

文章编号:1671-6833(2018)02-0039-05

# 基于网络层次分析法的电网发展诊断模型研究

王正阳<sup>1</sup>, 詹智民<sup>2</sup>, 罗 宾<sup>2</sup>, 刘行波<sup>2</sup>, 李源林<sup>2</sup>, 叶 磊<sup>2</sup>, 陈根永<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 湖北华中电力科技开发有限责任公司, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 结合电网发展规律, 从电网自身发展条件及外部因素限制选取影响电网发展的相关指标, 并从电网长期发展的角度, 考虑能源、环境、土地等资源对电网发展的制约, 提出创新型指标; 考虑指标之间的相互联系与相互制约, 运用网络层次分析法对电网发展现状及发展空间进行诊断, 并建立了相应的诊断模型. 通过对算例的诊断结果可知, 该诊断模型可以引导地区能源发展方向, 优化能源结构, 发现电网发展薄弱环节, 评估电网发展空间, 把握发展方向, 是一种合理可行的新型电网发展诊断方法.

**关键词:** 电网; 发展; 诊断; 网络层次分析法; 指标体系

**中图分类号:** TM615 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.002

## 0 引言

面对复杂严峻的经济形势和艰巨的改革发展任务, 电网作为社会重要基础设施, 应该在继承中创新, 在创新中发展, 为服务国家经济和社会发展作出更大贡献, 因此有必要通过电网发展诊断, 科学评价电网的发展现状和电网的发展空间, 寻找电网发展内在驱动力, 针对电网发展薄弱环节, 提出准确有效的诊断建议, 为电网发展提供技术支撑和决策依据, 促进电网科学发展, 提高电网管理水平<sup>[1]</sup>.

目前, 电网发展诊断逐步受到电力公司和研究人员的重视, 已有学者开展了相关研究工作. 文献[1]结合地市级电网的特点, 从电网安全与质量、速度与规模、协调性、运行效率和经济效益 5 个维度对电网发展进行综合评价, 并根据实地调研和数据挖掘方法确定了 46 个评价指标, 从而构建了电网发展评价与诊断双层结构模型. 文献[2]通过借鉴国际电力行业常用的指标体系, 从安全可靠、经济高效、服务优质、绿色低碳、友好互动等 5 个方面, 筛选了能够表征世界一流电网特质的核心指标, 形成指标体系. 文献[3]将层次分析法和德尔菲法用于电网现状评估中, 并建立了高、中压现状配电网的评

价体系, 着重分析和研究同一层次中各指标的权重求解问题. 文献[4]采用熵权法和密切值法相融合的评估模型, 对配电网评估指标体系进行了科学合理的评价.

笔者通过研究发现, 现有的电网发展诊断指标体系主要在于展示指标数据, 没有考虑指标间的相互联系与制约, 同时诊断的覆盖面还不够全面, 缺乏电网发展与能源资源、环境资源、土地资源等方面关系的指标, 现有的电网发展诊断指标体系还有待完善.

面对电网发展诊断的重大需求, 笔者从电网规模、电网结构、安全可靠、利用效率、设备水平、外部环境 6 方面<sup>[5-8]</sup>对电网发展现状及发展空间进行诊断, 提出相应的指标分析方法, 形成了基于网络层次分析法<sup>[9-10]</sup>的诊断模型. 用此模型对电网进行诊断, 发现电网发展的薄弱环节, 结合发展形势、经济环境和政策环境, 分析影响电网发展的限制因素, 把握电网发展方向, 明确电网投资重点, 推动电网科学发展.

## 1 电网发展诊断指标体系

影响电网发展的因素分为两类: ①内部限制因素; ②外部限制因素. 结合电网发展特点, 考虑指标间的相互影响与支配, 进行影响因素分析, 通

收稿日期: 2017-12-01; 修订日期: 2018-01-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2013M541990); 国家电网公司科技资助项目(20160284A)

通信作者: 陈根永(1964—), 男, 河南禹州人, 郑州大学教授, 主要从事电力系统的教学及科研工作, E-mail: ezcgy@163.com.

