

# 应用 PCA-C<sup>2</sup>R 模型综合评判电网规划方案

刘佳<sup>1,2</sup>, 韦钢<sup>1</sup>, 吴伟力<sup>3</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 上海大学, 上海 200072; 3. 珠海供电局, 广东 珠海 519002)

**摘要:** 电网规划方案的综合评判是一项复杂的决策性工作, 同时也是一个解决不确定性问题的过程。将数据包络分析中的 C<sup>2</sup>R 模型与主成分分析法相结合, 构建 PCA-C<sup>2</sup>R 模型, 并建立了一套完整的电网规划方案综合决策方法, 对电网规划方案进行综合评判。根据本文给出的电网规划方案综合评判流程与综合决策方法对一个实际的电网规划实例进行了分析计算, 得到的结果与区间层次法和模糊层次法的结果一致。相比之下, 本文建立的方法计算过程更加简便, 更具客观性, 是一种评判电网规划方案的适用方法。

**关键词:** 电网规划; 综合评判; 数据包络分析; 主成分分析

## Comprehensive evaluation of power system planning based on PCA-C<sup>2</sup>R model

LIU Jia<sup>1,2</sup>, WEI Gang<sup>1</sup>, WU Wei-li<sup>3</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai University, Shanghai 200072, China;  
3. Zhuhai Power Supply Bureau, Zhuhai 519002, China)

**Abstract:** There is an associated complex problem in the procedure of comprehensive evaluation of power system planning. This paper first combines the C<sup>2</sup>R model, which is the basic model of the DEA method, with the PCA method to create the PCA-C<sup>2</sup>R model. Meanwhile, an integrated methodology of comprehensive evaluation is introduced. In a practical power system planning case, the same result is obtained by using PCA-C<sup>2</sup>R as other methods applied in comprehensive evaluation. By comparison, the whole theory proposed in this paper is much clearer and more objective, with simple and convenient calculation.

**Key words:** power system planning; comprehensive evaluation; data envelopment analysis; principal component analysis

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)20-0020-05

## 0 引言

电网规划作为电力工业中一个重要的环节受到广泛的重视与研究。在进行电网规划的过程中, 由于规划原理、技术线路、资金构成、运行维护等规划着眼点不同, 通常会给出若干个比较可行的规划方案以供评判和选择。而与以往电网规划只追求单一目标最优不同的是, 当今的电网规划是一个具有不确定性的、复杂的、多目标的、非线性的决策过程<sup>[1]</sup>。因此, 在判断哪一个方案最能满足网架结构的要求时, 就需要综合考虑供电可靠性、投资成本、适应性、环境保护等诸多因素, 对给出的几个电网规划方案做出一个科学、合理的评判。

在这些需要综合考虑的因素中, 有些因素如投资成本、网损率等是可以量化的确定性因素, 有些

因素如网架结构合理性、对环境的影响等是很难量化的不确定性因素, 这在一定程度上加大了电网规划方案综合决策的难度。可以说, 对电网规划方案的综合评判是一个解决不确定性问题的过程, 也是一项复杂的决策性工作。

目前可以选用的电网规划综合评判方法有层次分析法、模糊综合评价法等。但是单纯采用其中一种方法显然不能很好地解决综合决策问题。因此, 很多文献在这些方法的基础上或加以改进或引入新的理论, 对电网规划的综合决策问题进行探讨与研究。如: 文献[2]的模糊层次分析法, 文献[3]的区间层次分析法, 文献[4]的模糊优选决策方法, 文献[5]的模糊综合评判等。总的来说, 这些方法在很大程度上还是需要依靠决策者的主观判断, 而专家的判断是否符合实际, 对权重向量的计算与隶属函数的确定有很大的影响。

基于以上问题, 本文引入 PCA-C<sup>2</sup>R 模型, 将数

据包络分析法与主成分分析法结合, 较为客观地对电网规划方案进行评判。文中结合配电网规划的实例, 对应用 PCA-C<sup>2</sup>R 模型综合评判电网规划方案的方法进行验证, 表明该方法具有可行性。

## 1 PCA-C<sup>2</sup>R 模型 [6-8]

### 1.1 C<sup>2</sup>R 模型概述

数据包络分析 DEA (Data Envelopment Analysis) 是美国著名运筹学家 A.Charnes 和 W.W.Cooper 等学者, 以相对效率概念为基础发展起来的一种效率评价方法。该方法是使用数学规划模型比较决策单元 DMU (Decision Making Unit) 之间的相对效率, 对决策单元做出评价。

