

考虑多重不确定性的光伏支撑体系动力可靠性分析^{*}

DYNAMIC RELIABILITY ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SUPPORT SYSTEM CONSIDERING MULTIPLE UNCERTAINTIES

钟伟^{**1} 杨欢红^{***2} 马向东¹ 黄龙安¹

(1. 国网浙江义乌市供电有限公司, 义乌 322000)

(2. 上海电力大学, 上海 200090)

ZHONG Wei¹ YANG HuanHong² MA XiangDong¹ HUANG LongAn¹

(1. State Grid Zhejiang Yiwu Power Supply Company, Yiwu 322000, China)

(2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

摘要 提出了考虑多重不确定性的光伏支撑体系(Photovoltaic Support System, PSS)随机动力可靠性分析方法。首先,构建了基于概率密度演化理论(Probability Density Evolution Method, PDEM)的光伏支撑体系可靠性分析模型,包括概率守恒方程、基本控制方程和密度演化方程;然后,建立了光伏支撑体系的有限元分析模型,包括结构受力模型、荷载组合形式、网格划分算法等。仿真模型中考虑了结构所受荷载与结构本身的随机性,共计6个随机变量和44个代表点。为提升算法分析效率,提出了Abaqus-PDEM的联合仿真算法,仿真分析表明,光伏支撑体系的失效模式主要为应力控制和位移控制两种,后者影响更为明显,基本荷载组合工况下的可靠度为0.928。随着风力等级的提高,结构可靠性逐渐降低,在高速风区(大于40 m/s),结构本身的不确定性会高估结构的可靠性水平,在设计中应予以关注。

关键词 光伏支撑体系 荷载组合 概率密度演化理论 多重不确定性 有限元模型 可靠性分析

中图分类号 TM711

Abstract Dynamic reliability analysis method of photovoltaic support system (PSS) was proposed considering the multiple uncertainties. Firstly, the reliability analysis model of PSS was constructed based on the probability density evolution method (PDEM), including the probability conservation equation, basic governing equation and density evolution equation. Then, the finite element analysis model of PSS was built, including the structural stress model, load combination form, and mesh generation algorithm. In simulation, the randomness in load combination and structures were incorporated, in which consists of six basic random parameters and 44 representative systems. The solution efficiency was improved by the joint simulation of PDEM and Abaqus. Results show that stress and displacement are two failure modes of PSS, and the influence of the latter is more obvious. The reliability index under the basic load combination condition is 0.928. As wind speed increases, the structural reliability decreases. In the high-speed range larger than 40 m/s, the uncertainty in structure itself will overestimate the reliability level of PSS, which should be paid attention in design.

Key words Photovoltaic support system; Load combination; Probability density evolution method; Multiple uncertainties; Finite element model; Reliability analysis

Corresponding author: YANG HuanHong, E-mail: yang196407@126.com, Fax: +86-21-35303130

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777119).

Manuscript received 20220904, in revised form 20221112.

0 引言

光伏发电系统作为新型电力系统之一,已成为国内外不可阻挡的研究发展趋势,得到了政府部门、学术界和工程界的极大关注^[1-2]。随着我国城镇化进程的

加快,光伏产业迅猛发展,在清洁可持续性能源推广方面占据重要地位。然而,光伏支撑系统在运行过程中将受到多种灾害天气影响,包括强风、雷电、冰雹等,严重威胁设备安全^[3-4]。此外,由施工安装质量和运维质量问题引发的日常事故层出不穷,给设备推广带来了

^{*} 20220904 收到初稿, 20221112 收到修改稿。国家自然科学基金项目(51777119)资助。

^{**} 钟伟,男,1971年生,浙江金华人,汉族,国网浙江义乌市供电有限公司高级工程师,主要研究方向为运检一体化及数字化智能运检技术。

^{***} 杨欢红(通信作者),女,1965年生,浙江诸暨人,汉族,上海电力大学副教授,主要研究方向为电力系统运行可靠度。

不利影响。因此,提高光伏支撑结构的可靠性成为近年来广受关注的课题。

传统的光伏系统可靠性研究主要集中在系统功能方面,通过对光伏系统的发电机制进行模拟,以输出功率、出口电压等为目标函数,考虑天气尤其是日照的不确定性构建可靠性分析模型^[5-7]。这里指出,随着光伏系统的运行,其支撑结构亦会出现安全问题,进而降低系统可靠性。尽管这方面的研究不多,但已逐步得到重视,已有研究主要集中在组件的受力行为分析及性能退化模拟方面^[8-10]。然而,影响光伏支撑系统可靠性的因素较为复杂,既包括组件本身的随机性,又包括运行环境的随机性,且两者在某些场景中以耦合的方式出现,进一步提高了可靠性分析模型的复杂性。

