基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价

徐长宝[1],王玉磊[2,3],赵立进[1],高吉普[1],黄 良[1],应黎明[2]

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院,贵州 贵阳 550000;
2. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;3. 国网青岛供电公司,山东 青岛 266002)

摘要:智能变电站建设为二次设备实时信息的获取提供了条件,准确了解继电保护系统的状态对提高供电可靠性具有重要作用。根据智能变电站的信息流向和设备功能建立基于实时自检信息和关键历史信息的状态评价信息模型,考虑传统状态评价方法对系统状态的评估具有滞后性,提出基于信息趋势预测的惩罚修正策略,根据趋势预测的结果选取岭形模糊隶属度函数进行模糊处理;采用层次分析法和反熵权法结合的组合赋权方法进行权重设定,克服了传统熵权法灵敏度太高的缺陷。将所提方法与传统方法进行对比验证,仿真结果表明所提方法可以有效地提高状态评价结果的准确性和及时性。

关键词:智能变电站;继电保护;信息趋势预测;组合赋权;反熵权法;状态评价;模糊综合评价

中图分类号:TM 77 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.024

0 引言

继电保护系统状态评价是进行故障诊断、风险评估和状态检修的重要基础数据源,对改进运维检修模式、保障电网可靠运行具有重要作用。智能变电站继电保护系统增加了过程层设备,且新型的继电保护装置信息交互更便捷。因此,传统的继电保护状态评价难以满足现实要求[1]。故障跳闸的正确动作与否遵循木桶原理,因此,状态评价应面向继电保护系统而不仅是面向装置,以使状态评价结果对全面提高保护系统的可靠性具有更大参考价值。

继电保护状态评价信息的全面性和准确性直接关系状态评价结果的准确性,一次设备的状态评价[2-3]研究较成熟,主要从设备的建造质量、历史故障、检修、试验、在线监测数据等方面进行评价。继电保护系统状态评价应加以借鉴。文献[4]从继电保护装置的投运前状况、历史运行状况、检修状况、通道状况等方面进行评价,涵盖了孤立装置较为全面的历史信息,但实时信息较少。文献[5]增加了二次回路的评价信息,并增加了绝缘状况、差动电流检测状况等信息。智能变电站的实时信息更加丰富,文献[6]提出基于保信系统中的保护自检告警、正确动作性、通信状态等信息对继电保护系统状态进行评价。实时信息的纳入可以更及时地掌握设备的状态,因此智能变电站状态评价应以实时信息为主。

状态评价信息的处理主要包含 2 个方面:权重的确定和信息的量化。常用赋权方法有层次分析法 AHP(Analytic Hierarchy Process)[7-8]、熵权法[9-11]、变权法[12]、组合赋权法[13-14]等。组合赋权法考虑主客观权重,能有效减小单一权重造成的机会误差。继电保护状态评价最终服务于运维人员,其中主观权重起关键作用,信息的变异水平确定的客观权重起辅助作用。熵权法是常用的客观权重计算方法,但其灵敏度太强,容易产生过大或过小的权重值,从而造成一些指标的失效。反熵与熵属性相同,都源于系统热力学,表征系统的无序程度,当样本的无序程度增强时,熵和反熵值都会增大[15]。反熵权法克服了熵权法灵敏度太高的问题,不会“喧宾夺主”,能和 AHP 相辅相成,所以本文选择反熵权法和 AHP 组合赋权。信息量化方法主要有类效用函数法[16]和模糊评价法[4-5]。类效用函数法对含有数量阈值的信息具有简洁、高效的特点,但继电保护设备的状态信息往往具有模糊性,更多依赖研发人员的评判,因此常用模糊评价法处理这类信息。

本文对继电保护系统状态评价信息的特性进行分析,提出采用反熵权法和 AHP 组合赋权的模糊综合处理方法进行建模。将传统针对保护装置的评价模型扩展至继电保护系统,计及继电保护装置、交换机、时钟、合并单元、智能终端、光纤通道,充分挖掘智能变电站继电保护系统内设备丰富的自检信息,建立包含投运前状态、历史运行状态、检修状态、实时自检信息、环境信息、厂家支持等多状态参量的信息模型。仅通过时间断面信息进行评价存在滞后性,因此,挖据信息点的变化趋势这一隐含信息,通过趋势预测实现超前评价,减小评价结果与设备真实状态之间的差距。通过算例分析验证了本文所建模型的

收稿日期:2017-01-06;**修回日期**:2017-11-06
基金项目:中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GZ2014-2-0049)
Project supported by the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (GZ2014-2-0049)

