

焦杰,文泽军. 基于模糊灰关联分析法的直驱式风电机组故障树分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(1): 62-70. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.009

Jiao J, Wen Z J. Fault Tree Analysis of Direct-drive Wind Turbines based on Fuzzy Grey Correlation Analysis [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020,35(1):62-70. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.009

基于模糊灰关联分析法的直驱式 风电机组故障树分析

焦杰,文泽军*

(湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201)

摘要:由于不同种类风电机组的构成部分以及发电机存在区别,当某一特定类型的风电机组发生故障时,针对该类型风电机组的故障树对故障维护将具有更大的参考价值.本文建立了兆瓦级直驱式永磁同步风电机组部分主要子系统的故障树,并结合模糊灰关联分析法对各子系统故障树进行了各最小割集与顶上事件的关联性分析,得到了各子系统的薄弱环节,并提出了相应的改进措施,对判别直驱式永磁同步风电机组的故障原因、改进系统的可靠性有一定参考价值.

关键词:直驱式永磁同步风电机组;模糊灰关联分析法;故障树分析

中图分类号:TB114.3 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)01-0062-09

Fault Tree Analysis of Direct-drive Wind Turbines Based on Fuzzy Grey Correlation Analysis

Jiao Jie, Wen Zejun

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Due to the difference between the components of different types of wind turbines and generators, when a particular type of wind turbine fails, the fault tree for this type of wind turbine will have greater reference value for fault maintenance. The fault tree of some main subsystems of MW-class direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine was established, including wind turbine system, pitch system, yaw system, permanent magnet synchronous generator, wind measurement system, cabin base and tower, and the correlation analysis between the minimum cut set and the top event of each subsystem fault tree was analyzed by fuzzy grey relational analysis method. The weak links of each subsystem were obtained, and the corresponding improvement measures were provided. It has certain reference value for judging the cause of failure of direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine and improving the reliability of the system.

Keywords: direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine; fuzzy gray correlation analysis; fault tree analysis

收稿日期:2019-05-29

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFF0203400);湖南省教育厅科学研究重点项目资助(17A069)

*通信作者,E-mail: zjwen732@163.com

可再生能源是引导我们的能源系统朝着可持续发展和供应安全的方向发展的基石,风资源是目前世界上增长最快的可再生资源之一^[1-2].Blanco^[3]表明,在整个风力发电项目的生命周期内,运营和维护(O&M)成本可占电力总成本的20%~30%,降低风电机组运行维护成本、提高维护效率已成为行业关注的焦点问题^[4-5].如果故障不能及时诊断,将产生大量额外维护费用.例如,轴承故障如果能及时发现,则维修或翻新费用可能只要5 000欧元,但如果未及时发现,则由于其他部件的附带损害导致的维护费用可能会超过250 000欧元^[6].因此,大量学者通过可靠性分析找出风电机组的薄弱环节,为优化风电机组设计,提升系统可靠性提供了指导.Kang^[7]根据故障历史数据对海上风电机组进行了故障树分析,实现了基于最小割集和重要度量的定量评估.赵秋丽^[8]针对某2 MW机型的齿轮箱和发电机的超温故障进行了FMECA分析,并提供了改进方案.Marque^[9]等建立了陆上风电机组故障树,并通过二元决策图法进行了定量分析.但是不同类型的风电机组故障模式区别很大,上述研究并未针对特定类型的风电机组进行完整的故障树分析,而且由于未考虑外界因素的模糊性和故障数据的不准确性对事件发生概率的影响,给定量分析带来了很大的误差.

针对以上研究的不足,本研究以兆瓦级直驱式永磁同步风电机组为对象,首先根据FMECA分析数据分别建立了风轮系统、变桨系统、永磁同步电机、自动偏航系统、测风系统以及机舱底座和塔架的故障树模型,然后采用模糊灰关联分析方法,得到每一个最小割集与最上层故障事件的灰色关联度,找到系统的薄弱环节,有利于在后期运行维护过程中减轻事故造成的影响,为在设计环节改进系统可靠性和安全性提供指导.

1 模糊灰关联分析法在故障树中的应用

1.1 建立故障树

以系统最不希望发生的事件作为顶上事件(用 T 表示),使用演绎法找出顶上事件发生的原因事件组合,从顶上事件逐级分解至每一个基本事件,并通过逻辑门表达各故障事件间的联系.

1.2 求故障树最小割集和结构函数

最小割集法是一种评价故障的基础方法.一组必然导致顶上事件发生的事件集合被视为故障树的一个割集,如果割集里的所有事件都发生,顶上事件才会发生,则称该割集为最小割集(用 F 表示),一个最小割集对应系统的一种特定的故障模式.将具有 n 个基本事件的故障树用数学表达式表示出来,简化为结构函数: $\Phi(X_1, X_2, \dots, X_n)$.分析简单故障树时,将结构函数展开为最小项数的乘积和,每一项乘积对应一个最小割集.

