

基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估

胡姚刚¹, 李 辉¹, 刘海涛¹, 宋二兵¹, 欧阳海黎², 兰涌森²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 中船重工(重庆)海装风电设备有限公司, 重庆 401122)

摘 要: 针对基于确定权重的评估方法难以适应风电机组特征量多且相互关系不明确的特点, 提出基于多类证据体的风电机组健康状态评估方法。首先考虑风速大小随机变化对机组振动和温度特征量波动范围的影响, 提出基于动态阈值的评估指标劣化度量方法; 其次针对证据间信息可能存在的高冲突问题, 按照证据间的优先度分布情况, 依据证据源修正思想建立基于证据推理的风电机组健康状态评估模型; 最后, 以某风电机组健康状态评估为例, 与传统的证据评估方法对比分析, 验证所提出评估方法可均衡兼顾各评估指标的状态信息获得有效的风电机组健康状态。

关键词: 风电机组; 状态评估; 指标量化; 证据冲突; 证据修正

中图分类号: TM315; TM307

文献标识码: A

0 引 言

随着我国海上风电建设规划相继启动及现运行的大部分风电机组质保期逐渐超出, 高故障发生率和高运维成本的现状已引起风电运营商、制造商和运维公司等机构的关注。开展风电机组的状态监测和评估研究, 对及时掌握风电机组健康状态, 为优化风电场的运行及检修策略提供技术支撑, 对降低故障率和减少运维成本, 以及保证风电机组安全高效运行有重要学术意义和工程应用价值^[1,2]。

与传统火电、水电机组相比, 风电机组在高空运行, 是多部件协同工作且关联性强的复杂系统, 监测特征量类型和数量众多, 当机组发生异常引起状态改变时, 往往不仅仅引起一个监测特征量改变, 相关的特征量均会存在不同程度的变化。但受风速大小和风向的不确定性影响及变速恒频发电控制的约束, 运行状态通常在不同工况之间随机频繁切换, 各类特征量随机波动范围较宽, 难以直接识别出其异常改变情况, 很有必要寻求一种能充分利用多类特征量监测信息的风电机组健康状

态评估方法。目前, 国内外对风电机组整机的状态评估方法主要有模糊综合评判^[3-6]、物元理论^[7]、云理论^[8]等。上述方法多是以确定评估指标的权重为关键点, 权重确定的合理与否直接影响评估结果的有效性和准确性^[9]。如文献[3]采用专家打分方式来确定风电机组评估指标权重系数, 评估结果不可避免受人为主观因素影响。文献[4~7]通过工程设计和检修记录, 并结合风电机组故障率的统计数据对各评估指标常权权重进行设定, 考虑了评估指标的劣化度改变对整机状态的影响, 引入变权公式在常权权重的基础上综合协调获得各评估指标的变权权重, 但在两项或多项指标发生严重偏离时, 变权公式将不能较好地实现对各评判指标的权重进行合理有效分配。另外, 当评估指标较多时, 分配给单个评估指标的权重就相对越小, 加上风速随机变化对各评估指标的不确定影响, 当单个或几个评估指标劣化时, 可能导致反映整机健康评估指标状态信息受多数不变或浮动变化较小的评估指标状态信息影响而被淹没, 出现与机组实际健康状态不相符或相悖的评估结果。证据理论作为处理多类证据信息融合问题的

收稿日期: 2016-01-04

基金项目: “国际科技合作专项(2013DFG61520); 国家自然科学基金项目(51377184); 重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztzz0212); 重庆市科技新星培育工程项目(KJXX2017009)

通信作者: 胡姚刚(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事风电机组状态评估与故障诊断方面的研究。huyaogang345@163.com

一种不确定性推理方法^[10],每个评估指标将被看作为一个证据体,可在不依赖于权重确定情况下,处理随机性和模糊性导致的不确定性问题,为建立多信息融合的风电机组健康状态评估方法提供了新思路。然而,在多个证据体参与评估时,证据信息的不一致性凸显,难免在证据体间信息出现高冲突现象,直接采用证据推理评估方法,可能得到与实际情况不符的评估结果。

综上所述,本文将各类评估指标看作不同的证据体,应用证据推理理论,提出基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估方法。首先,基于数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)监测信息,提取受风速和环境温度变化影响的监测特征量,构建层次型的健康状态评估指标体系,其中采用 bin 方法与“ 3σ 规则”通过确定动态阈值来实现振动和温度评估指标量化;其次,采用证据源修正的思想,引入优先度提取出证据源中劣化状态信息相对较大的证据体组成优先证据源,再利用相容系数对优先证据源进行修正,建立基于证据推理的风电机组健康状态评估模型;最后,以某 1.5 MW 风电机组 SCADA 监测信息为例,通过采用所提出的评估方法进行计算,并与传统证据评估方法结果及实际运行情况进行比较分析。

1 风电机组健康状态评估指标分析

1.1 评估指标体系

风电机组的 SCADA 监测信息能表征其健康状态情况^[4],反映机组健康状态的信息数量和类型较多,包括温度、压力、振动、电气等特征量。与文献[3~5]评估指标体系相比,把受风速、风向、环境温度等因素影响的各部件监测特征量进行层次归类,构建层次型风电机组健康状态评估指标体系,如图 1 所示。为方便对健康评估过程的表述以及评估指标统一量化,对图 1 的评估指标按照物理特性和指标属性上进行分类整理,如表 1 所示,从指标属性上来看,越小越优型指标包括温度、振动、位移和部分电气型指标;中间型最优型指标包括压力、速度和部分电气型指标。

