

电网企业应急能力动态评估方法及应用

关城¹, 胡超^{2*}, 王金贵²

(1. 国网智能电网研究院有限公司 信息通信研究所, 北京 102200; 2. 福州大学 环境与安全工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 为准确实时应对电网企业突发事件的动态变化, 提高电网企业的及时应对能力。在对电网企业应急系统要素进行分析的基础上, 构建了电网应急能力评估指标体系。从动静态特征的角度进行专家打分, 采用层次分析法确定指标主观权重, 再利用电网企业的以往数据构建贝叶斯网络确定指标客观动态权重, 并用综合动态权重与 Vague 集模型相结合进行评估。该动态评估方法经实例应用表明, 该方法实现了电网企业应急能力实时动态变化, 更能反映出实际问题并得出准确科学的结论。

关键词: 动态评估; 应急能力评估; 层次分析法; 贝叶斯网络; Vague 集

Dynamic Evaluation Method and Application of Power Grid Emergency Capacity

GUAN Cheng¹; HU Chao²; WANG Jingui²

(1. Global Energy Interconnection Research Institute Co. Ltd, Institute of Information and Communication, Beijing 102200. 2. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fujian 350116, China)

Abstract: In order to accurately and real-time respond to the dynamic changes of power grid emergencies and improve the timely response ability of power grid enterprises. Based on the analysis of the elements of the emergency system of power grid enterprises, the evaluation index system of power grid emergency capacity is constructed. From the perspective of dynamic characteristics and static characteristics to invite experts to score the evaluation indicators, the analytic hierarchy process is used to determine the subjective weight of the index, then the Bayesian network is constructed by using the previous data of power grid enterprises to determine the objective dynamic weight of the index, finally comprehensive dynamic weight and vague set model are combined to evaluate the power grid emergency capacity. The application of the dynamic evaluation method shows that this method realizes the real-time dynamic change of the emergency capacity of power grid enterprises, can better reflect the actual problems, and draw accurate and scientific conclusions.

Keywords: Dynamic assessment; Emergency Capability Evaluation; AHP; Bayesian Network; Vague Set

0 引言

近年来, 随着科技的高速增长, 电在人们的日常生活和工作中扮演着越来越重要的角色。电与交通、供水和信息交流等构成复杂的系统, 任何微小原因都会导致电力事故。如在 2008 年, 我国南方多个省份(区、市)由于雪灾覆冰造成大面积停电^[1]; 2018 年发生在巴西的 3.12 大面积停电使多个城市受到严重影响^[2]; 2021 年河南郑州因暴雨洪灾引起市内部分地区停电事故。而且, 电网运行的复杂性和事故发生的不确定性使得如今大面积停电事故难以从根本上给予解决。因此, 对电网应急能力进行综合全面、科学的分析与评估, 有利于发现薄弱环节, 并及时消除, 确保人们的正常生活、经济的快速发展和社会的稳定运行。

针对电网应急能力评估问题, 已引起很多学者的关注。王迪等人^[3]从时间和空间两个维度对电网应急能力进行研究, 使用三角模糊数对动态化问题进行量化处理, 并基于模糊-两

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2020J01505)

作者简介: 关城 (1990-), 男, 山西晋城人, 博士, 工程师, 研究方向为电力安全与应急。Email: guancheng2009@126.com。

通信作者: 胡超 (1996-), 男, 通信作者, 河南泌阳人, 硕士, 研究方向为公共安全管理。Email: 1280503133@qq.com。

阶段超效率 SBM 模型进行评估。刘超^[4]基于 PPRR 理论建立电网应急能力评估体系，通过层次分析法确定各项指标权重。黎振宇等人^[5]建立具有多元化数据类型的电网应急能力评估基本指标体系，采用二元联系数对数据进行预处理，层次分析法确定指标权重并使用投影灰靶决策模型对应急能力水平进行评价。张弛等人^[6]采用层次分析法得到电网应急能力指标权重，再利用模糊综合评价法（FCE）对电网应急能力进行评估。门永生等人^[7]建立电网基础设施突发事件应急能力评价指标体系，利用层次分析法对指标权重进行赋值，并基于多级模糊综合评价法进行评价。

