

基于熵权理论的FAHP模型在城市配电网建设评价中的研究与应用

于国康¹,余金¹,高贵亮¹,余中平¹,鲜龙²,李永清³

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院,新疆乌鲁木齐 830002;

2. 兰州理工大学,甘肃兰州 730050;3. 国网甘肃省电力公司白银供电公司,甘肃白银 730900)

摘要:随着电力负荷和线路不断增加,城市配电网面临诸多生产压力和设备问题,电网企业经常通过实施城市配电网自动化系统来解决上述问题;但由于其建设项目运行指标复杂,所以一般的评价方法难以准确给出评判结果。针对这一问题,提出了基于熵权理论的模糊层次项目综合评价模型。通过在具体电网中应用该评价模型,验证了其可行性和有效性,能够为实际配电网项目建设提供有效的评价方法和决策参考。

关键词:配电网自动化;评价;熵权理论;模糊层次评价法

中图分类号:TM7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0029-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210107

Research and Application of FAHP Model Based on Entropy Weight Theory in Evaluation of Urban Distribution Network Construction

Yu Guokang¹, Yu Jin¹, Gao Guiliang¹, Yu Zhongping¹, Xiang Long², Li Yongqing³

(1. State Grid Xingjiang Economic Research Institute, Urumqi 830002, Xingjiang, China;

2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

3. State Grid Baiyin Electric Power Supply Company, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract: With the continuous increase of loads and lines, urban distribution networks are facing many production pressures and equipment problems. Power grid companies often implement urban distribution automation systems to solve these problems. However, due to the complex operation indicators of their construction projects, it is difficult to give the judgment result accurately by general evaluation methods. Aiming at this problem, a fuzzy hierarchical project comprehensive evaluation model based on entropy weight theory is proposed. Through the application of the evaluation model in specific power grids, its feasibility and effectiveness have been verified, and it can provide effective evaluation methods and decision-making references for actual distribution network project construction.

Key words: distribution automation; evaluation; entropy weight theory; fuzzy hierarchy evaluation

0 引言

中国的城镇化在不断推进,因此城市配电网的供电负荷大小和供电线路长度也在不断增加。同时,由于城市配电网所处的环境开始不断地恶化,越来越多的配电网设备逐渐出现损坏和故障。为了解决上述问题,电网企业普遍采用建设配电网自动化系统的方式来提升城市配电网供电可靠性与运维管理水平等运行指标。但是,目前配电网自动化系统项

目建设还没有成熟的评价理论和方法,相关的量化分析评价研究也较少。现采用的城市配电网建设项目后评价方法普遍存在指标单一的问题,且其最终结论也依赖于一些定量指标。但与城市配电网自动化系统运行相关的各类指标表现出数量多、层次多、类型化的特点。因此,需要通过对上述指标进行全面的评价,才能将配电网自动化系统建设项目的实际成效定量地反映出来,从而给电力企业和投资方提供决策依据^[1]。

综合评价方法种类较多,其中模糊层次分析法

(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)^[2-5] 是工程人员最常采用的一种,它能够有效地处理模糊和不确定性问题,通过对建设项目指标进行打分来定量描述其运行成效,可以消除工程人员非客观判断影响^[1,6]。FAHP 在应用当中能够较好地体现工程人员对不确定性的一种模糊评判^[7],但它却无法量化表示专家的主观经验和评价结论。

针对 FAHP 的不足,基于熵权理论基本原理,提出了一种熵权法与模糊层次法相结合的综合评价模型^[6]。该模型需要计算评价指标的权重,同时对专家的评价结论进行量化,并以此来体现工程人员的主观判断,从而从定性和定量两方面确定结论与结论之间的区别^[8]。

