

基于变权重模糊综合评判法的 继电保护状态评估

模糊综合评判法(FSE)是继电保护状态评估的常用方法并且正得到越来越多的关注,但该方法的常权重系数不能有效地反映各状态量的变化,特别是对于单一状态量严重偏离正常值的情况。针对这个缺点,提出了变权重模糊综合评判法(VWFSE)。该方法利用模糊层次分析法(FAHP)和变权理论确定变权重系数。应用模糊分布法建立各状态量对于评价状态的隶属函数进而建立模糊关系矩阵。基于变权重系数和模糊关系矩阵,逐层计算模糊评判结果相量从而完成对继电保护装置的状态评估。运行实例分析表明,VWFSE的变权重系数可以根据状态量的变化进行自动调整,有效地解决了FSE不能反映状态量变化的不足。与FSE相比,基于VWFSE的继电保护状态评估方法拥有更加准确的评估结果。

赵冬梅 梁伟宸 张 旭/华北电力大学电气与电子工程学院



赵冬梅/教授

继电保护设备的正确动作对于电力系统的安全、稳定运行十分重要,其误动作时常导致失电区域的扩大,同时也是造成电力系统发生故障的主要原因之一。继电保护设备的计划检修存在检修不足和检修过度的问题,状态检修替代计划检修已为大势所趋^[1-2]。状态评估作为状态检修的基础,其为检修周期的确定提供理论依据,因此,研究准确、可靠的继电保护状态评估方法具有积极意义^[3-4]。

关键词/Keywords

VWFSE ·
FSE ·
变权重系数 ·
继电保护状态评估 ·
继电保护 ·

继电保护的状态评估主要利用设备的状态监测数据、历史数据、实验数据、巡视检修数据以及家族性数据等信息对继电保护设备的运行状态进行量化分析,从而准确、客观地评价设备的运

行状态,为状态检修提供依据。

早期的状态评估大多基于专家评判模型,在对继电保护运行经验和规律进行统计分析的基础上,通过专家讨论制定状态评分标准^[5-6]。该方法过于依赖专家的经验,缺乏客观的理论依据。因此,结合智能技术的状态评估方法得到了人们的广泛关注。支持相量机(SVM)通过核函数将运行工况等信息映射到高维特征空间,并应用模式识别方法来识别继电保护装置的运行状态^[7-8]。该方法对样本的准确性要求较高,不准确的样本将影响状态评估的准确度。针对信息存在误报与漏报的情况,文献[9]将粗糙集与神经网络等方法结合建立了获取诊断规则的故障诊断模型,其有效消除了不完备信息对诊断结果的影响。结合模糊信息融合系统,文献[10]提出了一种证据推理策略并建立了有机组合多种诊断方法系统框架。该方法思路新颖,对冗余信息的处理上效果明显,但对于证据信息间存在相互矛盾事件的情况,其应用效果不佳。模糊综合评判法^[11-12](FSE)通过构造模糊状态评级,把反映被评事物的状态量进行量化,然后利用模糊变换原理对各状态量进行综合评判。在状态评估中,故障与状态量之间存在复杂的模糊性与随机性,而FSE对于模糊问题具有较好的处理效果,所以其在状态评估领域正得到越来越多的关注。但是,FSE的权重系数为恒定值,其不会根据状态量的变化而进行调整。状态量的变化无法有效映射到模糊评判结果相量中,造

国家自然科学基金项目(51377054)。

成了评估结果对状态量变化的不敏感。当继电保护设备某一状态量已严重偏离正常值或某一模块的性能已严重下降时，整体的状态评价还处于正常水平。

针对FSE的不足，本文提出了变权重模糊综合评判法（VWFSE）。该方法将变权理论与FSE相结合，使权重系数能够准确地跟随状态量的变化而变化。VWFSE首先建立继电保护设备的层次评估体系，通过隶属函数计算状态量对于各状态评级的隶属值。结合模糊层次分析法（FAHP）与变权理论，建立变权重相量。选取适当的模糊算子，逐层计算模糊评判结果相量，最后利用最大隶属原则确定继电保护设备的整体状态评估结果。本文利用文献[12]的实例数据，验证了VWFSE的状态评估结果比FSE更加准确。

