

Evaluation of Smart Energy System Based on AHP-Improved Entropy Weight Method-TOPSIS

Yuliang Lu¹, Zheng Chen¹, Qing Duan², Chunyan Ma², Chiyi Liu¹, Guobao Zhang¹

¹Automation School of Southeast University, Nanjing Jiangsu

²China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing

Email: seu_luyu@qq.com

Received: Jan. 20th, 2020; accepted: Feb. 5th, 2020; published: Feb. 12th, 2020

Abstract

Smart energy system is the new direction of the current energy development. In order to build a long-term development of smart energy system, this paper proposes an evaluation method based on AHP-improved entropy weight method-TOPSIS, which can evaluate the construction level of smart energy system scientifically, reasonably and objectively. Aiming at the hierarchical structure of smart energy evaluation system, this paper uses the combination of AHP and improved entropy weight method to integrate the subjective weight and objective weight, and then uses TOPSIS to comprehensively evaluate each smart energy system. Through the analysis of the simulation system, the evaluation method proposed in this paper is highly available and reasonable.

Keywords

Smart Energy System, AHP, Improved Entropy Weight Method, TOPSIS

基于AHP-改进的熵权法-TOPSIS的智慧能源系统评价

鲁瑜亮¹, 陈 峥¹, 段 青², 马春艳², 刘炽义¹, 章国宝¹

¹东南大学自动化学院, 江苏 南京

²中国电力科学研究院有限公司, 北京

Email: seu_luyu@qq.com

收稿日期: 2020年1月20日; 录用日期: 2020年2月5日; 发布日期: 2020年2月12日

摘要

智慧能源系统是当前能源发展的新方向,为了智慧能源系统的建设和长期发展,本文提出了一种基于AHP-改进的熵权法-TOPSIS的评价方法,对智慧能源系统的建设水平进行科学合理客观的评价。本文针对智慧能源评价体系的层次结构,采用层次分析法和改进的熵权法结合的方式融合主观权重和客观权重,之后采用逼近理想点排序法(TOPSIS)对各个智慧能源系统进行综合评价。通过模拟系统算例分析,本文所提出的评价方法具有高可用性,并且合理可靠。

关键词

智慧能源系统, 层次分析法, 熵权法, 逼近理想点排序法

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源作为战略资源,是国民经济的基础和命脉,也是社会全面发展的重要物质资源。节能降耗对于解决现阶段我国存在的能源危机具有重要的现实意义。随着城市化进程的不断推进,城市的发展与环境及资源的矛盾日益突出。随着人工智能、信息物理系统、大数据、云计算等技术日益成熟与应用,其与能源产业的结合,必将推动能源产业的技术升级,智慧能源系统成为未来发展的重点。为保证智慧能源系统的科学性,对智慧能源系统的建设水平做出综合评估是有必要的。

智慧能源系统的基础是智能电网,智能电网的综合评估方法主要包括基于模糊数学的方法、模糊数学与概率论相结合的方法、层次分析法与熵权法相结合的方法等。本文针对智慧能源评价体系的层次结构,使用层次分析法(AHP) [1]确定主观权重,同时使用改进的熵权法[2]确定客观权重,主客观权重的结合可以融合专家经验的主观性和现实数据的客观性,最后采用逼近理想点排序法(TOPSIS) [3]对各个智慧能源系统进行综合评价。

2. 指标体系构建

智慧能源系统建设水平评价需要构建指标体系来保证,对智慧能源系统建设的每一阶段进行评价,了解各个阶段发展水平,科学合理地对系统的下一步发展做规划。通过综合指标体系为向导,为智慧能源系统的发展提供参考,促进智慧能源系统的健康稳定发展。

智慧能源系统是一个复杂的非线性系统[4],设计指标体系时,需遵循以下原则:全面性、系统性、科学性、功能性、可操作性、动态性。构建指标体系的步骤如图1所示。

智慧能源系统的建设水平评价分为供能可靠性、经济效益性、环境友好性、资源节约性、智能互动性、社会效益性,建立如图2所示的层次结构。

3. 指标权重系数计算

指标权重系数计算,为了使权重同时兼具专家经验的主观性与现实数据的客观性,智慧能源系统一

级指标由层次分析法确定权重，再利用改进的熵权法计算每个一级指标下的二级指标的客观权重，最后采用层次递归的方式确定每个二级指标的组合权重[5]。 w_k 表示组合权重， w_k 表示第*i*个二级指标所属的第*k*个一级指标的权重， w'_i 表示第*i*个二级指标的熵权权重。

