

DOI: 10.7667/PSPC162082

基于风电机组常见故障的模糊 FMECA 评价研究

王宇晨, 成斌

(石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 针对风力发电厂运行可靠性问题, 提出风电机组模糊故障模式、影响与危害性分析(Failure Modes, Effect and Criticality Analysis, FMECA)评价模型。基于金风天翼风电场全年运行数据的统计分析, 对风电机组故障评价引进模糊评价理论进行改进。通过建立 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)故障表, 绘制危害性矩阵图并建立因素集、评价集和权重集, 进行模糊评价分析。根据评价结果, 对各故障的危害度进行重新排序整理。该研究对进一步提高风电现场运维效率、降低运维成本具有重要的意义。

关键词: 风电机组; 故障; FMECA 分析; 模糊评价

Fuzzy FMECA based on common faults of wind turbine generator

WANG Yuchen, CHENG Bin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: Aiming at the reliability of wind power plant, a fuzzy Failure Modes, Effect and Criticality Analysis (FMECA) evaluation model for wind turbine is proposed. Based on the statistics of annual operating data of Gold Wind Factory, the fuzzy evaluation theory is introduced to improve the fault evaluation of wind turbine. Through the establishment of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) fault table, this paper draws the hazard matrix and establishes the factor set, evaluation set and weight set to carry out fuzzy evaluation analysis. According to the evaluation results, the damage degree of each fault is rearranged. This study means great significance to further improve the efficiency of wind farm operation and maintenance and reduce maintenance costs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51665052).

Key words: wind turbine generator; fault; FMECA analysis; fuzzy evaluation

0 引言

风能被我国作为针对能源结构、环境保护、经济与社会可持续发展问题的重要举措近年来发展十分迅速^[1-2], 同时作为可再生能源比地球上可开发利用的水能总量大十倍, 大约 1300 亿 kW。据《全球风电统计数据 2015》^[3], 截至 2015 年底, 全球风电累计装机容量达 4.32 亿 kW, 风力发电容量首次超过核能。双馈变速风电机组是目前主流机组^[4], 但风力发电机组运行故障已经严重制约风电企业的效益, 运行时间越长, 机组故障概率越高, 严重影响发电量, 造成经济损失^[5], 使得电力系统的安全稳定运行工作面临着巨大的挑战, 其所表现出来的征兆在很多情况下具有模糊性^[6-7], 一种有效评估风电机组故障危害性的分析方法是解决此类问题的重要途径。

故障模式、影响与危害性分析(Failure Modes, Effect and Criticality Analysis, FMECA)是一种用于找出系统薄弱环节、为系统运行提出预防措施和改进意见, 进而为提高系统可靠性提供依据的单因素分析法^[8-11]。由于传统 FMECA 方法得不到较确切的定量分析结果^[12], 因此在运用风电系统时存在风电系统有故障点隐蔽、因果关系复杂和故障种类繁多等特点, 此外由于个体主观意见的差异, 对故障发生的概率大小、种类和危害度等特点很难准确描述, 因此可以结合模糊理论与 FMECA 方法改善此类不足。

目前, 国内外许多学者将模糊理论与 FMECA 分析方法相结合对系统可靠性进行研究。夏军等人^[8]结合模糊理论及 FMECA 分析法对电液伺服阀故障进行研究; 戴城国等人^[13]利用模糊 FMECA 分析法对液压系统可靠性进行分析。本文针对 FMECA 在风电系统可靠性分析中存在的不足, 运用模糊综合评判方法进行改进, 将其结果与传统 FMECA 分析法结果进行对比分析。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51665052): 新疆风电装备叶片覆冰及其疲劳损伤建模研究

1 风电机组故障分析

明确风机故障对系统运行的影响，首先要明确风机系统各个部件的具体功能，不同故障会对系统正常运行产生不同影响。因为发电系统对安全性和时间性要求很高，可将故障等级分为如表 1 所示四个等级。

