

基于层次分析法的智能电网运行状态指标体系设计

研究层次分析法在智能电网运行状态指标体系设计中的应用方法,首先确定电网运行状态指标体系的构建原则,利用层次分析法建立指标体系分层、分级的量化评估模型,其次通过判断矩阵检验指标体系的合理性,计算出各指标权重值,最终获得电网运行状态关键指标体系。从安全、优质、经济和环保4个维度设计并实现了覆盖电网发电、输电、配电及用电各个环节的电网运行状态指标体系,并在深圳电力系统运行驾驶舱的建设过程中得到了应用与验证,推进了电网运行评价指标由繁到简,由定性到定性与定量相结合的转变。

江伟¹ 宋鑫² 黄颖祺¹ 刘成³ 郝蛟¹ 张留留^{2/1}.深圳供电局有限公司 2.国网电科院国电南瑞科技股份有限公司 3.东南大学



江伟/高级工程师

0 引言

近年来,随着经济社会的快速发展,电网规模不断扩大,同时各种自然灾害、复杂故障等为电网在极端情况下的安全稳定运行带来了极大的挑战。在此背景下,研究并建立科学、客观的电网运行状态指标体系,对于准确及时感知电网状态、提高电网运行管理水平具有重要意义^[1-2]。

南方电网提出并实践的一体化电网运行智能系统(Operation Smart System, OS2)及其电力系统运行驾驶舱子系统(Power system Operation Cockpit, POC)是对电网运行状态指标体系的重要应用,其目的是深入分析电网运行特征,真实反映电网运行状态,进而提高

资助项目:南方电网一体化电网运行智能系统OS2
试点项目(090000GS61120012)。

运行人员对电网的操控能力^[3-4]。

然而,电网运行状态指标数量众多,如何建立合理的指标体系、分配相关指标权重,是一直困扰研究人员的重要问题。美国运筹学家A.L.Saaty提出的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)使用决策者的经验判断各目标的相对重要程度,最终得到各目标的权重,是一种解决多目标复杂问题的定性与定量相结合的决策分析方法^[5]。将层次分析法应用在电网运行状态指标体系设计中,可将复杂指标体系的构建过程模型化、数量化,并通过将复杂指标分解为若干层次和若干指标,在各指标之间进行简单的比较和计算,得出各指标的权重,为最终指标体系设计提供依据。

文献[6]建立了评价地区电网运行方式的指标体系,包括对供电可靠性、电能质量、经济性、短路电流、运行操作复杂度以及检修方式特性等7个方面的评价,但仅针对电网运行方式进行评价。文献[7]建立了初始递阶层次型配电网经济运行评价指标体系。

本文首先阐述了电网运行状态指标体系的构建原则,然后结合具体示例,着重描述基于层次分析法构建指标体系以及通过判断矩阵进行指标一致性检验的方法,并提出了指标权重计算方法,是一种通用的指标体系设计方法。

1 电网运行状态指标体系构建原则

指标是对基础数据的提炼与总结,通

关键词/Keywords

电网运行状态·
电力系统运行驾驶舱·
指标体系·
层次分析法·
指标权重·

过汇总、分析与挖掘基础数据反映的信息,揭示在不同数据主题下电网运行的整体状况。在电网运行状态指标体系设计时应遵循以下基本原则。

(1) 层次性

整个指标体系应具有丰富的层次感,分析指标与基础指标之间、分析指标与分析指标之间层次分明、架构清晰,能够一目了然地了解整个指标体系的结构、物理含义及管理理念,并满足电网运行不同层级管理人员对电网运行状态感知的需求。

(2) 规范性

指标的概念应明确清晰,具有严谨的指标定义和明确的物理意义;指标命名应具备良好的可读性和一致性,便于电网运行人员理解和掌握;所有基础指标应隶属于指标体系中某一明确的类别中;各种指标的计量单位遵循电力系统的惯例。

(3) 可靠性

指标应该有可靠的统计数据渠道,具有可操作性,对于暂时不能统计又十分必要的指标可先设置,随着电网业务系统的完善而后进行统计。

(4) 适度性

在每层指标的数量和指标的层次数量两个方面,分别找到各自的平衡点。立足于实际工作需要,分步实施、分期完善,避免片面追求理论先进性而导致“过度设计”,使整个指标体系既能全面体现科学性,同时尽可能减少在实际应用中,数据上报与统计计算的繁重工作量。