$$w_i = w_k \times w'_i$$

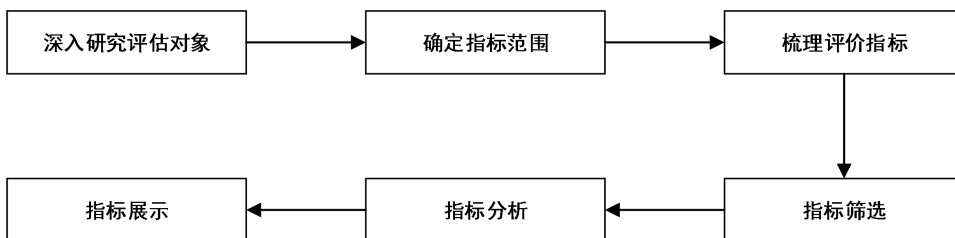


Figure 1. Steps to build an index system
图 1. 构建指标体系的步骤

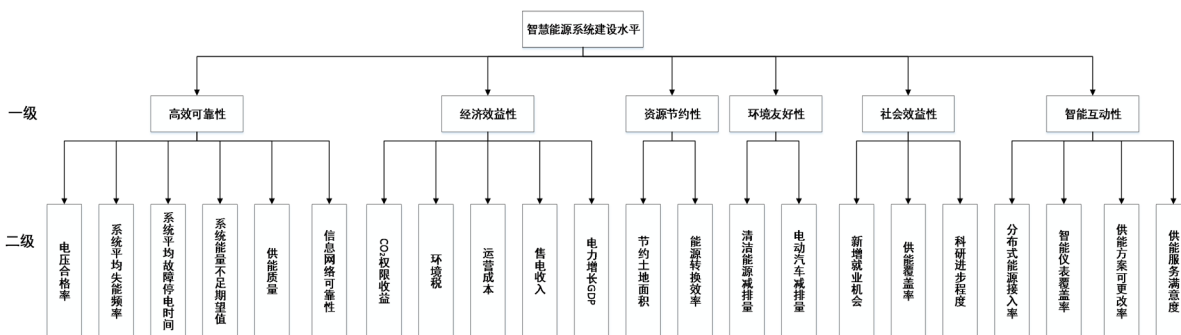


Figure 2. Index system hierarchy of smart energy system
图 2. 智慧能源系统指标体系层次结构

3.1. 主观权重计算

主观权重采用层次分析法计算，层次分析法是一种灵活、实用的多维度决策方法，其基本原理和主要步骤如下：

1. 在对系统深入分析的基础上，以指标体系为基础构建一个层次结构模型。
2. 对于属于同一个上级的同级指标，采用 1~9 标度两两比较法建立判断矩阵，比较程度由表 1 确定。

根据该领域的专家经验，得到判断矩阵 A。

3. 由于专家在两两比较的时候会有偏差，为了确保结果可信，必须对判断矩阵的一致性进行校验，若一致性校验不通过，需重新构造判断矩阵。一致性校验步骤如下：

- ① 计算一致性检验指标 CI， λ_{max} 代表最大特征值，*n* 代表矩阵阶数；

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

- ② 根据 *n* 查询其对应的平均随机一致性指标 RI，表 2 给出了 1~9 阶矩阵的 RI 取值；
- ③ 计算一致性比例 CR，若 $CR < 0.1$ ，判断矩阵符合一致性，若 $CR > 0.1$ ，判断矩阵需要重新构建；

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Table 1. Definition of pairwise comparisons method
表 1. 两两比较法定义

标度	含义
1	<i>i</i> 与 <i>j</i> 同等重要
3	<i>i</i> 比 <i>j</i> 略重要
5	<i>i</i> 比 <i>j</i> 较重要
7	<i>i</i> 比 <i>j</i> 非常重要
9	<i>i</i> 比 <i>j</i> 绝对重要
2, 4, 6, 8	中间值
倒数	$a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji}$

Table 2. Average random consistency index
表 2. 平均随机一致性指标

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.45

4. 当满足一致性要求时，最大特征值 λ_{\max} 所对应的的特征向量即为权重比例向量，归一化之后得到各指标的权重。权重向量计算步骤如下：

- ① 矩阵各列求和，得到向量 $B = [b_1 \ \dots \ b_n]$ ；
- ② 归一化矩阵 $C, c_{ij} = \frac{a_{ij}}{b_j}$ ；
- ③ 计算权重向量 $w = [w_1 \ \dots \ w_n]$, $w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}}$ 。

