

DOI: 10.7667/PSPC161878

考虑隶属度可变的继电保护变权模糊综合状态评价方法

赵晓明¹, 余志慧², 张雪松¹

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 国网浙江省电力公司杭州市供电公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 继电保护的状态评价通过对保护设备的有效监测, 同时引入科学客观的评价方法, 可以及时准确地掌握设备的运行状况, 从而合理安排检修计划, 大幅缩短检修时间和提高检修质量。研究和对比了现有继电保护状态评价方法的不足之处, 提出了一种考虑隶属度可变的继电保护变权模糊综合状态评价方法。首先完善了继电保护状态评价指标体系, 并增加了新的评价指标和劣化度计算模型。其次提出了基于系数可变、正态分布且评语集为4区的可变隶属度函数模型, 并考虑了隶属度模糊判别矩阵的动态修正问题, 提出了效果更加明显的模糊矩阵动态修正方法。构造了幅度有区别且变权系数可调的惩罚—激励型变权函数。最后, 在算例中利用该方法对某设备进行了状态评估, 并验证了该方法的可行性和优势。

关键词: 继电保护; 状态评价; 模糊综合评价; 隶属函数; 变权重

Fuzzy comprehensive state evaluation method of variable weight of relay protection based on variable membership degree

ZHAO Xiaoming¹, YU Zhihui², ZHANG Xuesong¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Evaluation of protection through effective monitoring, while using scientific and objective evaluation method, can timely and accurately grasp the operation status of equipment, so as to arrange the maintenance plan, shorten maintenance time and improve the quality of maintenance. In this paper, the shortcomings of the existing evaluation methods of protection are studied and compared. A fuzzy comprehensive state evaluation method of protection with changeable membership degree is proposed. Firstly, the protection status evaluation index system is further improved. A new evaluation index and deterioration degree calculation model are added. Secondly, a variable membership function model based on the variable coefficient, normal distribution and the comment set as the 4 area is proposed and the dynamic correction of membership fuzzy judgment matrix is considered. A new method of dynamic correction of fuzzy matrix is proposed. A variable weight function with variable amplitude and variable weight coefficient is constructed. Finally, the method is used to evaluate the state of the device, and the feasibility and advantage of the method is verified.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104).

Key words: relay protection; state evaluation; fuzzy comprehensive evaluation; membership function; variable weight

0 引言

随着电网规模的不断增长, 传统以设备停役为前提的继电保护定期检修模式逐渐暴露出某些弊端: 定检周期到来时, 可能因计划检修时间过长, 调度无法安排设备停电, 造成检修延期甚至取消;

另一方面, 设备无论实际状态好坏全部接受检验, 检修针对性也不强, 盲目检修还可能带来安全风险。而状态检修通过对设备状态的有效监测和科学客观的评价, 及时准确地掌握设备的运行状况^[1-5], 在此基础上开展检修工作, 可精准定制检修内容, 合理安排检修计划, 大幅缩短检修时间和提高检修质量。为此, 研究准确、可靠的继电保护状态评价方法具有积极意义^[6]。近年来, 国内外学者相继在继电保

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2015AA050104)

护状态检修和状态评价中进行了诸多有益尝试, 从早期通过专家讨论制定状态评分标准^[7], 到应用模式识别技术识别继电保护运行状态^[8], 再到利用模糊综合评价方法^[9]和变权理论^[10]进行继电保护状态评价, 状态评价理论在继电保护专业得到了越来越多的关注。

在继电保护状态评价的实际应用中, 一些企业如国家电网公司等结合自身运行经验, 先后颁布了有关继电保护状态检修和状态评价的相关技术导则, 并已开始实施。但上述技术导则仍以专家经验为基础, 仅依靠线性模型进行简单评价, 评分项权重固定, 各项指标以静态评价为主, 缺乏动态评判, 评价的准确性有待改进。针对上述不足, 已有文献进行了相关探讨。文献[9]将隶属函数和模糊评价理论引入继电保护状态评价中, 有一定指导意义, 但仍沿用权重由专家直接确定的方法, 客观性不足。文献[10]在继电保护状态评价中确立了变权重的基本思路, 但引入的变权函数不连续, 是否满足变权条件值得商榷。文献[11]单纯采用熵值法确立常权系数, 过渡依赖历史监测数据, 无法有效地利用专家已有经验, 同时其引入的变权均衡函数为“一类”变权函数, 适用条件受限^[12]。文献[13]提出隶属函数模糊判别矩阵动态修正方法, 改善了以往模糊评价方法针对快速劣化指标反应灵敏度不足的缺点, 有一定指导意义, 但计算过于繁琐。

