

基于区间数模糊的风电机组部件维修决策方法

韩中合, 苑一鸣, 刘华新, 周 沛

(华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 保定 071003)

摘 要: 风电机组部件间具有高耦合性, 并且评价过程中的重要度评判因素具有灰色模糊和区间取值的特点, 其不确定性为维修决策过程增加了难度。针对这一问题, 提出一种基于区间数灰色模糊(interval number gray fuzzy, INGF)重要度评价的风电机组维修决策方法。构建重要度评判体系并考虑到灰部对准则权重的影响, 引入OWA, 即有序加权平均算子对各重要度等级的因素值进行集结, 计算出部件对于各个重要度等级的综合评判结果。并在此基础上考虑经济性、可靠性和安全性, 对部件进行逻辑维修决策。最后, 以某风电场齿轮箱为研究对象, 选取统计数据进行分析与逻辑维修决策, 验证该方法的有效性和实用价值。

关键词: 区间数; 灰色模糊; 重要度分析; OWA算子; 逻辑决策

中图分类号: TM614; TM615 **文献标识码:** A

0 引 言

在世界范围内, 受到以中国为首的新增风电装机的驱动, 风电的装机容量在逐年递增^[1]。但风能的不稳定性和随机性, 加之风电机组部件之间的耦合性以及恶劣的运行环境, 使得风电场运维、管理所占地位日益重要。以“定期维修”与“事后维修”为代表的传统维修方式往往存在“过度维修”与“缺乏维修”现象。因此, 依据机组运行状态来采用合理的维修策略十分必要。

分析风电机组部件的重要度, 可辨识出对机组运行有重要影响的部件, 既可用重要度评价结果来制定运维计划、降低运维成本, 也可对部件进行风险管控和制定应急机制^[2]。文献[3, 4]采用TOPSIS与其改进方法对部件重要度进行评价, 但在收集决策者对影响因素打分时采用的点值打分的方式, 主观性较强; 文献[5]将模糊评价方法用于重要度评价领域, 仅考虑到评判因素的模糊性, 未考虑其灰色性。在基于重要度评价的维修决策领域, 文献[6]采用模糊综合评判法对重要度影响因素进行计算, 并依据评判结果进行维修决策; 文献[7]将蒙特卡罗法和模糊层次分析法用于部件系统的维修决策, 一定程度上降低主观因素的

影响。

针对现有评价方法中包含较强的主观因素以及未将评判因素的灰色性特点和模糊性特点综合考虑在内的不足, 本文在模糊综合评判方法的基础上进行改进, 引入基于OWA算子和区间数灰色模糊风电机组重要度评判的维修决策方法。考虑评价信息的不充分性, 引入灰度的概念; 考虑信息的不完整性, 表征事物特征的数据往往具有不确定性^[8], 为此引入区间数的概念; 为定量反应灰部与模部之间的影响^[9], 引入OWA算子。最后, 基于部件重要度评价结果, 采用逻辑决策的方式进行维修方法的决策, 并从实际运维角度分析维修决策的正确性。

1 基于区间数灰色模糊重要度评价的风电机组维修决策方法

1.1 传统重要度灰色模糊综合评价模型

综合考虑现有风电机组重要度灰色模糊综合评判模型的建立过程^[10, 11], 其建立的过程主要步骤为:

1) 确定参与评价的风电机组部件; 2) 在对参评部件故障分析的基础上, 得到重要度评价的因

收稿日期: 2016-12-27

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAA06B01); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015MS133)

通信作者: 刘华新(1980—), 男, 博士研究生、讲师, 主要从事电站设备状态检测、控制与信息技术方面的研究。zns007@sina.com

素集^[12];3)获取风电机组部件实际运行情况;4)划分部件重要度等级,以此建立评判集。依据部件重要度分类准则并以本文的评价对象为基础,将部件重要程度分为3类,形成评判集 $S=\{s_1, s_2, s_3\}$: s_1 表示部件类型属于关键部件; s_2 表示部件类型属于重要部件; s_3 表示部件类型属于一般部件。5)通过量化取值确定因素集与评判集之间的模糊关系,根据各因素信息的充分程度建立因素集与评判集间的灰色关系,由此得到灰色模糊矩阵,归一化得到矩阵;6)利用主、客观赋权法确定权重集,归一化得到矩阵;7)利用该模型对部件重要度进行评判;8)对评判结果进行处理。

