权重特性的评估方法流程图

Fig. 2 Flow chart of evaluation method of weight characteristics

客观赋权法所确定的权重系数虽然在多数情况下客观性较强,但赋权结果未能反映指标的实际重要程度,可能造成赋权结果与客观实际存在一定的差距,且其计算过程较复杂,需要一定数量的原始数据资料,在实践应用方面难以普及。

### 1.3.3 组合赋权法

单一赋权法容易受赋权方法的影响而造成偏倚,因此基于客观赋权法和主观赋权法相结合的组合赋权法得到越来越广泛的应用。组合赋权法通常是先利用 AHP 确定各项指标的主观权重,然后根据不同类型负荷的敏感程度<sup>[22]</sup>、熵值法<sup>[23-25]</sup>、离差最大化法<sup>[26]</sup>获得客观权重,最后通过线性加权<sup>[23]</sup>、乘法加权<sup>[22,24-26]</sup>、相对熵理论<sup>[27]</sup>、离差最大化模型<sup>[28]</sup>求取各指标的组合权重,其实现步骤如图 2(d)所示。

二阶段法可以看成组合赋权法的扩展,是一种基于最优化理论的评估方法。该方法充分考虑评估方案的差异和偏好信息,利用优化模型修正给定的指标初始权重,避免出现“赋权不公平”的情形。文献[29]基于最小二乘法建立了指标权重的优化模型,以修正指标权重。

组合赋权法能最大限度地减少信息损失,使赋权结果尽可能地与实际结果接近,但是计算较为复杂,不易应用于实际,且主客观权重如何更好地分配还需进一步研究。

## 1.4 基于模型特性的评估方法

### 1.4.1 物元分析法

物元分析法是研究矛盾问题规律的方法。物元可拓模型是利用物元分析法,结合可拓学集合论,建立的事物多指标性能参数的评定模型,其评估流程如图 3(a)所示。

物元可拓模型虽然能较简单、客观地实现电能质量的综合评估,但是在理论和应用上也存在不完善之处,如当指标数据超出节域时,关联函数就无法计算,进而无法进行评价;评价过程中,容易损失信息,从而易导致评定结果偏差等。因此,文献[30]对物元可拓模型的经典域和待评物元以及最大隶属度评价准则进行了改进。

物元分析法在解决电能质量综合评估建模的复杂性上有明显的优势,其建模简单,易于计算机编程处理,具有较好的实用性,但是由隶属度算法扩展而来的关联度算法具有同隶属度算法一样的不足,降低了评定结果的准确度。

### 1.4.2 雷达图法

雷达图分析法是基于形似导航雷达显示屏上的图形而构建的一种多变量对比分析技术,其原理是利用图形的形式表达评估中各项指标的数量关系,

结合对图像特征的数学处理,计算雷达图的相关变量给出定性评估结果。文献[31]根据多层次交互式算法确定的各指标权重来绘制雷达图,并根据雷达图的面积、边长、周长等特征量来实现电能质量的综合定量评估,避免数据归一化过程中的信息丢失。

传统的雷达图法在运用中效果较好,但也存在一些不足,如同一评估对象的各项指标间存在信息的共用问题;各指标的排列顺序不同,其面积周长也会不同,易造成评估结果的不一致性;各指标对应轴的夹角相同,无法通过权重来反映各指标的重要程度;相邻指标共用一条轴,各指标独立性差,对评估的准确性有较大影响等。因此,文献[32-33]结合电网实际运行状况,选取关键特征指标,确定组合权重,从而确定各指标轴间夹角值。在此基础上,文献[34]对雷达图法和隶属度算法进行改进,提出逆向雷达图与高斯隶属度相结合的评估方法。

雷达图分析法虽然较为简单易行,但是不能很好地体现指标之间的相互作用与影响,而且可能出现“分级不连续”的情况。

### 1.4.3 灰色评估法

灰色评估是一种基于灰色系统理论,对系统或所属因子在某一时段所处的状态,做出一种半定性半定量的评价与描述的方法,主要分为灰色统计评估和灰色聚类评估。

灰色统计评估是以灰数的白化函数生成为基础,将一些具体数据,按某种灰类所描述的类别进行归纳的方法。文献[24]通过分析数据特征来获取序列间的差异信息,建立差值举证,以此计算出待评估样本与标准样本的关联度。文献[35]基于电能质量指标间的关联性和网络层次分析法形成加权决策矩阵,实现了电能质量的综合评估。在此基础上,考虑到 DG 的影响,文献[36]提出了基于突变决策理论的电能质量评估方法。

