基于层次分析法的户内站配电装置布置的多层模糊综合评估系统

任 然[1]，田 甜[1]，喻雄飞[1]，陈俊丽[2]

（1. 重庆电力设计院有限责任公司，重庆 401121；2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400044）

摘要：户内站配电装置布置方式受占地面积及运行条件等多种因素的综合影响，但在实际设计过程中难以量化各因素的影响，从而确定最优布置方案。提出建立基于层次分析法的多层模糊综合评判的户内站配电装置布置方案评估系统。该系统综合占地面积、运维可靠性、经济造价和其他等因素建立配电装置布置方案评估体系，利用模糊统计法和模糊分布法确定各指标的隶属函数，通过各影响因素状态、模糊权重矩阵融合各评价因素的隶属函数，评估各层评价因素，综合得出配电装置设计方案的优劣。经实例分析表明，基于层次分析法的多层模糊综合评估模型可实现户内站配电装置布置方式优劣的准确有效评估，为配电装置布置方案的选择提供一定的参考。

关键词：层次分析法；模糊综合评估；户内站；配电装置布置；隶属度函数

A multi-level fuzzy comprehensive evaluation system based on AHP for distribution equipment layout of indoor stations

REN Ran[1], TIAN Tian[1], YU Xiongfei[1], CHEN Junli[2]

(1. Chongqing Electric Power Design Institute Co.,Ltd., Chongqing 401121, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

Abstract: The arrangement of distribution equipment of indoor stations is affected comprehensively by area, operating conditions and other factors, but in the actual design process, it is difficult to quantify the influence of various factors and determine the optimal arrangement. a distribution equipment layout evaluation system of indoor stations with multi-level fuzzy comprehensive evaluation based on analytic hierarchy process (AHP) is established . The work establishes a distribution equipment layout evaluation system considering area, operational reliability, economic cost and other factors. Fuzzy statistical method and fuzzy distribution method are used to determine the membership function of each indicator. By integrating the membership function of each evaluation factor, the status of each factor and the fuzzy weight matrix, the evaluation factors of each layer are evaluated and then the merits and demerits of the design of distribution equipment are obtained comprehensively. The example shows that the multi-level fuzzy comprehensive evaluation model based on the AHP can realize the accurate and effective evaluation of distribution equipment layout and provide reference to some extent for the selection of distribution equipment layout scheme.

Key words: analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; indoor stations; distribution equipment layout; membership function

10#技术版.indd 84 2019/10/11 16:32

0 引言

目前户内变电站配电装置布置方案的确定受主观因素影响较大，且尚未形成一种系统的研究方法，因此加强户内变电站配电装置最优布置方案系统的研究，一方面可以减小户内变电站占地面积，另一方面综合考虑占地面积、运维可靠性、经济造价和其他指标，可使配电装置布置方案更加科学、合理。

基于上述问题，本文在全面分析户内站配电装置布置方案设计影响因素的基础上，建立了大量综合参量的评估指标体系，结合层次分析法和模糊算法评估户内站配电装置的各布置方案的优劣，从而确定配电装置最优布置方案，为变电站最优配电装置布置方案的选择提供参考。

1 模糊综合评估模型的建立

模糊综合评判是对受多种因素影响的事物作出全面评价的多因素决策方法，大致分为4个步骤[1]。

1.1 因素集和评语集

因素集$\boldsymbol{X}=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$。记为：$\boldsymbol{x}_i=\{x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in}\}$，$x_i$中含有$n$个因素，$\boldsymbol{x}_{i1}=\{x_{i11}, x_{i12}, \cdots, x_{i1m}\}$，$\boldsymbol{x}_{i1}$中含有$m$个因素。$\boldsymbol{x}_i$为第一层评估因素，$x_{i1}$为第二层评估因素。评语集$\boldsymbol{V}=\{v_1, v_2,\cdots,v_n\}$。评语需按照实际情况分为多个维度。

