

# 基于模糊理论的数字电网发展指数评估

冯国平<sup>1,✉</sup>, 李娟<sup>2</sup>, 解文艳<sup>1</sup>, 吉小恒<sup>1</sup>, 古明生<sup>1</sup>, 黄翔<sup>3</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 中都工程设计有限公司华南分公司, 广东 广州 510075;

3. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510555)

**摘要:** [目的] 数字电网是一个全新概念, 是新型电力系统的最佳承载方式。在数字化转型中, 电网企业都致力于建设数字电网。数字电网有别于传统智能电网, 需要从宏观上衡量其发展水平。因此, 有必要构建全新的数字电网综合指数以指导电网企业开展数字电网建设, 并分析建设中存在的不足。[方法] 基于对数字电网发展指数关键构成因素的分析, 建立了数字电网指数评估体系, 针对性选择数字电网的核心指标。首先对各级关键指标赋权, 然后基于模糊理论构建了数字电网发展指数模型。[结果] 选取了南方电网下属的三家电网公司进行了实例分析, 分析结果表明: 数字电网发展指数总体不高, 除了本体安全指标外, 其他方面均有广阔的发展空间。[结论] 基于该方法能有效测算出电网企业数字电网发展状态, 以及未来的发展趋势。

**关键词:** 数字电网; 新一代数字化技术; 模糊综合评价; 新型电力系统; 指标体系

中图分类号: TM743; F40

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)S1-0001-09

开放科学(资源服务)二维码:



## Evaluation of Digital Power Grid Development Index Based on Fuzzy Theory

FENG Guoping<sup>1,✉</sup>, LI Juan<sup>2</sup>, XIE Wenyan<sup>1</sup>, JI Xiaoheng<sup>1</sup>, GU Mingsheng<sup>1</sup>, HUANG Xiang<sup>3</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Zhongdu Engineering Design Co., Ltd. South China Branch, Guangzhou 510775, Guangdong, China;

3. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510555, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] Digital power grid is a brand new concept and the best bearing mode of new power system. In the digital transformation, power grid enterprises are committed to constructing a digital power grid. Digital power grid is different from traditional smart power grid. It is necessary to measure the development level of digital power grid from a macro perspective. Therefore, it is necessary to build a new digital power grid comprehensive index to guide power grid enterprises to construct the digital power grid, and analyze the shortcomings in the construction. [Method] Based on the analysis of the key components of digital power grid development index, a digital power grid index evaluation system was established to select the core indicators of digital power grid. First, the key indicators at all levels were weighted, and then a digital power grid development index model was constructed based on fuzzy theory. [Result] Three power grid companies subordinate to China Southern Power Grid are selected for case study. The analysis results show that the overall development index of digital power grid is not high, and there is broad development space in various fields other than ontology security index. [Conclusion] Based on this method, the development status and future development trend of digital power grid of power grid enterprises can be effectively estimated.

**Key words:** digital power grid; new-generation digital technology; fuzzy comprehensive evaluation; new power system; indicator system  
2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-10-18 修回日期: 2022-12-13

基金项目: 国家重点研发计划资助“数字电网关键技术”(2020YFB0906000); 国家重点研发计划资助“基于数字孪生的海量多源异构数据中台建模与融合关键技术研究与应用”(2020YFB0906004)

## 0 引言

当前新一代数字技术作为核心力量引领新一轮工业革命发展,并向社会各行业深度渗透,从不同层面驱动全社会深刻、广泛变革。在数字化浪潮席卷全球的时代背景下,电网企业积极推进电网数字化升级,并大力拓展新兴业务,致力于在实体经济的基础上实现数字经济的融合发展,并获得企业的高质量发展。同时,面对全球日益恶化的气候问题,中国提出“碳达峰、碳中和”,并要构建以新能源为主体的新型电力系统。这为未来电网企业的发展指明了方向。构建新型电力系统,并以此全面支撑“双碳”目标实现,是能源电力行业的一场全局性变革。

电网企业纷纷以推动数字化转型,通过数字技术改造传统电网、升级企业管理,并提出建设数字电网,以“电力+算力”为新一代基础设施,推动整个能源生态变革。南方电网公司阐述了数字电网的定义,指出数字电网以新一代数字技术为驱动因素,以数据资产为核心生产要素,以传统电网与新一代信息网络设施为基础,推动新技术与电力业务、企业管理深度融合,不断提高电网企业的智能化水平,促进形成具有灵活性、开放性、交互性、经济性、共享性等特性的新型能源生态系统,使传统电网更加智能、安全、可靠、绿色、高效<sup>[1]</sup>。南方电网提出数字电网是新型电力系统最佳承载方式,通过打造数字电网驱动以新能源为主体的新型电力系统构建。数字电网成为电网企业在数字经济时代的首要战略任务。电网企业的发展方向由注重安全和设备转变为安全、效率、价值和生态并重<sup>[2]</sup>。因此,分析与掌握数字电网发展水平是电网企业建设数字电网的首要任务。电网企业需要在数字电网建设过程中,对自身的发展状态进行合理、客观的评价,需要构建全面、多维度的数字电网综合评价模型,为电网企业高质量发展提供参考。