灰色聚类评估是将聚类对象对不同聚类指标所用的白化权函数按几个灰类进行归纳,以判断该聚类对象属于哪个灰类,从而实现电能质量的评估,其评估流程如图 3(b)。文献[37]利用灰色聚类理论的“模糊性”及“可解决小样本、贫信息不确定性”的特点,充分挖掘监测数据所包含的信息,实现了 DG 并网条件下的电能质量综合评估。在此基础上,文献[38]将区间灰色聚类和证据融合理论相结合,解决了评估对象分界线附近数据的分类问题。

灰色评估法能充分利用原始数据所提供的信息,在研究小样本、贫信息的不确定性系统具有明显优势,但是它对历史数据的依赖性较大,且不适

合研究“大样本，外延不明确”的对象<sup>[39]</sup>。

#### 1.4.4 其他评估法

为了得到定量的、全面的评估电能质量的方法，国内外学者从模型的复杂性和抽象性出发，提出了大量的评估方法，除上述以外，主要还有下列几种。

理想解法是一种基于双基准值的多目标综合评价方法，其评估流程如图 3(c)所示。文献[40]将理

想解法和 AHP 相结合，提出了电能质量三态——理想状态、实际状态和可能状态，简单有效地实现了电能质量评估。然而传统的理想解法使用相对贴近度来确定电能质量的综合评估等级，难以比较落在正理想解和负理想解角平分线上的评价目标的电能质量优劣。因此，现有研究大都根据秩和比法<sup>[41]</sup>或者灰色关联法<sup>[42]</sup>对其进行改进。

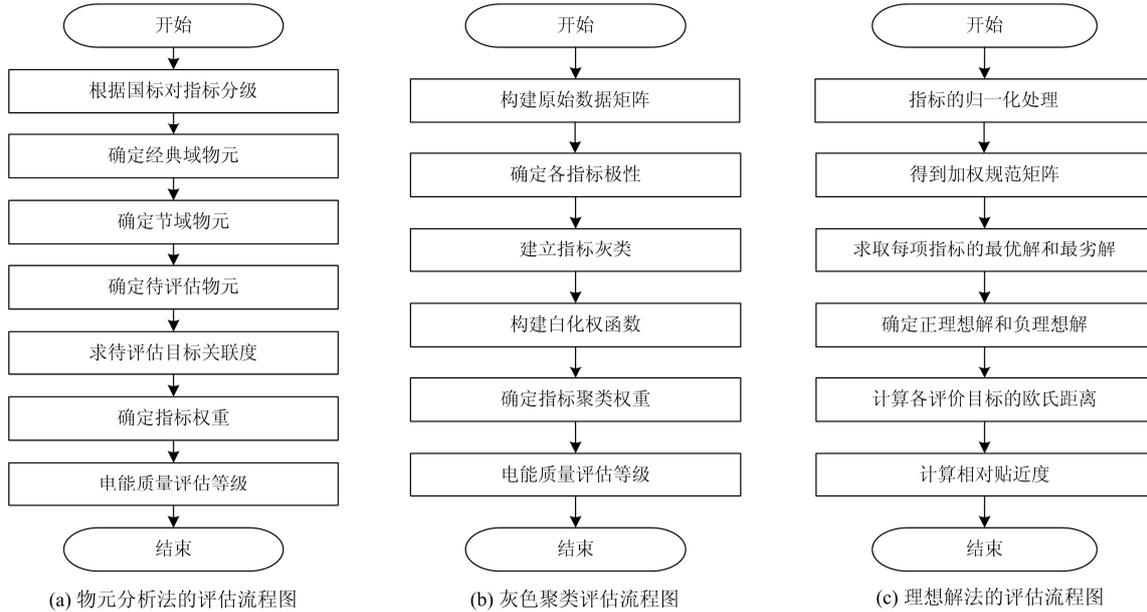


图 3 模型特性的评估方法流程图

Fig. 3 Flow chart of evaluation method for model characteristics

相似方法是在相似理论指导下，把个别现象系统化的研究结果推广到所有相似系统中的一类科学方法。文献[43]基于加速遗传算法和相似插值理论，构建了电能质量综合评估的新模型，克服了模糊综合评估等函数模式类评估方法无法合理构造评价指标集与评价等级之间函数关系的困难。

