

融合集对分析和证据理论的风电机组运行状态评估

周 凖¹, 徐清鹏², 李 剑¹, 王慕宾¹, 相晨萌¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为及时准确地评估风电机组运行状态, 结合集对分析和证据理论各自的特点提出了一种风电机组运行状态评估的新方法。该方法根据风电场数据采集与监控系统的物理量, 构建机组运行状态评估的指标体系, 建立了一个 2 层评价模型。模型第 1 层采用集对分析处理指标不确定性的劣化度, 并生成模型第 2 层的基本概率分配。模型的第 2 层采用证据理论进行多证据融合, 得到机组运行状态的隶属度, 同时基于隶属度最大原则与信度准则共同评判风电机组运行状态等级。采用所提评估方法对某风电场 1.5 MW 并网风电机组进行状态评估, 并将评估结果与传统的模糊综合评估方法得到的结果进行比较, 结果表明所提评估方法的结果更准确, 在状态的趋势分析中也表现较好。

关键词: 风电机组; 状态评估; 集对分析; 证据理论; 联系度; 风电

中图分类号: TM 315

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.007

0 引言

风力发电作为一种无污染的可再生能源, 近年来得到了迅速的发展, 已经成为解决资源消耗和环境污染问题不可或缺的重要力量^[1-3]。然而, 风电机组通常处于极端温度、大量灰尘及振动、风沙、盐雾等恶劣环境条件下, 且设备维修与更换费用昂贵, 因此及时准确地对机组运行状态进行评估, 有利于风电场运维检修计划的合理安排, 对于机组避免严重故障、节约维护成本、提高发电可靠性具有重要的意义。

目前, 关于风电机组的研究主要集中在机组的单一部件和子系统的状态检测上, 如文献[4]通过分析机组轴承的振动信号, 采用神经网络和支持向量机相结合的方法评估机组轴承的运行状态, 具有较好的效果; 文献[5]针对机组齿轮箱采用子空间算法计算正常监测数据和实际监测数据的均方根误差, 实现对齿轮箱运行状态的评估; 文献[6]基于非线性建模对风力发电机变流器进行分析, 采用径向基函数实现匝间短路电流的故障识别和诊断。然而, 风电机组整机结构复杂, 是由风轮、发电机、齿轮箱、保护、变流器等诸多子系统构成, 仅以机组的某一部件或子系统的状态监测结果进行评估, 难以形成子系统数据融合以及对机组整体状态进行评估。

此外, 我国风力发电起步较晚, 风电机组试验数据较为缺乏且获取的状态信息存在不确定性, 为此, 一些研究学者基于风电场的监测数据并结合多种智

能信息处理技术应用于风电机组整机的状态评估, 如可拓理论^[7]、支持向量机法^[8]、模糊综合评估法^[9-11]等, 这些方法在实际应用中取得了一定的效果。但 these 方法在处理信息的不确定性及信息融合方面分析不足, 而风电机组状态评估的问题不仅涉及状态参量、信息缺失、模糊评判的不确定性, 还涉及子系统的信息融合问题, 因此单一的状态评估方法并不能全面地处理风电机组整机状态评估中涉及的不确定性及信息融合问题。

基于上述分析, 本文尝试将集对分析方法和证据理论有机地结合, 并应用到风电机组运行状态评估中。首先, 对风电场的检测和监测数据进行分类管理和筛选, 构建风电机组运行状态评估体系; 然后, 引入相对劣化度和变权系数计算各指标参量的劣化度和权值, 同时, 基于集对分析理论, 依次确定各指标参量与状态等级间的多元联系度; 进一步地, 引入可信度系数修正基本信度分配, 尽可能避免因证据冲突造成的评估结果误差。然后, 采用证据理论将各子系统的信息融合得到机组整体状态评估隶属度数值, 结合隶属度最大原则与信度准则判定评估结果。最后, 通过监测数据进行实例分析, 验证了该方法的准确性和有效性。

1 风电机组运行状态评估框架的构建

1.1 建立评估指标体系

风电场数据采集与监控(SCADA)系统的主要功能为定期采集并记录风电机组各部件或子系统的状态数据, 所提供的运行参数可以比较全面地反映机组运行工况, 且采样周期短可以及时更新数据反映机组实时运行状态。

收稿日期: 2016-07-09; 修回日期: 2017-05-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215205)

Project supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China(2012CB215205)

本文所选风电场 SCADA 系统包含的监测项目共有 80 多个,按照功能相近、属性相近、相互独立等原则将风电机组划分为齿轮箱、发电机、变流器、控制系统、机舱五大重要部件,以此作为评估体系的子项目层。然后,对应各子系统分别选取能反映其运行工况的主要指标参量,如:齿轮箱油温能较为全面地体现齿轮箱工作效率,且齿面胶合、齿面点蚀等故障均可通过油温体现,轴承温度则可以体现风速变载荷引起的振动和冲击对齿轮箱的影响,因此选取油温和轴承温度反映齿轮箱运行状态;发电机定子绕组绝缘损坏、转子平衡效果差、负荷异常等故障可由绕组温度体现,而轴承润滑脂过多或不足、轴承磨损等通过轴承温度得到显示,因此主要选取绕组和轴承温度表征发电机的运行状态,其他子系统依次选取,最终建立的风电机组运行状态评估模型如图 1 所示。

