

基于区间数灰色模糊综合评判的继电保护维修决策方法研究

张媛¹, 覃剑², 王谦¹, 陈伟¹, 张海兵¹

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对继电保护维修决策评判因素具有灰色模糊性和区间取值的特点, 提出了一种基于区间数灰色模糊理论的维修决策方法。该方法在确定影响继电保护维修决策的6个主要因素的基础上, 建立了包含4个维修方案的评判体系。考虑到评判因素灰部和模部间的相互影响, 利用OWA(有序加权平均)算子对各方案的因素值进行集结, 并对区间灰色模糊数进行运算, 计算出各个方案的综合评判值, 进而优选出更贴近实际的维修方案。最后以某RCS-931BM型继电保护装置及其二次回路为例进行维修方案优选, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 继电保护; 维修决策; 区间数; 灰色模糊综合评判; OWA算子

Research on maintenance decision-making method of relay protection based on interval numbers grey fuzzy comprehensive evaluation

ZHANG Yuan¹, QIN Jian², WANG Qian¹, CHEN Wei¹, ZHANG Hai-bing¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401123, China;

2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Since the evaluation factors possess grey fuzzy and interval values' features while the maintenance decision-making of relay protection is performed, an interval numbers grey fuzzy theory based maintenance decision-making method is proposed. On the basis of deciding six principal factors of influencing maintenance decision-making of relay protection, an evaluation system including four maintenance projects is established. Considering the interaction between the grey part and fuzzy part of evaluation factors, this ordered weighted averaging (OWA) operator is used to aggregate the factor values of every project, and the interval grey fuzzy numbers are calculated, the comprehensive evaluation value of every project is worked out, then a more practical maintenance project is preferred. Taking a type RCS-931BM relay protection device and the secondary circuit for example, the optimal maintenance project is selected and the feasibility and validity of the proposed method is validated.

This work is supported by National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A120).

Key words: relay protection; maintenance decision-making; interval numbers; grey fuzzy comprehensive evaluation; OWA operator

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0016-06

0 引言

状态维修决策是以设备状态为基础, 结合实验测量数据和运行记录资料, 形成有限个维修方案, 在兼顾安全性和经济性的基础上, 优选出某一方案^[1-5]。目前, 电力设备维修决策的优选方法主要有: ①可靠性理论辅助决策法^[6]; ②全寿命周期成本管理决策法^[7]; ③系统风险评估决策法^[8]; ④模糊多属性决策法^[9-10]; ⑤灰色理论分析决策法^[11-12]; ⑥灰色模糊综合分析决策法^[13-15]。方法①、②在维修

决策过程中考虑的评判因素过于简单。方法③运算时需要已知大量系统数据, 数据量小时计算精度偏低。方法④主要运用模糊理论进行维修决策分析。文献[9-10]分别将模糊多属性决策及模糊层次分析法运用到变压器维修决策分析中。该类方法考虑了维修决策评判因素的不明确性, 即模糊性, 但忽略了评判信息的不充分性, 即灰色性。方法⑤主要运用灰色理论进行维修决策分析。文献[11-12]分别将灰局势决策法及灰色关联分析运用到变压器维修决策判断中。方法⑤与方法④相反, 它只考虑了评判因素的灰色性, 而忽略了模糊性。方法⑥将评判因素的灰色性及模糊性综合考虑。其中, 文献[13]

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A120)

提出了一种基于灰色模糊综合评判的断路器维修排序方法。文献[14]将灰色关联度和理想解法结合运用到电力设备维修决策中。文献[15]则提出了一种基于模糊映射和灰色关联理论的变电站维修方案优选方法。该类方法虽然将维修决策评判因素的灰色性和模糊性综合考虑,但只是将两者进行简单集结,没有考虑两者之间的相互影响,并且仅以实数的形式表示灰色模糊数,丢失了大量信息。

综上所述,现有维修决策方法或仅考虑了单方面的灰色性、模糊性,或将两者综合考虑,而忽视了灰色模糊数取值存在范围区间以及灰色模糊数间的相互影响。针对这一问题,本文提出了一种基于 OWA 和区间数灰色模糊综合评判的继电保护维修决策方法。该方法引入区间灰色模糊数表示因素值,最大限度保留了评判因素的信息;同时,引入 OWA 算子对因素值进行集结^[16],定量反映了灰色模糊数运算时灰部与模部间相互影响。在此基础上计算灰色模糊数,得到各方案的综合评判值,优选出最佳维修方案。