综合评估体系

继电保护设备所涉及的状态数据众多，为了对其进行全面而准确的状态评估，选取能够有效代表运行状态的状态量十分重要。状态量需包含状态监测数据、历史数据、实验数据、巡视检修数据以及家族性数据等数据，并建立状态量集合

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (1)$$

式中， n 为状态量的个数。

状态评级用于评价继电保护设备的运行状态，本文的状态评级集合包括正常状态、注意状态、异常状态和严重状态，即

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\} \quad (2)$$

式中， s_1 为正常状态； s_2 、 s_3 和 s_4 分别为注意状态、异常状态和严重状态。

根据不同的评估子目标构造综合评估体系。典型的综合评估体系大多根据继电保护设备的物理结构、典型故障或者部件重要度进行构建。例如层次物理结构评估体系在对设备整体进行状态评估的同时也能够对保护各模块进行评估，满足了进一步准确定位故障位置的评估子目标。由于继电保护设备设计的状态量较多，层次评估体系得到了广泛的应用，其结构图如图1所示。该评估体系包含两层：①第一层为3个综合状态量；②第

二层为各综合状态量的状态量。

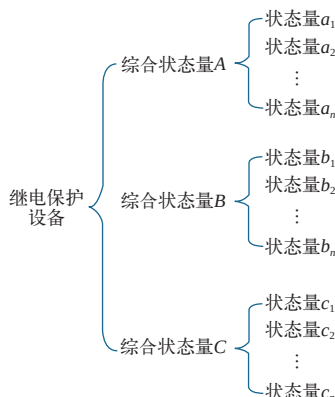


图1 层次评估体系结构图

隶属函数

隶属函数用来量化状态量对各状态评级的隶属度。隶属函数的建立不仅需要理论基础还需要一些经验，其主要方法包括增量法、模糊统计法、择优比较法和集值统计迭代法^[13]以及模糊分布法。本文利用模糊分布法计算状态量对各状态评级的隶属度。模糊分布函数主要包括三角形分布、梯形分布、正态分布以及柯西分布等。

根据建立的隶属函数建立状态量的模糊关系矩阵 $R_{n \times m}$ ，即

$$R_{n \times m} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中， n 为状态量的个数； m 为状态评级的个数（本文 $m=4$ ）； r_{nm} 为第 n 个状态量对于第 m 个状态评级的隶属值。

权重系数的确定

1. 常权重系数的计算

FSE利用FAHP计算其权重系数。FAHP是一种改进的层次分析法（AHP），该方法引入了模糊一致性矩阵的概念，使判断矩阵更容易满足一致性要求。

利用FAHP法计算继电保护设备各状态量常权重的流程如表1所示^[12]。

表1 0.1~0.9标度法评价标准

标度	说明
0.5	两元素比较, 同等重要
0.6	两元素比较, 一个比另一个稍微重要
0.7	两元素比较, 一个比另一个明显重要
0.8	两元素比较, 一个比另一个重要得多
0.9	两元素比较, 一个比另一个极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	与上述说明相反

1) 根据各状态量对于继电保护设备的重要程度以及专家的经验, 采用0.1~0.9标度法 (见表

1) 建立模糊一致性矩阵 $J_{n \times n}$ 。

2) 对模糊一致性矩阵进行修改使其满足一致性要求。

3) 基于矩阵 $J_{n \times n}$, 利用式 (4) 计算各状态量的权重系数

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n j_{ik} \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

式中, w_i 为状态量的常权重系数; a 为调整参数, $a \geq (n-1)/2$; j_{ik} 为模糊一致性矩阵 $J_{n \times n}$ 的元素。