动态综合评价是一种综合体现评价对象的当前水平和历史水平，提供更全面的参考信息，反映评估对象在评估时间内变化趋势的方法。现有的方法主要有二次加权法、纵横向拉开的档次法、双激励控制线法<sup>[44]</sup>、基于竞争机制的评估方法<sup>[45]</sup>和云模型<sup>[46]</sup>等。其中，二次加权法和纵横向拉开档次法考虑了时序权重，但忽略了数据的动态特征；基于竞争机制的评估方法未考虑数据的时序权重；双激励控制线法和云模型实用性较差。

除此之外，为避免隶属度和权重对电能质量评估的影响，提出了数据包络分析模型<sup>[47]</sup>；为解决主观因素影响大和评估模型复杂或不够准确的问题，提出了基于未确知测度理论模型<sup>[48]</sup>。

#### 1.5 研究现状小结

电能质量综合评估是电能质量研究的一个重要分支，现有的研究大都是从指标的模糊性和随机性、权重的主观性和随机性、模型的复杂性和抽象性出发，采用一种或几种数学方法和统计学方法进行分析建模，结合典型电网结构进行仿真验证，从而实现电能质量的综合评估。以下对现有方法进行比较，见表 1。

#### 2 现有综合评估方法存在的问题

通过以上分析，本文认为现有的电能质量综合评估还存在以下四个问题：

1) 无法适应不同应用需求。电能质量综合评估对电网规划设计、电源负荷接入、设备运维检修等生产环节的优化运行控制都具有重要的参考意义，但不同应用场景有不同的综合评估需求，如规划设计阶段，主要考虑采用经济、可实施的方案使全网电能质量水平满足发射总限值；在负荷接入阶段，主要通过背景电能质量分析和负荷电能质量预测，保证公共连接点的兼容水平；在运维检修阶段，主

要根据实施监测数据,利用可控技术手段,避免电能质量问题,影响电网安全稳定运行和用户正常用电。不同阶段不但应用需求不同,而且评估数据的来源和统计方式也不同,现有的综合评估研究较少

综合考虑多源数据融合以及不同应用需求的影响,缺少对电能质量数据与电网、设备运行状态之间的关联性分析,较难满足实际生产过程中不同生产环节和应用人员的需求。

表 1 现有方法的比较

Table 1 Comparison of existing methods

评估特性	评估方法	优点	缺点
指标特性	模糊数学法	① 解决模糊性和不确定性问题; ② 量化定性指标。	① 受人为因素影响; ② 不能解决指标关联性造成的信息重复的问题。
	集对分析法	① 处理不确定性问题; ② 解决多集合问题。	① 同异反的定义不唯一; ② 差异度系数的取值受主观因素影响。
	概率统计和矢量代数法	① 不受主观因素影响; ② 原理简单明了。	① 计算复杂; ② 基准值选取困难, 易影响评估结果的准确性。
权重特性	主观赋权法	① 不需要指标的原始数据; ② 操作较简单, 实用性强。	① 主观随意性大; ② 评价结果不稳定。
	客观赋权法	① 依靠原始数据做出判断而非经验; ② 反映各指标间的内在关系。	① 计算过程较复杂; ② 需要一定数量的原始数据资料。
	组合赋权法	① 能最大限度地减少信息的损失; ② 赋权结果与实际结果较为接近。	① 计算复杂; ② 科学客观地实现权重分配组合较难。
模型特性	物元分析法	① 易于编程处理; ② 实用性强。	关联度计算复杂, 易受主观影响。
	雷达图法	建模简单易行。	① 较难体现指标之间的相互影响; ② 可能出现“分级不连续”的情况。
	灰色评估法	① 不需要大量的样本且样本不需要有规律性分布; ② 计算工作量小。	对历史数据的依赖性较大。