目前国内外还未发现对数字电网发展指数进行评估,但利用相关综合评估方法对电网发展水平、电气化水平、智能电网建设等方面做了大量研究。随着电力体制改革相关政策出台,能源监管机构对电网的监管要点发生转变,为了适应监管要求,文献[3]构建了针对电网发展的综合评价体系,提出两级电网发展指标体系,涵盖安全性、绿色性、经济性等指

标,并利用层次分析法对指标进行赋权,基于多级模糊综合评判模型对电网发展水平进行评估。在智能电网的评价方面,文献[4]从技术成熟度的角度,按照目标、环节、建设等级三个维度创新性提出了智能电网评价的三维模型,并从效果、进程等维度构建智能电网评价指标体系。该文献结合电网规划,通过权重赋权,对智能电网进行阶梯渐进的评估。建设低碳电网是国家和全社会绿色发展的内在要求,文献[5]在分析促进电网低碳绿色发展、电网的综合量化评价体系、全生命周期设备管理的基础上,阐述了建立低碳电网的综合评价指标体系与模型的对电网绿色发展的实际意义。该文献受资产全生命周期管理理念的启发,从电网规划、建设、运行和电网设备等维度设计了电网绿色低碳的综合评价指标体系。在指标体系的基础上设计了电网绿色低碳的量化评价方法。在我国推进再电气化进程中,文献[6]分析了实施再电气化战略的必要性,针对再电气化水平,构建了包含控制层、指标层的评价指标,基于评价模型,结合实际数据,以取某地区为对象对该地区的电气化水平进行分析测算,得出电气化水平综合评价的量化结果,为有针对性的提高电气化水平提供了有益的建议。

在电网的个体评价方面,文献[7]基于矩阵计算理论,提出了兼顾主观因素和客观因素的集成赋权方法,针对电能质量进行综合评价,基于最优组合权重方法,创新性提出的电能质量灰色综合评价方案,并通过实际案例评价验证了该方案的有效性。针对敏感负荷富集区域,为了掌握电力用户对供电可靠性敏感度,文献[8]研究了电力用户对供电可靠性敏感度的定义,并分析电力用户敏感特性,从政治、经济和社会等多个因素出发构建用户敏感度评价指标体系,设计了指标矩阵,提出利用 AHP 和 FCM 等算法构建用户敏感度评价方法。还有其他学者基于模糊理论研究电力市场<sup>[9]</sup>、碳排放<sup>[10]</sup>、电网规划<sup>[11]</sup>、电能质量<sup>[12]</sup>、电力消纳<sup>[13]</sup>、电网项目<sup>[14]</sup>、电力通信设备<sup>[15]</sup>、电量计算<sup>[16]</sup>等。

上述文献一部分学者集中对电网的某一个体对象或某一属性进行研究评估,如供电可靠性、雷电防护能力、调度灵活性、电力设备风险等安全性、可靠性等技术问题,而另一部分学者则主要针对智能电网、智能配电网等从智能运行、低碳发展等角度提

出整体评价体系,更强调电网在电网的物理属性和价值属性。当前专家学者对数字经济时代电网企业的数字化、网络化和智能化发展研究涉及较少,更缺乏对新型能源生态系统的考量。

本文在已有的研究成果基础上,将建立数字电网的综合评价体系,从物理属性、技术属性和价值属性等维度提出数字电网的核心评价指标。基于模糊集理论,采用模糊综合评价方法,建立数字电网模糊综合评价模型,并对南方电网的数字电网发展指数进行综合量化评估计算。算例表明,该方法可以有效对数字电网发展指数进行量化计算,也可以用于对省级电网企业的数字化水平评价,或是用于多个电网企业的对比分析,为电网企业的数字化转型和数字电网建设提供参考。

## 1 数字电网发展水平指标体系

### 1.1 数字电网综合评价指标体系

根据南方电网公司发布的数字电网白皮书(2020)对数字电网的定义和特征的阐述,结合数字电网的特征和发展方向,分析影响数字电网发展的关键因素,形成本体安全、绿色消纳、平台赋能、数据驱动、开放共享和价值创造等6项核心指标。基于6项核心指标,分析其中最能反映数字电网建设成效的主要因素并设计相应的指标,从而形成一套能全面反映数字电网发展水平的综合评价指标体系。采用上述思路,梳理并设计了含有两级指标的数字电网综合评价指标体系,如表1所示。