梳理发现，大部分学者只从静态的角度去建立指标体系来评估电网应急能力。事实证明，仅静态评估电网应急能力是不能动态实时地反映出企业的应急能力。基于此，本文从动态的角度去构建指标体系，并采用合适的方式全方位各角度地考察企业的综合应急能力。此外，之前的学者使用的评估的方法主要有模糊综合评价法、层次分析法和 PPRR 理论等，然而模糊综合评价法的结果只由一个或几个因素确定，往往会遗漏大量信息；层次分析法会引入主观因素且无法反映出应急能力的动态变化，这些方法都存在较多的局限性和不足之处。因此，本文在此基础上进行改进将层次分析法与能够实时、动态反映出指标之间关系的贝叶斯网络进行联合使用，在一定程度上可以减少人的主观因素的干扰和弥补层次分析法无法动态有效地评估电网企业应急能力的不足；同时采用应用范围广、精确度高和尚未在电网应急能力评估中使用的 Vague 集进行评估模型的构建，最后选用某电网企业的实例分析来验证该角度的准确性。

1 电网应急能力指标体系构建

构建合理全面的电网应急能力评估指标体系是得出科学、有说服力评估结果的重要前提。因此，本文秉承科学性、可行性、层次性、动态性和灵活性的原则^[8]，建立了电网应急能力评估指标体系，共设置有应急预防、应急准备、应急响应和后期恢复 4 个一级指标，按照“五个体系”、“四种能力”和“两个系统”设 11 个二级指标，具体见图 1。在电网企业实际情况下，静态特征（一定时间内基本不会发生变化的属性，如电网企业规章制度完备情况）评估与动态特征（随着时间的推移可能会发生变化的属性，如员工掌握应急处置的能力）评估占据着同等重要的作用，再加上研究的方便，专家打分前动静态特征评估总分值设置一样，各占 50%，最终总分数为两者之和，其中专家使用两种特征考察企业的方法如下文所示。

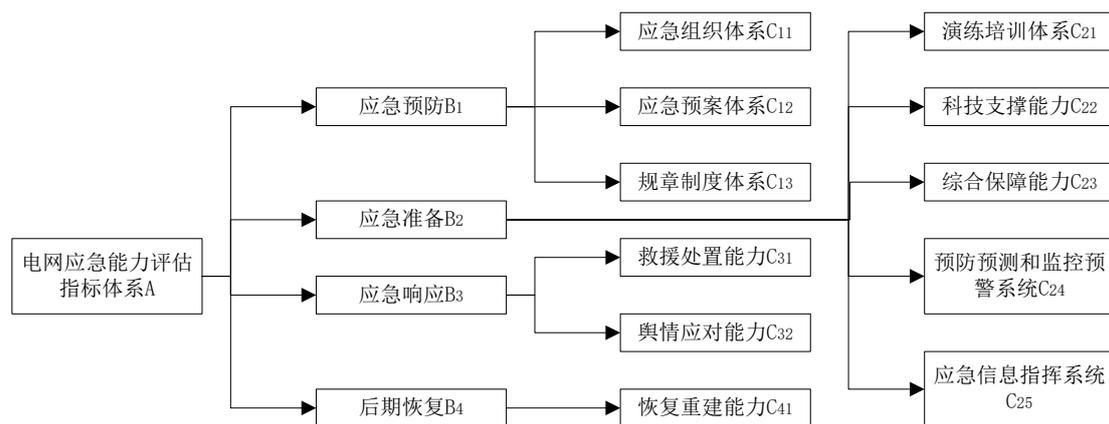


图 1 电网应急能力评估指标体系

（1）静态特征考察方法

静态特征考察主要采用检查资料、现场勘查等方法。检查资料包括电网企业的规章制度、应急预案、员工培训合格证、突发事件应对和处置情况、安全检查表和应急演练情况等相关资料。现场勘察主要对员工现场操作、安全防护、应急装备、应急物资、应急队伍、应急指