本文以光伏支撑系统为研究对象,考虑组件和运行环境等多重不确定性的影响,对光伏支撑结构的可靠性进行建模。模型求解方面,考虑到模型关联的不确定性因素较多,难以用传统方法给出高效且准确的结果。例如蒙特卡洛模拟方法存在 NP-Hard 问题,随着维度的增加,求解时间呈几何级数增加^[11]。矩方法需要假定随机变量的分布形式并给出解析表达式,且适用场景有限。为此,本文采用概率密度演化理论(Probability Density Evolution Method, PDEM),通过构造目标函数的概率密度演化方程,结合 Abaqus 有限元分析方法,给出最不利位置的概率分布函数,最后用直接积分法计算可靠度。上述方法可以显著提高模型求解效率和准确性,为光伏支撑系统的选型和维护提供理论指导。

1 概率密度演化理论(PDEM)

PDEM 的基础是概率密度守恒原理,可表述为任一保守的随机系统在演化过程中既没有随机因素的消失,又没有新的随机因素加入。该原理的基本数学表述为^[12]

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \int_{\Omega} p_X(X, t) dX = \\ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left[\int_{\Omega_t + \Delta t} p_X(X, t + \Delta t) dX - \int_{\Omega_t} p_X(X, t) dX \right] = \\ \frac{D}{Dt} \int_{\Omega_0} p_{X_0}(X_0, t) dX_0 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, Ω_0 、 Ω_t 分别为状态向量 X 在初始时刻和 t 时刻的积分区域; $p_X(X, t)$ 为 X 的概率密度函数; X_0 为 X 的初始值。

若给定一随机动力系统,其控制方程为

$$M(\Theta)\ddot{X} + C(\Theta)\dot{X} + G(\Theta, X) = IF(\Theta, t) \quad (2)$$

式中, M 、 C 、 G 、 I 和 F 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、恢复力向量、激励影响矩阵和激励时间向量; X 为状态向量,亦称为目标函数向量; Θ 为该系统所有基本

随机变量组成的基本随机向量。

系统的初始条件为

$$X(t_0) = X_0, \dot{X}(t_0) = \dot{X}_0 \quad (3)$$

对于上述系统,在引入随机向量后,式(1)中表述的概率密度守恒原理亦可表示为

$$\frac{D}{Dt} \int_{\Omega_t \times \Omega_\Theta} p_{X_\Theta}(X, \Theta, t) dX d\Theta = 0 \quad (4)$$

考虑到 $\Omega_t \times \Omega_\Theta$ 的任意性,式(4)可进一步表述为

$$\frac{\partial p_{X_\Theta}(X, \Theta, t)}{\partial t} + \dot{X}(\Theta, t) \frac{\partial p_{X_\Theta}(X, \Theta, t)}{\partial X} = 0 \quad (5)$$

$X(t)$ 的联合概率密度函数为

$$p_X(X, t) = \int_{\Omega} p_{X_\Theta}(X, \Theta, t) d\Theta \quad (6)$$

由上述推导过程可知,广义概率密度演化方程既包含了物理方程,又包含了密度演化方程,求解过程较为复杂,仅对一些简单问题可获得解析解,大部分工程问题需通过数值方法求解。本文采用代表点法进行求解^[13]。

在基本随机向量空间 Θ 中选择离散代表点,记为 $\theta_r = (\theta_{1r}, \theta_{2r}, \dots, \theta_{nr})$, n 为基本随机变量个数, $r = 1, 2, \dots, R$, R 为代表点个数。每个代表点的赋得概率为

$$p_r = \int_{V_r} p_{\Theta}(\theta) d\theta \quad (7)$$

式中, V_r 为代表性体积。

对于给定的 $\Theta = \theta_r$,式(5)中不再存在密度演化过程,仅为一定确定性物理系统,可通过数值分析等手段进行求解,从而获得对应的状态变量 X_r 及速度向量

$\dot{X}_r$ 。类似的,分别对 $r = 1, r = 2, \dots, r = R$ 共计 R 个确定性系统进行求解,从而获得 R 个解。此时概率密度演化方程可表示为

$$\frac{\partial p_{X_\Theta}(X, \theta_r, t)}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \dot{X}_i(\theta_r, t) \frac{\partial p_{X_\Theta}(X, \theta_r, t)}{\partial X_i} = 0 \quad (8)$$