过聚类算法,将指标分为电网规模、电网结构、利用效率、安全可靠、设备水平、外部环境 6 个类

别,下属指标共 39 个。基于这些指标建立的电网发展诊断体系如图 1 所示。

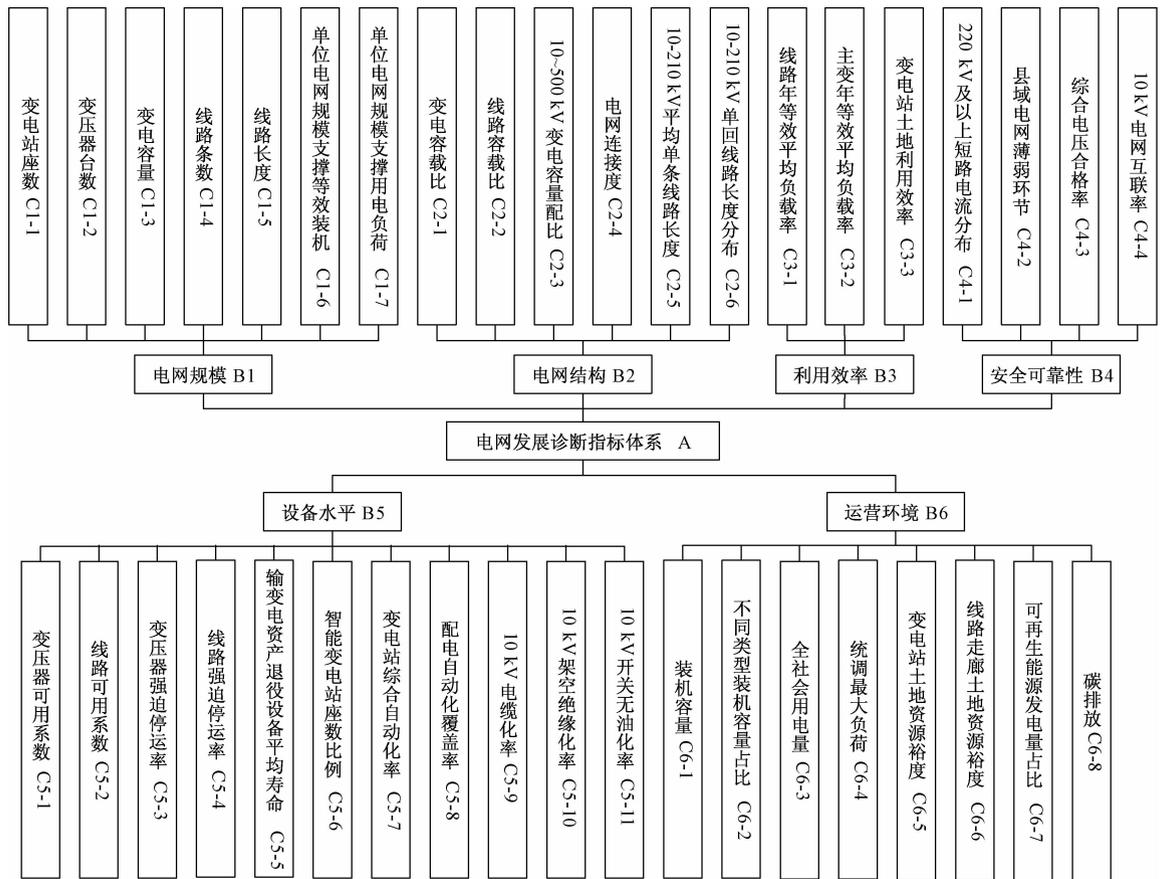


图 1 电网发展诊断指标体系

Fig. 1 The index system of power grid development diagnosis

## 2 网络层次分析法 (ANP)

考虑到各个指标间的相互联系与制约,笔者采用网络层次分析法 (analytic network process, ANP) 对指标体系作进一步研究。网络层次分析法是美国匹兹堡大学教授萨蒂在层次分析法 (AHP) 的基础上,于 1996 年提出的一种适应非独立递接层次结构,能够解决存在内部依存和反馈效应的复杂系统的决策方式。由于网络层次分析法在其网络层中可将问题的相关元素进行聚类而形成元素组,并可随意描述各个元素之间的相关性,即构造出网络结构,尽管建模过程较为复杂,但可以更准确地描述决策问题,因而成为一种更加有效的决策方法。

### 2.1 ANP 的基本结构

ANP 系统元素分为两个部分:①由问题目标及决策准则构成的控制层;②由控制层支配的所有元素构成的网络层,其内部是相互影响的网络结构。图 2 是典型的 ANP 结构形式。