1.3 确定基本事件的模糊概率

基本事件模糊概率由文献[10]中FMECA的频度确定(假设在频度区间内的概率分布服从三角模糊数对应的分布).三角模糊数由3个参数 a, m, b

表示,记为 $\tilde{P} = (a, m, b)$ 隶属函数如图1所示,表达式见式(1)^[11].

$$u_{\tilde{P}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ (x - a)/(m - a), & a \leq x \leq m; \\ (b - x)/(b - m), & m \leq x \leq b; \\ 0, & x > b. \end{cases} \quad (1)$$

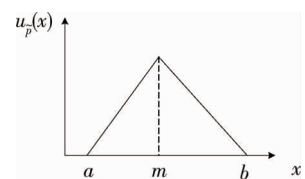


图1 三角模糊数的隶属度函数

1.4 计算顶上事件模糊概率

根据三角模糊数的模糊运算法则计算顶上事件的模糊概率,本文所建立的故障树仅有逻辑或门.此时,顶上发生的模糊概率计算公式如式(2).

$$\tilde{P}^{\text{OR}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{P}_i) = (1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i)). \quad (2)$$

根据式(2)可以计算出顶上事件的模糊概率为

$$\tilde{P}_T = \tilde{\Phi}(X_1, X_2, \dots, X_n) = (a_T, m_T, b_T). \quad (3)$$

1.5 用模糊重要度-中值法计算各基本事件模糊重要度

根据三角模糊中值的数学定义^[12],对于三角模糊数隶属函数 $u_{\tilde{p}}(x)$,若令 $A_1 = \int_a^s u_{\tilde{p}}(x) dx, A_2 = \int_s^b u_{\tilde{p}}(x) dx$ 在 a 与 b 之间必定存在 s_0 使得 $A_1 = A_2$,称 s_0 为三角模糊数的中值.三角模糊数中值用式(4)计算^[13].

$$z = \begin{cases} a + \sqrt{(m-a)(b-a)/2}, m-a > b-m; \\ b + \sqrt{(b-m)(b-a)/2}, m-a < b-m. \end{cases} \quad (4)$$

当第 i 个最小割集里所包含的基本事件都不发生时,顶上事件仍发生的概率为

$$\tilde{p}_{T_i} = \tilde{\Phi}(X_1, X_2, \dots, X_n) = (a_{T_i}, m_{T_i}, b_{T_i}). \quad (5)$$

记 \tilde{p}_{T_i} 的中值为 z_{T_i} , \tilde{p}_{T_i} 的中值为 z_{T_i} , 将第 i 个最小割集发生与否顶上事件发生的模糊概率中值差的绝对值定义为第 i 个最小割集的模糊重要度,即

$$e_i = |z_{T_i} - z_{T_i}|. \quad (6)$$

1.6 灰关联分析法

灰色关联分析法通过灰色关联序列比较不同因素间关系强弱.将故障树各最小割集的模糊重要度均理化处理,作为灰色关联分析的参考序列.

$$X_0 = [x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)] = \left[\frac{e_1}{e}, \frac{e_2}{e}, \dots, \frac{e_n}{e} \right];$$

$$\bar{e} = \sum_{i=1}^n e_i. \quad (7)$$

将故障树的最小割集对应的事件序列作为比较序列,若系统有 m 个最小割集, n 个基本事件,则参考序列组成的矩阵如下:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1(1) & X_1(2) & \cdots & X_1(n) \\ X_2(1) & X_2(2) & \cdots & X_2(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_m(1) & X_m(2) & \cdots & X_m(n) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在参考矩阵中,当基本事件 X_i 属于最小割集 F_k 时,取 $x_k(i) = 1$;否则取 $x_k(i) = 0$.

将与对应于第 i 个基本事件 ($i = 1, 2, \dots, n$) 的差值的绝对值作为差序列^[14].

$$\Delta_{0k}(i) = |x_0(i) - x_k(i)|. \quad (9)$$

在针对多元单序列统计分析问题时,计算灰关联系数公式为

$$\gamma[x_0(i), x_k(i)] = \frac{\min_{ik} \Delta_{0k}(i) + \zeta \max_{ik} \Delta_{0k}(i)}{\Delta_{0k}(i) + \zeta \Delta_{0k}(i)}. \quad (10)$$

式中: ζ 为分辨系数, $0 < \zeta < 1$, 取 $\zeta = 0.5$.

在针对多元单序列统计分析问题时,计算灰关联度公式为

$$\gamma_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma[x_0(i), x_k(i)]. \quad (11)$$

最后,根据 γ_k 大小排列灰关联序列. γ_k 越大, k 割集与顶上事件的关联性越强,从而找到系统的薄弱环节^[15].

2 兆瓦级直驱式永磁同步风电机组故障树分析

2.1 建立完整故障树

根据功能将直驱式永磁同步风电机组故障分为6个关键子系统的故障,分别是风轮系统、变桨系统、永磁同步发电机、偏航系统、测风系统以及机舱底座和塔架.其中机舱底座和塔架为风电机组提供物理支撑;风轮系统和永磁同步发电机实现风能的传递和转换;变桨系统、偏航系统通过测风系统测得的风速与

风向调节叶片桨距角与风电机组的对风方向,以控制风电机组的运行状态.直驱式永磁同步风电机组的系统故障树如图 2 所示.