有效性。

1　模糊综合评价

模糊综合评价主要利用模糊变换原理和最大隶属度原则,对评价指标进行统一的量化处理,适用于评价对象的各个要素,特别是对具有先天模糊性的定性指标,模糊综合评价方法相对而言不过多依赖先验数据。模糊综合评价的计算过程如图 1 所示。

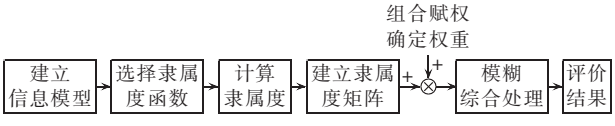

图 1 模糊综合评价过程

Fig.1 Process of fuzzy comprehensive evaluation

2　继电保护系统状态综合评价模型

2.1　状态评价信息模型

继电保护系统从故障判别至断路器断开过程中,信息传递经过的设备主要包含合并单元、交换机、继电保护装置、智能终端以及信息回路,还要计及提供对时服务的时钟。二次设备的功能受元器件可靠性的影响较大,事故发生具有随机性,传统的依靠装置历史运行状况进行状态评价的方法的准确性和及时性得不到保障。因此,本文根据智能变电站继电保护系统中装置自检信息以及告警信息等能实时上送信息为主导并结合关键历史运行信息建立状态评价信息模型,历史状态信息模型如图 2 所示,实时状态信息模型如图 3 所示。

2.2　状态信息趋势的预测策略

文献[5]中状态评价结果主要基于历史数据和最近的结果数据进行评价,本文认为这种处理方法存在一定问题:有的信息点当前状态较好,但有明显劣化的趋势,应引起重视;有的信息点虽然当前的状态较差,但有好转的趋势,则不必急于处理。因此本文提出一种利用实时数据进行信息趋势预测,然后根据预测结果进行模糊评价的策略,能在一定程度上改善评价的误差。信息趋势预测对设备状态变化起放大作用,对劣化趋势放大能更及时地发现隐患,对优化趋势放大可以避免无效工作过程,节约成本。信息趋势预测过程如图 4 所示。

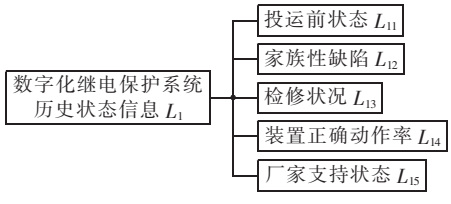

图 2 历史状态信息模型

Fig.2 Model of history state information

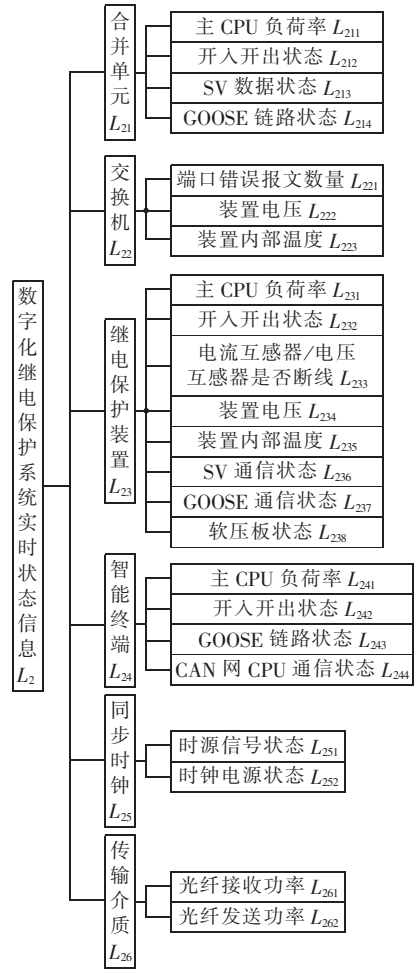

图 3 实时状态信息模型

Fig.3 Model of real-time state information

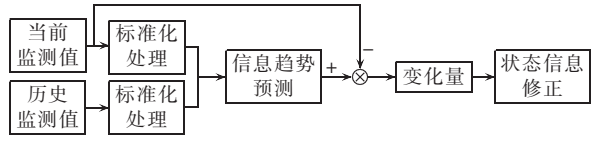

图 4 信息趋势预测策略

Fig.4 Information trend prediction strategy

指数平滑预测法[17]是一种简单易行的短时时间序列预测方法,它能够充分利用全部历史数据和相关信息,同时遵循重近轻远原则。本文采用二次指数平滑预测法进行信息趋势预测。