式(8)可利用有限差分法进行求解,将所有 $p_{X_\Theta}(X, \theta_r, t)$, $r = 1, 2, \dots, R$ 进行累计求和,即可获得式(6)的数值解,表达式为

$$p_X(X, t) = \sum_{r=1}^R p_{X_\Theta}(X, \theta_r, t) \quad (9)$$

2 光伏支撑系统有限元模型

2.1 结构布置及尺寸

光伏支撑系统为典型的主次梁结构,结构布置如图1所示,主要受力部件包括主梁、次梁、斜撑、光伏板、钢支柱和混凝土支座。其中,主梁、次梁、斜撑均采用 Q235B 级冷弯薄壁型钢,截面形式及尺寸如表1所

示;钢支柱采用 H235B 级圆钢管,直径 170 mm;混凝土支座采用 C30 级混凝土。光伏组件安装采用固定倾角的方式,倾斜角度为 15°,底端距离地面 2 m。

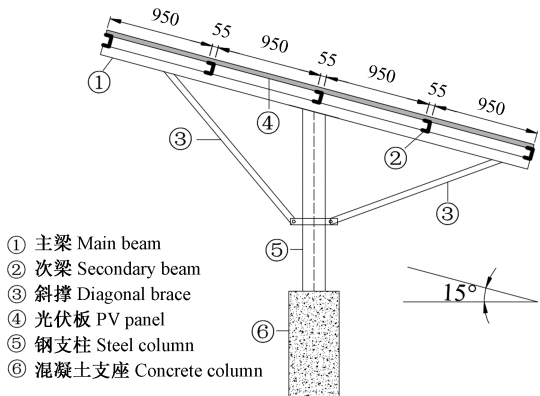
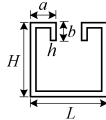


图 1 光伏支撑结构模型

Fig. 1 Photovoltaic support structure model

表 1 截面形式及尺寸

Tab. 1 Section form and size

截面形式 Section form					
物理量 Physical quantity	L/ mm	H/ mm	a/ mm	b/ mm	h/ mm
主梁 Main beam	50	45	12	10	3
次梁 Secondary beam	42	40	10	8	2.5
斜撑 Diagonal brace	35	30	8	6	2

2.2 荷载组合

光伏支撑系统在结构响应分析时主要考虑光伏板自重、风荷载、雪荷载三种荷载形式^[14]。

2.2.1 光伏板自重

根据单块光伏板及数量计算获取,实测单块光伏板自重为 $G_p=0.17\text{ kN/m}^2$ 。

2.2.2 风荷载

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009),风荷载标准值 W_k 的计算式为

$$W_k = \beta_z u_s u_z \omega_0 \quad (10)$$

式中, β_z 为风振系数; u_s 为体型系数; u_z 为风压高度变化系数; ω_0 为基本风压。根据《光伏电站设计规范》(GB 50797) 的规定,地面光伏组件的体型系数可取 $u_s=1.3$ 。由于光伏板底端距离地面小于 5 m,所属场地为 B 类,所以风压高度变化系数取 $u_z=1.0$ 。不考虑风振效应的影响,即 $\beta_z=1.0$,基本风压 $\omega_0=0.35\text{ kN/m}^2$ 。

2.2.3 雪荷载

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009),雪荷载标

准值 S_k 的计算式为

$$S_k = \mu_r s_0 \quad (11)$$

式中, μ_r 为屋面积雪分布系数,取 0.52; s_0 为基本雪压,取 0.55 kN/m^2 。

2.2.4 荷载组合

考虑到工程实际中要求光伏支架在 7 级强风作用下保持较高的可靠性,因此,本文考虑风荷载组合效应,荷载组合按式(12)计算:

$$S_d = 1.2G_p + 1.4W_k + 1.4 \times 0.7S_k \quad (12)$$

式中,1.2、1.4、0.7 为分项系数,根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009) 确定。

2.3 有限元模型

实际工程中的光伏体系可达数十跨,其全面建模是十分复杂的。考虑到相邻跨距间结构受力存在相似性,可进行简化建模^[15]。本文选择相邻两跨进行有限元建模,如图 2 所示。本文采用 Abaqus 有限元分析软件对结构进行力学分析,混凝土支座和钢支柱采用线性减缩积分单元 (C3D8R),主次梁和斜撑采用梁单元 (B33H)。网格划分时,由于截面较为规则,这里主要采用六面体单元 (Hex-dominated) 并利用扫掠网格划分技术进行网格划分,同时使用中性轴 (Medial Axis) 算法提高网格划分质量。网格尺寸方面,本文兼顾计算精度与计算时间两方面的影响,经预研究确定了梁、钢支柱和混凝土支柱的网格尺寸分别为 200、60、100 mm,确保在可接受的精度下提高计算效率。在此情形下,一个模型的计算用时约为 15 min,一组工况的可靠性分析耗时约为 12 h。网格划分结果如图 3 所示。