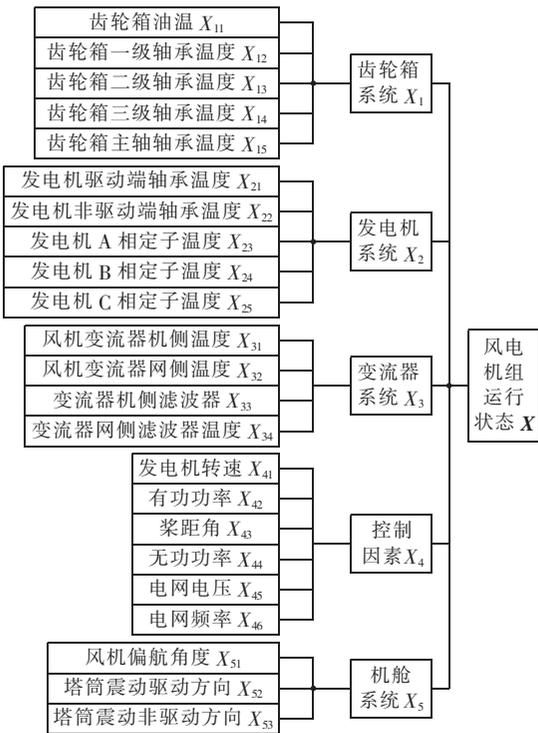


图 1 风电机组运行状态评估指标结构

Fig.1 Index system for operating state assessment of wind turbine generator unit

1.2 确定各指标的相对劣化度

风电机组整机结构复杂,指标参量繁多且量纲和数量级各不相同,为了有效地对比分析各指标参量,引入相对劣化度的分析方法^[12]对数据进行归一化处理。针对本文 1.5 MW 风电机组运行状态的指标参量,主要涉及以下 2 种劣化度的计算。

a. 对于齿轮箱、发电机、变流器温度等指标参数,其受风速和环境温度的影响较大,正常运行时温度指标在较宽的范围变化,这类参数需先拟合出其

正常运行的参数公式。以发电机轴承温度为例,首先结合 Bin 方法^[13]和文献^[14]的方法对原始数据进行预处理,获得发电机轴承的三维温度数据,如图 2 所示。其次,通过数据拟合,获得以风速与环境温度为自变量的拟合公式和拟合曲面,分别如式(1)和图 3 所示。

$$X_{21} = \begin{cases} \max(T, 25.97) & s < 3 \text{ 或 } 3 < s < 13.5 \text{ 且 } T < -10 \\ 10.399 + 12.7657s^{0.5} + 0.6542T & 3 \leq s \leq 13.5 \text{ 且 } -10 \leq T < 30 \\ \max(T, 76.93) & 3 < s < 13.5 \text{ 且 } T > 30 \text{ 或 } s > 13.5 \end{cases} \quad (1)$$

其中, X_{21} 为同时考虑风速和环境温度时发电机轴承温度的拟合值; s 为风速; T 为环境温度。

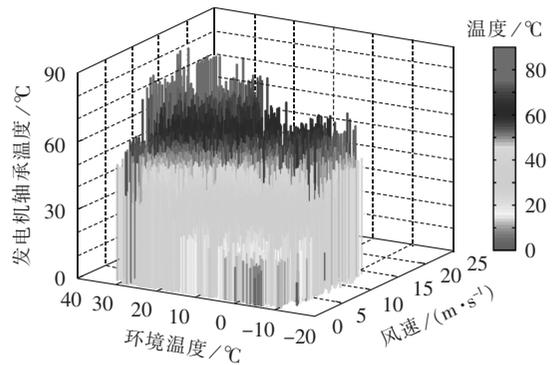


图 2 发电机轴承温度处理结果

Fig.2 Results of data processing for generator bearing temperature

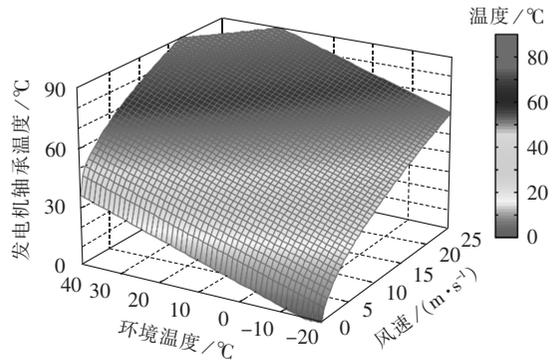


图 3 发电机轴承温度拟合曲面

Fig.3 Fitting surface of generator bearing temperature

对于此类状态参数,实际值与拟合值之差越小越好,采用式(2)计算劣化度:

$$g(\Delta x) = \begin{cases} 0 & \Delta x < \alpha \\ \frac{\Delta x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq \Delta x \leq \beta \\ 1 & \Delta x > \beta \end{cases} \quad (2)$$

其中, g 为状态参数的劣化度; Δx 为参数实际值与拟合值之差的绝对值; α 为参数处于正常状态时的实际值与拟合值的差值的允许值,如果 $\Delta x < \alpha$ 则说明参