现将金风天翼风电场 2.5 MW(该电厂投产于 2012 年,其中 3.0 MW 风力发电试验机 6 台,2.5 MW 风力发电机 17 台,除去故障情况,风力发电机均可正常运行)风电机组的电控部分及机械部分划分为四个系统: 主控系统、水冷系统、变桨系统和机械系

统。其常见故障的 FMEA 表^[14-15]如表 2—表 5 所示。

表 1 故障等级表

Table 1 Fault level table

级别	名称	说明
IV 类	特大型	造成风机永久性毁坏。
III 类	重大型	造成风机系统部分元件损坏, 需要更换, 使得风机短时间内无法正常运行。
II 类	一般型	造成风机某些元件轻微故障, 无需更换, 风机可在短时间内重新正常运行。
I 类	轻微型	未出现以上三种现象, 需非正常停机。

表 2 主控系统 FMEA 表

Table 2 Main control system FMEA table

系 统	故 障	代 码	故障原因	阶 段	故障影响		解决方法	等 级
					局 部	最 终		
主 控 系 统	机舱加速度超限故障	F ₁	1) 机组相应参数设置不合理; 2) 传感器信号受干扰造成; 3) 恶劣风况造成; 4) 线路虚接造成; 5) 加速度模块或者测量模块 KL3404 损坏。	运 行	电 缆 护 圈 轻 微 磨 损	停 机	1) 对线路进行勘察, 查看是否存在虚接; 2) 校对 X、Y 方向加速度信号; 3) 检查 PLC 相应输入模块 KL3404。	II 类
	液压泵反馈故障	F ₂	1) 液压泵的控制回路接线错误; 2) 液压泵的反馈回路虚接问题; 3) 测量模块 KL1104 损坏。	运 行	液 压 泵 接 触 器 跳 开	停 机	1) 对照图纸, 检查液压泵的控制回路接线是否正确; 2) 给 KL1104 模块 24 V 输入信号, 看程序是否接收正常。	II 类
	有功功率不匹配	F ₃	1) 接线松动; 2) KL3403 模块损坏; 3) 电压互感器上端熔断器损坏; 4) 电流互感器损坏。	运 行 或 停 机	停 机	影 响 调 度	1) 查看故障文件, 变流器三相电路的电压、电流是否正常; 2) 只有一台机组出现此故障时, 查看故障文件, 变流器三相电路的电压、电流是否正常; 3) 若以上都正常, 则变流器的反馈数据有问题, 需更换 1U1 的 ASIC 板, 或直接更换 1U1。	III 类

表 3 水冷系统 FMEA 表

Table 3 Water cooling system FMEA table

系 统	故 障	代 码	故障原因	阶 段	故障影响		解决方法	等 级
					局 部	整 体		
水 冷 系 统	温度比较故障	F ₄	1) 水冷系统实际流量低, 导致温差大; 2) 冬天机组刚启动的情况下; 3) 三通阀工作不正常。	运 行	温 度 过 高	停 机	1) 查看故障 F 文件, 出阀温度与进阀温度之差大于 5℃报的此故障; 2) 冬天启机时, 因水冷系统的作用是给变流器加热, 出阀温度将低于进阀温度, 当温差低于-1.5℃时, 机组将报温度比较故障。	I 类
	补气泵故障	F ₅	1) 补气泵开关未打开; 2) 补气泵保险烧坏; 3) ABB 24 V 中间继电器触点坏。	运 行	系 统 报 错	停 机	1) 打开补气泵开关; 2) 检查并更换补气泵保险。	I 类