挥中心和信息系统等的考察。主要考察企业的员工专业能力、应对突发事件能力和安全应急管理水平等。

(2) 动态特征考察方法

动态特征考察主要通过访谈、考问、考试和演练的方式来检验电网企业的应急管理和处置能力掌握情况。其中访谈是通过对应急领导小组(或应急指挥中心)成员、应急办人员进行交谈。考察应急人员对本岗位应急工作职责、总体应急预案和专项预案、预警流程、信息发布、响应流程等的熟悉情况。考问是对各个部门负责人、管理人员和员工进行提问和询问。主要考察其对本岗位应急工作职责、相关预案内容以及法律法规等的掌握程度。询问各部门衔接情况,本岗位职责中存在的应急问题,管理人员的专业水平以及管理层领导应急能力。考试是建立电网应急考试题库。选取一定比例的管理人员、应急部门人员和基层员工等进行答题测试,同一级别员工考试成绩取平均分,按照人员重要程度设置相应的权重进行计算,最后得出最终成绩。主要考察其在完全脱离文本后对应急管理基础知识内容的掌握程度。演练是分为桌面演练和现场演练。主要考察管理人员、应急领导人员、各个部门负责人和一线员工对应急预案启动程序、应急预案处置流程、信息上报以及响应措施等的熟悉情况。

2 电网应急能力评估

2.1 指标权重的确定

常见确定指标权重的方法有:变异系数法^[9]、优序图法^[10]、熵值法^[11]、层次分析法^[4-7]、主成分分析法^[12]等。相比之下,层次分析法具有需求信息量少、决策过程时间短等优点^[13],因此本文选取层次分析法对各级指标的权重进行确定。但是仅使用层次分析法主观随意性较强且无法对电网应急能力进行实时地动态评估,而贝叶斯网络可以弥补这些缺陷。因此,本文选取层次分析法和贝叶斯网络共同确定指标权重。

2.1.1 层次分析法确定指标主观权重

(1) 判断矩阵

构造判断矩阵,同一个指标层次的两个元素进行两两比较,用数值反映之间的重要程度,数值的取值准则,如表1。具体数值由电网应急领域的专家赋值。

表1 取值的准则

因素 i 比因素 j	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
非常重要	7
极其重要	9
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8

同一指标层任意两个指标按照重要程度所得的结果通常用矩阵 M 表示,该矩阵为判断矩阵。判断矩阵具有主对角线数值为 1 和 $m_{ij} = \frac{1}{m_{ji}}$ 的性质。

$$\text{判断矩阵 } M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 确定各判断矩阵的指标权重

使用 MATLAB 计算判断矩阵 M 的特征值和特征向量,选择出最大特征值 λ_{\max} 和 λ_{\max} 对应的特征向量,此特征向量经归一化处理即得权重 W_i' 。

(3) 一致性检验

按照公式 (2) 求出一致性指标 CI。根据矩阵的阶数 n，由表 2 找到对应的一致性指标 RI，并通过公式 (3) 进行计算。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中： λ_{\max} 是最大特征值；CI 是一致性指标；RI 是随机一致性指标；CR 是检验系数。

如果 $CR < 0.10$ ，则通过一致性检验，得到的指标权重可以在后续使用，否则调整判断矩阵，直至满足一致性要求。当矩阵的阶数不超过三阶时，无需检验均满足一致性要求。

表 2 随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.1.2 贝叶斯网络确定指标客观权重

(1) 基本原理

贝叶斯网络是一个有向无环图，由代表变量节点和连接这些节点的有向边构成。节点表示随机变量，连接这些节点的有向边表示节点之间的互相关系，用条件概率表示关系的强度。设指标 B_1 已经发生变化，引起指标 B_1 变化的原因有 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} ， $P(C_{11})$ 为先验概率，指标 B_1 发生变化是 C_{11} 导致的概率为后验概率，其计算公式为^[14]

$$P(C_{11}|B_1) = \frac{P(C_{11}, B_1)}{P(B_1)} \quad (4)$$

(2) 计算权重

应急能力评估指标体系构成贝叶斯网络如图 2

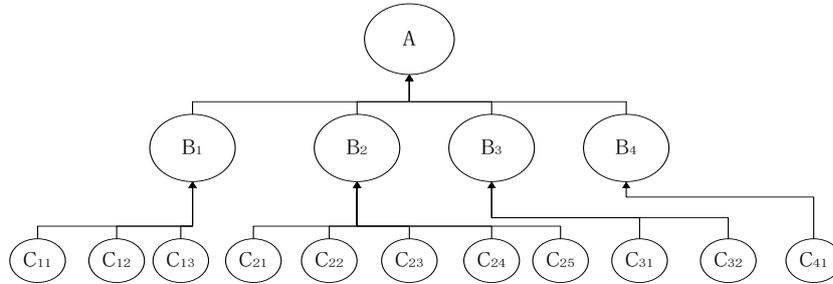


图 2 评估指标的贝叶斯网络

以指标 B_1 的贝叶斯网络为例，其它评价指标的后验概率为^[15]

