

基于层次分析法和熵权法的智能电网评价模型研究

卓越, 曹毅, 聂金峰

南方电网能源发展研究院 电力规划中心, 广东省广州市 510670;

Research on smart grid evaluation model based on analytic hierarchy process and entropy weight method

ZHUO Yue, CAO Yi and NIE Jinfeng

Energy Development Research Institute of CSG, Guangzhou 510670, China .

摘要: 对智能电网开展综合评价是科学评估各地智能电网发展水平和建设效果、指导智能电网规划的载体,也是推动智能电网发展的关键因素。本文从发电、输变电、配电、用电、智慧能源、通信、信息、调度、网络安全等九个环节入手,提出了一套覆盖发输变配用以及信息、通信、调度等支撑环节,包含83个三级指标的智能电网综合评价指标体系,并基于该指标体系提出了基于层次分析法和熵权法的综合评价模型。该模型通过主客观权重和客观权重,计算出综合权重,减小了因权重分配不均产生的误差,并利用线性加权综合法进行指标聚合。最后以一个地区供电局的智能电作为评估对象,验证了该模型的有效性。

关键词: 智能电网; 评价指标体系; 评价模型; 层次分析法; 熵权法

ABSTRACT: The evaluation index system of smart grid planning and construction is the carrier to scientifically evaluate the development level and construction effect of smart grid and guide the optimal operation of smart grid. It is also the key factor to promote the development of smart grid. A comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method was put forward for this index system. Subjective weight and objective weight are added into the model to calculate the comprehensive weight, which reduces the error caused by the uneven weight distribution. The linear weighted synthesis method was used for index aggregation. Finally, the construction of a district-level smart grid was taken as the evaluation object to verify the effectiveness of the model.

KEY WORD: smart grid; evaluation index system; evaluation model; analytic hierarchy process method; entropy weight

1 引言

电网是关系到国民经济和社会发展的基础设施之一,其内涵和重点随着经济社会的发展而不断演变。近年来,国家提出构建以新能源为主体的新型电力系统,这对电网的转型发展提出了新要求。开展智能电网建设可助力未来新型电力系统实现绿色、可靠、安全、高效、低碳[1]。近年来,随着信息通信技术不断发展,以及与电网的渗透与融合不断加深,智能电网进入了加快发展的时期。欧美等发达国家都在不断地推进智能电网技术研究、示范和标准制定[3-6]。经过多年发展,我国已在智能电网的理论体系、技术研

发、试点示范等方面都取得了重要进展[7-8]。

智能电网综合评价是开展智能电网规划与建设的基础和关键因素,如何科学评价智能电网示范区的建设效果是一个亟待解决的问题[9]。目前关于智能电网指标体系方面的研究已开展了大量的工作[10-14]。智能电网是一项涉及多领域、跨行业的复杂系统工程。

智能电网是一项复杂庞大的系统工程,涵盖电网规划建设运营的全过程,并涉及多领域、多行业。根据政策及技术的发展,以及评价的维度和目标不同,评价指标和评价方法也应相应地进行调整。本文构建了一套具有多层次多维度的智

