

计及运行环境影响的风力机可靠性建模

段贵钟¹, 秦文萍¹, 雷 达², 李胜文², 师景佳¹

(1. 电力系统运行与控制山西省重点实验室(太原理工大学), 太原 030024; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001)

摘 要: 根据风力机子系统的不同特性将其分成电力电子系统、机械系统和控制系统3个部分,考虑风速与温度分别对这3个部分的影响,提出计及运行环境影响的风电机组可靠性精确建模方法。为考虑机械系统故障率与风速之间的非线性相关性,该文引入Copula函数进行分析,并利用Copula函数生成相关性样本,从而建立机械系统可靠性模型。根据山西某风场实际风速与温度数据,以2 MW永磁直驱同步风电机组为例,分析不同月份中不同风速与温度情况下风电机组的故障率情况。研究结果表明,使用该文所提方法可得到风速、环境温度与风力机故障率之间的定量关系,从而得到更精确的风力机可靠性模型。

关键词: 风电机组; 故障率; 可靠性; 结温度; Copula函数; 相关性抽样

中图分类号: O325/TK79

文献标志码: A

0 引 言

截至2019年3月,中国海上和陆上风电累计装机容量已达到12.5万余台。风电场通常地处偏僻且风力机造价昂贵,导致风电机组维护和检修成本较高。因目前风力机可靠性模型过于简单,传统风电场可靠性建模时多取平均故障率为风力机的故障率,然而多变且恶劣的运行环境会对风力机故障率产生较大影响,平均故障率并不能很好地描述风电机组的故障情况,所以有必要深入研究风电机组可靠性问题。

传统风力机故障率是统计一段时间内风力机故障的状况,而后加权平均得到的。由于风力机运行环境恶劣且多变,不同的运行环境对风电机组故障率影响的差异较大。即便是同一风电场的风力机在不同时间段内的故障率也不相同,如果使用传统方法所得的平均故障率可能导致评估误差较大。文献[1-2]在建立风电机组的两状态模型时,使用平均故障率作为风力机的故障率。文献[3-4]虽然考虑了风速对风力机故障率的影响,但其假定风力机故障率与风速的二次方成正比,此种假定是否正确有待验证。文献[5]建立计及风速与风力机故障率相关性的风电场可靠性模型,却未考虑风速对风电机组子系统的影响。

风电机组子系统众多,主要有风叶、轮毂、变流器、发电机、齿轮箱、变桨偏航系统以及控制系统等。对可靠性建模而言,这些子系统是简单的串联关系,即任何一个子系统的故障都将引起风电机组的停运^[6]。由于不同子系统发生故障的原因不同,只用一种方法难以评估所有子系统的可靠性,不同的子系统需要适合自己特性的可靠性建模方法。因此,本文根据运行环境对风力机子系统的影响将其分成电力电子系统、机械系统与控制系统3个部分,分别使用适合其各自特性的方法进行可靠性建模,且运行环境重点考虑风速和温度,忽略湿度、盐雾等因素的影响。

电力电子系统为风力机变流器,这个部分包含大量二极管、IGBT等电力电子元件,本文采用FIDES Guide 2009^[7]提供的电力元件可靠性分析方法建立电力电子系统可靠性模型;机械系统包含受风速影响较大的子系统,利用Copula函数分析风速与机械系统故障率的关系,建立机械系统可靠性模型;控制系统为风力机的控制装置,由于其受外界环境影响较小^[8],使用控制系统的平均故障率建立控制系统可靠性模型。将上述3种系统故障率相加即为风力机的整机故障率,与平均故障率模型和现有文献所提方法相比较后发现,本文所提方法计算精度更高。由于修复时间相对于风力机运行时

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目(201603D112001); 山西省电力公司科技项目(SGTYHT/14-JS-188)

通信作者: 秦文萍(1972—),女,教授、博士生导师,主要从事电力系统可靠性分析、微电网运行与控制技术和微机保护等方面的研究。qinwenping1027@163.com

间非常小,在计算风力机故障率时可忽略修复时间对故障率的影响。最后,使用山西省电力公司电力科学研究院从山西某风场搜集的 2015~2016 年风速与温度数据,结合当地风电场同一时间段内 66 台风力机停运情况进行算例分析。

1 电力电子系统可靠性建模

风电机组的电力电子系统是风力机变流器。目前风力机变流器多使用背靠背变流器,变流器中包含大量电力电子元件。图 1 为背靠背变流器的拓扑结构。由文献[9]可知包含多个电力电子元件系统的故障率可表示为各个电力电子元件故障率之和。