2) 尚未针对长时间尺度进行评估。现有的评估方法大都只提取某一时间断面数据作为综合评估的数据基础,但所提取时段的数据并不一定具有代表性。文献[49]提出了基于灾害等级概念的电能质量综合评估思路,只关注超标的、将会造成影响和不良后果的指标数据,大幅降低对装置和网络容量的限制。然而目前随着网络和计算机技术发展,电网公司普遍建成电能质量监测系统,实现了海量电能质量监测数据的存储和检索<sup>[50-52]</sup>,现有方法较少考虑电能质量指标的变化过程与趋势信息,并未充分挖掘海量数据的价值。

3) 未综合考虑评估结果的治理成本和经济效益。供用电双方关心的各种电能质量问题最终都归结为经济问题,电能质量综合评估的最终目的是为电能质量治理提供准确依据,并指导经济可行的治理方案。好的综合评估结果说明电能质量总体水平较高,同时也可能意味着要投入更多的治理成本。现有部分评估方法已经考虑了电能质量的经济损失<sup>[49,53]</sup>,但未涉及电能质量指标的治理成本,因此无法给出考虑最佳经济效益的评估结果。文献[49]利用考虑经济损失的电能质量灾害等级评估结果确定治理各种电能质量问题的优先顺序,但尚未综合考虑治理成本和经济效益对评估结果的影响。

4) 较少考虑暂稳态指标的融合。近年来,随着

敏感用户和冲击负荷增多,暂态电能质量问题日益突出,特别是电压暂降与短时中断,已经成为用户投诉最多的电能质量问题。因此,考虑暂态指标的电能质量综合评估极为重要。现有的评估方法较少考虑暂态指标的影响,特别是持续时间的影响,缺少综合考虑负荷侧和系统侧的评价指标,难以避免单侧指标对暂降程度评估的影响;缺少对暂态指标量化及暂稳态指标融合的研究,较难实现同时考虑暂稳态指标的综合评估。文献[54]基于粒子群优化算法的相似插值算法及基于群优化算法的理想区间法,将暂态电能质量指标量化并将其考虑到电能质量综合评估中,使评估结果更加接近工程实际,但是上述方法对样本具有依赖性,需要进一步考虑如何更科学客观地实现暂稳态指标的融合问题。

### 3 电能质量综合评估的发展趋势

近年来, DG 大量并网、配售电市场放开、能源互联网和泛在电力物联网的技术进展都对电能质量领域研究带来了影响,本文认为未来电能质量综合评估可在以下几个方面进一步研究:

1) 考虑经济效益的评估方法。售电市场盈利的关键是实现电能的按需生产和定制化供应,电能质量将成为售电价格制定的重要依据,依质定价才能使电能回归商品的本质属性。如果能在电能质量综

合评估结果中计及达到评估等级所需的成本, 综合考虑评估等级所对应的经济效益, 对未来售电电价的制定将有重要的参考作用。

2) DG 并网条件下的综合评估。如前文所述, 现有的方法大都只提取某一时间断面数据作为综合评估的数据依据, 然而风力、光伏等 DG 的输出功率具有强烈的随机性和不确定性, 将导致电能质量指标的波动, 致使不同时段的综合评估结果不一致, 某一断面的评估结果并不能反映真实情况。现有 DG 并网条件下的评估方法大都是从客观性入手对传统方法进行改进<sup>[37]</sup>, 并未考虑 DG 本身特性对综合评估指标及模型等特性的影响。因此, 在 DG 大量并网条件下, 如何科学有效地实现电能质量综合评估, 还有待进一步研究。

3) 数据驱动的电能质量评估。目前电网企业已实现发、输、配电及用户侧全景实时数据的采集、传输以及存储, 产生了大量的具有异构、实时、真实等特征的数据<sup>[55]</sup>。现有的方法并未考虑从这些复杂而海量的数据中提取电能质量的特征来实现综合评估, 而数据驱动是大数据技术的核心思想, 能深度挖掘海量多源数据中的丰富信息, 充分利用已积累的海量数据, 为适应不同场景特征的电能质量综合评估提供一种新思路。

4) 能源互联网电能质量综合评估。能源互联网中包括热能、动能和化学能等其他形式的能源, 融合了电力传输网、电气化交通网、供热网和天然气网等。由于电力与其他能源的深度耦合, 电能质量问题将对其他能源供应产生影响, 如电压暂降将影响天然气网中稳定气压的变频驱动电机的正常运行, 从而将电网中的电能质量问题传导到气网。文献<sup>[56-57]</sup>提出了能源互联网的供能质量综合评估方法, 在电能质量综合指标的基础上增加考虑了空气质量综合指标、排污费指标以及价格惩罚指标, 但并未考虑到电网电能质量对其他能源网络的影响, 也未考虑其他能源对电网电能质量的可能改善作用。因此, 未来适用于能源互联网场景, 综合考虑各种能源供应稳定性的电能质量评估方法有待进一步研究。