### 1.2 数字电网关键评价指标

上述数字电网综合评价指标体系从多个维度刻画数字电网发展水平,相对完整和全面,但指标数量较多、部分指标计算复杂,数据获取困难,实际中操作中难度较大。因此有必要在上述综合指标体系的基础上选择一套针对有代表性、覆盖面广、便于操作、计算简单的数字电网关键指标。

数字电网关键指标选择思路基于以下4点:

1)指标选择应能准确反映数字电网的本质。数字电网的本质是电网数字化、企业数字化、服务数字化和能源生态数字化。关键指标的选择应围绕上述主题开展。

2)指标选择应能体现数字电网的数字特性。应能体现数字技术进步与用户需求驱动电网变革,赋

予电网更多新的应用场景。

3)指标选择应强调数据生产要素,注重电力数据价值的创造。数字电网以数据为核心生产要素推进电网企业转型和参与发展数字经济。

4)强调电网企业生态发展。通过数字化技术推动能源产业价值链整合,通过开放与合作与生态合作伙伴共同构建智慧能源产业生态。

根据上述思路,在上述数字电网综合评价指标体系的基础上,从代表性、覆盖面、可量化等方面进行专家评分,筛选出数字电网的核心评价指标,如图1所示。

图1所示数字电网核心评价指标体系中,核心指标体系由6项一级指标和12项二级指标构成。从数字电网的本质和特征来看,上述核心指标力求从电网数字化、企业数字化、服务数字化和能源生态数字化等方面描述数字电网发展水平,各指标均与一个或多个业务维度相关。

## 2 基于AHP-FCE的数字电网评价方法

### 2.1 AHP-FCE评价模型

层次分析法(AHP)基于定性和定量相结合的思路采用系统化、层次化方法解决多目标决策的问题。该方法先将指标两两比较,确定相对重要性程度,基于比较结果构造比较判断矩阵,也可由多个专家构造比较判断矩阵,然后综合给出评价结果。基于模糊数集理论,模糊综合评价法(FCE)为了解决各种非确定问题,把定性评价的数据转化为定量数据<sup>[17]</sup>。数字电网是一个全新的概念,相关专家学者和电网企业在不断创新数字电网理论、探索数字电网建设方向,因此,数字电网发展水平难以用准确的定量关系或简单数值描述,基于模糊集理论的模糊综合评价方法对评价数字电网发展水平这类模糊信息具有较强的适用性。分别利用AHP和FCE方法互补的特点,实现对数字电网的指标权重赋权,然后进行定量评价,得到数字电网发展指数。

### 2.2 基于AHP-FCE模型的数字电网综合评价

基于AHP-FCE模型的数字电网发展指数评估按以下步骤进行:

步骤1:构建数字电网层次结构模型。采用AHP-FCE方法利用分层思想,对数字电网的影响因素进行筛选,构造数字电网评价体系的分层模型,将一级

表 1 数字电网综合评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation indicator system of digital power grid

一级指标	二级指标	涵义
本体安全	供电可靠性	直接反映了供电企业对电力用户的持续供电能力,是电网企业整体管理水平综合体现
	网络安全防护水平	包括网络安全管理、网络安全防护技术能力、网络安全规范等在内的电网企业网络安全整理防护水平
	数据泄密安全事故数	反映电网企业在数据安全防护与管理水平
	数据安全能力成熟度	评估电网企业数据安全整理管理水准和数据安全能力
	数字化自主可控率	反映电网企业在芯片、操作系统等核心技术掌握情况,对数字基础设施的可控能力
绿色消纳	新能源接入力度	在能源构成中新能源电源装机占比及其发电量占总发电量比例
	清洁能源减排	反映通过用能方式的优化及需求侧管理,从而在用户侧取得的实际减少碳排放效益
	负荷侧碳减排	反映用户侧的节能减排成效
	电网企业自身能耗	电网企业自身的能耗情况,如煤、电、油、气等类型能耗
	设备利用率	反映电网输、变、配电设备的运营效率和设备服役情况,反映电网经济运行状况
平台赋能	算力水平	电网企业服务器、存储、网络等信息化基础设施水平,反映整体计算能力水平
	业务在线化	反映电网业务在线流转情况
	企业应用云化率	反映电网企业业务应用上云情况
	应用系统建设周期	反映信息化对业务需求的响应效率
	中台服务活跃度	反映公共业务服务在电网企业内部的共享情况
	应用系统可用率	反映应用系统运行的可靠程度
	统一数字身份率	反映企业内外部用户的统一数字身份管理水平
数据驱动	数字化设备联网率	智能终端、智能传感器等设备的在线联网情况
	全域数据应用水平	反映电网企业所有数据的实际应用情况,可从数据应用数量、实用化程度进行定量分析
	数据资产活跃度	反映电网企业数据资产的利用程度
	数据供给周期	反映面向企业所有数据用户,实施数据供给服务的效率
	数据标准化率	反映电网企业数据是否按统一的数据标准进行规范化
	数据确权率	反映在电网企业范围内针对所有数据资产开展数据产权确权情况
	数据质量水平	衡量电网企业全量数据在数据一致性、完整性、准确性等管理水平
数据管理能力	按照数据管理能力成熟度评估相关国家标准,评估电网整体数据管理能力和水平	
开放共享	数据共享开放服务化率	反映电网企业的数据对内共享和对外开放的数据服务完备程度
	生态合作伙伴间数据互通率数	电网企业与生态合作伙伴数据共享互通情况,反映电网企业数据对外开放水平
	对外开放合作产品水平	反映电网企业与生态合作伙伴开展产品合作的水平,可从产品数量、产品质量等方面进行定量分析
	能源业务生态化水平	反映电网企业业务生态化程度,即合作伙伴之间能够实现资源、业务或能力的共享、协同,可从生态合作伙伴的能力共享案例数量、协同案例数量进行定量分析
	电网组织生态化水平	反映电网企业组织生态化程度,即合作伙伴间建立了强链接关系,能够自由、动态开展跨组织合作,可从合作伙伴的,可从跨组织合作案例数量等方面定量评价
价值创造	数字经济规模与质量	反映电网企业数字经济总体发展情况,包括发展规模、发展质量、收入占总体收入比例等,反映数字经济拓展能力
	新产品产值贡献率	反映电网企业新兴业务的拓展能力
	产业带动能力	反映电网企业对整个能源产业价值链整合能力、带动能力

