

# 基于改进 Vague 集的智能一次设备评估

胡元潮<sup>1</sup>, 谢齐家<sup>2</sup>, 阮江军<sup>1</sup>, 安韵竹<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>, 龚若涵<sup>1</sup>, 李志政<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省电力公司电力试验研究院, 湖北 武汉 430077;  
3. 合肥电力公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 首先建立了变电站一次设备智能化改造水平评估模型, 然后结合该模型将 Vague 集目标决策理论运用到一次设备智能改造综合评估中, 提出基于 Vague 集理论的综合一致性检验方法并对权重求解问题作了改进, 给出了评估流程。最后, 结合实际算例证明所提出的评估方法引入不确定度对模糊数据进行数学表征, 可以更合理地表征人为因素, 对于水平相近的评估对象区分度更高, 更加符合实际工程。

**关键词:** 变电站; 智能电网; 设备; 改造; Vague 集; 模糊集; 综合一致性检验; 模型

**中图分类号:** TM 715

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.018

## 0 引言

智能电网为我国电网中长期的发展方向, 其绩效目标、性能特征、关键技术与功能实现等方面的要求是评价智能电网发展水平的关键所在<sup>[1-4]</sup>。变电站作为电网基础运行数据的采集源头和命令执行单元, 逐步完成由传统变电站到数字化变电站再到智能变电站的转变和升级, 已成为当前智能电网建设的重点方向。自 2010 年开始, 国网公司进行大量的研究工作, 陆续启动了智能变电站改造项目, 其中第一批智能变电站试点工程建设已基本完成<sup>[5-6]</sup>。为配合国网公司二期智能站改造试点工程, 除对智能站整体改造水平评估外, 需要具体到单一设备智能改造水平的横向对比评估。此外, 考虑到在对具体设备进行评估时, 各智能站之间差异性较大, 模糊因素较多, 在评估算法上应充分考虑模糊因素的量化问题。

Vague 集理论是模糊集的一种推广形式, 自 Cau 和 Buehrer 于 1993 年提出以来, 已取得较快发展<sup>[7-8]</sup>。传统多目标决策理论如 AHP、熵权法、灰色关联法、TOPSIS 等方法在不确定信息描述上有欠缺<sup>[9-11]</sup>。与模糊集理论相比, Vague 集理论数学表征和处理的确定性信息更为丰富。因此 Vague 集理论在模糊控制器设计、多目标模糊决策、人工智能等方面取得了很好的应用, 但电力行业对此理论方法涉及较少。

本文将 Vague 集理论运用到变电站一次设备的智能改造综合评估中, 并对 Vague 集理论一致性检验及权重求解作了改进。结合文中提出的变电站具体设备的智能改造评估模型, 对几个试点项目的智

能设备改造情况进行评估。最后结合实际算例具体说明该方法的计算流程, 并对比其他评估方法, 说明了该方法的实用性及优势所在。

## 1 变电站智能改造评估模型的建立

智能变电站采用集成智能设备, 完成信息的采集、测量、控制、保护、计量和监测等功能, 并实现电网实时在线分析与决策, 保证电网的协同互动运行。在国家电网第一、二批的智能变电站建设中, 变电站重要一次设备智能组件的集成度以及监测信息的高级应用, 是试点工程变电站智能改造水平的集中体现。

针对改造完成及建设中的智能变电站完成情况, 国网公司先后组织高压测试及设备学组的部分专家, 对一次设备智能改造一、二期试点工程项目进行调研和评估。评估采用从整体到部分的分层评估决策原则, 选定待评估的变电站, 对站内一次设备如变压器、GIS(HGIS)组合设备、断路器等整体评估, 继而根据准则中电气设备智能组件的要求<sup>[12-13]</sup>, 对每种设备的监测类别进行细化(如变压器的油温、局部放电等)。

实际调研表明, 不同电压等级的变电站对一次设备智能改造的区别基本上限于改造难度和不同智能组件生产厂家的方案上。同一个变电站的不同设备按照技术导则要求, 智能组件的安装虽有区别, 评估指标基本可从测量、控制、通信等要求统一恒定<sup>[14]</sup>。本文从一次设备的智能改造角度出发, 提出一次设备智能改造水平评估体系模型, 对变压器、GIS 组合设备、互感器、开关、避雷器及电缆等主要高压一次设备的改造进行评估, 评估指标体系如表 1 所示。

