

DOI: 10.7667/PSPC160623

基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法

孙义豪¹, 李秋燕¹, 丁岩¹, 全少理¹, 关朝杰¹, 杨德帅², 胡钊²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 对多个县域电网进行统筹优化建设时, 县域电网评价体系会直接影响建设方案的制定。传统电网评价体系常常表现为细致度不够、主观性较大, 因而现实指导性不强。因此, 建立了一套县域电网评价体系, 该评价体系利用主成分分析(Principal component analysis, PCA)进行微观剖析, 应用系统聚类分析(Hierarchical cluster analysis, HCA)实现宏观引导。其中, 通过主成分分析实现对多元评价指标进行降维、去相关性处理, 对各评价指标赋予不含主观因素的主成分权重, 从而建立县域电网综合评价体系, 并得出能反映县域电网在安全性、经济性、可靠性、适应性、优质性这五个性质上优劣程度的分数及排名。再利用系统聚类分析法对这些得分逐层逐层地进行聚类, 以不同层面的系统聚类结果回溯定位于与之相应的由主成分分析法得出的排名, 从而对县域电网不同指标模块的薄弱所在聚类研究, 并结合当地县域负荷及经济发展情况制定相应的发展路径。应用结果表明, 将主成分分析法及系统聚类分析法有机结合来对县域电网进行综合评价是切实有效的。

关键词: 县域电网; 评价指标体系; 主成分分析; 系统聚类; SPSS; 多层感知器训练

County power grid evaluation system based on principal component analysis and hierarchical cluster analysis

SUN Yihao¹, LI Qiuyan¹, DING Yan¹, QUAN Shaoli¹, GUAN Chaojie¹, YANG Deshuai², HU Po²

(1. Electric Power Economic Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: When many county power grids are constructed and optimized under unified arrangement, the development of the construction program is directly affected by the county power grid evaluation system. Traditional power grid evaluation system lacks in reality guidance due to insufficient consideration and larger subjectivity. In order to solve these problems, this paper provides a grid of county power grid evaluation system. This system can introduce micro-analysis based on principal component analysis (PCA) and conduct macro-guidance based on hierarchical cluster analysis (HCA). Multiple evaluation indexes are made to reduce its dimension by PCA and endow principal component weight to each index without subjective factors. Thereby, a comprehensive assessment system for county power grid is built to gain scores and rankings which can reflect their pros and cons of degree in safety, economy, reliability, adaptability and quality. And then, these scores are clustered based on HCA layer by layer, and the ranking location is backtracked which is gained by PCA, so as to cluster weak indicators of county power grid's different index modules, and combined load and local county economic development, appropriate development path is developed. Application results show that this county power grid evaluation system based on PCA and HCA is an effective solution.

Key words: county power grids; evaluation index system; principal component analysis; hierarchical cluster analysis; SPSS; multilayer perceptron training

0 引言

中国县域电网在配电网中所占比例很大, 其发展现状相对于快速发展的输电网架, 显得相对滞后且参差不齐, 同时也存在评价方法难以准确量化、

客观性与完备性不足等问题。为此, 迫切需要构建一套科学的、集微观剖析与宏观指导于一体的评价体系, 用于从县域电网的五个性出发, 对其进行聚类研究, 找出同一类县域电网共有的薄弱所在, 为各县域电网的建设发展提供切实可行的决策依据

与指导。

传统电网评价方法中的动态综合评价法^[1]、熵权法^[2]和层次分析法^[3]等虽然已经成功应用于电网评价, 但均没有完善的指标体系。文献[4-6]采用不同方法, 对电网的可靠性指标进行了评价研究, 文献[7]则利用模糊综合评价方法对电网的供电质量进行了半客观评价。虽然上述研究在不同程度上避免或减少了专家经验法的主观性, 但这些评价方法的完备性不够、客观性不足。

本文综合运用主成分分析与系统聚类将大量的评价指标依据对其去相关处理的结果降维成若干综合指标, 据此建立县域电网评价指标体系, 最后生成综合主成分评价指标函数并给出计算结果。并用所得数据进行系统聚类分析。上述两种分析方法的有机结合克服了主观赋权的弊端, 既可以区分不同县域电网在不同性质上的差异性和优劣性以及这些电网在各性质中不同主成分上的差异性和优劣性, 又能够以不同层面的系统聚类结果回溯定位于各县域电网所对应的由主成分分析法得出的排名。应用实例验证了方法的切实有效性。