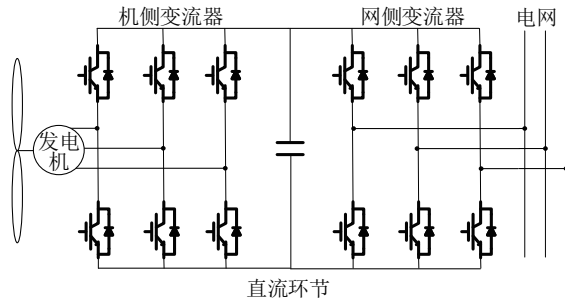


图1 背靠背变流器的拓扑结构

Fig. 1 Topology of back to back converter

则风力机变流器的故障率 λ_{inv} 计算公式为：

$$\lambda_{inv} = 6(\lambda_{ged} + \lambda_{gei} + \lambda_{grd} + \lambda_{gri}) + \lambda_{dc} \quad (1)$$

式中, λ_{ged} 、 λ_{gei} ——机侧变流器二极管和 IGBT 的故障率; λ_{grd} 、 λ_{gri} ——网侧变流器二极管和 IGBT 的故障率; λ_{dc} ——直流环节电容的故障率。

电力电子元件的故障情况除了受其本身质量影响外,很大程度由其结温决定,多变的运行环境会对变流器内部半导体元件的结温产生影响^[10]。电力电子元件结温受环境温度与功率损耗的影响,而功率损耗又由风速大小决定,因此,不同环境温度和风速将会对电力电子元件故障率产生影响。

FIDES Guide 提出与结温相关的电力电子元件故障率模型:

$$\lambda_{com} = (\lambda_{0Th} \pi_{Th} + \lambda_{0Tcy} \pi_{Tcy}) \pi_{in} \pi_{pm} \pi_{pr} \quad (2)$$

式中, π_{pm} ——元件制造质量对可靠性的影响,取值范围为 0.5~2.0,但一般取 1.6 或 1.7; π_{pr} ——控制和管理水平对可靠性的影响,取值范围为 1~8,但一般取 4; π_{in} ——过应力因子; π_{Th} 、 λ_{0Th} ——热力因子与热力因子对应的基础故障率; π_{Tcy} 、 λ_{0Tcy} ——热循环因子与热

循环因子对应的基础故障率。

1) 过应力因子的计算

过应力因子表示过应力对电力电子元件故障率的影响,计算公式为:

$$\pi_{in} = (\pi_{pl} \times \pi_{ap} \times \pi_{ru})^{0.511 \times \ln C_{sen}} \quad (3)$$

式中, π_{pl} ——元件在设备或系统中所处位置的影响因子,一般取值 1.6; π_{ap} ——元件在运行过程中使用者的使用水平、维护方法等对其可靠性的影响; π_{ru} ——控制方法等因素对元件可靠性的影响,一般取 1.7; C_{sen} ——固定参数,不同元件取值不同。

2) 热力因子的计算

热力因子表示温度大小对电力电子元件故障率的影响,计算公式为:

$$\pi_{Th} = \alpha e^{\beta \times [\frac{1}{293} - \frac{1}{(T+273)}]} \quad (4)$$

式中, α 、 β ——固定参数,不同元件取值不同; T ——结温度(对二极管和 IGBT 而言),电路板温度(对电容而言),电路板平均温度与元件相对于环境温升之和(对电感而言)。

电力电子元件的结温度无法直接测量,然而可通过不同风速下发电机的功率损耗与外界环境温度计算得到,具体计算过程见文献[11]。

3) 温度循环因子的计算

温度循环因子表示温度循环对电力电子元件故障率的影响,计算公式为:

$$\pi_{Tcy} = k \left(\frac{12 \times N_{an}}{t_{an}} \right) \times f(\Delta T) \times e^{1414 \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{b,max} + 273)} \right]} \quad (5)$$

式中, t_{an} ——所研究状态的时间; N_{an} ——温度循环次数; ΔT ——循环温度幅值; $T_{b,max}$ ——电路板最大温度。不同的元件, k 和 $f(\Delta T)$ 都不同^[7]。

本节所有参数计算过程和参数获得方法均可参见文献[7,11]。

2 机械系统可靠性建模

风力机的机械系统包括偏航系统、发电机、桨叶/叶片、刹车机构、液压装置、塔基、传动链、传感器和轮毂等子系统。这些部件的工作状况与风速大小密切相关。风速越快,风力机受到的风载荷越大,引发风力机机械系统故障^[3]的可能性就越大。因此风电机组机械系统故障率与风速之间一定存在相关性关系。本节通过 Copula 函数分析风力机机械系统故障率与风速之间的关系。