本文针对上述理论的不足之处, 进一步完善了继电保护状态评价指标体系, 增加了新的评价指标和劣化度计算模型; 提出了考虑隶属度可变的继电保护变权模糊综合状态评价方法, 该方法采用熵值法和模糊层次分析法(FAHP)的组合常权计算方式, 同时引入变权理论, 构造了幅度有区别的惩罚—激励型变权函数^[14], 建立了组合变权相量; 结合模糊判别理论, 构造了基于系数可变、正态分布且评语集为4区的可变隶属度函数模型, 并考虑了隶属度模糊判别矩阵的动态修正问题, 提出了效果更加明显的模糊矩阵动态修正方法, 最后选取加权平均型算子计算出模糊评判结果。

1 模糊评价基本理论和综合状态评价步骤

1.1 模糊评价基本理论

自1965年查德首先提出模糊集合概念以来, 多年的发展逐渐形成了一门实用价值很高的数学分支, 即模糊数学^[15-16]。应用模糊数学解决某些评判问题成为近年来众多领域的研究热点。模糊数学解决评价问题包含4个最基本要素, 即建立评价因素集、建立评语集、选取隶属函数得到模糊关系矩

阵, 最后通过与权重矩阵进行模糊线性变换得到评价结果。

对继电保护设备的状态评价包含设备的诸多因素, 因此可以建立评价因素集 U , 即

$$U = [u_j] = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\} \quad (1)$$

式中, 评价因素 u_j 包含温度、差流等状态评价指标。

根据实际需求以及专家和工程积累经验, 并依据各状态量的取值范围, 可以建立评语集 V , 即

$$V = [v_j] = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\} \quad (2)$$

式中, 评语因素 v_j , 本文选取“正常”、“注意”、“异常”和“严重异常”4项评语变量。通过选取适当的隶属函数 f , 可得到模糊关系矩阵 R , 即

$$f(U) = R = [r_{ij}] \quad (3)$$

式中, 元素 r_{ij} 表示因素集 U 中状态量 u_i 对于评语集 v_j 的隶属程度。由于因素集中各个因素的重要程度和所起的作用并不相同, 需要建立权重矩阵 W , 即

$$W = [w_i] \quad (4)$$

式中, w_i 为状态量 u_i 在评价中的权重。最后通过模糊线性变换得到评价结果

$$TR = W \circ R = B = [b_j] \quad (5)$$

式中: “ \circ ”为广义模糊运算符号; B 为模糊综合状态评价结果。对于广义模糊运算符号, 考虑到综合评判需要对所有指标都有所体现, 故本文采用 $(, +)$ 算子, 即

$$B = W(, +)R = \sum_{j=1}^m w_i r_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

1.2 综合状态评价步骤

通过1.1节模糊评价的基本理论得知, 综合状态评价的基本步骤包括: 建立评价因素集和评语集, 选取隶属函数, 确定权重矩阵, 最后得到综合状态评价结果。图1展示了更为细化的评价步骤, 包含了本文所提出的一些改进方法。

2 评价指标优化及劣化度计算

2.1 评价指标优化

某企业的继电保护评价导则中包含了装置本体和二次回路两大类评价指标, 这两大类指标又包含了若干子类指标。比如在装置本体中就包含了运行环境温度、红外测温、绝缘状况、数据采集、通道运行状况、差流等评价因素。本文在计算常权重时采用的熵值法是一种适合相互独立变量之间计算权重的客观赋权方法, 因此将运行环境温度、红外测温等弱独立因素合并为一个温度因素; 考虑到同一