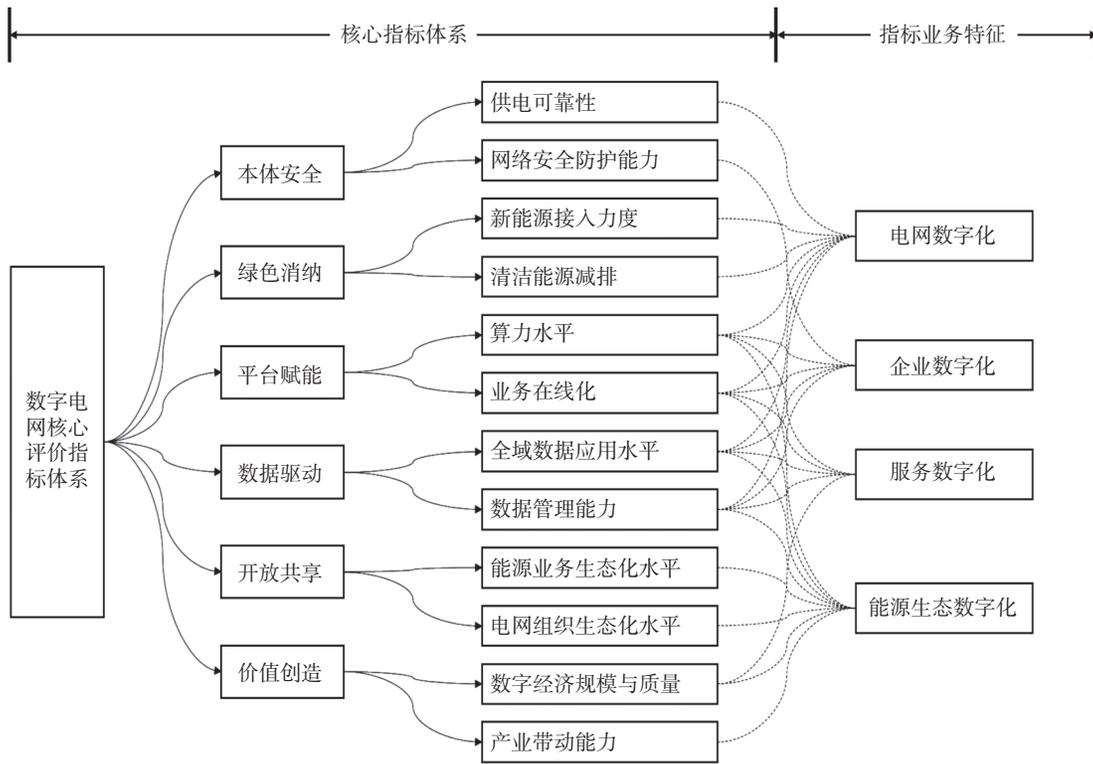


图 1 数字电网核心评价指标体系

Fig. 1 Core evaluation indicator system of digital power grid

指标作为准则层, 将二级指标作为备选方案, 如图 2 所示数字电网分层模型。

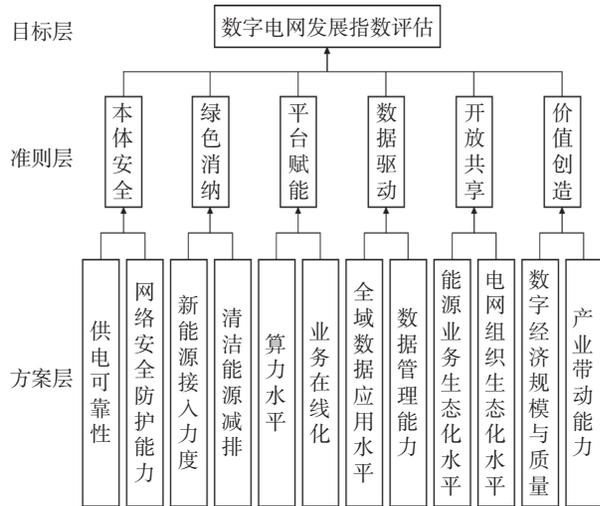


图 2 数字电网分层模型

Fig. 2 Hierarchical model of digital power grid

上述两级评价指标体系中, 因素集  $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  表示数字电网核心评价指标的一级评价指标, 元素  $u_i$  代表影响评价对象的第  $i$  个因素。通常元素  $u_i$  都具有一定程度的模糊性。因素集  $u_{ij}(i = 1,$

$2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, s)$  表示相应的二级指标。

步骤 2: 指标权重赋权。根据指标的重要程度赋予相应的权重。通常由于各指标对目标问题的重要程度不同, 应确定相应权重。本文采用 AHP 方法确定指标权重。首先构造出判别矩阵, 采用相对尺度将因素两两比较。

$$A = \{a_{ij}\} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, s) \quad (1)$$

判别矩阵的元素  $a_{ij}$  表示的是第  $i$  个因素相对于第  $j$  个因素的比较结果。判别矩阵  $a_{ij}$  的标度方法如表 2 所示。

通过专家调查得到各个评价指标对评价目标的权重排序。在进行层次单排序后进行一致性检验。  $w_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  表示一级评价指标相对于数字电网发展指数的权重向量,  $w_{ij} (i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, 12)$  是二级评价指标  $j$  相对于上一级指标  $i$  的权重, 对应向量的最大特征根为  $\lambda_{\max}$ , 特征向量需归一化处理。

步骤 3: 建立模糊综合评价模型。首先建立模糊综合评价等级论域, 表示对指标的可能做出的各种结果形成的集合。

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (2)$$

式中:

表 2 判别矩阵标度方法