1 模糊层次分析法和熵权法的基本原理

1.1 模糊层次分析法

设对被评价指标有影响的因素集合为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$, 其中每一种因素 u_i 共有 n 种情形, 其集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。集合 U 的子集实质上为模糊权重向量 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 体现了所评价指标不同的重要性; 集合 $U \times V$ 则是一个 $m \times n$ 阶矩阵, 定义为模糊关系评价矩阵 R 。通过对 U 和 $U \times V$ 进行模糊计算, 可以得出模糊子集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \in V$ 。由此可以知道, 模糊综合评价方法其实质就是, 首先构建能够代表各个指标权重大小的向量 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \in F(U)$, 然后找到一个能够实现集合 U 到集合 V 模糊变换的 $f(u_i)$, 即找到一个能够对集合 U 的每个元素 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 做出独立判断的向量, $f(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \in F(V)$, 再通过集合 U 和集合 V 构造模糊关系矩阵 $R = |r_{ij}|_{m \times n} \in F(U \times V)$, 其中, 指标因素 u_i 具有评价 v_j 的程度, v_j 是集合 V 的元素, 表示对被评价指标有影响的第 j 种状态。至此, 便可以求出模糊子集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \in F(V)$, 它即为最终的综合评价结果, 其中 b_j 表示其对 B 的隶属度。

1.2 熵权法^[6]

熵权法主要是通过计算所评价对象不同指标体系的熵值 H , 从而得到相应的权重大小 w_i , 熵值 H 的具体表达式为

$$H = -\frac{1}{\lg k} \sum_{i=1}^k w_i \lg w_i \quad (1)$$

在具体工程项目中, 评价对象的指标特性有所不同, 它们所包含的二级指标也需要考虑权重分布, 这就要求工程人员在实际使用时需要对多级指标的权重进行考察。通过对每个最低等级指标的分析, 权重的确定, 采用由低到高的方式, 依次计算各级评价指标对应的权重分布, 最终得到整个指标体系的总体权重分布情况。通过上述分析可知, 熵值范围为 $0 \leq H \leq 1$ ^[8]。

1) 若 H 接近于 1

若指标体系中 $k (k \neq 0)$ 个评价指标且权重相等, 即 $w_i = 1/k_i$, 此时熵值 H 恒为 1, 即:

$$H = -\frac{1}{\lg k} \times \left(k \times \frac{1}{k}\right) \times (-\lg k) = 1 (k \neq 0) \quad (2)$$

由熵权理论的基本原理可知, 当 $H = 1$ 时, 指标体系中的各个指标权重分布相同, 且与指标体系中的度量值相等; 若 $H \approx 1$, 指标体系中各个指标的指数近似相等, 这在评价实际工程时很少发生。由于每个指标的选取存在联系, 所以当 $H \approx 1$ 时, 说明各指标不是相互独立的, 这也说明评价指标体系的建立不够准确。

2) 若 H 接近于 0

当指标体系中只有某一指标的权重为 1, 其余都为 0, 此时熵值 H 为

$$H = -\frac{1}{\lg k} \log_k 1 = 0 (k \neq 0) \quad (3)$$

当 $H \approx 0$ 时, 说明指标体系的极少数指标的权重分布很大, 这就使得在评价其他不太重要的指标时出现较大误差, 由于这种情况在评价过程中并不常见, 所以这也说明此时建立的评价指标体系也不够准确。

3) 若 H 介于 0~1 之间

当 H 在 0~1 之间时, 说明指标体系的权重分布情况是与实际比较相符。此时, 所建立的指标体系具有了明显的层级优势, 这也体现了指标体系的结构层次性, 从而可以使用熵权方法来对评价指标进行量化^[9]。

2 改进 FAHP 评价模型

2.1 选取评价标准

为了提高评价的准确性、有效性和客观性, 需要

根据实际配电自动化工程的实施特点,选择科学合理的评价标准,这就要求首先要考虑各个方面对工程运行有影响的因素,其次便是工程人员的运行经验。设专家选择的指标数为 m ,专家总数为 M ,则由前面对模糊层次模型的分析可知隶属度 d 为

$$d = \frac{m}{M} \quad (4)$$

在选择和确定评价标准时,需要通过 10 位专家根据不同评价等级来确定相应的评价得分,同时考虑到中国配电自动化工程建设评价体系的研究现状,还需要借鉴其他行业相关做法来建立标准,具体如表 1 所示。