表 4 变桨系统 FMEA 表
Table 4 Variable pitch system FMEA table

系统	故障	代码	故障原因	阶段	故障影响		解决方法	等级
					局部	整体		
	变桨逆变器 OK 信号丢失故障	F ₆	1) 变桨逆变器温度高导致 AC2 自我保护; 2) 变桨电机缺相、电机绕组损坏。	变桨	故障点不能顺桨	停机	在监控面板上查看“变桨逆变器 OK”信号闪烁次数, 根据相关守则进行处理	III 类
变桨系统	变桨速度比较故障	F ₇	1) 变桨齿形带有松动现象, 2KL4001 模块输出有偏差; 2) 输出未按 PLC 模块执行 KL5001。	运行	变桨速度不正常	停机	1) 全面检查柜体内外接线是否存在脱落或松动现象; 2) 手动变桨以查看叶片旋转速度是否正常; 3) 如果还是叶片速度不正常则需要检查 KL5001 模块。	II 类
	变桨限位开关故障	F ₈	1) 选编问题; 2) 限位开关问题; 3) 87° 接近开关损坏; 4) A3 模块 KL1104 损坏。	停机	不能正常维护	影响进度	1) 查看变桨角度和限位开关状态; 2) 变桨角度和限位开关状态均正常, 查看 b 文件中选编读数, 读数是否不变或有跳变情况。	III 类

表 5 机械系统 FMEA 表
Table 5 Mechanical system FMEA table

系统	故障	代码	故障原因	阶段	故障影响		解决方法	等级
					局部	整体		
	导流罩故障	F ₉	1) 导流罩前端盖与导流罩分块总成连接处的玻璃钢法兰厚度偏薄或厚度不均; 2) 安装工艺方面存在一些缺陷。	运行及停机	安全危害	增加运维成本	1) 要求厂家出具整改方案, 经研发确认后进行处理; 2) 玻璃钢螺栓孔被磨大, 在该被磨大的螺栓孔两侧各增加一螺栓孔以加强; 3) 更换导流罩。	III 类
机械系统	发电机轴承故障	F ₁₀	轴承不同程度损坏	运行及停机	异响油脂外泄	发电机损坏	1) 观察; 2) 轴承外部油脂检查; 3) 取油脂送检; 4) 听诊器听声音。	IV 类
	叶片锁定盘制动器问题	F ₁₁	1) 转子刹车环锁定槽损坏; 2) 转子制动器刹车片损坏故障。	停机	无法锁叶轮	影响运维	更换刹车片	III 类
	螺栓问题	F ₁₂	螺栓各种问题	全程	影响维护	安全隐患	更换损坏螺栓	III 类

分析 FMEA 表可知: 风电机组故障复杂, 很难对各个故障之间的关联性予以评价, 对故障等级的评判存在模糊性等特点。下文通过引入模糊评价结合 CA 分析针对此类问题对故障进行进一步分析。

2 风电机组故障模糊分析

危害性矩阵图法的目的是通过对系统每个故障模式的危害性程度进行比较, 为系统故障危害性排序的确定提供基本依据。

2.1 机组故障的危害性概率划分

定性的危害度矩阵法是按故障模式发生的可能性大小划分等级, 然后通过等级对各故障模式进行评定的方法, 一般如表 6 所示, 分为 A、B、C、D、E 五个等级。

表 6 故障概率表

Table 6 Failure probability table

级别	频率	概率水平	概率程度
A	高频率	高概率	故障率高于总故障的 20%
B	中等频率	中等概率	故障率介于 10%~20%
C	低频率	低概率	故障率介于 1%~10%
D	很低频率	很低概率	故障率介于 0.1%~1%
E	极小频率	近乎为 0 概率	故障率小于 0.1%

2.2 危害性矩阵绘制

图 1 中横坐标为故障等级, 纵坐标为概率等级, 由每个故障点引垂线向危害性矩阵图的对角线(图中虚线), 对原点 O 到垂足距离做比较, 衡量每个

故障危害性大小。原点 O 到垂足距离越长, 则表明此故障危害性越大。

根据风电场 2016 年 1 月 1 日至 2016 年 10 月 1 日的所有故障数据, 用各个故障发生的次数比全部故障数, 根据表 6 得出故障概率分布如表 7。