1.2 基于区间数与逻辑决策的传统评价模型改进

在传统灰色模糊重要度评价模型的数学基础上,结合风电机组部件重要度评价过程的实际情况,对传统模型进行以下3方面改进:

1)取值区间化。由于专家评判过程的不确定性会造成点灰度和点隶属度缺乏一定的客观性。而且专家打分过程的区间取值的特点,若将评判矩阵中点灰度和点隶属度扩展成区间形式,评判过程更具客观性;2)引入 OWA 算子对评判因素进行集

$$\tilde{R}_{\otimes} = \begin{bmatrix} ([\mu_{11}^-, \mu_{11}^+], [v_{11}^-, v_{11}^+]) & ([\mu_{12}^-, \mu_{12}^+], [v_{12}^-, v_{12}^+]) & \cdots & ([\mu_{1n}^-, \mu_{1n}^+], [v_{1n}^-, v_{1n}^+]) \\ ([\mu_{21}^-, \mu_{21}^+], [v_{21}^-, v_{21}^+]) & ([\mu_{22}^-, \mu_{22}^+], [v_{22}^-, v_{22}^+]) & \cdots & ([\mu_{2n}^-, \mu_{2n}^+], [v_{2n}^-, v_{2n}^+]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ([\mu_{m1}^-, \mu_{m1}^+], [v_{m1}^-, v_{m1}^+]) & ([\mu_{m2}^-, \mu_{m2}^+], [v_{m2}^-, v_{m2}^+]) & \cdots & ([\mu_{mn}^-, \mu_{mn}^+], [v_{mn}^-, v_{mn}^+]) \end{bmatrix} = (r_{ij})_{m \times n} = ([[\mu_{ij}^-, \mu_{ij}^+], [v_{ij}^-, v_{ij}^+]])_{m \times n} \quad (1)$$

式中, c_{ij}^- 、 c_{ij}^+ ——区间数模部的左、右端点值; μ_{ij}^- 、 μ_{ij}^+ ——归一化的模部的左、右端点值,其中, $\mu_{ij}^- = c_{ij}^- / \sum_{j=1}^n c_{ij}^+$, $\mu_{ij}^+ = c_{ij}^+ / \sum_{j=1}^n c_{ij}^-$; v_{ij}^- 、 v_{ij}^+ ——区间数灰部的左端点值、右端点值。

2)区间数权重集的建立

因素集中各因素权重是因素在部件重要度确定过程中所占重要程度的定量反映,权重矩阵表达了被评价对象与评判因素之间的灰色模糊关系。在确定权重矩阵时考虑最多的问题是如何提高权

结。由第1节分析可知,虽然在评判过程中考虑到评判过程的不确定性和信息的不完全性,但未考虑两者之间的关联性。因此在原综合评价的基础上,引入 OWA 算子,从而定量反应灰部与模部之间的影响;3)引入逻辑维修决策。相比于基于灰色模糊评判的维修决策而言,在重要度评判基础上进行的逻辑决策既考虑到重要度评判因素对维修过程的影响,又考虑到维修费用、设备状态是否可以监测和隐藏性功能障碍等因素,使得维修决策参考的因素更全面。

因此,在传统风电机组部件重要度灰色模糊综合评价模型的基础上引入以上3方面改进,使模型更完善、综合评判过程更客观。

1.2.1 基于区间数灰色模糊矩阵和权重集的建立

1)区间数灰色模糊矩阵的建立

灰色模糊关系矩阵反映评判集与因素集的灰色模糊关系,通过机组部件实际运行情况统计数据得到因素集中元素对评判集的隶属程度,即模部大小,根据因素集中信息的充分程度确定灰部大小。区间数灰色模糊矩阵形式如式(1)、式(2)所示。

$$\tilde{C}_{\otimes} = ([[\mu_{ij}^-, \mu_{ij}^+], [v_{ij}^-, v_{ij}^+]])_{m \times n} \quad (1)$$

重矩阵的客观性。主观赋权法主要依靠决策者的主观信息进行赋权,虽然文献[13]提出区间数层次分析法,在一定程度上降低权重赋值过程中的主观性,但仍无法去除层次分析法带来的主观误差。因此本文基于灰色模糊矩阵的区间数特点,引用一种针对区间数多指标评判矩阵的客观赋权法^[14],使赋权结果更贴近客观实际。

