

DOI: 10.7667/PSPC170289

基于诱导有序加权证据推理方法的不完全信息下 继电保护系统健康状态评价

段嘉璐, 应黎明, 罗先成, 徐云

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 考虑到实际继电保护系统的监测数据庞杂, 往往呈现动态性、不完备性和不精确性等特征, 属于不完全信息, 针对不完全信息下继电保护系统的评价方法进行研究。基于证据推理方法, 对属性值存在缺失的继电保护系统状态进行了综合评价。引入诱导有序加权算子, 系统状态信息的权重依据各属性表现的排序来确定, 保证了状态评价模型中权系数与系统状态在任一时间点上的相关性。通过算例与传统模糊评价方法对比, 验证诱导有序加权证据推理方法对不完全信息下继电保护系统状态评价的有效性, 且更能针对性地反映系统劣化趋势。

关键词: 诱导有序加权平均(IOWA)算子; 证据推理(ER); DS证据理论; 不完全信息; 状态评价; 继电保护

Health condition assessment for relay protection system based on the induced ordered weighted evidential reasoning method under incomplete information

DUAN Jiajun, YING Liming, LUO Xiancheng, XU Yun

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The monitoring data of a relay protection system in practical application is generally confused, dynamic, incomplete and inaccurate, which belongs to the 'incomplete information'. This paper researches condition assessment of relay protection system which includes incomplete information. Based on evidence reasoning methods, a comprehensive evaluation for relay protection system without attribute value is provided. By introducing the induced ordered weighted operator, the weight of system status information is determined based on the sequence of each attribute's performance, ensuring that weight coefficient of the state evaluation model is consistent with system status at any moment. Compared with traditional fuzzy evaluation method by calculation example, Induced Ordered Weighted Evidence Reasoning (IOWER) Method for relay protection systems with incomplete information proves more effective, which could be more specific to reflect system's degradation.

This work is supported by Scientific and Technological Project of China Southern Power Grid (No. GZ2014-2-0049).

Key words: Induced Ordered Weighted Average (IOWA) operator; evidential reasoning (ER); DS evidence theory; incomplete information; condition evaluation; relay protection

0 引言

目前继电保护系统状态评价方法多依据系统运行经验规律的统计分析, 由专家讨论制定一系列评分模型, 在此基础上对设备运行状况做出评价^[1], 对数据完整性、精确性要求较高, 往往是针对运行监测大数据冗余信息的提取分析^[2], 未考虑不完备数据的情况。然而设备状态和性能优劣的描述语言是定性、模糊的^[3], 往往无法及时全面了解设备及关键部位运行状况^[4]。研究不完全信息下的继电保护系统, 解决历史数据不全和关键信息缺失等问题^[5],

具有重要现实意义。

针对不完全信息的综合评价问题, 有两种处理思路: 一是采用数理统计方法, 例如威布尔分布拟合的继电保护系统失效模型^[6]、元件老化模型^[7]或数据挖掘技术等, 将不完全信息化为完全信息; 二是运用证据推理方法直接分配已知信息的信度, 如D-S证据理论(Dempster/Shafar)和证据推理(Evidential Reasoning, ER)方法^[8]。文献[9]通过对变压器监测数据指标的状态分析, 证实了在信息不完全状况下, ER评价结果较模糊评价结果更加合理。

诱导有序加权的证据推理(Induced Ordered Weighted Evidential Reasoning, IOWER)方法建立在D-S证据理论信息合成规则的基础上, 可完成多层

次的属性综合^[10], 通过诱导向量的选取, 在动态评价的同时突出系统的某种状态。该方法在电力工业其他领域已有研究, 如在风电功率预测^[11]和电力负荷预测^[12]中, 引入诱导有序加权平均算子(Induced Ordered Weighted Averaging operator, IOWA), 依据各时段子预测法的准确度高低进行有序赋权, 提高组合预测的效率及精度。

合理的评价方法对电力设备安全经济运行至关重要^[13], 论文将 DS 证据理论的证据组合规则应用于继电保护系统状态评价中。在 ER 算法的基础上, 引入 IOWA 算子, 直接处理系统监测得到的不完全信息。根据评价要求赋予期望效用不同的权重值, 实现了多周期数据的动态评价。通过算例与传统的模糊综合评价方法进行对比, 验证其有效性。