数处于正常状态; β 、 α 分别为 Δx 的上、下限值,如果 $\Delta x > \beta$ 则说明参数处于恶劣状态。

b. 对于电压、电流、频率等阈值型参数,其劣化度的公式为:

$$g(x) = \begin{cases} 1 & x \leq \alpha_1 \\ \frac{\alpha_2 - x}{\alpha_2 - \alpha_1} & \alpha_1 < x < \alpha_2 \\ 0 & \alpha_2 \leq x \leq \alpha_4 \\ \frac{x - \alpha_4}{\alpha_3 - \alpha_4} & \alpha_4 < x < \alpha_3 \\ 1 & x \geq \alpha_3 \end{cases} \quad (3)$$

其中, α_1 、 α_3 分别为参数的上、下限值; α_2 、 α_4 分别为处于最佳运行状态时的上、下限值; x 为参数实际值。

1.3 运行状态等级划分

现有风电机组状态评估模型中,对于机组运行状态等级划分并没有统一的标准。因此,参照文献[15],本文将机组的运行状态划分为 4 个等级,即优良、良好、注意、严重,分别用 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 表示,记为集合 $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4\}$ 。则机组指标相对劣化度与状态等级的关系如表 1 所示。

表 1 相对劣化度与状态等级的关系
Table 1 Relationship between relative deterioration degree and state level

相对劣化度取值	状态描述
[0,0.2]	优良状态:状态参量处于正常阈值内,距离注意值有较大裕度;无明显劣化趋势。
(0.2,0.5]	良好状态:状态参量处于正常阈值内,介于最佳与注意值之间;存在不明显的劣化趋势。
(0.5,0.8]	注意状态:状态参量接近或略微超过注意值;有劣化趋势。
(0.8,1.0]	严重状态:状态参量达到或严重超过注意值;劣化趋势明显。

1.4 权值确定

同一评估系统中不同指标参量间的权值分配对该系统有较大影响。通常确定常权值有数据统计法和专家经验法 2 种方法。风电机组故障受环境影响较大,不同地区同一类型风电机组的故障率数据统计存在差异性,仅通过故障率数据统计确定常权值会带来较大的误差。专家经验法确定权值虽然易于实现,但是主观性强。因此,本文首先基于同类型风电机组故障统计数据得到各特征指标常权的基值,然后结合该风电场的检修记录,请专家进行调研并对基值进行修正。由此得到各级因素之间的权值分配如表 2 所示。

当风电机组某一状态量数值严重偏离正常值,即风电机组可能已经由于参数越限导致停机时,若仅依据常权系数来评估机组运行状态,由于该状态量权值所占比例小,机组的整体运行状态评估可能

表 2 各评价因素的权值
Table 2 Weights of assessment index

因子	权值	子项目	权值
X_1	0.2871	$\{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}\}$	$\omega_1 = [0.323, 0.169, 0.169, 0.169, 0.170]$
X_2	0.1948	$\{X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}\}$	$\omega_2 = [0.305, 0.305, 0.130, 0.130, 0.130]$
X_3	0.1246	$\{X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\}$	$\omega_3 = [0.322, 0.304, 0.213, 0.169]$
X_4	0.2847	$\{X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}, X_{46}\}$	$\omega_4 = [0.178, 0.185, 0.122, 0.127, 0.235, 0.153]$
X_5	0.1064	$\{X_{51}, X_{52}, X_{53}\}$	$\omega_5 = [0.521, 0.311, 0.168]$

还是正常水平。因此,依据常权系数并不能准确地反映风电机组真实的运行状态。

为体现风电机组运行状态指标参量偏离正常值的严重程度,本文利用文献[16]的方法处理变权,常权向量表示为:

$$\omega_k^{(0)} = [\omega_{k1}^{(0)}, \omega_{k2}^{(0)}, \dots, \omega_{kn_k}^{(0)}] \quad (4)$$

则各指标参数相应的变权值为:

$$\omega_{kl} = \frac{\omega_{kl}^{(0)}(1 - X_{kl})^{e-1}}{\sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl}^{(0)}(1 - X_{kl})^{e-1}} \quad (5)$$

相应地,变权向量表示为:

$$\omega_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn_k}] \quad (6)$$

其中, e 为变权系数,本文取 $e=0.2$ 。

经过上述变权系数处理后,若某一指标参量劣化程度明显高于其他指标参量时,可以依据式(4)自动调整其权重系数,劣化程度越严重其变权系数就越大,机组整体运行状态的评估结果越差,更加符合机组的实际运行情况。

2 评估模型

2.1 采用集对分析的指标层评估

集对分析理论是一种用于处理系统不确定性的定量分析方法,具有概念清晰、算法简单及评价结果直观等优点,现已初步应用于电网投资风险评估、电能质量评估、变压器可靠性评估等领域^[17-19]。文献[20]将其应用于风电场风速的预测中,处理风速预测过程中的不确定性,增强预测风速的稳健性取得了较好的效果。

a. 集对分析原理。

集对分析的本质是将确定性和不确定性同时包含于一个系统中,并对系统作“同一度、差异度、对立度”3 个方面的划分,从而全面刻画 2 个集合之间的相互联系。假设 2 个集合 A_1 和 A_2 组成集对 $H = (A_1, A_2)$,则可从该问题背景下的同异反三方面建立 2 个集合的联系度:

$$\mu_H = a + bi + cj \quad (7)$$

其中, i 为差异不确定系数,取值区间为 $[-1, 1]$; j 为

对立系数,规定取值为 -1 ; a, b, c 为联系分量,满足归一化条件,即 $a+b+c=1$ 。

为满足实际系统中多元层次的需求,可以对联系度作不同层次的扩展,通过对 b 的扩展得到 K 元联系度:

$$\mu_H = a + \sum_{i=1}^{K-2} b_i i + c_j \quad (8)$$

其中, i_i 为差异不确定系数的组分; b_i 为差异度的不同级,仍然满足归一化条件 $a+b_1+b_2+\dots+b_{K-2}+c=1$ 。

b. 集对分析算法。

假设指标体系共有 M 个特征量,指标参数 x_{kl} 构成集合 X_k , 状态等级为 K 级,指标参数各状态等级构成集合 $Z=\{z_1, z_2, \dots, z_K\}$ 。则 X_k 与 Z 构成集对 $H=\{X_k, Z\}$, 集对 H 的 K 元联系度 μ_{kl} 可表示为:

$$\mu_{kl} = a_{kl} + b_{kl,1} i_1 + b_{kl,2} i_2 + \dots + b_{kl,K-2} i_{K-2} + c_{kl} j \quad (9)$$

其中, a_{kl} 为指标 X_{kl} 与 $n(n=1, 2, \dots, K)$ 级状态等级的同一度; $b_{kl,K-2}$ 为指标 X_{kl} 与 n 级状态差异 $K-2$ 级的差异度; c_{kl} 为指标 X_{kl} 与 n 级状态等级差异 $K-1$ 级的对立度。

为表述方便,将 K 元联系度进行简化定义: a_{kl} 为指标 X_{kl} 隶属于 Z 第 1 级状态等级的程度; $b_{kl,1}$ 为指标 X_{kl} 隶属于 Z 第 2 级状态等级的程度; $b_{kl,2}$ 为指标 X_{kl} 隶属于 Z 第 3 级状态等级的程度; $b_{kl,K-2}$ 为指标 X_{kl} 隶属于 Z 第 $K-1$ 级状态等级的程度; c_{kl} 为指标 X_{kl} 隶属于 Z 第 K 级状态等级的程度。因此,集对 $H=(X_k, Z)$ 的 K 元联系度可以表示为:

$$\mu_k = \sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl} \mu_{kl} = \sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl} a_{kl} + \sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl} b_{kl,1} i_1 + \sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl} b_{kl,2} i_2 + \dots + \sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl} b_{kl,K-2} i_{K-2} + \sum_{l=1}^{N_k} \omega_{kl} c_{kl} j \quad (10)$$

其中, ω_{kl} 为指标 X_{kl} 的权重。

针对本文构建的风电机组运行状态指标体系,各指标参量 X_{kl} 的相对劣化度与 n 级状态等级构成集对,其 K 元联系度 μ_{kl} 可依模糊属性规则确定:

$$\mu_{kl} = \begin{cases} 1+0 \times i_1 + 0 \times i_2 + \dots + 0 \times i_{K-2} + 0 \times j & X_{kl} \leq r_1 \\ \frac{r_1+r_2-2X_{kl}}{r_2-r_1} + \frac{2X_{kl}-2r_1}{r_2-r_1} i_1 + & \\ 0 \times i_2 + \dots + 0 \times i_{K-2} + 0 \times j & r_1 < X_{kl} \leq \frac{r_1+r_2}{2} \\ 0 + \frac{r_2+r_3-2X_{kl}}{r_3-r_1} i_1 + \frac{2X_{kl}-r_1-r_2}{r_3-r_1} i_2 + \dots + & \\ 0 \times i_{K-2} + 0 \times j & \frac{r_1+r_2}{2} < X_{kl} \leq \frac{r_2+r_3}{2} \\ \vdots & \\ 0 + 0 \times i_1 + 0 \times i_2 + \dots + \frac{2r_{K-1}-2X_{kl}}{r_{K-1}-r_{K-2}} i_{K-2} + & \\ \frac{2X_{kl}-r_{K-2}-r_{K-1}}{r_{K-1}-r_{K-2}} j & \frac{r_{K-2}+r_{K-1}}{2} < X_{kl} \leq r_{K-1} \\ 0 + 0 \times i_1 + 0 \times i_2 + \dots + 0 \times i_{K-2} + 1 \times j & X_{kl} > r_{K-1} \end{cases} \quad (11)$$

其中, r_1, r_2, \dots, r_{K-1} 为各状态等级的阈值, $0 < r_1 < r_2 < \dots < r_{K-1} < 1$ 。

状态等级与区间阈值的关系如表 3 所示。 $K=4$ 时, μ_{kl} 的示意图如图 4 所示。

表 3 状态等级与区间阈值的关系
Table 3 Relationship between state level and threshold interval

状态等级	阈值区间	状态等级	阈值区间
z_1	$[0, r_1)$	z_{K-1}	$[r_{K-2}, r_{K-1})$
z_2	$[r_1, r_2)$	z_K	$[r_{K-1}, 1]$
\vdots	\vdots		

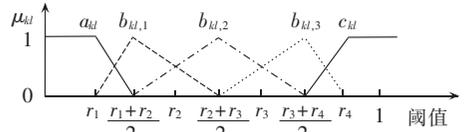


图 4 联系度 μ_{kl} 的示意图

Fig.4 Schematic diagram of correlation degree μ_{kl}

2.2 基于证据理论的信息融合及决策模型

D-S 证据理论是 Dempster 于 1967 年提出, 后由 Shafer 发展和完善而形成的一种不确定性推理和处理方法。通常多特征信息之间存在一定的冗余性和互补性, 依靠证据融合处理能够最终消除或降低这些不确定性, 达到目标识别的目的。

