

基于综合赋权灰色关联模型的电网运行安全能力评价模型

张琳娟¹, 许长清¹, 余晓鹏¹, 卢丹¹, 王利利¹, 王俊杰², 米传民²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州, 450052; 2. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京, 211106)

摘要: 为科学合理地评估电网运行安全能力, 本文采用等级相关主观赋权法和指标信息量集成客观权重的综合赋权法, 综合确定电网运行安全能力评价指标体系最终权重。构建了含有分辨系数的改进灰色关联综合评价模型, 对某电网运行6个时期的安全能力进行评价, 并与传统的灰色绝对关联度模型进行了对比。对比结果验证了本文模型的有效性和实用性。

关键词: 电网安全管理; 评价指标体系; 综合赋权; 灰色关联

中图分类号: F407.6; TM711 **文献标志码:** A

Evaluation Model of Power Grid Operation Safety Capability Based on Comprehensive Weighting Grey Correlation Model

ZHANG Linjuan¹, XU Changqing¹, YU Xiaopeng¹, LU Dan¹, WANG Lili¹, WANG Junjie², MI Chuanmin²

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou, 450052, China;
2. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: In order to scientifically and reasonably evaluate the power grid operation safety capability, this paper first adopts a comprehensive weighting method of the rank-related subjective weighting method and the index information amount to integrate objective weights for comprehensively determining the final weight of the grid operation safety capability evaluation index system. Then, an improved gray correlation comprehensive evaluation model with resolution coefficient is constructed. Finally, the safety capability of a power grid operation in six periods is evaluated, and compared with the traditional gray absolute correlation model. Results verify the validity and practicability of the proposed model.

Key words: security management of power grid; evaluation index system; combination weighting; grey correlation

引 言

电网运行安全能力评价是保证电网系统安全运行的基础, 是有效预防事故发生的前提。科学地评价电网运行安全能力, 建立合理的电网运行安全能力评价指标体系, 并以此为基础做出有效的日常安全管理、应急预案和调度决策, 已经成为预防电网运行安全事故的重要措施和手段^[1]。高新华等运用主

成分聚类分析法将智能电网安全评价指标分为若干个指标大类^[2]。牛东晓等从结构安全、运行安全、可靠性和充裕性4个方面提出了电网运行安全能力评价指标体系和综合评价模型^[3]。崔明建等针对电网安全运行评价的需要,提出一种基于多层次灰色面积关联分析法的电网安全综合评价模型^[4]。穆永铮等通过规范安全指标、一般安全指标及效益指标3类指标描述电网安全和效益特征,采用模糊层次分析法建立多算子层次分析模糊评价模型及相应解法^[5]。余晓鹏等针对目前电网运行事故缺乏数据标准的问题,设计了电网运行事故案例库,并运用基于案例的推理方法进行电网运行事故管理决策支持系统的研究^[6]。随着电网结构日益复杂、新能源融入以及泛在物联网的推进,电力安全生产与应急问题研究越来越深入^[7]。安全管理理论发展^[8]和预测评价理论^[9]的发展给新时期电网运行风险管理提供了新的思路和方法支撑。从评价角度,现有电网运行安全能力评价指标体系研究主要是从运行需求及影响因素等方面进行设计,指标权重多以专家赋权和层次分析法等为主,评价方法以加权综合评价和模糊综合评价等方法为主。中国学者提出的灰色系统是研究不完全信息的有效理论方法,在农业、工业、金融、能源、经济和管理等多个领域取得较好的应用^[10-11]。王怡静等运用灰色定权聚类方法进行了电力企业的安全能力评价研究^[12]。王俊杰提出一种改进的灰色动态趋势关联模型^[13]。党耀国等提出一种基于面板数据的新型灰色关联模型^[14]。

综上所述,电网运行风险管理目前主要基于业务系统采集的海量数据进行业务层面的安全预防与控制。这虽然能解决局部问题,但针对全网的整体安全风险往往缺乏有效的管理和决策支持手段。本文基于安全管理理论,结合电网运行管理实际,构建电网运行安全能力评价指标体系。然后针对数据多维异构、信息密度低带来的“贫信息”问题,采用主观与客观相结合的综合权重计算方法来确定各项指标的权重,构建灰色关联模型进行评价。