利用客观赋权法,确定评价部件重要度的因素集中的6个主要因素的区间模糊数,并取灰度区间为[0.1,0.2],归一化后的各因素权重为:

$$\tilde{W}_{\otimes} = ([[w_1^-, w_1^+], [u_1^-, u_1^+]], [[w_2^-, w_2^+], [u_2^-, u_2^+]], \cdots, [[w_m^-, w_m^+], [u_m^-, u_m^+]]) = ([[0.23, 0.43], [0.1, 0.2]], [[0.11, 0.18], [0.1, 0.2]], [[0.53, 0.09], [0.1, 0.2]], [[0.09, 0.15], [0.1, 0.2]], [[0.21, 0.31], [0.1, 0.2]], [[0.08, 0.13], [0.1, 0.2]]) \quad (3)$$

式中, w_i^- 、 w_i^+ ——归一化的权重矩阵模部左、右端点值, $w_i^- = d_i^- / \sum_{i=1}^m d_i^-$, $w_i^+ = d_i^+ / \sum_{i=1}^m d_i^+$; u_i^- 、 u_i^+ ——权重矩阵模部左、右端点值, $i=1, 2, \dots, m$ 。

1.2.2 基于 OWA 算子的部件重要度综合评判

1) 确定 OWA 相关联的加权向量

定 义 $OWA_{\omega}(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{j=1}^m \omega_j b_j$,

$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 与函数 OWA 相关联的加权向量, $\omega_j \in [0, 1]$, $j \in M$, $\sum \omega_j = 1$; b_j 一组数据 (a_1, a_2, \dots, a_m) 中第 j 大的元素, 其中函数 OWA 被称为有序加权平均算子, 也称为 OWA 算子^[9]。

OWA 算子中 ω_i 的确定采用式(4):

$$\omega_i = (1 - \alpha)/n + \alpha, \omega_i = (1 - \alpha)/n \quad (4)$$

$i \neq 1$, 且 $\alpha \in [0, 1]$, 由此求得加权向量为:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \quad (5)$$

2) 基于 OWA 算子的部件重要度综合评判及结果处理

利用 OWA 算子对第 j 个重要度等级 S_j 的评判因素集进行集结, 得到重要度等级 S_j 的综合评判结果:

$$Z_j = OWA_{\omega}(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^m \omega_i b_{ij} = ([z_j^-, z_j^+], t_j) \quad (6)$$

式中, $t_j = [t_j^-, t_j^+]$, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 与 OWA 相关联的加权向量, $a_i \in [0, 1]$, $i \in M$, $\sum a_i = 1$; $b_{ij} = ([b_{ij}^L, b_{ij}^U], \mu_{ij})$ 一组加权数据 $(n\omega_1 r_{1j}, n\omega_2 r_{2j}, \dots, n\omega_n r_{nj})$ 中灰度第 i 大的元素; $w = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 因素集的加权向量, $\omega_i \in [0, 1]$, $i \in M$, $\sum \omega_i = 1$; n 平衡因子。

由于 ω_i 和 r_{ij} 均为灰色模糊数, 为在计算时保留尽可能多的有效信息, 模部采用 $M(\bullet, +)$ 算子, 灰部采用 $M(\odot, \bullet)$ 算子:

$$\begin{aligned} nw_i r_{ij} &= n([w_i^-, w_i^+], u_i) \cdot ([r_{ij}^-, r_{ij}^+], v_{ij}) \\ &= n([w_i^- \odot r_{ij}^-, w_i^+ \odot r_{ij}^+], [1 \wedge (u_i^- + v_{ij}^-), 1 \wedge (u_i^+ + v_{ij}^+)]) \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $nw_i r_{ij}$ 的灰部是一个区间数, 且区间数具有无法直接比较大小的特点, 因此将区间数点化后进行排序^[15], 具体方法如下:

区间数 $\beta = [\beta_1, \beta_2]$ 的 θ 值 $m_{\theta}(\beta)$ 为:

$$m_{\theta}(\beta) = m_{\theta}([\beta_1, \beta_2]) = (1 - \theta)\beta_1 + \theta\beta_2 \quad (8)$$

其中, θ 评判者对待风险的态度, $\theta \in [0, 1]$ 。若评判者为风险厌恶型, $\theta = 0$; 若评判者为风险喜好型, $\theta = 1$; 若评判者为风险中性型, $\theta = 0.5$ 。考虑到评判者对待风险的普遍态度, 取 $\theta = 0.5$ 。