本文采用证据融合方法处理不同特征量的信息, 应用于机组状态评估决策层的信息融合, 缩小假设集, 提高决策能力。

(1) 确定辨识框架。

证据理论的论域称为辨识框架, 对于一个决策问题, 将所有可能的结果的集合用 Θ 表示, 则所关心的任一命题都对应于 Θ 的一个子集, 即 Θ 为辨识框架。本文的辨识框架为 4 种状态等级以及不确定度 θ , 即 $\Theta = \{z_1, z_2, z_3, z_4, \theta\}$ 。

(2) 基本信度分配(BPA)。

本文将风电机组各子系统运行状态信息作为独立证据, 结合集对分析得到的各指标参数与状态等级的联系度, 将联系度作为证据理论的基本信度分配。同时, 由于不同证据可信度不同, 引入可信度系数 λ_k 表征不同证据的可信程度, λ_k 值越大表明证据可信度越高。用可信度系数修订证据合成前的初始 BPA, 定义如下:

$$\begin{cases} m_k(Z) = \lambda_k \mu_k \\ m_k(\theta) = 1 - \lambda_k \end{cases} \quad (12)$$

其中, $m_k(\theta)$ 为开放框架后的不确定度; λ_k 由不同特征量之间的相对重要性 γ_k 来确定。

$$\gamma_k = \omega_k / \omega_{\max} \quad (13)$$

$$\lambda_k = \lambda \gamma_k \quad (14)$$

其中, λ 为优先可信度系数, 本文取 0.9; ω_{\max} 为权重

中的最大值。

(3) 证据融合。

为对多源证据进行综合处理,采用证据合成规则,计算出最终的基本概率分配和信度函数,计算方法如下:

$$m(\Psi) = \sum_{B \cap C = \Psi} \frac{m_1(B)m_2(C)}{1-P}, \quad m(\Phi) = 0 \quad (15)$$

$$P = \sum_{B \cap C = \Psi} m_1(B)m_2(C) \quad (16)$$

其中, $m_1(\Psi)$ 和 $m_2(\Psi)$ 分别为 2 个独立的证据提供对 Ψ 的基本概率分配; P 反映了证据的冲突程度, P 值越大,冲突程度越大; $m(\Psi)$ 即为融合后的 BPA 结果。

(4) 评估决策。

当采用 D-S 证据理论将基于多特征量的单信度值融合为一个综合信度值后,运用隶属度最大原则和信度准则综合评定机组的运行状态。具体的原则和方法如下。

a. 准确度原则: 所判定的状态等级信度函数值必须大于不确定信度函数值。

b. 隶属度最大原则: 所判定运行状态等级应具有最大的信度函数值,即 $\text{Bel}(F_c) = \max \{ \text{Bel}(F_j) \}$, 且所判定状态等级和其他等级信度函数值之差要大于某个阈值,即 $\text{Bel}(F_c) - \text{Bel}(F_j) > \eta (\eta = 0.15)$ 。

c. 信度可靠性原则: 所判定状态等级不确定信度函数值必须小于某个阈值,即 $m(\Theta) < \gamma$, 否则对应证据将会因可靠性过低而无法得出诊断结论,本文选取 $\gamma = 0.15$ 。

2.3 风机机组运行状态评估过程

图 5 所示为融合集对分析和证据理论的风电机组运行状态评估过程,具体步骤如下。

a. 从风电场 SCADA 系统状态监测数据中,选取表征运行状态的特征量及相应指标量,并按式(2)或式(3)计算相对劣化度。

b. 由统计数据结合本地风电场检修记录的方法确定常权,并按式(5)计算得到各评价因素的变权值。

c. 对风电机组运行状态进行等级划分,确定联系元数,并构建联系度表达式。

d. 应用集对分析方法按式(10)计算指标层与各状态等级间的联系度。

e. 按式(12)~(14)计算基本概率分配,再按式(15)、式(16)将多证据进行融合,得到风电机组整体状态的 BPA。

f. 按照最大隶属度原则和信度准则,对评估结果进行判定,若判断为正常状态则进一步对机组整体和子系统进行趋势分析;若判断为异常状态,则输出结果并采取相应的维修策略。

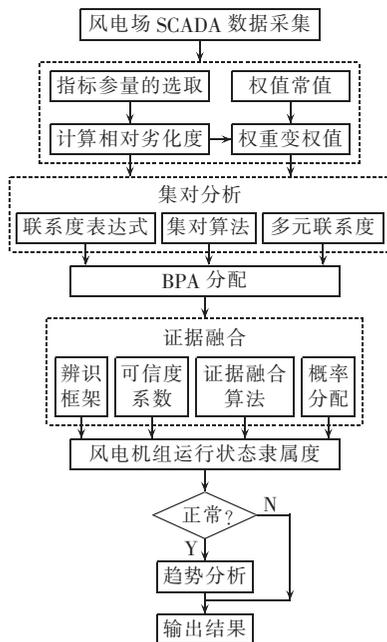


图 5 风电机组运行状态评估流程图

Fig.5 Flowchart of operating state assessment for wind turbine generator unit

3 实例与分析

为验证本文方法的准确性和有效性,以某 1.5 MW 风电机组的 SCADA 系统运行数据为例,分别选取状态等级为“优良”、“良好”和“严重”的运行数据进行计算并分析结果。