1 主成分分析法与系统聚类法的基本原理

1.1 主成分分析

主成分分析^[8-11]通过考虑各指标间的相互关系, 利用降维方法将多个指标变量在信息损失量最小的情况下转化为少数综合指标变量, 其实质是将多维坐标系按方差最大的原则进行旋转、翻转及平移变换, 最终实现将原始指标变量聚类化简并降低其维度之目的。

对原始指标变量的数据进行预处理、标准化后记为 x_1, x_2, \dots, x_n , 其综合指标变量即原始数据降维所得的主成分记为 $y_1, y_2, \dots, y_m (m \leq n)$, 两者之间的关系为

$$\begin{cases} y_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \dots + l_{1n}x_n \\ y_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \dots + l_{2n}x_n \\ \vdots \\ y_i = l_{i1}x_1 + l_{i2}x_2 + \dots + l_{in}x_n \\ \vdots \\ y_m = l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \dots + l_{mn}x_n \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, 系数 $l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{in} (i=1, 2, \dots, m)$ 构成系数矩阵。

主成分分析的主要步骤如下所述。

(1) 对预处理后的原始数据矩阵 \mathbf{K} 中各列向量进行正态分布标准化处理, 消除量纲影响, 得到标准化矩阵 \mathbf{X} 。

(2) 计算相关系数矩阵 \mathbf{R} , 即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, $r_{ij} (i, j=1, 2, \dots, p)$ 为原始指标变量 x_i 与 x_j 的相关系数, 其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{\sqrt{\text{Var}(x_i)\text{Var}(x_j)}} \quad (3)$$

式(3)中: $\text{cov}(x_i, x_j)$ 表示向量 x_i 与 x_j 的协方差; $\text{Var}(x_j)$ 表示向量 x_j 的样本方差。

(3) 计算特征值和特征向量。

(4) 计算主成分的贡献率 w_i 和累计贡献率 ρ 。

$$w_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (5)$$

式(4)、式(5)中的 λ_i 和 λ_j 均表示方差特征值。

一般取累计贡献率达 75%~85%的特征值所对应的主成分, 个别情况下累计贡献率可以适当降低。

(5) 计算主成分总得分 z 。

$$z = w_1y_1 + w_2y_2 + \dots + w_my_m \quad (6)$$

式(6)中, y_1, y_2, \dots, y_m 为各个主成分得分值。

1.2 系统聚类法

在系统聚类^[12-13]中, 首先将所要研究的样本(或指标变量)各自看成一类, 然后将样本(或指标变量)之间亲疏程度最高的两类合并, 继而将合并后所得各类之间的亲疏程度最高的两类再进行合并。重复这一两两合并过程, 直到将所有的样本(或指标变量)合并为一类。

2 县域电网综合评价流程

综合应用主成分分析与聚类分析理论与评价模型^[14-15], 设计基于主成分分析与聚类分析方法体系的县域电网综合评价方案。

(1) 从县域电网安全性、经济性、可靠性、适应性、优质性这 5 个方面筛选评价指标, 剔除不能足以反映县域电网特征以及非隶属于研究范围的指标, 其中, 对于共同反映某一方面问题的多个指标按其本质属性构造公式, 从而得到能够足以表征这几个指标共性的一个指标, 减少了指标数量^[16-20]。

(2) 进行数据预处理, 将所有指标都变成正向指标, 以便增加主成分分析结果的精确性。对于正向指标而言, 其相应数值越大越好, 如供电可靠率、

主变满足 $N-1$ 通过率, 这时只须作标准化处理; 对于反向指标来说, 其相应数值则是越小越好, 如重过载率, 这时须将其标准化后取相反数; 对于其他指标而言, 其相应数值在某一数值区间比较好, 如容载比, 这时须将其映射成符合正向指标规律的数值, 再作标准化即可。接着应用主成分分析法对县域电网 5 个性质分别进行主成分分析, 从而建立评价指标体系, 并得到县域电网在安全性、经济性、可靠性、适应性、优质性上的得分及排名, 同时得到每个性质中各主成分的得分及排名。

(3) 应用系统聚类分析法对县域电网进行逐层分析, 得到县域电网基于 5 个性质的总体分类以及基于各个性质上相应的主成分的分类。应用系统聚类时所用的第一层数据为县域电网在 5 个性质上的得分, 第二层数据为电网在每个性质上不同主成分上的得分。