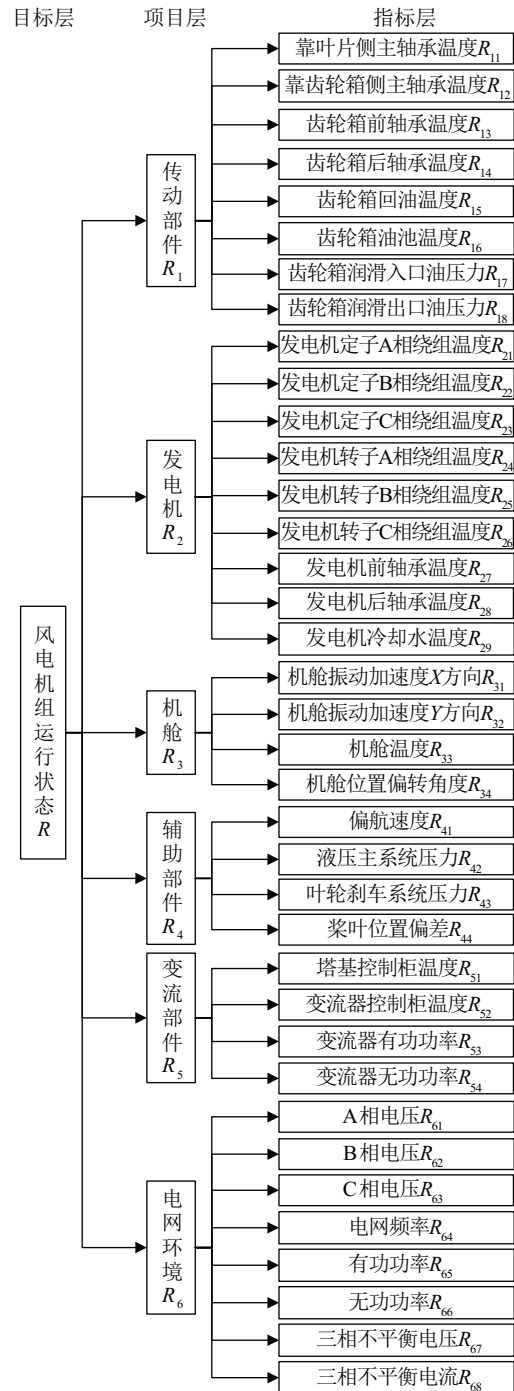


图1 风电机组健康状态评估指标体系

Fig. 1 Health evaluation indices system of a WTGS

1.2 评估指标的量化

在评估指标量化方面,引入劣化度概念来表征评估指标当前健康状态与故障状态相比的相对劣化程度^[4],取值范围为 $[0, \infty]$ 。根据不同取值来计算评估指标对应的部件状态的劣化程度。

表1 评估指标类型

Table 1 Type of the assessment indices

类型	评估指标	指标属性
温度	$R_{11} \sim R_{16}, R_{21} \sim R_{29}, R_{33}, R_{51} \sim R_{52}$	越小越优型
振动	$R_{31} \sim R_{32}$	越小越优型
压力	$R_{17} \sim R_{18}, R_{42} \sim R_{43}$	中间最优型
速度	R_{41}	中间最优型
位移	R_{34}, R_{44}	越小越优型
电气	$R_{61} \sim R_{64}$	中间最优型
	$R_{51} \sim R_{52}, R_{65} \sim R_{68}$	越小越优型

对于表1中的越小越优型指标,包括振动、温度、位移和部分电气型指标:

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \end{cases} \quad (1)$$

中间越优型指标,包括压力、速度和部分电气型指标:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{\gamma_1 - x}{\gamma_1 - \alpha}, & x < \gamma_1 \\ 0, & \gamma_1 \leq x \leq \gamma_2 \\ \frac{x - \gamma_2}{\beta - \gamma_2}, & \gamma_2 < x \end{cases} \quad (2)$$

式中, $g(x)$ ——劣化度(x 为实测值); α 、 β ——下限和上限阈值, $\alpha < \gamma_1 < \gamma_2 < \beta$ (γ_1 和 γ_2 为最佳值)。

合理设置劣化度的阈值是评估风电机组健康状态的关键,为此文中在阈值设定方面,按照评估指标的物理特性分为2类分别进行确定:1)第1类包括压力、速度、位移和电气型指标,该类指标劣化与自身部件的运行或与外界电网参数变化相关性较强,可通过风电机组的工程设计和满足电网运行要求的参数来设定阈值。2)第2类包括振动和温度型指标,考虑到该类评估指标运行数据易因风速或风力机转速变化而改变,文中以正常运行的振动和温度特征量运行数据为研究基础,应用四分位法和聚类方法^[11],剔除由故障或弃风限电停机引起的分散性和堆积型异常数据,再基于统计学中的“3 σ 原则”,以风力机转速为区间划分依据,分别确定各区间的阈值。详述如下:首先,利用bin方法,将机组允许的转速范围按照大小依此平均划分为 m 个区间,各区间用 D_i ($i=1, 2, \dots, m$)来表示。其次,分别以转速各采样时刻的运行数据数值大小为依据,

将温度、振动加速度指标的历史监测数据划归到各区间 D_i ,得到区间 D_i 的 n 个运行数据 $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}$ ($j=1, 2, \dots, n$)。最后,通过逐个计算区间 D_i 内运行数据的均值 μ_i 和标准差 σ_i ($i=1, 2, \dots, m$),其中,均值 μ_i 和标准差 σ_i 为:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_j^{(i)}}{n} \quad (3)$$

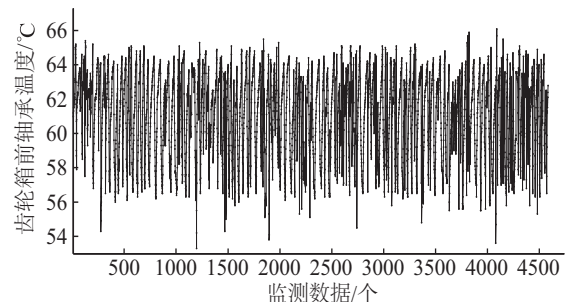
$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j^{(i)} - \mu_i)^2} \quad (4)$$