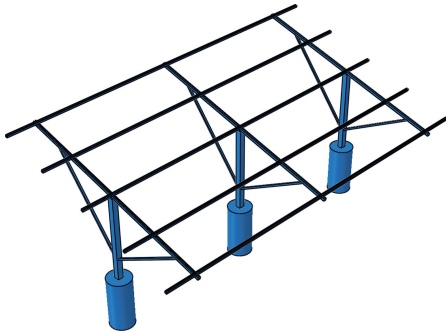


图 2 简化模型
Fig. 2 Simplified model

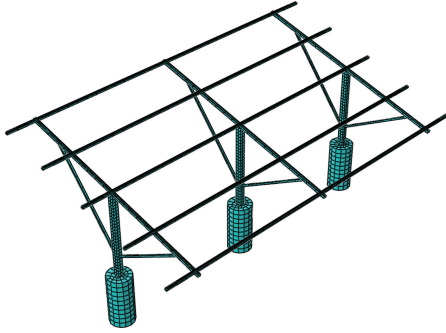


图 3 网格划分结果
Fig. 3 Meshing results

3 光伏支撑系统可靠性分析

3.1 基本随机变量

利用 PDEM 进行光伏支撑结构可靠性分析的第一步在于确定系统的基本随机变量。光伏系统运行过程中的随机性主要源于两方面:①荷载的随机性,包括光伏板自重、风荷载、雪荷载,这类参数与时段、季节、气候等具有相关性;②结构本身的随机性,包括构件尺寸、强度、弹性模量等,这类参数与材料的生产批次和拼装过程有关。为此,本文主要考虑以上两类随机性的影响,具体参数类型及分布如表 2 所示^[16-17]。

表 2 基本随机变量及分布形式
Tab. 2 Basic random variables and distributions

基本随机变量 Basic random metrics	均值 Mean	基本随机变量 Basic random metrics	变异系数 Coefficient of variation/%	分布类型 Distribution type
基本风压 Basic wind pressure/kPa	0.35	基本风压 Basic wind pressure	10	正态分布 Normal distribution
基本雪压 Basic snow pressure/kPa	0.55	基本雪压 Basic snow pressure	10	正态分布 Normal distribution
钢材弹性模量 Elastic modulus of steel/MPa	2×10^5	钢材弹性模量 Elastic modulus of steel	8	正态分布 Normal distribution
钢材屈服强度 Yield strength of steel/MPa	235	钢材屈服强度 Yield strength of steel	15	对数正态分布 Log-normal distribution
主梁跨度 Span of main beam/mm	3 965	主梁跨度 Span of main beam	5	正态分布 Normal distribution
次梁跨度 Span of secondary beam/mm	2 800	次梁跨度 Span of secondary beam	5	正态分布 Normal distribution

本模型共计 6 个基本随机变量,根据 GF 偏差选点法^[18],需在六维空间进行选点,代表点总数为 44 个,图 4 所示为基本风压的选点结果。

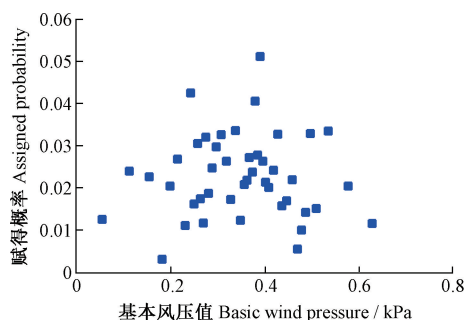


图 4 基本风压选点结果

Fig. 4 Point selection results of the basic wind pressure

根据 PDEM,需对 44 组代表点生成的确定性系统分别进行数值分析,在获取对应的目标函数后,方可根据式(8)和式(9)求得最终目标函数的概率密度。值得注意的是,这只是一组工况的分析,若涉及多组工况的对比,建模和求解的工作量巨大。为提高计算效率,这里采用 Abaqus-PDEM 的联合仿真方式(图 5),基本思路为:①利用 Abaqus 生成典型模型的 inp 文件;②Matlab 调用 inp 文件,修改对应参数后批量生成模型文件;③利用 shell 脚本调用 Abaqus 引擎对模型顺序执行分析;④分析结果反馈至 Matlab 进行 PDEM 演化运算。