2.1 时间序列生成

由于在 Copula 分析过程中,故障率与风速是以时间序列的方式出现的,所以在建立 Copula 模型前需要生成对应的时间序列。

2.2.1 风功率指数时间序列

由于切入/切出风速的限制,风力机并不是一直处于运行状态。为找到一种参数来表现风力机在运行时的风速情况,文献[12]提出了风功率指数(power index, PI)来代替风速。相比于风速, PI 与风力机的风载荷有着更直接的联系。

第 i 个月的风功率指数 PI_i 可定义为:

$$PI_i = \frac{P_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i} \quad (6)$$

式中, m ——所统计的月份数; P_i ——第 i 个月的平均输出功率。

$$P(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \\ \frac{P_r(v^3 - v_{ci}^3)}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (7)$$

$$P_i = \int_0^\infty P(v)f(v)dv \quad (8)$$

式中, $P(v)$ ——风力机的出力与风速的关系函数; $f(v)$ ——风速概率密度函数; v_{ci} 、 v_{co} ——切入、切出风速; v_r ——额定风速; P_r ——额定功率。

将山西某风电场 2016 年风速转化成 PI 后,如图 2 所示。从图 2 可看出 8、9 月份风速对应的 PI 值更小了,原因在于这 2 个月风速处于切入风速以下的情况较多。而 3、4 月份风速虽相差不大,但 PI 值相差较大,原因在于 4 月份风速大于切出风速的情况较多。

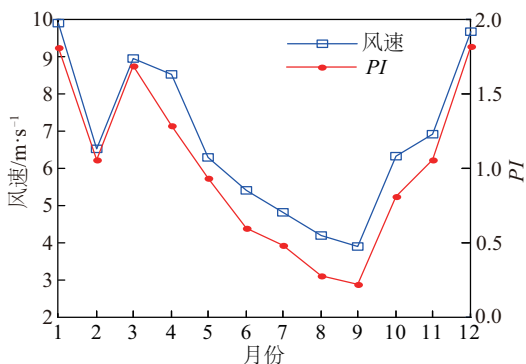


图2 风速与 PI 的关系

Fig. 2 Wind speed versus PI

2.2.2 故障率时间序列

第 i 个月机械子系统故障率计算公式为:

$$\lambda_i = \frac{n_i}{NT_i/8760} \quad (9)$$

式中, n_i ——时间 T_i 内的故障次数; N ——所统计的风力机总数。

利用式(9)可计算每个月风力机机械子系统的故障率。当风电场风力机足够多、搜集的数据足够时,可利用 Copula 函数分析每个机械子系统与风速的相关性关系。但单个机械子系统故障率太小,若风电场风力机不够多、搜集数据不够,将难以进行数据分析,最终得到的结果并不一定准确^[13],这种情况可将上述机械系统子系统合成一个整体,组成机械系统进行 Copula 函数数据分析。

山西某风电场 2015~2016 年 66 台风力机历史数据生成 PI 与每月机械系统故障率如图 3 所示。

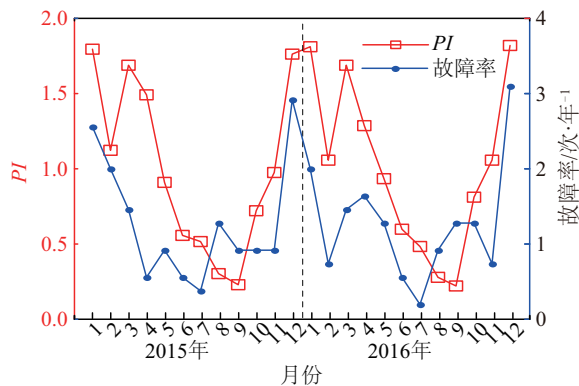


图3 2015~2016年 PI 与机械系统故障率情况

Fig. 3 Profile of mechanical system failure and PI in 2015-2016

2.2 Copula模型建立

2.2.1 Copula 函数的概念

Copula 是一种将几个随机变量联合分布函数与其各自边缘分布函数连接到一起的函数,所以又称作连接函数。

假设风电机组机械故障率(wind turbine generator failure rate, WTGFR)的边缘分布为 $F_1(x_1)$, PI 的边缘分布为 $F_2(x_2)$, 而 $F(x_1, x_2)$ 为机械故障率与 PI 的联合分布函数,则有且只有一个 $C(u_1, u_2)$ 满足:

$$F(x_1, x_2) = C(F_1(x_1), F_2(x_2)) \quad (10)$$

常用的 Copula 函数主要有正态 Copula、 t -Copula、Gumbel-Copula、Clayton-Copula 以及 Frank-Copula^[14]。为更好地描述机械故障率与 PI 之间的关系,需要根据