$$P(C_{1k}|B_1) = \frac{P(C_{1k}, B_1)}{P(B_1)} \quad k=1, 2, 3 \quad (5)$$

则各指标的权重为^[16]

$$W''(C_{1k}) = \frac{P(C_{1k}|B_1)}{P(C_{11}|B_1) + P(C_{12}|B_1) + P(C_{13}|B_1)} \quad k=1, 2, 3 \quad (6)$$

2.1.3 指标综合权重

由层次分析法和贝叶斯网络得到的权重进行综合，按照下式计算指标综合权重：

$$W_{\text{总}} = \frac{W'_i W''_i}{\sum_{i=0}^n W'_i W''_i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

2.2 基于 Vague 集建立电网应急能力评估模型

2.2.1 Vague 集的基本概念

设 U 为一个论域, u 为其中任意的一个元素, 论域中的一个 Vague 集 A 分别可用两个函数表示: 真隶属函数 t_A 和假隶属函数 f_A 。 $t_A(u)$ 是从支持 u 的证据所导出的 u 的隶属度下界, $f_A(u)$ 是从反对 u 的证据所导出的 u 的否定隶属度下界, 不确定部分 $\Pi_A(u)$ 是 1 与上述两个函数之和的差值, 该差值表示为 u 相对于 A 的犹豫度。 不确定部分的值与 u 相对 A 的未知信息程度成正比, 为了体现 A 在 u 的 Vague 值, 常用闭区间 $[t_A(u), 1-f_A(u)]$ 来表示。 真假隶属两个函数将 0 到 1 闭区间中所有的实数与论域 U 中的所有元素联系起来。 即 $t_A: U \rightarrow [0, 1]$, $f_A: U \rightarrow [0, 1]$, 且 $t_A + f_A$ 在 $[0, 1]$ 之间。

如果 U 是连续的, Vague 集 A 可表示为

$$A = \int_U [t_A(u), 1-f_A(u)] / u \quad u \in U \quad (8)$$

如果 U 是离散的, Vague 集 A 可表示为

$$A = \sum_{l=1}^m [t_A(u_l), 1-f_A(u_l)] / u_l \quad u_l \in U \quad (9)$$

一旦上述两个函数达到最大值 1 时, 不确定部分为 0, 则 u 相对 A 的未知信息程度为完全未知, 此时 Vague 集退化为 Fuzzy 集。

2.2.2 Vague 集的计算步骤

计算步骤^[7]:

(1) 设定相应级别评语集 V 。 评语集是评审人通过动静态特征考察方法对电网应急能力的实际情况进行全面评估后, 给出一种关于风险因素强弱的语言描述集合, 在本文将评估等级分为四级, 即优秀、良好、一般和较差。

(2) 确定指标权重, 上文 2.1 部分的方法。

(3) 构造 Vague 集的评估矩阵。 设一级指标 B_i 的二级指标 C_{ij} 的抉择评估集 V_k ($k=1, 2, 3, 4$), 对其构造评估指标集和 V 之间的 Vague 集的评估矩阵为 R_i

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{in1} & r_{in2} & r_{in3} & r_{in4} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: r_{ijk} 表示二级指标 C_{ij} 关于评语集的相应评估, $r_{ijk} = [t_{ijk}, 1-f_{ijk}]$, 需要专家按照评语集给与选择, 再对专家的选择结果进行归一化, 即得 $t_{ijk}, 1-f_{ijk}$ 的值。