1.2 权重系数的确定

根据实际运行经验和专家建议，采用层次分析法确定各因素的权重，确定影响配电装置布置的影响因素。根据专家经验，采用层次分析法对指标体系中处于同一评价目标下的两两因素成对比较，构造判断矩阵，判断矩阵最大特征值对应的特征向量为影响因素的常权重[2]。

1.3 确定指标层参量隶属函数

根据户内站配电装置布置方案评估指标体系中影响因素的特性差异，采用模糊统计实验法和模糊分布法相结合，确定指标层各参量隶属度函数[3]。

（1）模糊统计试验法

户内站配电装置布置方案评估参量中存在难以量化的静态数据，例如安装难度、运行可靠性、维修难度、操作便捷性和安全性、厂商生产难度及扩建的可能性等，针对此类参量需采用模糊统计实验法确定隶属度。邀请专家对参量的各种状态进行评语打分，隶属度计算公式为

$$\text{隶属度}=\frac{\text{认为因素}i\text{属于第}j\text{评语的人数}}{\text{参加评定的专家人数}} \quad (1)$$

（2）模糊分布法

定量指标采用模糊分布法确定隶属函数。根据现场人员积累的实践经验和配电装置特性，确定配电室水平占地面积和建筑高度，配变电造价、建筑及占地面积造价等定量指标选用抛物线型分布函数，如图1所示。

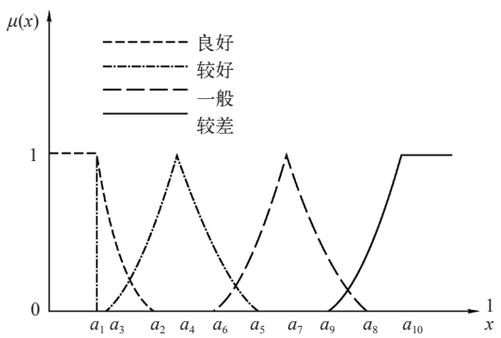


图1 抛物线型隶属函数分布图

Fig. 1 Parabolic distribution of its membership function

各参量属于各等级的隶属度计算公式如下。

良好等级隶属函数为

$$r(x)=\begin{cases}1 & x<a_1\\ \left(\dfrac{a_1-x}{a_2-a_1}\right)^k & a_1\leqslant x\leqslant a_2\\ 0 & x>a_1\end{cases} \quad (2)$$

较好等级隶属函数为

$$r(x)=\begin{cases}0 & x<a_3, x\geqslant a_5\\ \left(\dfrac{x-a_3}{a_4-a_3}\right)^k & a_3\leqslant x<a_4\\ \left(\dfrac{a_5-x}{a_5-a_4}\right)^k & a_4\leqslant x<a_5\end{cases} \quad (3)$$

10#技术版.indd 85 2019/10/11 16:32

一般等级隶属函数为

$$r(x)=\begin{cases}0 & x<a_6,x\geqslant a_8\\ \left(\dfrac{x-a_6}{a_7-a_6}\right)^k & a_6\leqslant x<a_7\\ \left(\dfrac{a_8-x}{a_8-a_7}\right)^k & a_7\leqslant x<a_8\end{cases} \tag{4}$$

较差等级隶属度函数为

$$r(x)=\begin{cases}0 & x<a_9\\ \left(\dfrac{x-a_9}{a_{10}-a_9}\right)^k & a_9\leqslant x\leqslant a_{10}\\ 1 & x>a_{10}\end{cases} \tag{5}$$

指标层参量通过隶属函数生成评判矩阵

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m}\\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm}\end{bmatrix} \tag{6}$$

1.4 模糊算子综合评估及评估结果分析

一般模糊综合评估模型为

$$V=A^{\circ}\boldsymbol{R} \tag{7}$$

式中，A为变权权重；$\boldsymbol{R}$为隶属值；V为评判结果；“$^{\circ}$”表示模糊运算。

根据模糊运算规则可知$v_j=\sum_{i=1}^{n}a_i r_{ij}$，采用最大隶属度分析评估结果向量，即设模糊综合评价结果向量为$\boldsymbol{V}=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$，则配电装置布置方案总体隶属于第$r$等级，$v_r=\max\{v_j\}$，$j=1,2,\cdots,m$[2-6]。