1 不完全信息下证据推理的状态评价方法

当不完全信息类型多样化时, 例如信息缺失、信息模糊、区间信度和区间评估等级等, 难以将不完全信息转化为完全信息进行状态评价。此时借助证据推理方法建模, 可大大减少工作量^[14]。

1.1 证据理论基础

定义 1 对某一系统状态评价问题, 称其所有可能评价结果的集合 Θ 为识别框架。 Θ 的幂集 2^Θ 是包含 Θ 所有可能子集的集合。当 Θ 中的元素有 N 个时, Θ 的幂集有 2^N 个, 具体为

$$2^\Theta = \{\Phi, \{a_1\}, \dots, \{a_N\}, \{a_1, a_2\}, \{a_1, a_3\}, \dots, \{a_{N-1}, a_N\}, \{a_1, a_2, a_3\}, \dots, \Theta\} \quad (1)$$

定义 2 设 Θ 为识别框架, 如果集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足

$$m(\Phi) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (3)$$

则称 m 为框架 Θ 上的基本可信度分配(Basic Possibility Assignment, BPA), 也称 $m(\text{mass})$ 函数。证据的质量(mass)支持了一个信任, 对应于 Θ 中的一个或多个子集。

定义 3 Θ 为识别框架, 集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 是框架 Θ 上的基本可信度分配, 则称由公式(4)

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B), \forall A \subseteq \Theta \quad (4)$$

所定义的函数 $\text{Bel}: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为 Θ 上的信度函数。 $\text{Bel}(A)$ 表示主体对命题 A 的总信任程度, 或对命题为真的总支持程度。

定义 4 如果 $m(A) > 0$, 则称 A 为信度函数 Bel 的焦点, 所有焦点的集合称为“核”; C_j 表示第 j 个

属性, 对于 $\forall a_k \in \Theta$, 其中 a_k 表示方案, 如果第 k 个方案 a_k 下第 j 个属性 C_j 的值不为零, 即 $f(a_k, C_j) \neq 0$, 则称 $\{a_k\}$ 是属性 C_j ($j=1, 2, \dots, M$) 的证据的焦点。

1.2 诱导有序加权平均(IOWA)算子

有序加权平均(Ordered Weighted Averaging, OWA)算子于 1988 年首次被提出后大量运用于管理决策等领域。文献[15]将 OWA 算子推广, 提出了诱导向量。

定义 5 若 F 满足

$$F(\langle u_1, a_1 \rangle, \dots, \langle u_n, a_n \rangle) = \sum_{j=1}^n \omega_j b_j \quad (5)$$

则称“ F ”为诱导有序加权平均算子。其中 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^\top$ 是与 F 相关联的加权向量,

$\omega_j \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$; $\langle u_i, a_i \rangle$ 为 OWA 对, b_j 是 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中按照降序排列的第 j 个元素所对应 OWA 对中的第二个分量, 并且称 $\langle u_i, a_i \rangle$ 中的第一个分量 u_i 为诱导分量, a_i 为数值分量。如果出现 $u_i = u_j$, 则在集结过程中将 a_i 和 a_j 平分:

$$\left\langle u_i, \frac{1}{2}(a_i + a_j) \right\rangle, \left\langle u_j, \frac{1}{2}(a_i + a_j) \right\rangle \quad (6)$$

1.3 期望效用诱导的证据推理(ER)方法

定义 6 令分布式评估向量为

$$S(e_i(a_i)) = \{(H_n, \beta_{n,i}(a_i)), n=1, \dots, N\} \quad (7)$$

式(7)表示被评价对象 a_i 的属性 e_i 被评估为等级 H_n 的信度为 $\beta_{n,i}(a_i)$ 。

M 个被评价对象的 L 个基本属性的评价结果可以表示为信度决策矩阵: $D_g = (S(e_i(a_i)))_{L \times M}$ 。

效用计算: 将不完全信息转化为效用信息, 从而作为 IOWA 算子的诱导向量。

$$u_{\min}(i) = (\beta_{1,i} + \beta_{H,i})u(H_1) + \sum_{n=2}^N \beta_{n,i}u(H_n) \quad (8)$$

$$u_{\max} = \sum_{n=1}^{N-1} \beta_{n,i}u(H_n) + (\beta_{N,i} + \beta_{H,i})u(H_N) \quad (9)$$