能电网指标评价体系,并提出了基于层次分析法和熵权法的智能电网评价模型。为后续为智能电网评估及平台开发提供有力支撑,也可为其他地区智能电网建设评估提供借鉴。

2 智能电网综合评价指标体系

本节分析和提炼了智能电网各领域的技术特征及核心作用,梳理总结智能电网各领域的指标,共有9个一级指标、25个二级指标、83个三级指标,如表1所示。

表1 智能电网综合评价三级指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	一级指标	二级指标	三级指标	
发电	清洁能源利用	非化石能源电量占比	用电	高级量测	110kV及以下主变轻载比	
		非化石能源电量消纳率			10kV配变重载比	
	可再生能源发电利用率	10kV配变轻载比				
输变电	灵活调峰能力	非化石能源装机占比	客户服务	设备水平	高压配电线路重载比	
		电网调峰容量占最大负荷比例			高压配电线路轻载比	
	抽水蓄能装机占比	中压配电线路重载比				
输变电	优化主网结构	220kV及以上主变“N-1”通过率	需求侧响应	智慧能源	中压配电线路轻载比	
		220kV及以上线路“N-1”通过率			中压线路绝缘化率	
	220kV及以上输电线路机巡覆盖率	中压线路电缆化率				
	重要输电通道和灾害地区线路智能故障监测覆盖率	开关无油化率				
输变电	输电智能化	35kV及以上变压器可用系数	电动汽车	电能替代	高损配变比例	
		35kV及以上变电站中智能变电站占比			乡村户均配变容量(公变)	
	220kV及以上主变重载比例	自动抄表率				
输变电	变电智能化	220kV及以上主变轻载比例	电能替代	智慧能源	智能电表覆盖率	
		220kV及以上输电线路重载比例			低压集抄覆盖率	
	220kV及以上输电线路轻载比例	计量自动化终端覆盖率				
配电	供电可靠性	供电可靠率(RS-3)	智慧能源	智慧能源	第三方客户满意度	
		客户平均停电次数			客户服务评价满意率	
	供电质量	电压合格率	频率合格率	客户服务	智慧能源	互联网业务办理比例
			谐波合格率			智慧营业厅占比
			线损率			参与需求侧响应的用户比例
	线损水平	线损异常率	线损异常率	需求侧响应	智慧能源	参与需求侧响应的负荷比例
			配网可转供电率			车均充电桩数量
	配电	灵活配电网	110kV及以下主变“N-1”通过率	电动汽车	电能替代	电动汽车充电桩平台接入率
			高压配电线路“N-1”通过率			支持V2G技术的充电桩数量占比
		中压线路联络率	电能替代增售电量占增售电量比例			
220kV及以上输电线路重载比例		电能占终端能源消费比例				
配电	配电自动化	220kV及以上输电线路轻载比例	智慧能源	智慧能源	综合能源服务业务量占比	
		220kV及以上输电线路轻载比例			多能互补供能占比	
	220kV及以上输电线路轻载比例	能源数据增值业务量占比				
配电	设备利	110kV及以下主变重载比	通信	骨干通信网络	通信覆盖率	
		110kV及以下主变重载比			35千伏及以上厂站光纤通信覆盖率	
	110kV及以下主变重载比	35千伏及以上站点综合数据网覆盖率				
配电	设备利	110kV及以下主变重载比	配电接入网络	智能调度系统	110千伏及以上站点双平面调度数据网覆盖率	
		110kV及以下主变重载比			配电通信网覆盖率	
	110kV及以下主变重载比	地调及以上调度自动主站系统失灵次数				
配电	设备利	110kV及以下主变重载比	智能调度系统	调度	主站系统可用率	
		110kV及以下主变重载比			远动系统可用率	
	110kV及以下主变重载比	新能源功率预测模块覆盖率				
配电	设备利	110kV及以下主变重载比	安全稳定系统	安全稳定系统	220kV及以上故障快速切除率	
		110kV及以下主变重载比			220kV及以上稳控系统正确动作率	
	110kV及以下主变重载比	110kV及以上安自装置正确动作率				
配电	设备利	110kV及以下主变重载比	安全稳定系统	安全稳定系统	220kV及以上保护正确动作率	
		110kV及以下主变重载比			220kV及以上保护正确动作率	
	110kV及以下主变重载比	220kV及以上保护正确动作率				

信息	电网数字化	大数据平台信息接入率
		110kV及以上变压器数字化率
		110kV及以上线路数字化率
		110kV及以上断路器数字化率
网络安全	网络安全	网络安全事件数量
		网络安全合规率
		关键应用系统运行率
		信息网络运行率

3 智能电网综合评价模型

智能电网评价是以智能电网为研究对象,通过评价属性的定量化为手段,实现对智能电网建设整体水平或部分功能性指标的量化描述,从而展示该智能电网发展水平和薄弱环节。本文模型的构建思路是首先将反映智能电网本质特征的属性具体化,转变为可度量的指标,通过指标无量纲化过程消除不同指标之间的不可比较性,把各单项指标转化为能直接进行比较的量化指标,最后通过构建一个合适的多元函数,将各单项指标综合成一个可以直接进行比较的综合评价值,用以评估智能电网的规划建设水平。其中建立评价指标体系、确定各评价指标的权重系数、指标的标准化以及选择综合评价模式是本文开展智能电网评价的四个关键的部分。