2 建立户内站配电装置布置方案评估系统

户内站配电装置布置方案评估，需对属于不同层次和类别的对象进行综合分析。为充分发挥每个参量的作用，采用多层模糊综合评估法建立户内站配电装置布置方案状态评估模型。

2.1 建立评估参量的因素集和评语集

根据户内变电站配电装置自身特点及运行要求，本文从占地面积、运维可靠性、经济造价和其他因素4个方面选择状态参量作为评估因素，建立多层配电装置布置方案综合评估指标体系，如图2所示。该指标体系由4个评估项目组成：$\boldsymbol{X}=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，其次划分各评估因素的子指标。

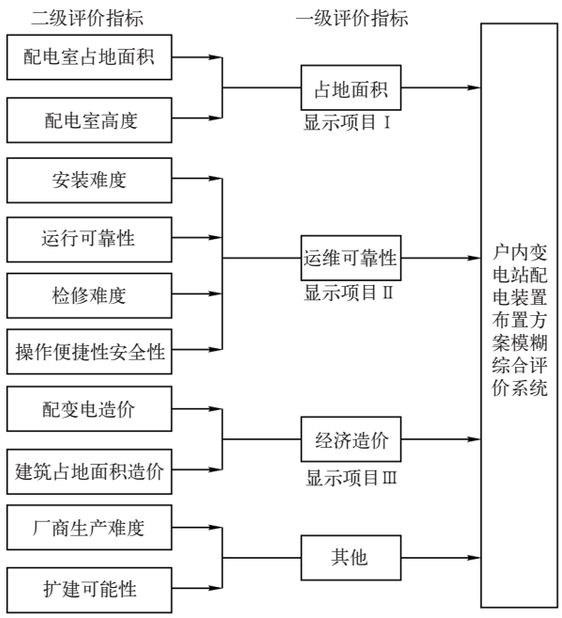


图2 户内站配电装置布置方案评估指标体系

Fig. 2 Condition evaluation indices system

确定评估参量因素集后，进行各因素等级的划分。等级数过多易导致评价结构分散，计算难度加大；等级数过少难以准确界定其运行状态。结合配电装置布置方案实际运行情况，将户内变电站配电装置评估状态划分为“良好，较好，一般，较差”4种维度，即评语集为$\boldsymbol{V}=\{v_1,v_2,v_3,v_4\}$。

2.2 确定配电装置布置方案各层参量权重

根据层次分析法权重评定原则，邀请4位配电装置设计经验丰富的专家，采用1～9标度确定评价指标体系中各要素的相对重要性，综合4位专家的评估结果，评估指标X_1～X_4的权重分配如表1所示，其他参量的权重分配类似。

表1 专家对项目层指标的权重分配表

Tab. 1 Weights of project layer index assigned by experts

	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	1	2	3	4
X_2	1/2	1	2	3
X_3	1/3	1/2	1	2
X_4	1/4	1/3	2	1

10#技术版.indd 86 2019/10/11 16:32

计算常权重是采用层次分析法构建评判矩阵，求出矩阵的最大特征值及其对应的特征向量。根据专家建立的评判矩阵，求得各指标权重如表2所示。

表2 评估指标权重

Tab. 2 Weights of every index

指标	特征值	下层指标权重$w_i^{(0)}$
X	3.942	（0.523 4，0.234 2，0.131 1，0.111 3）
X_1	2.00	(0.75，0.25)
X_2	3.032 4	(0.030 6，0.631 4，0.249，0.089)
X_3	2.00	(0.4，0.6)
X_4	2.00	(0.6，0.4)

2.3 确定指标层隶属函数

2.3.1 确定定性指标隶属度

户内变电站配电装置评估参量中安装难度、运行可靠性、维修难度、操作便捷性和安全性、厂商生产难度及扩建的可能性为定性指标，其量化数据由专家结合布置方案及生产技术评估获得，即需采用模糊统计试验法确定其隶属度。邀请10位专家填写调查表，以确定各因素隶属度，从而得到单因素评判矩阵，计算公式见式（2）。