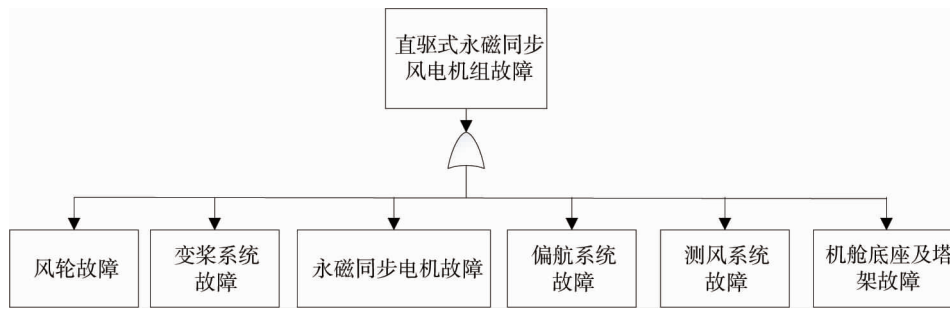


图 2 风电机组系统故障树

2.2 风轮系统故障树分析

风轮系统主要由叶片、轮毂和防雷装置组成.风轮是将风能转化为风电机组动能的主要机构,风力带动叶片旋转,在直驱式永磁同步风电机组中,风轮无须经过齿轮箱增速,直接通过主轴与低速多极同步电机连接.风轮系统的故障树如图 3 所示,逻辑门见表 1,基本事件及模糊概率见表 2.

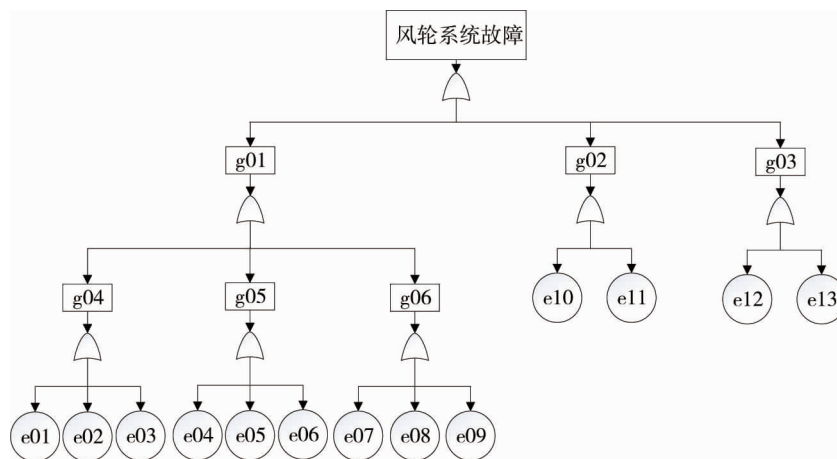


图 3 风轮系统故障树

表 1 风轮系统故障树的逻辑门

逻辑门	代码	逻辑门	代码
叶片故障	g01	轮毂故障	g02
防雷装置故障	g03	叶片断裂抛出	g04
叶片局部开裂、孔洞	g05	叶片表面疲劳裂纹	g06

表 2 风轮系统故障基本事件及其模糊概率

基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$	基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$
设计加工缺陷	e01	(0.000,0.000 50,0.001 0)	存在较大冲击载荷	e02	(0.00,0.000 50,0.001 0)
变桨失效,风机失速	e03	(0.000,0.000 50,0.001 0)	表面胶衣耐磨性不够	e04	(0.01,0.055 00,0.100 0)
风沙、水汽磨蚀	e05	(0.010,0.055 00,0.100 0)	雷击	e06	(0.01,0.055 00,0.100 0)
叶片旋转质量不平衡	e07	(0.000,0.000 50,0.001 0)	叶片空气动力学外形不合理	e08	(0.00,0.000 50,0.001 0)
叶片安装联接松动	e09	(0.001,0.005 50,0.010 0)	循环载荷的反复作用	e10	(0.00,0.000 25,0.000 5)
轮毂加工存在应力集中	e11	(0.000,0.000 25,0.000 5)	接闪器损坏	e12	(0.01,0.055 00,0.100 0)
引下线与接地装置连接断开	e13	(0.010,0.055 00,0.100 0)			

由式(2)~式(3)计算得风轮系统故障发生的模糊概率为(0.050 0 0.252 8 0.418 9).

由式(4)~式(6)计算得各最小割集(由于故障树只有或门,因此每一个基本事件构成一个最小割集),各最小割集的模糊重要度依次为[0.000 4 0.004 5 0.000 4 0.000 4 0.001 8 0.052 5 0.052 5

0.001 6 0.001 6 0.001 6 0.012 0 0.004 5 0.004 6 0.007 4 0.007 4].

由式(9)~式(11)计算得最小割集的灰色关联度依次为[0.807 6 0.822 9 0.807 6 0.807 6 0.812 8 0.828 3 0.828 3 0.812 2 0.812 2 0.812 3 0.842 0 0.822 9 0.823 1 0.833 3 0.833 3].