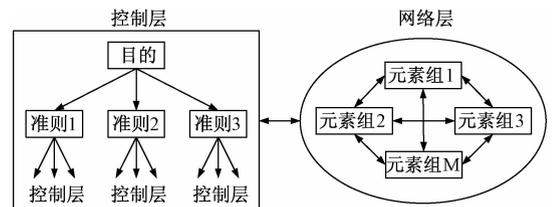


图 2 典型 ANP 的结构形式

Fig. 2 A typical ANP structure

### 2.2 ANP 的计算步骤

①判断矩阵和排序向量的建立。使用德尔菲法判断 ANP 系统中各指标的相对重要性,常采用 1—9 标度法作为判断标准。

设 ANP 中控制层元素为  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , 网络层元素集有  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , 其中  $C_i$  有元素  $e_{ik}$  ( $k = 1, 2, \dots, n_j$ )。首先在控制准则下构造判断矩阵,按照元素集  $C_i$  中的元素对  $e_{jk}$  的影响程度进行两两比较。然后根据特征根法求得排序向量  $[w_{i1}^{(j)} w_{i2}^{(j)} \dots w_{in_i}^{(j)}]^T$ 。若该特征向量可以通过一致性检验,则将其写成矩阵形式,即可得到局部权重向量矩阵:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \cdots & w_{i1}^{(j_n)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \cdots & w_{i2}^{(j_n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \cdots & w_{in_i}^{(j_n)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

若  $C_j$  中的元素不受  $C_i$  中元素影响,则  $W_{ij} = 0$ .

②超矩阵的建立. 同理,将其他元素集元素的内外关系依次进行比较,可得到由网络层中各元素互相影响的排序向量构成的无权重超矩阵  $W$ .

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n1} & \cdots & W_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$W$  的每个元素都是矩阵,列和是 1,但  $W$  不是归一化矩阵,为方便计算需将超矩阵列归一化,即对  $W$  的元素加权,得到加权超矩阵.

③加权超矩阵的计算. 在控制层  $B_n$  准则下,根据网络层各组元素对  $C_j(j = 1, \dots, n)$  的重要

程度进行比较,得到归一化的排序向量

$$H_j = [h_{1j} \cdots h_{nj}]^T, \quad (3)$$

进而可以得到加权矩阵

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

将矩阵  $H$  和  $W$  相乘即为加权超矩阵  $\bar{W}$ .

④超矩阵  $W$  稳定处理. 计算每个超矩阵的极限相对排序向量

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} (1/N) \sum_{k=1}^N \bar{W}^k. \quad (5)$$

若该极限收敛且唯一,则原矩阵对应的值为各指标的权重. 通过式(5)计算可得各指标的权重值.

### 3 算例分析

基于上述电网发展诊断模型,分析指标应用场景,选取 220 kV 电网适应性评价指标,构建 220 kV 电网发展诊断指标体系的 ANP 结构,如图 3 所示.

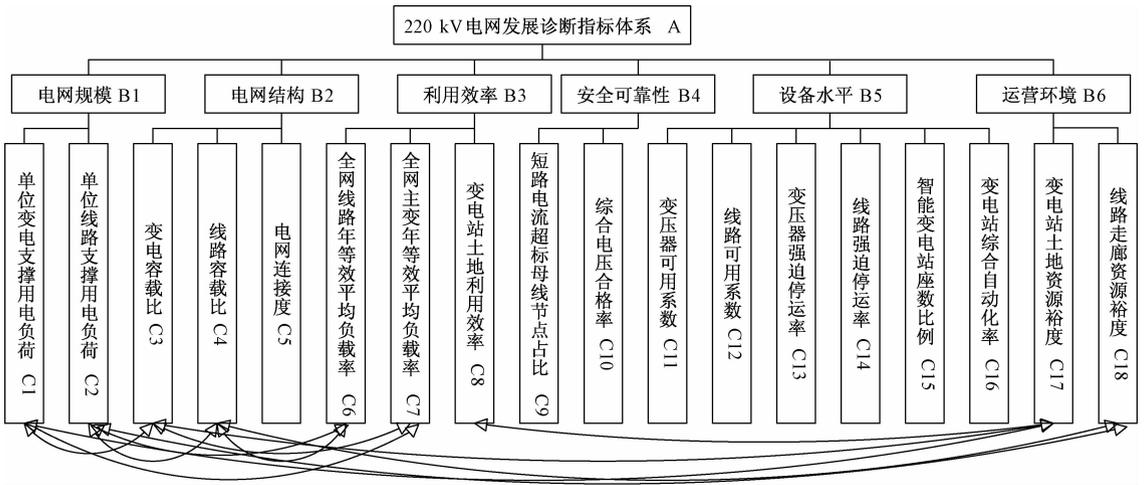


图 3 220 kV 电网发展诊断指标体系的 ANP 结构

Fig. 3 ANP structure of 220 kV power grid development diagnosis index system

图 3 中  $C_1$  与  $C_3$ 、 $C_7$ 、 $C_{17}$  相关联; $C_2$  与  $C_4$ 、 $C_6$ 、 $C_{18}$  相关联; $C_3$  与  $C_7$ 、 $C_{17}$  相关联; $C_4$  与  $C_6$ 、 $C_{18}$  相关联; $C_8$  与  $C_{17}$  相关联.