(5) 协调性

指标体系的各个指标,并不是完全孤立的,而是互为发展前提,互为因果,它们整体组成一个有机的评价体。在反映某一方面的特征时,可以通过不同指标相互补充。在设计指标体系时,应处理好不同数据主题等之间的逻辑关系,便于指标体系在实际工作中的任务分解与协作实施。

(6) 完整性

指标体系涵盖电网运行不同层面、不同维度、不同业务内容的各方面需求,不遗漏、不重复,点面俱到。

2 基于层次分析法的指标体系构建

层次分析法是一种主观赋权方法,其基本思想是将复杂的问题分解成若干元素,并按其支

配关系构建一个层次结构模型,然后应用两两比较的方法确定各元素之间的相对重要性,最终把问题归结为底层元素相对于顶层目标权重值的确定。因此,利用层次分析法建立电网全景指标体系,可以达到化繁为简的目的。

运用AHP方法,大体可分为以下几个步骤:

1)建立分层、分级的指标体系模型;

2)对同一层次各指标关于上一层中某一指标的重要性进行两两比较,构造两两比较的判断矩阵;

3)对判断矩阵进行一致性检验,保证指标模型的合理性;

4)由判断矩阵计算被比较指标对于该准则的相对权重。

2.1 建立层次指标体系模型

使用层次分析法建立分层、分级的指标体系,同一层的指标从属于上一层的指标或对上层指标有影响,同时又支配下一层的指标或受到下层指标的作用。最上层为目标指标层,通常只有一个因素,最下层通常为具体指标层,中间可以有一个或几个层次,通常为准则层。当每一层次过多时可进一步分解出子指标层,每一层次中各指标所支配的指标一般不超过9个,如果更多的话就增大了元素间比较的难度,并将影响模型的质量。因此需要根据已有指标的物理意义对其进行初步的分类。

下面建立一个简单的指标体系模型,后续计算基于此模型进行,如图1所示。

2.2 构造判断矩阵

在确定指标权重时,如果只是定性的结果,则难以被所有人接受,因此根据层次分析法理论,采用判断矩阵的方法计算权重。该方法不将所有指标放在一起比较,而是两两互相比,采用相对尺度,以尽可能地减少性质不同的指标相互比较的困难,以提高准确度。

层次分析法的一个重要特点就是用两两重要性程度之比的形式表示出两个指标的相应重要性程度等级。如对某一指标,对其下的所有指标进行两两对比,并按其重要性程度评定等级,并记录其重要性之比,表1列出9个重要性等级及其赋值:

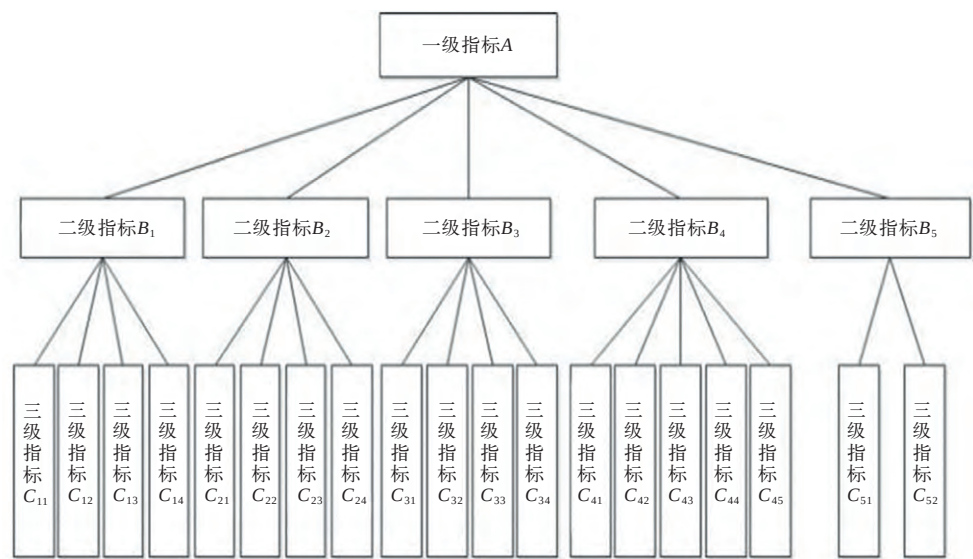


图1 指标体系模型

表1 判断矩阵的比例标度及含义

标度	含义
1	表示两个因素相比,同样重要
3	表示两个因素相比,一个比另一个稍微重要
5	表示两个因素相比,一个比另一个明显重要
7	表示两个因素相比,一个比另一个强烈重要
9	表示两个因素相比,一个比另一个极端重要
2,4,6,8	分别表示为相邻1-3,3-5,5-7,7-9的中值
倒数	若因素i与j比较得,则j与i比较得