设某监测参数的时间序列为$\{x_1,x_2,\cdots,x_t\}$,则一次平滑值和二次平滑值的计算公式为:

$$\begin{cases} S_t^{(1)}=\varepsilon x_t+(1-\varepsilon)S_{t-1}^{(1)} \\ S_t^{(2)}=\varepsilon S_t^{(1)}+(1-\varepsilon)S_{t-1}^{(2)} \end{cases} \tag{1}$$

其中,$S_t^{(1)}$ 为一次平滑值;$S_t^{(2)}$ 为二次平滑值;ε 为平滑系数,$\varepsilon\in[0,1]$。

取 3~5 个数据的算术平均值作为初始值 $S_0^{(1)}$、$S_0^{(2)}$。二次指数平滑预测法的预测模型为:

$$x_{t+T}=a_t+b_tT \quad T=1,2,\cdots \tag{2}$$

$$a_t=2S_t^{(1)}-S_t^{(2)} \tag{3}$$

$$b_t=\varepsilon(S_t^{(1)}-S_t^{(2)})/(1-\varepsilon) \tag{4}$$

预测结果记为$\{x_{t+1},x_{t+2},\cdots,x_{t+T}\}$。

平滑系数ε决定预测值和真实值之间的响应灵敏度及平滑水平。ε取值越大,则远期监测参数对预测值的贡献越小;ε取值越小,则远期监测参数对预测值的贡献越大。ε的大小取决于设备监测参数的变化情况。先选定ε的大致范围,然后通过计算选择使监测值与预测值方差和最小的值,求取最小误差平方和的公式如式(5)所示。

$$f=\min\sum_{i=1}^{N}(\hat{x}_i-x_i)^2 \tag{5}$$

其中,N为训练样本数;$\hat{x}_i$为监测值的第i个序列预测值;x_i为监测值的第i个序列实际值。

2.3 状态信息模糊处理

2.3.1 指标的规范化处理

状态信息点具有不同的物理意义及取值范围,为了使其能够进行综合分析,需要进行标准化处理。将监测得到的实际值折算为[0,1]之间的数值。状态评价信息按影响效果可分为效益型、成本型和区间型。信息描述采用效益型指标,即数值越大代表设备的性能越优。

a. 效益型指标标准化处理。

正确动作率等参数为效益型指标,其变换公式为:

$$g(x)=\begin{cases}0 & x<x_{\min1}\\ \dfrac{x-x_{\min1}}{x_{\min2}-x_{\min1}} & x_{\min1}\leqslant x\leqslant x_{\min2}\\ 1 & x>x_{\min2}\end{cases} \tag{6}$$

其中,x为该指标的实际值;$[x_{\min1},x_{\min2}]$为该指标最低运行要求的下限和最佳运行的下限构成的范围。

b. 成本型指标标准化处理。

主CPU负荷率等参数为成本型指标,其变换公式为:

$$g(x)=\begin{cases}1 & x<x_{\max2}\\ \dfrac{x_{\max1}-x}{x_{\max1}-x_{\max2}} & x_{\max2}\leqslant x\leqslant x_{\max1}\\ 0 & x>x_{\max1}\end{cases} \tag{7}$$

其中,$[x_{\max2},x_{\max1}]$为该指标最佳运行的上限和最低运行要求的上限构成的范围。

c. 区间型指标标准化处理。

装置内部温度等参数为区间型指标,其变换公式为:

$$g(x)=\begin{cases}0 & x<x_{\min1}\\ \dfrac{x-x_{\min1}}{x_{\min2}-x_{\min1}} & x_{\min1}\leqslant x\leqslant x_{\min2}\\ 1 & x_{\min2}<x<x_{\max2}\\ \dfrac{x_{\max1}-x}{x_{\max1}-x_{\max2}} & x_{\max2}\leqslant x\leqslant x_{\max1}\\ 0 & x>x_{\max1}\end{cases} \tag{8}$$