## 2 改进 Vague 集多目标评估算法流程

Vague 集作为模糊集的推广, 最大优点是兼顾了隶属度、非隶属度和踌躇度(不确定度)三方面的

收稿日期: 2013-01-12; 修回日期: 2013-11-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 资助项目(2011CB209404); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012207020204)

Project supported by Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2011CB209404) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(201220-7020204)

表 1 变电站一次设备智能改造水平评估指标体系  
Tab.1 Evaluation index system for substation retrofitting with intelligent primary equipment

一级指标	二级指标
测量功能	数字化采样、MMXU/MMXN 标准模型、GMRP 协议动态组播分配、动态/稳态数据综合采集、电能质量监测
控制功能	CSWI/CILO 标准模型、网络化控制、GMRP 协议动态组播分配、紧急操作、具备同期电压选择的同期功能
状态监测	监测数据数字化、测量结果标准化、状态异常报警
保护功能	PDIF/PTRC 等标准模型、网络化控制、数字化采样、就地安装、GMRP 协议动态组播分配
通信功能	虚拟局域网(VLAN)、优先级传输、IEC61588 高精度网络对时、GMRP 协议动态组播分配、无线手持设备通信
计量功能	MMTR 标准模型、数字化采样、GMRP 协议动态组播分配

信息,比传统的模糊集表征模糊信息的能力更为灵活和丰富。

## 2.1 Vague 值判断矩阵

根据 Vague 集定义,论域  $X$  (域中任意元素用  $x$  表示)上的 Vague 集  $v$  用真隶属度函数  $t_v$  和假隶属度函数  $f_v$  表征:

$$t_v: X \rightarrow [0, 1], \quad f_v: X \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

假设  $t_v(x)$  和  $f_v(x)$  分别表示支持和反对  $x$  的证据所导出的隶属度下界,且  $t_v(x)+f_v(x) \leq 1$ ,则元素  $x$  在 Vague 集  $v$  上的隶属度被  $[0, 1]$  上的子区间  $[t_v(x), 1-f_v(x)]$  所界定。根据上述定义,支持  $x \in X$  的必要性用  $t_v(x)$  表征,支持  $x \in X$  的可能性用  $1-f_v(x)$  表征,而  $1-t_v(x)-f_v(x)$  数学描述了对  $x$  的不确定度。

设  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  是一属性集,决策者利用 0.1~0.9 标度法<sup>[15]</sup>对每个属性两两比较,这就构成了基于 Vague 值的判断矩阵  $V = [V_{ij}]_{m \times n}$ ,其中  $V_{ij} = [t_{ij}, 1-f_{ij}]$  为 Vague 值,  $t_{ij}$  和  $f_{ij}$  分别表示决策者对属性  $x_i$  和  $x_j$  的偏好程度,  $1-t_{ij}-f_{ij}$  表示决策者的不确定度,根据判断矩阵结构性质,有  $t_{ij} \in [0, 1], f_{ij} \in [0, 1], t_{ij} + f_{ij} \leq 1$ , 对角线元素满足  $t_{ii} = f_{ii} = 0.5$ , 非对角线元素满足互补性:  $t_{ij} = f_{ji}$ 。在实际评估中,不同专家对某一属性的判断往往具有主观性和各异性,因此可以取不同决策者评估值的均值作为判断矩阵的 Vague 值。

## 2.2 Vague 值判断矩阵的模糊逼近

Vague 集在多目标评估时一般只考虑了支持和反对隶属度,对不确定信息的考虑不够。事实上,不确定信息作为决策者的态度之一,应当充分细化挖掘。另外,以 vague 值作为判断矩阵的元素使计算复杂度增加。基于这两方面的考虑,将 Vague 集转化为模糊集是处理 vague 值判断矩阵的可行方法。

