

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210409

基于主客观赋权相结合的省级电网发展诊断 分析方法与实证研究

戴国华¹, 戴睿², 张琪瑞¹, 李姚旺³

(1. 国网黑龙江省电力有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2. 国网黑龙江省电力有限公司检修公司, 黑龙江 哈尔滨 150000; 3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 面向省级电网的发展诊断分析问题, 提出一种基于区间二型模糊集合和熵权法的电网发展诊断分析方法。首先, 综合考虑指标体系的多维度、多影响因素、独立性和可操作性, 从电网发展速度、发展规模、发展安全、发展效率和发展效益五个角度, 提出电网发展诊断评价的分层指标体系。在此基础上, 提出面向该指标体系的指标归一化评分方法, 并基于区间二型模糊集合和熵权法提出了各项指标的赋权方法。该方法能够较好地刻画指标赋权过程中的模糊因素问题。最后, 基于黑龙江电网的实际数据开展实证分析, 评估黑龙江电网的发展情况。分析结果表明: 黑龙江电网的整体发展情况良好, 但在网源协调性、网荷协调性、电网设备水平、企业经营状态等方面仍有待完善。

关键词: 区间二型模糊集合; 熵权法; 电网发展诊断; 指标体系; 评价方法; 实证分析

Empirical study and analysis of provincial power grid development diagnosis based on the combination of a subjective and objective weighting method

DAI Guohua¹, DAI Rui², ZHANG Qirui¹, LI Yaowang³

(1. State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Harbin 150000, China; 2. State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd. Maintenance Company, Harbin 150000, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A method of diagnosis and analysis for a regional power grid based on the interval type-2 fuzzy sets and entropy weighting is proposed. First, with a comprehensive consideration of multi-dimensional, multi-influencing factors, independence and operability of the index system, a hierarchical index system for power grid development diagnosis and evaluation is proposed from five perspectives: power grid development speed, scale, safety, efficiency, and benefits. An index normalized scoring method for the index system is proposed. Also, a weighting method is proposed based on the interval type-2 fuzzy sets and entropy weighting. This method can better characterize the fuzzy factors in the process of index weighting. Finally, an empirical analysis is carried out based on the actual data from the Heilongjiang Power Grid. The development of the Heilongjiang Power Grid is evaluated. The results indicate that the overall development of the Heilongjiang Power Grid is good, but still needs to be improved in terms of grid-source coordination, grid-load coordination, grid equipment level, and business operational status.

This work is supported by the Chinese Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M640127).

Key words: interval type-2 fuzzy sets; entropy weighting method; power grid development diagnosis; index system; evaluation method; empirical analysis

0 引言

2020年9月22日国家主席习近平在第七十五

届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话。习主席提出:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现“碳中和”^[1-3]。“30 60 碳目标”的提出为我国能源发展道路指明

基金项目: 中国博士后科学基金项目资助(2018M640127)

了方向——新能源为主体的新型电力系统将成为我国未来能源的核心环节。由此可见, 电网的安全、稳定运行极为重要, 将是保障我国社会健康、稳定、高速发展的重要基石^[4-10]。

科学、合理的电网发展诊断分析技术能够有效地定位电网的发展现状和电网的发展空间, 帮助电网查漏补缺, 为电网规划建设提供理论支撑和决策依据。电网发展诊断分析技术对促进电网科学发展, 提高电网管理水平有积极意义^[11]。为此, 电网发展诊断分析技术近年来已备受关注, 成为了电网公司的必备关键技术。

近年来, 已有学者针对电网发展诊断分析方法开展了一定研究。文献[11]提出了一种基于网络层次分析法的电网发展诊断模型, 该发展模型综合考虑了能源、环境、土地等资源对电网发展的制约。文献[12]基于物元分析法提出了一种电网发展诊断分析方法, 该指标体系主要从电网发展速度协调性、电网发展规模协调性、电网结构协调性等角度对电网的发展情况进行表征。文献[13]采用模糊层次分析法分析了区域电网的发展情况, 并提出了区域电网的发展诊断方法。文献[14]从电网发展效率与效益等角度提出了市域电网的发展诊断分析方法。文献[15]采用粗糙集和差异集成赋权方法, 提出了面向地市级电网的诊断评价体系。文献[16]基于层次分析法和数据包络法提出了电网规划方案的综合评价方法。

以上研究从理论角度提出了较为全面的电网发展诊断评价指标体系, 并提出了相应的电网发展诊断评估方法。上述研究成果具有良好的启发意义, 能够对电网的发展诊断起到一定指导和借鉴作用。但是, 目前在电网诊断分析研究领域, 针对我国实际区域电网的实证分析研究稍显不足, 对指标体系的可用性和有效性缺乏实证数据验证。

此外, 现有评价方法较多采用层次分析法, 该方法具有表达简单等优点, 已被广义应用于诸多评价领域; 但是, 该决策方法相对而言过于依赖专家判断, 对电网发展评价过程中的模糊因素无法充分刻画。然而, 电网发展评价指标系统中, 将同时包含定量和部分定性指标, 且涉及大量的模糊因素, 而区间二型模糊集合则能够较好应对以上问题^[17-18]。目前, 区间二型模糊集合法已应用于一些评价问题中, 如: 储能选型、海上风电评估、无人机路径规划、制造业创新能力评价、抽水蓄能机组性能预测等问题^[19-23]。