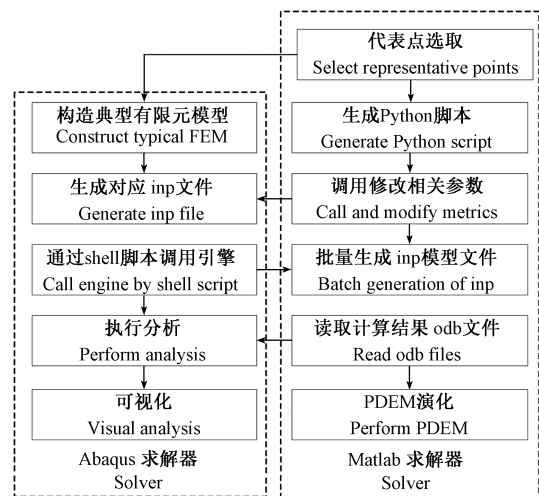


图 5 Abaqus-PDEM 联合仿真流程

Fig. 5 Abaqus-PDEM joint simulation procedure

3.2 仿真结果分析

在确定光伏支撑系统的结构参数、荷载参数和基本随机变量的分布参数之后,即可采用 Abaqus-PDEM 联合仿真的方式获取 44 组模型的目标变量。对于目标变量的选取,这里主要关注最不利位置的应力和应变两种物理量。根据刘志超^[19]的研究成果,光伏支架在风荷载(尤其是台风)作用下,位移增长速度要大于内力增长速度,因此,位移更容易超限。在文献[20]的分析中,大部分光伏支架的应力峰值能够满足设计要求,位移峰值不能满足设计要求。因此,本文将最不利位置的位移作为目标变量。

图 6(a)给出了某次确定性分析时光伏支撑体系整体结构的应力云图,若将混凝土支座视为刚体,则整个体系的最不利位置出现在钢支柱根部,最大 Mises 应力为 83 MPa,仅为允许值的 35.3%。根据图 6(b)可知,本次工况下最大位移为 6.9 mm,出现在靠近次梁中跨位置。根据《光伏发电站设计规范》(GB 50797)第 6.8.8 条的规定,次梁挠度允许值为跨度的 1/250,即 $1/250 \times 2800 \text{ mm} = 11.2 \text{ mm}$,可见,上述位移已达允许值的 61.6%。换言之,与内力相比,结构位

移更容易超限,这也验证了目标变量选取的正确性。

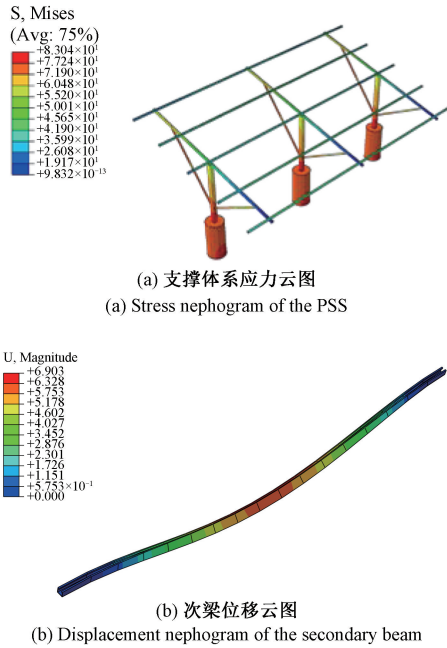


图 6 某次确定性分析时应力和位移云图

Fig. 6 Stress and displacement nephogram in one deterministic analysis

根据上述分析,本文将最不利位置的位移 ζ 作为目标函数,记为 $X(\theta) = \zeta(\theta)$ 。考虑到 $\zeta(\theta)$ 为随机变量,在概率密度演化前需进行转化,这里构造虚拟随机过程,表达式为

$$\zeta(\theta, \tau) = X(\theta) \phi(\tau) \quad (13)$$

式中, $\phi(\tau)$ 为虚拟时间过程。

联合式(8)、式(9)和式(13)即可求得 $\zeta(\theta, \tau)$ 的概率密度,最终光伏支撑系统的可靠度可表示为

$$R = \int_0^{\zeta_0} \zeta(\theta, \tau) |_{\tau=\tau_0} d\zeta = \int_0^{\zeta_0} X(\theta) \phi(\tau) |_{\tau=\tau_0} d\zeta \quad (14)$$