(4) 则 C_{ij} 基于 Vague 集的综合评估结果为

$$V_i = W_i \otimes R_i \quad (11)$$

式中: V_i 为抉择评语集上的等级 Vague 集子集; \otimes 是 Vague 集矩阵相乘符号。

另外 \oplus 是 Vague 集矩阵和的运算符号, Vague 集矩阵的数乘、乘法和有线和的具体运算法则如下:

$$\text{数乘: } k \otimes A = [kt_A, k(1-f_A)], k \in (0, 1) \quad (12)$$

$$\text{乘法: } A \otimes B = [t_A t_B, (1-f_A)(1-f_B)] \quad (13)$$

$$\text{有限和: } A \oplus B = [\min\{1, t_A+t_B\}, \min\{1, (1-f_A)+(1-f_B)\}] \quad (14)$$

b_{ik} 表示评估等级 V_k 对综合评估所得等级 Vague 集 B_i 的评估值, 其值为

$$b_{ik} = [\min\{1, \sum_{j=1}^n w_{ij} t_{R_{ijk}}\}, \min\{1, \sum_{j=1}^n w_{ij} (1-f_{R_{ijk}})\}] \quad (15)$$

(5) 计算最终的综合评估结果, 用 Vague 集模糊评估矩阵 P 表示: -

$$P = W \otimes R \quad (16)$$

式中: W 是 A-B 矩阵的指标权重, R 是步骤 (4) 所得评估矩阵。

则最终得到的 Vague 集评估向量 $P=(p_1, p_2, p_3, p_4)$, 其中 $p_i = [t_{pi}, 1-f_{pi}]$ 。Vague 集的排序规则为: 设 $a=[a^-, a^+]$, $b=[b^-, b^+]$, 若 $(a^-+a^+)/2 \leq (b^-+b^+)/2$, 则 $a \leq b$, 即可得到最终综合评估结果。

3 实例应用分析

某电网供电企业负责给 7 县(市) 2 区供电, 供电面积为 16129 平方公里, 拥有 211 座 35 千伏及以上的变电站, 主变压器容量 689.6 万千伏安。本文以该供电公司为例, 根据该供电企业四个季度实际的评估数据基于层次分析法和贝叶斯网络构建电网应急能力评估指标体系, 并运用 Vague 集模型对电网应急能力进行评估。针对四个季度应急能力邀请供电应急领域相关专家对电网应急能力评估指标进行打分。得到判断矩阵后应用 MATLAB 计算该矩阵的主观权重, 按照公式 (2) - (3) 计算得出 CR, 验证 CR 是否小于 0.10, 保留通过一致性检验的矩阵, 不满足检验的矩阵舍弃, 其它矩阵按照上述步骤进行操作。再利用公式 (4) - (6) 计算出实时动态贝叶斯网络的客观权重, 最后再利用公式 (7) 求出综合指标权重, 见表 3。

表 3 第一季度各个指标权重

矩阵	指标	主观指标权重	客观指标权重	综合权重
A-B	B ₁	0.239	0.239	0.183
	B ₂	0.301	0.302	0.290
	B ₃	0.403	0.401	0.516
	B ₄	0.057	0.058	0.011
B ₁ - C _{1X}	C ₁₁	0.297	0.283	0.207
	C ₁₂	0.540	0.547	0.726
	C ₁₃	0.163	0.169	0.068
B ₂ - C _{2X}	C ₂₁	0.270	0.259	0.218
	C ₂₂	0.092	0.085	0.024
	C ₂₃	0.474	0.481	0.712
	C ₂₄	0.077	0.083	0.020
	C ₂₅	0.088	0.091	0.025
B ₃ - C _{3X}	C ₃₁	0.833	0.802	0.955
	C ₃₂	0.167	0.198	0.045
B ₄ - C _{4X}	C ₄₁	1.000	1.000	1.000