1 电网运行安全态势评价指标体系构建及权重确定

1.1 电网运行安全能力评价指标体系构建

电网运行安全能力评价是对电网公司整体安全能力的科学评判,其目的是寻求最低的事故率,最小的损失和最优的安全投资效益,是预防和控制电网事故行之有效的方法。构建绩效评价指标体系,应综合考虑其自身特征和安全管理要求,借鉴指标体系构建的一般原则,考虑安全能力评价的合理性与适用性。本文参考安全管理基本理论^[15]、现有研究基础^[2-5]以及电力安全管理要求^[16],确定评价指标体系。该指标体系主要从人员、管理和物资3个方面构成一级指标,各项一级指标下各有2~4项二级指标,如表1所示。

(1)人员。从人员的专业技能水平和规章制度执行力两个方面刻画人员本身的安全技术能力。工作技能水平通过电网公司统一组织考试来评价工作人员的安全技能水平。规章制度执行能力通过现场督察中记录到的工作人员是否按照安全规章制度工作情况来衡量。

(2)管理。通过对人到岗到位的监督和执行能力、对现场勘察以及施工要求的前期计划执行效果反映其安全能力。现场勘察准确度通过现场施工前是否进行了现场勘察以及是否勘察准确来进行该项指标测算。图纸准确度通过专业人员抽查核对和项目、施工人员的反馈情况中抽检到的正确图纸数与图纸总数的比例来测试该项指标值。三措一案准确度通过现场勘察中抽样到的三措一案准确度与抽样的三措一案次数的比重来计算该项指标值。管理人员到岗到位率通过现场勘察和系统监控途径中抽样到的作业中管理人员到岗到位率与抽样到的要求管理人员到岗到位的作业次数的比重来测算该项指标值。

(3)物资。通过对人员使用的安全工器具的状态以及施工工器具的管理水平衡量其安全管理水平。安全工器具状况通过现场督察、系统记录和专项检查中安全工器具合格数与安全工器具总数的比值来

表1 电网运行安全能力评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of power grid operation safety capability

一级指标	二级指标	安全能力指数计算公式
人员(H_1)	工作技能水平(H_{11})	$H_{11} = \frac{\text{专业考试平均分数}}{100\text{分}}$
	规章制度执行能力(H_{12})	$H_{12} = 1 - \frac{\text{督察到的违章总数}}{\text{督察的作业次数}}$
管理(H_2)	现场勘察准确度(H_{21})	$H_{21} = \frac{\sum \text{抽样到的现场勘察准确度}}{\text{抽样的现场勘察次数}}$
	图纸准确度(H_{22})	$H_{22} = \frac{\text{正确图纸数}}{\text{图纸总数}}$
	三措一案准确度(H_{23})	$H_{23} = \frac{\sum \text{抽样到的三措一案准确度}}{\text{抽样的三措一案次数}}$
	管理人员到岗到位率(H_{24})	$H_{24} = \frac{\sum \text{抽样到的作业中管理人员到岗到位率}}{\text{抽样到的要求管理人员到岗到位的作业次数}}$
物资(H_3)	安全工器具状况(H_{31})	$H_{31} = \frac{\text{安全工器具合格数}}{\text{安全工器具总数}}$
	标识标牌状况(H_{32})	$H_{32} = 1 - \frac{\text{缺陷标识标牌个数}}{\text{应有的标识标牌总数}}$

衡量该项指标。标识标牌状况通过现场督察和专项检查中缺陷标识标牌个数与应有标识标牌总数的比例来判断。

1.2 基于等级相关与信息量集成的指标权重确定方法

常用的权重确定方法分为主观赋权法和客观赋权法。实践表明,单一的主观赋权或客观赋权都不能充分体现指标的自身重要程度,主观赋权法易受专家人为因素的影响,客观赋权法往往会随样本的变化而改变,稳定性相对较弱。基于此,本文将主观赋权与客观赋权进行有效组合,既能考虑相关专家的主观认识,又能一定程度上体现指标本身的特点,使评价结果更为准确、合理。

1.2.1 基于等级相关法的主观权重

本文首先采用专家评价法对指标权重进行量化。等级相关法确定的步骤如下:

(1) 确定各指标的等级相关性。如果评价指标 h_i 相对于评价标准或指标的重要性大于 h_l , 则可表示为 $h_i > h_l$ 。如果评价指标 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ 相对于评价标准或目标存在 $h_i > h_l > \dots > h_k > \dots > h_n$ ($i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n$), 用“>”确定评价指标的等级相关关系。