式中, ζ_0 为允许位移,与构件类型和跨度有关。

本文取 $\phi(\tau) = \sin(0.25\pi\tau)$,代入式(13)后经概率密度演化可以获得 ζ 的概率密度演化曲面,如图 7(a)所示,对应的概率密度等值线见图 7(b),两者反映了虚拟时间过程中次梁中部位移的概率密度信息及其演变过程。令 $\tau = 4$ s,即可获得相应的概率密度曲线,并利用式(14)进行积分得到该工况下的可靠度值,计算得 0.928。

3.3 不同风速易损性分析

光伏支架对于风荷载尤为敏感,随着风速的提高,结构所受风压不断增大,可靠性迅速降低,尤其是在台风等强风作用下极易出现掀翻、失稳等破坏。为此,本节研究了不同风力等级作用下的光伏支架可靠性变化趋势,为设计提供参考。

根据《热带气旋等级》(GB/T 19201),台风风速定

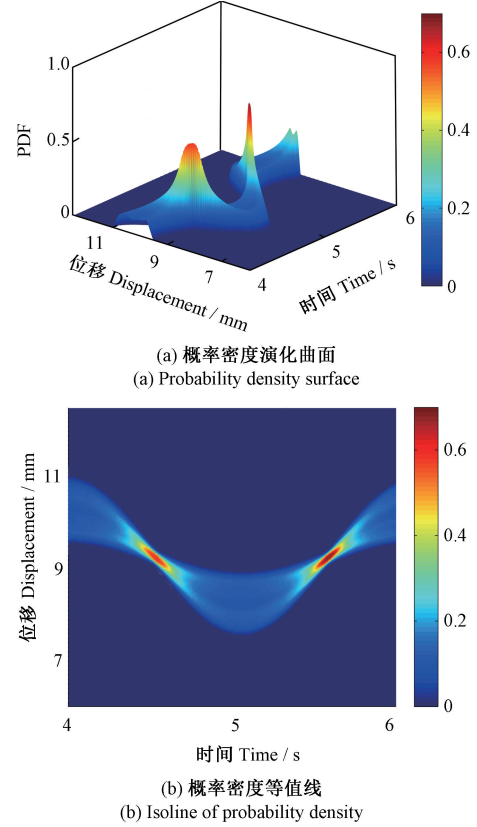


图 7 位移的概率密度信息

Fig. 7 Probability density information of the displacement

义为底层中心附近 2 min 内的最大平均风速,而《建筑结构荷载规范》(GB 50009)中的基本风压则取地面上 10 m 高度处 10 min 内的平均风速观测数据。显然,直接采用台风风速定义进行结构分析会将基本风压放大。因此,在进行结构可靠性分析前需将风速进行转换。

利用文献[21]给出的离海风不同时距最大平均风速间的转换关系,依据 Bernoulli 法则,即可确定基本风压,计算式为

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad (15)$$

式中, ρ 为空气密度,取 1.25 kg/m^3 ; v_0 为基本风速。

选取几组整数风速等级进行换算,得到 10 min 平均风速对应的基本风压如表 3 所示。

利用表 3 给出的基本风压重新计算光伏支架的荷载并构件有限元分析模型,经 PDEM 获得对应工况的可靠度。为进一步分析不确定性因素对结构可靠性的影响,这里对比分析三种组合类型,分别为:①只考虑荷载的不确定性;②只考虑结构本身(尺寸和材性)的不确定性;③综合考虑所有不确定性因素。图 8 给出了不同组合类型和不同风速下光伏支架的失效概率对比结果。由图 8 可知,随着风速的增加,光伏支架可靠性逐渐降低,失效概率不断提高。三条曲线的交点大致位于 $35 \sim 40 \text{ m/s}$ 的风速区间内,小于此交点时,组

表 3 典型风速下的基本风压换算

Tab. 3 Basic wind pressure conversions under the typical wind speed

风速 Wind speed (转换前 Before conversion)/(m/s)	热带气旋分类 Classification of tropical cyclone	基本风压 Basic pressure (转换后 After conversion)/kPa
15	热带低压 Tropical depression	0.13
20	热带风暴 Tropical storm	0.23
25	强热带风暴 Strong tropical storm	0.35
30	强热带风暴 Strong tropical storm	0.51
35	台风 Typhoon	0.69
40	台风 Typhoon	0.90
45	强台风 Violent typhoon	1.14
50	强台风 Violent typhoon	1.41
55	超强台风 Super typhoon	1.71