根据“3 σ 原则”,将 $\mu_i - 3\sigma_i$ 和 $\mu_i + 3\sigma_i$ 作为振动和温度评估指标在区间 D_i 的下限和上限阈值。例如,对于某1.5 MW风电机组齿轮箱前轴承指标 R_{27} ,利用bin区间划分方法,将风力机转速作为区间划分的依据,从10~18 r/min从小到大平均划分成8个区间,划分的区间见表2所示。以区间 D_3 的阈值确定为例进行说明,首先通过区间 D_3 的齿轮箱前轴承温度历史数据统计,区间 D_3 的齿轮箱前轴承温度的历史数据见图2,数据量共4583个,然后计算均值 μ_3 和标准差 σ_3 得到 $\mu_3=61.03$ °C和 $\sigma_3=2.45$ °C。故该 D_3 区间的阈值为[56.14 °C, 65.92 °C]。同理,其他区间和其他第二类评估指标获取过程与上述类似。

表2 风力机转速区间划分

Table 2 Interval classification by using rotating speed of wind turbine

区间	D_1	D_2	D_3	D_4
风力机转速/r·min ⁻¹	10~11	11~12	12~13	13~14
区间	D_5	D_6	D_7	D_8
风力机转速/r·min ⁻¹	14~15	15~16	16~17	17~18

图2 区间 D_3 中齿轮箱前轴承温度的监测数据Fig. 2 Monitoring data of gearbox front bearing temperature in interval D_3

2 风电机组健康状态评估模型

2.1 证据理论

证据理论是 Dempster 在 1967 年提出,后来由 Shafer 推广形成 D-S 证据理论。主要包括 3 部分:识别框架及 mass 函数、融合规则和评估确定规则^[12]。

1) 识别框架及 mass 函数。识别框架是被评估对象全部可能的状态类别的集合, L 的所有可能子集,在评估过程中就是全部状态的集合,用 $\Omega(L)$ 表示。如,可将评估对象状态划分 s 个等级,即评估对象状态识别框架为 $L=\{l_1, l_2, \dots, l_s\} (t=1, 2, \dots, s)$ 。mass 函数也称基本概率分配函数, L 上的 mass 函数定义为:

$$m: \Omega(L) \rightarrow [0, 1], \text{ 且 } m(\Phi)=0, \sum_{i=1}^s m(l_i)=1$$

其中, $m(l_i)$ 表示对 l_i 的信任程度,在评估过程中为对某状态 l_i 的确认程度。

2) 融合规则。融合规则是证据联合作用的法则。在融合规则中,相比于传统的 Dempster 合成规则, Yager 融合规则取消了正则化过程,该规则适合于处理证据间的低冲突信息,可将部分未知信息分配给识别框架外的子集 l_θ , 而不像 Dempster 合成规则那样分配到识别框架 L 中,一定程度上提高了最后融合结果的合理性^[12]。其合成规则为:

$$m(l_i) = \begin{cases} \sum_{A \cap B = l_i} m_1(A) \times m_2(B) & l_i \neq l_\theta \\ \sum_{A \cap B = l_i} m_1(A) \times m_2(B) + K & l_i = l_\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中, $K = \sum_{A \cap B = \Phi} m_1(A) \times m_2(B)$ 。

3) 评估规则确定。常用的评估规则有最大信任规则、绝对支持规则等。考虑最大信任规则与人类认知相符^[12], 能将对应于信任程度最高的状态作为评估结果。因此采用最大信任规则, 选择 $\max(m(l_i))$ 最大数值相对应的状态作为整机健康状态的评估结果。

2.2 评估指标的隶属度函数及其 mass 函数

为了方便风电机组健康状态的证据推理评估, 将风电机组健康状态划分“良好, 合格, 注意, 严重”4 个状态, 即识别框架为: $L=\{l_1, l_2, l_3, l_4\}=\{\text{良好, 合格, 注意, 严重}\}$ 。将识别框架 L 中 $l_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的

隶属度 $v_i (i=1, 2, 3, 4)$ 依次为 mass 函数 $m(l_i)$ 。

考虑三角形和半梯形组合的分布函数形状简单, 具有与其他较复杂的隶属函数得出的结果差别较小优点^[4], 构建了各评估指标对应状态 $l_1 \sim l_4$ 隶属函数, 见图 3 所示。计算出评估指标的劣化度, 结合图 3 mass 函数确定过程为: 根据式 (1) 和式 (2) 及三角形和半梯形相结合分布函数, 将计算出的状态等级 $l_1 \sim l_4$ 的隶属函数 $v_1 \sim v_4$ 依次作为 mass 函数 $m(l_1) \sim m(l_4)$ 。另外, 将 l_θ 的 mass 函数初值设置为 $m(l_\theta)=0$ 。

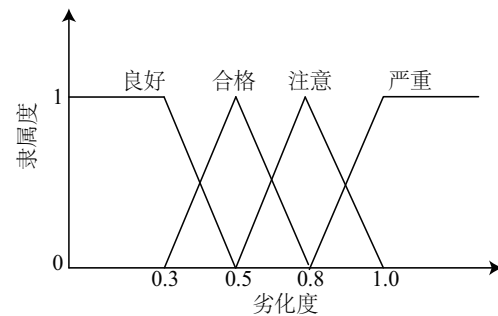


图3 隶属函数分布图

Fig. 3 Distribution of membership function

例如, 项目 R_i 中包含 n 个评估指标, 其 mass 函数 M_{R_i} 为:

$$M_{R_i} = \begin{bmatrix} m_{R_{i1}}(l_1) & m_{R_{i1}}(l_2) & m_{R_{i1}}(l_3) & m_{R_{i1}}(l_4) & m_{R_{i1}}(l_\theta) \\ m_{R_{i2}}(l_1) & m_{R_{i2}}(l_2) & m_{R_{i2}}(l_3) & m_{R_{i2}}(l_4) & m_{R_{i2}}(l_\theta) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{R_{in}}(l_1) & m_{R_{in}}(l_2) & m_{R_{in}}(l_3) & m_{R_{in}}(l_4) & m_{R_{in}}(l_\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 证据源修正与两级证据推理评估