2.3.2 确定定量指标隶属函数

（1）原始参量归一化处理

由于户内变电站各评估指标的原始参量本质属性和量纲各不相同，为消除量纲的影响同时满足隶属函数变量取值范围，需对原始参量进行归一化处理转化到（0,1）。

对于越小越优型和越大越优型指标，计算公式分别为

$$f(x)=\exp\left(\frac{x-b}{b}\right) \tag{8}$$

$$f(x)=\exp\left(\frac{b-x}{b}\right) \tag{9}$$

式中，$f(x)$为隶属函数自变量；x为参量原始数据；b为规程中规定的阈值。

例如户内变电站占地面积根据建设条件中规划占地面积的规定，配电装置室占地面积不超过950 m^2，即户内变电站配电装置占地面积指标的归一化函数为

$$f(x)=\exp\left(\frac{x-950}{950}\right) \tag{10}$$

（2）确定隶属函数

配电装置布置方案评估参量中，配电室水平占地面积、配电室建筑高度，配变电造价、建筑及占地面积造价，采用模糊分布法中的抛物线函数确定隶属函数，以准确反映参量与隶属度非线性变化关系，专家根据自身经验确定图1中抛物线分布函数在4种状态等级的模糊分界区间，统计结果如表3所示。利用式（10）进行归一化处理，各等级对应的占地面积的隶属分布如图3所示。

表3 专家评价配电室占地面积对应的状态

Tab. 3 Experts evaluate the corresponding state of the area of distribution room

专家	配电装置占地面积（m^3）对应的状态			
	良好	较好	一般	较差
1	400	450	570	860
2	480	498	690	920
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	200	600	700	950
范围	0～480	450～600	570～700	680～950

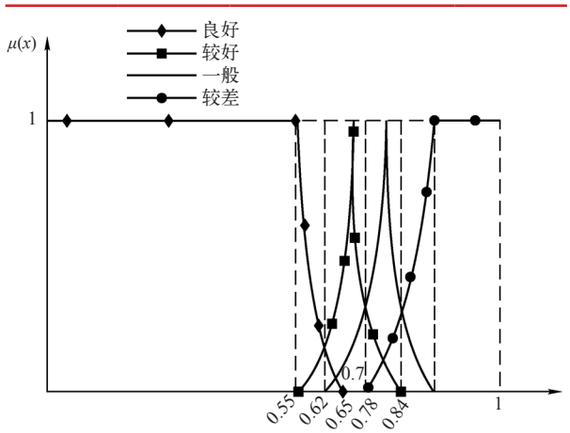


图3 配电装置占地面积隶属函数分布

Fig. 3 Subordinate function distribution of area covered by distribution devices

由图3可知，$0\leqslant f(x)<0.55$区间属于良好状态；$0.55\leqslant f(x)<0.62$区间属于良好和较好两种模糊状态；$0.62\leqslant f(x)<0.65$区间属于良好、较好和一般三种模糊状态；$0.65\leqslant f(x)<0.7$区

10#技术版.indd 87 2019/10/11 16:32

间属于较好和一般两种模糊状态；$0.7 \leqslant f(x) < 0.78$区间属于较好、一般和较差三种模糊状态；$0.78 \leqslant f(x) < 0.84$区间属于一般和较差两种模糊状态；$0.84 \leqslant f(x) \leqslant 1$区间属于较差状态。户内站配电装置室占地面积指标对应于4种状态的隶属函数如表4所示。同理可得到其他定量参量的隶属函数。