变量不同的相关性特点选择适合的 Copula 模型。

2.2.2 确定 Copula 函数

在传统的 Copula 函数建立中,使用参数分布法确定风速与机械系统故障率边缘分布模型。然而,参数分布确定的分布函数很难准确反映实际样本的分布情况,而非参数核密度法无需事先确定分布函数的类型,可直接反映样本的分布情况,更加精准。

假设得到一组观测值: x_1, x_2, \dots, x_n , 设 $f(x)$ 为变量 x 的概率密度函数,则 $f(x)$ 对应的非参数核密度估计为:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (11)$$

式中, n ——样本容量; h ——带宽; $K(\cdot)$ ——核函数。

确定 PI 与机械子系统故障率边缘分布后,可以建立 5 种常用待选 Copula 函数模型,使用最大似然估计法计算 Copula 函数模型的未知参数。

在确定最合适的 Copula 模型时,本文通过计算经验 Copula 与待选 Copula 函数之间的平方欧式距离法进行选择,欧式距离越小说明拟合度越高^[15]。

欧式距离计算公式为:

$$d(C, C_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [C(u_i, v_i) - C_n(u_i, v_i)]^2} \quad (12)$$

式中, C, C_n ——待选 Copula 与经验 Copula; (u_i, v_i) ——二维 PI 与机械子系统故障率总体的样本。

经验 Copula 计算公式为:

$$C_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, F_1(x_1) \leq u, F_2(x_2) \leq v \quad (13)$$

式中, $F_i(\cdot)$ ——变量 x_i 的经验分布函数; $I(\cdot)$ ——示性函数,若样本满足括号内条件,示性函数值为 1,否则,示性函数值为 0。

2.2.3 Copula 函数产生相关性样本

使用得到的 Copula 函数可以产生满足相关性的 PI 与风力机机械系统故障率样本^[16]。首先使用确定的二维 Copula 联合概率分布函数生成二元随机数 $U=(u_1, u_2)$, 在生成一定规模的二元随机数以后,将得到的随机向量根据 PI 与风力机机械系统故障率各自边缘分布进行逆变换,可得到计及相关性的 PI 与风力机机械系统故障率模拟样本数据。

与其他考虑相关性的方法相比,在建立机械系统故障率与 PI 之间关系时,使用 Copula 函数具有以下优势:1)边缘分布不受限制, Copula 函数可以将不同的分布函数连接起来,刻画出变量之间的联合分布特性;2) Copula 函数可以描述变量之间的非线性关系;3) Copula

函数具有尾部相依性。

2.3 Copula 函数与相关性系数

使用相关性参数可描述机械系统故障率与 PI 之间相关性的关系,通常使用 Pearson 线性相关系数 γ 来进行描述:

$$\gamma = \frac{\text{cov}(U, V)}{\sigma(U)\sigma(V)} \quad (14)$$

式中, $\text{cov}(U, V)$ ——协方差; $\sigma(U), \sigma(V)$ ——标准差; U, V ——风力机机械系统故障率和风功率指数 PI 的边缘分布。

但 γ 只能表现变量间的线性关系,而 Kendall 秩相关系数 τ 可表现变量之间的非线性关系。Copula 函数与秩相关系数间有着非常直接的数学关系,可利用 Copula 函数直接计算秩相关系数,计算公式为:

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u, v) dC(u, v) - 1 \quad (15)$$

3 风力机可靠性模型

综上所述,建立计及运行环境影响的风力机可靠性模型步骤如下:1)考虑风速和温度对电力电子系统故障率的影响,利用第 1 节建立的变流器可靠性模型计算得到风力机变流器的故障率;2)考虑风速对风力机机械系统的影响,利用 Copula 函数得到风力机机械系统的故障率;3)由于控制系统受风速与温度影响不大,使用平均故障率作为其故障率;4)将上述 3 个可靠性模型所得故障率相加即为整个风力机的故障率。建模过程如图 4 所示。