2. 常权重系数的不足

利用FAHP确定状态量的权重系数的方法得到了较多应用, 并且取得了较好的效果。但是对于继电保护状态评估, 该方法存在不足。

利用FAHP确定的权重系数为恒定值, 其不能根据状态量的变化而变化。对于继电保护状态评估, 因其状态量较多, 各状态量的权重系数较小, 状态量的变化无法有效映射到模糊评判结果相量中, 造成了评估结果对状态量变化的不敏感。当单一状态量严重偏离正常值时, 继电保护设备的整体评价可能还是正常水平。常权重系数不能有效反映状态量偏离正常值的情况。对于继电保护设备的特点, 偏离正常值的状态量应拥有更大的权重系数。因此, 常权重系数不能客观、准确地反映继电保护设备的真实运行状况, 其需要改进。

3. 变权重系数

针对常权重系数的不足, 本文将变权理论与FAHP相结合, 使权重系数能够根据状态值的变化进行自动调节, 偏离正常值的状态量根据偏

离程度将拥有更大的权重系数。对于单一状态量严重偏离正常值的情况, 基于变权重系数的继电保护状态评估方法同样能够得到准确的评估结果。

(1) 状态量的归一化处理级

由于继电保护设备各状态量的单位并不相同, 一些状态量不属于同一数量级。因此, 需要对各状态量的状态值进行归一化处理。

归一化处理的公式如下^[14]

$$X_i = \frac{C_a - C_i}{C_a - C_p} \quad (5)$$

式中, X_i 为经过归一化处理的状态值, 如果 $X_i < 0$, 令 $X_i = 0$, 如果 $X_i > 1$, 令 $X_i = 1$; C_a 为状态量的警示值; C_p 为状态量的初始值 (最优值); C_i 为状态量的初始状态值。

(2) 变权重系数的计算

变权理论可以反映综合评价中各要素状态的均衡性。针对常权重系数不能跟随状态量变化的不足, 本文将变权理论引入状态评估。变权公式为^[15]

$$v_i = \frac{w_i}{x_i} / \sum_{p=1}^n \frac{w_p}{x_p} \quad (6)$$

式中, v_i 为变权重系数, x_i 为经过归一化处理的状态值; n 为状态量的个数; w_i 为常权重系数。

变权重模糊综合评判法的评估流程

基于变权重模糊综合评判法的继电保护状态评估流程图如图2所示。根据流程图, 具体的评估步骤如下。

1) 选取适当的状态量并建立状态量集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 并进行数据采集。

2) 确定状态评级并建立状态评级集合 $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ 。根据继电保护设备的结构特点以及状态评估的评估子目标对单项状态量进行分类, 构建层次状态评估体系。

3) 利用模糊分步法建立状态量对于各状态评级的隶属函数, 进而根据隶属函数值建立模糊关系矩阵 $R_{n \times m}$ 。

4) 基于各状态量的重要程度以及0.1~0.9标

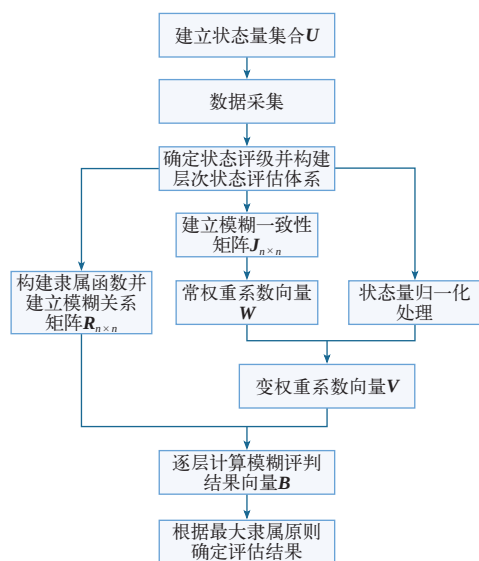


图2 继电保护状态评估流程图

度法，建立模糊一致性矩阵 $J_{n \times n}$ 。

5) 基于模糊一致性矩阵 $J_{n \times n}$ ，利用式(4)计算各状态量的常权重系数并建立常权重系数向量 $W = \{w_1, w_1, \dots, w_n\}$ 。

6) 利用式(5)对各状态量的状态值进行归一化处理。

7) 基于经过归一化处理的状态值和步骤5)中的常权重系数，采用式(6)计算各状态量的变权重系数并建立变权重向量 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。