为此, 本文首先基于层次分析法构建了面向我国省级电网的发展诊断评价指标体系。此后, 介绍

了区间二型模糊集合的概念, 并基于区间二型集合和熵权法进行了指标赋权。在此基础上, 基于我国黑龙江电网的实际运行数据, 开展实证分析, 并给出未来黑龙江电网的规划与发展建议。

1 电网发展诊断指标体系

1.1 指标选取原则

电网发展诊断评估是一个复杂的多变量决策问题, 需要从电网发展速度、规模、安全、质量、效率、效益等多方面进行全要素考虑, 提炼出能够反映电网实际运行情况和发展情况的具体指标, 并根据指标间的关系建立清晰的指标体系结构。同时, 指标的选取应做到客观、独立, 并具有完备性与可操作性。本文考虑多层面的电网发展因素, 研究了指标选取与指标体系构建时应考虑的关键要素, 其关键特征如下。

(1) 多维度: 电网的发展情况涉及安全性、经济性等多个方面, 因此, 电网发展诊断指标应该能够从多维度反映电网的发展情况。

(2) 全面性: 在评估的过程中, 某一方面的指标可能还会受到多个细分参数的影响, 因此, 需要在构建指标的过程中尽可能地保证指标选取的全面性。

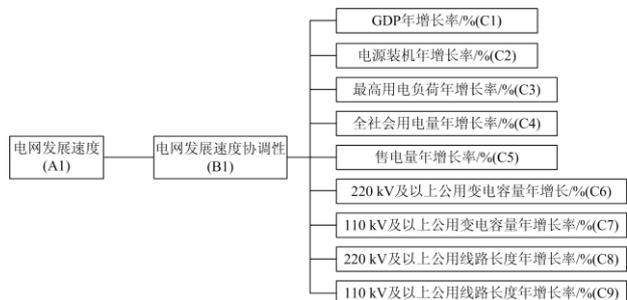
(3) 独立性: 同层次上的指标不应具有包含关系, 不应有很强的相关性, 不应出现过多的信息包容涵盖, 保证指标能从不同方面反映系统的实际情况。

(4) 可操作性: 面向电网发展诊断的指标体系必须可以有效地应用于实际评价, 具有简单、方便、易理解、可操作等特点, 否则无法达到评价的目的。

1.2 指标体系

基于所提出的指标选取原则, 采用层次分析法的指标分层设定思想, 提出了面向电网发展诊断分析的三层指标体系。指标体系如图 1 所示。

该指标体系分别从电网发展速度(A1)、电网发展规模(A2)、电网发展安全(A3)、电网发展效率(A4)和电网发展效益(A5)五个方面反映电网的发展情况。



(a) 一级指标“电网发展速度”指标明细

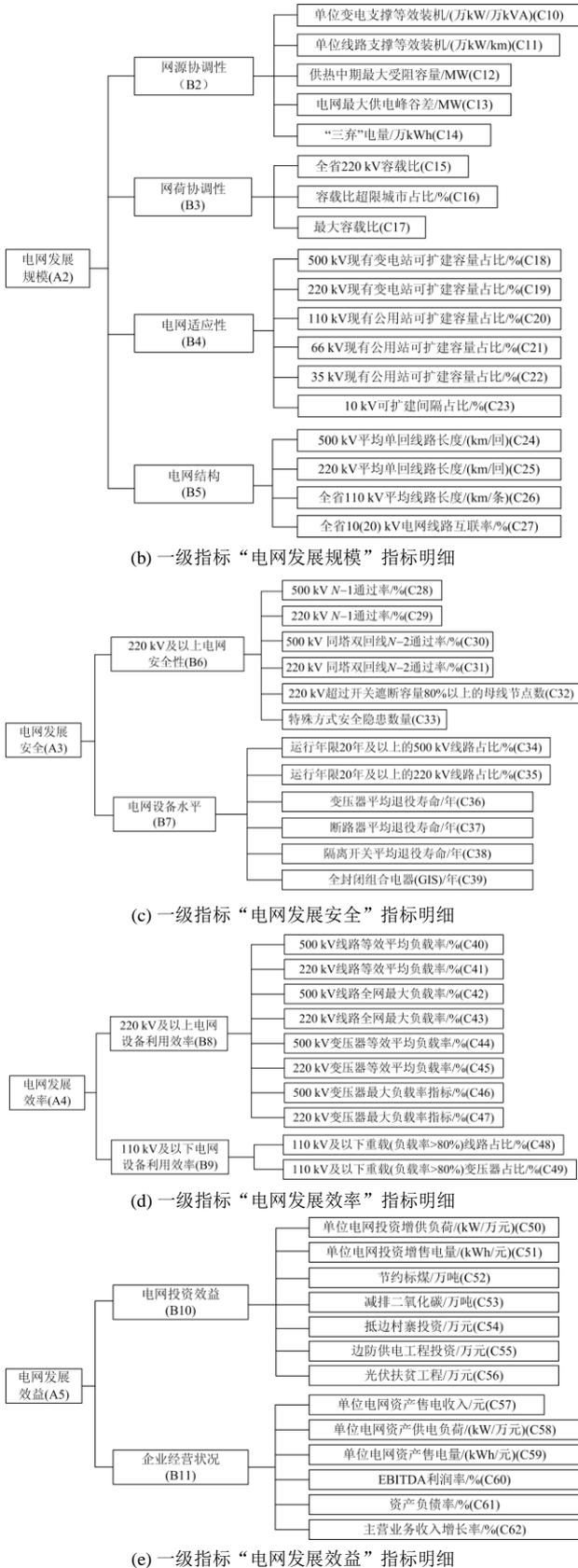


图 1 电网发展诊断指标体系明细

Fig. 1 Index system for power system development diagnostic

其中，电网发展速度方面，二级指标主要包括电网发展速度协调性；电网发展规模方面，共包括 4 项二级指标：网源协调性、网荷协调性、电网适应性、电网结构；电网发展安全方面，共包括 2 项二级指标：220 kV 及以上电网设备利用率、110 kV 及以上电网设备利用效率；电网发展效率方面，共包括 2 项二级指标：电网投资效益和企业经营状况。