按两两比较结果构成的矩阵称作判断矩阵,然后可构造两两比较评判矩阵A

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

以二级指标为例,指标B₂比指标B₁稍重要,B₃也比B₁稍重要,B₄比B₁明显重要,B₅比B₁强烈重要,得到判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1/7 \\ 3 & 1 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 5 & 3 & 3 & 1 & 1/3 \\ 7 & 5 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

以三级指标为例,指标C₁₁和C₁₂同等重要,C₁₃比C₁₁稍重要,C₁₄比C₁₁稍重要;指标C₂₁和C₂₂同等重要,C₂₃比C₂₁稍重要,C₂₄比C₂₁稍重要;指标C₃₂比C₃₁稍重要,C₃₃比C₃₁明显重要,C₃₄比C₃₁明显重要;指标C₄₁和C₄₂同等重要,C₄₃比C₄₁稍重要,C₄₄比C₄₁明显重要,C₄₅比C₄₁明显重要;指标C₅₂比C₅₁稍重要。同理可得矩阵

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/3 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 & 1 \\ 5 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 \\ 3 & 3 & 1 & 1/3 & 1/3 \\ 5 & 5 & 3 & 1 & 1 \\ 5 & 5 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 一致性检验

由于指标重要程度判断受主观因素影响,因此可能会出现类似下面的情况:三个元素A、B、C,其中A比B重要,C比A重要,但B比C重要,这

显然是矛盾。因此需要分析判断矩阵当前判断矩阵中是否存在自相矛盾的部分,即进行一致性检验。如果判断矩阵通过了一致性检验,那么就可以初步认为该矩阵是可靠的,否则,这组数据就不可靠,应当舍弃。

判断矩阵都是正互反矩阵 ($a_{ij}=1/a_{ji}$), 正互反矩阵的一致性检验需要用到如下数学定理: 如果一个正互反矩阵的元素满足 $a_{ij}a_{jk}=a_{ik}$, $i, j, k=1, 2, \dots, n$, 则称矩阵具有完全一致性。而 n 阶正互反矩阵是一致阵的充要条件是最大特征根。因此, 与矩阵维数的差值可以作为衡量一个正互反矩阵不一致程度的数量标准。

对于判断矩阵 A , 可以求得

$$\lambda_{\max} = 5.1269$$

$$CI_A = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.1269 - 5}{5 - 1} = 0.031725$$

虽然 CI 值能反映出判断矩阵 A 的非一致性的严重程度, 但未能指明该非一致性是否可以接受。因而在具体分析时, 还需要引入一个度量的标准, 即所谓随机一致性指标, 根据平均随机一致性指标 RI 来计算随机一致性比率: $CR=CI/RI$ 。一般而言, 当 $CR<0.1$ 时, 可认为判断矩阵基本符合随机一致性指标; 当 $CR\geq 0.1$ 时, 可认为判断矩阵 A 不符合随机一致性指标, 必需进行调整和修正, 使其满足 $CR<0.1$, 从而具有满意的一致性。

随机一致性指标 RI 和判断矩阵的阶数有关, 一般情况下, 矩阵阶数越大, 则出现偏离的程度越大。随机一致性指标的值需要通过查表获得, 由文献[3]得出的1阶~7阶重复计算1 000次的平均随机一致性指标见表2。

表2 随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.58	0.89	1.12	1.26	1.36

由表2得 $RI_A=1.12$, 那么随机一致性比例 $CR_A=CI_A/RI_A=0.0283<0.10$, 因此矩阵 A 具有满意的一致性。如果不满足一致性要求, 需要调整判断矩阵。

采用同样的方法处理其他矩阵, 其结果见表3。

表3 判断矩阵的一致性

判断矩阵	A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
最大特征值	5.126 9	4	4	4.043 5	5.055 6	2
CR	0.028 3	0	0	0.016 1	0.012 4	0