合 1 的可靠性最高,组合 3 的可靠性最低;大于此交点时,组合 1 的可靠性最低,组合 3 的可靠性最高。换言之,荷载的不确定性会高估光伏支架在低风速水平的可靠性,而结构本身的不确定性会高估光伏支架在高风速水平的可靠性,而后者对于结构的运行而言更为不利,在设计过程中应予以关注。

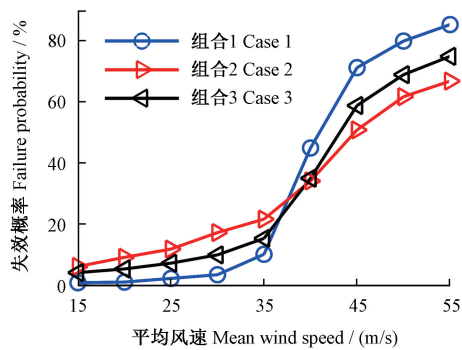


图 8 不同风速下光伏支架失效概率

Fig. 8 Failure probabilities of photovoltaic support model under different wind speeds

此外,当风速较大时,光伏支撑体系中其他部位的响应亦逐渐增大,例如斜撑和钢支柱。图 9 和图 10 分别给出了风速 40 m/s 时斜撑的位移分布云图和钢支柱的应力分布云图。此时,斜撑最大位移为 6.496 mm,达临界值的 81.2% (斜撑长度为 2 m,最大允许位移为 $1/250 \times 2 \text{ m} = 8 \text{ mm}$);支柱最大应力为 211.3 MPa,达到允许值的 89.9%。因此,这些部位在台风前应注意予以加固处理。

4 结论

提出了光伏支撑体系动力可靠性分析方法,考虑了结构荷载组合和结构本身的多重随机性影响,主要结论如下:

- 1) 利用 PDEM,并综合 Abaqus-PDEM 联合求解方法,可以实现光伏支撑体系动力可靠性的高效分析。
- 2) 光伏支撑体系的失效模式主要受次梁位移控

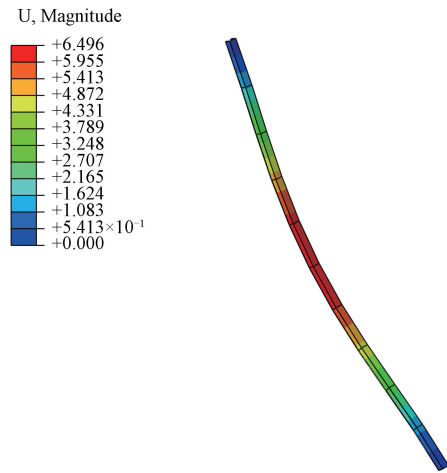


图 9 斜撑位移分布(风速 40 m/s)

Fig. 9 Displacement distribution of the diagonal brace (wind speed 40 m/s)

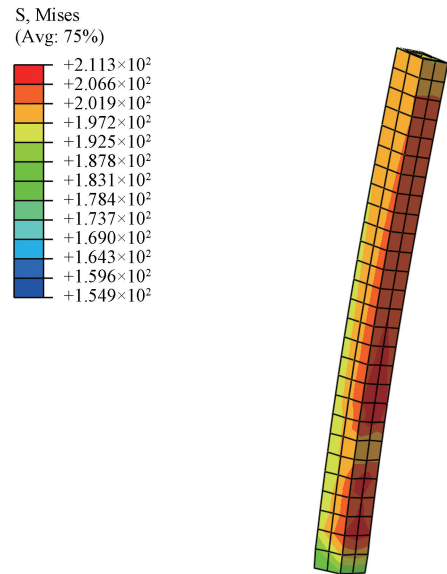


图 10 支柱应力分布(风速 40 m/s)

Fig. 10 Stress distribution of the steel column (wind speed 40 m/s)

制,基本荷载组合模式下的可靠性指标为 0.928。

3) 随着风速等级的提高,体系可靠性逐渐降低,在低风速区间 ($< 35 \text{ m/s}$),荷载的不确定性会高估结构的可靠性水平,在高风速区间 ($> 40 \text{ m/s}$),结构本身的不确定性会高估结构的可靠性水平。

参考文献 (References)

- [1] 鄢伟安,孔文琪,刘卫东,等. 具有初始退化随机特征的光伏组件可靠性评估[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 152-157.
YAN WeiAn, KONG WenQi, LIU WeiDong, et al. Reliability assessment of photovoltaic modules with initial degradation random characteristics[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(3): 152-157 (In Chinese).
- [2] 刘 飞,熊晓琪,查鹏程,等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3754-