表 1 所建立的评价标准及其说明

等级	标准	说明
优	0.8 ~ 1.0	好,可以
良	0.6 ~ 0.8	良好,可以
中	0.3 ~ 0.6	一般,不确定
差	0 ~ 0.3	差,不可以

2.2 构建评估矩阵

已知模糊关系评价矩阵 $R = U \times V$,根据建立的评价标准和计算得到的 d ,可以求出评价矩阵 R 为

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.3 计算矩阵 R 中每一个指标权重^[6]

在 $m \times n$ 个评价指标中,第 i 个评价指标的熵值为

$$H_i = -\frac{1}{\lg m} \sum_{j=1}^m r_{ij} \lg r_{ij} \quad (6)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。从而,对于第 i 个指标来说,它的熵权即为 w_i ,可定义为

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \quad (7)$$

2.4 确定某个层级指标权重

由前述可知,当指标体系中只有某一指标的权重为 1,其余都为 0 时,熵权值最小。基于这一原理,先给各个指标层级确定权重,然后进行进一步的处理,可以得到每层指标加权和平均之后的标准化值 I_i ^[1]:

$$I_i = \frac{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)}{m} \quad (8)$$

根据式(8)可知, I_i 越大,指标体系中某指标层级的权重分布就越大。将 I_i 进行处理可以得到:

$$v_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^m I_i} \quad (9)$$

2.5 构建模糊综合评价子集

利用评价矩阵 R 和分层权重矩阵 A 可以得到模糊评价结果矩阵为

$$B = A \times R \quad (10)$$

利用模糊评价结果,考虑隶属度影响,对指标的影响因素大小进行分析并给出结果。

2.6 计算模糊综合评判矩阵

得到某一层级的模糊评价结果矩阵 B 后,可以运用相同的步骤逐级进行计算,最终得到模糊综合评判矩阵 $B^* = AR$ 。此时,可以将计算得到的评价结果与相关数据进行比较,并在给定表中按“优、良、中、劣、差”对结果进行评分,并以此来判定所评价项目的可行性是否达到预先设定的标准和要求^[8]。

3 应用分析

将所提出的改进 FAHP 评价模型应用于 BY 市配电自动化项目评价,分析其项目建设运行的经济、技术和社会综合效益^[2,5]。

3.1 权重确定

依据 BY 市配电自动化建设项目确定相关评价指标体系,然后建立综合因素评价集合 $U = (U_1, U_2, U_3)$,并根据实际情况将考虑的 3 类因素构建成二维综合因素评价集合:

经济效益集合为 $U_1 = (B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{15})$,其中: B_{11} 为单位电量产值; B_{12} 为单位资产供电负荷; B_{13} 为投入产出比; B_{14} 为单位线路产度造价; B_{15} 为单位变电容量造价。

技术效益集合为 $U_2 = (B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{24}, B_{25})$,其中: B_{21} 为主变压器负载率; B_{22} 为供电安全性; B_{23} 为供电可靠性; B_{24} 为电压质量; B_{25} 为网损率。

社会综合效益集合为 $U_3 = (B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{34}, B_{35})$,其中: B_{31} 为就业率; B_{32} 为环境影响情况; B_{33} 为电表入户率; B_{34} 为供电覆盖率; B_{35} 为科技进步

收入比率。

1) 确定一级指标权重

建立评价集合 $U = (U_1, U_2, U_3)$ 的评价矩阵, 如表 2 所示。

表 2 一级指标评价矩阵

U	U_1	U_2	U_3	ω	一致性检验
U_1	1.0	2.0	3.0	0.539 7	$\lambda_{\max} = 3.000 9$
U_2	0.5	1.0	2.0	0.296 8	$C_I = 0.004 6$
U_3	1.0	0.5	1.0	0.163 3	$C_R = 0.007 9$