风轮系统故障树的灰关联序列为 $r_{11} > r_{14} = r_{15} > r_6 = r_7 > r_2 = r_{12} > r_{13} > r_5 > r_{10} > r_8 = r_9 > r_1 = r_3 = r_4$.

经过灰关联性分析得到结论,轮毂加工导致的应力集中与顶上事件相关性最大,应在设计环节改善轮毂应力集中,提高轮毂加工精度.

2.3 变桨系统故障树分析

变桨系统主要包括变桨电机、变桨减速器、变桨轴承等部件.变桨距控制是根据风速的变化来调整叶片的桨距角,从而调整风电机组捕获风能的效率.变桨系统的故障树如图4所示,逻辑门见表3,基本事件及其模糊概率见表4.

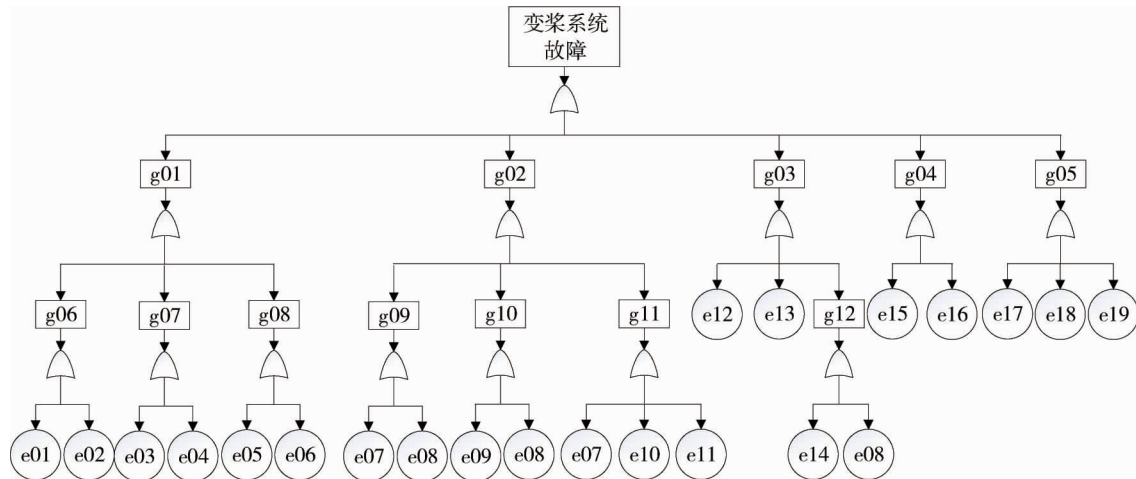


图4 变桨系统故障树

表3 变桨系统失效故障树的逻辑门

逻辑门	代码	逻辑门	代码	逻辑门	代码	逻辑门	代码
变桨电机故障	g01	变桨减速器故障	g02	变桨轴承失效	g03	变桨小齿轮失效	g04
旋转编码器故障	g05	变桨电机过载温升过高	g06	变桨电机故障失效	g07	变桨电机工作振动剧烈	g08
内部齿轮疲劳裂纹	g09	齿轮折断或断轴	g10	减速器工作振动剧烈	g11	变桨轴承工作变形	g12

表4 变桨系统基本事件及其模糊概率

基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$	基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$
变桨减速器卡塞	e01	(0.001,0.000 5,0.001)	变桨轴承阻力增大	e02	(0.001,0.005 5,0.010)
变桨电机供电故障	e03	(0.001,0.005 5,0.010)	变桨电机内部绕组烧坏	e04	(0.001,0.005 5,0.010)
变桨驱动器内部耦合不良	e05	(0.000,0.000 5,0.001)	变桨电机安装松动	e06	(0.000,0.000 5,0.001)
内部润滑不良	e07	(0.000,0.001 0,0.002)	冲击载荷反复作用	e08	(0.000,0.001 5,0.003)
设计不合理,存在应力集中	e09	(0.000,0.000 5,0.001)	密封不严,有异物侵入	e10	(0.000,0.000 5,0.001)
变桨小齿轮与齿形带啮合不良	e11	(0.000,0.000 5,0.001)	叶片交变载荷反复作用	e12	(0.000,0.000 5,0.001)
变桨轴承内部润滑不良	e13	(0.001,0.005 5,0.010)	变桨轴承安装不当	e14	(0.000,0.000 5,0.001)
齿形带过紧或者过松	e15	(0.001,0.005 5,0.010)	齿轮啮合润滑不良	e16	(0.001,0.005 5,0.010)
旋转编码器损坏	e17	(0.010,0.055 0,0.100)	编码器接线短路	e18	(0.010,0.055 0,0.100)
数字输入模块故障	e19	(0.010,0.055 0,0.100)			

同理算得,变桨系统故障发生的模糊概率为(0.035 5 0.192 1 0.327 9),各最小割集的模糊重要度依次为[0.000 4 0.004 2 0.004 2 0.004 2 0.000 4 0.000 4 0.001 5 0.003 3 0.000 4 0.000 4 0.000 4 0.000 4 0.004 2 0.000 4 0.004 2 0.051 9 0.051 9 0.051 9],变桨系统故障树各最小割集的灰色关联度依次为[0.834 4 0.845 7 0.845 7 0.845 7 0.834 3 0.834 3 0.837 7 0.843 2 0.834 3 0.834 3 0.834 3 0.834 4 0.845 7 0.834 3 0.845 7 0.845 7 0.850 6 0.850 6 0.850 6],

灰关联序列为 $r_{17}=r_{18}=r_{19}>r_2=r_3=r_4=r_{13}=r_{15}=r_{16}>r_8>r_7>r_1=r_{12}>r_5=r_6=r_9=r_{10}=r_{11}=r_{14}$.