其中,$[x_{\min1},x_{\max1}]$为该指标最低运行要求的范围;$[x_{\min2},x_{\max2}]$为该指标的最佳运行范围。

2.3.2 模糊隶属度函数的选取

常用的隶属度分布函数有三角形、岭形等。观察岭形、三角形分布函数形态,在确定指标的评价等级后,当取高隶属度时,岭形分布能收集更多隶属度高的信息;当取较低隶属度时,采用岭形分布能屏蔽更多隶属度低的信息[18]。当某指标或评价对象未绝对处于某评价区间,并向另一区间转移时,三角形分布隶属度函数计算所得模糊隶属程度偏高[4],计算结果偏保守;而模糊岭形分布较符合主观预期。本文以岭形分布隶属度函数为例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p_1、p_2、p_3、p_4。根据监测数据和后期工作表现给出4个状态等级的模糊分界区间,建立各状态等级的隶属度函数,见式(9)—(12)。

$$l_{p_1}(z)=\begin{cases}1 & z\leqslant0.2\\ 0.5-0.5\sin\dfrac{\pi}{0.2}(z-0.3) & 0.2<z\leqslant0.4\\ 0 & z>0.4\end{cases} \tag{9}$$

$$l_{p_2}(z)=\begin{cases}0 & z\leqslant0.2\\ 0.5+0.5\sin\dfrac{\pi}{0.2}(z-0.3) & 0.2<z\leqslant0.4\\ 0.5-0.5\sin\dfrac{\pi}{0.2}(z-0.5) & 0.4<z\leqslant0.6\\ 0 & z>0.6\end{cases} \tag{10}$$

$$l_{p_3}(z)=\begin{cases}0 & z\leqslant0.4\\ 0.5+0.5\sin\dfrac{\pi}{0.2}(z-0.5) & 0.4<z\leqslant0.6\\ 0.5-0.5\sin\dfrac{\pi}{0.2}(z-0.7) & 0.6<z\leqslant0.8\\ 0 & z>0.8\end{cases} \tag{11}$$

$$l_{p_4}(z)=\begin{cases}0 & z\leqslant0.6\\ 0.5+0.5\sin\dfrac{\pi}{0.2}(z-0.7) & 0.6<z\leqslant0.8\\ 1 & z>0.8\end{cases} \tag{12}$$

根据隶属度函数,得出第i个一级指标中的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$\boldsymbol{L}_i$,如式(13)所示。

$$\boldsymbol{L}_i=\begin{bmatrix}l_{p_1}(z_{i1}) & l_{p_2}(z_{i1}) & l_{p_3}(z_{i1}) & l_{p_4}(z_{i1})\\ l_{p_1}(z_{i2}) & l_{p_2}(z_{i2}) & l_{p_3}(z_{i2}) & l_{p_4}(z_{i2})\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ l_{p_1}(z_{in}) & l_{p_2}(z_{in}) & l_{p_3}(z_{in}) & l_{p_4}(z_{in})\end{bmatrix} \tag{13}$$

2.4 权重确定

本文利用AHP确定主观权重,主观权重能较好地量化专家对权重重要度的判断而克服了赋权随意性的特点,因此能合理利用运行经验给出判断。利用反熵值权法[19]确定指标客观权重,反熵权法对指标差异度的敏感性远小于熵权法,克服了极端情况下指标权重趋近于0的问题,而又能较好地体现指标之间的差异。根据指标数据的变异程度得到权重,可以避免人为因素的干扰。构建的数据评价矩阵进行

标准化处理后为 $\boldsymbol{R}=[r_{kj}]_{m\times n}$。其中,$r_{kj}$ 为第 k 个评价对象下指标 j 的值。指标 j 输出的信息反熵见式(14)。

$$E_j=-\sum_{k=1}^{m}r'_{kj}\ln(1-r'_{kj}) \tag{14}$$

$$r'_{kj}=\frac{r_{kj}}{\sum_{k=1}^{m}r_{kj}} \tag{15}$$

指标 j 的权重为:

$$\omega'_j=E_j/\sum_{j=1}^{n}E_j \tag{16}$$

最后得到客观权重矩阵 $\boldsymbol{W}'=[\omega'_1,\omega'_2,\cdots,\omega'_n]$。根据 AHP 确定主观权重为 $\boldsymbol{W}''=[\omega''_1,\omega''_2,\cdots,\omega''_n]$。

采用组合赋权法综合考虑了指标的重要度和严重程度,有效降低了严重信息被淹没的缺陷。根据矩估计理论,计算各指标主客观权重的重要度系数 α_i 和 β_i,最终计算组合权重[20]如式(18)所示。

$$\begin{cases}\alpha_i=\omega'_i/(\omega'_i+\omega''_i)\\ \beta_i=\omega''_i/(\omega'_i+\omega''_i)\end{cases} \tag{17}$$

$$\omega_i=\frac{\alpha_i\omega'_i+\beta_i\omega''_i}{\sum_{i=1}^{n}(\alpha_i\omega'_i+\beta_i\omega''_i)} \tag{18}$$