对向量 $(n\omega_1 r_{1j}, n\omega_2 r_{2j}, \dots, n\omega_n r_{nj})$ 按(9)式按灰度大小进行排序, 得到 b_{ij} , 通过式(7)、式(8)得出:

$$\begin{aligned} t_j &= [t_j^-, t_j^+] = \prod_{i=1}^n \mu_{ij} = \prod_{i=1}^n [\mu_{ij}^-, \mu_{ij}^+] \\ &= \left[\prod_{i=1}^n (1 \wedge (u_i^- + v_{ij}^-)), \prod_{i=1}^n (1 \wedge (u_i^+ + v_{ij}^+)) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $z_j^- = \sum_{i=1}^n a_i b_{ij}^-$, $z_j^+ = \sum_{i=1}^n a_i b_{ij}^+$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

得到评判结果 Z_j 为区间数, 将区间实数化后进行排序, 通过排序结果确定部件重要度等级。

依据区间数排序公式(8), 将评判结果 Z_j 的灰部 t_j 实数化:

$$g_j = m_{\theta}(t_j) = (1 - \theta)t_j^- + \theta t_j^+ \quad (10)$$

将评判结果 $Z_j = ([z_j^-, z_j^+], t_j)$ 模部化为两区间参数, 得:

$$Z_j = [z_j^-(1 - g_j), z_j^+(1 + g_j)] = [z_{ij}^L, z_{ij}^U] \quad (11)$$

通过式(10)计算出的综合评判结果 $m_{\theta}(Z_j)$, 通过比较某部件的 $m_{\theta}(Z_j)$ 来确定部件所归属的重要度等级。

1.2.3 基于重要度评价的风电机组部件维修方式逻辑决策

基于部件重要度等级的划分, 对每个等级的部件重要度程度进行描述, 继而依据部件对安全性和经济性等因素进行维修决策的制定。

一般部件对风电机组或其所属子系统正常运行无影响且备件费用较低, 采取减少备件及降低故障频率的措施收益不明显; 重要部件故障后虽然会造成较严重的设备故障, 但通常不会产生安全性后果。通过有效的维修可有效降低故障率, 提高机组可靠性, 但会产生较高的维修费用; 关键部件的故障可能引起机组运维人员安全、引起重大生产损失等诸多严重后果, 从降低故障频率和提高可用率角度, 可很大程度上提高机组可靠性和经济性。