在实际中, 当项目中包含多个评估指标时, 证据信息的不一致性凸显, 难免会出现证据间信息高冲突问题, 直接将评估指标信息进行融合, 会出现评估结果与实际不符。为了获得合理的状态评估结果, 结合图 1, 采用证据源修正的思想, 从证据源中提取出相对劣化程度严重的状态信息, 并重组为修正证据源, 引入优先度和相容系数概念, 并通过一级和二级证据推理评估获取整机的健康状态评估结果。

1) 一级证据推理评估。针对各项目单元, 引入优先度^[10]概念, 状态 $l_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的优先度越大, 则反映证据信息中状态 l_i 能力越强。优先度计算式为:

$$P_{R_i} = M_{R_i} \times p(L) = [P_{R_{i1}} \ P_{R_{i2}} \ \cdots \ P_{R_{in}}]^T \quad (7)$$

式中, $p(L)=[p(l_1), p(l_2), p(l_3), p(l_4)]$ 为识别框架的量子度。选取 $p(L)=[0, 0.2, 0.5, 0.9]^T$ 为各状态的量子度, 并以各评估指标优先度为依据, 若评估指标满足条件为:

$$P_{R_{ij}} \geq \delta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{R_{ij}} \quad (8)$$

则将满足式(8)评估指标 mass 函数提取并重组为优先证据源 M_{R_i}' , 并将证据源中相对劣化程度严重的证据信息组成为优先证据源。其中, δ 为优先度总和的平均值, 以 δ 为依据, 剔除与相对劣化严重证据信息外的部分证据信息, 既可保留出现单个或几个评估指标的劣化信息不被多数的相对良好的信息所淹没, 又可均衡兼顾各证据状态原始信息。

对于状态 $l_i (i=1, 2, 3, 4)$, 引入相容系数^[13]来确定每个证据 R_{ij} 关于状态 l_i 的支持度, 对优先证据源 M_{R_i}' 进行修正, 以进一步解决 M_{R_i}' 中各证据体间的信息高冲突问题。相容系数公式计算的状态 l_i 的支持度为:

$$\omega_{R_{ij}}(l_i) = \frac{2m_{R_{ij}}'(l_i) \times \bar{m}_{R_i}'(l_i)}{m_{R_{ij}}'(l_i)^2 + \bar{m}_{R_i}'(l_i)^2} \quad (9)$$

式中, $\bar{m}_{R_i}'(l_i)$ —— $M_{R_i}'(l_i)$ 的平均值。在理想情况下, 所有证据高度统一, 每个证据都与 $\bar{m}_{R_i}'(l_i)$ 相等, 支持度都为 1, 故可用支持度对 mass 函数进行重新分配:

$$m_{R_{ij}}''(l_i) = \omega_{R_{ij}}(l_i) \times m_{R_{ij}}'(l_i) \quad (10)$$

当证据间存在高冲突时, 证据个体相应的权值可能小于 1。故由式(10)可知, 修正后的证据所提供的确定性信息将减少, 而对框架外的子集 l_0 相对应的

mass 函数 $m_{R_{ij}}''(l_0)$ 将增加, 计算式为:

$$m_{R_{ij}}''(l_0) = 1 - \sum_{i=1}^4 m_{R_{ij}}''(l_i) \quad (11)$$

进而得到 R_{ij} 的修正的 mass 函数为:

$$m_{R_{ij}}'' = [m_{R_{ij}}''(l_1) \ m_{R_{ij}}''(l_2) \ m_{R_{ij}}''(l_3) \ m_{R_{ij}}''(l_4) \ m_{R_{ij}}''(l_0)] \quad (12)$$

同理, 也可得到其他评估指标的修正 mass 函

数, 进而得到修正证据源 M_{R_i}'' , 最后利用式(5)的 Yager 融合规则依次进行证据融合得到 mass 函数 m_{R_i}'' 。

为了证明上述方法在解决证据间信息冲突问题的有效性, 举例如下: 假设传动部件项目 R_1 中的 R_{11} 和 R_{12} 为“严重”状态, $R_{13} \sim R_{15}$ 为“注意”状态, R_{16} 为“合格”状态, R_{17} 和 R_{18} 处于“良好”状态。此时, 考虑评估指标 R_{11} 和 R_{12} 已处于严重状态, 理论上可认为传动部件 R_1 的健康状态为“严重”状态。假设传动部件 R_1 的 mass 函数证据源 M_{R_1} 为:

$$M_{R_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

明显看出, 在 M_{R_1} 中证据体 R_{11} 与 R_{18} 、 R_{11} 与 R_{17} 、 R_{12} 与 R_{18} 等相对应的状态信息存在高冲突问题。

当直接采用 Yager 融合规则, 依据式(5)对证据源

M_{R_1} 进行证据融合推理评估, 得到 R_1 的 mass 函数为 $m_{R_1}=[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 根据最大信任规则, 可知 $\max(m_{R_1}(l_i))=m_{R_1}(l_1)=1$, 其相对应的状态为“良好”, 即传动部件 R_1 的评估结果为“良好”状态。

应用本节所提出的方法, 计算过程如下: 首先采用式(8), 得到项目 R_1 中各证据的证据体的优先度为:

$P_{R_1}=[0.9 \ 0.86 \ 0.66 \ 0.44 \ 0.41 \ 0.16 \ 0.02 \ 0]^T$, 其次, 依据式(9), 提取 $R_{11} \sim R_{14}$ 重组的优先证据源 M_{R_1}' 为:

$$M_{R_1}' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

可看出, 在 M_{R_1}' 中既保留了劣化严重的信息, 又保留了相对良好的信息, 信息均衡兼顾较为合理。再次, 先后采用式(10)和式(11)计算得到 M_{R_1}' 中的各证据体的修正 mass 函数, 进而得到修正证据源 M_{R_1}'' 为:

$$M_{R_i}'' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.8643 & 0.1357 \\ 0 & 0 & 0.0498 & 0.8167 & 0.1336 \\ 0 & 0 & 0.5393 & 0.3750 & 0.0856 \\ 0 & 0.0941 & 0.6149 & 0 & 0.2910 \end{bmatrix}$$

最后,采用式(5)的 Yager 融合规则依次对 M_{R_i}'' 进行证据融合得到项目 R_i 的修正的 mass 函数 M_{R_i}'' 为:

$$M_{R_i}'' = [0 \quad 0.0010 \quad 0.0966 \quad 0.8991 \quad 0.0032]$$

根据最大信任规则, $\max(m_{R_i}''(l_i)) = m_{R_i}''(l_4) = 0.8991$, 相对应状态为“严重”, 即传动部件 R_i 为“严重”状态。

从 m_{R_i} 和 m_{R_i}'' 对比可知, 直接采用 Yager 融合规则, 无法处理证据间信息的高冲突问题, 最终的融合结果与假设情况不相符; 而采用文中提出的证据源修正方法, 单个或几个评估指标的劣化信息不至于被多数的相对良好的信息所淹没, 并可均衡兼顾证据状态原始信息, 可得到与假设情况近乎相符的评估结果。

2) 二级证据推理评估。与一级证据推理过程相似, 在采用式(5), 求得整机 R 的 mass 函数 m_R'' 后, 根据最大信任规则, 得到的 $\max(m_R''(l_i))$ 中最大数值相对应的状态, 即为机组整机的健康状态评估结果。

2.4 风电机组健康状态评估流程

所提出的基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估流程, 如图 4 所示, 包括评估指标量化、证据推理和评估结果 3 部分。首先, 关于评估指标量化部分, 以温度和振动类评估指标的运行数据作为输入, 以风力机转速运行数据确定区间阈值参数

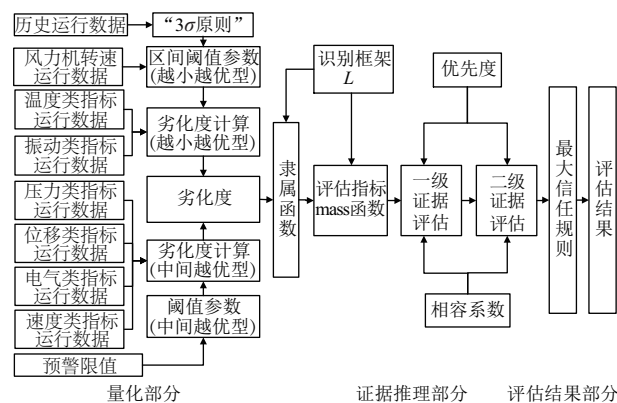


图 4 健康状态评估流程

Fig. 4 Flowchart of health conditions assessment

的依据, 通过式(1)计算得到劣化度; 另外, 其他 4 类评估指标分别采用式(2)计算出相应的劣化度; 其次, 关于证据评估部分, 将劣化度作为输入, 通过识别框架和建立隶属函数来确定出各评估指标的 mass 函数, 进而通过一级和二级证据推理评估过程, 获得整机的 mass 函数; 最后, 采用最大信任规则, 最终确定出风电机组的健康状态评估结果。

3 实例分析

3.1 实例说明

为了验证所提出的评估模型和流程的有效性, 以 2012 年 1~8 月份的某 1.5 MW 双馈风电机组 8 组监测数据为例进行评估计算, 如表 3 所示。通过 2 个实例进行评估计算, 并与传统证据评估方法对比分析。在实例 1 中, 以机组健康状态为“严重”时刻的监测数据为例来分析本文评估方法的计算过程及其有效性; 在实例 2 中, 分别采用本文的评估方法和传统证据评估方法, 对机组的 8 个时刻的状态进行评估, 并对这两种方法的评估结果与实际运行情况对比分析。

3.2 实例一

为了详述本文评估方法的计算过程, 以表 3 中的第 1 组的 2012 年 6 月 17 日 15 时 27 分的监测数据为例, 阐述所提评估流程, 具体计算过程如下:

1) 评估指标的劣化度量化。根据 1.2 节的评估指标量化方法, 在确定了各评估指标的阈值后, 依据式(1)和式(2), 计算确定的各项目指标的劣化度为:

$$g_{R_1} = [0.84 \quad 1 \quad 0.55 \quad 0.63 \quad 0.57 \quad 0.78 \quad 1 \quad 0]$$

$$g_{R_2} = [0.45 \quad 0.43 \quad 0.43 \quad 0.43 \quad 0.43 \quad 0.56 \quad 0.80 \quad 0.51 \quad 0.01]$$

$$g_{R_3} = [0 \quad 0.47 \quad 0 \quad 0] \quad , \quad g_{R_4} = [0.05 \quad 0 \quad 0.52 \quad 0.44]$$

$$g_{R_5} = [0.90 \quad 0.82 \quad 0 \quad 0]$$

$$g_{R_6} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.02 \quad 0.10]$$

2) 一级证据推理。按照第 2.2 节的隶属函数确定方法, 根据表 3 中第 1 组监测数据, 分别计算得到各评估指标各状态的隶属度, 即得到如式(6)各项目证据源。6 个项目的证据源分别为:

表3 某1.5 MW风电机组监测数据
Table 3 Monitoring data of a 1.5 MW WTGS

评估指标	风电机组SCADA监测数据							
	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组	第7组	第8组
	06-17	02-19	08-04	01-23	02-19	02-07	04-26	04-01
	15:27	16:33	0:01	23:01	0:15	16:10	20:00	09:59
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10.4	6.8	11.2	5.7	9.8	11.2	9.2	6.0
转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	16.4	12.7	17.3	11.8	17.0	17.3	16.6	13.5
$R_{11}/^{\circ}\text{C}$	51.9	30.4	42.1	6.1	30.6	28.1	40.7	24.4
$R_{12}/^{\circ}\text{C}$	62.8	33.8	42.7	12.0	35.3	38.6	42.6	34.1
$R_{13}/^{\circ}\text{C}$	73.1	65.3	68.2	36.8	63.3	65.0	76.6	61.4
$R_{14}/^{\circ}\text{C}$	77.9	63.1	65.4	44.4	72.7	69.3	79.0	61.5
$R_{15}/^{\circ}\text{C}$	58.7	39.3	40.6	24.3	32.1	44.4	56.2	40.5
$R_{16}/^{\circ}\text{C}$	69.1	51.1	66.2	30.5	51.1	59.6	71.5	50.4
R_{17}/kPa	-400	-398	-400	-400	-398	-398	-400	-140
R_{18}/kPa	79	6	104	155	-379	104	84	-140
$R_{21}/^{\circ}\text{C}$	95.3	34.9	101.6	25.5	54.5	59.8	69.9	41.3
$R_{22}/^{\circ}\text{C}$	96.1	35.0	102.6	25.4	54.1	59.9	70.5	42.3
$R_{23}/^{\circ}\text{C}$	93.9	34.4	101.8	25.1	54.8	58.8	69.5	42.0
$R_{24}/^{\circ}\text{C}$	93.2	34.2	102.3	25.4	52.9	59.5	70.3	40.6
$R_{25}/^{\circ}\text{C}$	93.3	33.7	100.9	25.6	53.3	58.8	70.0	40.7
$R_{26}/^{\circ}\text{C}$	94.2	33.2	107.0	25.1	52.4	59.8	69.7	40.5
$R_{27}/^{\circ}\text{C}$	62.2	40.4	59.5	19.0	17.0	27.2	47.9	25.4
$R_{28}/^{\circ}\text{C}$	81.9	15.6	70.2	20.7	35.9	38.4	53.5	38.5
$R_{29}/^{\circ}\text{C}$	50.8	19.6	85.3	21.3	13.1	49.3	61.8	26.6
R_{31}/g	0.0020	-0.0088	0.0034	-0.0131	-0.0068	-0.0200	0.0112	-0.0151
R_{32}/g	-0.0005	-0.0068	-0.0024	-0.0161	-0.0229	-0.0180	-0.0019	-0.0088
$R_{33}/^{\circ}\text{C}$	43.3	11.6	27.1	2.1	5.0	8.8	25.1	14.6
$R_{34}/(^{\circ})$	367.0	182.4	318.5	697.7	383.5	227.7	-48.7	358.8
$R_{41}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-2.4×10^{-7}	9.8×10^{-45}	7.8×10^{-14}	9.8×10^{-45}	-6.2×10^{-4}	9.8×10^{-45}	-2.5×10^{-20}	-9.8×10^{-45}
R_{42}/kPa	14320	14472	14655	14167	14442	14258	14506	14625
R_{43}/kPa	16639	15205	15052	14869	14991	15571	14838	15082
$R_{44}/(^{\circ})$	0.00	0.02	0.00	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
$R_{51}/^{\circ}\text{C}$	50.1	61.6	36.5	2.2	11.9	13.8	35.8	23.5
$R_{52}/^{\circ}\text{C}$	45.8	14.6	34.1	6.1	8.3	13.6	30.5	15.0
R_{53}/kW	1056.0	415.7	1507.3	210.2	1274.4	1539.1	1128.3	369.7
R_{54}/kvar	-2.8	-2.8	1.0	1.0	1.0	-2.8	-2.8	-2.8
R_{61}/V	396.0	395.7	393.4	391.8	408.1	395.4	399.6	394.5
R_{62}/V	395.7	392.4	392.1	389.1	404.1	396.2	397.8	394.2
R_{63}/V	394.8	396.9	394.8	391.5	407.4	396.0	399.9	395.1
R_{64}/Hz	50.00	50.00	50.01	50.00	50.00	50.07	50.00	49.97
R_{65}/kW	1058.4	410.4	1471.8	197.4	1257.6	1569.6	1143.2	348.3
R_{66}/kvar	-151.7	-102.1	-209.6	-22.7	0.0	-74.2	-162.9	-33.2
R_{67}/V	1.2	4.5	2.7	2.7	3.9	0.6	2.1	0.9
R_{68}/A	10.2	24.6	6.7	4.2	4.7	11.9	24.7	10.6

$$\begin{aligned}
 M_{R_1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.2417 & 0.7583 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8417 & 0.1583 & 0 \\ 0 & 0.1300 & 0.8700 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0900 & 0.9100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_{R_2} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.7880 & 0.2120 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7560 & 0.2440 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8440 & 0.1560 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8720 & 0.1280 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8680 & 0.1320 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8320 & 0.1680 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1867 & 0.8133 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0077 & 0.9923 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4333 & 0.5667 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_{R_3} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6063 & 0.3937 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_{R_4} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4075 & 0.5925 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_{R_5} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_{R_6} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

观察可知,各证据源 $M_{R_1} \sim M_{R_6}$ 中的证据间存在不同程度的证据信息高冲突问题,其中, M_{R_5} 中的信息冲突最为凸显。对于 M_{R_1} ,通过式(7)得到优先度为:

$$\begin{aligned}
 P_{R_1} &= M_{R_1} \times p(L) \\
 &= [0.90 \ 0.90 \ 0.43 \ 0.56 \ 0.46 \ 0.86 \ 0.90 \ 0]^T
 \end{aligned}$$