8) 选取适当的模糊算子，利用式(7)逐层计算模糊评判结果向量 B ，即

$$B = V \triangle R_{n \times m} \quad (7)$$

式中， V 为变权重向量； $R_{n \times m}$ 为模糊关系矩阵； $\triangle$ 为模糊算子，本文选用加权平均型算子。

9) 根据最大隶属原则确定继电保护设备的状态评估结果。

实例分析

本文以文献[12]的层次状态评估体系和数据为实例，以FSE作为对照，验证基于VWFSE的继电保护状态评估方法的有效性。

建立的层次状态评估体系如图3所示。

该层次体系根据继电保护设备的物理结构分为三层，主要包含保护装置、二次回路和通道状况三部分，共21个状态量。这种层析评估体系不

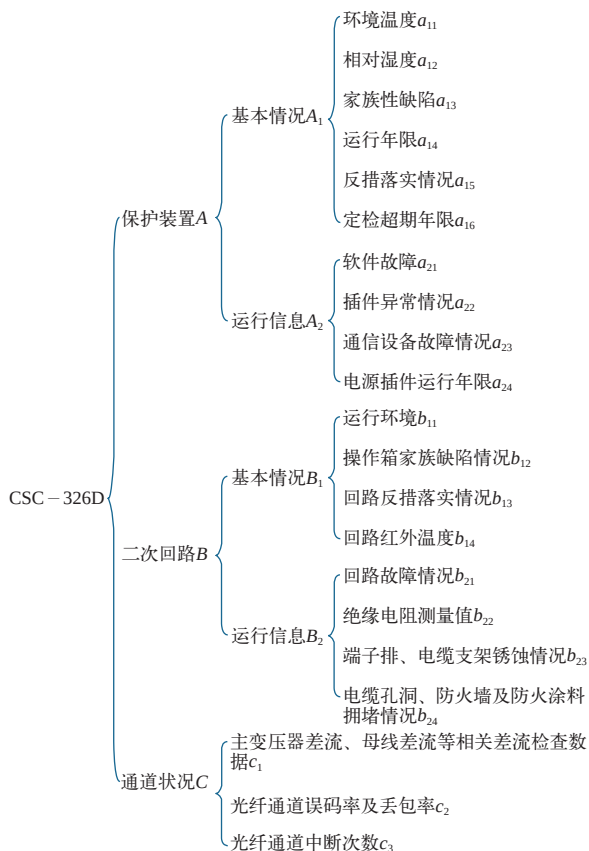


图3 层次状态评估体系结构图

仅可以实现对于继电保护设备的整体评估，也可以完成对不同部分的评估，有助操作人员查找可能的故障出处。

将某CSC-326D型保护状态作为分析实例，其一个评估周期内各状态量的状态值如表2所示。状态评级分为正常状态、注意状态、异常状态和严重状态。

根据式(4)和式(6)，FSE和VWFSE的权重系数如表3所示。

从表3中可以看出，VWFSE中偏离正常值的状态量拥有更大的权重系数，而FSE中状态量的权重系数值则不受状态值的改变而发生变化。

基于所建立的隶属函数和权重向量，采用加权平均算子，FSE和VWFSE的各层模糊关系矩阵如表4所示。

表4中两种方法的第三层模糊关系矩阵（例如 R_{A1} 和 R'_{A1} ）相同，因根据相同的隶属函数所建立。而第二层和第一次模糊关系矩阵则不相同，变权

表2 设备状态值参数表

项目	状态量	状态值
保护设备	环境温度	42 ℃
	相对湿度	86%
	家族性缺陷发生情况	出现一次已处理
	运行年限	3年
	反措落实情况	无未执行反措
	定检超期年限	定检超期半年
	软件故障次数	10次
	插件异常情况	2次
	通信装置故障情况	发生过一次通信中断
	电源插件运行年限	3年
二次回路	端子箱温度	59 ℃
	操作箱家族性缺陷情况	存在一处家族性缺陷且未处理
	反措执行情况	无未执行反措
	二次回路红外温度	高出环境温度13 ℃
	操作箱故障情况	发生过两次故障
	绝缘电阻测量值	0.9 MΩ
通道状况	端子排、电缆支架锈蚀情况	锈蚀程度约为5%
	电缆孔洞、防火墙及防火涂料封堵状况	电缆孔洞出现2处封堵状况
	差流检查数据	小于0.5倍允许范围
	光纤通道误码率及丢包率	告警值的0.5倍以下
通道状况	光纤通道中断系数	未发生过光纤中断现象