Tab. 2 Scale method of judgment matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同样重要性
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 的重要性之比, $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$

注:采用Santy 1-9的标度方法。

$v_j$ ——第  $j$  种评价结果,例如优,良,中,差。

以上述分层模型的方案层为评价指标,通过专家调查对单个因素进行评价,建立评价矩阵。若因素集  $U$  中第  $q$  个元素对评价集  $V$  中第  $k$  个元素的隶属度为  $r_{qk}$ , 则对第  $q$  个元素单因素评价的结果用模糊集合表示为:  $R_i = (r_{q1}, r_{q2}, \dots, r_{qn})$ ,  $m$  个单因素评价向量  $R_1, R_2, \dots, R_m$  组成矩阵  $R_{m \times n}$ , 称为模糊综合评价矩阵。

$$R_{m \times n} = \{r_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

基于上述单因素评价矩阵  $R$ , 结合因素权重  $A$ , 通过模糊变化, 将  $A$  转变为  $B$ , 即

$$B = A_{1 \times m} \circ R_{m \times n} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (4)$$

式中:

$\circ$ ——综合评价算子, 取矩阵乘法。

最后根据 AHP-FCE 综合评价模型确定最终评价得分, 即

$$F = B_{1 \times n} S_{1 \times n}^T \quad (5)$$

式中:

$F$ ——系统总得分;

$S$ —— $V$  中相应因素的设定分值。

总得分  $F$  即表示数字电网发展指数的综合评估结果。

### 3 实例分析

本文基于 AHP-FCE 模型, 选择南方电网公司具有代表性的 3 家电网企业: 电网公司 1、电网公司 2、电网公司 3 作为评价对象, 从 2020 年企业信息公开数据收集相关影响因素的参数, 同时还通过调查问卷、专家访谈形式进行调查, 邀请多位从事数字电网规划、建设的相关专家进行模拟测评, 对 3 家电网企

业数字电网发展水平进行对比评价。

#### 3.1 评价指标层次分析

基于专家调查数据, 对专家评判矩阵进行几何平均, 计算出一级核心指标的判别矩阵, 并计算得到对应因素的权重。准则层判别矩阵和权重向量分别如下:

本体安全

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2.0362 \\ 0.4911 & 1 \end{bmatrix}, w_1 = (0.6706, 0.2278) \quad (6)$$

绿色消纳

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2.1689 \\ 0.4611 & 1 \end{bmatrix}, w_2 = (0.6844, 0.3156) \quad (7)$$

平台赋能

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1.5849 \\ 0.631 & 1 \end{bmatrix}, w_3 = (0.6131, 0.3869) \quad (8)$$

数据驱动

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1.7956 \\ 0.5569 & 1 \end{bmatrix}, w_4 = (0.6423, 0.3577) \quad (9)$$

开放共享

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1.3195 \\ 0.7579 & 1 \end{bmatrix}, w_5 = (0.5689, 0.4311) \quad (10)$$

价值创造

$$A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1.9037 \\ 0.5253 & 1 \end{bmatrix}, w_6 = (0.6556, 0.3444) \quad (11)$$

目标层判别矩阵和权重向量如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3.2752 & 3.6962 & 3.4083 & 4.7941 & 4.6224 \\ 0.3053 & 1 & 1.6976 & 1.377 & 1.1761 & 0.8199 \\ 0.2705 & 0.5891 & 1 & 0.742 & 0.5891 & 0.463 \\ 0.2934 & 0.7262 & 1.3477 & 1 & 0.7185 & 0.5969 \\ 0.2086 & 0.8503 & 1.6976 & 1.3918 & 1 & 0.6084 \\ 0.2163 & 1.2197 & 2.1598 & 1.6754 & 1.6438 & 1 \end{bmatrix}$$

$$w_i = (0.4398, 0.1273, 0.0781, 0.0967, 0.1092, 0.1489) \quad (12)$$

方案层中要素对数字电网发展指数的权重如表 3 所示。

基于上述数据, 总体上看数字电网仍然强调电网的本体安全, 供电可靠性和网络安全防护能力权重首位度高, 但是数字经济规模与质量、新能源接入力度、全域数据应用水平和能源产业生态化水平等是数字电网的发展重点。

#### 3.2 模糊综合评价

结合电网公司实际, 建立评价等级论域, 如下:

表 3 方案层要素的排序权重  
Tab. 3 Sorting weights of scheme layer elements

要素	权重
供电可靠性	0.295 0
网络安全防护能力	0.144 9
数字经济规模与质量	0.097 6
新能源接入力度	0.087 1
全域数据应用水平	0.062 1
能源业务生态化水平	0.062 1
产业带动能力	0.051 3
算力水平	0.047 9
电网组织生态化水平	0.047 1
清洁能源减排	0.040 2
数据管理能力	0.034 6
业务在线化	0.030 2

$V = (\text{起步发展, 夯实基础, 快速发展, 国内先进, 国际领先})$

然后进行单因素模糊评价, 对于隶属度函数的选择, 本文采用模糊统计法(部分指标可采用梯形分布或正态分布为隶属度函数), 并为评价论域设定分值如表 4 所示。

表 4 论域的分值

Tab. 4 Value of domain of discourse

评价等级	值
起步发展	1
夯实基础	2
快速发展	3
国内先进	4
国际领先	5

通过专家评审打分, 根据公式(3)和公式(4), 以电网公司 1 “本体安全” 对应的 “供电可靠性” 和 “网络安全防护能力” 要素为例, 计算结果如下:

$$A_1 = (0.670\ 6, 0.329\ 4)$$

$$R_1 = \begin{pmatrix} 4.2 \\ 3.8 \end{pmatrix}$$

$$b_1 = A_1 \circ R_1 = (0.670\ 6, 0.329\ 4) \begin{pmatrix} 4.2 \\ 3.8 \end{pmatrix} = 4.068\ 3$$

同理计算, 以此得到 3 家电网公司的模糊评价向量和数字电网综合指数结果。

$$B_1 = (4.068\ 3, 3.210\ 7, 3.554\ 7, 3.543\ 1, 3.000\ 0, 3.000\ 0)$$

$$F_1 = B_{1 \times n} * S_{1 \times n}^T = 3.592\ 7 \quad (13)$$

$$B_2 = (3.402\ 4, 2.673\ 8, 3.522\ 6, 3.071\ 5, 2.600\ 0, 2.262\ 2)$$

$$F_2 = B_{1 \times n} * S_{1 \times n}^T = 3.029\ 9 \quad (14)$$

$$B_3 = (3.402\ 4, 3.273\ 8, 3.032\ 1, 3.000\ 0, 2.086\ 2, 2.068\ 9)$$

$$F_3 = B_{1 \times n} * S_{1 \times n}^T = 2.975\ 6 \quad (15)$$

式中:

$B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ ——电网公司 1、电网公司 2、电网公司 3 的模糊评价向量;