## 4 结论

现有大量电能质量综合评估研究大都从评估指标、评估权重以及评估模型三方面的特性出发, 能较为定量、全面和客观地反映所有类型的电能质量问题的综合结果。但随着 DG 大量接入、配售电市场放开、能源互联网和泛在电力物联网技术的发展, 现有评估方法普遍存在经济性考虑不足、无法利用

多源海量数据进行长时间尺度评估等问题, 难以满足不同场景的需求, 具有一定局限性。因此, 未来电能质量综合评估这一传统研究领域还有许多关键技术有待突破。

## 参考文献

- [1] BOLLEN M H J. What is power quality?[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 5-14.
- [2] KALLER A, BIELEN S, MARNEFFE W. The impact of regulatory quality and corruption on residential electricity prices in the context of electricity market reforms[J]. Energy Policy, 2018, 123: 514-524.
- [3] 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.
- [4] 陶顺, 肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.  
TAO Shun, XIAO Xiangning. Infrastructure of the power quality assessment system of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.
- [5] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 46-49.  
JIA Qingquan, SONG Jiahua, LAN Hua, et al. Quality of electricity commodity and its fuzzy evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49.
- [6] FARGHAL S A, KANDIL M S, ELMITWALLY A. Quantifying electric power quality via fuzzy modeling and analytic hierarchy processing[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 44-49.
- [7] MORSI W G, EL-HAWARY M E. Power quality evaluation in smart grids considering modern distortion in electric power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(5): 1117-1123.
- [8] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 基于模糊集对分析法的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 81-85.  
LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy set pair analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 81-85.
- [9] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.  
LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A new method for power quality comprehensive evaluation considering the analysis of sequence stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.
- [10] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 基于概率统计和矢量代数

- 的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1): 66-70.  
JIANG Hui, PENG Jianchun, OU Yaping, et al. Power quality unitary quantification and evaluation based on probability and vector algebra[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(1): 66-70.
- [11] MILANOVIĆ J V, ABDELRAHMAN S, LIAO H. Compound index for power quality evaluation and benchmarking[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(19): 4269-4275.
- [12] ELBASUONY G S, ABDEL ALEEM S H E, IBRAHIM A M, et al. A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems[J]. Energy, 2018, 149: 607-622.
- [13] 吴传来, 杨洪耕, 张云红, 等. 考虑指标质量影响权重的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 97-102.  
WU Chuanlai, YANG Honggeng, ZHANG Yunhong, et al. Power quality comprehensive evaluation considering the indexes' influence on weights[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4): 97-102.
- [14] 何吉彪, 程浩忠, 姚良忠, 等. 基于两种改进方法的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化, 2013, 25(1): 18-22.  
HE Jibiao, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on two improved methods[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 18-22.
- [15] JIN W, SHI X, GE F, et al. Comprehensive evaluation of impacts of connecting distributed generation to the distribution network[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017, 12(2): 621-631.
- [16] 何禹清, 彭建春, 毛丽林, 等. 考虑用户不同需求的电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 48-52.  
HE Yuqing, PENG Jianchun, MAO Lilin, et al. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 48-52.
- [17] 毛丽林, 黎灿兵, 何禹清. 考虑用户需求和专家知识的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 135-139.  
MAO Lilin, LI Canbing, HE Yuqing. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands and expert knowledge[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 135-139.
- [18] NOUROLLAH S, ZARGARI A. Assessing power quality of power system using FICA algorithm[J]. Advanced Computational Techniques in Electromagnetics, 2014, 2014: 1-20.
- [19] 张涛, 程志友, 梁栋, 等. 非线性主成分分析在电能质量综合评估中的应用[J]. 电测与仪表, 2008, 45(6): 5-9.  
ZHANG Tao, CHENG Zhiyou, LIANG Dong, et al. The application of nonlinear PCA in synthetic evaluation of power quality[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(6): 5-9.
- [20] SALARVAND A, MIRZAEIAN B, MOALLEM M. Obtaining a quantitative index for power quality evaluation in competitive electricity market[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(7): 810-823.
- [21] YUN J Y, CHAO T, YUN T X, et al. A projection pursuit model optimized by free search: for the regional power quality evaluation[J]. The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2015, 9(1): 1422-1427.
- [22] SHARMA A, RAJPUROHIT B S, SINGH S N. A review on economics of power quality: impact, assessment and mitigation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 88: 363-372.
- [23] 雷刚, 顾伟, 袁晓冬. 灰色理论在电能质量综合评估中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 62-65, 70.  
LEI Gang, GU Wei, YUAN Xiaodong. Application of gray theory in power quality comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 62-65, 70.
- [24] 王睿, 方洁, 张可, 等. 基于熵权和 AHP 的电能质量模糊综合评估[J]. 电测与仪表, 2007, 44(11): 21-25.  
WANG Rui, FANG Jie, ZHANG Ke, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on entropy and AHP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(11): 21-25.
- [25] FAN L, ZHANG Y. Application of combination weighing and outranking relation method in evaluation of power quality[J]. Journal of Information and Computational Science, 2013, 10(1): 1-7.
- [26] 林爽, 秦萃丽. 模糊层次分析法在电能质量综合评估中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1): 72-77.  
LIN Shuang, QIN Cuili. Application of fuzzy analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of power quality[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 72-77.
- [27] GE B, PAN T, LI Z. Synthetic assessment of power quality using relative entropy theory[J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(4): 1323-1331.
- [28] 张乙, 潘天红, 李正明. 基于贝叶斯与属性识别模型的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 41-45.  
ZHANG Yi, PAN Tianhong, LI Zhengming. A synthetic power quality evaluation method based on Bayesian algorithm and attribute recognition model[J]. Power