表 2 中: w 表示矩阵 U 最大特征值的特征向量; λ_{\max} 表示矩阵 U 最大特征值; C_I 表示一致性指标; C_R 表示判断矩阵是否满足一致性指标。此外 R_I 表示平均随机一致性指标, 它们的关系如下:

$$C_I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (12)$$

当 $C_R < 0.10$, 则判断满足一致性, 否则重新判断, 直至满意。

2) 计算 U_1 、 U_2 和 U_3 的权重

根据经济效益集合 U_1 所包含的内容可以得到相应的判断矩阵, 然后计算出对应的权重分布, 结果如表 3 所示。

表 3 经济效益评价矩阵

U_1	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	ω	一致性检验
B_{11}	2	2	2	3	2	0.326 4	$\lambda_{\max} = 5.294 4$
B_{12}	1/2	1	1	3	5	0.258 9	$C_I = 0.073 6$
B_{13}	1/2	1	1	2	5	0.238 7	$C_R = 0.065 7$
B_{14}	1/3	1/3	1/2	1	1	0.097 0	
B_{15}	1/2	1/5	1/5	1	1	0.079 2	

根据技术效益集合 U_2 所包含的内容可以得到相应的判断矩阵, 然后计算出对应的权重分布, 结果如表 4 所示。

表 4 技术效益评价矩阵

U_2	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	ω	一致性检验
B_{21}	1	1	1/3	2	2	0.186 7	$\lambda_{\max} = 5.215 9$
B_{22}	1	1	1	3	2	0.251 0	$C_I = 0.054 0$
B_{23}	3	1	1	2	6	0.360 9	$C_R = 0.048 0$
B_{24}	1/2	1/3	1/2	1	1	0.107 1	
B_{25}	1/2	1/2	1/6	1	1	0.093 3	

根据社会综合效益集合 U_3 所包含的内容可以得到相应的判断矩阵, 然后计算出对应的权重分布, 结果如表 5 所示。

表 5 社会综合效益评价矩阵

U_3	B_{31}	B_{32}	B_{33}	B_{34}	B_{35}	ω	一致性检验
B_{31}	1	1	1/3	2	2	0.177 1	$\lambda_{\max} = 5.093 6$
B_{32}	1	1	1	3	4	0.274 9	$C_I = 0.023 4$
B_{33}	3	1	1	4	5	0.379 3	$C_R = 0.020 9$
B_{34}	1/2	1/3	1/4	1	1	0.885 8	
B_{35}	1/2	1/4	3	1	1	0.080 0	

3) 层次总排序

根据计算出的 U_1 、 U_2 和 U_3 所对应的权重可以得到第二级评价指标的权重大小以及基于权重因子的指标对评价结果产生影响的效果排序^[10], 结果如表 6 所示。

表 6 组合权重分布

第二级指标	第三级指标	组合权重分布 (X_i)	排序结果
经济效益 (0.539 7)		0.326 4	1
		0.258 9	3
		0.238 7	4
		0.097 0	9
		0.079 2	10
经济效益 (0.296 9)		0.186 7	8
		0.251 2	6
		0.360 9	5
		0.107 3	12
		0.093 3	14
社会综合 效益 (0.163 4)		0.177 1	13
		0.275 0	11
		0.379 4	7
		0.885 9	2
		0.080 0	15

为了得到各种因素综合权重分析的结果, 按照 4 个层级对成效进行划分^[3], 结果如表 7 所示。

表 7 成效分析以及等级划分

等级	成效分析	等级划分
I	较好	$0.1 \leq \text{权重} \leq 1$
II	好	$0.05 \leq \text{权重} \leq 0.1$
III	一般	$0.02 \leq \text{权重} \leq 0.05$
IV	较差	$0 \leq \text{权重} \leq 0.02$