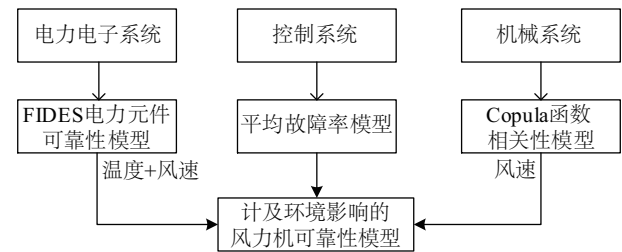


图4 风力机可靠性模型

Fig. 4 Reliability mode of WTG

4 算例分析

本文以 2 MW 永磁直驱同步风电机为例,结合山西某地风电场实际数据,建立计及运行环境对风力机影响的风力机可靠性精确模型。

4.1 电力电子系统故障率

利用式(1)~式(5)得到变流器故障率与风速和环

境温度的关系如图 5 所示。

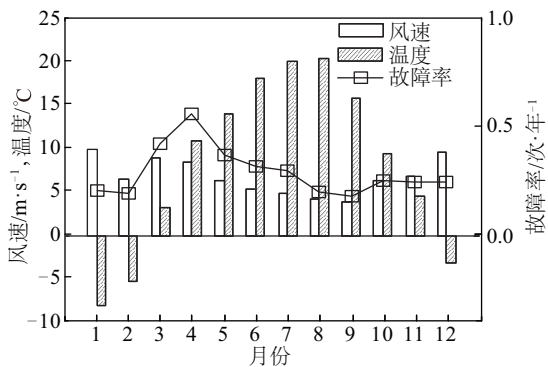


图5 变流器故障率与风速、温度的关系

Fig. 5 Converter failure versus wind speed and temperature

由图 5 可知在 4 月份变流器故障率最高,原因是 4 月份风速与温度均较高。而在 1 月份和 12 月份,虽然风速较高但环境温度却较低,所以故障率并不是最高的。同样地,7、8 月份虽然环境温度较高,风速却小,故障率也不是最高。

图 6 为实际变流器故障率与计算所得变流器故障率的比较曲线图。由图 6 可知,计算所得的变流器故障率曲线与实际变流器故障情况基本一致,验证了本文所用方法的正确性。

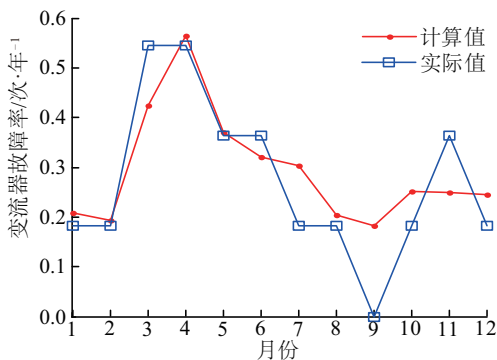


图6 变流器故障率情况

Fig. 6 Profile of converter failure rate

4.2 机械系统故障率

利用 Copula 函数结合风电场历史数据,确定机械系统子系统与 PI 的相关性关系如表 1 所示。本文将上述子系统组成机械系统进行 Copula 函数数据分析,表 1 给出机械系统故障率与 PI 之间的相关性关系,可看出线性相关性系数为 0.6359,非线性相关性系数为 0.4683,即机械系统故障率与 PI 间相关性较强且线性相关性强于非线性相关性。本节将详细描述模型建立过程。

表 1 故障率与相关系数

Table 1 Failure and correlation coefficient

项目	故障率/ 次·年 ⁻¹	Pearson 线性相关系数	Kendall 秩相关系数
变桨/桨叶	0.2803	0.4422	0.2643
传感器	0.2350	0.2821	0.1767
偏航系统	0.1818	0.4248	0.3597
液压装置	0.1818	0.2107	0.1986
轮毂	0.1212	0.2253	0.1852
刹车机构	0.1136	0.6029	0.5133
传动链	0.0985	0.4844	0.3222
发电机	0.0303	0.2457	0.2303
塔基	0.0227	0.3016	0.3878
机械系统	1.2652	0.6359	0.4683

4.2.1 Copula 函数的选取

根据式(12)分别计算 5 种待选 Copula 函数与经验 Copula 函数之间的欧式距离见表 2。

表 2 Copula 函数参数估计和欧氏距离

Table 2 Parameter estimation and Euclidean distance

Gaussian	t-Copula	Gumbel	Clayton	Frank
0.0158	0.01335	0.0119	0.0293	0.0146

从表 2 可知 Gumbel-Copula 函数具有最小的欧氏距离,能更好地描述 PI 与风力机机械系统故障率之间的相关性,其联合概率分布函数为:

$$F(u,v)=\exp(-[(-\ln u)^{1/\theta}+(-\ln v)^{1/\theta}]^{\theta}) \quad (16)$$

利用极大似然估计法计算所得的 Gumbel-Copula 函数系数 θ 为 1.8809,所建立 Copula 模型如图 7 所示。由图 7 可知所建立的 Copula 函数模型上尾高,下