(2) 确定相邻指标的相对重要程度。相邻指标 h_{k-1} 与 h_k 的相对重要程度表示为

$$r_k = \frac{h_{k-1}}{h_k} \quad k = n, n-1, \dots, 3, 2 \quad (1)$$

式中 r_k 表示相邻指标的相对重要程度。

(3) 确定主观权重。根据评价指标的等级相关性和相对重要程度, 计算主观权重为

$$\omega_n^1 = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\omega_{k-1}^{(1)} = r_k \omega_k^{(1)} \quad (3)$$

式中 $\omega_k^{(1)}$ 表示第 k 个指标的权重。

1.2.2 基于指标信息量的客观权重

定义 1 设评价对象集 P 中有 n 个待评价对象, 表示为 $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$, m 个评价指标组成的指标集为 $T, T = (T_1, T_2, \dots, T_m)^T$ 。评价对象 P_i 对应的指标 T_j 的属性值表示为 $y_i(j) (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 则对应的观测矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_1(2) & \cdots & y_1(m) \\ y_2(1) & y_2(2) & \cdots & y_2(m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_n(1) & y_n(2) & \cdots & y_n(m) \end{bmatrix}$$

确定指标信息量的客观权重方法如下:

(1) 对观测矩阵数据标准化处理。对于非负指标序列 $Y_a^* = (y_1(a), y_2(a), \dots, y_n(a))$, $a \in m$; $Y_b^* = (y_1(b), y_2(b), \dots, y_n(b))$, $b \in m$, 数据标准化函数为: 当序列 Y^* 为正向指标时, 对序列进行无量纲化处理, 即

$$y_k = \frac{y^*(k) - \min(y^*(k))}{\max(y^*(k)) - \min(y^*(k))} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

当序列 Y^* 为负向指标时, 对序列进行无量纲化处理, 即

$$y_k = \frac{\max(y^*(k)) - y^*(k)}{\max(y^*(k)) - \min(y^*(k))} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

将标准化处理后的序列记为 $Y_a = (y_1(a), y_2(a), \dots, y_n(a))$; $Y_b = (y_1(b), y_2(b), \dots, y_n(b))$ 。

(2) 计算各指标信息量差异。指标序列 a 和 b 在 K 点的测度距离为 $|y_k(a) - y_k(b)|$, 则序列 Y_a 和 Y_b 在不同 K 点 ($K \in n$) 的信息差异总和表示为

$$\epsilon_{ab} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k(a) - y_k(b)| \quad (6)$$

则

$$C_a = \frac{\delta_a}{\bar{x}} \sum_{a \neq b}^m (1 - \epsilon_{ab}) \quad (7)$$

为 a 的信息量。式(7)中 δ_a 表示 a 的标准差, \bar{x} 为 a 观测值的均值, $\frac{\delta_a}{\bar{x}}$ 表示 a 的变异系数, $\sum_{a \neq b}^m (1 - \epsilon_{ab})$ 表示 a 和其他指标的综合距离差值。

第 a 个指标客观权重 w_a 为

$$w_a = \frac{C_a}{\sum_{a=1}^n C_a} \quad (8)$$

结合式(3)与式(8), 得到基于等级相关与信息量集成的综合权重为

$$W(k) = \eta w_a + (1 - \eta) w_k \quad (9)$$

式中: w_a 表示客观权重; w_k 表示主观权重; $\eta \in (0, 1)$ 。

2 基于综合权重的改进灰色综合关联模型

本文采用基于等级相关与信息量集成的综合权重确定方法首先确定各指标的权重, 再结合灰色关联模型求得各序列的灰色关联度。基于改进的灰色关联模型计算步骤如下:

(1) 确定分析数列 $X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)]$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$ 。其中 X_0 为参考数列, X_i 为比较数列。

(2) 根据客观权重确定方法中对数据进行无量纲化处理的方法对分析数列信息处理, 得到无量纲化序列 $x'_i(k)$ 。

(3) 求各序列的均值像。令

$$X'_i = \frac{X_i}{x_i(1)} = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

(4) 求 X_0 与 X_i 的均值像对应分量之差的绝对值序列。记

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|, \Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

(5) 求灰关联系数 $r(x_0(k), x_i(k))$, 即

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{1 + \epsilon(|x'_0(k) + x'_i(k)|)}{1 + \epsilon(|x'_0(k) + x'_i(k)|) + \Delta_i(k)} \quad (13)$$