1 继电保护维修决策的区间数灰色模糊综合评判模型

1.1 建立综合评判模型的基本思路

建立评判模型的基本步骤为:(1)建立与继电保护维修决策相关的因素集;(2)获取继电保护的实际情况;(3)建立表示备选方案集合的评判集;(4)通过量化取值方式确定因素集与评判集之间的模糊关系区间,通过建立区间数灰色关系矩阵来衡量各因素所能收集到的信息量的不同,由此形成区间数灰色模糊关系矩阵 \tilde{C} ,并归一化为 \tilde{R} ;(5)利用区间数层次分析法^[17]确定权重集 \tilde{M} ,并归一化为 \tilde{E} ;(6)引入OWA算子确定与其关联的加权向量 ω ;(7)利用基于OWA的区间数灰色模糊综合评判进行继电保护维修决策计算;(8)最后利用区间数排序法处理评判结果,优选出最佳维修方案。

1.2 继电保护维修决策评判因素的确定

通过综合分析,在兼顾安全性和经济性的基础上,得出与继电保护维修决策有关的6个主要因素^[6,14]: x_1 为维修所需技术水平,即本单位有无相应技术水平、是否外聘等; x_2 为维修风险,即误跳其他保护装置、误碰二次回路等; x_3 为维修对生产及安全的影响,即对售电量、电网安全产生的影响等; x_4 为综合费用,即维修费用、停电损失费用等; x_5 为维修效果,即提高设备可靠性等; x_6 为相关一次设备的健康程度,即二次设备维修应根据一次设备

的健康程度综合确定维修计划。

1.3 表示备选方案集合的评判集的建立

为进行方案的技术经济比较,根据继电保护的运行特性和维修模式,拟订如下4个维修方案,形成评判集 $S=\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$: s_1 表示立即停电检修; s_2 表示优先安排检修; s_3 表示定期检修; s_4 表示延期检修。

1.4 建立区间数灰色模糊关系矩阵

评判矩阵可视为因素集与评判集之间的灰色模糊关系。根据某一因素给出评判集中各方案的模糊取值区间,并根据信息的充分程度给出相应的灰度区间如式(1)。

$$\tilde{C} = \left(\left([c_{ij}^-, c_{ij}^+], [v_{ij}^-, v_{ij}^+] \right) \right)_{n \times m} \quad (1)$$

对其模糊部分规范化处理,得

$$\tilde{R} = \left(\left(\begin{array}{ccc} ([\mu_{11}^-, \mu_{11}^+], [v_{11}^-, v_{11}^+]) & ([\mu_{12}^-, \mu_{12}^+], [v_{12}^-, v_{12}^+]) & \cdots & ([\mu_{1m}^-, \mu_{1m}^+], [v_{1m}^-, v_{1m}^+]) \\ ([\mu_{21}^-, \mu_{21}^+], [v_{21}^-, v_{21}^+]) & ([\mu_{22}^-, \mu_{22}^+], [v_{22}^-, v_{22}^+]) & \cdots & ([\mu_{2m}^-, \mu_{2m}^+], [v_{2m}^-, v_{2m}^+]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ([\mu_{n1}^-, \mu_{n1}^+], [v_{n1}^-, v_{n1}^+]) & ([\mu_{n2}^-, \mu_{n2}^+], [v_{n2}^-, v_{n2}^+]) & \cdots & ([\mu_{nm}^-, \mu_{nm}^+], [v_{nm}^-, v_{nm}^+]) \end{array} \right) \right)_{n \times m} = \left((r_{ij})_{n \times m} \right)_{n \times m} \quad (2)$$

$$\text{其中, } \mu_{ij}^- = c_{ij}^- / \sum_{j=1}^m c_{ij}^+, \quad \mu_{ij}^+ = c_{ij}^+ / \sum_{j=1}^m c_{ij}^-。$$

1.5 确定权重集

各因素权重是以定量方式反映各项因素在维修决策评判中所占的比重。权重集可视为评判对象与评判因素之间的区间数灰色模糊关系。本文采用区间数层次分析法^[17],降低了权重确定过程中的主观性,使权重尽可能贴合客观实际。