3.2. 客观权重计算

客观权重采用改进的熵权法计算，熵权法是根据各个指标的数据所提供的信息量确定权重，指标的变化程度越大，信息熵越小，指标所提供的信息量就越大，重要度越高，分配的权重就越大。熵权法完全按照数据的离散程度来确定权重，客观性得以保证。

熵权法的计算步骤如下：

- ① 数据归一化，假设给定 m 个指标，其中 $X_i = \{X_1, \dots, X_n\}$ 。假设对各指标数据标准化后的值为 Y_1, \dots, Y_k ，归一化之后 $y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ ；

- ② 信息熵 $E_j = -\frac{\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln n}$ ，其中 $p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}$ ；

- ③ 根据各指标熵值计算权重， $w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^k 1 - E_i}$ ，当 E_i 无限趋近于 1 的时候，分子会变得非常小，所以熵值的微小变化将会引起权重的成倍变化，这是不合理的，本文对传统的熵权法进行了优化，权重计算公式改为 $w_i = \frac{1 - E_i + \bar{E}}{\sum_{i=1}^k 1 - E_i + \bar{E}}$ ， \bar{E} 为信息熵的均值。

4. AHP-改进的熵权法-TOPSIS 组合评价

TOPSIS (逼近理想点排序法)主要用于对有限方案进行多目标决策,在对原始数据归一化的基础上,选择最优方案和最劣方案,计算各个方案相对最优方案与最劣方案的距离用来排序,对各个方案进行综合评价。若本次有 m 个方案, k 个评价指标,初始矩阵 P , P_{ij} 表示第 i 个对象的第 j 个指标值,使用 AHP-改进的熵权法-TOPSIS 组合评价的步骤如下:

$$1. \text{ 构建原始矩阵 } P, P = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mk} \end{pmatrix};$$

$$2. \text{ 矩阵 } P \text{ 归一化, } M = \begin{pmatrix} \frac{P_{11}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{1j}^2}} & \cdots & \frac{P_{1k}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{1j}^2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{P_{m1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{mj}^2}} & \cdots & \frac{P_{mk}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{mj}^2}} \end{pmatrix};$$

$$3. \text{ 采用 AHP-改进的熵权法得到权重向量 } w = [w_1, \cdots, w_k];$$

$$4. \text{ 计算指标加权评价矩阵 } V = \begin{pmatrix} \frac{P_{11} * w_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{1j}^2}} & \cdots & \frac{P_{1k} * w_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{1j}^2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{P_{m1} * w_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{mj}^2}} & \cdots & \frac{P_{mk} * w_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{mj}^2}} \end{pmatrix}, v_{ij} = m_{ij} * w_j;$$

$$5. \text{ 计算正理想解 } V^+ = [v_1^+, \cdots, v_k^+], v_j^+ = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} v_{ij};$$

$$\text{负理想解 } V^- = [v_1^-, \cdots, v_k^-], v_j^- = \min_{i \in \{1, \dots, m\}} v_{ij};$$

$$1. \text{ 计算各方案到正负理想解的欧式距离, } S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - v_j^+)^2}, S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - v_j^-)^2};$$

$$2. \text{ 计算最终评价值, 根据评价值对各个方案择优排序, } g_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}。$$

AHP-改进的熵权法-TOPSIS 评价算法流程如图 3 所示。

5. 算例分析

智慧能源系统的建设水平评价分为三个阶段,第一阶段偏向供能可靠性、经济效益性,第二阶段偏向环境友好性、资源节约性,第三阶段偏向智能互动性、社会效益性。一级指标根据三个算法的发展重点采用 AHP 法赋权,得到如表 3 的主观权重分布。模拟系统的数据如表 4 所示,每个指标值都代表相对目标值的完成程度。通过计算,得到客观权重与三阶段的组合权重,如表 5 所示。三个组合权重的对比如图 4 所示,第一阶段供能可靠性和经济效益性所占权重最大,第二阶段资源节约性和环境友好性所占权重最大,第三阶段社会效益性和智能互动性所占权重最大,这体现了智慧能源系统动态评价的特点。根据各阶段的组合权重,基于各属性的指标值,计算出 TOPSIS 综合评价得分,如表 6 所示,第一阶段 A 的得分最高,因为 A 的供能可靠性和经济效益性完成程度最好;第二阶段 B 的得分最高,因为 B 的资源节约性和环境友好性完成程度最好;第三阶段 C 的得分最高,因为 C 的社会效益性和智能互动性完成程度最好。