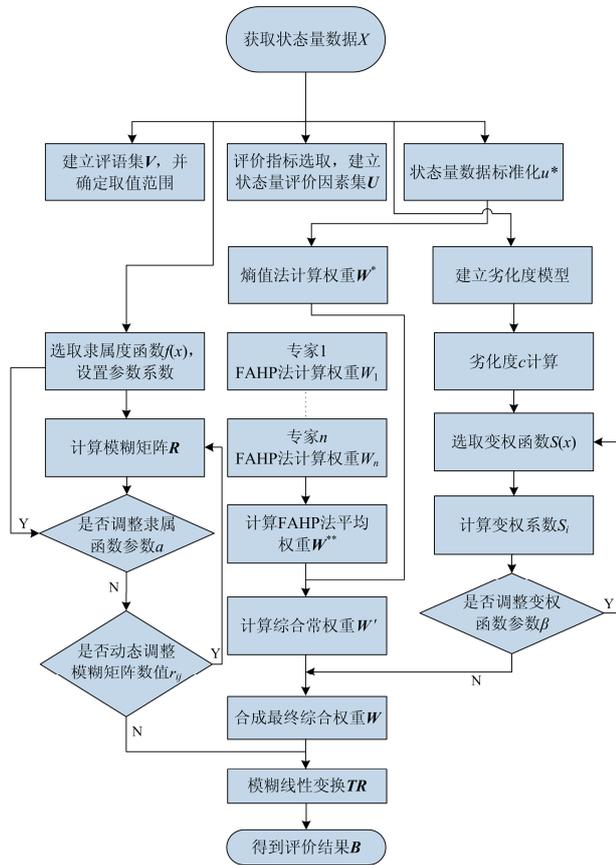


图 1 继电保护综合状态评价步骤

Fig. 1 Comprehensive state evaluation procedure of relay protection

装置不同部位间温度差异, 另增加温差因素; 考虑到不平衡电压严重到一定程度, 将会导致距离保护等含电压元件的继电保护装置误动或拒动, 故在状态评价体系中增加了不平衡电压因素。

2.2 劣化度计算

劣化度用来表征继电保护装置各评价指标的劣化程度, 由所采集的状态量数据经劣化计算得到, 其结果代入变权函数, 用来计算变权系数。评价指标在良好范围内, 可认为没有劣化, 规定此时劣化度为 1, 超出良好范围, 则按各自劣化曲线进行计算, 指标劣化度越高取值越小。因此计算劣化度首先要建立评价因素的劣化模型。对于温度型评价因素, 本文采用半正态分布函数劣化模型, 即

$$c(\mu) = \begin{cases} 1 & \mu \leq \mu_0 \\ e^{-\frac{(\mu-\mu_0)^2}{2\sigma^2}} & \sigma = \frac{\mu_{\max} - \mu_0}{3}, \mu > \mu_0 \end{cases} \quad (7)$$

其函数曲线如图 2 所示。

对于其他评价因素, 采用梯形函数劣化模型, 即

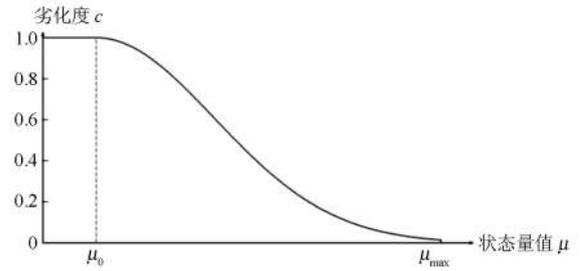


图 2 半正态分布劣化度计算模型

Fig. 2 Calculation model of the degree of deterioration of the semi-normal distribution

$$c(\mu) = \begin{cases} 1 & \mu \leq \mu_0 \\ 1 - 0.99 \times \frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0} & \mu > \mu_0 \end{cases} \quad (8)$$

其函数曲线如图 3 所示。

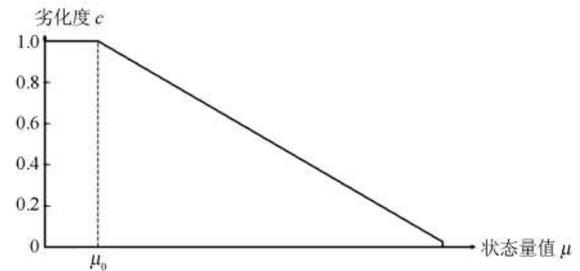


图 3 梯形分布劣化度计算模型

Fig. 3 Calculation model of the degree of deterioration of trapezoidal distribution

式(7)、式(8)和表 1 中 c 为劣化度, μ 为状态量值, μ_0 为各指标正常范围边界, μ_{\max} 为各指标“严重异常”边界, μ_1 、 μ_2 分别为“注意”和“异常”边界。考虑到变权函数自变量的取值范围以及保证足够的劣化精度, 上述劣化度 c 的取值范围为 $c \in [0.01, 1]$ 。对于正向指标, 例如装置绝缘指标, 取倒数后统一为负向指标。不同型号装置的劣化曲线和取值范围可能存在不同, 应用中可以按实际参数进行调整。表 1 给出了部分评价指标及其取值范围。