表 7 实际故障概率分布

Table 7 Actual fault probability distribution

故障代码	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
概率等级	D	B	B	C	A	A
故障代码	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂
概率等级	C	D	D	C	B	A

以表 7 为依据绘制危害性矩阵图如图 1 所示。

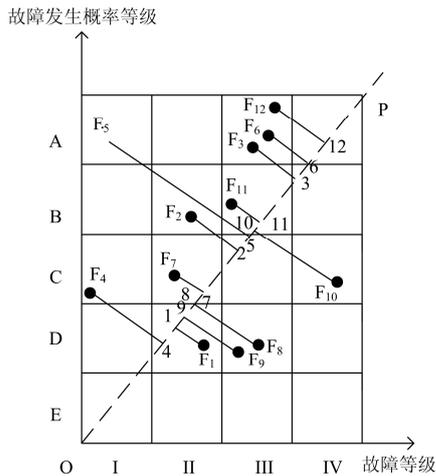


图 1 风电系统故障危害性矩阵图

Fig. 1 Matrix diagram of wind power system fault hazard

由危害性矩阵图 1 可知, 在风电场运行过程中故障的危害度大小由高往低排序分别为 F₁₂, F₆, F₃, F₁₁, F₁₀, F₅, F₂, F₇, F₈, F₉, F₁, F₄。

评价风电机组故障时, 假设评价对象为 n 个, 记: $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$, 因此这 n 个对象构成评价对象的有限集合为

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$$

根据机组故障模式的各项评价指标以及表 8 所示因素水平等级建立故障评价因素集:

$U = \{\text{机组故障严重程度, 机组故障概率等级, 机组故障检测难易等级, 机组故障维修难易等级}\}$

根据评价要求对评价结果进行划分, 记: $v_1, v_2, v_3, \dots, v_m$, 因此构成评价结果的有限集合为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$$

本文将评价结果划分为 4 个等级, 如表 8 所示。

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$$

各个不同故障之间的权重向量通过 AHP-熵值

法得到, 而对各个故障所属的严重度等级、发生概率等级、检测难易度等级以及维修难易等级的隶属表则需要通过专家调查表的方式得到。为了获得相对比较准确的数据, 通过向相关专家进行调查, 并通过数理统计得出结果。

对各个故障的危害性隶属度进行计算, 通过归一化处理得到结果, 如:

$$R_i = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$$

R_i 表示该故障的评判向量。隶属度通过式(1)计算。

$$r_i = \frac{n_i}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \quad (1)$$

式中: r_i 为该故障对 i 水平危害的隶属度; n_i 为此故障隶属于第 i 类危害度所代表的人数。

表 8 因素水平等级

Table 8 Factor level

影响因素	等级			
	1	2	3	4
严重度级别	轻微	一般	重大	特大
发生概率等级	极少	偶尔	有时	经常
检测难易等级	容易	一般	困难	无法检测
维修难易等级	容易	一般	困难	更换配件

通过专家评判组的判定, 利用统计分析, 得到故障隶属表如表 9 所示, 从隶属表可得到故障 F₁₂ 的模糊评判矩阵为

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 综合权重的确立

利用 AHP-熵值法^[16]确定综合权重步骤如下。

1) 首先利用 T.L.Saaty1-9 标度法得到故障判断矩阵 C , 并根据判断矩阵 C 计算各故障权重 ω_i 。

2) 对综合评判矩阵进行标准化及归一化处理, 得到标准矩阵 $(\theta_{ij})_{m \times n}$, θ_{ij} 为第 i 个对象的第 j 个指标的数值。