$$u_{\text{avg}}(i) = \frac{u_{\min}(i) + u_{\max}(i)}{2} \quad (10)$$

L 个基本属性的信度计算: ER 算法将权重信息和初始的信度信息相结合, 可得到 m 函数为

$$m_{n,i} = m_i(H_n) = \omega_i \beta_{n,i}(a_i) \quad (11)$$

$$m_{H,i} = m_i(H) = 1 - \sum_{n=1}^N m_{n,i} = 1 - \omega_i \sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_i) \quad (12)$$

$$\tilde{m}_{H,i} = \tilde{m}_i(H) = \omega_i \left(1 - \sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_i) \right) \quad (13)$$

$$\bar{m}_{H,i} = \bar{m}_i(H) = (1 - \omega_i) \quad (14)$$

其中: $n=1, 2, \dots, N$; $i=1, \dots, L$, 且有

$$m_{H,i} = \bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}, \quad \sum_{i=1}^L \omega_i = 1 \quad (15)$$

m 函数“ $m_{n,i}$ ”表示第 i 个基本属性 e_i 支持评价对象 a_i 的综合属性被评估为第 n 个评价等级 H_n 的程度。余下的信度 $m_{H,i}$ 被分配给了整个集合 H , 而非分配给某个特定的评价等级。

合成可信度分配:

$$\{H_n\}: m_n = k \left[\prod_{i=1}^L (m_{n,i} + \bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}) - \prod_{i=1}^L (\bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}) \right] \quad (16)$$

$$\{H\}: \tilde{m}_H = k \left[\prod_{i=1}^L (\bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}) - \prod_{i=1}^L (\bar{m}_{H,i}) \right] \quad (17)$$

$$\{H\}: \bar{m}_H = k \left[\prod_{i=1}^L (\bar{m}_{H,i}) \right] \quad (18)$$

$$k = \left[\sum_{n=1}^N \prod_{i=1}^L (m_{n,i} + \bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}) - (N-1) \prod_{i=1}^L (\bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}) \right]^{-1} \quad (19)$$

将合成的可信度分配归一化, 得到综合评价的信度为

$$\{H_n\}: \beta_n = \frac{m_n}{1 - \bar{m}_H}, n = 1, \dots, N \quad (20)$$

$$\{H\}: \beta_H = \frac{\tilde{m}_H}{1 - \bar{m}_H} \quad (21)$$

β_n 和 β_H 分别表示被评价对象 a_i 的综合属性被评估为等级 H_n 和不确定等级 H 的信度。

2 继电保护系统综合评价模型

2.1 评价指标体系

现有继电保护系统的研究已定义了一系列较为完善的风险评价指标^[16]。然而目前针对智能变电站二次设备的数据库建设尚处于起步阶段, 有效的巡检数据十分缺乏^[17], 用于状态评价分析的两类主要数据来源是历史统计数据 and 实时运行数据, 其信息不完全是必然存在的。

选取继电保护系统实时状态信息的主要指标, 建立继电保护状态评价系统简化模型, 如图 1 所示。

2.2 评价指标的标准化

状态信息具有不同的物理意义及取值范围, 首先进行标准化处理: 将监测值折算到[0, 1]。状态评

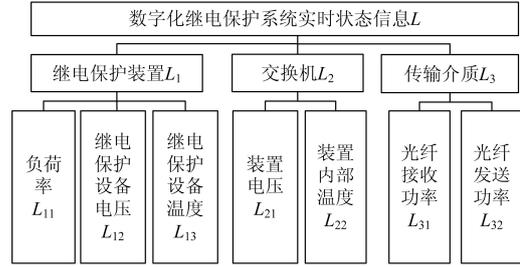


图 1 继电保护系统简化状态信息模型

Fig. 1 Simplified status information model of relay protection

价信息按影响效果可分为效益型、成本型和区间型。变换公式如式(22)一式(24)。

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1, & x > x_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

$$g(x) = \begin{cases} 1, & x < x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0, & x > x_{\max} \end{cases} \quad (23)$$

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_m - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x \leq x_m \\ 1, & x_m < x < x_n \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_n}, & x_n \leq x \leq x_{\max} \\ 0, & \end{cases} \quad (24)$$