- System Protection and Control, 2013, 41(7): 41-45.
- [29] 荆朝霞, 胡仁. 基于二阶段法的电能质量评估及其灵敏度分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 57-62.  
JING Zhaoxia, HU Ren. Power quality evaluation based on two-stage method and its sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 57-62.
- [30] 李泓泽, 郭森, 唐辉, 等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 653-659.  
LI Hongze, GUO Sen, TANG Hui, et al. Comprehensive evaluation on power quality based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 653-659.
- [31] 李国栋, 李庚银, 杨晓东, 等. 基于雷达图法的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 70-74.  
LI Guodong, LI Gengyin, YANG Xiaodong, et al. A comprehensive power quality evaluation model based on radar chart method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 70-74.
- [32] 程志友, 朱唯韦, 陶青, 等. 基于改进雷达图的配电系统电能质量评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 34-39.  
CHENG Zhiyou, ZHU Weiwei, TAO Qing, et al. Power quality evaluation method of distribution system based on improved radar chart[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(14): 34-39.
- [33] 乔鹏程, 吴正国, 李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 88-92.  
QIAO Pengcheng, WU Zhengguo, LI Hui. Power quality synthetic evaluation based on improved radar chart[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 88-92.
- [34] 刘蓉晖, 王毅超. 基于改进雷达图法与高斯隶属度相结合的电能质量综合等级评估[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 69-74.  
LIU Ronghui, WANG Yichao. Comprehensive grade evaluation of power quality based on improved radar chart method and Gaussian membership degree[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 69-74.
- [35] 曾巧燕, 杨洪耕, 杨雪萍, 等. 考虑指标关联性的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 73-78.  
ZENG Qiaoyan, YANG Honggeng, YANG Xueping, et al. Comprehensive evaluation on power quality considering the relevance of indexes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(7): 73-78.
- [36] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 基于突变决策的分布式发电系统电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 52-57.  
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang. A catastrophe decision theory based power quality comprehensive evaluation method for distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 52-57.
- [37] JASIŃSKI M, SIKORSKI T, BORKOWSKI K. Clustering as a tool to support the assessment of power quality in electrical power networks with distributed generation in the mining industry[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 166: 52-60.
- [38] 黄沁悦, 周福林, 刘双玲, 等. 基于区间灰色证据组合模型的电能质量评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 8-15.  
HUANG Qinyue, ZHOU Fulin, LIU Shuangling, et al. Power quality evaluation method based on interval grey-evidential combination model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 8-15.
- [39] LIU Sifeng, LIN Yi. An introduction to grey systems theory[M]. Grove City: IIGSSA Academic Publisher, 1998.
- [40] LEE B, SOHN D, KIM K M. Development of power quality index using ideal analytic hierarchy process[J]. Information Science and Applications (ICISA), 2016, 376: 783-793.
- [41] 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 ration method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 128-132.
- [42] 李杰. 基于合作博弈和改进 TOPSIS 的电能质量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 109-115.  
LI Jie. Research on evaluation method of power quality based on cooperative game theory and improved TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 109-115.
- [43] 栗秋华, 周林, 刘华勇, 等. 用加速遗传算法和sp模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 139-143.  
LI Qiuhua, ZHOU Lin, LIU Huayong, et al. Evaluation of power quality by accelerating genetic algorithm and Shepard interpolation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 139-143.
- [44] 欧阳森, 石怡理, 刘洋. 基于双激励控制线的区域电网电能质量动态综合评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 205-210.  
OUYANG Sen, SHI Yili, LIU Yang. Dynamic comprehensive evaluation of power quality for regional grid based on double inspiring control lines[J]. Power