设 Vague 集  $v = \{[t_v(x), 1-f_v(x)] | x \in X\}$ , 模糊集  $F = \{[x, F(x)] | x \in X\}$ , 映射  $R: v \rightarrow F$  满足式(2)则称

$F$  为 Vague 集  $v$  的模糊逼近。

$$F(x) = \frac{t_v(x)}{t_v(x) + f_v(x)} \quad (2)$$

同样,推广到 Vague 值判断矩阵的模糊逼近,可以得到  $V$  的模糊逼近判断矩阵  $Q = [q_{ij}]_{n \times n}$ , 其中  $q_{ij}$  见式(3)。

$$q_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_{ij} + f_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

## 2.3 模糊判断矩阵的一致性检验及修正

在模糊判断矩阵的一致性检验问题上,文献[15-16]考虑了判断顺序的传递性,避免了在各属性优劣循环链中出现诸如  $x_i < x_j < x_k < x_i$  的判断顺序逻辑矛盾,但该方法忽视了偏差的可接受性;文献[17]虽设定了偏差阈值,但对判断顺序的传递性考虑不够。事实上,模糊判断矩阵需要同时满足一致相容性和逻辑传递性。本文结合 2 个特性提出综合检验标准并给出修正方法,使一致性检验更为合理。

### 2.3.1 相容性指标验证

模糊判断矩阵  $Q$  满足互补条件,对  $\forall k \in (1, n)$ , 有  $q_{ij} = 0.5 + q_{ik} - q_{jk}$ , 则矩阵  $Q$  为完全一致性矩阵。实际评估中,因决策信息的各异性,完全一致性矩阵很难存在,需要通过修正不断逼近。通常用一致性指标  $C_1$  衡量偏差程度(一般取到 0.1 以下)。称  $Q^* = (q_{ij}^*)_{n \times n}$  为  $Q$  的特征矩阵,其中  $q_{ij}^*$  如式(4)所示。

$$q_{ij}^* = 0.5 + \left( \sum_{k=1}^n q_{ik} - \sum_{k=1}^n q_{jk} \right) / n \quad (4)$$

相容性指标  $C_1$  用模糊判断矩阵  $Q$  与其特征矩阵  $Q^*$  的偏差表示为:

$$C_1 = \| Q - Q^* \| / n^2 = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |q_{ij} - q_{ij}^*| \right) / n^2 \quad (5)$$

其中,“ $\| \cdot \|$ ”表示范数。

一般实际运用中,当  $C_1 < \varepsilon$  ( $0.10 \leq \varepsilon \leq 0.15$ ) 时,可认为  $Q$  为满意一致矩阵。

### 2.3.2 传递性指标验证

引用图论中的可达矩阵  $T$  验证模糊判断矩阵  $Q$  的逻辑传递性<sup>[18]</sup>。定义矩阵  $Q_T$  为模糊判断矩阵  $Q$  的伴随可达阵,当  $q_{ij} > 0.5$  时,  $Q_T$  的取值为“真”,并用 1 表示;反之视为“假”,用 0 表示。依次求解伴随可达阵的  $n$  阶次,得到可以判断  $Q$  一致性的可达矩阵  $T$  为:

$$T = Q_T \parallel Q_T^2 \parallel \dots \parallel Q_T^n \quad (6)$$

其中,“ $\parallel$ ”为布尔运算中的“或”运算。若可达矩阵  $T$  所有主对角线元素为 0,认为  $Q$  满足逻辑传递性的一致检验。

### 2.3.3 综合检验及修正

当  $Q$  同时满足相容性指标和传递性指标时认为其一致性是可接受的,否则需要对偏差过大的列进行修正。计算每行元素偏差值之和:

$$\Delta h_i = \sum_{j=1}^n |q_{ij} - q_{ij}^*| \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

选取偏差最大的第  $h$  行元素进行第  $k$  次修正:

$$q_{hj}^{(k+1)} = (1-\alpha)q_{hj}^{(k)} + \alpha q_{hj}^{*(k)} \quad j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

其中,  $0 \leq \alpha \leq 1$  为原始矩阵信息所占的比例。

同理,对偏差最大的第  $l$  列元素进行修正:

$$q_{il}^{(k+1)} = (1-\alpha)q_{il}^{(k)} + \alpha q_{il}^{*(k)} \quad i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