维修逻辑决策流程图如图 1~图 3 所示。

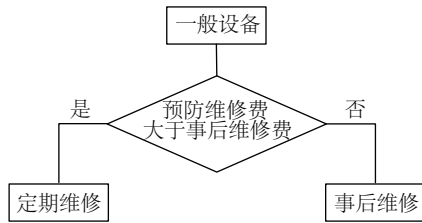


图1 一般设备维修方式逻辑决策框图

Fig. 1 Maintenance logic decision diagram of general equipment

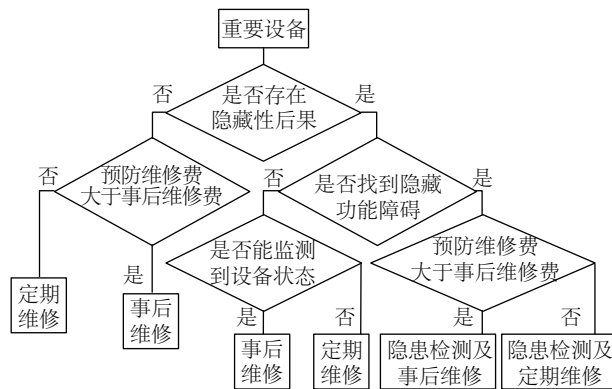


图2 重要设备维修方式逻辑决策框图

Fig. 2 Maintenance logic decision diagram of important equipment

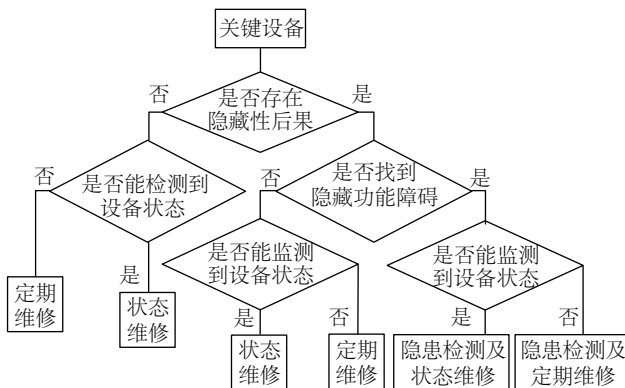


图3 关键设备维修方式逻辑决策框图

Fig. 3 Maintenance logic decision diagram of key equipment

2 案例分析

以某风电场 1.5 MW 机组齿轮箱为研究对象,选取齿轮箱统计数据,进行部件维修决策。

建立评判指标集,包括部件重要度评判的影响因素、定性定量指标内容和量化方法。参照火电厂和风电场部件重要度评判指标,考虑到指标的耦合性和评判过程的间接性,可以筛选出评判过程主要影响因素和评价因素的评判内容。评判内容具体的衡量过程如表 1 所示。

表1 重要度等级评判表

Table 1 Importance rating table

评判因素	重要度等级		
	关键部件	重要部件	一般部件
对系统功能影响	基本丧失	明显下降	几乎无影响
失效频率/h	8000~15000	1500~8000	700~1500
停运时间/d	5~15	2~5	0~2
维修造成的经济损失	大	一般	小
维修费用	高	中等	低
可监测性	高	中等	低

根据因素集中的评价内容,结合齿轮箱历史数据描述齿轮箱实际运行情况。该齿轮箱发生故障时会导致系统功能基本丧失;平均无故障时间在 7000~12500 h;齿轮箱故障进行的维修或更换导致停运时间在 0.5~8 d;维修造成经济损失较高;可监测性对技术的要求属于中等水平。

2.1 基于本文方法的齿轮箱维修决策模型

2.1.1 建立区间数灰色模糊关系矩阵

根据齿轮箱实际运行情况和和表 1 中的量化取值,得出评价矩阵 \tilde{C} ,归一化得到矩阵 \tilde{R} :

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} ([0.37, 0.71], [0.2, 0.3]) & ([0, 0.29], [0.3, 0.4]) & ([0, 0], [0.2, 0.3]) \\ ([0, 0.69], [0.1, 0.2]) & ([0.22, 0.31], [0.1, 0.2]) & ([0, 0], [0.2, 0.3]) \\ ([0, 0.23], [0.1, 0.2]) & ([0, 0.38], [0.2, 0.3]) & ([0.29, 0.38], [0.2, 0.3]) \\ ([0.45, 0.68], [0.1, 0.2]) & ([0, 0.27], [0.1, 0.2]) & ([0, 0.05], [0.3, 0.4]) \\ ([0.45, 0.68], [0.4, 0.5]) & ([0, 0.27], [0.3, 0.4]) & ([0, 0.05], [0.2, 0.3]) \\ ([0.03, 0.38], [0.2, 0.3]) & ([0.25, 0.63], [0.1, 0.2]) & ([0.44, 0.62], [0.2, 0.3]) \end{bmatrix}$$

2.1.2 模型处理结果

1) 由式(6)与式(7)确定与 OWA 相关联的加

权向量为: $\omega = [0.33, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13]$

2) 由式(9)~式(14)进行基于 OWA 的区间数

模糊综合评判,得: $Z_1=([0.29, 2.01], [0, 0.01])$, $Z_2=([0.05, 1.80], [0, 0.01])$, $Z_3=([0.03, 0.06], [0, 0.02])$ 。

3) 评判结果的处理。由式(10)、式(12)和式(13),考虑到评判者对待风险的普遍态度,取 $\theta=0.5$ 。计算 Z_j 的综合评判结果 $m_\theta(Z_1)=0.59$, $m_\theta(Z_2)=0.25$, $m_\theta(Z_3)=0.05$ 。由此可得,该部件在机组中的重要程度属于关键部件。