针对影响继电保护维修决策的6个主要因素,利用区间数层次分析法计算模糊部分,并取灰度区间为 $[0.1, -0.2]$,可得各因素权重为

$$\tilde{M} = \left(([m_1^-, m_1^+], [u_1^-, u_1^+]), ([m_2^-, m_2^+], [u_2^-, u_2^+]), \cdots, ([m_n^-, m_n^+], [u_n^-, u_n^+]) \right) = \left(([0.04, 0.05], [0.1, 0.2]), ([0.17, 0.20], [0.1, 0.2]), ([0.26, 0.29], [0.1, 0.2]), ([0.09, 0.11], [0.1, 0.2]), ([0.15, 0.18], [0.1, 0.2]), ([0.09, 0.11], [0.1, 0.2]) \right) \quad (3)$$

将权重集 \tilde{M} 归一化得

$$\tilde{E} = \left(([e_1^-, e_1^+], [u_1^-, u_1^+]), ([e_2^-, e_2^+], [u_2^-, u_2^+]), \cdots, ([e_n^-, e_n^+], [u_n^-, u_n^+]) \right) = \left(([0.04, 0.06], [0.1, 0.2]), ([0.18, 0.25], [0.1, 0.2]), ([0.28, 0.36], [0.1, 0.2]), ([0.10, 0.14], [0.1, 0.2]), ([0.16, 0.23], [0.1, 0.2]), ([0.10, 0.14], [0.1, 0.2]) \right) \quad (4)$$

$$\text{其中, } e_i^- = m_i^- / \sum_{i=1}^n m_i^+, \quad e_i^+ = m_i^+ / \sum_{i=1}^n m_i^-,$$

$i=1,2,\dots,n$ 。

1.6 确定 OWA 相关联的加权向量

定义 $OWA_{\omega}(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n \omega_j b_j$ ，其中 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 是与函数 OWA 相关联的加权向量， $\omega_j \in [0,1], j \in N, \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ ，且 b_j 是一组数据 (a_1, a_2, \dots, a_n) 中第 j 大的元素，则称函数 OWA 是有序加权平均算子，也称为 OWA 算子^[16]。

OWA 算子中 ω_i 确定采用式(5)。

$$\omega_1 = (1 - \alpha)/n + \alpha, \omega_i = (1 - \alpha)/n \quad (5)$$

$i \neq 1, \text{ 且 } \alpha \in [0,1]$

由此求得加权向量为

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (6)$$

1.7 基于OWA的区间数灰色模糊综合评判

利用OWA算子对方案 s_j 的因素值进行集结，求得 s_j 的综合评判值：

$$Z_j = OWA_{\omega}(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i b_{ij} = ([z_j^-, z_j^+], [t_j^-, t_j^+]) \quad (7)$$

其中， $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 是 OWA 相关联的加权向量， $\omega_i \in [0,1], i \in N, \sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

$b_{ij} = ([b_{ij}^-, b_{ij}^+], [\lambda_{ij}^-, \lambda_{ij}^+])$ 是一组加权数据 $(ne_1 r_{1j}, ne_2 r_{2j}, \dots, ne_n r_{nj})$ 中灰度第 i 大的元素， n 是评判因素的个数。

根据区间数灰色模糊综合评判相关算法^[18]：

$$\tilde{Z}_j = \tilde{E} \cdot \tilde{R} = ([z_j^-, z_j^+], [t_j^-, t_j^+]) = \quad (8)$$

$$\left[\left(\left[\sum_{i=1}^n e_i^- \cdot \mu_{ij}^-, \sum_{i=1}^n e_i^+ \cdot \mu_{ij}^+ \right], \left[\prod_{i=1}^n (1 \wedge (u_i^- + v_{ij}^-)), \prod_{i=1}^n (1 \wedge (u_i^+ + v_{ij}^+)) \right] \right) \right]_{m}$$

由此可得

$$ne_i r_{ij} = n([e_i^- \cdot \mu_{ij}^-, e_i^+ \cdot \mu_{ij}^+], [(1 \wedge (u_i^- + v_{ij}^-)), (1 \wedge (u_i^+ + v_{ij}^+))]) \quad (9)$$