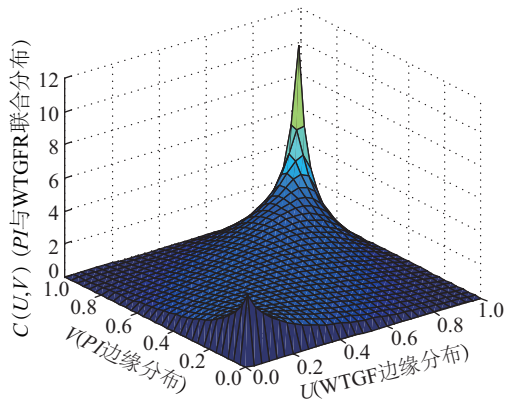


图7 PI 与机械系统故障率的 Gumbel-Copula 分布密度图

Fig. 7 Density function of PI and mechanical system failure based on Gumbel-Copula

尾低,也就是说风力机机械系统故障率与 PI 具有在上尾部较集中的特点,即机械系统出现故障情况集中在风速高时。

4.2.2 Copula 函数样本的产生

生成计及相关性的 PI 与风力机机械系统故障率的模拟样本数据,画出 PI -机械系统故障率散点图如图 8 所示。

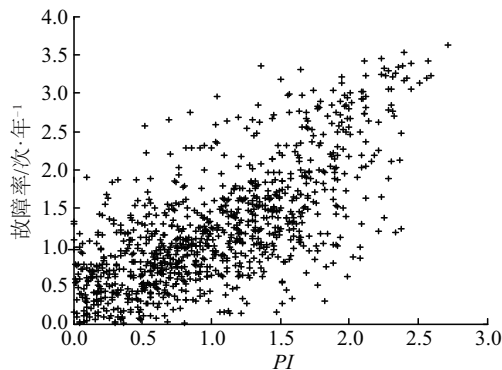


图 8 PI 与机械系统故障率相关性散点图

Fig. 8 Correlative scatter plot of PI and mechanical system failure rate

根据风电场 2016 年每个月的 PI 情况,挑选每个月 PI 对应的样本组成一年的风力机机械系统故障率样本,重复 500 次,取每月故障率平均值后如图 9 实线所示。从 500 次中任意选 10 次绘制曲线如图 9 虚线所示。

4.3 风力机的故障率

将机械系统平均故障率、电力电子系统故障率、控制系统故障率这 3 项相加,即可得到风力机在一年内不同月份的故障情况,其中控制系统故障率取平均故障率 0.651。风力机故障率情况如图 10 所示,从图 10 可知计算所得风力机故障率情况与实际风力机故障率情况基本一致,验证了本文所提方法的有效性。同时还可看

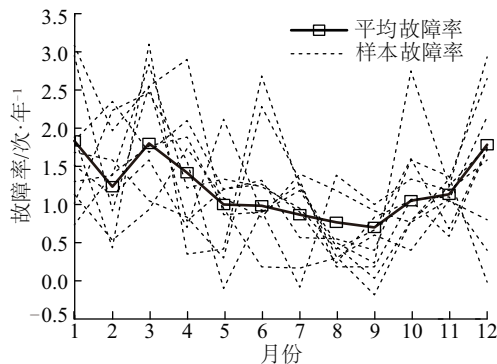


图 9 机械系统故障率样本

Fig. 9 Samples of mechanical system failure

出不同月份风力机的故障率情况差异较大,如 1、3、4、12 月份风力机的故障率较高,而 7~9 月份故障率较小。

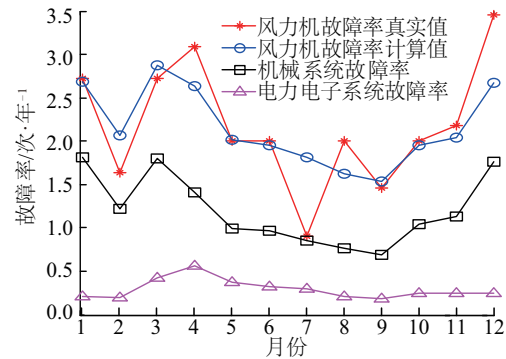


图 10 整个风力机的故障率

Fig. 10 Whole wind turbine failure

仿真曲线在某些月份与实际值有一定的误差,原因除了风速与温度外,其他因素也会对风力机故障率产生影响,如风电场每年的定期维护、电网对风电场的限电、空气湿度等。此外还有一些故障与风速温度无关,如液压站及油管漏油故障等。所以在进行可靠性分析时也应同时考虑风电场定期维护时间安排以及电网对风电场限电等因素的影响。

4.4 风力机可靠性分析结果对比

将本文所提方法与文献[5]所用方法进行对比。由于文献[5]是建立风速与风力机整机故障率之间的相关性关系,因此首先与本文机械系统故障率所建模型的相关性参数比较如下:

由表 3 可知,使用文献[5]方法得到的风速与风力机整机故障率的线性相关性参数小于本文方法得到的线性相关性参数,而非线性相关性参数略有减小。原因在于本文在生成时间序列时,使用与风载荷联系更紧密的 PI 代替风速。此外,从风力机子系统中挑选出受风速影响更大的机械系统。

表 3 相关系数对比

Table 3 Comparison of correlation coefficient

方法	Pearson 线性 相关系数	Kendall 秩 相关系数
文献[5] 可靠性模型	0.5653	0.4579
本文机械系统 可靠性模型	0.6359	0.4683

利用回归分析^[17]评估模型计算结果的精度,根据文

献[5]与本文方法的预测结果分别绘制残差图,如图 11 所示。

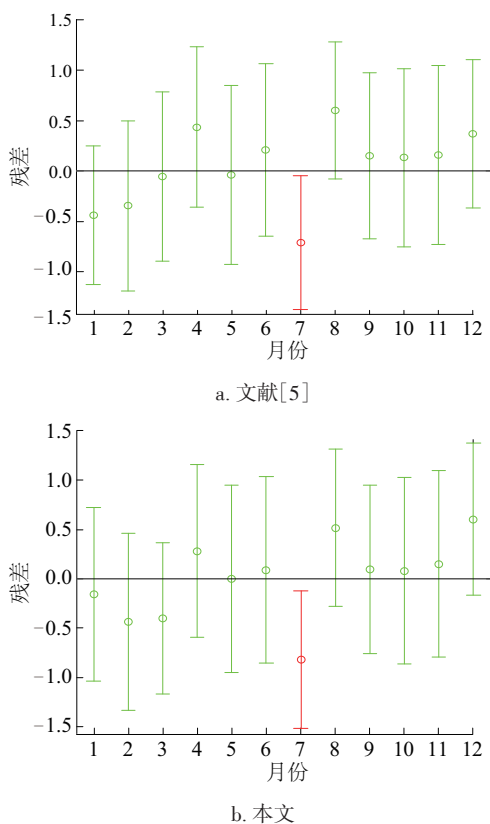


图 11 文献[5]与本文方法的风力机可靠性方法残差图
Fig. 11 Residual case order plot of this paper and literature[5]

利用残差图可以看出数据残差距离零点的距离,而若残差的置信区间包含零点,则说明预测数据可以很好地反映原始数据,否则可视为异常数据。从图 11a、图 11b 可知 2 种方法都显示 7 月份预测数据为异常数据,原因是该风电场 7 月份安排进行每年的定期维护,影响了风力机故障监测情况。而在剔除 7 月份数据后,2 种方法拟合度优先可决系数如表 4 所示。

表 4 可决系数对比

Table 4 Comparison of decisive coefficient

方法	可决系数
文献[5]可靠性模型	0.7346
本文风力机可靠性模型	0.7618

可决系数为预测数据与实际数据相关系数的平方,可决系数越大说明拟合度越高。由表 4 可知本文风力机可靠性模型可决系数更大,相比于文献[5],本文模型更精确。

5 结 论

本文根据运行环境对风力机子系统的影响将风电机组分成电力电子系统、机械系统、控制系统 3 部分。以 FIDES Guide 电力电子可靠性模型分析风速、温度对风力机电力电子系统故障率的影响;利用风功率指数 PI 代替风速,使用 Copula 函数建立风力机机械系统故障率与 PI 之间的关系;控制系统使用平均故障率模型。

1)在风电机组运行过程中,风速与温度对风力机电力电子系统故障率造成较大影响,当环境温度越高、风速越大时,电力电子系统故障率越高。

2)风电机组机械系统故障率与风速密切相关,风速越大,风力机机械系统故障率越高。

3)同时考虑风速与温度对风力机的影响,建立计及运行环境影响的风力机可靠性模型,可更准确地评估风力机在不同环境下的故障率情况。

[参考文献]

- [1] 杨苏,袁越,陆丹,等.基于风速-负荷联合状态的发输电系统可靠性评估研究[J].可再生能源,2016,34(7):1024-1031.
YANG S, YUAN Y, LU D, et al. Reliability assessment of generation and transmission systems considering joint state of wind speed and load[J]. Renewable energy resources, 2016, 34(7): 1024-1031.
- [2] 吴林伟,张建华,刘若溪.考虑风电机组故障的风电场可靠性模型及其应用[J].电力系统自动化,2012,36(16):31-35.
WU L W, ZHANG J H, LIU R X. A wind farm reliability model considering wind turbine faults and its application[J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(16): 31-35.
- [3] 蒋程,张建华,刘先正,等.计及运行工况的风电机组停运模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(24):112-116.
JIANG C, ZHANG J H, LIU X Z, et al. Wind turbine outage model based on operation conditions [J]. Power system protection and control, 2013, 41(24): 112-116.
- [4] 蒋程,刘文霞,张建华,等.含风电接入的发输电系统风险评估[J].电工技术学报,2014,29(2):260-270.
JIANG C, LIU W X, ZHANG J H, et al. Risk

- assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.
- [5] 陈凡, 卫志农, 张小莲, 等. 计入风速与风电机组故障相关性的风电场可靠性建模及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2900-2908.
- CHEN F, WEI Z N, ZHANG X L, et al. Reliability modeling of wind farms incorporating correlation between wind speed and failure of wind turbines and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2900-2908.
- [6] 曾军, 陈艳峰, 杨苹, 等. 大型风力发电机组故障诊断综述[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 1-11.
- ZENG J, CHEN Y F, YANG P, et al. Review of fault diagnosis methods of large-scale wind turbines[J]. Power system technology, 2018, 42(3): 1-11.
- [7] FIDES group. Reliability methodology for electronic systems[R]. FIDES guide 2009(Edition A), September 2010.
- [8] TAVNER P J, EDWARDS C, BRINKMAN A, et al. Influence of wind speed on wind turbine reliability[J]. Wind engineering, 2006, 30(1): 55-72.
- [9] HIRSCHMANN D, TISSEN D, SCHRÖDER S, et al. Reliability prediction for inverters in hybrid electrical vehicles[J]. IEEE transactions on power electronics, 2007, 22(6): 2511-2517.
- [10] 杨珍贵, 周维维, 杜雄, 等. 基于器件的结温变化评估风力机中参数差异对网侧变流器可靠性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 41-49.
- YANG Z G, ZHOU L W, DU X, et al. Effects of different parameters on reliability of grid-side converters based on varied junction temperature of devices in wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 41-49.
- [11] LI W Y. Application of risk evaluation to renewable energy systems[M/OL]. Wiley-IEEE Press, 2014.
- [12] SU C, JIN Q, FU Y Q. Correlation analysis for wind speed and failure rate of wind turbines using time series approach[J]. Journal of renewable and sustainable energy, 2012, 4(3): 10.1063/1.4730597.
- [13] 何禹清, 彭建春, 孙芊. 考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 16-22.
- HE Y Q, PENG J C, SUN Q. Fast algorithm for distribution system reliability evaluation considering the random energy output of wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 16-22.
- [14] 卢锦玲, 於慧敏. 基于混合 Copula 的风光功率相关结构分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 3188-3194.
- LU J L, YU H M. Dependence structure analysis of wind and PV power based on hybrid copula[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(11): 3188-3194.
- [15] 张玥, 王秀丽, 曾平良, 等. 基于 Copula 理论考虑风电相关性的源网协调规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 102—108.
- ZHANG Y, WANG X L, ZENG P L, et al. Copula theory based generation and transmission co-planning considering wind power correlation [J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(9): 102-108.
- [16] 李春燕, 杨强, 魏蔚, 等. 计及风速与负荷相关性的配电网重构方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 148-153, 160.
- LI C Y, YANG Q, WEI W, et al. Distribution network reconfiguration considering correlation between wind-speed and load [J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(2): 148-153, 160.
- [17] 钱政, 裴岩, 曹利霄, 等. 风电功率预测方法综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1047-1060.
- QIAN Z, PEI Y, CAO L X, et al. Review of wind power forecasting method[J]. High voltage engineering, 2016, 42(4): 1047-1060.

WIND TURBINE RELIABILITY ANALYSIS CONSIDERING OPERATING ENVIRONMENT

Duan Guizhong¹, Qin Wenping¹, Lei Da², Li Shengwen², Shi Jingjia¹

(1. *Shanxi Key Laboratory of Power System Operation & Control(Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, China;*

2. *State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China*)

Abstract: According to the different characteristics of WTG subsystem, this paper divides the WTG into three parts: power-electronic system, mechanical system and control system. In order to describe the nonlinear relationship between the failure rate of WTG mechanical system and the wind speed, the Copula function is used to study the correlation relation and generate correlation samples. This paper finds a wind turbine reliability analysis method which considers the influence of wind speed and temperature for the three parts. At the end of this paper, according to the historical foundation of wind farm, the case analysis the 2 MW permanent magnet synchronous generator failure in the different wind speed and temperature. Research result shows that using the method of this paper can get the quantitative relationship between wind speed, temperature and the WTG failure rates. And this paper provides a method more accurate for WTG reliability analysis.

Keywords: WTG; failure rates; reliability; junction temperature; Copula function; correlation sample