以国家电网公司一体化电网规划设计平台中 2016 年电网规划和实际运行数据为基础(见表 1),选取河南、湖北、山东、江苏、北京 5 地区 220 kV 电网进行诊断分析. 鉴于部分数据较难收集,诊断工作将仅基于现有数据展开,涉及更多指标、更多电压等级的区域电网整体发展诊断分析需进一步加强数据统计收集工作,其诊断流程是在本算例基础上的扩展.

ANP 计算过程异常繁复,对于大型系统,基本无法进行手工计算. 笔者采用基于 ANP 理论的专业计算工具 Super Decisions 软件进行权重计算,所得各指标权重如表 2 所示.

基于 ANP 的评价得分如表 3 所示. 诊断结果可以从总体上判断 220 kV 电网发展现状. 同时,由诊断过程中间结果绘制相应的雷达图,如图 4 所示. 从雷达图可以发现各地区 220 kV 电网的薄弱环节和发展方向.

由表 3 及图 4 可知,北京 220 kV 电网诊断得分最低,其中电网规模、电网结构发展略超前

表1 5省2016年220 kV电网发展诊断相关数据

Tab.1 Power grid development diagnosis index data of five provinces in 2016

指标	区域电网				
	河南	湖北	山东	江苏	北京
单位变电支撑用电负荷/(kW·kVA <sup>-1</sup> )	0.64	0.67	0.51	0.50	0.63
单位线路支撑用电负荷/(kW·km <sup>-1</sup> )	3 240	2 300	3 000	3 100	6 700
变电容载比	1.73	1.92	1.85	1.90	1.80
线路容载比	2.10	3.15	2.05	2.32	2.35
电网连接度	6.10	6.49	5.43	6.31	8.63
全网线路等效平均负载率/%	26.00	21.55	36.23	23.68	24.67
全网主变等效平均负载率/%	31.00	29.43	30.94	33.44	26.80
变电站土地利用效率/(kVA·m <sup>-2</sup> )	25	23	27	28	49
短路电流超标母线节点占比/%	0	0.84	0	0	0
综合电压合格率/%	99.503 5	99.477 5	99.755 5	99.854 5	99.820 0
变压器可用系数/%	100.000 0	99.931 7	99.982 0	99.974 0	99.972 0
线路可用系数/%	99.999	99.835 3	99.846 0	99.939 0	99.934 0
变压器强迫停运率/(次·百台年 <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0
线路强迫停运率/(次·百公里年 <sup>-1</sup> )	0.040	0.045	0.140	0.025	0.142
智能变电站座数比例/%	10.40	19.50	15.73	16.81	10.96
变电站综合自动化率/%	100	100	100	100	100
变电站土地资源裕度/%	55	57	53	47	35
线路走廊资源裕度/%	83	77	72	67	56

表2 指标权重计算结果

Tab.2 Calculation result of indexes weight

关键层	控制层		网络层	
	准则	权重	指标	权重
电网规模	0.209	0.209	单位变电支撑用电负荷	0.5
			单位线路支撑用电负荷	0.5
电网结构	0.171	0.171	变电容载比	0.361
			线路容载比	0.361
			电网连接度	0.278
220 kV 电网发展诊断指标体系	0.211	0.211	全网线路等效平均负载率	0.373
			全网主变等效平均负载率	0.373
			变电站土地利用效率	0.254
安全可靠性	0.118	0.118	短路电流超标母线节点占比	0.852
			综合电压合格率	0.148
			变压器可用系数	0.216
			线路可用系数	0.216
设备水平	0.096	0.096	变压器强迫停运率	0.224
			线路强迫停运率	0.224
			智能变电站座数比例	0.071
			变电站综合自动化率	0.049
外部环境	0.195	0.195	变电站土地资源裕度	0.65
			线路走廊资源裕度	0.35