式中: x 为该指标的实际值; $[x_{\min}, x_{\max}]$ 为该指标运行要求的范围; $[x_m, x_n]$ 为该指标的最佳运行范围。

2.3 归一化方法

本文以岭形分布隶属度函数来描述各状态空间的模糊关系。将二次设备的信息状态划分为 4 个等级: 严重、异常、注意、正常, 分别表示为 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 。对应的隶属度函数如式(25)一式(28)所示。

$$l_{p_1}(z) = \begin{cases} 1, & z \leq 0.2 \\ 0.5 - 0.5 \sin \frac{\pi}{0.2} (z - 0.3), & 0.2 < z \leq 0.4 \\ 0, & z > 0.4 \end{cases} \quad (25)$$

$$l_{p_2}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0.2 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{\pi}{0.2} (z - 0.3), & 0.2 < z \leq 0.4 \\ 0.5 - 0.5 \sin \frac{\pi}{0.2} (z - 0.5), & 0.4 < z \leq 0.6 \\ 0, & z > 0.6 \end{cases} \quad (26)$$

$$l_{p_3}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0.4 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{\pi}{0.2}(z - 0.5), & 0.4 < z \leq 0.6 \\ 0.5 - 0.5 \sin \frac{\pi}{0.2}(z - 0.7), & 0.6 < z \leq 0.8 \\ 0, & z > 0.8 \end{cases} \quad (27)$$

$$l_{p_4}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0.6 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{\pi}{0.2}(z - 0.7), & 0.6 < z \leq 0.8 \\ 1, & z > 0.8 \end{cases} \quad (28)$$

根据隶属度函数, 得出一级指标 i 中的 n 个二级指标的劣化度数值 z_{ij} 隶属于状态空间 $[p_1, p_2, p_3, p_4]$ 的隶属度矩阵 L_i , 如式(29)所示。

$$L_i = \begin{bmatrix} l_{p_1}(z_{i1}) & l_{p_2}(z_{i1}) & l_{p_3}(z_{i1}) & l_{p_4}(z_{i1}) \\ l_{p_1}(z_{i2}) & l_{p_2}(z_{i2}) & l_{p_3}(z_{i2}) & l_{p_4}(z_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{p_1}(z_{in}) & l_{p_2}(z_{in}) & l_{p_3}(z_{in}) & l_{p_4}(z_{in}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

2.4 权重指标

反熵权法能较好地体现指标之间的差异, 且克服了熵权法在极端情况下权重趋于零的问题。权重

根据指标的在线监测数据得到, 可以避免人为因素的干扰。用 2.2、2.3 小节的方法对监测数据进行处理, 得到数据评价矩阵: $R = [r_{kj}]_{M \times N}$ 。其中, r_{kj} 表示评价对象 k 的指标 j 的值。

$$r'_{kj} = \frac{r_{kj}}{\sum_{k=1}^M r_{kj}} \quad (30)$$

$$E_j = -\sum_{k=1}^M r'_{kj} \ln(1 - r'_{kj}) \quad (31)$$

指标 j 的权重为

$$\omega'_j = E_j / \sum_{k=1}^N E_j \quad (32)$$

最后得到客观权重向量: $\omega' = [\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_N]$ 。

3 IOWER 状态评价分析

本节通过算例分析验证方法的有效性。完整的继电保护系统实时监测数据如表 1 所示(传输介质指标中的功率为功率灵敏度值, 表示最小接收功率, 故只有下限)。

表 1 保护设备状态信息表

Table 1 Status information table of protection equipment

一级指标	二级指标	三级指标	单位	良好值范围	门限值		监测数据				
					下限	上限	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
继电保护系统 L	继电保护装置 L_1	负荷率 L_{11}	1	0~70%	—	95%	0.05	0.06	0.08	0.1	0.2
		装置电压 L_{12}	V	4.9~5.1	4.5	5.5	4.8	5	5.1	5.2	5.2
		继保温度 L_{13}	°C	5~30	-10	60	0	20	30	40	35
	交换机 L_2	装置电压 L_{21}	V	4.9~5.1	4.5	5.5	4.9	5	5.1	5.2	5.25
		装置内部温度 L_{22}	°C	5~30	-10	60	25	25	30	35	38
		光纤接收功率 L_{31}	dBm	-25~-14	-31	—	-16	-20	-22	-24	-29
传输介质 L_3	光纤发送功率 L_{32}	dBm	-18~-14	-20	—	-16	-20	-18	-16	-14	