1978 年第一个 DEA 模型——C<sup>2</sup>R 模型建立。随后, 相关的理论研究不断深入发展。C<sup>2</sup>R 模型、BC<sup>2</sup> 模型、FG 模型和 ST 模型成为当今最具代表性的“经典”模型。随着 DEA 方法在实际生产过程中的广泛应用, 在基本模型 C<sup>2</sup>R 模型的基础上发展和派生出很多扩展 DEA 模型和综合 DEA 模型。但是 C<sup>2</sup>R 模型作为 DEA 方法中的基本模型, 是研究其他 DEA 模型的基础, 值得关注。因此, 本文引入 C<sup>2</sup>R 模型, 对电网规划方案进行综合评判。

### 1.2 PCA 概述

由于 C<sup>2</sup>R 模型只适用于判断某一决策单元是否 DEA 有效, 而无法对 DEA 有效的决策单元进行排序, 无法得到最优结果。因此有必要引入主成分分析 PCA (Principal Component Analysis) 这一概念。

主成分分析法广泛应用于经济、社会、科教、环保等领域中众多对象的评价和排序, 是一种研究如何将多指标问题化为较少的综合指标问题的方法。它是将其分量相关的原随机向量, 借助于一个正交变换, 转化成其分量不相关的新随机向量, 并以方差作为信息量的测度, 对新随机向量进行降维处理, 再通过构造适合的价值函数, 进一步把低维系统转化成一维系统。

值得注意的是, 主成分分析法中对于权重向量的赋值, 其源信息是来自于统计数据本身, 而不是专家的知识 and 经验, 因此具有客观性。

### 1.3 PCA-C<sup>2</sup>R 模型

传统的 DEA 模型在评价决策单元时总是强调单个被评价单元的优势, 使得不同的决策单元具有不同的评价基准, 影响了决策单元之间的可比性, 从而导致在实际计算过程中采用 C<sup>2</sup>R 模型对多个决策单元进行评价时会出现大量的决策单元都有效的

情况。而本文建立的 PCA-C<sup>2</sup>R 模型是先通过 C<sup>2</sup>R 模型判断出 DEA 有效的决策单元, 然后采用 PCA 方法对这些有效单元进行再排序, 从而很好地解决上述大量决策单元都有效的问题。具体模型及步骤如下:

1) 采用非阿基米德无穷小量 C<sup>2</sup>R 模型对决策单元进行有效性判断。

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \theta - \varepsilon(\hat{e}^T s^- + e^T s^-) \right\} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \\ s^+, s^- \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,  $\hat{e} = (1, 1, \dots, 1)^T \in R^m, e = (1, 1, \dots, 1)^T \in$

$R^s, x_j$  为第  $j$  个决策单元的  $m$  维投入向量,  $y_j$  为第  $j$  个决策单元的  $s$  维产出向量。 $x_0, y_0$  是被评价的某决策单元 DMU <sub>$j_0$</sub>  的投入、产出向量,  $\varepsilon$  为非阿基米德无穷小量, 实际应用中可取值为  $10^{-5}$ 。

当该模型最优解  $\lambda^0, s^0, s^{+0}, \theta^0$  满足:  $\theta^0=1$ , 并且  $s^0=0, s^{+0}=0$ , DMU <sub>$j_0$</sub>  为 DEA 有效。

2) 将得到的  $n$  个有效单元的输入数据  $x_{ij}$ 、输出数据  $y_{kj}$  标准化为  $\alpha_{ij}、\beta_{kj}$ , 使每类指标数据不超过 1:

3) 根据式(2)计算排序值。

$$\hat{\alpha}_i = \frac{\prod_{j=1}^n \alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \alpha_{ij}}, \quad \hat{\beta}_k = \frac{\prod_{j=1}^n \beta_{kj}}{\sum_{k=1}^s \prod_{j=1}^n \beta_{kj}} \quad (2)$$

式(2)中  $m、s$  分别为输入指标和输出指标数目。

4) 根据式(3)计算各决策单元的效率。

$$\theta_j = \frac{\sum_{k=1}^s \hat{\beta}_k \beta_{kj}}{\sum_{i=1}^m \hat{\alpha}_i \alpha_{ij}}, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

5) 对各决策单元的效率值  $\theta_j$  的大小进行排序,  $\theta_j$  数值越大的方案越优。

## 2 PCA-C<sup>2</sup>R 模型的应用

针对电网规划综合决策过程中出现的一些难题, 以及 PCA-C<sup>2</sup>R 模型的突出优点, 本文首次将该模型应用于电网规划综合决策中, 建立了起综合评判多属性多目标的电网规划方案的流程, 并形成了完整的综合评判方法。具体步骤流程如图 1。