(4) 将一层聚类后县域电网类别回溯定位于 5 个性质上的排名位置, 将二层聚类后县域电网类别回溯定位于每一性质的各个主成分上的排名位置, 从而可以找出各类县域电网在 5 个性质中的薄弱性质所在以及在每一性质上的薄弱主成分所在。

3 评价方法应用

限于篇幅, 本文仅给出了从安全性方面对河南省 108 个县域电网进行综合评价分析的应用实例, 聚类研究其薄弱点, 确定每类电网在安全性的各个主成分上的共性与个性问题。

3.1 计算结果及其分析

利用 SPSS 软件, 对河南省 108 个县能表征其电网安全性的指标进行预处理、标准化, 然后利用主成分分析法求出初始特征值的方差以及方差的累计贡献率, 由主成分分析法提取出的 5 个主成分的特征值分布如表 1 所示。

表 1 利用 SPSS 提取出的 5 个主成分的特征值分布

Table 1 Distribution of feature values of five main components extracted by SPSS

第 i 主成分	初始特征值			旋转平方和载入		
	合计	方差 (%)	累积 (%)	合计	方差 (%)	累积 (%)
1	3.040	19.001	19.001	2.713	16.956	16.956
2	2.163	13.520	32.520	2.051	12.821	29.777
3	1.875	11.717	44.237	1.928	12.053	41.830
4	1.419	8.871	53.108	1.582	9.888	51.717
5	1.050	6.561	59.669	1.272	7.952	59.669

由表 1 可知, 利用 SPSS 总共提取出了 5 个主成分, 累积方差贡献率已接近 60%, 故可以用这 5

个主成分表征原有的 16 个指标, 实现了对原有指标变量降维的目的。此外, 108 个县域电网安全性的主成分因子载荷矩阵如表 2 所示。

表 2 108 个县域电网安全性的主成分因子载荷矩阵

Table 2 Principal component factor load matrix of 108 county power grids in safety

指标序号	评价指标	第 1	第 2	第 3	第 4	第 5
		主分 上的 因子 载荷	主分 上的 因子 载荷	主分 上的 因子 载荷	主分 上的 因子 载荷	主分 上的 因子 载荷
1	35 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例	.840	.059	.060	.060	-.281
2	35 kV 电网主变满足 $N-1$ 比例	.840	-.080	-.040	-.023	-.131
3	110(66) kV 主变满足 $N-1$ 比例	.783	-.226	.043	.036	.042
4	110(66) kV 线路满足 $N-1$ 比例	.735	.197	.059	.177	.149
5	35 kV 电网单线或单变电站比例	.005	.798	-.126	-.159	.138
6	110(66) kV 单线或单变电站比例	-.002	.791	-.081	-.148	-.003
7	供电半径超标					
7	低压线路占线路总数比例	-.140	.427	-.287	.208	-.079
8	35 kV 线路重过载占比	-.132	-.210	.759	.137	.076
9	35 kV 主变重过载率	.050	-.020	.699	.063	-.232
10	10 kV 线路重过载占比	.110	-.234	.503	-.093	-.108
11	110(66) kV 线路重过载占比	.026	.412	.485	-.072	.173
12	110(66) kV 主变重过载率	.065	.400	.464	.188	-.459
13	10 kV 电网联络线路比例	.023	-.037	-.008	.877	.066
14	10 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例	.177	-.154	.076	.783	-.109
15	供电半径超标的线路占公用线路总数比例	.030	-.001	-.175	.013	.785
16	10 kV 架空主干截面 ≤ 70 (mm) ² 线路长度所占比例	-.243	.227	.090	-.013	.428

对表 2 中的主成分因子载荷矩阵进行分析时, 所依据的聚类判别准则为 $|\text{cov}(F_i, x_j)| > 0.5$, 若某指标所对应的 $|\text{cov}(F_i, x_j)|$ 均小于 0.5, 则将该指标归于数值最接近 0.5 所在列的那一主成分, 因此, 通

过分析因子载荷将各指标分别划归于相应的主成分上, 如表 3 所示。

表 3 分别划归于五个主成分上的各指标

Table 3 Indexes which are classified in five main components

第 i 主成分上的指标	指标序号
第 1 主成分上的指标	指标 1、2、3、4
第 2 主成分上的指标	指标 5、6、7
第 3 主成分上的指标	指标 8、9、10、11、12
第 4 主成分上的指标	指标 13、14
第 5 主成分上的指标	指标 15、16