由上述方法得到一、二级指标权重和监测信息指标权重分别如表 1、表 2 所示。

表 1　一、二级指标权重

Table 1 Weights of first and second class indexes

指标	权重	指标	权重
L_1	0.3000	L_{21}	0.2522
L_2	0.7000	L_{22}	0.1384
L_{11}	0.1052	L_{23}	0.2522
L_{12}	0.3979	L_{24}	0.1384
L_{13}	0.1476	L_{25}	0.0805
L_{14}	0.1366	L_{26}	0.1384
L_{15}	0.2128		

表 2　监测信息指标权重

Table 2 Weights of monitoring information indexes

指标	权重			指标	权重		
	AHP	反熵权法	组合权重法		AHP	反熵权法	组合权重法
L_{211}	0.1648	0.3212	0.2580	L_{236}	0.1110	0.1073	0.0961
L_{212}	0.2412	0.2263	0.2251	L_{237}	0.1110	0.1073	0.0961
L_{213}	0.3529	0.2263	0.2919	L_{238}	0.1110	0.1073	0.0961
L_{214}	0.2412	0.2263	0.2251	L_{241}	0.1768	0.3594	0.2870
L_{221}	0.3678	0.3964	0.3803	L_{242}	0.2744	0.2135	0.2377
L_{222}	0.3678	0.2952	0.3334	L_{243}	0.2744	0.2135	0.2377
L_{223}	0.2645	0.3083	0.2863	L_{244}	0.2744	0.2135	0.2377
L_{231}	0.0497	0.2072	0.1556	L_{251}	0.5547	0.4998	0.5271
L_{232}	0.1110	0.1073	0.0961	L_{252}	0.4453	0.5002	0.4729
L_{233}	0.3454	0.1073	0.2545	L_{261}	0.5000	0.4934	0.4967
L_{234}	0.1110	0.1074	0.0962	L_{262}	0.5000	0.5066	0.5033
L_{235}	0.0497	0.1487	0.1091				

2.5　评价结果的综合

根据第 i 个一级指标中 n 个二级指标的隶属度矩阵 $\boldsymbol{L}_i$ 和式(18)确定指标权重向量 $\boldsymbol{W}_i$,计算系统综合状态一级评价指标隶属度矩阵 $\boldsymbol{B}_i$。

$$\boldsymbol{B}_i=\boldsymbol{W}_i\boldsymbol{L}_i=[b_i(p_1),b_i(p_2),b_i(p_3),b_i(p_4)] \tag{19}$$

其中,$b_i(p_j)(j=1,2,3,4)$为指标对应的隶属度数值。

根据各一级指标的隶属度矩阵和权重系数,计算二次设备综合状态评价隶属度矩阵 $\boldsymbol{C}$。

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{B}=[c_1,c_2,c_3,c_4] \tag{20}$$

其中,$\boldsymbol{B}=[\boldsymbol{B}_1,\boldsymbol{B}_2]^{\mathrm{T}}$;$c_i$ 为二次设备状态的隶属度值。采用隶属度最大原则,隶属度最大的状态即为设备当前的设备状态。

3　实例分析

根据本文提出的继电保护系统的状态评价模型,对南方电网某 220 kV 智能变电站内继电保护系统的状态进行算例分析,并与传统的继电保护状态评价方法进行对比分析。通过电网企业的生产管理系统、保信系统以及二次设备在线监测系统等数据库,可以获取继电保护系统状态评价所需的信息,状态信息模型如图 2、3 所示,设备间采用总线式通信的继电保护系统典型结构。

本文采用 AHP 与反熵权法相结合的组合赋权法,根据指标的变异水平不同,分别计算了反熵权法权重和熵权法权重。图 5 给出了部分指标的权重。对比熵权法与反熵权法可知,在权重的分配过程中,二者权重的整体趋势是一致的,但由于继电保护系统存在的大量布尔型自检告警信息,熵权法的权重分配非常极端,由于告警信号只存在 0 和 1 这 2 种状态,熵权法将这种变异放大,造成部分指标的权重过大,而另一部分指标的权重几近为 0,对评价结果的可靠性造成较大的影响;反熵权法既能较好地体现指标的变异程度,又避免了部分指标失效或权重过大等极端情况,因此反熵权法对处理继电保护系统的客观权重具有明显优势。

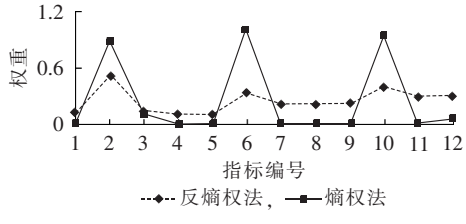

图 5　反熵权法与熵权法权重对比

Fig.5 Comparison of weight between anti-entropy weighting method and entropy weighting method