故 $ne_i r_{ij}$ 的灰部为一区间，由于区间数的大小不能直接比较，因此，将区间数化为实数进行排序^[19]，方法如下：

区间数 $\beta = [\beta_1, \beta_2]$ 的 θ 值 $m_{\theta}(\beta)$ ：

$$m_{\theta}(\beta) = m_{\theta}([\beta_1, \beta_2]) = (1 - \theta)\beta_1 + \theta\beta_2 \quad (10)$$

其中， θ 为决策者对待风险的态度， $\theta \in [0,1]$ 。

由式(10)可对向量 $(ne_1 r_{1j}, ne_2 r_{2j}, \dots, ne_n r_{nj})$ 按其灰度大小进行排序，即可得出 b_{ij} ，结合式(7)~式(9)，可得出 Z_j 中各元素的求解方式：

$$t_j^- = \prod_{i=1}^n \lambda_{ij}^-, \quad t_j^+ = \prod_{i=1}^n \lambda_{ij}^+ \quad (11)$$

$$z_j^- = \sum_{i=1}^n \omega_i b_{ij}^-, \quad z_j^+ = \sum_{i=1}^n \omega_i b_{ij}^+$$

1.8 评判结果的处理

由于评判结果 Z_j 为区间数，故需要将区间数化为实数进行排序，具体步骤如下：

(1) 根据式(10)，将评判结果 Z_j 的灰部 t_j 实数化，记为

$$g_j = m_{\theta}(t_j) = (1 - \theta)t_j^- + \theta t_j^+ \quad (12)$$

其中，取 $\theta = 0.5$ ；

(2) 将评判结果 $Z_j = ([z_j^-, z_j^+], [t_j^-, t_j^+])$ 化为两参数区间数，得

$$Z_j = [z_j^-(1 - g_j), z_j^+(1 + g_j)] = [z_{ij}^*, z_{ij}^{**}] \quad (13)$$

(3) 通过式(10)计算出每个方案的综合评判结果 $m_{\theta}(Z_j)$ ，比较各个方案的 $m_{\theta}(Z_j)$ ，得到各方案的优劣排序。

2 算例

以重庆市电力公司管辖范围内某220 kV线路保护为例，应用本文提出的方法对其维修决策进行分析。

(1) 建立评判指标集。针对影响继电保护维修决策的6个评判因素，根据重庆市电力公司二次设备状态检修相关规定，依据继电保护运行、维修的历史记录，咨询相关专家意见，得出维修决策评判因素的具体评价内容和量化方法，具体见表1。

(2) 获取继电保护的运行情况。该线路保护为2008年投运的南瑞RCS-931BM型继电保护装置。该继电保护二次回路电缆破损，维修需大量技术人员更换电缆，维修较困难；该继电保护为双重化配置，二次回路较复杂，维修风险较大；该线路为变电站主要进线，维修涉及本侧与对侧变电站的相互配合，故对生产及安全有较严重影响；该变电站为枢纽变电站，停电损失较大，综合费用较高；除二次电缆破损外，继电保护装置及二次回路运行状况良好，故预计维修效果较好；该继电保护相关的断路器及刀闸等一次设备健康程度好。

(3) 建立区间数灰色模糊关系矩阵。根据上述继电保护运行情况和表1的量化取值，得出评价矩阵 \tilde{C} ，并归一化为 \tilde{R} ：

表1 维修决策评判因素的量化取值

Table 1 Quantitative values of maintenance decision-making evaluation factors

评判因素	量化取值			
	差(0.0~0.25)	一般(0.25~0.5)	较好(0.5~0.75)	好(0.75~1.0)
维修所需技术水平 x_1	维修需要特聘专家, 备件难以购买, 维修所需时间长、维修困难。	维修需要大量技术人员, 备件需要专门购买, 维修所需时间较长、维修较困难。	维修需要技术人员, 备件为标准件, 维修所需时间较短、维修较容易。	维修只需一般运维人员, 不需更换备件, 维修所需时间短、维修容易。
维修风险 x_2	装置和二次回路复杂, 误碰、误动机会大, 维修风险大。	装置和二次回路较复杂, 误碰、误动机会较大, 维修风险较大。	装置和二次回路较简单, 误碰、误动机会较小, 维修风险较小。	装置和二次回路简单, 误碰、误动机会小, 维修风险小。
维修对生产及安全的影响 x_3	故障对生产及安全有严重影响。	故障对生产及安全有较严重影响。	故障对生产及安全有一定影响。	故障对生产及安全不产生影响。
综合费用 x_4	维修和停电损失总费用高。	维修和停电损失总费用较高。	维修和停电损失总费用一般。	维修和停电损失总费用小。
维修效果 x_5	不能提高装置可靠性, 维修效果差。	能提高装置可靠性, 维修效果一般。	能较大幅度提高装置可靠性, 维修效果较好。	能大幅提高装置可靠性, 维修效果好。
相关一次设备的健康程度 x_6	一次设备健康程度差。	一次设备健康程度一般。	一次设备健康程度较好。	一次设备健康程度好。