该评价方法主要包括基础数据准备、指标评估计算、评估结论及建议等环节。在基础数据准备环节,包括评估对象、评估标准、对标标准,其中评估对象为根据被评估智能电网的运行状态而测量、统计、计算的指标数据;评估标准为根据智能电网现状、智能电网技术发展以及专家认知对指标制作的评分标准和权重占比;对标对象为智能电网发展的各个阶段。在指标评估计算环节,主要根据评估标准中的指标评分判据及权重占比,对评估对象进行评估计算,评估各个一级指标,并通过综合计算一级指标的数据评估整个智能电网的发展水平。在评估结论环节,将一级指标评分与智能电网评分与对标对象进行对比,评估智能电网所处的发展阶段,并分别对智能电网各个环节或领域进行对比分析,比较优劣势,最后提出合理的发展建议。

3.1 确定智能电网指标权重系数

权重的数量形式可以不同,但本质上它是一个结构相对数,反映的是针对特定评价目标,是

影响被评价对象内部多个因素重要程度的差异。因此如何计算权重将对综合评价的可行性与成效造成直接的影响。本文采用层次分析法与熵权法结合的主客观综合赋权法计算智能电网各指标的权重。

首先需要建立指标评价集。将所有指标按重要性分为一定的等级。在此,将重要性等级从大到小分为5个等级,因此可得到评价集为 $A=\{9分, 7分, 5分, 3分, 1分\}$ 。

各评价指标隶属于 A 中评分的隶属度 a_i 可确定。假设评价专家数量为 N ,那么某一评价指标隶属于 A 中某一权重等级的隶属度可用 a_{ij} 表示:

$$a_{ij} = \frac{n}{N} \quad (1)$$

其中 n 为对某一个因子 a_{ij} 在所有评价专家中评其为 A 中第 j 等级的人数。因此,可将每个一级指标作为一个整体来构造评价矩阵。可得到 $N \times 9$ 矩阵,同样可得到 $R_1、R_2、R_3、R_4、R_5、R_6、R_7、R_8、R_9$ 。

指标的主观权重和客观权重主客观综合赋权法来确定,并通过科学的方法组合起来得到各指标的综合权重值

采用层次分析法在确定各因素间的权重时可使在主观权重上结果准确性更高。层次分析法采用了相对尺度的方法,即通过比较每个评价指标之间的相对重要程度最终确定各层级指标的权重。可通过标度法得到判断矩阵为 $B=(b_{ij})_{m \times n}$ 。

其中 b_{ij} 表示二级指标与二级指标的重要性之比,判断矩阵标度定义见表2。

表2 标度法

判断指标	b_{ij} 含义
1	i 指标和 j 指标重要性相同
3	i 指标比 j 指标有点重要
5	i 指标比 j 指标比较重要
7	i 指标比 j 指标十分重要

9 **i 指标比 j 指标绝对重要**
2,4,6,8 **i 指标和 j 指标结果介于以上结果之间**

判断矩阵 B 建立后, 通过计算一致性比例 CR 判断矩阵的一致性。只有 $CR < 0.1$ 时, 才能够满足一致性检验的要求。可以得到一致性比例公式:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

其中, RI 是平均一致性指标, CI 是一致性指标, 计算公式为 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$, λ_{\max} 是判断矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 的最大特征值。

由特征向量法可知 $BW = \lambda_{\max} W$, 其中 W 为权重向量。如果评价指标体系中存在二级指标, 且二级指标数量为 n , 三级评价指标数量为 m , 各二级评价指标分别包括了 m_1, m_2, \dots, m_n 。则可已通过计算将各中间层评价指标权重 $w_j (j=1, 2, \dots, n)$ 与各三级评价指标对应权重 $t_j (j=1, 2, \dots, m)$ 归一化后得到。

本文采用熵权法计算客观权重。假设有个评价指标和个评价对象所组成的原始数据矩阵

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

可通过矩阵标准化处理得到 $Q = (q_{ij})_{m \times n}$,

其中 $q_{ij} (0 \leq q_{ij} \leq 1)$ 是第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的标准值。

综上, 对于正向指标

$$q_{ij} = \frac{y_{ij} - \min\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}}{\max\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\} - \min\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}} \quad (4)$$