根据得到的权重大小排序可知,单位电量产值这一指标的权重(0.176 28)排在第一位,由此可以知道当 BY 市配电网建设完成后,电网企业的售电量得到了明显提升。另一方面,分析居民供电覆盖率(0.144 838)、单位资产供电负荷率(0.139 748)和用户用电可靠率指标(0.107 322)的排序可以知道,项目的实施提高了售电量,实现了 100% 居民用电,同时也提高了用户用电可靠率,而且整体提高了配电网总资产效率,使其增加到相应电力负荷水平,因此处于第一梯队。单位线路长度造价指数(0.052 441)、单位主变压器负荷率指数(0.055 442)、供电安全可靠率指数(0.074 554)提升效果次之,说明进行配电网自动化的改造可以实现单位线路成本的有效降低,相应的单位可变量成本也能够有效下降,效益整体呈现良好趋势,属于第二梯队。除与科技相关的指标外的剩余指标排序比较靠后,属于第三梯队,这说明 BY 市城市配电网建设对于这些指标所带来的效益增值和改善不明显,还需进一步关注测算。科技进步效益流入率(0.013 180)权重最小排在最后,属于第四梯队的指标,这说明 BY 市配电网自动化的建设对科技进步效益流入率的影响较小,取得的效益增值和改善相对较差,还需在科技力度的精准投入上继续加强、加深,使得科技成果更好作用于配电网自动化建设,从而提升科技因素的利用效益。

3.2 综合评价

通过对 BY 市城市配电网自动化建设项目的评价,对 U_1 、 U_2 和 U_3 进行单因素评价。结果如表 8、表 9、表 10 所示。

表 8 U_1 评价结果

U_1	很好	好	一般	差	较差
B_{11}	0.10	0.40	0.20	0.20	0.10
B_{12}	0.00	0.30	0.40	0.30	0.00
B_{13}	0.10	0.20	0.40	0.20	0.10
B_{14}	0.00	0.30	0.40	0.20	0.10
B_{15}	0.00	0.30	0.40	0.30	0.00

表 9 U_2 评价结果

U_2	很好	好	一般	差	较差
B_{21}	0.10	0.30	0.20	0.20	0.20
B_{22}	0.00	0.30	0.40	0.20	0.10
B_{23}	0.00	0.30	0.40	0.20	0.10
B_{24}	0.00	0.30	0.40	0.10	0.20
B_{25}	0.00	0.30	0.30	0.30	0.10

表 10 U_3 评价结果

U_3	很好	好	一般	差	较差
B_{31}	0.10	0.30	0.30	0.30	0.00
B_{32}	0.00	0.30	0.50	0.20	0.00
B_{33}	0.00	0.20	0.40	0.30	0.10
B_{34}	0.10	0.20	0.40	0.20	0.10
B_{35}	0.00	0.20	0.30	0.30	0.20

基于所得到的评价结果,构建模糊矩阵,利用 $B = \omega \times R$ 可以求出各个因素的一级和二级评价结果^[1]。

1) 一级评价结果

$$B_1 = \omega_1 \times R_1 = \begin{bmatrix} 0.3265 \\ 0.2588 \\ 0.2386 \\ 0.0970 \\ 0.0791 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix} = (0.05651, 0.3088, 0.3347, 0.2338, 0.06621)$$

(13)

$$B_2 = \omega_2 \times R_2 = \begin{bmatrix} 0.1866 \\ 0.2511 \\ 0.3608 \\ 0.1072 \\ 0.0933 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0.2 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix} = (0.01866, 0.2874, 0.353, 0.1984, 0.1293)$$

(14)

$$B_3 = \omega_3 \times R_3 = \begin{bmatrix} 0.1772 \\ 0.2749 \\ 0.3793 \\ 0.8858 \\ 0.08 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix} = (0.1063, 0.4047, 0.7207, 0.4013, 0.1425)$$

(15)

2) 二级评价结果

基于各个因素的一级评价结果,可以构建各个因素的二级评价模糊评价矩阵^[1],并根据评价标准中的权重分布,得到最终不同因素的综合评价结果。

3) 系统综合评价

基于得到的一级和二级评价结果,可以得到 BY 市城市配电网自动化项目评价体系模糊综合评价矩阵为

$$E = \omega \times R = \begin{bmatrix} 0.539 & 6 \\ 0.296 & 9 \\ 0.163 & 5 \end{bmatrix}^T \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.056 & 51 & 0.308 & 8 & 0.334 & 7 & 0.233 & 8 & 0.066 & 21 \\ 0.018 & 66 & 0.287 & 4 & 0.353 & 0 & 0.198 & 4 & 0.129 & 30 \\ 0.106 & 30 & 0.404 & 7 & 0.720 & 7 & 0.401 & 3 & 0.142 & 50 \end{bmatrix}$$