表 1 评价指标及其取值范围

Table 1 Evaluation index and its value range

评价因素	取值范围			
	μ_0	μ_1	μ_2	μ_{\max}
温度/°C	30.0	40.0	60.0	80.0
温差/°C	1.0	3.0	6.0	9.0
绝缘/(MΩ ⁻¹)	0.1	0.2	1.0	2.0
采样/%	2.5	3.0	4.0	5.0
通道/%	0.25	0.30	0.40	0.50
差流/mA	5.0	10.0	20.0	50.0
差压/V	1.0	1.5	2.0	3.0

3 综合常权重系数的确定

正如图 1 所示, 本文采用的继电保护综合状态评价常权重系数由 FAHP 法常权重系数和熵值法常权重系数组合构成。FAHP 法确定权重, 充分考虑领域内专家和工程技术人员的实践经验, 把决策过程中定性和定量的因素有机地结合起来, 将人的主观性依据用数量的形式表达出来^[17]。而熵值法确定权重则通过采集大量数据, 根据不同评价因素的离散程度确定权重, 离散程度越大, 该因素对应的权重也越大, 对评价的重要性就越大。综合 FAHP 法和熵值法的优点, 可以兼顾主观和客观两种因素。

3.1 熵值法常权重计算步骤

1) 数据标准化处理

继电保护状态评价涉及诸多评价指标, 这些指标的类型、量纲、数量级等一般并不相同, 需要进行数据的标准化处理, 消除指标的不可公度量性影响。设 U 为一组数据集合, 包含 n 组采样数据, 每组含 m 个因素, u_{ij} 为第 i 组采样数据中的第 j 个因素的数值。

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nm} \end{pmatrix} \quad (9)$$

对于正向指标:

$$u_{ij}^* = \frac{u_{ij} - \min\{u_j\}}{\max\{u_j\} - \min\{u_j\}} \quad (10)$$

对于负向指标:

$$u_{ij}^* = \frac{\max\{u_j\} - u_{ij}}{\max\{u_j\} - \min\{u_j\}} \quad (11)$$

式中, u_{ij}^* 为标准化处理后的数据。

2) 计算第 i 组状态量中第 j 个因素权重

$$p_{ij} = \frac{u_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^*} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

3) 计算第 j 项因素的熵

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \times \ln p_{ij} \quad (13)$$

式中, $k=1/\ln m$ 。

4) 计算各因素权重系数

$$w_j^* = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (14)$$

3.2 FAHP 常权重计算步骤

模糊层次分析法(FAHP)是一种改进的层次分析法(AHP), 引入了模糊一致性判断矩阵, 相比原有层次分析法, 该方法更容易检验判断矩阵是否满足一致性要求^[18]。

1) 建立模糊一致性判断矩阵。

2) 调整模糊一致性判断矩阵并满足一致性^[19]。

3) 计算权重系数。

考虑到专家对继电保护装置进行状态评价时的差异性, 本文对不同专家的 FAHP 法权重进行了算数平均, 最终得到 FAHP 法综合权重 w^{**} 。

3.3 常权组合赋权

常权组合赋权是将各评价因素的主观、客观权重按照一定规则进行组合再赋权, 兼顾了评价因素的客观信息和评价者的主观判断。

组合赋权公式为

$$w_i' = \frac{w_i^{**} w_i^{*\alpha}}{\sum w_i^{**} w_i^{*\alpha}} \quad (15)$$

式中: w_i^{**} 为 FAHP 法确定的第 i 个主观权重; w_i^* 为熵值法确定的对应的客观权重; w_i' 为组合常权重; α 为变权系数。考虑到主观、客观权重的平衡性, 本文取 $\alpha=1$ 。