$F_1$ 、 $F_2$ 和 $F_3$ ——电网公司 1、电网公司 2、电网公司 3 的指数综合计算结果。

最后评估情况如图 3 所示。

指数综合计算结果如表 5 所示。

从图 3 和表 5 可以看出 3 家电网企业的数字电网发展水平得分均不高, 除了本体安全指标外, 其他方面均有广阔的发展空间。相对来看, 电网公司 1 的数字电网发展水平相对较好, 核心关键指标均领

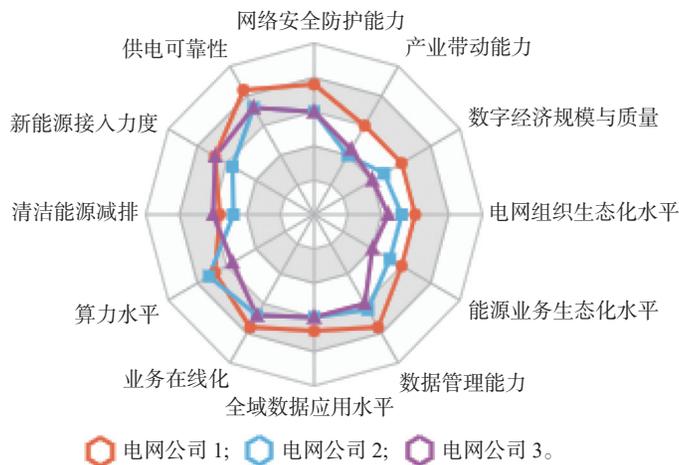


图 3 综合评估结果

Fig. 3 Comprehensive evaluation results

表 5 数字电网发展指数

Tab. 5 Development index of digital power grid

电网企业	发展指数
电网公司1	3.592 7
电网公司2	3.029 9
电网公司3	2.975 6

先于另两家电网企业,尤其是在数字技术应用、数据价值发挥和能源生态拓展等方面基础好起步早。电网公司 2 与电网公司 3 总体发展水平相当,电网公司 3 在能源产业生态拓展、数字经济发展等方面落后。总而言之,三家电网企业的数字电网发展水平总体不高,与“十四五”建成数字电网的目标还有一定的差距。

#### 4 结论

本文基于模糊集理论,将 AHP 和 FCE 两种方法相结合,并应用于数字电网发展指数评估。根据数字电网顶层设计思想,从多个维度设计最能体现数字电网特点的关键指标。首先对评价目标进行分析,构建数字电网分层模型,分别明确目标层、准则层和方案层,然后通过层次分析法进行成对分析,根据专家数据赋予各指标相应的权重,建立模糊综合评价模型,实现单因素评价和总体评价。

通过实例研究表明,AHP 和 FCE 相结合的方法用于数字电网发展指数评估是可行的,不仅可以用于数字电网单因素的评价也可以用于综合评价,可为电网企业诊断分析数字电网建设的薄弱环节、及时调整发展方向提供有益的参考。本文对数字电网发展指数的评估也存在不足之处,后续可根据单因素的特性有针对性的选择隶属度函数,还可以尝试基于直觉模糊理论进一步优化评价方法。

#### 参考文献:

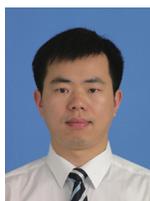
- [1] 南方电网公司. 数字电网白皮书(2020年) [R]. 广州: 南方电网有限责任公司, 2020.  
China Southern Power Grid Corporation. Digital Power Grid White Paper (2020) [R]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co., LTD., 2020.
- [2] 冯国平, 解文艳, 王海吉, 等. 基于大数据的DSS融合架构研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 1-4,13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.001.  
FENG G P, XIE W Y, WANG H J, et al. Research on fusion

architecture of DSS based on big data [J]. *Southern energy construction*, 2016, 3(Suppl. 1): 1-4,13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.001.