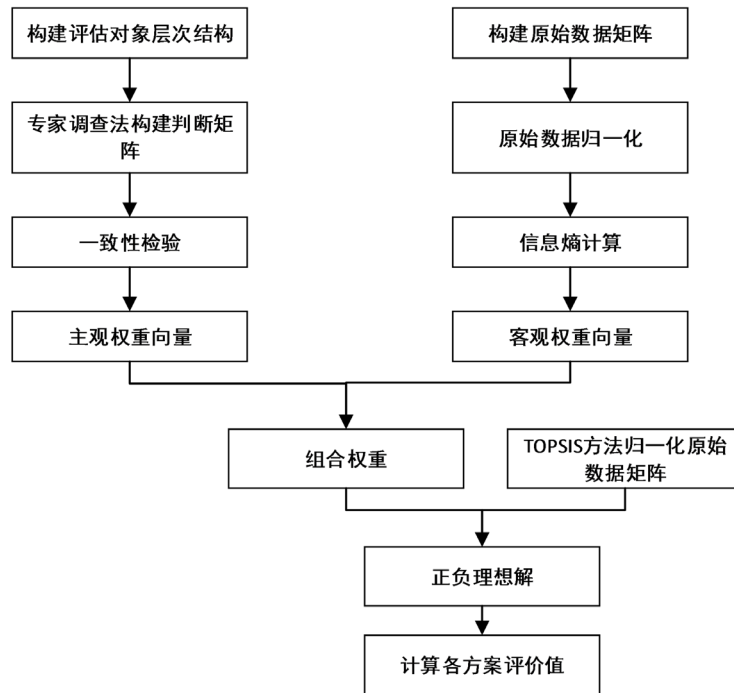


Figure 3. Evaluation algorithm flow
图 3. 评价算法流程

Table 3. Weights of first-grade index
表 3. 一级指标权重

时期	供能可靠性	经济效益性	资源节约性	环境友好性	社会效益性	智能互动性
第一种	0.25	0.25	0.15	0.15	0.10	0.10
第二种	0.10	0.10	0.25	0.25	0.15	0.15
第三种	0.15	0.15	0.10	0.10	0.25	0.25

Table 4. Analog data of evaluation index (%)
表 4. 评价指标模拟数据(%)

指标序号	指标名称	待评智慧能源系统		
		A	B	C
1	电压合格率	71/75/81	40/43/47	33/39/41
2	系统平均失能频率	69/73/75	38/41/49	32/34/37
3	系统平均故障停电时间	51/54/60	31/33/38	25/26/32
4	系统能量不足期望值	66/69/75	45/46/48	43/45/48
5	供能质量	69/72/80	46/48/52	24/26/31
6	信息网络可靠性	40/42/48	32/34/38	30/32/37
7	CO2 权限收益	70/81/88	33/39/47	22/29/40
8	环境税	65/70/73	43/45/48	34/37/43
9	运营成本	67/76/83	42/45/51	37/39/46
10	售电收入	64/71/81	38/42/47	35/41/48

Continued

11	电力增长 gdp	63/67/70	44/48/70	23/28/35
12	节约土地面积	38/44/51	57/65/71	25/28/35
13	能源转换效率	47/51/55	67/72/78	41/42/46
14	清洁能源减排量	58/59/62	80/84/89	51/54/58
15	电动汽车减排量	54/61/63	82/85/91	48/52/55
16	新增就业机会	37/41/48	51/62/69	78/84/91
17	供能覆盖率	27/37/50	34/42/47	74/81/88
18	科研进步程度	34/38/44	43/47/55	66/72/78
19	分布式能源接入率	35/42/48	42/47/51	62/66/71
20	智能仪表覆盖率	47/51/53	56/57/62	72/78/90
21	供能方案可更改率	27/33/42	38/39/46	49/55/64
22	供能服务满意度	34/38/41	40/44/51	51/61/69

Table 5. Weights of second-grade index (%)

表 5. 二级指标权重(%)