在三级指标方面，全指标体系共包括 62 个三级指标体系。以上指标均为电网公司能够直接测量或统计得到的实用性指标。

2 指标计分方法

不同于方案选择问题，省级电网发展诊断问题的主要目标是希望让省级电网运营商充分了解本省的电网发展情况及薄弱环节，而不是通过多个方案综合优劣性对比进行方案优选。其通常更关注单一方案各项指标的细化得分，而不是多方案的综合得分对比。因此，逼近理想解排序法^[24]和理想解相对接近度排序法^[19]均不适用于该评价问题，采用对每项指标进行单独评分的方式是应对该问题的较好处理方法。

由图 1 可见，指标体系中的指标类型各异，且有着不同的量纲。为了能够在同一标度下有效反应不同指标的好坏，需要对每一项指标设置归一化的评分公式，为每个指标设置统一的评价标准。目前，评分公式常采用分段函数的方式表示。

$$\begin{cases}
 y = 0 & x < x_1 \\
 y = a'x + b' & x_1 \leq x < x_2 \\
 \dots & \\
 y = a''x + b'' & x_2 \leq x < x_3 \\
 y = 100 & x \geq x_3
 \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 表示该指标的数值； y 表示该指标的得分； x_1 、 x_2 和 x_3 表示分段标度； a' 、 a'' 、 b' 和 b'' 为评分公式系数，需要说明的是，该式用线性函数表征指标数值与得分的关系，该对应关系还可以用更为复杂的非线性函数进行表征，该函数表达式可根据评价具体需求拟定。

需要说明的是，评分公式中分段指标(x_1 、 x_2 和 x_3)以及评分公式系数(a' 、 a'' 、 b' 和 b'')可根据指标目标值计算得到。指标目标值可依据指标具体定义、省份经济发展现状、地区自然条件、数据可获得能力、同业对标中较为优秀地区的得分、国网该指标平均值等来确定^[15]。以“500 kV N-1 通过率”为例说明评分公式中分段指标和评分公式系数的计算方法：假设指标目标值 500 kV N-1 通过率大于等于

99%时记为100分, 500 kV N-1 通过率等于 95%时记为60分, 500 kV N-1 通过率小于90%时记为0分, 则, $x_1=90\%$, $x_2=95\%$, $x_3=99\%$, $a'=12$, $a''=10$, $b'=-1\ 080$, $b''=-890$ 。

式(1)中表征的评分公式为百分制, 其他分制的评分方式只需对该公式进行等比例放缩即可。此外, 式(1)适用于指标数值与指标得分间有正比例关系的指标。当指标数值与指标得分之间有反比例关系, 以及指标得分在某区域内得分最高或最低时, 指标的评分公式分别由式(2)一式(4)表示。

$$\begin{cases} y=100 & x < x_1 \\ y=a'x+b' & x_1 \leq x < x_2 \\ \dots & \\ y=a''x+b'' & x_2 \leq x < x_3 \\ y=0 & x \geq x_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y=0 & x < x_1 \\ y=a'x+b' & x_1 \leq x < x_2 \\ y=100 & x_2 \leq x < x_3 \\ y=a''x+b'' & x_3 \leq x < x_4 \\ y=0 & x \leq x_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y=100 & x < x_1 \\ y=a'x+b' & x_1 \leq x < x_2 \\ y=0 & x_2 \leq x < x_3 \\ y=a''x+b'' & x_3 \leq x < x_4 \\ y=100 & x \leq x_4 \end{cases} \quad (4)$$

3 基于区间二型模糊集的指标权重获取方法

本文采用主客观赋权法相结合的权重获取方法, 其中, 各指标的主观权重由区间二型模糊层次分析法获得, 客观权重由熵权法获得。

3.1 区间二型模糊集

在本文所提出的指标体系中, 评价指标数量众多、类型各异, 不同指标在整个评价体系中所占的比重有所不同, 例如: 多数系统运行者更加看重电网发展安全性, 因此, 该指标的得分在整个评价指标体系中将占据更加重要的比重。

本文采用区间二型模糊集对各项指标进行权重分配。区间二型模糊数的隶属度函数示意图如图2所示。该隶属度函数 \tilde{A}_i 分为上隶属度函数 \tilde{A}_i^U 和下隶属度函数 \tilde{A}_i^L , 两个隶属度函数均用梯形隶属度表示, 隶属度函数的表达式为

$$\tilde{A}_i = (\tilde{A}_i^U, \tilde{A}_i^L) = \left((a_{i1}^U, a_{i2}^U, a_{i3}^U, a_{i4}^U; H_1(\tilde{A}_i^U), H_2(\tilde{A}_i^U)), (a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L, a_{i4}^L; H_1(\tilde{A}_i^L), H_2(\tilde{A}_i^L)) \right) \quad (5)$$