经过灰关联性分析得到结论,变桨系统中编码器故障与变桨系统故障相关性最大,应优化编码器设计,减少编码器故障率.

2.4 永磁同步电机故障树分析

在交流电机中同步电机被广泛应用,稳定运行时,转速 n 和定子电流频率 f 满足等式 $n=n_0=60f/p$,其中 n_0 为转速, p 为极对数.目前所采用的交流电能主要是由同步发电机提供.永磁同步发电机是同步发电机的一类,它与传统的电励磁同步发电机相比,差别主要是:其主磁场是由永磁体提供,而不是励磁绕组.永磁同步发电机主要包括定子、定子支架、定子主轴 转子等.定子通过定子支架安装在定子主轴上,在定子主轴前段套有空心的转动轴,与风轮轮毂同步转动,联轴器将转子和转动轴联接,使发电机发电.永磁同步电机故障树如图 5 所示,逻辑门见表 5,基本事件及其模糊概率见表 6.

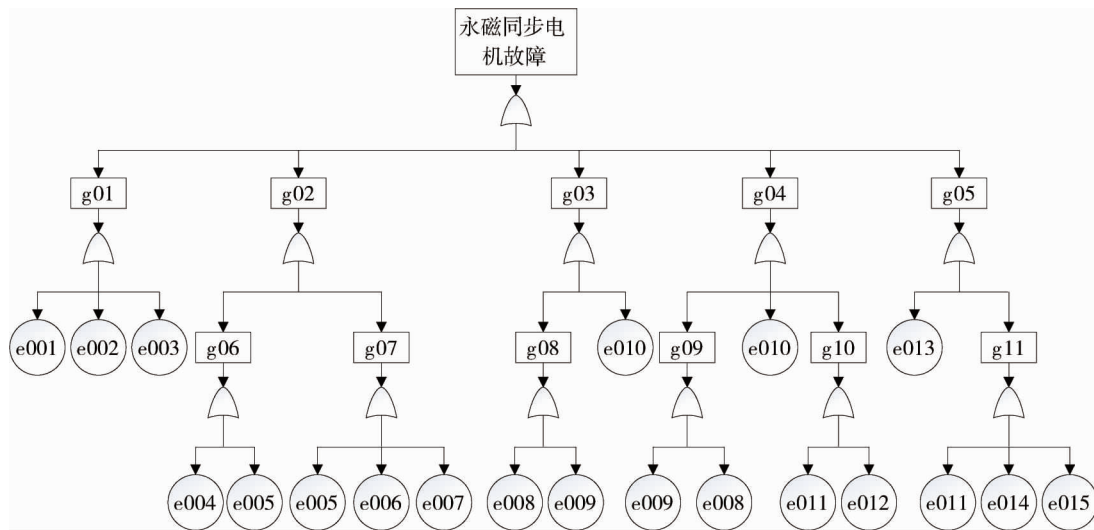


图 5 永磁同步电机故障树

表 5 永磁同步电机故障树逻辑门

逻辑门	代码	逻辑门	代码	逻辑门	代码	逻辑门	代码
定子总成故障	g01	转子总成故障	g02	定子主轴故障	g03	转轴故障	g04
前后轴承故障	g05	转子支架疲劳断裂	g06	永磁体失磁	g07	定子主轴断裂	g08
转轴断裂	g09	转轴异常振动	g10	前后轴承振动异常	g11		

表 6 永磁同步电机故障树基本事件及其模糊概率

基本事件	代码	模糊概率 $\bar{p}(a, m, b)$	基本事件	代码	模糊概率 $\bar{p}(a, m, b)$
定子匝间绝缘老化	e01	(0.000,0.000 50,0.001)	定子匝间存在油污腐蚀	e02	(0.001,0.005 00,0.010)
定子支架安装不合理	e03	(0.000,0.000 50,0.001)	不平衡载荷反复作用	e04	(0.000,0.000 55,0.001)
转子振动剧烈	e05	(0.000,0.001 00,0.002)	故障引起的瞬间高温	e06	(0.010,0.055 00,0.100)
电枢过电流	e07	(0.010,0.055 00,0.100)	存在应力集中	e08	(0.000,0.001 00,0.002)
存在较大冲击载荷	e09	(0.000,0.001 00,0.002)	交变载荷反复作用	e10	(0.000,0.001 00,0.002)
轴承安装配合间隙过大	e11	(0.000,0.001 50,0.003)	转轴与轮毂联接处螺栓松动	e12	(0.001,0.005 50,0.010)
发电机轴承润滑不良	e13	(0.001,0.005 50,0.010)	轴承润滑不良	e14	(0.001,0.005 50,0.010)
轴承旋转振动大	e15	(0.000,0.000 50,0.001)			