4 变权函数及变权系数确定

常权重法确定的权重系数是恒定不变的, 不能随状态量的变化而变化。有时某些继电保护状态评量在某一时刻会发生较大变化, 但因其权重系数太小无法将变化传导至评价结果, 可能使评判结果失真。变权理论的引入, 使得评价因素的权重系数可以实时调整, 解决了上述常权重法的不足。文献[20-23]系统地介绍了变权理论, 并引入了变权公式(16)。

$$w_i(x) = \frac{w_i^0 S_i(x)}{\sum w_i^0 S_i(x)} \quad (16)$$

式中: $S_i(x)$ 为变权函数; w_i^0 为变权前权重; $w_i(x)$ 为变权后权重。变权理论的核心内容之一是构造变权函数 $S_i(x)$ 。对于继电保护装置, 可以参考“微笑曲线”建立局部惩罚—激励型变权函数。由 2.2 节可计算出继电保护装置各评价因素的劣化程度, 当某项评价因素劣化度很高时, 可以施以较强的惩罚权重, 增强对于高劣化度指标项的反应灵敏性。而当劣化度不高时, 可以既不惩罚也不激励, 或是采用较弱激励。

在文献[14]的基础上, 本文构造了局部惩罚—激励型变权函数式(17)。

$$S_i(x) = \begin{cases} \ln(0.7/x)^\beta + 1.0 & 0.01 \leq x \leq 0.7 \\ 1 & 0.7 < x \leq 0.9 \\ \ln(0.2/(1.1-x))^\beta + 1.0 & 0.9 < x \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中, β 为变权系数。如图 4 所示, 其函数曲线由 3 段构成, 即: 权重惩罚、权重不惩罚和权重激励。当指标评价值处于数值范围 $0.01 \leq x \leq 0.7$ 时, 对于变权函数施以最重的惩罚力度, 并且当劣化度低至一定程度时, 权重惩罚程度明显加重。当 $0.7 < x \leq 0.9$ 时, 既不惩罚也不激励; 当 $0.9 < x \leq 1$, 采用弱强度的激励力度。

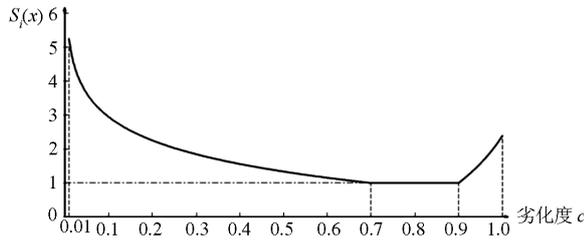


图 4 局部惩罚—激励型变权函数曲线

Fig. 4 Local penalty incentive variable weight function curve

5 可变隶属函数模型

5.1 隶属函数

模糊状态评价中一个重要的步骤是确立合适的隶属函数。工程中常用的隶属函数分布形式有三角形、梯形、抛物型、正态型、岭型等。本文选用改进型正态梯形隶属函数。对应式(2)中的评语因素 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 , 即“正常”、“注意”、“异常”和“严重异常”4 项评语语言变量的隶属函数表达式分别为式(18)—式(21)。

$$r_{i1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq \mu_0 \\ e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} & \sigma_1 = \frac{\mu_1 - \mu_0}{a_1}, \mu_0 < x \leq \mu_1 \\ 0 & x > \mu_1 \end{cases} \quad (18)$$

$$r_{i2}(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_2^2}} & \sigma_2 = \frac{\mu_1 - \mu_0}{a_2}, \mu_1 \leq x \leq \mu_2 \\ e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_3^2}} & \sigma_3 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{a_3}, \mu_2 < x \leq \mu_{\max} \\ 0 & x < \mu_0, x > \mu_2 \end{cases} \quad (19)$$

$$r_{i3}(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_4^2}} & \sigma_4 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{a_4}, \mu_0 \leq x \leq \mu_1 \\ e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_5^2}} & \sigma_5 = \frac{\mu_{\max} - \mu_2}{a_5}, \mu_1 < x \leq \mu_2 \\ 0 & x < \mu_1, x > \mu_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

$$r_{i4}(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-\mu_{\max})^2}{2\sigma_6^2}} & \sigma_6 = \frac{\mu_{\max} - \mu_2}{a_6}, \mu_2 \leq x \leq \mu_{\max} \\ 1 & x > \mu_{\max} \\ 0 & x < \mu_2 \end{cases} \quad (21)$$

式中, $a_1 \sim a_6$ 为隶属函数可调参数, 可以根据实际调整, 其值越小对应的正态函数越陡峭, 将会屏蔽更多的隶属度低的信息。图 5 为正态梯形隶属函数分布。