利用五个主成分所对应的指标建立县域电网安全性评价指标体系, 如图 1 所示, 其中, 五个主成分分别是分别根据各自所对应的指标性质命名的。

图 1 中, 第二层的 5 个综合指标是利用主成分分析法提取出的 5 个主成分, 其得分由预处理、标准化的原始数据矩阵与系数矩阵相乘得到。第一层的县域电网安全性评价指标体系的得分为综合成分得分即总得分, 是由 5 个主成分得分矩阵与 5 个主成分所对应的方差矩阵乘积得到。利用主成分分析法对所有县域电网评价所得结果均值为零, 评价得分值可以反映县域电网发展水平的相对高低。

应用 SPSS 软件对 108 个县域电网在安全性 5 个主成分上的得分数据(构成 108 行 5 列的数据矩阵)进行系统聚类, 所用方法为 ward 法, 距离为欧式距离, 所得聚类树如图 2 所示。

依据对薄弱点分类研究的需要, 将系统聚类树切分成 4 类, 如表 4 所示。

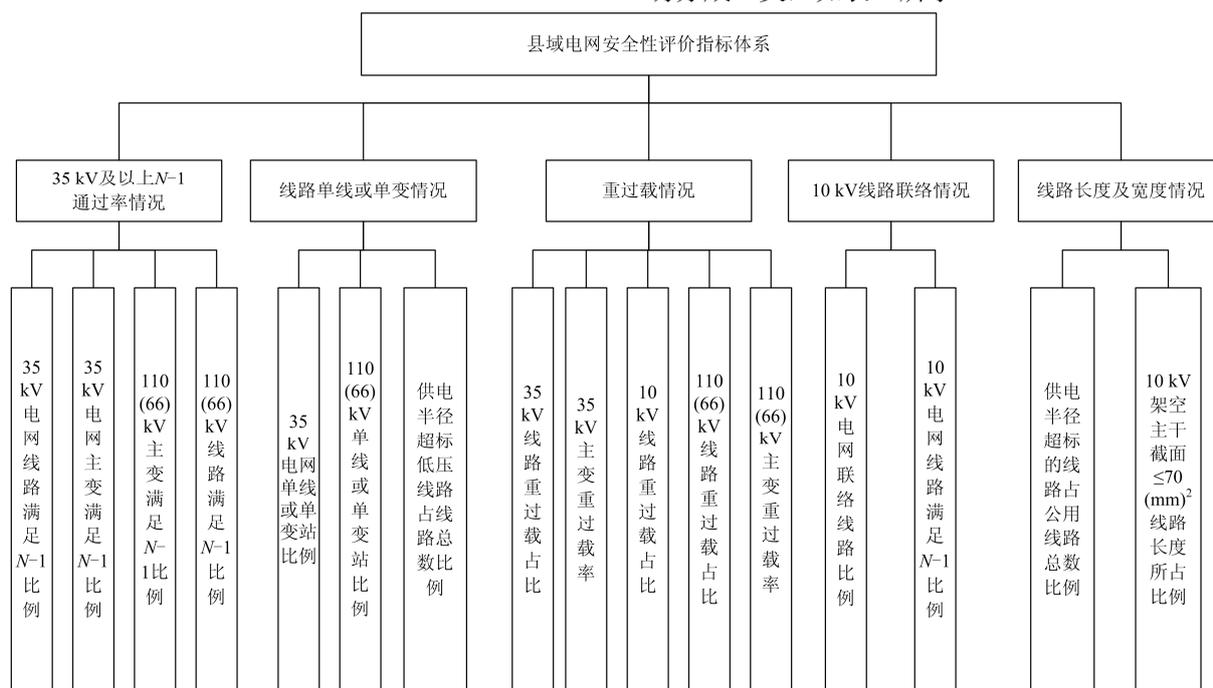


图 1 县域电网的安全性评价指标体系

Fig. 1 County power grid evaluation system in safety

表 4 聚为四类的结果

Table 4 Result of four categories by HCA

类别	总数	落入各个类别中的县域电网序号
系统聚类	第 1 类	21 个 30, 77, 78, 79, 95, 103, 106, 76, 34, 98, 96, 99, 72, 73, 93, 102, 104, 17, 94, 14, 28