同理算得,永磁同步发电机故障发生的模糊概率为(0.023 8 0.137 7 0.241 9),基本事件的模糊重要度依次为[0.000 4 0.004 5 0.000 4 0.000 4 0.001 8 0.052 5 0.052 5 0.001 6 0.001 6 0.001 6 0.012 0 0.004 5 0.004 6 0.007 4 0.007 4],故障树各最小割集的灰色关联度依次为[0.807 6 0.822 9 0.807 6 0.807 6 0.812 8 0.828 3 0.828 3 0.812 2 0.812 2 0.812 3 0.842 0 0.822 9 0.823 1 0.833 3 0.833 3]灰关联序列为 $r_{11}>r_{14}=r_{15}>r_6=r_7>r_2=r_{12}>r_{13}>r_5>r_{10}>r_8=r_9>r_1=r_3=r_4$.

经过灰关联性分析得到结论,永磁同步电机中轴承安装配合间隙过大与永磁同步电机故障相关性最大,应在设计阶段尽量提高轴承与转轴、主轴的配合精度.

2.5 偏航系统故障树分析

永磁同步电机的对风过程通过电动的偏航系统驱动机舱旋转来实现,偏航系统主要包括偏航电机、偏航行星齿轮减速器以及偏航制动装置.偏航系统的故障树如图6所示,逻辑门见表7,基本事件及其模糊概率见表8.

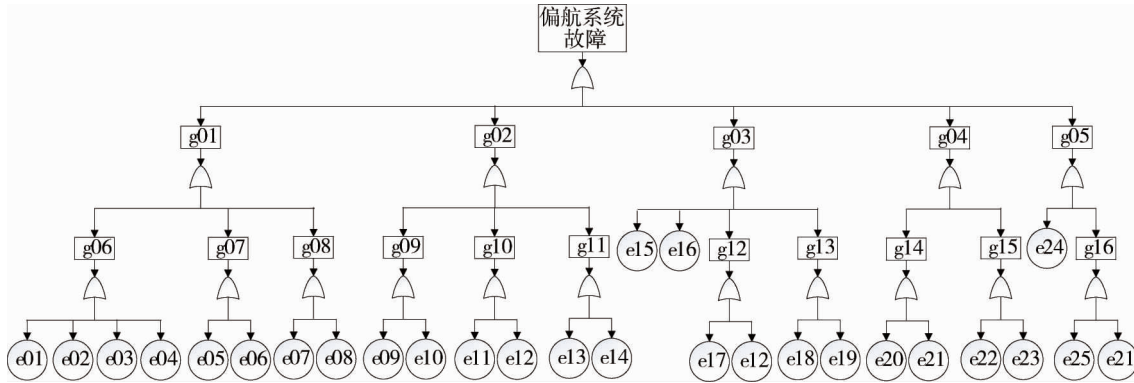


图6 偏航系统故障树

表7 偏航系统故障树逻辑门

逻辑门	代码	逻辑门	代码	逻辑门	代码	逻辑门	代码
偏航电机故障	g01	偏航减速器故障	g02	偏航轴承失效纹损伤	g03	偏航刹车盘失效	g04
偏航制动器故障	g05	偏航电机过载温升过高	g06	偏航电机不工作	g07	偏航电机振动异常	g08
内部齿轮疲劳裂纹损伤	g09	齿轮折断或断轴	g10	减速器振动异常	g11	偏航轴承工作变形	g12
外侧大齿圈磨损严重	g13	刹车盘磨损严重	g14	刹车盘工作振动、噪音大	g15	制动器磨损严重	g16

表8 偏航系统故障基本事件及其模糊概率

基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$	基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$
偏航减速器卡塞	e01	(0.001, 0.005 5, 0.010)	电磁刹车失效抱紧	e02	(0.001, 0.005 5, 0.010)
偏航余压过大	e03	(0.010, 0.055 0, 0.100)	偏航轴承阻力增大	e04	(0.010, 0.055 0, 0.100)
供电输入断路	e05	(0.010, 0.055 0, 0.100)	电机内部绕组烧坏	e06	(0.010, 0.055 0, 0.100)
偏航驱动啮合不良	e07	(0.001, 0.005 5, 0.010)	偏航减速机安装链接松动	e08	(0.001, 0.005 5, 0.010)
内部润滑不良	e09	(0.000, 0.000 5, 0.001)	工作振动过大	e10	(0.000, 0.000 5, 0.001)
设计加工时,有应力集中	e11	(0.000, 0.000 5, 0.001)	工作时存在较大冲击载荷	e12	(0.000, 0.001 0, 0.002)
内部齿轮磨损严重	e13	(0.001, 0.005 5, 0.010)	密封不严,有异物侵入	e14	(0.001, 0.005 5, 0.010)
偏航交变载荷反复作用	e15	(0.000, 0.000 5, 0.001)	偏航轴承内部润滑不良	e16	(0.000, 0.000 5, 0.001)
偏航轴承安装不合理	e17	(0.001, 0.005 5, 0.010)	偏航耦合润滑脂缺失	e18	(0.001, 0.005 5, 0.010)
轴承外齿圈和偏航小齿轮啮合不良	e19	(0.000, 0.000 5, 0.001)	制动器匝间间隙小	e20	(0.000, 0.000 5, 0.001)
偏航余压过大	e21	(0.000, 0.001 0, 0.002)	刹车盘上沾染油脂	e22	(0.001, 0.005 5, 0.010)
制动盘安装松动	e23	(0.000, 0.000 5, 0.001)	液压接头处漏油	e24	(0.001, 0.005 5, 0.010)
制动器安装松动	e25	(0.001, 0.005 5, 0.010)			