$$= (0.053\ 4, 0.318\ 3, 0.403\ 2, 0.250\ 7, 0.097\ 4) \quad (16)$$

通过上述分析,在采用基于熵权理论的模糊层次评价模型后,针对 BY 市城市配电网自动化的建设项目,在所有参与评价的人员中,综合评价为“较好”的占 5.43%;综合评价为“好”的占 31.83%,综合评价为“一般”的占 40.32%^[6]。同时,在本次综合评价的结果中,认为建设“尚且不够完善”的评价人员人数占比大约为 25.07%,认为建设“很不完善”的评价人员人数占比大约为 9.17%。在上述理论中,依据已描述的最大隶属度原则,最终将 BY 市城市配电网建设项目的综合评价结果确定为 (0.318 4 ~ 0.403 3),基本介于一般与较好间。由此可以得出结论:BY 市城市配电网自动化项目建设能够获得一定的综合效益,实现其配电网可靠性和运行水平的明显提升^[11],进而可以助力城市快速发展。

4 结 语

基于项目技术、经济和社会效益 3 个方面的指标,构建城市配电网自动化项目建设评价指标体系,综合熵权法和模糊综合评价法提出了改进的模糊层次分析法,并应用于 BY 市配电网自动化建设项目综合评价。应用结果表明,所使用的改进模糊层次分析评价模型能够客观、准确地确定城市配电网建设运行的有效性,可以为电网公司和相关投资方在城市

(上接第 23 页)

培训、事故预想等方面提出了几点建议,以提高运维、保护人员的事故处理效率。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)[Z]. 北京:国家电网公司,2018.
- [2] 李润鑫,魏博. 风电场零序保护不正常动作典型案例分析[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(2):93-96.

配电网建设效益分析和投资决策方面提供有力的支撑依据,具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 李永清. 改进的 FAHP 在白银配电网自动化项目综合评价中的应用研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
- [2] 黄宇. 模糊层次分析法在配电网建设项目后评价的应用[D]. 南昌:南昌大学,2016.
- [3] 张磐,凌万水,郑悦,等. 基于模糊层次分析法的配电网自动化运行评估方法研究[J]. 电测与仪表,2016,53(22):72-77.
- [4] 张斯梁. 基于模糊层次分析法的产业新城内智能电网工程后评价[D]. 北京:华北电力大学,2016.
- [5] 林俊,王钺,苏迪. 改进的模糊层次分析法在配电网规划中的应用[J]. 高电压技术,2008,34(6):1161-1167.
- [6] 王红. 养老地产 PPP 项目融资模式及风险评价研究[D]. 吉林:吉林建筑大学,2019.
- [7] 刘立轩. 基于多层次模糊评价法的内蒙古电网工程项目后评价研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.
- [8] 王涛. 基于熵权模糊的通辽配电网自动化主站项目前评估[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [9] 吕晓玥,简迎辉. 基于熵权模糊综合评价法的水资源送水工程项目综合后评价研究[J]. 项目管理技术,2014,12(12):114-118.
- [10] 韩富春,任婷婷,陈晶晶. 基于层次分析法的输变电工程项目后评价研究[J]. 电气技术,2009(2):42-45.
- [11] 王勇胜,孔祥美,陈露锋. 基于改进层次模糊综合评价法的电网建设项目风险评估体系[J]. 科技和产业,2018,18(3):79-83.

作者简介:

于国康(1990),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电网规划。

(收稿日期:2020-08-26)

- [3] 吴斌. 电力变压器非电量保护故障案例分析[J]. 自动化应用,2018(1):108-109.
- [4] 薛峰. 怎样分析电力系统故障录波图[M]. 北京:中国电力出版社,2014:12-25.

作者简介:

马小军(1992),男,学士,主要研究方向为电力系统稳定性分析与继电保护等。

(收稿日期:2020-08-05)