表3 权重系数参数表

FSE	VMFSE
$\mathbf{W}=[0.5,0.3,0.2]$	$\mathbf{V}=[0.5,0.3,0.2]$
$\mathbf{W}_A=[0.4,0.6]$	$\mathbf{V}_A=[0.4,0.6]$
$\mathbf{W}_B=[0.65,0.35]$	$\mathbf{V}_B=[0.65,0.35]$
$\mathbf{W}_C=[0.467,0.367,0.167]$	$\mathbf{V}_C=[0.509,0.4,0.091]$
$\mathbf{W}_{A1}=[0.14,0.16,0.26,0.12,0.22,0.1]$	$\mathbf{V}_{A1}=[0.147,0.502,0.136,0.071,0.092,0.05]$
$\mathbf{W}_{A2}=[0.267,0.4,0.2,0.133]$	$\mathbf{V}_{A2}=[1,0,0,0]$
$\mathbf{W}_{B1}=[0.158,0.358,0.292,0.192]$	$\mathbf{V}_{B1}=[0.195,0.467,0.19,0.147]$
$\mathbf{W}_{B2}=[0.342,0.308,0.208,0.142]$	$\mathbf{V}_{B2}=[0.142,0.719,0.052,0.088]$

重系数将状态量的变化有效映射到了上级模糊关系矩阵中，进而使得整体的模糊评价结果相量更符合继电保护设备的真实运行状况。

FSE的模糊评判结果相量为 $\mathbf{B}=[0.393 \ 0.344 \ 0.148 \ 0.116]$ 。根据最大隶属原则，判定CSC-326D型继电保护设备在该评估周期内处于正常状态。VWFSE的模糊评判结果相量为 $\mathbf{B}'=[0.235$

表4 模糊关系矩阵参数表

FSE	VWFSE
$\mathbf{R}_{A1}=\begin{pmatrix} 0.802 & 1 & 0.395 & 0.132 \\ 0.45 & 0.9 & 1 & 0.55 \\ 1 & 0.287 & 0.007 & 0 \\ 0.688 & 1 & 0.111 & 0 \\ 1 & 0.368 & 0.018 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_{A1}=\begin{pmatrix} 0.802 & 1 & 0.395 & 0.132 \\ 0.45 & 0.9 & 1 & 0.55 \\ 1 & 0.287 & 0.007 & 0 \\ 0.688 & 1 & 0.111 & 0 \\ 1 & 0.368 & 0.018 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}_{A2}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.57 & 0.779 & 0.105 & 0 \\ 0.018 & 0.368 & 1 & 0.632 \\ 0.816 & 1 & 0.204 & 0 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_{A2}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.002 & 1 \\ 0.570 & 0.779 & 0.105 & 0 \\ 0.018 & 0.368 & 1 & 0.632 \\ 0.816 & 1 & 0.204 & 0 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}_{B1}=\begin{pmatrix} 0.209 & 1 & 0.822 & 0.088 \\ 0.287 & 1 & 0.007 & 0 \\ 1 & 0.449 & 0.086 & 0 \\ 1 & 0.8 & 0.3 & 0.071 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_{B1}=\begin{pmatrix} 0.209 & 1 & 0.822 & 0.088 \\ 0.287 & 1 & 0.007 & 0 \\ 1 & 0.449 & 0.086 & 0 \\ 1 & 0.8 & 0.3 & 0.071 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}_{B2}=\begin{pmatrix} 0.939 & 0.57 & 0.047 & 0.061 \\ 0.25 & 0.833 & 1 & 0.667 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.135 & 0.939 & 1 & 0.895 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_{B2}=\begin{pmatrix} 0.939 & 0.57 & 0.047 & 0.061 \\ 0.25 & 0.833 & 1 & 0.667 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.135 & 0.939 & 1 & 0.895 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}_A=\begin{pmatrix} 0.471 & 0.339 & 0.13 & 0.06 \\ 0.223 & 0.34 & 0.177 & 0.258 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_A=\begin{pmatrix} 0.291 & 0.333 & 0.248 & 0.128 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}_B=\begin{pmatrix} 0.372 & 0.482 & 0.129 & 0.017 \\ 0.308 & 0.288 & 0.23 & 0.173 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_B=\begin{pmatrix} 0.314 & 0.531 & 0.138 & 0.017 \\ 0.165 & 0.334 & 0.357 & 0.143 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}_C=\begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.94 & 0.37 & 0.221 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'_C=\begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.714 & 0.75 & 0.286 & 0 \\ 1 & 0.94 & 0.368 & 0.221 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}=\begin{pmatrix} 0.323 & 0.34 & 0.158 & 0.179 \\ 0.35 & 0.414 & 0.165 & 0.072 \\ 0.632 & 0.247 & 0.098 & 0.023 \end{pmatrix}$	$\mathbf{R}'=\begin{pmatrix} 0.116 & 0.133 & 0.099 & 0.651 \\ 0.262 & 0.462 & 0.214 & 0.061 \\ 0.493 & 0.356 & 0.139 & 0.011 \end{pmatrix}$