图 6 对比了部分指标的组合赋权结果和单一赋权结果。结果显示,主客观相结合的组合赋权法能较为合理地体现主观权重在状态评价中的主导作用,同时引入客观权重能较好地体现设备状态之间的差异性,便于及时发现问题设备。利用反熵权法求解客观权重,能合理量化信息变异程度的敏感性,体现了本文权重设定方法的合理性。

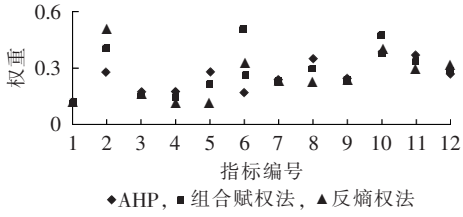

图6 组合赋权法权重分布

Fig.6 Weight distribution of combination weighting method

利用二次指数平滑预测法实现对设备信息点的一步短时时间序列预测,利用数据的变化趋势提高评价的准确性和及时性,后续状态利用实时监测值更新预测结果。设备电压的预测结果如图7所示,由于仅进行一步预测,其预测准确性较高,ε取0.3。当设备电压偏大于正常值时,预测值突出电压偏大的趋势;当电压偏小时,预测值突出电压偏小的趋势。预测结果是偏惩罚性质的结果,即预测值突出实际值的劣化趋势,留出了安全缓冲裕度,这正符合利用状态评价实施状态检修的意义。

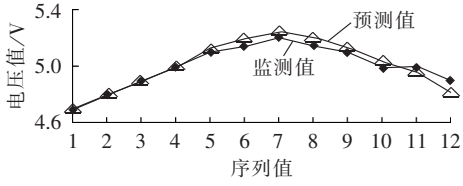

图7 电压预测值与监测值对比

Fig.7 Comparison of predictive voltage and monitoring voltage

根据式(9)—(12)对不同的状态监测信息进行模糊量化,设备的监测参数见表3。

以岭形分布隶属度函数计算指标状态等级的隶属度,由于继电保护系统的设备较多,给出交换机、继电保护装置的监测值隶属度矩阵和二次平滑预测后的隶属度矩阵($\boldsymbol{L}_i^{(t)}$为监测值隶属度矩阵,$\boldsymbol{L}_i^{(t+1)}$为基于趋势预测的隶属度矩阵)。

$$\boldsymbol{L}_{22}^{(t+1)}=\begin{bmatrix}0 & 0.1830 & 0.8170 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0.0918 & 0.9082\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{L}_{22}^{(t)}=\begin{bmatrix}0 & 0.5000 & 0.5000 & 0\\ 0 & 0 & 0.5000 & 0.5000\\ 0 & 0 & 1.0000 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{L}_{23}^{(t)}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0.1464 & 0.8536\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\end{bmatrix}$$

表3 设备监测参数

Table 3 Monitoring parameters of equipment

指标	数值						指标类型
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	预测值	
L_{11}/次	3	4	3	3	3	3.1331	成本型
L_{12}/次	0	0	0	1	1	0.744	成本型
L_{13}/次	0	1	1	1	0.8	0.9939	成本型
L_{14}	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.9856	效益型
L_{15}	1	1	1	1	1	1	布尔型
L_{211}	0.05	0.06	0.08	0.1	0.2	0.1387	成本型
L_{212}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{213}	1	1	1	1	0.9	0.956	效益型
L_{214}	1	1	1	1	0.9	0.956	效益型
L_{221}/个	0	4	3	4	5	4.5629	成本型
L_{222}/V	4.9	5.0	5.1	5.2	5.25	5.1995	区间型
L_{223}/℃	25	25	30	35	38	34.784	区间型
L_{231}	0.05	0.06	0.08	0.10	0.20	0.1387	成本型
L_{232}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{233}	1	1	1	1	1	1	布尔型
L_{234}/V	4.8	5.0	5.1	5.2	5.2	5.1857	区间型
L_{235}/℃	0	20	30	40	35	36.366	区间型
L_{236}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{237}	1	1	1	1	0.8	0.912	效益型
L_{238}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{241}	0.10	0.06	0.08	0.10	0.20	0.1346	成本型
L_{242}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{243}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{244}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{251}	1	1	1	1	1	1	效益型
L_{252}/V	4.7	4.8	4.9	5.0	5.2	5.0655	区间型
L_{261}/dBm	−16	−20	−18	−16	−14	−10.3	区间型
L_{262}/dBm	−16	−20	−22	−24	−29	−36.78	区间型

$$\boldsymbol{L}_{23}^{(t+1)}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0.6419 & 0.3581\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\end{bmatrix}$$