3.1 监测数据预处理

根据表 1 列出的监测值和 2.2 小节中的标准化方法, 计算得到如表 2 所示的标准化指标。

表 2 继电保护设备状态信息标准化指标

Table 2 Normalized index of relay protection devices'

	status information				
	实测值的归一化指标(5 个测量周期)				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
负荷率 L_{11}	1	1	1	1	1
装置电压 L_{12}	0.75	1	1	0.75	0.75
继保温度 L_{13}	0.67	1	1	0.67	1
装置电压 L_{21}	1	1	1	0.75	0.625
装置内部温度 L_{22}	1	1	1	1	0.8
光纤接收功率 L_{31}	1	1	1	1	0.33
光纤发送功率 L_{32}	1	0	1	1	1

根据隶属度计算式(25)一式(28)得到隶属度矩阵。隶属度矩阵的行表示状态评价向量 $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, \emptyset\}$; 矩阵的列表示评价指标向量 $L = \{L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{21}, L_{22}, L_{31}, L_{32}\}$ 。

假设部分信息缺失, 得到如表 3 所示的各监测指标评价信息。其中带*号的数据是由于测量仪器故障、人工记录失误和环境影响等原因而造成的缺失, 为不完全信息。

为了提高状态评价的准确性, 根据历史运行经验和专家意见等, 假定不完全信息已知可能出现的最低状态或最高状态, 故该监测状态数据既含有不完全信息“*”部分, 又含有模糊信息部分。如表 3 中的括号所示: 例如“(H_2 ~ H_4)”即表示该不完备状态的最坏评价结果是 H_2 , 最好的评价结果是 H_4 。

表 3 设备状态评价信息(含有*的为信息不完全的数据)

Table 3 Equipment condition assessment information (* for incomplete information data)

指标	信度矩阵(5 个测量周期)				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
L_{11}	H_4	H_4	H_4	H_4	H_4
L_{12}	$H_4(0.854)$	*($H_1 \sim H_3$)	*($H_3 \sim H_4$)	$H_4(0.854)$	$H_4(0.854)$
	$H_3(0.146)$			$H_3(0.146)$	$H_3(0.146)$
L_{13}	$H_4(0.273)$	H_4	H_4	$H_4(0.273)$	*($H_1 \sim H_4$)
	$H_3(0.727)$			$H_3(0.727)$	
L_{21}	*($H_2 \sim H_4$)	H_4	*($H_3 \sim H_4$)	$H_4(0.854)$	$H_4(0.038)$
				$H_3(0.146)$	$H_3(0.962)$
L_{22}	H_4	*($H_1 \sim H_3$)	H_4	*($H_2 \sim H_4$)	H_4
L_{31}	H_4	H_4	H_4	H_4	$H_2(0.727)$
					$H_1(0.273)$
L_{32}	H_4	H_1	H_4	H_4	H_4

根据式(30)一式(32)确定指标 $L_j(j=11,12,\dots,32)$ 的权重向量为: $\omega=(0.154\ 252, 0.079\ 955, 0.110\ 701, 0.120\ 6, 0.125\ 952, 0.201\ 573, 0.206\ 965)$ 。

对表 1 所示的完整监测数据, 采用反熵权法和 AHP 组合赋权的模糊处理方法得到的结果为 $(H_1, H_2, H_3, H_4)=(0, 0.018\ 4, 0.084\ 9, 0.896\ 7)$ 。

3.2 IOWER 综合评价方法

1) 确定识别框架及证据源的基本可信度分配: 将表 2 中各状态评价等级“ H_i ”($i=1, 2, \dots, 4$) 看作 DS-AHP 证据理论的识别框架 $\Theta = \{H_1, H_2, H_3, H_4\}$ 。

然后根据“定义 4”从不完全信息矩阵得到每个监测周期下的所有焦点: 将监测周期 $A_j(j=1, 2, \dots, 5)$

记作同一识别框架 Θ 下的不同信度函数的基本可信度分配 $m_j(j=1, 2, \dots, 5)$, 并将周期指标 $A_j(j=1, 2, \dots, 5)$ 下属性值相同或影响程度相同的监测信息归入同一幂集子集, 即同一焦点。

2) 针对系统的不同状态信息 L_i 以及不同时段 A_j 的数据, 构成 $i \times j$ 阶信度决策矩阵, 其中缺失的状态值表示为区间 $([a, b], 1)$;