表4 配电室占地面积隶属函数

Tab. 4 Subordinate function of area occupied by distribution room

评语	配电室占地面积	
良好	$r(f(x))=$	1 $f(x)<0.55$ $(\frac{0.65-f(x)}{0.15})^2$ $0.55 \leqslant f(x) < 0.65$ 0 $f(x) \geqslant 0.65$
较好	$r(f(x))=$	$(\frac{f(x)-0.55}{0.1})^2$ $0.55 \leqslant f(x) < 0.62$ $(\frac{0.78-f(x)}{0.15})^2$ $0.62 \leqslant f(x) < 0.78$ 0 $f(x)<0.55, f(x) \geqslant 0.78$
一般	$r(f(x))=$	$(\frac{f(x)-0.62}{0.15})^2$ $0.62 \leqslant f(x) < 0.7$ $(\frac{0.84-f(x)}{0.15})^2$ $0.7 \leqslant f(x) < 0.84$ 0 $f(x)<0.62, f(x) \geqslant 0.84$
较差	$r(f(x))=$	0 $f(x)<0.7$ $(\frac{f(x)-0.7}{0.2})^2$ $0.7 \leqslant f(x) < 0.84$ 1 $f(x) \geqslant 0.84$

3 户内站配电装置布置方案评估结果分析

针对一进出线回路数一定的户内变电站设计了3种出线布置方案，分别为水平出线布置方案、品字出线方案和正反品字出线方案，其中方案3各定量指标配电室水平占地面积为430 m^2，配电室建筑高度为7 m，配变电造价为1 258万元，建筑及占地面积造价为179万元[7-10]。

根据上述信息及专家评估各定性指标，各参量的量化结果如下：X_1=(0.813，0.368)，X_2=(0.61，0.55，0.3，0.43)，X_3=(0.984，0.936)，X_4=(0.4,0.6)。

以运维可靠性X_2为例，分析在变权模式下对各项目进行评估的过程，得到其在各评语集下的权重。计算可得各子指标在各评语集的隶属度为：$\boldsymbol{R}_{X_{21}}$=(0.7 0.3 0 0)，$\boldsymbol{R}_{X_{22}}$=(0.75 0.25 0 0)，$\boldsymbol{R}_{X_{23}}$=(0.68 0.21 0.11 0)，$\boldsymbol{R}_{X_{24}}$=(0.65 0.25 0.1 0)。

将上述计算结果代入式（7）可得

$$\boldsymbol{R}_{X_2}=A_{X_2}\circ\begin{pmatrix}\boldsymbol{R}_{X_{21}}\\ \boldsymbol{R}_{X_{22}}\\ \boldsymbol{R}_{X_{23}}\\ \boldsymbol{R}_{X_{24}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.0306\\ 0.6314\\ 0.249\\ 0.089\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\circ\begin{pmatrix}0.7 & 0.3 & 0 & 0\\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0\\ 0.68 & 0.21 & 0.11 & 0\\ 0.65 & 0.25 & 0.1 & 0\end{pmatrix}$$

$$=(0.722\quad 0.3942\quad 0.036\quad 0) \tag{11}$$

按照上述方法，计算另外4个方面参量评判矩阵结果及GIS评估结果为：$\boldsymbol{R}_{X_1}$=(0.892 0.108 0 0)，$\boldsymbol{R}_{X_3}$=(0.784 2 0.215 8 0 0)，$\boldsymbol{R}_{X_4}$=(0.672 0.246 0.082 0)。

$$V_X=A_X\circ\begin{pmatrix}\boldsymbol{R}_{X_1}\\ \boldsymbol{R}_{X_2}\\ \boldsymbol{R}_{X_3}\\ \boldsymbol{R}_{X_4}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.5234\\ 0.2342\\ 0.1311\\ 0.1113\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\circ\begin{pmatrix}0.892 & 0.108 & 0 & 0\\ 0.722 & 0.3942 & 0.036 & 0\\ 0.7842 & 0.2158 & 0 & 0\\ 0.672 & 0.246 & 0.082 & 0\end{pmatrix}$$

$$=(0.8136\quad 0.2045\quad 0.0175\quad 0) \tag{12}$$

经向量标准化后可得

$$=(0.7856\quad 0.1975\quad 0.0169\quad 0)$$

根据上述评估计算结果可知，在最大隶属度原则下，该正反品字形配电装置布置方案评估等级为“良好”，同理求得水平布置方案、品字形布置方案分别在各评语下的隶属度为(0.322 8，0.277 4，0.399 8，0)，(0.432 5，0.522 8，0.044 7，0)，即评语分别为“一般”，“较好”。通过3种布置方案评估分析可知，正反品字型布置方案为最优布置方案。后期在实际建设及运行中证明，综合各指标，正反品字布置方案为最优布置方案，具有占地面积小、运维可靠性高及经济造价低等优点。因此可知，将多层模糊综合评判模型用于户内站配电装置设计方案状态评估，可为配电装置最优布置方案的选择提供一定的参考。