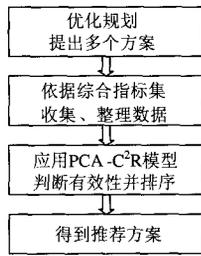


图 1 电网规划综合评判简单流程

Fig.1 Simple flow chart of comprehensive evaluation

### 2.1 建立综合指标集

评价主要包含两个要素，指标体系（属性集）和评价方法。其中，评价要素中的指标体系集需要满足层次性与多样性的要求。层次性表现为层析结构，从目标层、分支层到测度层；多样性则是根据评价客体、评价目的的不同，属性集也将不同<sup>[7]</sup>。

根据以上准则，在对电网规划方案进行综合评价时，分别以社会可行性、技术可行性和经济可行性三方面作为分支层，建立起含有 24 个具体属性要素的电网综合评价指标集，以全面反映电网规划方案中各属性要素。

表 1 电网综合评价指标集

Tab.1 Comprehensive evaluation index set

一级指标	二级指标	三级指标	序号	
经济可行性指标	投资总额		1	
		运行费用		
	高压网损率		2	
各分区中压网损率			3	
社会可行性指标	环境指标	规划区高压站总数	4	
		各分区变电站对城市环境的影响	5	
	适应性指标	负荷增长慢时经济性	6	
		各分区站点浪费情况	7	
		扩展性	上级站仓位裕量	8
			上级站对区外供电可能性	9
技术可行性指标	高压网	网架结构合理性	10	
		高压直供用户 T 接数	11	
		上级站停电影响范围	12	
		线路平均长度	13	
		线路条数	14	
		电压等级单一度	15	
		潮流分布合理性	16	
		最低电压水平	17	
		短路电流合理性	18	
		各分区中压网	网架结构合理性	19
	高压站个数		20	
	线路平均长度		21	
	潮流分布合理性		22	
			最低电压水平	23
		短路电流合理性	24	

### 2.2 数据收集与处理

#### 2.2.1 输入输出指标的选取

成功运用 DEA 的关键在于输入输出指标的正确选择<sup>[6]</sup>。我们视每个决策单元的输入与输出为“消耗的资源”和“生产的产品”，因此对输入输出指标的选取原则是：输入指标数据越小越好，而输出指标数据越大越好。如：电网规划方案中的投资总额应越小越好，归为输入指标数据；网架结构合理性量化为数据之后应越大越好，为输出指标数据。

#### 2.2.2 指标数据的处理

在综合评价指标集中既有定量数据，又有定性数据。其中定量数据不需要处理，保留原值即可。而定性数据多为模糊数据，难以量化处理。本文采用德尔菲法<sup>[13]</sup>对定性数据作以下处理：

将定性指标重要度分为 11 级，量值范围为 0~1.0；

表 2 定性数据量化度

Tab.2 Quantify degrees of qualitative data

不可比拟好 (多)	极端好 (多)	非常好 (多)	显著好 (多)	较为好 (多)	一般
1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
较差 (少)	显著差 (少)	非常差 (少)	极端差 (少)	无法形容差 (少)	
0.4	0.3	0.2	0.1	0	

需要注意的是，表 2 中“无法形容差（少）”对应的定性数据量化度为零，但是 DEA 模型中的输入、输出数据均要求大于零，因此在实际优化计算过程中取一个大于零且十分小的数字，实际计算时常取  $10^{-5}$ 。

1) 按表 2 的定性数据量化度，对初步拟定的综合决策指标进行匿名评议，并给出相应指标的重要度；

2) 根据专家人数和各专家给出的重要度，加权平均，得到的数值即为定性指标的量化值。

## 3 实例分析

### 3.1 实例简介

本文结合文献[2, 3]中的电网规划实例，对本文中拟建立起来的电网规划方案综合决策体系进行分析计算，以验证该决策方法的有效性。

规划区的电网规划简单概括为：全区（62 km<sup>2</sup>）高压配电网规划、核心区（7.43 km<sup>2</sup>）中压配电网规划及新镇一期（2.4 km<sup>2</sup>）中压配电网规划。

经过比较筛选，最终提出三套规划方案，方案一为 35 kV 方案，方案二为 110 kV 方案，方案三为

35 kV、110 kV 混合方案。

### 3.2 方案输入数据

输入指标有：投资总额、高压网有功网损率、各分区中压网有功网损率、高压直供用户 T 接数量、高压网线路平均长度、高压网线路条数、各分区中压网线路平均长度、规划区高压站总数目、各分区变电站对城市环境影响及各分区站点浪费情况。