	第 2 类	28 个 15, 41, 20, 64, 19, 27, 36, 88, 23, 92, 11, 87, 47, 53, 26, 54, 12, 13, 55, 56, 29, 38, 50, 71, 101, 86, 107, 32
	第 3 类	27 个 24, 49, 9, 10, 67, 90, 7, 37, 43, 82, 8, 33, 69, 18, 31, 84, 91, 42, 35, 81, 5, 80, 39, 85, 89, 44, 83
	第 4 类	32 个 46, 48, 74, 105, 60, 75, 1, 65, 57, 63, 58, 62, 97, 108, 25, 4, 52, 2, 45, 68, 16, 22, 59, 21, 100, 51, 61, 3, 40, 6, 66, 70
有效率(%)		100
缺失率(%)		0

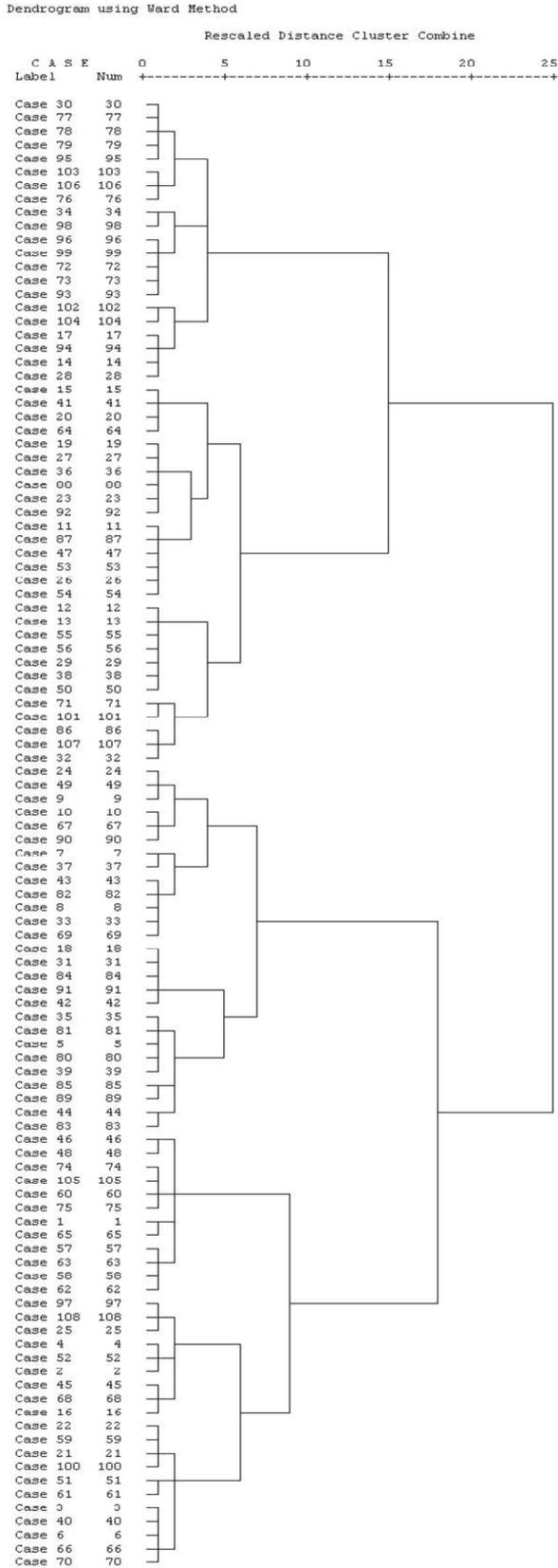


图 2 108 个县域电网的系统聚类树

Fig. 2 Hierarchical clustering tree of 108 county power grids

用表 4 所得结果将县域电网类别回溯定位于主成分分析在安全性每一主成分上的排名位置, 找出各类县域电网在每一性质上的薄弱主成分所在, 从而精确地找到县域电网在安全性上的薄弱所在。县域电网各个类别在安全性各主成分上得分排名位置如图 3 所示。