4 结束语

现阶段户内站配电装置布置方案的选择主

10#技术版.indd 88 2019/10/11 16:32

要以经验为主，一般某一因素显著性较强，解决了布置方案选择的科学性问题，提出结合配电装置布置方案影响因素，建立户内站配电装置布置方案多层模糊综合评估模型。实例分析表明，建立的户内站配电装置多层模糊综合评估模型，可实现户内站配电装置最优布置方案的选择，为设计人员选择最优方案提供参考依据。

参考文献

[1] 陆国俊，黄炎光，覃煜，等．基于电力设备状态评价体系的GIS状态评估方法[J]．南方电网技术，2014，8(1)：70-74．
LU Guojun，HUANG Yanguang，QIN Yu，et al．A condition assessment method of GIS based on the condition assesment and risk management system of electrical equipment[J]．Southern Power System Technology，2014，8(1)：70-74．

[2] 陈朋永，宋晓磊，陈云飞，等．SF_6高压断路器运行状态模糊综合评估[J]．高压电器，2016，52(3)：171-176．
CHEN Pengyong，SONG Xiaolei，CHEN Yunfei，et al．Fuzzy comprehensive evaluation on the operation condition of SF_6 high voltage circuit breaker[J]．High Voltage Apparatus，2016，52(3)：171-176．

[3] 蒋兵．GIS在220 kV配电装置中的布置方案研究[J]．电网与清洁能源，2014 (5)：26-30．
JIANG Bing．Research on GIS in 220 kV distribution equipment layout plan[J]．Power System and Clean Energy，2014 (5)：26-30．

[4] LI Junhong，TIAN Zhenghong．Intuitionistic fuzzy comprehensive evaluation in decision-making problem[C]．2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery，2010：203-206．

[5] CHEN Juan．A flexible fuzzy comprehensive evaluation method[C]．2010 Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics，2010：502-506．

[6] 郭日彩，许子智，徐鑫乾．220 kV和110 kV变电站典型设计研究与应用[J]．电网技术，2007，31(6)：23-30．
GUO Ricai，XU Zizhi，XU Xinqian．Research and application of typical design for 220 kV and 110 kV substations[J]．Power system Technology，2007，31(6)：23-30．

[7] 丁浩寅，邰能灵，崔新奇，等．基于粒子群算法的变电站室内GIS高压配电装置设计[J]．电力科学与技术学报，2010，25(4)：64-70．
DING Haoyin，TAI Nengling，CUI Xinqi，et al．Design of indoor high voltage GIS equipment for substation based on particle swarm optimization[J]．Journal of Electric Power Science and Technology，2010，25(4)：64-70．

[8] 于国梅，史卓鹏，罗炜．基于国家电网通用设计方案的220 kV户内变电站总平面布置的优化[J]．山西电力，2017 (1)：15-18．
YU Guomei，SHI Zhuopeng，LUO Wei．General layout optimization of 220 kV indoor substation based on general design scheme of state grid corporation[J]．Shanxi Electric Power，2017 (1)：15-18．

[9] 张鹏程．110 kV智能GIS变电站设计与运维分析[D]．西安：西安理工大学，2016．
ZHANG Pengcheng．Design and operation of 110 kV smart GIS substation[D]．Xi'an：Xi'an University of Technology，2016．

[10] 郑杰．全户内变电站的设计与创新应用[D]．济南：山东大学，2012．
ZHENG Jie．The indoor substation design and innovative application [D]．Jinan：Shandong University，2012．

作者简介



任 然

任然（1986－），男，硕士研究生，工程师，从事变电一次设计工作。

(收稿日期：2019－03－07)EA

10#技术版.indd 89 2019/10/11 16:32