每次修正后对矩阵  $Q$  进行一致性检验,直至同时满足相容性指标和传递性指标为止。

### 2.4 求解评估指标权重

对符合一致性检验的矩阵  $Q$  进行分层权重求解。利用特征向量法求出  $Q$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  和对应该特征值的特征向量。将特征向量进行归一化处理得到第  $k$  层  $n$  个指标的权重向量  $(w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)})$ , 计算评估指标对于总目标的综合权重  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

$$w_j = w_j^{(k)} w_j^{(k-1)} \dots w_j^{(1)} \quad j=1,2,\dots,n \quad (10)$$

### 2.5 求解综合评估结果

对于  $m$  个对象、 $n$  个指标的评估,构造加权决策矩阵  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ , 其中,  $y_{ij}$  由不同评估对象各指标的专家评估值或实际参数值乘以该指标权重确定(注意对效益型参数和成本型参数<sup>[8]</sup>的归一化处理)。加权决策矩阵可以直观地表示各评估对象之间的指标对比情况。实际中一般取一级评估指标  $z_i$  作为决策矩阵  $Z = (z_{ij})_{m \times n}$  的列向量, 其中  $z_{ij}$  如式(11)所示。

$$z_{ij} = \sum_{j=1}^n (y_{ij} w_j) \quad i=1,2,\dots,m \quad (11)$$

根据加权决策矩阵得到各评估对象的最终评估值  $\eta_i$  为:

$$\eta_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad i=1,2,\dots,m \quad (12)$$

$$V = \begin{bmatrix} [0.50, 0.50] & [0.35, 0.50] & [0.41, 0.68] & [0.38, 0.73] & [0.48, 0.73] & [0.59, 0.67] \\ [0.50, 0.65] & [0.50, 0.50] & [0.53, 0.68] & [0.48, 0.73] & [0.48, 0.78] & [0.68, 0.88] \\ [0.32, 0.59] & [0.32, 0.47] & [0.50, 0.50] & [0.38, 0.68] & [0.48, 0.68] & [0.35, 0.45] \\ [0.27, 0.62] & [0.27, 0.52] & [0.32, 0.62] & [0.50, 0.50] & [0.50, 0.67] & [0.65, 0.47] \\ [0.27, 0.52] & [0.22, 0.52] & [0.32, 0.52] & [0.33, 0.50] & [0.50, 0.50] & [0.54, 0.76] \\ [0.33, 0.41] & [0.12, 0.32] & [0.55, 0.65] & [0.53, 0.35] & [0.24, 0.46] & [0.50, 0.50] \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用式(2),求 Vague 值判断矩阵的模糊逼近矩阵  $Q$ ,并按式(4)、(5)对矩阵进行相容性指标验证,得  $C_1=0.0458$ ,满足相容性偏差要求。按式(6)验证  $Q$  的传递性,可达矩阵主对角线元素不全为 0,因此对偏差最大的第 6 行、第 6 列按  $\alpha=0.4$  进行修正。2 次修正后,得到最终的模糊判断矩阵见式(14)。

$$Q = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.41 & 0.56 & 0.58 & 0.64 & 0.65 \\ 0.58 & 0.50 & 0.62 & 0.64 & 0.69 & 0.78 \\ 0.44 & 0.38 & 0.50 & 0.54 & 0.60 & 0.52 \\ 0.42 & 0.36 & 0.46 & 0.50 & 0.60 & 0.57 \\ 0.36 & 0.31 & 0.40 & 0.40 & 0.50 & 0.60 \\ 0.35 & 0.22 & 0.48 & 0.43 & 0.40 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 2.6 Vague 集评估方法流程图