- [3] 刘万勋, 于琳琳, 张丽华, 等. 基于AHP和多级模糊综合评判的电网发展水平评估 [J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2020.05.013.  
LIU W X, YU L L, ZHANG L H, et al. Evaluation of power grid development level based on AHP and multi-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Smart power*, 2020, 48(5): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2020.05.013.
- [4] 高新华, 严正. 以技术成熟度为特征的智能电网评价指标体系 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(1): 8-12. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2014.01.002.  
GAO X H, YAN Z. The smart grid's evaluation index system with technology maturity characteristic [J]. *Southern power system technology*, 2014, 8(1): 8-12. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2014.01.002.
- [5] 孙彦龙, 康重庆, 陈宋宋, 等. 低碳电网评价指标体系与方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 157-162. DOI: 10.7500/AEPS20140505006.  
SUN Y L, KANG C Q, CHEN S S, et al. Low-carbon power grid index system and evaluation method [J]. *Automation of electric power systems*, 2014, 38(17): 157-162. DOI: 10.7500/AEPS20140505006.
- [6] 陈永权, 王雄飞. 基于模糊层次分析法的我国电气化水平综合评价 [J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2019.07.005.  
CHEN Y Q, WANG X F. Comprehensive evaluation of China's electrification level based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Smart power*, 2019, 47(7): 24-28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2019.07.005.
- [7] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.  
SHEN Y W, PENG X T, SHI T Q, et al. A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight [J]. *Automation of electric power systems*, 2012, 36(10): 67-73.
- [8] 张宇轩, 苏娟, 贾涛, 等. 电力用户对供电可靠性敏感度的评价与分类方法 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 575-581,608. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2021.05.012.  
ZHANG Y X, SU J, JIA T, et al. Sensitivity evaluation and classification method of power users to power supply reliability [J]. *Journal of Jiangsu university (natural science edition)*, 2021, 42(5): 575-581,608. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2021.05.012.
- [9] 赵文猛, 周保荣, 黎小林, 等. 电力市场综合评估指标体系及评价方法 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(8): 74-80. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2019.08.011.  
ZHAO W M, ZHOU B R, LI X L, et al. Comprehensive evaluation index system and evaluation method of electricity

- market [J]. *Southern power system technology*, 2019, 13(8): 74-80. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2019.08.011.
- [10] 向思阳, 蔡泽祥, 刘平, 等. 基于AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价 [J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(4): 69-76. DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2019.04.010.
- XIANG S Y, CAI Z X, LIU P, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the low-carbon operation of distribution network based on AHP-Anti-Entropy Method [J]. *Journal of electric power science and technology*, 2019, 34(4): 69-76. DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2019.04.010.
- [11] 唐勇俊, 曹哲, 袁智强. 基于可靠性评估的电网综合评价规划方法研究 [J]. *电力与能源*, 2017, 38(1): 87-90. DOI: 10.11973/dlyny201701021.
- TANG Y J, CAO Z, YUAN Z Q. Research on comprehensive evaluation of power network planning based on reliability assessment [J]. *Power & energy*, 2017, 38(1): 87-90. DOI: 10.11973/dlyny201701021.
- [12] 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 J H, LUO L F, ZHANG Z W, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy set pair analysis [J]. *Power system technology*, 2012, 36(7): 81-85.
- [13] 郭华, 李悝, 陈凯. 基于综合评价法的广西消纳外来电力竞争力分析 [J]. *南方电网技术*, 2018, 12(9): 62-67. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2018.09.009.
- GUO H, LI K, CHEN K. Competitiveness analysis on external electricity absorption in Guangxi power system based on comprehensive evaluation method [J]. *Southern power system technology*, 2018, 12(9): 62-67. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2018.09.009.
- [14] 张浩然, 杨玉静, 王少杰, 等. 基于电网成效贡献度的储备项目量化评价方法及优选排序 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(2): 26-33. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.02.004.
- ZHANG H R, YANG Y J, WANG S J, et al. Quantitative evaluation method and optimal ranking of reserve projects based on grid effectiveness [J]. *Southern power system technology*, 2021, 15(2): 26-33. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.02.004.
- [15] 李杰, 李卫军, 萧琨, 等. 基于模糊综合评判的电力通信设备状态评价方法 [J]. *南方电网技术*, 2014, 8(5): 56-60. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2014.05.018.
- LI J, LI W J, XIAO K, et al. State evaluation of power communication equipment based on fuzzy synthetic assessment [J]. *Southern power system technology*, 2014, 8(5): 56-60. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2014.05.018.
- [16] 严宇, 李庚银, 周明, 等. 基于模糊综合评价的交易结算偏差电量处理方法 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 200-204. DOI: 10.7500/AEPS20180612009.
- YAN Y, LI G Y, ZHOU M, et al. Processing method for transaction settlement bias power based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(3): 200-204. DOI: 10.7500/AEPS20180612009.
- [17] 陆以勤, 黄俊贤, 程喆, 等. 基于改进AHP-FCE模型的多指标拟态表决算法 [J]. *北京邮电大学学报*, 2021, 44(2): 8-13. DOI: 10.13190/j.jbupt.2020-105.
- LU Y Q, HUANG J X, CHENG Z, et al. A multi-index mimic voting algorithm based on improved AHP-FCE model [J]. *Journal of Beijing university of posts and telecommunications*, 2021, 44(2): 8-13. DOI: 10.13190/j.jbupt.2020-105.

#### 作者简介:



冯国平

冯国平(第一作者, 通信作者)

1980-, 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事电力数字化规划与大数据技术研究工作(email)fengguoping@gedi.com.cn。

(编辑 赵琪)