表 4 第一季度二级指标 Vague 值评语

准则层	方案层	权重	优秀	良好	一般	较差
B ₁	C ₁₁	0.207	[0.00, 0.10]	[0.50, 0.60]	[0.30, 0.40]	[0.10, 0.20]
	C ₁₂	0.726	[0.30, 0.40]	[0.30, 0.40]	[0.20, 0.30]	[0.10, 0.20]
	C ₁₃	0.068	[0.20, 0.30]	[0.40, 0.50]	[0.20, 0.30]	[0.10, 0.20]
B ₂	C ₂₁	0.218	[0.10, 0.20]	[0.20, 0.30]	[0.50, 0.60]	[0.10, 0.20]
	C ₂₂	0.024	[0.30, 0.40]	[0.40, 0.50]	[0.20, 0.30]	[0.00, 0.10]
	C ₂₃	0.712	[0.10, 0.20]	[0.50, 0.60]	[0.20, 0.30]	[0.10, 0.20]
	C ₂₄	0.020	[0.00, 0.20]	[0.60, 0.80]	[0.20, 0.40]	[0.00, 0.20]
	C ₂₅	0.025	[0.10, 0.20]	[0.30, 0.40]	[0.40, 0.50]	[0.10, 0.20]
B ₃	C ₃₁	0.955	[0.00, 0.00]	[0.00, 0.00]	[1.00, 1.00]	[0.00, 0.00]
	C ₃₂	0.045	[0.20, 0.30]	[0.30, 0.40]	[0.40, 0.50]	[0.00, 0.10]

B ₄	C ₄₁	1.000	[0.10, 0.20]	[0.30, 0.40]	[0.50, 0.60]	[0.00, 0.10]
----------------	-----------------	-------	--------------	--------------	--------------	--------------

此外,请专家从动静态特征综合的角度对应能力指标体系的二级指标层给与 Vague 集值,见表 4。假如 10 位专家参加评估,选择优秀、良好、一般、较差和弃权的专家数分别为 2 名、3 名、3 名、1 名和 1 名,则评语集可表示为([0.20, 0.30], [0.30, 0.40], [0.30, 0.40], [0.10, 0.20]), 弃权人数与总人数的比值为区间长度,其它因素评语依此类推。

按照公式(11)将权重与表 4 内的 Vague 集评估矩阵 R_i相乘,遵循公式(12)-(15)规则,可求出一级指标的 Vague 集评语,见表 5。

表 5 第一季度一级指标 Vague 值评语

目标层	准则层	权重	优秀	良好	一般	较差
A	B ₁	0.183	[0.231, 0.322]	[0.349, 0.449]	[0.221, 0.321]	[0.100, 0.200]
	B ₂	0.290	[0.103, 0.205]	[0.429, 0.531]	[0.270, 0.372]	[0.096, 0.197]
	B ₃	0.516	[0.009, 0.014]	[0.014, 0.018]	[0.973, 0.978]	[0.000, 0.005]
	B ₄	0.011	[0.100, 0.200]	[0.300, 0.400]	[0.500, 0.600]	[0.000, 0.100]

从表 5 可知: B₁=([0.231, 0.322], [0.349, 0.449], [0.221, 0.321], [0.100, 0.200]), 根据 Vague 集的排序规则可知,该项指标评估结果为良好。同理, B₂ 该指标评估结果为良好, B₃ 评估结果是一般, B₄ 评估结果为一。

最后再根据公式(16)求出该电网应急能力评估的 Vague 集评估值为 P=([0.078, 0.129], [0.198, 0.250], [0.626, 0.678], [0.046, 0.097]), 排序为一般>良好>优秀>较差,“一般”隶属度最大,表示该第一季度电网应急能力级别一般;同理,求出第二、三和四季度隶属度及其评价结果,如图 3 所示。