对于逆向指标

$$q_{ij} = \frac{\max\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\} - y_{ij}}{\max\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\} - \min\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}} \quad (5)$$

$$\text{第 } i \text{ 个指标的熵定义为 } e_i = -k \sum_{j=1}^n t_{ij} \ln t_{ij},$$

$$\text{其中 } 1 \leq i \leq m, \quad t_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_{ij}}, \quad k = \frac{1}{\ln n}, \quad \text{且当}$$

$$t_{ij} = 0 \text{ 时, } \ln t_{ij} = 0.$$

$$\text{而熵权可以定义为 } u_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{i=1}^m e_i}, \quad \text{其中}$$

$$0 \leq u_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^m u_i = 1.$$

采用熵权法可以避免只采用层次分析法导致的计算出的结果倾向于专家的主观打分, 而是将经验数据得到的指标权重更加客观。这种主客观综合赋权法将主观权重和客观权重综合的能够使得指标权重更加具有科学性。综合赋权法的综合权重计算公式如下所示:

$$Z_i = \frac{t_i u_i}{\sum_{i=1}^n t_i u_i} \quad (6)$$

可计算得到层次分析法中三级指标的权重与熵权法计算得到的权重的综合权重。但是该方法忽略了二级指标的重要性比较和在一些特殊情况下主观权重和客观权重具有不同的侧重性, 从而导致计算出来的综合权重可能会与实际场景差异较大。针对上述问题, 本文采用了一种改进的方法, 针对第三级指标主观权重 t_i 与客观权重 u_i , 计算综合权重 Z_i :

$$Z_i = \frac{t_i u_i ((1-\beta)t_i + \beta u_i)}{\sum_{i=1}^n t_i u_i ((1+\beta)t_i + \beta u_i)} \quad (7)$$

其中 $\beta \in (0,1)$ ， β 表示不同指标的主观和客观比重。

3.2 确定智能电网指标权重系数

一般指标体系中存在多种类型的指标，并且指标的量纲和量级不同，从而给综合评价带来不便，因此一般通过指标类型一致化处理、指标无量纲化处理、模糊判断矩阵法等方法对评价指标进行标准化处理。本文结合目前南方电网智能电网发展情况，对智能电网指标进行标准化，即制定初级智能电网、中级智能电网、高级智能电网、智慧电网与每个指标数值之间的对应关系，并考虑指标类型及数据特征，确定指标的有效范围区间，针对不同指标设计效用函数实现标准化，从而获得每个指标数值对应的评价分数。

首先将第三级评价指标的综合权重与第二级评价指标一一对应起来，并分别对各第二级评价指标的综合权重进行标准化，可计算得到。

$$d_{ij}^\phi = \frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^k Z_{ij}} \quad (8)$$

其中 $k = n_1, n_2, \dots, n_m$ ； $i = 1, 2, \dots, m$ 。

再通过第二级评价指标的权重 d_{ij}^ϕ 与对应相乘，可进一步算出综合权重 d_{ij}^ϕ 。

$$d_{ij}^\phi = w_i d_{ij}^\phi \quad (9)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, m$ ； $j = 1, 2, \dots, k$ ；

$k \in \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 。

根据计算所得的综合权重 d_{ij}^ϕ 进行归一化，即得到了最终的综合权重 D_{ij} 。

$$D_{ij} = \frac{d_{ij}^\phi}{\sum_{i=1}^n d_i^\phi} \quad (10)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

最后，对智能电网建设情况进行综合评价：

$$T = DOR = (D_1, D_2, \dots, D_n) O \begin{bmatrix} D_1 OR_1 \\ \vdots \\ D_m OR_m \end{bmatrix} = (D_1, D_2, \dots, D_n) O \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{m5} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (11)$$

对 T 进行归一化处理得到：

$$T = \left[\frac{b_1}{\sum_{i=1}^5 b_i}, \frac{b_2}{\sum_{i=1}^5 b_i}, \dots, \frac{b_5}{\sum_{i=1}^5 b_i} \right]^\Delta = (E_1\%, E_2\%, \dots, E_5\%) \quad (12)$$