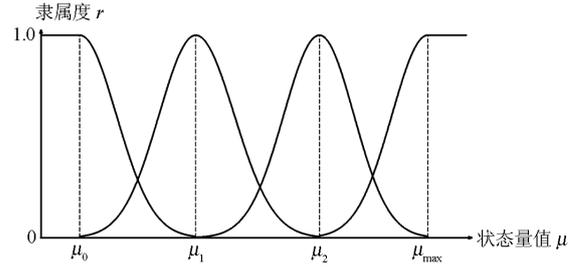


图 5 正态梯形隶属函数分布

Fig. 5 Normal trapezoidal membership function distribution

5.2 隶属度动态修正

文献[13]提出了隶属函数模糊判别矩阵动态修正方法, 可根据前后两次状态量采样值变化量对模糊判别矩阵进行修正, 提高相应状态量的隶属度值。本文提出一种更为简洁的隶属函数模糊判别矩阵动态修正方法。

设第 j 个评价因素 $t - \Delta t$ 时刻和 t 时刻的状态量采集值劣化度分别为 $c(t - \Delta t)$ 、 $c(t)$; 令第 j 个评价因素 t 时刻状态量采集值对应的隶属度计算结果为 r_{ij} 、 $r_{i+1,j}$, 对应的评语因素为 v_i 、 v_{i+1} , 如果满足:

$$c(t - \Delta t) - c(t) \geq 0.2 \quad (22)$$

对 t 时刻隶属度 r_{ij} 、 $r_{i+1,j}$ 进行修正

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{a} \quad (23)$$

$$r'_{i+1,j} = \min(a \times r_{i+1,j}, 1) \quad (24)$$

式中: r'_{ij} 和 $r'_{i+1,j}$ 为修正后的隶属度; a 为调整系数, 且 $a > 1$ 。

讨论:

1) 若 $r_{i+1,j} = 0$, 则意味着, 对应的评语因素 v_i 没有发生变化, 隶属度仍处于“正常”状态, 此时不需要修正;

2) 若 $r_{i,j} = 0$, 则意味着, 对应的评语因素 v_{i+1} 已经进入“严重异常”状态, $r_{i+1,j} = 1$, 已达到最大值, 故也无需修正。

6 算例分析

以某继电保护装置为例, 使用本文提出的隶属度可变的继电保护变权模糊综合状态评价方法对其进行状态评价。表 2 为某一监测周期内 10 组状态量采集值。此外, 在 $t - \Delta t$ 时刻和 t 时刻分别得到两组状态量采集值 U_1 、 U_2 。

$$\begin{aligned} U_1 &= \{31, 1.1, 0.073, 0.029, 0.000, 8.0, 1.1\} \\ U_2 &= \{31, 1.1, 0.073, 0.029, 0.000, 8.0, 2.5\} \end{aligned} \quad (25)$$

利用表 2 数据及式(6)一式(17)计算得到的综合变权模糊综合状态评价结果见表 3。评价结果显示, 该保护装置“正常”值为 0.711, 在 4 项评语中占比最大, 因此该装置的评价结果为正常。

利用 U_1 、 U_2 数据及式(7)、式(8)计算 t 时刻及 $t - \Delta t$ 时刻劣化度:

$$\begin{aligned} c(t) &= \{0.9982, 0.9993, 1, 0.8349, 1, 0.9340, 0.2575\} \\ c(t - \Delta t) &= \{0.9982, 0.9993, 1, 0.8349, 1, 0.9340, 0.9670\} \end{aligned} \quad (26)$$

可知劣化度满足:

$$c_7(t - \Delta t) - c_7(t) > 0.2 \quad (27)$$

因此可以对模糊矩阵 R 中第 7 个评价因素的隶属度进行修正。最后, 把不考虑变权、正常变权、增大变权系数、考虑隶属度动态修正以及按评价导则计分等 5 种评价方法得到的评价结果列入表 4。对表 4 的隶属度结果进行分析可知, 采用变权法(正常变权、 $\beta = 1$ 时, 正常值为 0.711)和常权法(正常值为 0.723)得到的评价结果和按某企业评价导则计分所得评价结果(正常值为 0.883)是一致的, 结果均显示为装置正常, 但相比评价导则计分, 变权法和常权法可以更为及时准确地反映装置的异常变化, 提示装置虽然整体处于正常状态, 但已经出现某些评价因素健康状况下降的情况。变权法(正常变权、 $\beta = 1$ 时, 异常值为 0.090)比常权法(异常值为 0.070)更为灵敏, 特别是增大变权系数后(正常变权、 $\beta = 5$ 时, 异常值为 0.117), 效果更为明显。而使用本文所提出的隶属度动态修正方法($a = 2$ 时, 异常值为 0.228)效果最为明显, 异常值由 0.090 提高到 0.228, 这足以引起评价人员的高度重视。