(1) 算例分析。

表 4 为风电场 SCADA 系统 3 个时刻的运行数据。表中,数据 1 对应的时刻为 2010 年 3 月 17 日 15:00,此时风速为 9.8 m/s、环境温度为 12.6 °C;数据 2 对应时刻为 2010 年 5 月 18 日 15:00,此时风速为 10.2 m/s、环境温度为 20.1 °C;数据 3 对应时刻为 2010 年 6 月 5 日 15:00,此时风速为 10.6 m/s、温度为 23.8 °C。选取的 3 组数据中,只有数据 3 齿轮箱温度有明显异常的情况,其余指标量基本正常。

按照图 5 提出的基于集对分析和证据理论的评估流程,分析表 4 中的数据 1。首先分析各评判指标的劣化度,通过直观的分析可知,各项参数均在正常运行范围内,依据式(2)和式(3)计算各特征参量的劣化度为:

$$g_1 = \{0.2545, 0.3219, 0.3814, 0.2530, 0.2582\}$$

$$g_2 = \{0.201, 0.3272, 0.3025, 0.2812, 0.31\}$$

$$g_3 = \{0.3804, 0.2741, 0.248, 0.1107\}$$

$$g_4 = \{0.021, 0.056, 0, 0, 0, 0\}$$

$$g_5 = \{0.091, 0.224, 0.2176\}$$

根据变权理论,将常权经过式(5)进行变权处理后,得到相应的权值为:

$$\omega_1 = [0.3103, 0.1751, 0.1885, 0.1621, 0.1640]$$

表 4 风电机组在线监测数据
Table 4 Online monitored data of wind turbine generator unit

状态参数	在线监测数据		
	数据 1	数据 2	数据 3
$X_{11}/^{\circ}\text{C}$	32.6	30.7	36.8
$X_{12}/^{\circ}\text{C}$	38.6	40.5	67.6
$X_{13}/^{\circ}\text{C}$	39.3	38.5	48.2
$X_{14}/^{\circ}\text{C}$	35.6	34.5	36.6
$X_{15}/^{\circ}\text{C}$	34.2	33.2	39.1
$X_{21}/^{\circ}\text{C}$	36.2	34.2	36.7
$X_{22}/^{\circ}\text{C}$	42.1	40.5	42.2
$X_{23}/^{\circ}\text{C}$	42.5	43.3	46.8
$X_{24}/^{\circ}\text{C}$	43.8	43.6	45.3
$X_{25}/^{\circ}\text{C}$	44.4	45.9	47.1
$X_{31}/^{\circ}\text{C}$	49.5	48.9	50.4
$X_{32}/^{\circ}\text{C}$	46.6	46.2	49.7
$X_{33}/^{\circ}\text{C}$	53.9	52.3	56.9
$X_{34}/^{\circ}\text{C}$	44.6	42.8	44.6
$X_{41}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1698	1708	1682
X_{42}/kW	1392	1470	1574
$X_{43}/(^{\circ})$	0	0	0
X_{44}/kvar	-44.1	-45.5	-45.9
X_{45}/V	653.1	652.8	653.1
X_{46}/Hz	50.01	49.99	50.01
$X_{51}/(^{\circ})$	-429	-430	-432
$X_{52}/(^{\circ})$	0.35	0.34	0.36
$X_{53}/(^{\circ})$	0.22	0.22	0.25

表 5 指标参量与状态等级关联度的计算值
Table 5 Calculated correlation degrees between index and state level

特征量	指标量	联系度			
		z_1	z_2	z_3	z_4
X_1	X_{11}	0.6367	0.3633	0	0
	X_{12}	0.1873	0.8127	0	0
	X_{13}	0	0.8953	0.1047	0
	X_{14}	0.6467	0.3533	0	0
	X_{15}	0.6120	0.3880	0	0
X_2	X_{21}	0.9933	0.0067	0	0
	X_{22}	0.1520	0.8480	0	0
	X_{23}	0.3167	0.6833	0	0
	X_{24}	0.4587	0.5413	0	0
	X_{25}	0.2667	0.7333	0	0
X_3	X_{31}	0	0.8987	0.1013	0
	X_{32}	0.5060	0.4940	0	0
	X_{33}	0.6800	0.3200	0	0
	X_{34}	1.0000	0	0	0
	X_{41}	1.0000	0	0	0
X_4	X_{42}	1.0000	0	0	0
	X_{43}	1.0000	0	0	0
	X_{44}	1.0000	0	0	0
	X_{45}	1.0000	0	0	0
	X_{46}	1.0000	0	0	0
X_5	X_{51}	1.0000	0	0	0
	X_{52}	0.8400	0.1600	0	0
	X_{53}	0.8827	0.1173	0	0