利用 Vague 集评估方法对实际对象进行评估时,可遵循上述评估步骤,具体流程图如图 1 所示。

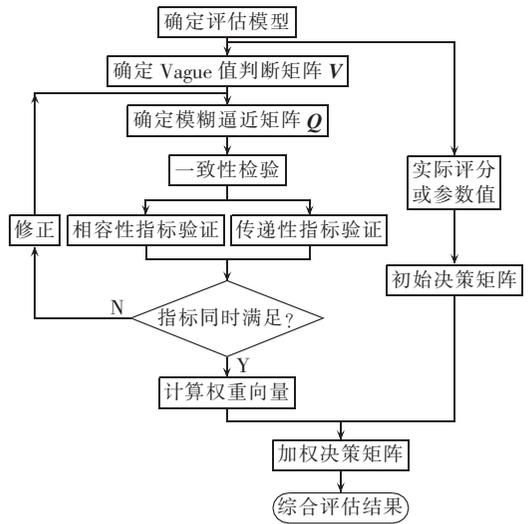


图 1 Vague 集评估方法流程图

Fig.1 Flowchart of evaluation based on Vague sets

## 3 算例分析

### 3.1 实际算例

选取试点工程中改造初步完成的变电站主要一次设备作为评估对象,以改造完成的几座 110 kV 智能变电站试点工程为例,选取 3 个站的变压器、2 个站的 GIS 高压组合电器设备作为评估对象。以表 1 评估指标体系对每种一次设备的智能化改造水平进行评估。首先对一、二级指标利用 Vague 集评估方法求解每级指标的权重向量,以第 2 层指标为例,取不同专家对二级指标 Vague 值的均值构成 Vague 值判断矩阵如式(13)所示。

经修正,传递性指标达到要求,  $C_1=0.0228$ ,可见相容性偏差也得到修正。依次求解各二级指标的 Vague 值判断矩阵并进行模糊逼近和一致性判断,求解结果见表 2, Y、N 分别表示满足和不满足一致性判断。

根据修正后的模糊判断矩阵,利用特征向量法得到一级指标权重向量(0.1866,0.2133,0.1661,0.1614,0.1416,0.1310)。同理,根据各个二级指标的模糊判断矩阵求解对应权重向量,由式(10)求得二级指标综合权重向量如表 3 所示。

选择待评估的变电站一次设备,对每个设备智

表 2 二级指标 Vague 集矩阵求解及一致性检验结果  
Tab.2 Solutions of secondary index Vague set matrix and results of consistency inspection

一级指标	一致性检验		Q1 次修正		Q2 次修正		Q3 次修正	
	$C_1$	T	$C_1$	T	$C_1$	T	$C_1$	T
测量指标	0.1125	N	0.0781	N	0.0566	Y	—	—
控制指标	0.0696	N	0.0475	Y	—	—	—	—
监测指标	0.1111	N	0.0815	N	0.0652	N	0.0489	Y
保护指标	0.1437	N	0.0991	N	—	—	—	—
计量指标	0.0531	Y	—	—	—	—	—	—
通信指标	0.0926	N	0.0653	N	0.0495	Y	—	—

表 3 二级指标综合权重向量结果  
Tab.3 Solutions of secondary index comprehensive weight vectors

一级指标	各二级指标综合权重 $w$
测量指标	(0.0466, 0.0307, 0.0267, 0.0429, 0.0397)
控制指标	(0.0510, 0.0538, 0.0414, 0.0292, 0.0378)
监测指标	(0.0648, 0.0446, 0.0567)
保护指标	(0.0274, 0.0333, 0.0285, 0.0211, 0.0206)
计量指标	(0.0545, 0.0449, 0.0421)
通信指标	(0.0303, 0.0377, 0.0244, 0.0134, 0.0251)

能改造评估的二级指标(表 1)进行评分。其中,支持和反对某指标完成水平的评分分别为  $t_v(x)$  和  $f_v(x)$  (评分  $t_v(x)+f_v(x) \leq 1$ ), 则对该指标的评分构成一个 Vague 值  $[t_v(x), 1-f_v(x)]$ , 根据式(2)取该指标的模糊逼近值  $\bar{F}_v(x)$  作为该指标的实际评分值。不同决策者对某一指标的 Vague 值评定各有差异, 取每个二级指标模糊逼近值的平均值构成该设备的评分向量  $\bar{F}_i(v)$ 。以对变压器 A 的评分向量求解为例, 经过专家根据表 1 的评定, 变压器 A 的评分结果见表 4。