式中: a_{ij}^U 和 a_{ij}^L 分别表示区间二型模糊集 \tilde{A}_i 是上下隶属度参考点; $H_1(\tilde{A}_i^X)$ 和 $H_2(\tilde{A}_i^X)$ 分别表示梯形隶属度函数中 a_{i2}^X 和 a_{i3}^X 处的隶属度值, 其中 $X \in \{U, L\}$ 。

区间二型模糊数间同样可以进行加、减、乘、除、开方和数乘运算。具体定义与计算规则详见文献[19]和文献[20]。

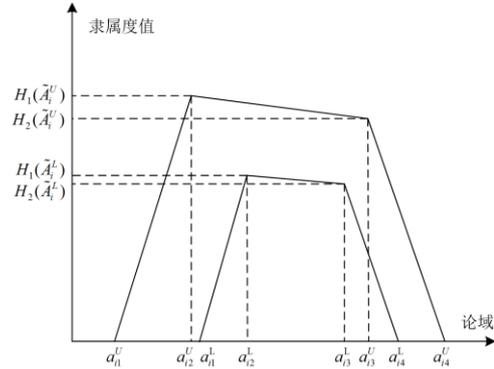


图2 区间二型模糊集的隶属度示意图

Table 2 Geometric schematic diagram of the interval-type-2 fuzzy set

3.2 主观权重求取过程

使用区间二型模糊层次分析法求解各指标权重。假设共有 n 个指标, 基于专家评价结果, 构造判断矩阵, 判断矩阵 \tilde{C} 中元素 \tilde{c}_{ij} 的值反映了指标 \tilde{c}_i 对于 \tilde{c}_j 的相对重要性, 表达式如式(6)一式(7)所示。判断矩阵数值基于表1所示的区间二型模糊集的比较语言量获得。

表1 区间二型模糊集对应的比较语言量表

Table 1 Comparative linguistic scale for interval type-2 fuzzy sets

语言变量	对应的区间二型模糊集
同等重要(EI)	(1.0,1.0,1.0,2.0;1,1),(1.0,1.0,1.0,1.5;0.9,0.9)
稍微重要(MMI)	(2.0,2.7,3.3,4.0;1,1),(2.5,2.8,3.1,3.5;0.9,0.9)
明显重要(SMI)	(4.0,4.7,5.3,6.0;1,1),(4.5,4.8,5.1,5.5;0.9,0.9)
强烈重要(VSMI)	(6.0,6.7,7.3,8.0;1,1),(6.5,6.8,7.1,7.5;0.9,0.9)
极端重要(EMI)	(8.0,8.7,9.3,10.0;1,1),(8.5,8.8,9.1,9.5;0.9,0.9)

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{11} & \tilde{c}_{12} & \dots & \tilde{c}_{1j} & \dots & \tilde{c}_{1n} \\ \tilde{c}_{21} & \tilde{c}_{22} & \dots & \tilde{c}_{2j} & \dots & \tilde{c}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{c}_{j1} & \tilde{c}_{j2} & \dots & \tilde{c}_{jj} & \dots & \tilde{c}_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{c}_{n1} & \tilde{c}_{n2} & \dots & \tilde{c}_{nj} & \dots & \tilde{c}_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\tilde{c}_{ij} = 1/\tilde{c}_{ij} = \left(\begin{array}{l} (1/c_{ij4}^U, 1/c_{ij3}^U, 1/c_{ij2}^U, 1/c_{ij1}^U; H_1(\tilde{C}_{ij}^U), H_2(\tilde{C}_{ij}^U)), \\ (1/c_{ij4}^L, 1/c_{ij3}^L, 1/c_{ij2}^L, 1/c_{ij1}^L; H_1(\tilde{C}_{ij}^L), H_2(\tilde{C}_{ij}^L)) \end{array} \right) \quad (7)$$

由于不同专家经验的差异性，判断矩阵往往不能满足完全一致性，当指标元素间的一致性较差时，可能出现指标 P_1 较指标 P_2 更加重要，指标 P_2 较指标 P_3 更加重要，但指标 P_3 又比指标 P_1 重要这样的矛盾情形，为保证各指标间重要度的协调性，需要进行一致性校验。校验时，基于 λ_{\max} 计算一致性指标值 C_I ，当一致性比例 $C_R > 0.10$ 时，表明多个指标的相对重要程度存在不一致性，需要人为地调整判断矩阵，平均随机一致性指标 R_I 采用文献[24]的计算结果，如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标

Table 2 Average random consistency index

n	1	2	3	4	5	6
R_I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	12
R_I	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54

当一致性不满足时，可采用和积法实现^[24]。

为便于获取矩阵的特征值，可以采用文献[25]

中的去模糊化方法对判断矩阵 \tilde{C} 中的区间二型模糊集元素进行去模糊化，如式(8)所示。

$$A_i^D = D\text{TraT}(\tilde{A}_i) = \frac{(a_{i4}^U - a_{i1}^U) + (H_1(a_{i2}^U) \cdot a_{i2}^U - a_{i1}^U) + (H_1(a_{i3}^U) \cdot a_{i3}^U - a_{i1}^U)}{8} + \frac{(a_{i4}^L - a_{i1}^L) + (H_1(a_{i2}^L) \cdot a_{i2}^L - a_{i1}^L) + (H_1(a_{i3}^L) \cdot a_{i3}^L - a_{i1}^L)}{8} + \frac{a_{i1}^U + a_{i1}^L}{2} \quad (8)$$