输出指标有：上级站停电影响范围、高压网电压等级单一度、各分区高压站个数、高压网架结构合理性、各分区中压网架结构合理性、高压网最低点电压水平、各分区中压网若干最低点电压水平平均值、高压网短路电流是否超标、各分区中压网短路电流是否超标、高压网潮流分布合理性、各分区中压网潮流分布合理性、负荷增长较慢时经济性、上级站仓位裕量及上级站对区外供电可能性。

通过选取输入输出指标数据，并对取得的数据进行量化处理之后，得到该电网规划方案的全部输入数据，见表 3。

表 3 三方案的输入数据

Tab.3 Input data of the programs

	指标	方案 1	方案 2	方案 3	数据性质
输入指标	投资总额/万元	80895	76898	79710	定量
	高压网损率/%	0.980	0.680	0.730	定量
	新镇中压网损率 <sup>1</sup> /%	0.120	0.180	0.120	定量
	35 kV 直供用户	0.6	0.3	0.3	定性
	高压网线路平均长度/km	2.972	2.780	2.837	定量
	高压网线路条数	0.6	0.4	0.5	定性
	中压网线路平均长度 <sup>2</sup> /km	0.703	1.005	0.703	定量
	规划区高压变电站个数	47	24	28	定量
	对新镇环境影响 <sup>3</sup>	0.4	0.6	0.6	定性
	站点浪费情况 <sup>4</sup>	0.5	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	定性
输出指标	上级站停电影响范围	0.6	0.7	0.6	定性
	高压网电压等级单一度	0.7	0.6	0.4	定性
	新镇高压站个数 <sup>5</sup>	2	1	2	定量
	高压网架结构合理性	1.0	1.0	1.0	定性
	高压网最低电压水平	1.003	1.013	1.007	定量
	中压网最低电压水平 <sup>6</sup> /kV	10.471	10.473	10.475	定量
	高压网短路电流合理性	1.0	1.0	1.0	定性
	中压网潮流分布合理性 <sup>7</sup>	0.6	0.4	0.5	定性
	负荷增长较慢时经济性	0.6	0.4	0.5	定性
	上级站仓位裕量	0.2	0.6	0.5	定性
上级站对区外供电	10 <sup>-5</sup>	1.0	1.0	定性	

注：1~3、5~7：以新镇为代表，4：以核心区为代表，指标数据为 0 数值用 10<sup>-5</sup> 代替。

### 3.3 综合评价结果

根据表 3 方案的输入数据，结合 PCA-C<sup>2</sup>R 模型，计算得到该地区三个电网规划方案的效率值。具体结果见表 4：

表 4 综合评价结果

Tab.4 Results of comprehensive evaluation

	方案一	方案二	方案三
C <sup>2</sup> R 效率值	1	1	1
PCA-C <sup>2</sup> R 效率值	0.947	0.995	1.067
区间层次法可能度	0.233	0.379	0.389
模糊层次法可能度	0.244	0.265	0.491

### 3.4 结果分析

综合评价结果给出了单纯采用 C<sup>2</sup>R 模型计算出的结果，从结果中可以看出这三个规划方案均为 DEA 有效，因此仅采用 C<sup>2</sup>R 模型是无法评判哪一个方案更好。相对应地通过 PCA-C<sup>2</sup>R 模型计算得出的结果，则很容易判断规划方案三相比其他两个方案在投入、产出效率上更具优势。而这一结果与区间层次法和模糊层次法得到的结果是一致的，因此在实际电网规划决策中应选择方案三为推荐方案。

虽然采用区间层次法、模糊层次法和 PCA-C<sup>2</sup>R 模型这三种方法得到的结果是一致的，但是在整个决策过程中，PCA-C<sup>2</sup>R 模型是以决策单元各输入输出的权重为变量，不需要分别确定各指标在优先意义下的权重，从而避免了人为确定权重的问题；同时对于决策单元输入输出之间的某种关系，也不需要确定显式表达式，从而排除了很多主观因素；整个运算不需要建立对比矩阵和判断矩阵，计算上更加简单方便。因此，采用 PCA-C<sup>2</sup>R 模型从易于操作，计算量等方面具有很大的优势。