表3 评价结果

Tab.3 The evaluation results

地区	评分
河南	82.147
湖北	78.412
山东	85.973
江苏	86.316
北京	73.295

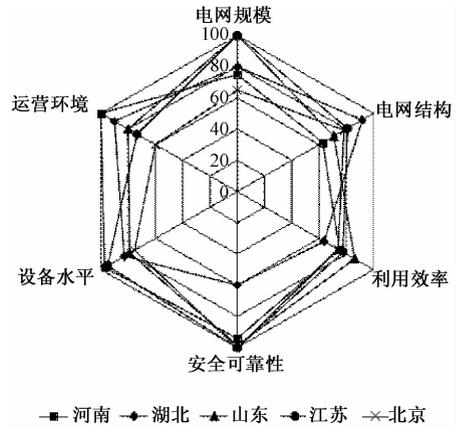


图4 5省电网发展诊断雷达图

Fig.4 Rader of five provinces power grid development diagnosis

于社会经济发展和负荷发展需求. 在发展过程中主要存在中心城区变电站数量不足、电力通道资源匮乏的紧张局面, 建议合理优化分区, 加强网络结构建设, 着重解决变电容量与负荷的空间分布不均和局部地区供电能力不足等问题, 提高电网运行水平. 安全可靠得分最高, 这是因为考虑到首都能源安全大局, 北京电网在发展过程中始终将安全可靠作为发展重心. 电网发展资源裕度从内部来看, 利用效率处于中等水平, 未充分利用已有设备容量, 设备重载和轻载现象同时存在. 下一步建议考虑增加轻载输变电设备负荷传输, 打通高、低容载比地区的电力传输通道, 同时考虑对部分变电站土

地资源利用效率较低的重载变电站采取合理紧凑的布置方式进行扩建以提高供电能力,并达到节约土地资源、提高土地利用效率的目的.从外部来看,运营环境得分最低,建设环境变化快,可供电网发展所利用的资源裕度较小,为了积极抢占变电站站址、电力管沟、线路廊道等稀缺资源,满足未来负荷飞跃发展的需求,建议该地区加强与政府规划部门协调,争取从政策上保障土地资源的可获得性,并加大 220 kV 电网投资力度,适度超前开展输变电工程建设.

## 4 结论

笔者结合电网发展特点,从电网自身及外部环境入手,选取电网结构、利用效率、安全可靠、设备水平、外部环境等指标,建立一套电网发展诊断指标体系,并提出相应的指标分析方法,形成电网发展综合诊断模型.通过电网发展诊断,研究电网发展现状,发现电网薄弱环节,寻找电网发展方向,并根据诊断结论制定针对性措施,以保证地区电网健康发展.

## 参考文献:

[1] 史智萍,单体华,刘文峰,等.地市级电网发展诊断

体系及综合评价[J].华侨大学学报(自然科学版), 2015,36(1):11-16.

- [2] 徐科,刘明志,张军,等.世界一流城市电网评价指标体系[J].电力建设,2015,36(11):51-57.
- [3] 李晓辉,张来,李小宇,等.基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J].电力系统保护与控制, 2008,36(14):57-61.
- [4] 卢建昌,王伟.基于熵权密切值法的配电网评估模型[J].华东电力,2013,41(5):1047-1050.
- [5] 岳云力,黄毅臣,韩锐.输电网规划综合评价指标体系研究[J].智能电网,2014,2(2):41-45.
- [6] 唐文左,梁文举,李媛媛,等.大型城市电网结构分析及其对重庆电网的启示[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(3):72-75.
- [7] 韩柳,庄博,王智冬,等.电网利用效率指标研究[J].华东电力,2011,39(6):850-854.
- [8] 徐敏,沈靖蕾,闫震山.电网规划的多层面协调性的综合评估方法研究[J].郑州大学学报(工学版), 2016,37(1):24-28.
- [9] 李金超,李金颖,牛东晓,等.基于 ANP 的电网企业运营能力评价模型研究[J].电力系统保护与控制, 2011,39(19):37-43.
- [10] 马旭东,杨东,聂瑞华,等.基于 AHP 方法的山区河道截流难度影响因素研究[J].水利水电技术, 2017,48(5):97-101.

## Research of the Index Model of Power Grid Development Diagnosis Based on ANP

WANG Zhengyang<sup>1</sup>, ZHAN Zhimin<sup>2</sup>, LUO Bin<sup>2</sup>, LIU Xingbo<sup>2</sup>, LI Yuanlin<sup>2</sup>, YE Lei<sup>2</sup>, CHEN Genyong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Hubei Central China Technology Development of Electric Power CO. LTD, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Followed the development law of power grid, the related index of the power grid development based on its own conditions and external factors to establish the diagnosis model by using ANP. By considering the energy, environment put forward, land and other resources on the development of power grid constraints, we innovative index was from the perspective of long-term development of the power grid. Considering the mutual connection and restriction between those indexes, use the model was used to diagnose the present situation and development space of the power grid development. Based on the example of diagnosis, the diagnosis model could guide the development direction of regional power supply, optimize energy structure, find the weak link in the development of power grid, evaluate the development space of grid, and grasp the development direction. It was a reasonable and feasible new type of power grid development diagnostic method.

**Key words:** power grid; development; diagnosis; ANP; index system