式中， A_i^D 为区间二型模糊集 \tilde{A}_i 的去模糊值。

基于区间二型模糊集的基本运算法则，计算各个决策指标的模糊几何平均值，通过归一化得到各个指标的主观权重。归一化计算公式如下。

$$\tilde{r}_j = [\tilde{c}_{j1} \otimes \tilde{c}_{j2} \otimes \dots \otimes \tilde{c}_{jn}]^{1/n} \quad (9)$$

$$\tilde{w}_j^{\text{AHP}} = \frac{\tilde{r}_j}{\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n} \quad (10)$$

式中： \tilde{r}_j 为指标 j 的模糊几何平均值； \tilde{w}_j^{AHP} 为采用区间二型模糊层次分析法计算求得的第 j 个指标的区间二型模糊主观权重。

3.3 客观权重求取过程

熵权法是目前最常用的客观权重求取方法之

一，基于熵权法的客观权重求取步骤如下^[19]。

首先，假设共有 m 个评价对象， n 个评价指标，建立归一化后的原始数据评价矩阵 P ，表达式为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中， p_{ij} 表示第 i 个评价对象的第 j 个指标值。

其次，计算各项指标的信息熵 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (12)$$

最后，可得到各指标的客观权重 w_j^{EM} 。

$$w_j^{\text{EM}} = \frac{(1 - e_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (13)$$

求得客观权重后，可通过加权集成的方式得到各指标的综合权重 w_j 数值^[15]。

$$w_j = \alpha \tilde{w}_j^{\text{AHP}} + \beta w_j^{\text{EM}} \quad (14)$$

式中， α 和 β 为指标集成权重， $\alpha + \beta = 1$ 。

4 实证分析

基于我国黑龙江省的实际统计数据，本文结合所提出的电网发展诊断指标体系，开展实证分析，对黑龙江电网的发展情况进行评价，并在此基础上提出黑龙江电网的未来发展建议。

4.1 黑龙江电网情况简介

黑龙江省是我国最东北的省份，北部、东部以黑龙江、乌苏里江为界，与俄罗斯相望；西部与内蒙古自治区毗邻；南部与吉林省接壤，地域面积 454 000 km²，2019 年常驻人口 3 773.1 万人。

截止 2019 年底，黑龙江电网装机总容量为 3 426.228 万 kW，其中以 500 kV 电压等级并网的发电装机容量为 300 万 kW，以 220 kV 电压等级并网的发电装机容量为 1 934.235 万 kW，以 110 kV 电压等级并网的发电装机容量为 457.467 万 kW，以 66 kV 电压等级并网的发电装机容量为 285.64 万 kW，以 35 kV 及以下电压等级并网的发电装机容量为 268.885 7 万 kW。

随着黑龙江省经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，对电力的需求逐步加大。2019 年黑龙江省全社会用电量完成 995.63 亿 kWh，年均增长率为 3.54%。其中，第一产业用电有所下降；第二产业受国内及国际经济影响，增速缓慢；第三产业及

居民生活用电仍保持较快速度增长。黑龙江省作为工业大省, 60%左右的用电量为第二产业所耗。而随着经济增长方式的改变、产业结构调整力度的加大、各项节能政策措施的落实以及“早改水、机改电”的大范围实施, 第一产业、第三产业及居民生活用电量出现较大幅度增长, 用电比重上升, 第二产业用电比重下降。随着转变经济发展方式的不断深入, 第三产业用电比重将有较大上升空间, 其所占比重将进一步增大。

黑龙江电网最大峰谷差由 2015 年的 449.3 万 kW 增加到 450.6 万 kW。随着峰谷差的进一步加大, 电网调峰矛盾更加突出, 其主要原因为电网启停调峰次数同比减少; 同时, 随着省内 10 万 kW 机组的关停以及风电的集中、大规模接入电网, 无机组参与启停调峰, 仅有富热厂可参与停炉调峰, 而新增火电机组主要为供热机组, 调峰能力差。部分电厂由于发电煤质和供热影响, 机组调峰能力严重下降, 增加了电网调峰困难。虽然鲁固特高压直流输电工程投产后, 黑龙江电网的外送能力有所提高, 但黑龙江省的调峰缺口依然较大, 保证新能源消纳的压力依然存在。

为此, 电网发展诊断分析工作对黑龙江电网尤为重要, 能够为其未来规划与建设提供决策依据。

4.2 评估结果与分析

黑龙江电网各项指标的统计结果如表 3 所示, 同时, 通过区间二型模糊集合得到各项指标主观权重, 通过熵权法和 2017 年至 2019 年的黑龙江电网指标统计结果得到指标的客观权重; 合成综合权重时, α 和 β 分别取 0.8 和 0.2, 计算所得各指标的综合权重如表 3 所示。