表 4 基于 Vague 值的变压器 A 的评分结果  
Tab.4 Results of evaluation based on Vague value for transformer A

一级指标	各二级指标评分结果均值 $\bar{F}_i(v)$
测量指标	(0.8095, 0.7857, 0.7021, 0.8171, 0.6923)
控制指标	(0.7701, 0.8816, 0.7021, 0.7857, 0.7701)
监测指标	(0.8252, 0.7627, 0.8182)
保护指标	(0.8861, 0.8736, 0.9239, 0.6364, 0.8929)
计量指标	(0.8667, 0.9135, 0.8590)
通信指标	(0.7609, 0.8462, 0.9184, 0.8947, 0.5769)

依次计算其他一次设备的评分结果, 并根据式(11)组成决策矩阵  $Z$ 。各智能一次设备的评估指标的加权值如表 5 所示。

表 5 各智能一次设备的评估指标加权值  
Tab.5 Weighted evaluation indexes for different intelligent primary equipments

对象	加权值					
	测量指标	控制指标	监测指标	保护指标	计量指标	通信指标
变压器 A	0.1431	0.1678	0.1339	0.1115	0.1244	0.1038
变压器 B	0.1397	0.1665	0.1316	0.1141	0.1238	0.1133
变压器 C	0.1307	0.1561	0.1217	0.1086	0.1167	0.1086
GIS 设备 A	0.1337	0.1586	0.1251	0.1098	0.1158	0.1076
GIS 设备 B	0.1135	0.1386	0.1055	0.0981	0.1107	0.0995

由式(12)可以得到各一次设备智能改造综合评估结果如表 6 所示。同时, 表 6 给出了利用 AHP<sup>[9]</sup>和 TOPSIS 法<sup>[19]</sup>的计算值。由于不同评估方法采用的计算步骤不同, 最后的评估值会有差异, 但不同评估方法的排序结果是一致的。

表 6 各一次设备智能改造综合评估结果  
Tab.6 Evaluated results of intelligent primary equipments

对象	Vague 集评估法		AHP 评估法		TOPSIS 评估法	
	$\eta_i$	排序	$\eta_i$	排序	$\eta_i$	排序
变压器 A	0.7845	2	0.0607	2	0.70605	2
变压器 B	0.7890	1	0.6830	1	0.71800	1
变压器 C	0.7424	4	0.6276	4	0.66820	4
GIS 设备 A	0.7506	3	0.6682	3	0.68300	3
GIS 设备 B	0.6659	5	0.5993	5	0.59930	5

### 3.2 评估结果分析

评估结果表明: 变压器作为变电站中主要电力设备, 在智能改造过程中, 一般对变压器的智能改造要优于其他一次设备; 新建智能变电站按照智能变电站标准建设, 其一次设备智能化水平高于其他改造变电站。算例中 GIS 设备 A 的评估值高于变压器 C, 这是由于 GIS 组合电器设备 A 所在变电站是新建智能变电站, 而变压器 C 所在变电站为后期改造变电站, 评估结果与实际试点工程切合。

从不同评估方法的结果来看, Vague 集评估方法引入不确定度对模糊数据进行数学表征, 因此可以更合理地表征人为因素, 对于水平相近的评估对象区分度更高, 与实际工程更加相符。

## 4 结语

本文利用 Vague 集理论解决变电站一次设备智能改造的评估问题。首先根据相关标准和调研信息构建评估模型, 并对 Vague 集评估算法进行了改进, 使评估方法更合理、准确。文中利用该评估方法对变电站的部分一次设备的智能改造水平进行评估, 并给出实例验证。运用该法进一步对智能变电站整体智能改造水平以及区域电网智能电网的整体水平进行评价是下一步的工作目标。本文评估可为变电站智能改造和电网制定相应的标准提供现实依据。

### 参考文献:

- [1] HAASE P. Intelligrid: a smart network of power[J]. EPRI Journal, 2005(Fall): 17-25.
- [2] AMIN M, SCHEWE P F. Preventing blackouts: building a smarter power grid[J]. Scientific American, 2008(8): 60-67.
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.  
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [4] 薛晨, 黎灿兵, 黄小庆, 等. 智能变电站信息一体化应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 110-114.