3) 计算第 j 项指标的熵值 H_j 。

4) 计算第 j 项指标的差异系数 g_j 。

5) 根据式(2)确定综合权重。

$$A = \frac{\omega_i g_i}{\sum_{j=1}^n \omega_j g_j} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: ω_i 为层次分析法的权重; g_i 为熵值法的差异性系数; A 为 AHP-熵值法的综合权重。

表 9 风电系统故障隶属表

Table 9 Fault membership of wind power system

故障 编号	严重程度等级				发生概率等级				检测难易等级				维修难易等级			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
F ₁₂	0.6	0.2	0.2	0	0.2	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.7	0	0	0	0	1
F ₆	0.1	0.3	0.4	0.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.6	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.2
F ₃	0.1	0.1	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	0.1	0.8	0.2	0	0	0.6	0.3	0.1	0
F ₁₁	0.1	0.5	0.3	0.1	0	0	0.6	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.2	0
F ₁₀	0.2	0.2	0.5	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.8	0.2	0	0	0.3	0.5	0.2	0
F ₅	0.5	0.5	0	0	0.1	0.2	0.5	0.2	0.3	0.5	0.2	0	0.4	0.4	0.2	0
F ₂	0.4	0.4	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0	0.4	0.4	0.2	0	0.4	0.5	0.1	0
F ₇	0.4	0.4	0.2	0	0.4	0.4	0.2	0	0.4	0.3	0.2	0.1	0.2	0.5	0.2	0.1
F ₈	0.2	0.4	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0	0.4	0.5	0.1	0	0.3	0.5	0.2	0
F ₉	0.4	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.2	0	0.4	0.5	0.1	0	0.2	0.6	0.1	0.1
F ₁	0.5	0.5	0	0	0	0.2	0.4	0.1	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0
F ₄	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.5	0.5	0	0

通过以上步骤可得 F₁₂ 的综合权重集为

$$A_{12} = \{0.3, 0.2, 0.3, 0.2\}$$

2.4 评价过程

根据一级模糊综合评判模型^[17], 通过式(3)对故障 F₁₂ 综合评价。

$$B_{12} = A_{12} \cdot R_{12} \quad (3)$$

式中: B_{12} 为故障 F₁₂ 评价模型; A_{12} 为权重集; R_{12} 为评判矩阵。

对故障 F₁₂ 进行评价, 如下式:

$$B_{12} = [0.3, 0.2, 0.3, 0.2] \cdot \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [0.25, 0.2, 0.33, 0.22]$$

同理可对其余故障进行综合评价, 评价结果如下:

$$B_6 = [0.25, 0.25, 0.36, 0.14]$$

$$B_3 = [0.43, 0.23, 0.20, 0.14]$$

$$B_{11} = [0.23, 0.35, 0.28, 0.14]$$

$$B_{10} = [0.38, 0.24, 0.29, 0.09]$$

$$B_{15} = [0.34, 0.42, 0.20, 0.04]$$

$$B_2 = [0.38, 0.42, 0.2, 0.03]$$

$$B_7 = [0.38, 0.39, 0.14, 0.06]$$

$$B_8 = [0.39, 0.41, 0.17, 0.06]$$

$$B_9 = [0.36, 0.47, 0.12, 0.05]$$

$$B_1 = [0.4, 0.49, 0.08, 0.02]$$

$$B_4 = [0.44, 0.46, 0.09, 0.03]$$

根据对各故障的模糊评价结果, 通过式(4)进行反模糊化运算。

$$D = B \cdot V^T \quad (4)$$

式中: D 为故障危害性; B 为故障评价模型; V 为评价等级。

$$D_{12} = B_{12} \cdot V^T = 2.52$$

$$D_6 = B_6 \cdot V^T = 2.39$$

$$D_3 = B_3 \cdot V^T = 2.05$$

$$D_{11} = B_{11} \cdot V^T = 2.33$$

$$D_{10} = B_{10} \cdot V^T = 2.09$$

$$D_5 = B_5 \cdot V^T = 1.94$$

$$D_2 = B_2 \cdot V^T = 1.94$$

$$D_7 = B_7 \cdot V^T = 1.82$$

$$D_8 = B_8 \cdot V^T = 1.96$$

$$D_9 = B_9 \cdot V^T = 1.86$$

$$D_1 = B_1 \cdot V^T = 1.7$$

$$D_4 = B_4 \cdot V^T = 1.75$$

通过模糊评价计算, 可从故障对风电系统危害性的角度对这 12 种故障的危害性从大到小进行重新排序, 新的顺序为 F₁₂, F₆, F₁₁, F₁₀, F₃, F₈, F₂, F₅, F₉, F₇, F₄, F₁。

3 降低风电机组故障率措施

针对风电机组运行故障引入模糊 FMECA 分析法进行分析评价, 得出螺栓问题及变桨逆变器 OK 信号丢失故障为危害性最高的两个故障, 对螺栓问

题, 应加大巡检力度, 对螺栓故障率较高的部件进行试验研究, 探究最为合适的力矩, 对故障率较高的螺栓部位增加力矩检修次数以达到降低故障率的目的。

在变桨逆变器 OK 信号丢失故障方面应及时更换冷却液, 以防止变桨电机温度过高的状况; 在巡检过程中加大变桨电机的检查力度, 对操作人员进行专业培训, 规范变桨操作, 减少变桨操作失误率。

现场检修作业需根据故障危害度的不同合理分配工作时间, 通过修改检修规章制度等措施降低此类故障的发生率。例如: 在金风天翼风电场的检修章程中, 可将全年一次大规模检修修改为每月定期对故障危害度高的部件进行检修, 对故障危害度较低的部件一年一检, 这种针对性的检修不仅大大降低了员工的工作量, 且将大幅度降低故障发生的概率及因故障所产生的损失。

4 结论

对风电系统故障运用模糊 FMECA 分析法进行研究, 根据分析结果可知螺栓连接问题为检修重点, 此故障的危害性最高; 对得出的危害性较大的故障应在日常维护中重点检查维护; 传统 FMECA 分析法仅仅依据故障等级及故障发生概率对故障危害性进行评价, 不够全面准确, 本文引入模糊 FMECA 评价模型, 对故障等级、概率、检修难易及修复难易度进行综合评价, 对主要故障危害度进行重新排序, 得出的故障危害度更为符合实际情况, 在 FMECA 分析法的基础上引入模糊评价法, 对风电系统故障进行分析评价, 使得结果更加合理、科学、准确。两种方法结合克服了传统的 FMECA 分析法对系统故障危害性、发生概率和检测难易程度、修复难易程度分析不足等特点, 对于风电企业现场运维和降低故障率具有重要意义。风能在新能源的开发探索中十分重要, 风电系统运行可靠性与风电企业的切身利益息息相关, 本文仅对发电机组故障进行研究, 并未涉及叶片等故障, 因此, 有必要针对整体故障进行进一步的研究。

参考文献

[1] 李媛媛, 余秀月, 丁剑. 含高渗透率风电的孤网频率动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 158-163.
LI Yuanyuan, YU Xiuyue, DING Jian. Study on frequency dynamic characteristics of isolated network with high penetration of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 158-163.

[2] 李浪, 刘辉海, 赵洪山. 风力发电机振动监测与故障诊断方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 94-100, 108.
LI Lang, LIU Huihai, ZHAO Hongshan. Review of vibration monitoring and fault diagnosis methods of wind turbines[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 94-100, 108.

[3] 全球风能理事会. 全球风电统计数据 2015[R]. 2016. Global Wind Energy Council. Global wind power statistics of 2015[R]. 2016.

[4] 唐学用, 叶航超, 万会江, 等. 风电机组不同控制模式下 SVC 在改善电网电压质量中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 128-131, 136.
TANG Xueyong, YE Hangchao, WAN Huijiang, et al. Application of SVC in improving power grid voltage quality under different control models of the wind turbine[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(10): 128-131, 136.