表 3 黑龙江电网的指标统计结果及各指标权重

Table 3 Statistical results and weights of indexes for

Heilongjiang Power Grid

编号	指标名称	数值	权重/%
C1	GDP 年增长率/%	5.96	1.463
C2	电源装机年增长率/%	3.75	1.587
C3	最高用电负荷年增长率/%	2.44	1.084
C4	全社会用电量年增长率/%	2.23	0.991
C5	售电量年增长率/%	1.46	1.385
C6	220 kV 及以上公用变电容量年增长率/%	1.86	0.904
C7	110 kV 及以上公用变电容量年增长率/%	4.02	0.858
C8	220 kV 及以上公用线路长度年增长率/%	5.64	0.986
C9	110 kV 及以上公用线路长度年增长率/%	5.16	1.198
C10	单位变电支撑等效装机/(万 kW/万 kVA)	0.76	0.992
C11	单位线路支撑等效装机/(万 kW/km)	0.19	0.980
C12	供热中期最大受阻容量/MW	4 800	1.632
C13	电网最大供电峰谷差/MW	4 623	1.471
C14	“三弃”电量/万 kWh	15 983	1.407

续表 3

编号	指标名称	数值	权重%
C15	全省 220 kV 容载比	1.89	1.019
C16	容载比超限城市占比/%	84.6	1.602
C17	最大容载比	3.48	1.120
C18	500 kV 现有变电站可扩建容量占比/%	40.20	1.201
C19	220 kV 现有变电可扩建容量占比/%	34.60	0.821
C20	110 kV 现有公用站可扩建容量占比/%	36.70	1.025
C21	66 kV 现有公用站可扩建容量占比/%	41.50	0.919
C22	35 kV 现有公用站可扩建容量占比/%	43.50	0.998
C23	10 kV 可扩建间隔占比/%	40.40	0.971
C24	500 kV 平均单回线路长度/(km/回)	137.56	1.183
C25	220 kV 平均单回线路长度/(km/回)	33.11	1.098
C26	全省 110 kV 平均线路长度/(km/条)	17.21	0.923
C27	全省 10(20) kV 电网线路互联率/%	32.46	0.875
C28	500 kV N-1 通过率/%	100	3.176
C29	220 kV N-1 通过率/%	92.94	3.422
C30	500 kV 同塔双回线 N-2 通过率/%	100	3.378
C31	220 kV 同塔双回线 N-2 通过率/%	98.98	3.262
C32	220 kV 超过开关遮断容量 80% 以上的 母线节点数	1	4.091
C33	特殊方式安全隐患数量	0	3.106
C34	运行年限 20 年及以上的 500 kV 线路占比/%	20.77	4.078
C35	运行年限 20 年及以上的 220 kV 线路 占比/%	16.71	3.238
C36	变压器平均退役寿命/年	14.17	2.749
C37	断路器平均退役寿命/年	15.9	2.918
C38	隔离开关平均退役寿命/年	15.06	3.051
C39	全封闭组合电器(GIS)/年	17	3.024
C40	500 kV 线路等效平均负载率/%	51	1.540
C41	220 kV 线路等效平均负载率/%	14.30	1.649
C42	500 kV 线路全网最大负载率/%	18.03	1.354
C43	220 kV 线路全网最大负载率/%	86.55	1.498
C44	500 kV 变压器等效平均负载率/%	11.79	1.556
C45	220 kV 变压器等效平均负载率/%	22.65	1.452
C46	500 kV 变压器最大负载率指标/%	44.88	1.427
C47	220 kV 变压器最大负载率指标/%	54.58	1.472
C48	110 kV 及以下重载(负载率 > 80%) 线路占比(%)	9.42	1.498
C49	110 kV 及以下重载(负载率 > 80%) 变压器占比/%	12.70	1.619
C50	单位电网投资增供负荷/(kW/万元)	0.78	1.267
C51	单位电网投资增售电量/(kWh/元)	0.32	1.467
C52	节约标煤/万吨	1044.7	1.024
C53	减排二氧化碳/万吨	2578.2	1.992
C54	抵边村寨投资/万元	3722	0.992
C55	边防供电工程投资/万元	400	0.978
C56	光伏扶贫工程/万元	607	0.900
C57	单位电网资产售电收入/元	0.47	0.923
C58	单位电网资产供电负荷/(kW/万元)	1.21	1.176
C59	单位电网资产售电量/(kWh/元)	0.81	1.267
C60	EBITDA 利润率/%	8.26	0.927
C61	资产负债率/%	67.78	0.927
C62	主营业务收入增长率/%	9.74	0.903

此外，各项指标的得分情况如图 3 所示。根据各项指标的得分情况和各项指标的权重，计算得到系统总得分为 87.81 分。由图 3 中的结果可以看出，黑龙江电网的整体发展情况良好，但在网源协调性(B2)、网荷协调性(B3)、电网设备水平(B7)、企业经营状态(B11)等方面仍有待完善。具体分析如下。

在网源协调性方面，该部分指标评分为 73.59 分。2019 年供热中期的最大受阻容量达到 4 800 MW，而电网的最大供电峰谷差达到 4 632 MW，年弃风

电量为 15 983 万 kWh。黑龙江电网电源以火电为主，结构单一，省网调峰主要依靠火电机组自身调峰能力，调峰能力差。黑龙江为高寒地区，冬季供热机组容量已经占最大负荷的 80%，由于原有可启停调峰的机组相继关停，考虑到现有供热机组运行调峰能力差，火电整体调峰能力下降，风电迅猛发展又进一步加重了电网的调峰困难。为此，应统筹电网和电源规划，编制统一的能源规划和电力发展规划，合理安排电源建设时序。