System Technology, 2012, 36(12): 205-210.

[45] 欧阳森, 杨家豪, 石怡理. 基于竞争机制的电能质量动态评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 1-7.  
OUYANG Sen, YANG Jiahao, SHI Yili. Dynamic evaluation method of power quality based on the competitive mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 1-7.

[46] 阴艳超, 吴仁杰, 常斌磊. 复杂电网电能质量知识云评价服务模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 241-247.  
YIN Yanchao, WU Renjie, CHANG Binlei. Knowledge cloud evaluation service model and method for power quality of complex power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 241-247.

[47] 柴鹏飞, 孙雅娟, 沈可, 等. 基于数据包络分析的电能质量综合评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(4): 124-128.  
CHAI Pengfei, SUN Yajuan, SHEN Ke, et al. Research on synthetic evaluation method of power quality based on data envelopment analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(4): 124-128.

[48] 李国欣, 苏礼莎, 曹申, 等. 基于负荷分类与曲线型未知函数的电能质量综合评估[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 14-18.  
LI Guoxin, SU Lisha, CAO Shen, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on load classification and curvilinear unascertained function[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 14-18.

[49] 刘颖英, 朱永强, 蔡维, 等. 基于灾害等级概念的电能质量综合评估新思路[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 110-113.  
LIU Yingying, ZHU Yongqiang, CAI Wei, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on disaster levels[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 110-113.

[50] 张逸, 杨洪耕, 叶茂清. 基于分布式文件系统海量电能质量监测数据管理方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 102-108.  
ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing. A data management scheme for massive power quality monitoring data based on distributed file system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 102-108.

[51] 张逸, 彭灿, 张默霓. 基于移动 Agent 的电能质量监测数据管理方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 164-169.  
ZHANG Yi, PENG Can, ZHANG Moni. A data management scheme for power quality monitoring data based on mobile agent[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(22): 164-169.

[52] 屈志坚, 袁慎高, 范明明. 电能质量在线监测系统海量数据的双列族存储设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 154-160.  
QU Zhijian, YUAN Shengao, FAN Mingming. Double column family storage design for massive data of power quality online monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 154-160.

[53] GHIASI M. Technical and economic evaluation of power quality performance using FACTS devices considering renewable generations[J]. Renewable Energy Focus, 2019, 29: 49-62.

[54] 张蔓, 林涛, 曹健, 等. 2 种电能质量综合评估方法的分析比较[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 37-40, 101.  
ZHANG Man, LIN Tao, CAO Jian, et al. A comparative study on two methods for synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 37-40, 101.

[55] 张宇帆, 艾芊, 肖斐, 等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 187-196.  
ZHANG Yufan, AI Qian, XIAO Fei, et al. Present situation, supporting technologies and prospect of data driven power quality analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 187-196.

[56] 付学谦, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 1-7.  
FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7.

[57] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.  
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical / thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-07-30

作者简介:

刘颖英(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制等; E-mail: liuyy.mail@163.com

冯丹丹(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量数据分析等; E-mail: nobody.fd@163.com

林才华(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制技术。E-mail: 1043186933@qq.com

(编辑 张爱琴)