0.277 0.142 0.346]，其判定该继电保护设备处于严重状态。状态量参数表中，保护设备在一个评估周期内软件发生了10次故障。对于微机保护设备，软件的运行情况至关重要。如果微机保护的软件在一个评估周期内故障了10次，那么该设备处于严重状态，必须尽快安排停电检修。因此，VWFSE的状态评估结果更加准确。

上述实例属于较为极端的案例，经其他实例测试，同样验证了基于VWFSE的继电保护状态评估方法的有效性。

结束语

本文提出了基于VWFSE的继电保护状态评估方法,建立了层次状态评估体系,以综合状态量作为继电保护设备整体状态评价的要素,有利于准确地评价设备的运行状态。与FSE相比,VWFSE更适合继电保护设备的特点并且状态评估结果更加准确。变权重系数是该方法的主要特点,其有效地解决了常权重系数不能跟随状态量变化的缺点。偏离正常值的状态量拥有更大的权重系数,使其对整体的评估体系有更大的影响。VWFSE能够客观、准确地反映继电保护设备的真实运行状态,状态评估结果更加符合实际。文中最后用实例验证了VWFSE的有效性且状态评估结果令人满意。

在接下来的研究中,继电保护状态评将会考虑继电网的运行方式及运行状态,有望进一步提高状态评估的准确性。

参考文献

- [1] 许婧,王晶,高峰.电力设备状态检修技术研究综述[J].电网技术,2000,24(8):48-52.
- [2] 李明,韩学山,杨明.电网状态检修概念与理论基础研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):43-52.
- [3] 刘凡,张星海,贺含峰,等.大型电力变压器状态评估与寿命管理方法应用研究[J].电气应用,2009,28(17):32-38.
- [4] 姚峰,张毅明,孙建华,等.基于故障树法和层次分析法的电力变压器状态综合评估[J].电气应用,2013,32(11):66-69.
- [5] 叶远波,孙月琴,黄太.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.
- [6] 程肖峰.大同超高压公司继电保护状态检修管理研究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [7] 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.
- [8] 郭创新,朱承志,张琳.应用多分类多核学习支持向量机的变压器故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2010,30(13):128-134.
- [9] 莫娟,王雪,董明,等.基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2004,24(7):162-167.
- [10] 董明,严璋,杨莉,等.基于证据推理的电力变压器故障诊断策略法[J].中国电机工程学报,2006,26(1):106-114.
- [11] 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.
- [12] 候艾君.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.
- [13] 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,1996:92-129.
- [14] 骆思佳,廖瑞金,王有元,等.带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J].高电压技术,2007,33(8):106-110.
- [15] 李黎,张登,谢龙君,等.采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J].中国电机工程学报,2013,33(24):152-159.

(收稿日期:2014-09-15) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告