采用加权平均型模糊综合评价算子对继电保护系统的综合评价结果进行模糊综合,如式(19)、(20)所示。计及历史信息和实时信息的综合评价结果,以最大隶属度作为系统状态确定的标准。$\boldsymbol{C}^{(t)}$为根据监测信息做出的直接评价结果,$\boldsymbol{C}^{(t+1)}$为进行信息趋势预测后的评价结果。

$$\boldsymbol{C}^{(t)}=[0\ \ 0.0184\ \ 0.0849\ \ 0.8967]$$

$$\boldsymbol{C}^{(t+1)}=[0\ \ 0.0396\ \ 0.1281\ \ 0.8324]$$

根据评价结果,当前继电保护系统的最大隶属度分别为0.8967和0.8324,均属于p_4状态,可见计及信息趋势预测后的整体评价结果与原来是一致的。但进行趋势预测后,正常状态的隶属度明显降低。实时监测信息显示该继电保护系统中部分装置的光功率、电源电压、内部温度等指标均有劣化的迹

象,包含趋势预测的评价结果与设备的实际运行状态是相吻合的。

本文对文献[4]采用的评价模型与本文提出的评价模型进行了对比,评价结果如图 8 所示。本文提出的状态评价模型能更加精准地反映继电保护系统的实时状态,而传统的状态评价模型对信息的敏感度较低,存在一定的局限性,本文方案能实现对继电保护系统状态的超前评价,存在劣化趋势时能及时在评价结果中指示出来,结果显示所提模型评价更准确、实用性提高。

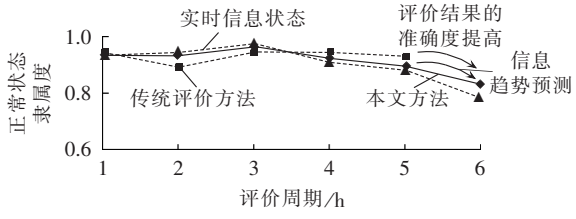

图 8 状态评价结果对比

Fig.8 Comparison of state evaluation result

4 结论

智能变电站继电保护系统的实时自检信息和在线监测信息为提高状态评价的准确性和及时性有重要作用。本文对智能变电站的继电保护系统进行了分解,建立系统多维度状态评价信息模型。考虑到在线监测信息的不断丰富,提出了利用信息趋势对系统状态进行修正的模糊评价策略,提高了评价的准确性和及时性。本文利用 AHP 和反熵权法相结合的权重确定方法,能合理地考虑主观权重和客观权重。反熵权法克服了熵权法灵敏度太高的缺陷,使权重设置更加合理。通过算例对比分析验证了组合赋权方法在权重设置中的优势和信息趋势修正的模糊评价模型的有效性。对利用状态评价结果进行状态检修等运维工作具有较强指导意义。

参考文献:

[1] 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.

[2] 阮羚,谢齐家,高胜友,等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术,2014,40(3):822-828.
RUAN Ling,XIE Qijia,GAO Shengyou,et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in power transformer condition assessment[J]. High Voltage Engineering,2014,40(3):822-828.

[3] 杜林,袁蕾,熊浩,等. 电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. 高电压技术,2011,37(4):897-903.
DU Lin,YUAN Lei,XIONG Hao,et al. Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer[J]. High Voltage Engineering,2011,37(4):897-903.

[4] 吴姜,蔡泽祥,胡春潮. 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. 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.

[5] 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.

[6] 王跃强,廖华兴,袁晓青,等. 基于保信系统的继电保护状态评价系统的开发与应用[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(8):134-139.
WANG Yueqiang,LIAO Huaxing,YUAN Xiaoqing,et al. Development and application of relay protection condition evaluation system based on fault information processing system[J]. Power System Protection and Control,2014,42(8):134-139.

[7] 段若晨,王丰华,顾承昱,等. 采用改进层次分析法综合评估 500 kV 输电线路防雷改造效果[J]. 高电压技术,2014,40(1):131-137.
DUAN Ruochen,WANG Fenghua,GU Chengyu,et al. Comprehensive evaluation of 500 kV transmission line lightning protection effect based on improved analytic hierarchy process[J]. High Voltage Engineering,2014,40(1):131-137.