通过标度法将智能电网评价指标得分划分为 9 分、7 分、5 分、3 分、1 分 5 个档次，专家中有 $E_1\%$ 的比例认为指标得分为 9 分，有 $E_2\%$ 的比例认为指标可以得 7 分，有 $E_3\%$ 的比例认为可以得 5 分，有 $E_4\%$ 的比例认为可以得 3 分，有 $E_5\%$ 的比例认为可以得 1 分。

进一步，令 $R = (9, 7, 5, 3, 1)^T$ ，所以智能电网的综合评价得分为：

$$F = BOR \quad (13)$$

其中“O”取算子 $M(., +)^O$ 得到：

$$F = 9E_1\% + 7E_2\% + 5E_3\% + 3E_4\% + 1E_5\% \quad (14)$$

3.3 智能电网综合评价

智能电网综合评价是指对智能电网跨专业多目标多属性的复杂系统工程的具体示范应用做出全局性、整体性的综合评价，通过一个数学模型将多个评价指标值转化成为整体性的综合评价值，即：

$$y_i = f(w_i, x_i) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中， $f(\cdot)$ 是转化函数， x 为各指标， w 为指标占比。

根据智能电网指标体系及指标标准化的特点，本文选取了线性加权综合法进行智能电网评估。线性加权综合法计算公式为：

$$y_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} w_j \quad (16)$$

式中， y_i 为智能电网评价目标的综合评价值； w_j 为与评价指标 x_{ij} 相对应的权重。

具体步骤如下：

- (1) 根据三级指标的得分，利用式(16)计算二级指标得分。
- (2) 根据二级指标的得分和二级指标权重，利用式(16)计算一级指标得分。
- (3) 根据一级指标的得分和一级指标权重，利用式(16)计算智能电网得分。

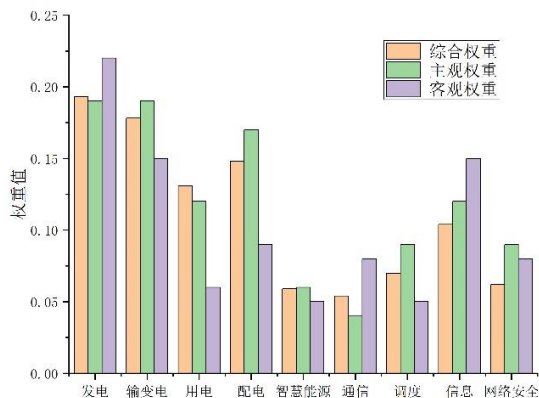


图1 一级评价指标权重计算结果

根据构建的智能电网综合评价指标体系和相关专家的评价信息，依据层次分析法—熵权法确定各指标综合权重，智能电网综合评价模型一级评价指标权重计算结果如下图1所示。

根据权重表，发电>输电>配电>用电>信息>调度>网络安全>智慧能源>通信。可以发现智能电网的发输配用四个环节权重明显比通信、信息、智慧能源等方面权重更大，评价结果符合评价预期。

4 智能电网综合评价模型

4.1 基本步骤

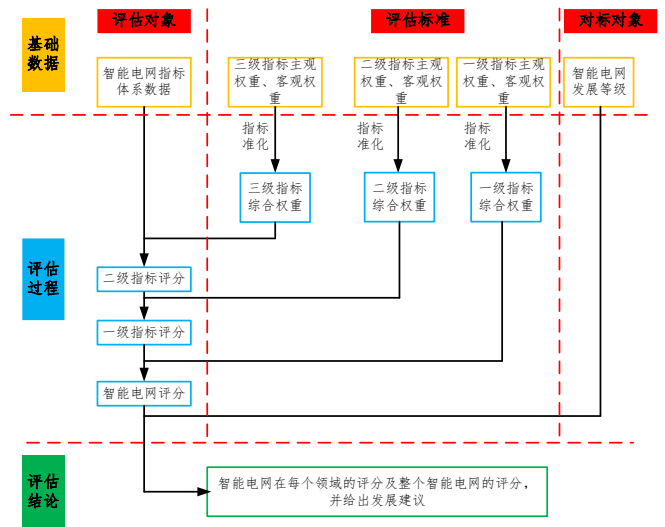


图2 智能电网综合评价基本步骤

如图2所示，智能电网综合评价基本步骤如下：

- (1) 根据综合评价模型计算主观权重和客观权重，利用线性加权综合法进行指标聚合，计算出三级指标的综合权重。
- (2) 在各二级指标内，对三级指标的分数求取平均值，得到二级指标的分数。
- (3) 在各一级指标内，利用二级指标的权重和二级指标的分数求取对应一级指标的分数。
- (4) 利用得到的一级指标的权重和一级指标的分数求取该地市级电网智能电网的评分。经计算，该地区得到的评分为72.21分。