(6) 基于组合权重确定的灰色关联度为

$$R(X_0, X_i) = \sum_{k=1}^M (W_i(k) \times r(f_k(0), f_k(i))) \quad i \in N \quad (14)$$

式中 $W_i(k)$ 通过 1.2 节指标权重的确定方法求得。

(7) 电网公司安全能力指数为

$$I = R(X_0, X_i) \times 100 \quad (15)$$

3 样本数据分析

为了验证本文模型的科学性和有效性, 向电网公司的安全监督部进行调研和讨论, 确定了 2019 年 1~6 月以月为单位的 6 期数据作为研究样本数据。由电网公司安全监督部提供的安全督察周报、生产计划报表、督察任务表、外协单位技能测试统计表、配农网实一致性专项检查情况报告和违章对应表, 对电网公司统计的 6 个时期的安全能力各项指标数据进行统计。选择了来自省电力公司安全管理部门专家、高校科研院所的安全管理研究人员和市公司安全管理部门一线业务骨干专家 9 名, 进行主观权重的打分。

首先对搜集的样本数据做规范化处理。为保证评价的合理性与科学性, 通过专家对各项指标的重要程度进行排序, 确定相邻指标的相对重要程度, 再结合式(1—3)确定各指标的主观权重, 结合式(6—8)确定各项指标的客观权重。然后结合式(9), 根据公司安全管理实际和专家意见, 进行多个取值的实验比较, 取 $\eta = 0.3$, 得到各指标的综合权重见表 2。

通过灰色综合关联模型得到关联系数矩阵。根据 ϵ 的判断准则与方法, 取 $\epsilon = 0.1$, 结合本节求得的权重, 得到基于改进的灰色综合关联模型的各时期的灰色关联度。根据式(15)计算得到电网运行各个

表 2 各项指标权重
Table 2 Weight of index

指标	工作技能水平	规章制度执行能力	现场勘察准确度	图纸准确度	三措一案准确度	管理人员到岗到位率	安全工器具状况	标识标牌状况
主观权重	0.135	0.170	0.150	0.130	0.085	0.130	0.100	0.100
客观权重	0.124	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
组合权重	0.132	0.157	0.143	0.129	0.097	0.129	0.107	0.107

时期的安全能力指数如图1所示。从图1可见,安全指数均处于[94,98]之间,说明被评价的各时期安全能力指数均处于较高状态,且安全能力呈现提升的良好态势。

为进一步分析电网运行安全能力的影响因素,按照本文所构建的指标体系中的人员、管理、物资3项一级指标进行分析,结果如表3所示。从表3可以看出,影响电网运行各个时期的安全能力的关键指标是管理,其次是人员和物资两个方面。这说明现场勘察准确度、图纸准确度、三措一案准确度和管理人员到岗到位率这4项二级指标对电网运行的安全起到较大的影响,在以后的生产工作中应强化监督力量,加强电网运行安全生产现场管理,大力推进设备检查工作,增强安全检查与隐患排查力度。

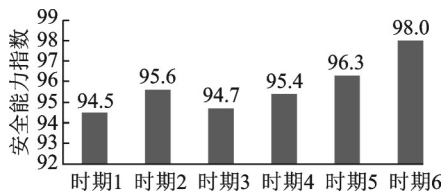


图1 电网运行安全能力指数

Fig.1 Power grid operation safety capability index

表3 电网运行安全能力影响因素分类评价

Table 3 Classification evaluation of influencing factors of power grid operation safety capability

指标	时期1	时期2	时期3	时期4	时期5	时期6
人员	0.288	0.287	0.286	0.289	0.290	0.288
管理	0.494	0.496	0.494	0.494	0.495	0.498
物资	0.218	0.217	0.220	0.217	0.215	0.214

4 结束语

本文从电网运行安全管理实际需求出发,结合致因理论,建立了安全能力评价指标体系;提出了主观和客观相结合的组合赋权法确定指标权重,并基于改进的灰色关联算法构建了电网公司评价模型。运用电网运行的6期数据进行了模型的验证。从结果可以得到安全能力指数及其发展趋势,同时通过对各因素的分析验证了模型的有效性。

参考文献:

- [1] 汤涌,王英涛,田芳,等. 大电网安全分析、预警及控制系统的研发[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 1-11.
TANG Yong, WANG Yingtao, TAN Fang, et al. Research and development of stability analysis, early-warning and control system for huge power grids[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 1-11.
- [2] 高新华,严正. 基于主成分聚类分析的智能电网建设综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2238-2243.
GAO Xinhua, YAN Zheng. Comprehensive assessment of smart grid construction based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2238-2243.
- [3] 牛东晓,魏亚楠,邢棉. 电网运行安全性评价体系分析及应用[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 160-163.
NIU Dongxiao, WEI Yanan, XING Mian. Analysis and application of evaluation system for power grid operation safety[J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 160-163.
- [4] 崔明建,孙元章,杨军,等. 一种基于多层次灰色面积关联分析的电网安全综合评价模型[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3453-3460.
CUI Mingjian, SUN Yuanzhang, YANG Jun, et al. Power grid security comprehensive assessment based on multi-level grey area relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3453-3460.
- [5] 穆永铮,鲁宗相,乔颖,等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全于效益综合评价指标体系[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 23-28.
MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 23-28.
- [6] YU Xiaopeng, XU Changqing, LU Dan, et al. Design and application of power grid accident case library based on CBR[J]. Information, 2020, 11(2): 91-102.
- [7] 宋学贵. 电力企业应急管理中的问题及解决途径[J]. 中国安全生产, 2019(1): 50-51.

- SONG Xuegui. Problems and solutions in emergency management of electric power enterprises[J]. China Occupational Safety and Health, 2019 (1): 50-51.
- [8] 邱万亿. 电力安全生产与应急管理的思考[J]. 工程技术研究, 2019(23): 247-248.
QIU Wanyi. Thinking of electric power safety production and emergency management[J]. Engineering and Technological Research, 2019 (23): 247-248.
- [9] 孙作雨, 于洪, 王国胤. 基于TOPSIS的三支决策评价模型[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(5): 891-899.
SUN Zuoyu, YU Hong, WANG Guoyin. Three-way decision evaluation system based on TOPSIS[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2018, 33(5): 891-899.
- [10] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 第8版. 北京: 科学出版社, 2017.
LIU Sifeng. Grey system theory and its application[M]. 8th ed. Beijing: Science Publication, 2017.
- [11] 范红军, 杨中书, 陈友龙, 等. 航空四站综合保障能力的灰色评估[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(增刊1): 207-210.
FAN Hongjun, YANG Zhongshu, CHEN Youlong, et al. Capacity evaluation of aviation four-station integrate providing with grey method[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(S1): 207-210.
- [12] WANG Yijing, MI Chuanmin, XU Jie, et al. Research on the evaluation of electric power companies' safety capability based on grey fixed weight clustering[C]//Proceedings of the 2019 INFORMS International Conference on Service Science. Nanjing, China: [s.n.], 2019.
- [13] WANG Junjie, HIPEL K W, DANG Yaoguo. An improved grey dynamic trend incidence model with application to factors causing smog weather[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 87(11): 240-251.
- [14] 党耀国, 尚中举, 王俊杰, 等. 基于面板数据的灰色指标关联模型构建及其应用[J]. 控制与决策, 2019, 34(5): 1077-1084.
DANG Yaoguo, SHANG Zhongju, WANG Junjie, et al. Grey incidence model for relationship between indicators of panel data and its application[J]. Control and Decision, 2019, 34(5): 1077-1084.
- [15] HEINRICH H W. Industrial accident prevention: A scientific approach [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1931.
- [16] 编委会. 电网企业本质安全能力建设与实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
Editorial Board. Grid enterprise intrinsic safety capability construction and practice[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.

作者简介:



张琳娟(1985-),女,高级工程师,研究方向:电网智能化规划、电网运行风险管控技术相关研究, E-mail: zlinj@163.com。



许长清(1973-),男,高级工程师,研究方向:电网智能化规划相关研究, E-mail: zzplus@163.com。



余晓鹏(1974-),男,教授级高级工程师,研究方向:能源电力规划、电力系统安全稳定分析相关研究, E-mail: yuxiaopeng4798@sohu.com。



卢丹(1981-),男,高级工程师,研究方向:电网运行风险管控、主动配电网技术, E-mail: ludan555@qq.com。



王利利(1984-),男,高级工程师,研究方向:智能电网规划、配电网规划相关研究, E-mail: l_l_wang@qq.com。



王俊杰(1988-),男,讲师,硕士生导师,研究风险:灰色系统理论、环境评价相关研究, E-mail: wangjj@nuaa.edu.cn。



米传民(1976-),男,教授,硕士生导师,研究方向:不确定理论、风险管理、数据科学, E-mail: cmmi@nuaa.edu.cn。