## 4 结论

本文应用 PCA-C<sup>2</sup>R 模型对电网规划方案进行综合评判，结合实际电网规划实例进行验证，取得了比较满意的结果，主要结论：

1) 建立了一整套属性要素比较科学、合理并能比较全面反映整个电网规划方案的综合评价指标集。

2) 建立了完整的基于 PCA-C<sup>2</sup>R 模型的电网规划方案决策的综合评判方法。

3) 对于综合评价指标集中的定性数据采用德尔菲法处理，有效地降低了个人偏好对决策造成的片面性，提高了数据的可靠性，使得整个决策方法有较强的客观性。

4) 本文提出的电网规划综合决策方法相比其他方法更加方便，且易于计算。对于实际电网规划

方案的综合决策具有很好的参考作用,是值得在电网规划领域推广应用的。

### 参考文献

- [1] 张文泉. 电力技术经济评价理论、方法与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
ZHANG Wen-quan. Power Technical & Economic Evaluation Theory, Method and Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 陈大字, 肖峻. 基于模糊层次分析法的城市电网规划综合评判[J]. 东北电力技术, 2003, (9): 5-14.  
CHEN Da-yu, XIAO Jun. Comprehensive Judgment of Policy Making for Urban Power Network Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Northeast Electric Power Technology, 2003, (9): 5-14.
- [3] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.  
XIAO Jun, WANG Cheng-shan, ZHOU Min. An IAHP-based MADM Method in Urban Power System Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.
- [4] 周任军, 徐志生, 杨洪明. 模糊优选在电网规划综合决策中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2): 23-26.  
ZHOU Ren-jun, XU Zhi-sheng, YANG Hong-ming. An Application of Multi-attribute Fuzzy Optimal Selection to the Evaluation of Grid Planning[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2005, 26(2): 23-26.
- [5] 黄武忠, 孔德明, 钟丹红, 等. 模糊综合评判在电网远期规划中的应用[J]. 供用电, 2001, 18(5): 7-9.  
HUANG Wu-zhong, KONG De-ming, ZHONG Dan-hong, et al. Application of Fuzzy Comprehensive Judgment in Long-term Network Planning[J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(5): 7-9.
- [6] 魏权龄, 岳明. DEA 概论与 C2R 模型-数据包络分析(一)[J]. 系统工程理论与实践, 1989, (1): 58-69.  
WEI Quan-ling, YUE Ming. Introduction of DEA and the CCR model-Data Envelopment Analysis(1)[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1989, (1): 58-69.
- [7] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
QIN Shou-kang. Theory and Application of Comprehensive Evaluation[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [8] 卢宗华. DEA 有效决策单元的排序方法[J]. 复杂巨系统理论·方法·应用, 1994: 334-338.  
LU Zong-hua. DEA Effective Decision-making Unit Sorting Method[J]. Complex Giant System Theory, Method and Application, 1994: 334-338.
- [9] 罗道平, 肖笛. 数据包络分析(DEA)在电力工业的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1996, (4): 60-66.  
LUO Dao-ping, XIAO Di. The Application of Data Envelopment Analysis(DEA) in Electric Power Industry[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1996(4): 60-66.
- [10] Pahwa A, FENG Xiao-ming, Lubkeman D. Performance Evaluation of Electric Distribution Utilities Based on Data Envelopment Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 400-405.
- [11] Seiford L M. Data Envelopment Analysis: the Evolution of State of the Art (1978~ 1995)[J]. Journal of Production Analysis, 1996, (7): 99-137.
- [12] Andersen P, Petersen N C. A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis[J]. Management Science, 1993, 39(10): 1261-1264.
- [13] 龙海明, 李花. 德尔非法及其在社科成果评奖中的应用[J]. 中国高校师资研究, 2006, (3): 27-32.  
LONG Hai-ming, LI Hua. Delphi Method and Its Application of Evaluation Results in the Social Sciences[J]. Chinese Colleges and Universities Teachers Research, 2006, (3): 27-32.

收稿日期: 2008-01-03

作者简介:

刘佳(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划, 电力系统运行分析; E-mail: diana630372@163.com

韦钢(1958-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行分析、配电系统规划、电力系统继电保护;

吴伟力(1980-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划, 电力系统经济技术分析等。

(上接第4页 continued from page 4)

WANG Bing, YOU Zhen-hua, HAN Xue-jun, et al. Steady-state Voltage Stability Analysis of Heavy Load Node Considering the Steady-state Load Characteristics[J]. Relay, 2007, 35(11): 21-25.

收稿日期: 2008-06-24

作者简介:

熊宁(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向是电网可靠性;

程浩忠(1962-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事电压稳定、电网规划、电能质量、电力市场等方面的教学科研工作。E-mail: chenghz@online.sh.cn