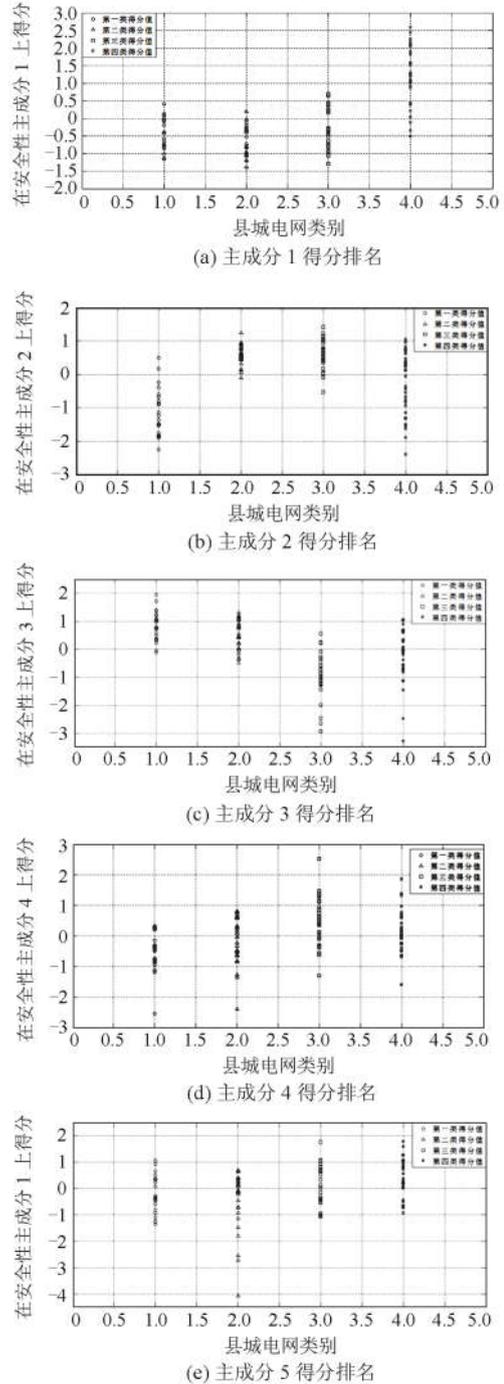


图 3 县域电网各类别在安全性各主成分上得分排名位置

Fig. 3 Ranking of every county power grid in every component in safety

分析图 3, 得到各个类别的县域电网在安全性五个主成分上的排名位置, 如表 5 所示。

表 5 各个类别的县域电网在安全性五个主成分上的排名位置

Table 5 Ranking of every county power grid in five components in safety

类特点	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	第 5 主成分
第一类特点	排名大 多居后	排名大 多居后	排名大 多中上	排名大 多分散	排名大 多中后
第二类特点	排名大 多居后	排名大 多居中	排名大 多中上	排名大 多分散	排名 分散
第三类特点	排名分 散	排名大 多中上	排名大 多居后	排名大 多中上	排名 分散
第四类特点	排名大 多居前	排名 分散	排名大 多居中	排名 分散	排名 分散

由表 5 可知, 在 108 个县域电网中, 若某一类电网在某个主成分上排名大多居前, 则其相应的电力指标水平较好, 随着排名位置由前到后, 相应的薄弱程度逐渐严重。与此同时, 每一类中各县域电网的发展路径制定还需结合考虑其各自的负荷情况、负荷增长情况以及经济发展水平, 对经济发展迅速、负荷增长突增的县域加大力度整改其电网的薄弱环节, 以求更好地服务于该县域的经济建设。

3.2 多层感知器神经网络辅助分析

由于表征县域电网安全性的电力指标共有 16 个, 故而以最能够表征县域电网安全性的指标——“10 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例”作为神经网络的因变量, 其余 15 个指标变量作为自变量, 应用 SPSS 中的多层感知器得到这 15 个变量相对“10 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例”的重要性与标准化重要程度, 分别如表 6 所示。由此可见, “10 kV 电网联络线路比例”、“供电半径超标的线路占公用线路总数”这两个指标对“10 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例”贡献最大, 故而在河南省 108 个县域电网安全性发展目标统筹规划时, 这两个指标所在主成分相对应的多个指标均要重点关注, 大力改善其薄弱程度。对于其他四个性质中的相应因变量也作同样分析。

4 结语

主成分分析法可以避免人工赋权的主观性干扰, 系统聚类分析法则可以基于数据量对样本进行聚类, 弥补主成分分析会丢失少量信息的不足。本文有机结合这两种方法提出了一种基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法, 以待评价数据内在的相关性为依据, 运用主成分因子载荷聚类分析将指标体系分层分类, 将众多评价指标按评价