表 2 状态量采集值

Table 2 State quantity acquisition value

采集序号	评价因素						
	温度/°C	温差/°C	绝缘/(MΩ ⁻¹)	采样/%	通道/%	差流/mA	差压/V
1	52.0	7.3	1.567	0.043	0.036	19.0	0.499
2	47.6	4.0	0.126	0.047	0.030	20.0	0.100
3	54.3	3.4	0.086	0.020	0.016	24.6	0.571
4	41.9	8.2	0.861	0.034	0.018	4.6	2.109
5	28.4	1.4	0.934	0.018	0.034	22.9	1.543
6	60.8	1.8	0.870	0.030	0.018	8.4	1.795
7	43.8	3.7	0.071	0.034	0.002	9.2	0.879
8	31.3	9.2	0.948	0.029	0.028	3.8	1.357
9	55.1	3.6	0.475	0.023	0.030	19.4	0.193
10	39.8	2.1	1.392	0.006	0.010	8.6	1.642

表 3 计算结果

Table 3 Calculation result

评价因素 U	模糊矩阵				FAHP 法	熵值	常权组合	变权	综合	评价结果 B
	R				权重 w^{**}	权重 w^*	权重 w'	系数 $S(x)$	权重 w	
温度	$\begin{bmatrix} 0.970 & 0.088 & 0.000 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.993 & 0.067 & 0.000 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.339 & 0.619 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.472 & 0.472 \end{bmatrix}$	0.132	0.081	0.073	1.675	0.079	正常	0.711		
温差		0.127	0.098	0.085	1.686	0.093				
绝缘		0.187	0.152	0.196	1.693	0.214	注意	0.109		
采样		0.136	0.126	0.118	1.000	0.076				
通道		0.159	0.164	0.179	1.693	0.196	异常	0.090		
差流		0.151	0.195	0.202	1.186	0.154				
差压		0.108	0.198	0.146	2.000	0.188	严重异常	0.090		

表 4 评价结果对比

Table 4 Comparison of evaluation results

评价结果	评语集 V			
	正常	注意	异常	严重异常
正常变权 $\beta=1$	0.711	0.109	0.090	0.090
常权	0.723	0.138	0.070	0.070
增大变权 系数 $\beta=5$	0.696	0.070	0.117	0.117
隶属度动 态修正 $a=2$	0.603	0.093	0.228	0.076
按某企业 评价导则 计分*	0.883			

*注: 某企业评价导则计分规则为: 正常 1.0~0.86; 注意 0.85~0.71; 异常 0.70~0.61; 严重异常<0.60。

7 结论

本文对继电保护状态评价方法进行了深入研究, 在原有模糊综合评价理论的基础上, 提出了考虑隶属函数可变的继电保护变权模糊综合状态评价方法。该方法集合了多种方法优势, 既考虑到客观常权和主观常权的结合, 又引入了变权理论, 使评价因素的权重系数可以随状态量的变化实时调整。变权中又考虑多种方法, 提出了增大变权系数和隶属度动态修正两种方法, 并有以下改进和创新: 1) 进一步完善了继电保护状态评价指标体系, 引入了继电保护不平衡电压、温差等指标, 提出了温度和不平衡电压等指标的劣化度计算模型; 2) 采用熵值法和模糊层次分析法(FAHP)的组合常权计算方式, 并在 FAHP 中引入多位专家计分; 3) 引入变权理论, 构造了幅度有区别且变权系数可调的惩罚—激励型变权函数; 4) 提出了一种效果更加明显的隶属函数模糊判别矩阵动态修正方法, 并比较了单纯变权和单纯隶属度修正的实际效果。通过算例分析可知, 本评价方法可较为准确地反映继电保护设备的实际状态, 提高对于继电保护状态评价的准确性, 为继电保护开展状态检修提供了决策依据。

参考文献

[1] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2

[2] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58.

XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.