$\omega_2 = [0.2804, 0.3218, 0.1333, 0.1301, 0.1344]$

$\omega_3 = [0.3582, 0.2980, 0.2030, 0.1408]$

$\omega_4 = [0.1790, 0.1915, 0.1206, 0.1255, 0.2323, 0.1512]$

$\omega_5 = [0.4900, 0.3319, 0.1781]$

采用集对分析方法处理指标量的不确定性,按照式(7)、(8)计算得各指标量与状态等级间的联系度如表 5 所示,各子系统的初始信度分配如表 6 所示。

为避免因证据冲突造成评估结果误差,引入可信度系数修正 BPA。根据表 2 计算的常权值, ω_{\max} 为 0.2871,按式(13)得 $\gamma_1 - \gamma_5$ 构成的集合为 $\{1.0000, 0.6785, 0.4340, 0.9916, 0.3706\}$,由式(14)得 $\lambda_1 - \lambda_5$ 构成的集合为 $\{0.9000, 0.6106, 0.3906, 0.8924, 0.3335\}$, $m_1(\theta) - m_5(\theta)$ 构成的集合为 $\{0.1000, 0.3894, 0.6094, 0.1076, 0.6665\}$ 。最后,按式(12)计算基本概率分配结果如表 7 所示。

融合机组评估体系 5 个部分的 BPA 可得: $X = \{0.8734, 0.1161, 0.0041, 0\}$, 不确定度 $m(\theta) = 0.0064$ 。按本文基于最大隶属度原则和信度准则方法判断此风电机组整体运行状态属于 z_1 级,即优良状态。

从监测数据来看,齿轮箱、发电机、机舱、控制因素各项指标都在正常运行状态上,与本文评估结果相吻合。进一步由表 6、表 7 可以看出,虽然风电机组整体处于优良状态,但是齿轮箱系统与状态等级的

表 6 各特征量与状态等级的联系度

Table 6 Correlation degrees between characteristic index and state level

特征量	联系度			
	z_1	z_2	z_3	z_4
X_1	0.4356	0.5447	0.0197	0
X_2	0.4651	0.5349	0	0
X_3	0.4296	0.5341	0.0363	0
X_4	1.0000	0	0	0
X_5	0.9260	0.0740	0	0

表 7 基本概率分配计算结果

Table 7 Calculated basic possibility assignments

证据	$m_k(z_i)$				$m_k(\theta)$
	z_1	z_2	z_3	z_4	
X_1	0.3920	0.4902	0.0177	0	0.1000
X_2	0.2840	0.3266	0	0	0.3894
X_3	0.1678	0.2086	0.0142	0	0.6094
X_4	0.8924	0	0	0	0.1076
X_5	0.3088	0.0247	0	0	0.6665

联系度 $\mu_{11} = 0.4356$ 、 $\mu_{12} = 0.5477$ 、 $\mu_{13} = 0.0197$,说明该子系统有从良好状态转为注意状态的趋势,应该加强监测;此外,指标参量中齿轮箱油温、一级轴承温度、二级轴承温度、发电机非驱动端轴承温度均有劣化趋势,需要注意。

(2) 与其他方法的比较。

为进一步说明本文方法的有效性,表 8 给出了利用模糊综合评估与本文评估方法对 3 组数据的评估结果。由表 8 可见,对于数据 1 和数据 3,2 种方法

表 8 评估的对比结果
Table 8 Comparison of assessment results

数据	运行状态评估结果	
	模糊综合评估方法	本文方法
数据 1	[0.7145,0.2568,0.0235,0.0052],优秀	[0.8734,0.1161,0.0041,0],优秀不确定度为 0.0064
数据 2	[0.3367,0.3474,0.1824,0.1135],无法判别	[0.2614,0.6147,0.1203,0],良好不确定度为 0.0036
数据 3	[0,0,0,1],严重	[0,0,0,0.1],严重

对机组运行状态判定的结果基本一致,与实际情况相符合。

数据 2 中模糊综合评估方法得到最终隶属度为 [0.3367,0.3474,0.1824,0.1135],此时最大隶属度与次大隶属度两者间的差别并不大,状态等级间区分度小,无法进行判别,甚至易造成误判。而本文方法通过多次证据融合缩小假设集,其最终评判结果状态等级的区分度依然达到 0.3533。因此相比而言,集对分析结合证据理论的分析方法具有计算简单、直观、区分度高的优点,为风电机组运行状态评估提供了一种新的思路。

4 结论

a. 风电机组运行状态的评估是风电场运维检修的基础,本文将集对分析方法和证据理论应用到机组状态评估中。通过分析风电场运行数据的特点及机组各子系统重要的指标参量,利用层次分析法,建立了机组运行状态评估体系。引入集对分析方法构造联系度来处理评估指标的不确定性,同时应用证据理论融合机组子系统的基本概率分配,最后依据最大隶属度和信度准则共同判定机组的运行状态等级。

b. 算例表明,本文提出的评估方法可以用于评判分析风电机组运行状态,该评估方法简单直观、评定结果准确、区分度较高,一定程度上避免了在状态等级相差不大时导致的判断失效。

参考文献:

[1] 李丰,张粒子. 大规模风电跨省消纳与交易机制的研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):119-124.
LI Feng,ZHANG Lizi. Accommodation and transaction mechanism of transprovincial large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):119-124.

[2] 徐琴,楼俊尚. 风电并网现状及产业前景分析[J]. 华东电力,2012,40(12):2145-2147.
XU Qin,LOU Junshang. Analysis of current wind power integration and its industrial prospect[J]. East China Electric Power,2012,40(12):2145-2147.

[3] 谭忠富,鞠立伟. 中国风电发展综述:历史、现状、趋势及政策[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2013,82(2):1-7.
TAN Zhongfu,JU Liwei. Review of China's wind power development: history, current status, trends and policy [J]. Journal of

North China Electric Power University(Social Sciences),2013,82(2):1-7.