4.2 基本步骤

根据4.1节的评分，该地市级智能电网示范区处于中级智能电网阶段，各一级指标与高级智能电网发展目标的对比如图3所示。

整体而言，该地市级电网智能电网发展现状与发展目标对比高级智能电网阶段还有一定距离，仍需在各方面有所建设。其中，发电、配电和通信领域的发展水平较高，即将达到或接近高级智能电网水平；输变电、调度系统、信息平台 and 网络安全领域的发展水平较好，已超过高级智能电网标准；用电领域的发展与高级智能电网水平差距较大，仍需加强建设和发展；智慧能源和经济性领域的评分较低，建设情况仍处于初级智

能电网水平。

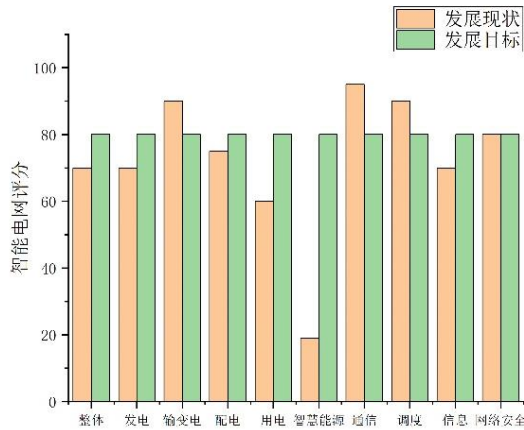


图3 某地市级电网智能电网发展现状与发展目标对比

5 结论

本文提出了一种覆盖智能电网发输变配用以及支撑环节的指标体系构建智能电网综合评价模型，并采用层次分析法与熵权法相结合的方法计算指标的综合权重，分级逐步确立智能电网在发电、输变电、配电、用电、智慧能源、通信、信息、调度、网络安全等9个环节的指标权重。该模型将主、客观权重结合计算综合权重，有效克服了权重分配不均的问题，并且计算简便。采用线性加权综合法进行指标聚合，保证评价结果一致性且符合评价人意图，减少了误差，使结果更具有合理性。通过权重计算结果和实例分析可表明，本文构建的评价指标体系以及评价模型具有一定合理性和科学性，对其他地区智能电网评价

工作也具有参考应用价值。

参 考 文 献

- [1] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31):1-14.
- [2] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34):1-8.
- [3] 卢永, 甘德强, JohnN. JIANG. 美国智能电网和分布式发电重点方向的调研分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9):12-16.
- [4] 张扬. 解读美国最新的智能电网政策[J]. 能源技术经济, 2011, 23(9):1-5.
- [5] 李立理, 张义斌, 葛旭波. 美国智能电网发展模式的系统分析[J]. 能源技术经济, 2011, 23(2):27-35.
- [6] 曾鸣, 杨国凤, 马明娟, 等. 欧盟智能电网研究及其对我国的启示[J]. 华东电力, 2013, 41(4):709-711.
- [7] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5):12-16.
- [8] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):2-8.
- [9] Wang JM, Shi T. Construction of Evaluation Index System for Smart Grid[J]. East China Electric Power, 2012.
- [10] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8):2245-2252.
- [11] 赵良, 李立理, 何博, 等. 适合我国国情的智能电网评价指标体系及计算方法[J]. 电网技术, 2015(2015年12):3520-3528.
- [12] 蒋菱, 袁月, 王峥, 等. 智能电网创新示范区能源互联网评估指标及评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1):39-45.
- [13] 王彬, 何光宇, 梅生伟, 等. 智能电网评估指标体系的构建方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23):65-71.
- [14] 王华昕, 邹龙, 赵永熹等. 基于AHP-变熵权法的配电网应急响应能力综合评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1):32-38

收稿日期:

作者简介:

卓越(1981-), 男, 江西宜春, 博士, 高级工程师, 主要从事智能电网技术、电力通信技术的研究