[3] 赵晓明, 吴建伟. 电力系统继电保护定期校验问题综述及其展望[J]. 浙江电力, 2011, 30(11): 1-5. ZHAO Xiaoming, WU Jianwei. Overview of periodic check problems and prospect for relay protection in power system[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(11): 1-5.

[4] 赵晓明, 余志慧. RET670 主变保护调试技术研究[J]. 浙江电力, 2010, 29(7): 1-3. ZHAO Xiaoming, YU Zhihui. Research of RET670 transformer protection's commissioning[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(7): 1-3.

[5] 胡佳琳, 张炜, 操丹丹, 等. 基于模糊理论的电力系统健康状况的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 61-66. HU Jialin, ZHANG Wei, CAO Dandan, et al. Research on health status of power system based on fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 61-66.

[6] 赵冬梅, 梁伟宸, 张旭. 基于变权重模糊综合评判法的继电保护状态评估[J]. 电气应用, 2015(17): 70-75. ZHAO Dongmei, LIANG Weichen, ZHANG Xu. State evaluation of relay protection based on variable weight fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Electrotechnical Application, 2015(17): 70-75.

[7] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵. 继电保护状态检修在现代电网中的应用研究[J]. 华东电力, 2011, 39(8): 1275-1278. YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui. Implementation of condition-based maintenance for relay protection of modern power grid[J]. East China Electric Power, 2011, 39(8): 1275-1278.

[8] 田有文, 唐晓明. 基于支持向量机的微机保护装置状态评估的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 66-69. TIAN Youwen, TANG Xiaoming. Study on state evaluation for microprocessor protective device based on SVM[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 66-69.

[10] 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 Zexiang, HU Chunchao, 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.
- [11] 彭志峰, 杨明玉. 基于变权理论的继电保护状态评价方法[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 92-96.
PENG Zhifeng, YANG Mingyu. Status evaluation method of relay protection based on the variable weight theory[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 92-96.
- [12] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.
SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.
- [13] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)—变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII): variable weights analysis[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(3): 1-9.
- [14] 师元康, 姜振超, 安寸然. 智能变电站继电保护装置状态评估实用化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 119-125.
SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, AN Cunran. Research on practical state evaluation of protection device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 119-125.
- [15] 张正, 罗日成, 伍珊珊, 等. 带惩罚变权的大型变压器状态模糊层次评价方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 9(3): 51-56.
ZHANG Zheng, LUO Richeng, WU Shanshan, et al. Fuzzy hierarchy analysis method for large transformer state assessment with punishment variable weights[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 9(3): 51-56.
- [16] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998.
- [17] 刘运通, 胡江碧. 模糊评判的数学模型及其参数估计[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 112-115.
LIU Yuntong, HU Jiangbi. A mathematical model and its parameters estimation for fuzzy evaluation[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2001, 27(1): 112-115.
- [18] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122.
ZHU Yin, MENG Zhiyong, KAN Shuyu. Determination of weight value by AHP[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 119-122.
- [19] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
ZHANG Jiju. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88.
- [20] 张玉, 莫寒, 张烈平. 基于模糊支持向量机的光伏发电量预测[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 116-120.
ZHANG Yu, MO Han, ZHANG Lieping. Photovoltaic power prediction based on fuzzy support vector machine[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 116-120.
- [21] 段杰, 王秀丽, 侯雨伸. 基于模糊专家系统的输电线路分段冰风荷载等效停运率模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 220-228.
DUAN Jie, WANG Xiuli, HOU Yushen. Piecewise equivalent model of ice disaster impact on outage rate of transmission lines using fuzzy expert system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 220-228.
- [22] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 气体绝缘设备中 SF₆ 气体分解产物与设备故障关系的建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 231-238.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, JI Yansong, et al. Modeling of the relation between SF₆ decomposition products and interior faults in gas insulated equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 231-238.
- [23] 赵靛, 柴庆龙. 基于分层模糊符号有向图法的故障诊断方法[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 26-31.
ZHAO Lian, CHAI Qinglong. A fault diagnosis approach based on hierarchical fuzzy signed directed graph model[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 26-31.

收稿日期: 2016-11-10; 修回日期: 2017-03-13

作者简介:

赵晓明(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 22639366@qq.com

余志慧(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行; E-mail: 112168713@qq.com

张雪松(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: ee_zxs@163.com

(编辑 姜新丽)