4) 基于逻辑决策流程的维修决策

在对齿轮箱进行重要度评价的基础上,根据逻辑决策流程,结合现行风电场维修决策方式,确定其维修方式为隐患检测及状态维修。从实际运维角度分析,首先,SCADA数据包含齿轮箱轴承温度数据和润滑油油温数据^[16],即可对齿轮箱状态进行实时监测。在齿轮箱状态监测的基础上,可以进行状态维修。风电齿轮箱主要包含齿轮、轴承、齿轮箱轴、润滑系统等部件及系统。其次,根据文献[17]进行的FMEA分析可知,对于一些故障模式,如齿面耗损、轴承表面损伤等,机组可以正常工作;对于一些故障模式,如轴承发生润滑不良故障时,虽然机组可以运行,但应及时采取措施;轴承保持架变形将导致有异响或不能正常工作,长期处于这种状态工作则需停机、更换轴承。综上,齿轮箱工作状态可监测,并且存在隐藏功能障碍和安全隐患,即从实际运维角度验证了采取隐患检测及状态维修方式的正确性。

2.2 参照组模型

传统灰色模糊重要度评价方法中,模部与灰部均为点值,且模部采用 $M(\bullet, +)$ 算子、灰部采用 $M(\odot, \bullet)$ 算子对评价结果进行集结。将本节所提算例带入到传统评价模型中,评价过程及结果如下所示。

参考火电厂重要度指标权重的取值^[18];考虑到灰部取值的不确定性,并根据区间数评价矩阵和权重矩阵灰部确定其灰度值,最后将评价矩阵和权重矩阵代入传统模型中进行评价。本文模型与传统模型的评价结果,即齿轮箱的重要度等级,如表2所示。其中传统模型(L)/传统模型(R)分别表示其灰度取值为区间数灰部的左/右端点值。

表2 2种模型对齿轮箱的评价结果

Table 2 Evaluation results of two models for gearbox

模型	关键部件	重要部件	一般部件
本文模型	0.59	0.25	0.05
传统模型(L)	1.10	1.02	1.00
传统模型(R)	1.09	1.01	0.99

由表2的评价结果可知,传统模型在重要度评价过程中,齿轮箱相对于各重要度等级的隶属度区分度不高;其次,在灰度取值变化时,会出现评价结果与实际不符合的情况,如传统模型(R)的评价结果将齿轮箱归为重要部件,将直接影响维修决策。而相比于传统模型,改进后的模型重要度评判结果离散程度大,不易受到灰度取值的影响。

3 结 论

本文将区间数灰色模糊综合评判方法引入风电机组部件重要度评价领域。在传统模糊综合评判基础上,考虑到信息的不确定性,引入灰色数的概念。同时,考虑到风电机组部件间较强关联性和耦合性及某评语的隶属程度难以用一个确定的数表示,引入区间数的概念,可一定程度上保证评判过程的客观性。

在重要度等级划分的基础上,结合经济性、故障可检测性等因素,以齿轮箱为例,通过逻辑决策维修模型确定了其维修方式,并基于实际运维经验,验证了该方法的正确性。该模型与传统模型进行对比时具有评价结果离散程度高和不易受灰部取值影响的优势,可为风电机组部件状态维修提供支持。

[参考文献]

- [1] 刘振亚, 张启平, 董 存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513—2522.
- [1] Liu Zhenya, Zhang Qiping, Dong Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC Projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513—2522.
- [2] 符 杨, 李学武, 黄玲玲. 基于层次分析法的海上风电机组部件重要度评估[J]. 上海电力学院学报,