同理算得,偏航系统故障的模糊概率为(0.049 9 0.255 4 0.421 9),基本事件的模糊重要度依次为 [0.004 4 0.004 4 0.043 7 0.043 7 0.043 1 0.043 1 0.003 8 0.003 8 0.000 3 0.000 3 0.000 3 0.001 3 0.003 8 0.003 8 0.000 3 0.000 3 0.000 3 0.003 7 0.003 7 0.000 3 0.000 3 0.001 3 0.003 7 0.000 3 0.003 8 0.003 7],偏航系统故障树各最小割集的灰色关联度依次为[0.830 3 0.830 3 0.832 5 0.832 5 0.832 6 0.832 6 0.828 7 0.828 7 0.819 6 0.819 6 0.819 6 0.822 3 0.828 7 0.828 7 0.819 6 0.819 6 0.828 7 0.828 7 0.819 6 0.819 6 0.822 3 0.828 7 0.819 6 0.828 7 0.828 7],灰关联序列为 $r_5=r_6>r_3=r_4>r_1=r_2>r_7=r_8=r_{13}=r_{14}=r_{17}=r_{18}=r_{22}=r_{24}=r_{25}>r_{12}=r_{21}>r_9=r_{10}=r_{11}=r_{15}=r_{16}=r_{19}=r_{20}=r_{23}$.

经过灰关联性分析得到结论,偏航系统中偏航电机故障与偏航系统故障的关联性最大,可以使用可靠

性更高的断路器,减少供电输入断路故障的发生;进一步改善工艺和设备的跑冒滴漏现象,可以通过在各法兰处涂少量 704 密封胶,定期检查设备密封来预防绕组短路故障.

2.6 测风系统故障树分析

测风系统主要包括风向标、风速仪、测风支架等部分,其中风向标被用来测量风向,并把风向和机舱面对方向的偏差值传递给主控系统,主控系统再通过偏航系统使风电机组对风.测风系统的故障树如图 7 所示,逻辑门见表 9,基本事件及其模糊概率见表 10.

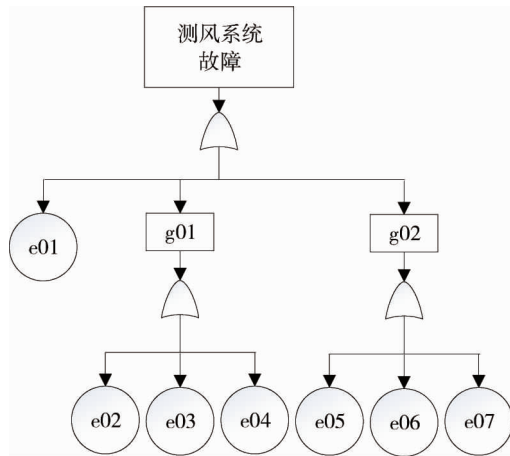


图 7 测风系统故障树

表 9 测风系统故障树逻辑门

逻辑门	代码	逻辑门	代码
测得风向与实际不符	g01	测得风速与实际不符	g02

表 10 测风系统故障树基本事件及其模糊概率

基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$
自然老化锈蚀	e01	(0.001,0.005 5,0.010)
风向标损坏	e02	(0.001,0.005 5,0.010)
风向标安装联接松动	e03	(0.000,0.000 5,0.001)
风向标接线故障	e04	(0.010,0.055 0,0.100)
风速仪损坏	e05	(0.001,0.005 5,0.010)
风速仪接线故障	e06	(0.010,0.055 0,0.100)
采集模块故障	e07	(0.001,0.005 5,0.010)

同理算得,测风系统故障发生的模糊概率为(0.023 8 0.126 9 0.222 7),基本事件的模糊重要度依次为[0.005 5 0.010 5 0.006 0 0.055 3 0.010 5 0.055 7 0.010 5],故障树各最小割集的灰色关联度依次为[0.735 3 0.767 5 0.738 3 0.791 3 0.767 7 0.791 1 0.767 7],测风系统故障最小割集灰关联序列为 $r_4 > r_8 > r_5 = r_7 > r_2 > r_3 > r_1$.