3) 归一化数据, 通过期望效用来定义诱导变量。给定假设效用值 $u(H_1)=0.25, u(H_2)=0.5, u(H_3)=0.75, u(H_4)=1$ 。利用式(5)、式(6)计算诱导向量, 再根据式(7)计算 ER 对向量, 结果如表 4 所示。

表 4 期望效用加权的有序 ER 对

Table 4 Expected utility orderly weighted ER vector

序号	有序 ER 对矩阵(5 个测量周期)				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
1	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$
2	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$
3	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$
4	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 0.963\ 5, \{(H_4, 0.854), (H_3, 0.146)\} \rangle$	$\langle 0.963\ 5, \{(H_4, 0.854), (H_3, 0.146)\} \rangle$
5	$\langle 0.963\ 5, \{(H_4, 0.854), (H_3, 0.146)\} \rangle$	$\langle 0.5, \{[(H_1 \sim H_3), 1]\} \rangle$	$\langle 1, \{(H_4, 1)\} \rangle$	$\langle 0.963\ 5, \{(H_4, 0.854), (H_3, 0.146)\} \rangle$	$\langle 0.759\ 5, \{(H_4, 0.038), (H_3, 0.962)\} \rangle$
6	$\langle 0.818\ 25, \{(H_4, 0.273), (H_3, 0.727)\} \rangle$	$\langle 0.5, \{[(H_1 \sim H_3), 1]\} \rangle$	$\langle 0.875, \{[(H_3 \sim H_4), 1]\} \rangle$	$\langle 0.818\ 25, \{(H_4, 0.273), (H_3, 0.727)\} \rangle$	$\langle 0.625, \{[(H_1 \sim H_4), 1]\} \rangle$
7	$\langle 0.75, \{[(H_2 \sim H_4), 1]\} \rangle$	$\langle 0.25, \{(H_1, 1)\} \rangle$	$\langle 0.875, \{[(H_3 \sim H_4), 1]\} \rangle$	$\langle 0.75, \{[(H_2 \sim H_4), 1]\} \rangle$	$\langle 0.431\ 75, \{(H_2, 0.727), (H_1, 0.273)\} \rangle$

采取上一节得到的指标权重向量: $\omega=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7)=(0.15, 0.08, 0.11, 0.12, 0.13, 0.20, 0.21)$ 。系统状态评价时, 对期望效用大

小不同的证据信息重视程度不同。将权向量分别按降序和升序排序, 分别得到重视各时段优势信息和劣化信息的状态评价结果。

4) 由证据合成公式(式(8)一式(21)), 计算各监测周期的综合评价信度。如表 5 和表 6 所示。

表 5 IOWER 方法的评价结果(重视优势状态)

Table 5 Evaluation results of IOWER method
(attaches great importance to the advantage status)

测量 周期	IOWER 评价结果				
	H_1	H_2	H_3	H_4	Θ
A_1	0	0	0.068	0.884	0.048
A_2	0.060	0	0	0.788	0.151
A_3	0	0	0	0.887	0.113
A_4	0	0	0.083	0.868	0.049
A_5	0.143	0.016	0.107	0.758	0.076

表 6 IOWER 方法的评价结果(重视劣化状态)

Table 6 Evaluation results of IOWER method
(attaches great importance to attention status)

测量 周期	IOWER 评价结果				
	H_1	H_2	H_3	H_4	Θ
A_1	0	0	0.155	0.696	0.149
A_2	0.222	0	0	0.502	0.276
A_3	0	0	0	0.706	0.294 0
A_4	0	0	0.175	0.675	0.15
A_5	0.154	0.058	0.162	0.463	0.163

对比 3.1 小节, 根据完整数据, 采用传统的模糊处理得到健康状态评价结果。相比传统方法正常状态 H_4 的信度 0.896 7, 利用 IOWER 方法得到 H_4 的平均信度如下: 重视优势信息时为 $0.837 \pm 0.087 4$ ($0.087 4$ 为不确定信度); 重视劣化信息时为 $0.604 \pm 0.206 4$ ($0.206 4$ 为不确定信度), 与实时信息状态值 0.77 较为相符。故 IOWER 方法能够较好地处理不完全信息对各评价等级的支持度, 科学地给出不确定信度大小, 及时反映系统存在的风险。