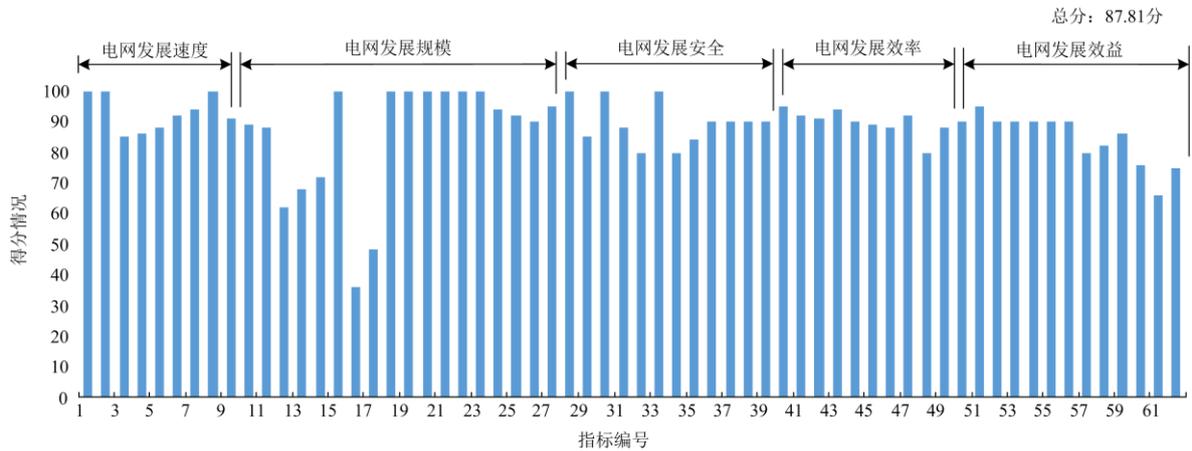


图 3 黑龙江电网 2019 年发展诊断分析

Fig. 3 Diagnosis and analysis of Heilongjiang Power Grid Development

在网荷协调性方面，该部分指标评分为 57.03 分。尽管全省整体容载比 1.89 在合理范围内(1.7-2)，但是，全省容载比超标的城市比例达到约 85%，各地区发展存在较大不均衡性，大庆地区的容载比偏低(1.65)，而牡丹江地区却达到 3.48。为此，应科学安排电网项目建设投资，满足地方经济发展对电力的需求，并保证电网投资效益有效发挥；应对负荷有较大影响的项目进行深入分析、论证，并结合各地区电网容载比情况，对拟新开工项目的建设时序进行优化调整，同时对现有轻载或重载变电站进行分析和研究，采取相应措施改善；建议根据各地区负荷发展情况，合理选择主变容量等设备，以提高设备利用效率。

在电网设备水平方面，该部分指标评分为 86.84 分。截至 2019 年，黑龙江省各类型设备运行年限超过 20 年及以上的占比仍然较大。电网老旧设备的占比较高，应对电网老旧设备进行梳理，并对关键地区和节点的老旧设备进行及时检修和更换。

在企业经营状态方面，该部分指标评分为 78.16 分。目前，企业经营状态方面的各项指标均不乐观。黑龙江电网公司盈利水平偏低，处于严重累计亏损状态，其主要原因是 2009 年起公司承担单边调价政

策性亏损，同时地方电网上划，电网投资规模的大幅增加，资产折旧、财务费用、运营成本的不断增长，均超出公司电量自然增长承受能力，投入产出严重不配比。为此，需组织持续深化业扩报装专项治理活动，夯实基础管理，扎实规范验收标准，不断规范服务行为。此外，需要继续加强内外部的监督管控。一级指标的得分情况如图 4 所示。由图 4 可以看出，在五项一级指标中，黑龙江电网在“电网发展规模”和“电网发展效益”方面相对薄弱。得分分别为 82.14 分和 85.58 分。

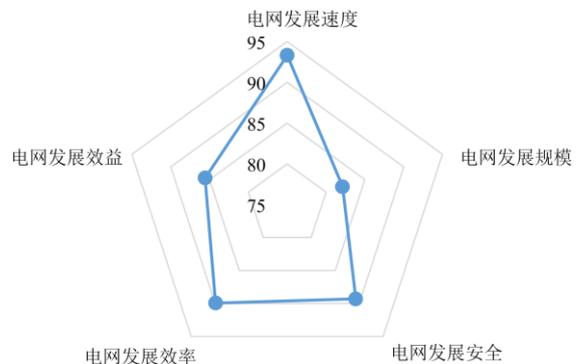


图 4 一级指标的得分情况

Fig. 4 Score of the first level indicator

5 结论

本文提出了一种基于区间二型模糊集合的电网发展诊断评价方法。该方法可从电网发展速度、发展规模、发展安全、发展效率和电网发展效益五个角度量化评价省级电网的发展情况, 该指标体系包括 62 个细化指标。基于所提出的电网发展诊断方法, 对 2019 年黑龙江电网的发展情况进行实证分析, 分析结果表明: 黑龙江电网的整体发展情况良好, 但在网源协调性、网荷协调性、电网设备水平、企业经营状态等方面仍有待完善。