同理可得所有矩阵的 RI 均小于表2中对应的随机一致性指标。

2.4 计算各指标的权重值

为了从判断矩阵中提炼出有用信息, 达到对指标规律性的认识, 为决策提供出科学依据, 就需要计算判断矩阵的权重向量。一致性矩阵具有如下基本性质:

- 1) 存在唯一的非零特征值 $\lambda_{\max}=n$, 其规范化特征向量 $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 叫做权重向量, 且 $a_{ij}=W_i/W_j$;
- 2) 一致性矩阵的列向量之和经规范化后的向量, 就是权重向量;
- 3) 一致性矩阵的任一列向量经规范化后的向量, 就是权重向量;
- 4) 对一致性矩阵的全部列向量求每一分量的几何平均, 再规范化后的向量, 就是权重向量。

因此, 对于构造出的判断矩阵, 就可以求出最大特征值所对应的特征向量, 然后归一化后作为权值。根据上述定理中的性质2和性质4即得到判断矩阵满足一致性的条件下求取权值的方法, 分别称为和法和根法。

计算 B 层各指标权重分为三步:

首先, 计算判断矩阵 A 的每一行元素乘积, $M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}$, $i=1, 2, \dots, n$, 其中 n 是矩阵维数; 其次, 计算 M_i 的 n 次方根, $\bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i}$ 可以得到向量 $M_A=[0.3165, 0.7248, 0.7248, 1.7188, 3.4997]^T$; 最后, 将 $\bar{w}_i$ 标准化为

$$W_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j}$$

得到向量： $W_A=[0.045\ 3, 0.103\ 8, 0.103\ 8, 0.246\ 1, 0.501\ 1]^T$ ， W_A 为A的特征向量，同时也是权重向量。 W_A 各元素分别对应Bi的权重，即 $B_1=0.0453$ ， $B_2=0.1038$ ， $B_3=0.1038$ ， $B_4=0.2461$ ， $B_5=0.5011$ 。

然后，可用同样的方法计算C层各指标关于B层的排序权重，其计算结果见表4。

表4 C层的权重计算结果

	相对B层权重	相对A层权重
C_{11}	0.125 0	0.005 7
C_{12}	0.125 0	0.005 7
C_{13}	0.375 0	0.017 0
C_{14}	0.375 0	0.017 0
C_{21}	0.125 0	0.013 0
C_{22}	0.125 0	0.013 0
C_{23}	0.375 0	0.039 0
C_{24}	0.375 0	0.039 0
C_{31}	0.067 5	0.007 0
C_{32}	0.150 9	0.015 7
C_{33}	0.390 8	0.040 6
C_{34}	0.390 8	0.040 6
C_{41}	0.064 0	0.015 8
C_{42}	0.064 0	0.015 8
C_{43}	0.151 8	0.037 4
C_{44}	0.360 1	0.088 6
C_{45}	0.360 1	0.088 6
C_{51}	0.250 0	0.125 3
C_{52}	0.750 0	0.375 8

3 电网运行状态指标体系构建

经过对南方电网深圳供电局运行指标应用现状的广泛调研，通过对电网运行管理工作需求的深入发掘，以安全、优质、经济和环保为主题，覆盖发电、输电、配电和用电各环节，结合层次分析法的建模原则，建立电网运行状态指标体系。整个电网运行指标体系共分为3层，呈树形结

构，以各数据主题为核心形成4个指标集，在各指标集下根据评价需求划分成一系列指标子集，在各指标子集下进一步根据评估内容细分为各指标类，最终落实到具体单项评估指标上。

电网调度运行的首要任务是确保电网的安全稳定运行，因此安全指标集是电网运行指标体系的重中之重。该指标集从后评估、预警、实时监控三个方面出发，分别实现对电网调度运行安全水平的评价、对未来电网安全危险点的预防和对电网实时运行状态的监控。

优质指标集用于在电网调度运行过程中，为调度值班人员提供一些“所见即所得”的反映电网供电质量的特征指标。

经济指标集从时间维度上分为后评估和预测两个部分，分别反映电网运行经济效益的变化历史以及发展趋势。在后评估指标设计中不仅应实现对历史经济效益数据的科学统计，还着力分析影响电网运行经济效益的关键因素，并挖掘电网运行经济效益的可提高之处，从而推动电网经济运行的精益化管理。