指标序号	指标名称	熵权法权重	组合权重 1	组合权重 2	组合权重 3
1	电压合格率	0.1425	0.0356	0.0143	0.0214
2	系统平均失能频率	0.1465	0.0366	0.0147	0.0220
3	系统平均故障停电时间	0.1431	0.0358	0.0143	0.0215
4	系统能量不足期望值	0.1530	0.0383	0.0153	0.0230
5	供能质量	0.1387	0.0347	0.0139	0.0208
6	信息网络可靠性	0.1374	0.0344	0.0137	0.0206
7	CO2 权限收益	0.1388	0.0347	0.0139	0.0208
8	环境税	0.2480	0.0620	0.0248	0.0372
9	运营成本	0.2592	0.0648	0.0259	0.0389
10	售电收入	0.2548	0.0637	0.0255	0.0382
11	电力增长 gdp	0.2380	0.0595	0.0238	0.0357
12	节约土地面积	0.4864	0.0730	0.1216	0.0486
13	能源转换效率	0.5136	0.0770	0.1284	0.0514
14	清洁能源减排量	0.5017	0.0753	0.1254	0.0502
15	电动汽车减排量	0.4983	0.0747	0.1246	0.0498
16	新增就业机会	0.3308	0.0331	0.0496	0.0827
17	供能覆盖率	0.3350	0.0335	0.0503	0.0838
18	科研进步程度	0.3342	0.0334	0.0501	0.0836
19	分布式能源接入率	0.2466	0.0247	0.0370	0.0617
20	智能仪表覆盖率	0.2573	0.0257	0.0386	0.0643
21	供能方案可更改率	0.2429	0.0243	0.0364	0.0607
22	供能服务满意度	0.2532	0.0253	0.0380	0.0633

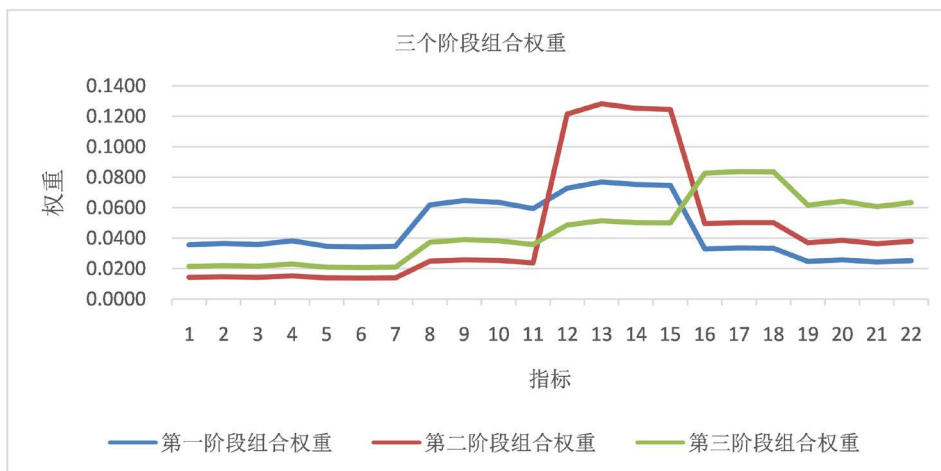


Figure 4. Combination weights of three steps
图 4. 三阶段组合权重

Table 6. Comprehensive score
表 6. 综合评分

	第一阶段			第二阶段			第三阶段		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
综合评价得分	0.5846	0.5107	0.2703	0.3514	0.7024	0.3184	0.3484	0.4181	0.5753

6. 结束语

本文提出了一种基于 AHP-改进的熵权法-TOPSIS 的智慧能源系统评价方法,能科学合理地智慧能源系统的发展做出客观评价,对智慧能源系统的建设和长期发展提供系统指导。本文在深入研究智慧能源系统的基础上,构建了智慧能源系统的指标体系,采用 AHP 与熵权法结合的方式确定各个指标的权重,最后采用 TOPSIS 方法计算智慧能源系统与正负理想解的贴近度从而进行综合评价。本文设计存在不合理之处,采用 AHP 的方式确定主客观权重的时候没有融合多个专家的意见,在后续的设计中可以采用 D-S 理论融合多个专家的判断矩阵,提高主客观权重的可信度。

基金项目

国家电网有限公司总部科技项目:城市智慧能源体系典型设计与运行服务研究资助。

参考文献

- [1] 霍磊,牛西武.基于层次分析法的职教集团绩效考核体系构建与研究[J].杨凌职业技术学院学报,2019,18(4):46-49.
- [2] 袁鹏,曾艺桥,陈政.基于 TOPSIS 法的城市旅游发展动力因子评价:以湖南省为例[J].统计与决策,2019(22):59-63.
- [3] 李兵,庄文化,孙海龙.改进熵权法在岩石边坡生态护坡效果综合评价中的应用[J].中国水土保持,2019(9):58-63.
- [4] 王俊涛.智能电网综合评价方法及其应用研究[D]:[硕士学位论文].山东:山东大学,2017.
- [5] 张海瑞.智能电网综合评价方法研究[D]:[硕士学位论文].上海:上海交通大学,2012.