[4] 安学利,蒋东翔,陈杰,等. 基于 ITD 和 LS-SVM 的风力发电机组轴承故障诊断[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):10-13.
AN Xueli,JIANG Dongxiang,CHEN Jie,et al. Bearing fault diagnosis based on ITD and LS-SVM for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):10-13.

[5] 赵洪山,郭伟,邵玲,等. 基于子空间方法的风机齿轮箱故障预测算法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):27-32.
ZHAO Hongshan,GUO Wei,SHAO Ling,et al. Gearbox fault prediction algorithm based on subspace method for wind turbine [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):27-32.

[6] 李辉,季海婷,秦星,等. 考虑运行功率变化影响的风电变流器可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):1-8.
LI Hui,JI Haiting,QIN Xing,et al. Reliability evaluation considering operational active power variation of wind power converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):1-8.

[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.
LI Hui,HU Yaogang,YANG Chao,et al. A matter-element-assessment method of a grid-connected wind turbine driven generator system under online operating conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):81-85.

[8] 梁颖,方瑞明. 基于 SCADA 和支持向量回归的风电机组状态在线评估方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):7-12,31.
LIANG Ying,FANG Ruiming. An online wind turbine condition assessment method based on SCADA and support vector regression [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(14):7-12,31.

[9] 李辉,胡姚刚,唐显虎,等. 并网风电机组在线运行状态评价方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(33):103-109.
LI Hui,HU Yaogang,TANG Xianhu,et al. Method for online operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(33):103-109.

[10] 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):2132-2139.
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):2132-2139.

[11] 黄必清,何焱,王婷艳. 基于模糊综合评价的海上直驱风电机组运行状态评估[J]. 清华大学学报(自然科学版),2015,55(5):543-549.
HUANG Biqing,HE Yan,WANG Tingyan. Fuzzy synthetic evaluation of the operational status of offshore direct-drive wind turbines[J]. Journal of Tsinghua University(Science & Technology Edition),2015,55(5):543-549.

[12] 廖瑞金,孟繁津,周年荣,等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术,2014,40(2):474-481.
LIAO Ruijin,MENG Fanjin,ZHOU Nianrong,et al. Assessment strategy for inner insulation condition of power transformer based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-

- making[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2):474-481.
- [13] SCHLECHTINGEN M, SANTOS I F, ACHICHE S. Wind turbine condition monitoring based on SCADA data using normal behavior models. part 1: system description[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(1):259-270.
- [14] YANG W, COURT R, JIANG J. Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis[J]. Renewable Energy, 2013, 53(9):365-376.
- [15] 刘有为, 李光范, 高克利, 等. 制订《电气设备状态维修导则》的原则框架[J]. 电网技术, 2003, 27(6):64-68.
LIU Youwei, LI Guangfan, GAO Keli, et al. Fundamental frame to draft guide for condition maintenance of electric power equipment[J]. Power System Technology, 2003, 27(6):64-68.
- [16] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3):70-75.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3):70-75.
- [17] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 基于模糊集对分析法的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(7):81-85.
LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy set pair analysis [J]. Power System Technology, 2012, 36(7):81-85.
- [18] 王绵斌, 谭忠富, 张丽英, 等. 市场环境下电网投资风险评估的集对分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19):91-99.
WANG Mianbin, TAN Zhongfu, ZHANG Liying, et al. Power grid investment risk evaluation model based on set-pair analysis theory in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19):91-99.
- [19] 金华征, 程浩忠, 曾德君, 等. 基于集对分析的柔性电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3):7-12.
JIN Huazheng, CHENG Haozhong, ZENG Dejun, et al. A novel method of flexible transmission network planning based on set pair analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):7-12.
- [20] 郭钰锋, 孙颀, 于继来, 等. 集对分析理论在风电场风速区间预测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2):6-11.
GUO Yufeng, SUN Di, YU Jilai, et al. Application of set pair analysis in wind speed interval prediction for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2):6-11.

作者简介:



周 涑

周 涑(1973—),男,重庆人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、电力系统风险评估、新能源电力设备(**E-mail**:zhouquan@cqu.edu.cn);
徐清鹏(1988—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、新能源电力设备(**E-mail**:617058868@qq.com)。

Operating state assessment based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making for wind turbine generator unit

ZHOU Quan¹, XU Qingpeng², LI Jian¹, WANG Mubin¹, XIANG Chenmeng¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: A method of operating state assessment based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making is proposed to timely and accurately evaluate the operating state of wind turbine generator unit, which establishes an index system according to the physical variables of wind farm SCADA system and builds a two-layer assessment model. In the first layer, the set-pair analysis is adopted to deal with the deterioration degree of index uncertainty for generating the basic probability assignments for the second layer. In the second layer, the evidential reasoning decision-making is adopted to aggregate all the evidences for calculating the membership degree of unit operating state. Based on the maximum membership degree principle and the confidence criteria, the operating state of wind turbine generator unit is evaluated. The operating state of a 1.5 MW grid-connected unit is assessed by the proposed method and the results are compared with those by the traditional fuzzy comprehensive evaluation method, which shows that the proposed method has higher precise and better performance in the trend analysis of unit operating state.

Key words: wind turbine generator system; state assessment; set-pair analysis; evidential reasoning decision-making; correlation; wind power