- XUE Chen, LI Canbing, HUANG Xiaoqing, et al. Application of intelligent substation information integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 110-114.
- [5] 国家电网公司智能电网部. 高压开关设备/GIS 设备智能化技术条件(试行)[R]. 北京: 国家电网公司智能电网部, 2009.
- [6] 国家电网公司智能电网部. 高压设备智能化技术分析报告[R]. 北京: 国家电网公司智能电网部, 2009.
- [7] 李凡, 卢安. 基于 Vague 集的多目标模糊决策方法[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(7): 1-3.
- [8] 朱六兵. 粗糙集与 Vague 集的理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- ZHU Liubing. Theory and application research on rough sets and Vague sets[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [9] 赵云飞, 陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 85-87.
- ZHAO Yunfei, CHEN Jinfu. Analytic hierarchy process and its application in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 85-87.
- [10] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.
- NIE Hongzhan, LÜ Pan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.
- [11] 闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评标中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2004, 36(1): 98-100.
- YAN Wenzhou, GU Liansheng. Application of the method of entropy proportion in the engineering mark[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2004, 36(1): 98-100.
- [12] 国家电网公司智能电网部. 关于印发电力变压器-高压开关设备智能化技术条件的通知[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- [13] 国家电网公司. 变电站智能化改造技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- [14] 赵辰鹏. 智能变电站一次设备的选择及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- ZHAO Chenpeng. The selection and application investigation of primary equipment in smart substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [15] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵的相容性及一致性研究[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2002, 3(2): 94-96.
- XU Zeshui. Research on compatibility and consistency of fuzzy complementary judgment matrices[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2002, 3(2): 94-96.
- [16] 张诚一, 周厚勇. Vague 集的模糊逼近与模糊熵相似度量[J]. 计算机工程与应用, 2006, 33(4): 20-23.
- ZHANG Chengyi, ZHOU Houyong. Transformation and entropy for Vague sets[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 33(4): 20-23.
- [17] 宋光兴, 杨德礼. 模糊判断矩阵的一致性检验及一致性改进方法[J]. 系统工程, 2003, 21(1): 110-116.
- SONG Guangxing, YANG Deli. Methods for identifying and improving the consistency of fuzzy judgment matrix[J]. Systems Engineering, 2003, 21(1): 110-116.
- [18] 肖四汉, 樊治平, 王梦光. Fuzzy 判断矩阵的一致性研究[J]. 系统工程学报, 2001, 16(2): 142-145.
- XIAO Sihan, FAN Zhiping, WANG Mengguang. Study on consistency of fuzzy judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(2): 142-145.
- [19] 胡元潮, 阮江军, 杜志叶, 等. 基于 TOPSIS 法的变电站一次设备智能化评估[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 22-27.
- HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Evaluation of substation primary equipment intellectualization based on TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 22-27.

#### 作者简介:



胡元潮(1988-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 研究方向为智能电网、电力系统多物理场计算(E-mail: 563279452@qq.com)。

## Evaluation of intelligent primary equipment based on improved Vague sets

HU Yuanchao<sup>1</sup>, XIE Qijia<sup>2</sup>, RUAN Jiangjun<sup>1</sup>, AN Yunzhu<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>1</sup>, GONG Ruohan<sup>1</sup>, LI Zhizheng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Electric Power Test and Research Institute, Wuhan 430077, China;

3. Hefei Electric Power Company, Hefei 230000, China)

**Abstract:** An evaluation model is established for smart substation, combined with which, the objective decision theory based on Vague sets is applied to evaluate the substation retrofitting with intelligent primary equipment. The comprehensive consistency inspection based on Vague set theory is proposed and the method to solve its weight is improved. The evaluation flowchart is given. The results of a case study show that, with the uncertainty degree to mathematically represent the fuzzy data, the human factor can be more reasonably represented and the objects at similar level can be evaluated with higher resolution, more suitable for actual projects.

**Key words:** electric substations; smart grid; electric equipments; retrofitting; Vague set; fuzzy set; comprehensive consistency inspection; models