参考文献

- [1] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 6: 58-64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 6: 58-64.
- [2] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154-163.
ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 154-163.
- [3] 潘险险, 余梦泽, 隋宇, 等. 计及多关联因素的电力行业碳排放权分配方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 35-42.
PAN Xianxian, YU Mengze, SUI Yu, et al. Allocation scheme of carbon emission rights for power industry considering multiple correlated factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 35-42.
- [4] 郭建波. 未来高比例新能源电力系统的挑战[R]. 北京: 国家电网有限公司, 2020.
GUO Jianbo. Challenges of the future high-proportion new energy power system[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2020.
- [5] 胡健, 秦玉杰, 焦提操, 等. 泛在电力物联网环境下考虑碳排放权约束的 VPP 理性调峰模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 49-57.
HU Jian, QIN Yujie, JIAO Ticao, et al. Rational peak shaving model of VPP considering carbon emission rights constraints in ubiquitous power internet of things environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 49-57.
- [6] 赵东声, 高忠臣, 刘伟. 碳捕集火电与梯级水电联合优化的低碳节能发电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 148-155.
ZHAO Dongsheng, GAO Zhongchen, LIU Wei. Low-carbon energy-saving power generation dispatching optimized by carbon capture thermal power and cascade hydropower[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 148-155.
- [7] HUANG Wujing, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(12): 1-13.
- [8] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [9] 檀勤良, 代美, 梅书凡. 考虑电动汽车碳配额及需求响应的电力系统调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 79-86.
TAN Qinliang, DAI Mei, MEI Shufan. Research on electric vehicle carbon quota and demand response in electric power system dispatching[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 79-86.
- [10] 姜曼, 杨司玥, 刘定宜, 等. 中国各省可再生能源电力消纳量对碳排放的影响[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 87-95.
JIANG Man, YANG Siyue, LIU Dingyi, et al. Impacts of renewable electricity consumption on carbon dioxide emission in China's province[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 87-95.
- [11] 王正阳, 詹智民, 罗宾, 等. 基于网络层次分析法的电网发展诊断模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(2): 39-43.
WANG Zhengyang, ZHAN Zhimin, LUO Bin, et al. Research of the index model of power grid development diagnosis based on ANP[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(2): 39-43.
- [12] 艾欣, 赵璐, 王智冬, 等. 物元分析法及其在电网发展诊断中的应用研究[J]. 华北电力大学学报, 2020, 47(3): 10-18.
AI Xin, ZHAO Lu, WANG Zhidong, et al. Matter element

- analysis and its application in power grid development diagnosis[J]. Journal of North China Electric Power University, 2020, 47(3): 10-18.
- [13] 龚贵宝. 基于模糊层次分析法的区域电网发展诊断研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
GONG Guibao. Study on diagnosis of regional power grid development based on fuzzy analytic hierarchy process[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [14] 王兴辉. 市域电网发展诊断分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.
WANG Xinghui. Analysis of city region development of power grid diagnosis[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [15] 李佳莲. 基于粗糙集与差异集成赋权的地市级电网诊断评价体系[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
LI Jialian. The diagnosis and evaluation system of municipal power grid based on the rough set and integrated weighting method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [16] 陈奎, 韦晓广, 牛俊萍, 等. 基于 AHP-DEA 模型的电网规划方案综合评判决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 40-46.
CHEN Kui, WEI Xiaoguang, NIU Junping, et al. Comprehensive judgment for power system planning alternatives based on AHP-DEA[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 40-46.
- [17] LI H, WU C, WU L, et al. Filtering of interval type-2 fuzzy systems with intermittent measurements[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 46(3): 668-678.
- [18] CHEN S M, LEE L W. Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the ranking values and the arithmetic operations of interval type-2 fuzzy sets[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 824-833.
- [19] 冯喜春, 张松岩, 朱天瞳, 等. 基于区间二型模糊多属性决策方法的大规模储能选型分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 4123-4136.
FENG Xichun, ZHANG Songyan, ZHU Tiantong, et al. Large-scale energy storage selection analysis based on interval type 2 fuzzy multiple attribute decision making method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4123-4136.
- [20] DEVECI M, CALI U, KUCUKSARI S, et al. Interval type-2 fuzzy sets based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm development in Ireland[J]. Energy, 2020, 198.
- [21] SUN X, CAI C, YANG J, et al. Route evaluation for unmanned aerial vehicle based on type-2 fuzzy sets[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 39: 132-145.
- [22] 王志恒. 基于信息集成的区间二型模糊多准则决策方法及其在制造业创新能力评价中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2019.
WANG Zhiheng. Interval type-2 fuzzy multi-criteria decision-making method based on information aggregation and its application in manufacturing innovation ability evaluation[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [23] 邹雯. 基于二型模糊模型辨识的抽水蓄能机组性能劣化趋势预测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZOU Wen. Prediction of pumped storage unit performance deterioration trend based on type 2 fuzzy model identification[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [24] 雷琪, 苗世洪, 郭宝甫, 等. 基于层次分析和改进逼近理想解法的分层储能系统综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 13-19.
LEI Qi, MIAO Shihong, GUO Baofu, et al. Comprehensive evaluation of hierarchical storage system based on analytic hierarchy process and improved technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 13-19.
- [25] CHEN S M, LEE L W. Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the ranking values and the arithmetic operations of interval type-2 fuzzy sets[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 824-833.

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-08-25

作者简介:

戴国华(1963—), 男, 本科, 高工, 从事电网规划研究;

戴睿(1993—), 女, 本科, 工程师, 从事继电保护研究;

张琪瑞(1980—), 男, 硕士, 高工, 从事电网投资管理研究。

(编辑 张爱琴)