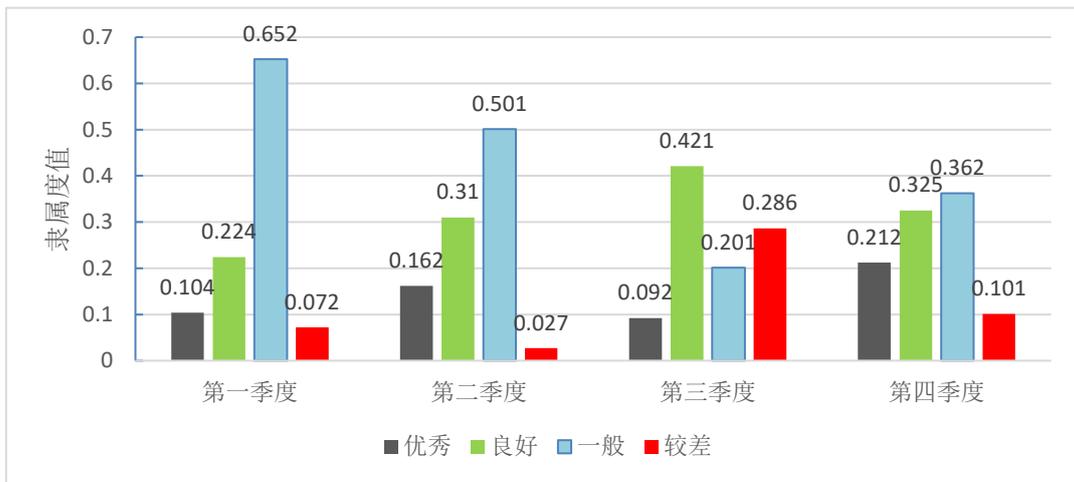


图 3 某电网公司四个季度的应急能力评估的变化

图 3 可知,第一、二和四季度应急能力为一般,第三季度的应急能力为良好。由表 4 和表 5 可知一、二级指标评价等级,进而可以发现薄弱环节。例如,第一季度评估结果为一,是因为应急响应指标下救援处置能力一般引起的,这为电网应急能力的加强提供了方向,因此,在后续工作中重视电网事件的救援处置能力。

4 结论

为了更加全面客观地评估电网企业的应急能力,在应急预防、应急准备、应急响应和后期恢复四个方面选取 11 个指标,构建科学的电网应急能力评估指标体系,选择合适的方法去考察动静态特征应急能力;设置动静态特征评估同样分值打分表,请专家对各级指标打分,使用层次分析法确定指标主观权重,利用贝叶斯网络对电网企业历史数据构建指标的动态权重;再利用 Vague 集与动态综合权重结合,可以实现对电网企业应急能力的实时动态评估。研究成果从该角度出发对电网应急能力进行评估是全面的、可行的,更能准确及时发现电网

应急环节的薄弱之处。

参考文献

- [1] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.
- [2] 周博文, 陈麒宇, 杨东升. 巴西大停电的思考[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 97-105.
- [3] 王迪, 房鑫炎, 陈晓国, 等. 基于模糊-两阶段超效率 SBM 的电网应急能力动态综合评价[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1333-1341.
- [4] 刘超. 基于 PPRR 理论的电力应急能力评估指标体系研究[J]. 电信科学, 2010(增刊 3): 37-41.
- [5] 黎振宇, 陈晓国, 宋永超, 等. 二元联系数-投影灰靶决策理论在电网应急能力评估中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(5): 927-934.
- [6] 张弛, 陈涛, 倪顺江. 基于层次分析法和模糊综合评价的电网系统应急能力评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2): 180-186.
- [7] 门永生, 朱朝阳, 于振, 等. 电网基础设施突发事件应急能力指标体系构建及评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 84-87.
- [8] 铁永波, 唐川. 城市灾害应急能力评价指标体系建构[J]. 城市问题, 2005(6): 78-81.
- [9] 宋彦蓉, 张宝元. 基于地区现代化评价的客观赋权法比较[J]. 统计与决策, 2015(11): 82-86.
- [10] 卢璐. 基于优序图法的高校图书馆微信公众平台评价研究[D]. 河南: 郑州大学, 2018.
- [11] 尚娱冰, 康蓉. 通过综合指数法评价中国能源部门的气候变化适应能力[J]. 生态经济, 2021, 37(7): 190-195.
- [12] 孙义豪, 李秋燕, 丁岩, 等. 基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 30-36.
- [13] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. Mc. Graw: Hill International Book Company, 1980.
- [14] Pei C, Zhang Z, Yin X, et al, Index system and methods for urban power grid operation risk assessment[C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific and Energy Engineering Conference (APPEEC). Xi'an, China: IEEE, 2016.
- [15] Liu R, Zhang J, Qiu W, et al. Research on online static risk assessment for urban power system[C]//Power & Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE, 2010.
- [16] Zhang K W. Risk assessment of smart grid cyber security based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Advanced Materials Research, 2013, 605/606/607: 2311-2317.
- [17] 杨斯玲, 蒋根谋. 基于 IAHP 和 Vague 集的高层建筑火灾风险评价[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(1): 124-131.