- 2015, 31(1): 1—6.
- [2] Fu Yang, Li Xuewu, Huang Lingling. Importance assessment of offshore wind turbines component based on the analytic hierarchy process[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(1): 1—6.
- [3] 刘佳, 王敏, 顾煜炯, 等. 基于TOPSIS重要度分析的风电场设备维修方式逻辑决策[J]. 可再生能源, 2012, 30(12): 29—34.
- [3] Liu Jia, Wang Min, Gu Yujiong, et al. Maintenance logical decision of wind farm equipment based on the TOPSIS criticality analysis[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(12): 29—34.
- [4] 李常有, 徐敏强. 基于改进的TOPSIS的设备重要度分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 164—167.
- [4] Li Changyou, Xu Minqiang. Criticality analysis of equipment based on the improved TOPSIS[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(6): 164—167.
- [5] 姚成玉, 张荧驿, 陈东宁, 等. T-S模糊重要度分析方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 163—169.
- [5] Yao Chengyu, Zhang Yingyi, Chen Dongning, et al. Research on T-S fuzzy importance analysis methods[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 163—169.
- [6] 张毅. 基于重要度划分的设备维修方式决策[J]. 兵工自动化, 2005, 24(6): 23—24.
- [6] Zhang Yi. Maintenance manner decision-making for equipment based on partitioning importance[J]. Ordnance Industry Automation, 2005, 24(6): 23—24.
- [7] 王宝, 刘青, 王彬, 等. 基于重要度的电弧炉炼钢系统维修决策[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(1): 14—24.
- [7] Wang Bao, Liu Qing, Wang Bin, et al. Maintenance decision-making for EAF steelmaking system based on criticality[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(1): 14—24.
- [8] 刘俊娟, 王伟, 程琳. 基于梯形隶属函数的区间数模糊评价方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 390—392.
- [8] Liu Junjuan, Wang Wei, Cheng Lin. Interval number fuzzy evaluation based on trapezoid subordinate function[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 390—392.
- [9] 王坚强, 王君. 一种区间灰色模糊多准则决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(12): 2409—2411.
- [9] Wang Jianqiang, Wang Jun. Interval grey fuzzy multi-criteria decision making approach[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(12): 2409—2411.
- [10] 万书亭, 万杰, 张成杰. 基于灰色理论和变权模糊综合评判的风电机组性能评估[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2285—2291.
- [10] Wan Shuting, Wan Jie, Zhang Chengjie. Comprehensive evaluation of wind power unit performance evaluation based on grey theory and variable weight fuzzy mathematics[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2285—2291.
- [11] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161—167.
- [11] Guo Lianyu, Li Kejun, Liang Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161—167.
- [12] Pancholi N, Bhatt M G. Multicriteria FMECA based decision-making for aluminium wire process rolling mill through COPRAS-G[J]. Journal of Quality and Reliability Engineering, 2016, 5(10): 1—8.
- [13] 李艳萍, 乔琦, 柴发合, 等. 基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 334—340.
- [13] Li Yanping, Qiao Qi, Chai Fahe, et al. Study on environmental risk assessment index weight of industrial park based on the analytic hierarchy process[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(3): 334—340.
- [14] 汪群峰, 金佳佳, 米传民, 等. 基于灰关联深度系数的评价指标客观权重极大熵配置模型[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 235—240.
- [14] Wang Qunfeng, Jin Jiajia, Mi Chuanmin, et al. Maximum entropy configuration model of objective index weight based on grey correlation deep coefficient[J]. Control and Decision, 2013, 28(2): 235—240.
- [15] 孙海龙, 姚卫星. 区间数排序方法评述[J]. 系统工程学报, 2010, 25(3): 304—312.
- [15] Sun Hailong, Yao Weixing. Comments on methods for ranking interval numbers[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(3): 304—312.
- [16] Tautz Weinert J, Watson S J. Using SCADA data for wind turbine condition monitoring—A review[J].

- Institution of Engineering and Technology, 2016, 12 (2): 1—32.
- [17] 孙晓伟. 风电机组齿轮箱故障模式与影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [17] Sun Xiaowei. Fault statistics and effect analysis of gearbox for wind turbines [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [18] 董玉亮, 顾煜炯, 杨 昆. 基于蒙特卡洛模拟的发电厂设备重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 201—205.
- [18] Dong Yuliang, Gu Yujiong, Yang Kun. Criticality analysis on equipment in power plant based on monte carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8): 201—205.

MAINTENANCE DECISION METHOD FOR WIND TURBINE COMPONENTS BASED ON INTERVAL NUMBER FUZZY

Han Zhonghe, Yuan Yiming, Liu Huaxin, Zhou Pei

(Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China)

Abstract: The high coupling between the components of the wind turbine and the important factors in the evaluation process has the characteristics of gray fuzzy and interval value. The uncertainty increase difficulty for maintenance decision making. Aiming at this problem, a method based on INGF (Interval Number Gray Fuzzy) is proposed to evaluate the importance of wind turbine maintenance. The important degree evaluation system is constructed based on the method and considering the effect of grey part on the criteria weights, the introduction of OWA (Ordered Weighted Averaging) is used to aggregate the values of the important degree factors, then calculate the comprehensive evaluation results of the components for each importance grade. And on the basis of this result, considering the economy, reliability and security, the logic maintenance decision of components is made. Finally, a certain wind farm gear box is taken as the research object and the statistical data is selected for the importance analysis and logic maintenance decision-making. The validity and the practical value of the proposed method is validated.

Keywords: interval numbers; grey fuzzy; importance analysis; OWA operator; logical decision