环保指标集用于电网运行环保水平分析的常态管理机制，主要利用火电厂脱硫装置自动监测系统，评估各火电厂的脱硫执行情况。

4 层次分析法优缺点评价

使用层次分析法进行电网指标体系设计具备以下优点。

(1) 优越的体系架构

使用层次分析法设计指标体系，架构清晰，每一层指标的权重设置最后都会直接或间接影响到结果，不割断各个指标对最终指标的影响，而且在每个指标对最终指标的影响程度都是量化的。

(2) 定性与定量的有机结合

使用层次分析法设计指标体系，可以将定性与定量有机地结合起来，使复杂的指标体系分解，将思维过程数学化、系统化，便于人们接受，且能把多目标、多准则又难以全部量化处理的指标化为多层次单目标问题。计算结果简单明确，容易为决策者了解和掌握。

(3) 所需定量数据信息较少

层次分析法从评价者对评价问题的本质、要素的理解出发,比一般的定量方法更讲求定性的分析和判断。由于层次分析法是一种模拟人们决策过程的思维方式的一种方法,将判断各指标相对重要性的步骤留给大脑,只保留人脑对要素的印象,并化为简单的权重进行计算。这种思想能处理许多用传统的最优化技术无法着手的实际问题。

使用层次分析法进行电网指标体系设计有以下缺点:

(1) 不能为决策提供新方案

使用层次分析法设计指标体系,只能针对已有指标进行分析计算,无法根据已有指标挖掘潜在问题。如果已有指标设计不合理或缺乏某些指标,使用层次分析法无法推断出不合理之处或具体缺乏哪些指标。

(2) 无法完全满足个人需求

层次分析模拟人脑认识问题的方法,因此必然带有较多的定性色彩。每个人对指标的认识不同,而层次分析法只能将每个人的认识整合起来,其结果必然无法完全满足个人需要。

(3) 指标过多时计算量大,且权重难以确定

为保证指标体系的全面性,指标数量往往较多,这就意味着要构造层次更深、数量更多、规模更庞大的判断矩阵,从而造成计算困难。在对指标进行两两比较时,如果指标数量过多,那么对每两个指标之间的重要程度的判断则比较困难,甚至会对最终判断矩阵的一致性产生影响,而层次分析法里面无法指出判断矩阵里哪个元素出了问题。

5 结束语

本文所介绍的层次分析法在电网运行状态关键指标体系设计中具有结构清晰、量化简单、适应性强等优点,但也存在着权重设置过度依赖主观判断等缺点。

层次分析法在深圳电力系统运行驾驶舱的设计和实现过程中得到了实践、验证和归纳,对于电网运行状态指标体系设计的研究具有重要指导意义,基于层次分析法建立的指标体系可以指导运行人员深入分析电网运行特征、揭示关键运行

风险。

层次分析法在智能电网指标体系设计中的应用,是在深圳电力系统运行驾驶舱系统指标体系模块的设计和实现过程中进行总结、归纳所得到的,其设计思路适用性较广,可为智能电网指标体系的深入研究起到借鉴作用。

参考文献

- [1] 王彬,何光宇,梅生伟,等.智能电网评估指标体系的构建方法[J].电力系统自动化,2011,35(23):1-5.
- [2] 王智冬,李晖,李隽.智能电网的评估指标体系[J].电网技术2009(17):14-18.
- [3] 汪际峰.一体化电网运行智能系统的概念及特征[J].电力系统自动化,2011,35(24):1-6.
- [4] 汪际峰.南方电网一体化电网运行智能系统建设初探[J].南方电网技术,2012(02):1-4.
- [5] 许树伯.层次分析原理.天津大学出版社,1998.
- [6] 陈轩.地区电网运行评价指标体系及评价方法研究[D].上海交通大学,2012.
- [7] 卢志刚,马丽叶.配电网经济运行评价指标体系的建立[J].电网技术,2011,35(3):108-112.

(收稿日期:2015-05-15) EA

作者简介

江伟(1983-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为从事电力系统调度自动化方向的研究与应用工作。

宋鑫(1981-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为从事IEC 61970系列标准、电网模型拼接、电网KPI指标、商务智能等方向的研究与应用工作。