经过灰关联性分析得出结论,测风系统中风向标接线故障与测风系统故障的相关性最大,在设计过程中,应保障风向标接线端子的质量和可靠性.

2.7 机舱底座及塔架故障树分析

定子为风电机组的发电机和风轮提供支撑,定子主轴与机舱底座联接,然后通过偏航轴承与塔架连接.机舱底座与塔架为风电机组提供支撑,由于要在复杂工况下承受动、静载荷,塔架与机舱底座必须有足够的强度.机舱底座及塔架的故障树如图 8 所示,逻辑门见表 11,基本事件及其模糊概率见表 12.

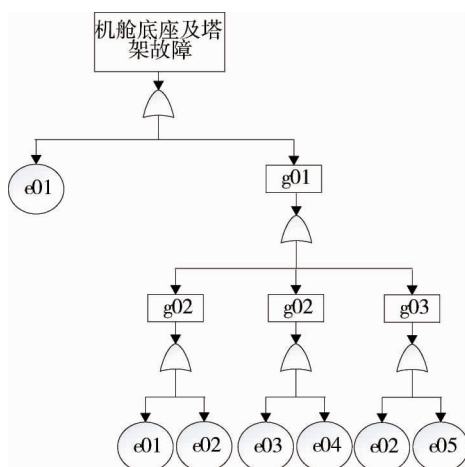


图 8 机舱底座及塔架故障树

表 11 机舱底座及塔架故障树逻辑门

逻辑门	代码	逻辑门	代码
塔筒故障	g01	塔筒疲劳裂纹损伤	g02
塔筒工作振动剧烈	g03	塔筒突然断裂	g04

表 12 机舱底座及塔架故障基本事件及其模糊概率

基本事件	代码	模糊概率 $\tilde{p}(a, m, b)$
交替载荷反复作用	e01	(0,0.001 0,0.002)
塔筒设计、加工缺陷	e02	(0,0.001 0,0.002)
风机工作部分振动剧烈	e03	(0,0.000 5,0.001)
塔筒安装联接松动	e04	(0,0.000 5,0.001)
存在较大的冲击载荷作用	e05	(0,0.000 5,0.001)

同理算得,机舱底座及塔架故障发生的模糊概率为(0.023 8 0.126 9 0.222 7),基本事件的模糊重要度依次为[0.002 0 0.002 0 0.000 5 0.000 5 0.000 5],故障树各最小割集的灰色关联度依次为[0.857 5 0.857 7 0.787 1 0.787 1 0.787 2],灰关联序列为 $r_2 > r_1 > r_5 > r_3 = r_4$.

经过灰关联性分析得到结论,支撑系统中塔架设计、加工的缺陷导致的故障与机舱底座及塔架故障的相关性最大.设计时,应进一步改善塔架的结构,提高加工精度、改善加工工艺.

3 结论

1) 以兆瓦级直驱式永磁同步风电机组为对象,建立了风轮系统、变桨系统、永磁同步电机、偏航系统、测风系统和机舱底座与塔架的故障树模型,全面、准确地表达了系统各组成单元之间的逻辑关系,为辨别直驱式永磁同步风电机组的故障模式,找出故障原因提供了参考.

2) 通过模糊灰关联分析法对建立的故障树进行了进一步的分析,得出了各关键子系统中最小割集与顶上事件的灰关联度,找出了系统的薄弱环节,并提出了相应的改进措施,为在设计环节改进系统可靠性和安全性提供指导.

参考文献:

- [1] Mostafaipoor A. Productivity and development issues of global wind turbine industry[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, 14(3): 1048–1058.
- [2] Crawford R H. Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2009, 13(26): 53–60.
- [3] Blanco M I. The economics of wind energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13: 387–401.
- [4] 席菁华, 董霞威. 风电运维市场痛点仍在[J]. *能源*, 2018(1): 55–57.
- [5] 王长路, 王伟功, 张立勇, 等. 中国风电产业发展分析[J]. *重庆大学学报*. 2015, 38(1): 148–154.
- [6] McMillan D, Ault G W. Condition monitoring benefit for onshore wind turbines: sensitivity to operational parameters[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2008, 2(1): 60–72.
- [7] Jichuan K, Liping S, Soares C G. Fault tree analysis of floating offshore wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2019, 133: 1455–1467.
- [8] 赵秋丽. 风电机组部件超温故障的 FMECA 分析及控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [9] Marquez F P G, Perez J M P, Marugan A P, et al. Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time[J]. *Renew Energy*, 2016, 87(2): 869–883.
- [10] 周新建, 李志强. 利用 FMECA 法的兆瓦级风力机故障模式分析[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(1): 108–116.
- [11] 周真, 马德仲, 于晓洋, 等. 模糊灰关联分析方法在故障树分析中的应用[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(3): 60–64.
- [12] Mitauo Y. The median for a L-R fuzzy number[J]. *Microelectron Relia*, 1995, 35(2): 269–271.
- [13] 李青, 陆廷金, 李宁萍, 等. 三角模糊数的模糊故障树分析及其应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(1): 56–59.
- [14] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法[J]. *统计研究*, 1995(3): 46–48.
- [15] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 62–63.