[8] 肖峻,王成山,周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):54-61.
XIAO Jun,WANG Chengshan,ZHOU Min. ANIAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):54-61.

[9] 罗毅,李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术,2013,37(1):77-81.
LUO Yi,LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis [J]. Power System Technology,2013,37(1):77-81.

[10] 欧阳森,石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化,2013,37(21):156-159,164.
OUYANG Sen,SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(21):156-159,164.

[11] 杨志超,张成龙,葛乐,等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
YANG Zhichao,ZHANG Chenglong,GE Le,et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):90-94.

[12] 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.

[13] 陈晶腾,林韩,蔡金锭,等. 一种引入熵函数进行组合赋权的直流落点选择方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):146-152.
CHEN Jingteng,LIN Han,CAI Jinding,et al. DC-link location selection by combination weighting based on entropy function[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):146-152.

[14] 周淙,徐智,廖瑞金,等. 基于云理论和核向量空间模型的电力

变压器套管绝缘状态评估[J]. 高电压技术,2013,39(5):1101-1106.
ZHOU Quan,XU Zhi,LIAO Ruijin,et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space model[J]. High Voltage Engineering,2013,39(5):1101-1106.
[15] 吕朋蓬,赵晋泉,李端超,等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J]. 电网技术,2015,39(8):2245-2252.
LÜ Pengpeng,ZHAO Jinquan,LI Duanchao,et al. An assessment index system for power grid operation status and corresponding synthetic assessment method[J]. Power System Technology,2015,39(8):2245-2252.
[16] 李春杰,程艳从,赵会茹. 基于效用函数的电力普遍服务综合效用评价[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):50-54.
LI Chunjie,CHENG Yancong,ZHAO Huiru. Comprehensive utility evaluation of electric power universal service based on utility function[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):50-54.
[17] 王国权,王森,刘华勇,等. 基于自适应的动态三次指数平滑法的风电场风速预测[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):117-121.
WANG Guoquan,WANG Sen,LIU Huayong,et al. Self-adaptive and dynamic cubic ES method for wind speed forecasting[J]. Power System Protection and Control,2014,42(15):117-121.
[18] 汪培庄,李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机[M]. 北京:科学出版社,1996:20-55.
[19] 张海瑞,韩冬,刘玉娇,等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(11):24-29.
ZHANG Hairui,HAN Dong,LIU Yujiao,et al. Smart grid evaluation based on anti-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control,2012,40(11):24-29.
[20] 张心洁,葛少云,刘洪,等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术,2014,38(1):40-46.
ZHANG Xinjie,GE Shaoyun,LIU Hong,et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology,2014,38(1):40-46.

作者简介:

徐长宝

徐长宝(1977—),男,贵州贵阳人,高级工程师,硕士,研究方向为数字化变电站技术;

王玉磊(1991—),男,山东潍坊人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电网二次设备状态评估、综合评价(**E-mail**:wfwyl243@126.com);

赵立进(1959—),男,贵州贵阳人,高级工程师,研究方向为输变电设备运行和维护技术(**E-mail**:asbzhao@yahoo.com.cn)。

Fuzzy comprehensive evaluation of intelligent substation relay protection system state based on information trend prediction and combination weighting

XU Changbao[1],WANG Yulei[2,3],ZHAO Lijin[1],GAO Jipu[1],HUANG Liang[1],YING Liming[2]
(1. Electric Power Science Research Institute of Guizhou Power Grid Co.,Ltd.,Guiyang 550000,China;
2. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;
3. State Grid Qingdao Power Supply Company,Qingdao 266002,China)

Abstract: The construction of intelligent substation provides conditions for the acquisition of real-time information of the secondary equipment. Accurate understanding of the state of relay protection system plays an important role in improving the reliability of power supply. According to the information flow and equipment functions of intelligent substation,the state evaluation information model based on real-time self-checking information and key historical information is established. Taking the hysteresis quality of traditional state evaluation method on the system's state into account,the correction strategy based on information trend prediction is proposed. Mountain shaped fuzzy subordinate function is selected for fuzzy processing according to trend prediction results. The weights are set by combination weighting method combining with the analytic hierarchy process method and anti-entropy weighting method,which overcomes the too-high sensitivity of traditional entropy weighting method. Compared with the traditional method,simulative results show that the proposed method can improve the accuracy and timeliness of state evaluation results effectively.

Key words: intelligent substation; relay protection; information trend prediction; combination weighting; anti-entropy weighting method; state evaluation; fuzzy comprehensive evaluation