4 结论

论文将诱导有序加权证据推理方法应用于不完备信息的继电保护系统状态评价中。以期望效用作为诱导向量, 根据需要灵活改变指标权重, 并与传统层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)+反熵权法的模糊评价结果相对比, 得出以下结论:

1) 在状态评价过程中引入 IOWA 算子, 可根据评价要求赋予监测数据(包括不确定信息)各项指标动态的权重。在论文中以期望效用作为诱导向量, 权重按照升/降序排列。在实际应用中可根据需要更加灵活地选取诱导向量和权重, 实现更具针对性的评价。

2) 由于系统状态绝大部分时段都处于良好以上水平, 通过期望效用诱导向量强调劣化信息, 更

敏感地反映系统风险信息, 具有实用价值。

3) IOWER 方法的评价结果不仅与实时状态信息较为相近, 且能够将证据支持度和不确定度明确给出, 便于下一步决策。

参考文献

- [1] 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 Aijun. The state evaluation method of relay protection and its use in maintenance decision[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [2] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 108-120. DOI 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [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 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.
- [4] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. Investigation on condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [5] 陈星田, 熊小伏, 齐晓光, 等. 一种用于继电保护状态评价的大数据精简方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 538-548.
CHEN Xingtian, XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, et al. A big data simplification method for evaluation of relay protection operation state[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 538-548.
- [6] 王玉财, 吕飞鹏, 何奎. 满足可靠性要求的继电保护装置预防检修模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 49-53.
WANG Yucai, LÜ Feipeng, HE Kui. Preventive maintenance model for relay protection device based on reliability requirements[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 49-53.
- [7] 邓奥攀, 胡志坚, 胡美玉, 等. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 69-74.
DENG Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu, et al. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System

- Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74.
- [8] 潘玉厚. 不完全与不确定信息下的多属性综合评价方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
PAN Yuhou. The research on multi-attribute comprehensive evaluation methods with incomplete and uncertainty information[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [9] IRUNGU G K, AKUMU A O, MUNDA J L, et al. Application of fuzzy logic and evidential reasoning methodologies in transformer insulation stress assessment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1444-1452.
- [10] 付艳华. 基于证据推理的不确定多属性决策方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
FU Yanhua. Researches on uncertain multi-attribute decision making based on evidential reasoning[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [11] 乔梁, 张露, 许懿, 等. 基于最大-最小贴近度和诱导有序加权算子的风电功率短期预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 114-121.
QIAO Liang, ZHANG Lu, XU Yi, et al. Wind power short-term forecast model based on maximum- minimum approach degree and induced ordered weighted operator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 114-121.
- [12] 龙瑞华, 毛弋, 毛李帆, 等. 基于诱导有序加权平均算子和马尔可夫链的中长期电力负荷组合预测模型[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 150-156.
LONG Ruihua, MAO Yi, MAO Lifan, et al. A combination model for medium and long-term load forecasting based on induced ordered weighted averaging operator and Markov chain[J]. Power system Technology, 2010, 34(3): 150-156.
- [13] 万安平, 顾新建, 陈坚红, 等. 燃气轮机状态维修决策模型及系统设计[J]. 热力发电, 2016, 45(12): 56-61.
WAN Anping, GU Xinjian, CHEN Jianhong, et al. Study on the state maintenance decision-making model and system design of gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(12): 56-61.
- [14] YANG J B, WANG Y M, XU D L, et al. The evidential reasoning approach for MADA under both probabilistic and fuzzy uncertainties[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171(1): 309-343.
- [15] YANGER R R, FILEV D P. Induced ordered weighted averaging operators[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B, 2011, 29(2): 141-150.
- [16] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣, 等. 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, et al. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.
- [17] 曹海欧, 张沛超, 高翔, 等. 基于模糊支持向量机的继电保护状态在线评价[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 70-74.
CAO Haiou, ZHANG Peichao, GAO Xiang, et al. Online condition evaluation of relay protection based on fuzzy support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 70-74.

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-05-24

作者简介:

段嘉珺(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事电力设备状态评估与故障诊断方面的研究。E-mail: duanjiajun@whu.edu.cn

应黎明(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态评估与故障诊断、电力设备有源噪声控制。E-mail: LMYing@whu.edu.cn

(编辑 魏小丽)