表 6 15 个指标变量相对“10 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例”的重要性

Table 6 Importance of 15 indexes compared to “10 kV grid lines meet $N-1$ ratio”

指标变量	重要性	标准化的重要性
110(66) kV 主变重过载率(VAR1)	.049	24.0%
110(66) kV 线路重过载占比(VAR2)	.046	22.8%
35 kV 主变重过载率(VAR3)	.078	38.6%
35 kV 线路重过载占比(VAR4)	.039	19.2%
10 kV 线路重过载占比(VAR5)	.021	10.5%
110(66) kV 单线或单变电站比例(VAR6)	.085	42.0%
110(66) kV 主变满足 $N-1$ 比例(VAR7)	.041	20.1%
110(66) kV 线路满足 $N-1$ 比例(VAR8)	.081	40.2%
35 kV 电网单线或单变电站比例(VAR9)	.041	20.1%
35 kV 电网主变满足 $N-1$ 比例(VAR10)	.044	21.8%
35 kV 电网线路满足 $N-1$ 比例(VAR11)	.051	25.0%
10 kV 架空主干截面 ≤ 70 (mm) ² 线路长度所占比例(VAR12)	.148	73.2%
10 kV 电网联络线路比例(VAR13)	.203	100.0%
供电半径超标的线路占公用线路总数比例(VAR14)	.001	.6%
供电半径超标低压线路占线路总数比例(VAR15)	.072	35.4%

数据的相关性降维得出更高层级的综合性新指标用来反映县域电网的基本情况, 建立评价指标体系。并用系统聚类结果回溯定位主成分分析得分排名, 找出县域电网在安全性、经济性、可靠性、适应性、优质性这五个性质中的薄弱性质所在以及每个性质中各主成分上薄弱主成分所在。最后, 应用神经网络中多层感知器对样本数据进行训练, 得到各个自变量对因变量的相对重要性, 从而在统筹规划县域电网的发展目标时, 可以精确定位其薄弱环节, 更有针对性地改善其薄弱程度。

参考文献

- [1] 韩冬, 严正, 宋依群, 等. 基于系统动力学的智能电网动态评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 16-21. HAN Dong, YAN Zheng, SONG Yiqun, et al. Dynamic assessment method for smart grid based on system dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 16-21.
- [2] 张海瑞, 韩冬, 刘玉, 等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 24-29. ZHANG Hairui, HAN Dong, LIU Yu, et al. Smart grid evaluation based on anti-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 24-29.

- [3] 曹阳, 孟晗辉, 赵力, 等. 基于层次分析法的新农村低压配电网综合评价评估方法[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 68-72.
CAO Yang, MENG Hanhui, ZHAO Li, et al. A comprehensive evaluation of new rural low-voltage distribution networks based on analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 68-72.
- [4] 吴开贵, 王韶, 张安邦, 等. 基于 RBF 神经网络的电网可靠性评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 9-12.
WU Kaigui, WANG Shao, ZHANG Anbang, et al. The study of reliability assessment of electric power system using RBF neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 9-12.
- [5] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 35-39.
XIE Yinghua, WANG Chengshan. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 35-39.
- [6] LI Weixing, WANG Peng, LI Zhimin, et al. Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constrains[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 753-758.
- [7] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.
TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [8] 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.
- [9] 肯德尔. 多元分析[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [10] 孟生旺. 用主成分分析法进行多指标评价应注意的问题[J]. 统计研究, 1992(4): 86-87.
- [11] 黄润龙. 数据统计分析——SPSS 原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 253.
- [12] 蒋定定, 孙明珠, 张兢. SAS 系统的基本组成和功能[J]. 管理, 2012(10): 218.
- [13] 赵姗姗. 基于 SPSS 中系统聚类的 CPI 分析[D]. 新乡: 河南师范大学, 2013.
- [14] 黄知超, 谢霞, 王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69.
HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [15] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124.
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.
- [16] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 22(1): 43-49.
- [17] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 33(36): 27-33.
- [18] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [19] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [20] 姚致清, 张茜, 刘喜梅, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Xi, LIU Ximei, et al. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2016-05-01; 修回日期: 2016-08-14

作者简介:

孙义豪(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网规划技术、配电自动化技术。E-mail: sunyihao@ha.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)