依据式(8)提取 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{16} 和 R_{17} 的 mass 函数重组成的优先证据源 M_{R_1}' 为:

$$M_{R_1}' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0900 & 0.9100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

再采用式(9)求出修正证据源 M_{R_1}'' 为:

$$M_{R_1}'' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.9997 & 0.0003 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9997 & 0.0003 \\ 0 & 0 & 0.0424 & 0.9076 & 0.0500 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9997 & 0.0003 \end{bmatrix}$$

最后根据式(5)确定项目 R_1 的 mass 函数 m_{R_1}'' 为: $m_{R_1}'' = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$ 。同理,可得到其他项目的 $m_{R_2}'' \sim m_{R_6}''$, 最终确定的目标层 R 的证据源 m_R 为:

$$\begin{aligned}
 m_R &= [m_{R_1}'' \ m_{R_2}'' \ m_{R_3}'' \ m_{R_4}'' \ m_{R_5}'' \ m_{R_6}'']^T \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.1785 & 0.7762 & 0.0270 & 0.0183 \\ 0 & 0.6062 & 0.3937 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4075 & 0.5925 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3) 二级证据推理。以证据源 m_R 为基础,同理上述一级证据推理,通过二级证据推理确定的 m_R'' 为 $m_R'' = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$,按照最大信任规则可知 $\max(m_R''(l_i)) = \max(m_R''(l_4)) = 1$,整机的评估结果为“严重”状态。从表 3 中的监测数据来看,第 1 组中各项评估指标存在不同程度的劣化,其中, $x_{R_{12}} = 62.8^\circ\text{C}$ 、 $x_{R_{16}} = 69.1^\circ\text{C}$ 、 $x_{R_{28}} = 81.9^\circ\text{C}$ 、 $x_{R_{51}} = 50.1^\circ\text{C}$ 和 $x_{R_{52}} = 45.8^\circ\text{C}$ 对应的劣化度分别为 1、1、0.8、0.9 和 0.82。

该机组实际的运行情况是因靠齿轮箱侧主轴承润滑不足,造成其温度持续上升,最终在运行 532 min 后发生靠齿轮箱侧主轴承超温故障,机组被迫停机。综上可知,评估结果“严重”与实际整机健康状态情况相符。

3.3 实例二

本实例以表 3 中的数据,对所提出的评估方法(方法 1)和传统证据评估方法(方法 2)进行对比分析。

1) 在评估指标的量化方面,以齿轮箱前轴承温度 R_{13} 指标的劣化情况为例计算说明。对于表 3 中的 8 组 R_{13} 的监测数据,仅从各数据大小对比或与其预警阈值 100°C 相比,是较难看出第 2 组数据中的齿轮箱前轴承已发生明显劣化,但结合第 2 组数据的转速值和 1.2 节中第二类评估指标阈值范围确定的实例可知,此时转速为 12.68 r/min 对应的阈值区间为 D_3 区间,即阈值范围为 $[56.14^\circ\text{C}, 65.92^\circ\text{C}]$,根据式(1)计算可得到齿轮箱前轴承的劣化度 $g_{R_{13}} = 0.94$,可见其已严重劣化,并与检修时发现的齿轮箱前轴承内圈严重磨损情况相符,由此可知所提评估指标量化方法是有效的。

2)在评估方法对比方面,分别采用方法1和方法2对表3中8组数据进行评估计算,结果见表4,对比分析如下:第1~5组的监测数据实际对应的机组“严重”运行状态,主要原因分别为靠齿轮箱侧主轴承超温、齿轮箱前轴承劣化度较高及塔基控制柜温度超限、发电机转子C相绕组及发电机前轴承温度过大接近超限、无条件解缆接近触发阈值、定子C相电压幅值接近触发阈值。采用方法1对第1~5组数据计算结果为“严重”,与实际对应的状态一致,可在单个或几个评估指标的严重劣化信息时,不被多数相对良好的信息所淹没,即出现证据间信息高冲突现象时,得到与机组的实际健康状态相一致评估结果。另外,采用方法1对第6~8组的评估结果分别为“注意”、“注意”和“合格”状态,结合监测数据和机组实际运行状况,发现引起第6组对应的机组健康状态发生变化的因素是齿轮箱前、后轴承温度偏高,劣化度分别为 $g_{R_{13}}=0.42$ 、 $g_{R_{14}}=0.48$;

第7组为靠齿轮箱侧主轴承和靠叶片侧主轴承、发电机后轴承、塔基控制柜温度偏高,劣化度分别为 $g_{R_{11}}=0.61$ 、 $g_{R_{12}}=0.65$ 、 $g_{R_{28}}=0.69$ 、 $g_{R_{51}}=0.61$;第8组监测数据对应的各评估指标基本处在正常值运行范围,仅有齿轮箱油温评估指标的劣化度 $g_{R_{16}}=0.32$,可见采用本文所提出考虑证据源修正的评估方法,在考虑评估指标劣化信息不被淹没同时,还可均衡兼顾评估指标的各类状态信息,获得机组有效的健康状态评估结果。此外,与方法1的评估结果对比,采用方法2的评估结果均为“良好”,表明方法2不适合应用于多个评估指标的证据推理评估,尤其是单个或几个评估指标劣化度较大时,即出现证据间信息高冲突现象。在未对证据冲突进行修正的情况下,直接采用方法2进行证据推理评估,得到的评估结果与机组实际健康状态多不相符。

表4 某1.5 MW风电机组状态评估结果对比

Table 4 Comparison results of conditions assessment by using two methods for a 1.5 MW WTGS