[5] 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.
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 Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2285-2291.

[6] 杨杰明, 董玉坤. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 102-109.
YANG Jieming, DONG Yukun. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 102-109.

[7] 单志鹏, 梅卫江. 模糊聚类在齿轮典型故障特征模式识别中的应用[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2012, 30(2): 257-260.
SHAN Zhipeng, MEI Weijiang. Research on diagnosis of typical gear faults based on wavelet power spectrum and fuzzy clustering[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2012, 30(2): 257-260.

[8] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2.

[9] 李萍, 袁朝辉, 苏峰. 基于模糊 FMECA 的电液舵机可靠性分析[J]. 机床与液压, 2013, 41(13): 178-182.

- LI Ping, YUAN Chaohui, SU Feng. Reliability analysis of electro-hydraulic actuator based on fuzzy FMECA[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(13): 178-182.
- [10] 夏军, 任金宝, 季海燕. 基于模糊 FMECA 的地铁车门可靠性分析[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(2): 184-187.
- XIA Jun, REN Jinbao, JI Haiyan. Reliability analysis of metro door system based on fuzzy FMECA[J]. Machine Building Automation, 2014, 43(2): 184-187.
- [11] 蔡志强, 孙树栋, 司书宾. 基于 FMECA 的复杂装备故障预测贝叶斯网络建模[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 187-193.
- CAI Zhiqiang, SUN Shudong, SI Shubin. Modeling of failure prediction Bayesian network based on FMECA[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(1): 187-193.
- [12] 顾煜炯, 宋磊. 基于 FMECA 和 FTA 正向综合分析的风电场设备故障管理[J]. 可再生能源, 2012, 30(9): 100-105.
- GU Yujiong, SONG Lei. Fault management of wind farm equipment based on FMECA and FTA positive analysis[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(9): 100-105.
- [13] 戴城国, 王晓红, 张新. 基于模糊综合评判的电液伺服阀 FMECA[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(12): 1575-1578.
- DAI Chengguo, WANG Xiaohong, ZHANG Xin. Fuzzy comprehensive evaluation in FMECA of electro-hydraulic servo valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(12): 1575-1578.
- [14] 窦赛, 陈国顺, 吕艳梅, 等. 无人机系统的模糊 FMECA 分析方法研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(23): 7-9.
- DOU Sai, CHEN Guoshun, LÜ Yanmei, et al. Research on fuzzy FMECA of unmanned aerial vehicle system[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(23): 7-9.
- [15] 孙凯帆, 阚树林, 曹召锋, 等. 基于模糊 FMECA 的液压系统可靠性分析[J]. 液压气动与密封, 2014(5): 26-29.
- SUN Kaifan, KAN Shulin, CAO Zhao Feng, et al. The reliability analysis of hydraulic system based on the fuzzy FMECA method[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2014(5): 26-29.
- [16] 胡佳琳, 张炜. 基于模糊理论的电力系统健康状况的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 61-66.
- HU Jialin, ZHANG Wei. Research on health status of power system based on fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 61-66.
- [17] 刘涛, 蔡增杰. 基于 FMECA 和模糊综合评判的飞机起动电磁阀安全性评估[J]. 机械, 2009, 36(12): 65-68.
- LIU Tao, CAI Zengjie. Accessory safety assessment of airplane start-up electromagnetic valve based on FMECA and fuzzy comprehensive evaluation methods[J]. Machinery, 2009, 36(12): 65-68.

收稿日期: 2016-12-10; 修回日期: 2017-02-28

作者简介:

王宇晨(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电装备运行可靠性; E-mail: 2421578599@qq.com

成斌(1961—), 男, 通信作者, 双学士, 教授, 研究方向为风电装备运行可靠性. E-mail: 1017630198@qq.com

(编辑 魏小丽)