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} ([0.13, 0.20], [0.2, 0.3]) & ([0.21, 0.30], [0.3, 0.4]) & ([0.25, 0.35], [0.1, 0.2]) & ([0.25, 0.35], [0.1, 0.2]) \\ ([0.17, 0.25], [0.1, 0.2]) & ([0.25, 0.35], [0.4, 0.5]) & ([0.21, 0.30], [0.2, 0.3]) & ([0.21, 0.30], [0.2, 0.3]) \\ ([0.15, 0.23], [0.2, 0.3]) & ([0.35, 0.45], [0.2, 0.3]) & ([0.19, 0.27], [0.4, 0.5]) & ([0.15, 0.23], [0.3, 0.4]) \\ ([0.06, 0.15], [0.1, 0.2]) & ([0.35, 0.54], [0.1, 0.2]) & ([0.18, 0.31], [0.2, 0.3]) & ([0.18, 0.31], [0.1, 0.2]) \\ ([0.33, 0.45], [0.1, 0.2]) & ([0.33, 0.45], [0.2, 0.3]) & ([0.13, 0.20], [0.2, 0.3]) & ([0.04, 0.10], [0.1, 0.2]) \\ ([0.23, 0.29], [0.2, 0.3]) & ([0.23, 0.29], [0.2, 0.4]) & ([0.23, 0.29], [0.1, 0.2]) & ([0.20, 0.26], [0.1, 0.2]) \end{bmatrix}$$

(4) 确定OWA相关联的加权向量。根据式(5)求得加权向量为

$$\omega = [0.33 \ 0.13 \ 0.13 \ 0.13 \ 0.13 \ 0.13]。$$

(5) 进行基于OWA的区间数灰色模糊综合评判。由式(7)~式(11)可得

$$Z_1 = ([0.13, 0.27], [0, 0.01]), \quad Z_2 = ([0.26, 0.49], [0, 0.03])$$

$$Z_3 = ([0.19, 0.38], [0, 0.01]), \quad Z_4 = ([0.16, 0.32], [0, 0.01])$$

(6) 处理评判结果。根据区间数排序步骤, 利用式(10)~式(13), 取 $\theta = 0.5$, 计算 Z_j 的综合评判值为 $m_\theta(Z_1) = 0.20$, $m_\theta(Z_2) = 0.38$, $m_\theta(Z_3) = 0.29$, $m_\theta(Z_4) = 0.24$ 。

因此, 可得各方案排序为: $s_2 > s_3 > s_4 > s_1$, 即最优方案为“优先安排检修”。

3 结论

本文提出的基于区间数灰色模糊综合评判的继电保护维修决策方法, 是以区间模糊数定量描述评判因素与评判集之间的模糊关系, 以区间灰度描述信息的不充分程度, 最大限度地保留了评判对象

的信息。同时, 引入OWA算子对评判因素值进行集结, 定量反映了灰色模糊数之间的内部联系。在此基础上计算各方案的综合评判值, 进而通过对各评判值排序, 得到了更符合实际情况的维修决策优选方案。

参考文献

- [1] 张轶议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [2] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 基于模糊机会约束二层规划的配电网检修计划优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 157-163.
XU Xu-feng, HUANG Min-xiang, WANG Ting-ting, et al. Optimization of distribution network maintenance scheduling based on fuzzy chance-constrained bi-level

- programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 157-163.
- [3] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
WU Jiang, CAI Ze-xiang, HU Chun-chao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.
- [4] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.
DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [5] 毛颖科, 关志成, 王黎明, 等. 基于泄漏电流脉冲主成分分析的外绝缘污秽状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 39-45.
MAO Ying-ke, GUAN Zhi-cheng, WANG Li-ming, et al. Evaluation of contamination levels of outdoor insulators based on the principal components analysis of leakage current pulses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 39-45.
- [6] 侯艾君. 继电保护状态评价方法及其在检修决策中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
HOU Ai-jun. The state evaluation method of relay protection and its use in maintenance decision[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [7] 王佳明, 刘文颖, 魏帆, 等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 77-80.
WANG Jia-ming, LIU Wen-ying, WEI Fan, et al. Study on policies of condition based maintenance of transmission and distribution equipments combined with life cycle cost management[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 77-80.
- [8] 侯艾君, 熊小伏, 沈智健, 等. 一种输电设备状态维修日程安排的可靠性决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 108-112.
HOU Ai-jun, XIONG Xiao-fu, SHEN Zhi-jian, et al. A reliability decision method of CBM maintenance schedule for transmission equipments[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 108-112.
- [9] 袁志坚, 孙才新, 李剑, 等. 基于模糊多属性群决策的变压器状态维修策略研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 66-70.
YUAN Zhi-jian, SUN Cai-xin, LI Jian, et al. Study on condition-based maintenance policy of transformer based on fuzzy multiple expert and multiple attribute group decision making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 66-70.
- [10] 吕俊. 电力设备故障诊断与检修决策支持系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Lü Jun. The research on fault diagnosis and maintenance decision support system of electric power equipment[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [11] 王有元, 徐海霞, 陈伟根, 等. 电力变压器状态维修策略的灰局势决策方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(12): 1419-1424.
WANG You-yuan, XU Hai-xia, CHEN Wei-gen, et al. Grey situation decision making method of condition based maintenance strategy for power transformer[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(12): 1419-1424.
- [12] 刘从法. 基于灰色理论的变压器状态维修决策研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
LIU Cong-fa. Research on condition maintenance decision making method of transformer based on grey theory[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [13] 张媛, 熊小伏, 周家启, 等. 基于灰色模糊综合评判的断路器维修排序方法[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 21-24.
ZHANG Yuan, XIONG Xiao-fu, ZHOU Jia-qi, et al. Research on sequence of maintenance of circuit breakers based on grey fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 21-24.
- [14] 杨良军, 熊小伏, 张媛. 基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 74-78.
YANG Liang-jun, XIONG Xiao-fu, ZHANG Yuan. Research on condition-based maintenance policy of electric power equipment based on grey correlation

- degree and TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 74-78.
- [15] 肖闽进, 张生荣, 何一鸣, 等. 基于灰色关联的无人值守变电站维修性评估[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2012, 46(4): 422-426.
- XIAO Min-jin, ZHANG Sheng-rong, HE Yi-ming, et al. Evaluation of unattended electricity substation maintainability based on grey relation[J]. Journal of Huazhong Normal University: Nat and Sci, 2012, 46(4): 422-426.
- [16] 王坚强, 王君. 一种区间灰色模糊多准则决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(12): 2409-2411.
- WANG Jian-qiang, WANG Jun. Interval grey fuzzy multi-criteria decision making approach[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(12): 2409-2411.
- [17] 魏毅强, 刘进生, 王绪柱. 不确定型 AHP 中判断矩阵的一致性概念及权重[J]. 系统工程理论与实践, 1994(4): 16-22.
- WEI Yi-qiang, LIU Jin-sheng, WANG Xu-zhu. Concept of consistence and weights of the judgement matrix in the uncertain type of AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1994(4): 16-22.
- [18] 孟科, 李云祥, 王朝军, 等. 风险偏好的区间值灰色模糊综合评判及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(4): 109-111.
- MENG Ke, LI Yun-xiang, WANG Chao-jun, et al. Interval-value grey fuzzy comprehensive evaluation based on the preference of the risk and its application[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(4): 109-111.
- [19] 孙海龙, 姚卫星. 区间数排序方法评述[J]. 系统工程学报, 2010, 25(3): 304-312.
- SUN Hai-long, YAO Wei-xing. Comments on methods for ranking interval numbers[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(3): 304-312.

收稿日期: 2013-05-25; 修回日期: 2013-07-18

作者简介:

张媛(1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为继电保护状态检修。E-mail: zhangyuan200705@126.com