数据组别	本文所提出评估方法(方法1)	评估结果	传统证据评估方法(方法2)	评估结果
	$[l_1, l_2, l_3, l_4, l_\theta]$		$[l_1, l_2, l_3, l_4]$	
第1组	[0,0,0,1,0]	严重	[1,0,0,0]	良好
第2组	[0,0,0,1,0]	严重	[1,0,0,0]	良好
第3组	[0,0.0001,0.2657,0.7105,0.0236]	严重	[1,0,0,0]	良好
第4组	[0,0,0,1,0]	严重	[1,0,0,0]	良好
第5组	[0,0.0024,0.0064,0.9853,0.0059]	严重	[1,0,0,0]	良好
第6组	[0,0.0172,0.9572,0.0151,0.0104]	注意	[1,0,0,0]	良好
第7组	[0,0.0105,0.4705,0.4042,0.1149]	注意	[1,0,0,0]	良好
第8组	[0.0005,0.9994,0,0,0.0001]	合格	[1,0,0,0]	良好

4 结 论

提出一种基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估方法。以1.5 MW风电机组监测数据为例,将所提出的评估方法与传统的证据评估方法进行对比。结果表明:

1)相对传统证据评估方法,通过对证据源进行修正,可均衡兼顾评估指标的各类状态信息,能解决多证据体间信息高冲突问题,通过所建的评估模型能获得有效的风电机组健康状态。

2)相比于现有风电机组健康状态评估方法,所

提出的评估方法无需考虑评估指标的权重赋值问题,能较好地评估出机组真实的健康状态。

上述研究主要针对现有风电机组传统控制方式下的运行数据,对于限电、调频等不同控制策略下的健康状态分析还有待进一步深入研究。

[参考文献]

- [1] Liu W Y, Tang B P, Han J G, et al. The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 466—472.

- [2] Tchakoua P, Wamkeue R, Ouhrouche M, et al. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends and future challenges[J]. *Energies*, 2014, 7(4): 2595—2630.
- [3] 王志国, 马一太, 杨 昭, 等. 风力发电机组性能分析的模糊综合评判方法[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(2): 177—181.
- [3] Wang Zhiguo, Ma Yitai, Yang Zhao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of wind power generation unit[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2004, 25(2): 177—181.
- [4] 李 辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组的运行状态评估方法[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(33): 103—109.
- [4] Li Hui, Hu Yaogang, Tang Xianhu, et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(33): 103—109.
- [5] 肖运启, 王昆朋, 贺贯举, 等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(13): 103—109.
- [5] Xiao Yunqi, Wang Kunpeng, He Guanju, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(13): 103—109.
- [6] Li Hui, Hu Yaogang, Yang Chao, et al. An improved fuzzy synthetic condition assessment of a wind turbine generator system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 45(1): 468—476.
- [7] 李 辉, 胡姚刚, 杨 超, 等. 并网风电机组运行状态的物元评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(6): 81—85.
- [7] Li Hui, Hu Yaogang, Yang Chao, et al. A matter-element assessment method of a grid-connected wind turbine driven generator system under on-line[J]. *Automation of Electrical Power System*, 2011, 35(6): 81—85.
- [8] Yu Song, Jian Meizhang. Condition assessment of wind turbine based on cloud model[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 448-453: 3327—3330.
- [9] 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, 22.
- [9] Li Li, Zhang Deng, Xie Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(24): 152—159, 22.
- [10] 董玉亮, 顾煜炯, 马履翱. 基于证据推理的汽轮机组状态评价方法[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(29): 74—79.
- [10] Dong Yuliang, Gu Yujiong, Ma Lü'ao. Condition evaluation on steam turbine units based on evidential reasoning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 29: 74—79.
- [11] 赵永宁, 叶 林, 朱倩雯. 风电场弃风异常数据簇的特征及处理方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(21): 39—46.
- [11] Zhao Yongning, Ye Lin, Zhu Qianwen. Characteristics and processing method of abnormal data clusters caused by wind curtailments in wind farms[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(21): 39—46.
- [12] 杨风暴, 王肖霞. DS证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [12] Yang Fengbao, Wang Xiaoxia. Combination method of conflictive evidences in D-S evidence theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [13] 朱友清, 周石琳, 邹焕新. 基于相容系数的冲突证据合成方法及评价准则[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 32(6): 70—75.
- [13] Zhu Youqing, Zhou Shilin, Zou Huanxin. Combination method of conflict evidences and evaluation rule based on compatibility ratio[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 32(6): 70—75.

EVALUATION OF HEALTH STATUS OF WIND TURBINE BASED ON MULTIPLE EVIDENCE METHOD

Hu Yaogang¹, Li Hui¹, Liu Haitao¹, Song Erbing¹, Ouyang Haili², Lan Yongsen²

(1. *State Key Laboratory of Equipment and System Safety of Power Transmission and Distribution & New Technology (Chongqing University)*, Chongqing 400044, China; 2. *CSIC (Chongqing) Haizhuang Wind Power Equipment Co., Ltd.*, Chongqing 401122, China)

Abstract: In view of the fact that the evaluation method based on deterministic weight is difficult to adapt to the large amount of wind turbine features and their mutual relations are not clear, a method to assess the health status of wind turbines based on multiple evidences was proposed. Firstly, considering the influence of the uncertainty of wind speed and wind direction on the fluctuation range change of vibration characteristic and temperature characteristic parameters of generator, the quantification method of degradation index based on dynamic threshold was presented. Secondly, according to the possible conflicts between the evidences, according to the distribution of the priority among the evidences and the revision of the evidence source, the assessment model of health status of wind turbines based on evidence reasoning was established. Finally, taking the assessment of the health status of certain wind turbine as an example, comparing with the traditional evidence evaluation methods, the validation of proposed evaluation method can obtain the effective health status of the wind turbines by balancing the status information of each evaluation index.

Keywords: wind turbine generator system; conditions assessment; indices quantification; evidences conflict; evidential reasoning