- 3765.
- LIU Fei, XIONG XiaoQi, ZHA PengCheng, et al. Multi-objective collaborative optimization for DC distribution network configuration and distributed photovoltaic[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12):3754-3765(In Chinese).
- [3] SINHA S, CHANDEL S S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic—wind based hybrid energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 755-769.
- [4] 秦志龙. 计及相关性的含风电场和光伏电站电力系统可靠性评估[D]. 重庆:重庆大学, 2013:2.
- QIN ZhiLong. Reliability assessment of power systems with wind farms and photovoltaic power stations considering correlations[D]. Chongqing:Chongqing University, 2013:2(In Chinese).
- [5] 王 磊, 石家瑞, 吴源鑫, 等. 基于光伏系统可靠性的组件与逆变器最优容配比研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12):498-504.
- WANG Lei, SHI JiaRui, WU YuanXin, et al. Research on optimal capacity ratio of module and inverter based on reliability of photovoltaic system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(12):498-504(In Chinese).
- [6] 郭一飞, 高厚磊, 田 佳. 引入聚类分析的光伏出力建模及其在可靠性评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 93-100.
- GUO YiFei, GAO HouLei, TIAN Jia. Photovoltaic output modeling by introducing clustering analysis and its application in reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23):93-100(In Chinese).
- [7] 杨锡运, 刘玉奇, 张 璜, 等. 含并网光伏电站的系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9):2689-2696.
- YANG XiYun, LIU YuQi, ZHANG Huang, et al. Reliability evaluation method of grid connected with photovoltaic power station[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2689-2696(In Chinese).
- [8] 江继波, 章正暘, 陆元明, 等. 有遮挡的屋面光伏阵列风荷载特性研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(12):1777-1785.
- JIANG JiBo, ZHANG ZhengYang, LU YuanMing, et al. Study on wind load characteristics of shielded roof PV arrays[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(12):1777-1785(In Chinese).
- [9] 王泽国, 赵菲菲, 吉春明, 等. 多排多跨柔性光伏支架的风致振动分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(增刊2):75-79.
- WANG ZeGuo, ZHAO FeiFei, JI ChunMing, et al. Wind-induced vibration analysis of multi-row and multi-span flexible photovoltaic support[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(Suppl. 2):75-79(In Chinese).
- [10] 王小峰, 杨 帆, 尤 颖. 光伏组件不同固定间距测试及有限元模型研究[J]. 机械强度, 2018, 40(1):211-216.
- WANG XiaoFeng, YANG Fan, YOU Ying. Research of finite element simulation and test about PV module with different fixed spacing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(1):211-216(In Chinese).
- [11] 王 帅, 高 鹏, 刘 畅, 等. 基于时域-误差模型的运动时变可靠性研究[J]. 机械强度, 2020, 42(4):869-874.
- WANG Shuai, GAO Peng, LIU Chang, et al. Research on time-dependent kinematic reliability based on time domain error model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(4): 869-874(In Chinese).
- [12] LI J, CHEN J B. Stochastic dynamics of structures[M]. Singapore: John Wiley&Sons, 2009:192.
- [13] 李 杰, 陈建兵. 随机动力系统下的概率密度演化方程及其研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2):170-188.
- LI Jie, CHEN JianBing. Advances in the research on probability density evolution equations of stochastic dynamical systems[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(2):170-188(In Chinese).
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:8.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012:8(In Chinese).
- [15] 史 磊. 光伏电站支架系统结构抗台风设计实践[J]. 南方能源建设, 2020, 7(1):90-94.
- SHI Lei. Design and practice of typhoon resistance for supporting bracket system of PV power station[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1):90-94(In Chinese).
- [16] 李 刚. 基于 Pushover 分析的钢框架整体刚度和屈服强度的概率统计特性[J]. 应用力学学报, 2004, 21(2):101-105.
- LI Gang. Probability distribution of structural stiffness and yield strength of steel frames by Pushover analysis[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(2):101-105(In Chinese).
- [17] 金 浏, 韩亚强, 杜修力. 混凝土单轴动态拉伸强度随机性的统计特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24):6-13.
- JIN Liu, HAN YaQiang, DU XiuLi. Statistical investigation on the randomness of uniaxial dynamic tensile strengths of concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24):6-13(In Chinese).
- [18] CHEN J B, YANG J Y, LI J. A GF-discrepancy for point selection in stochastic seismic response analysis of structures with uncertain parameters[J]. Structural Safety, 2016, 59: 20-31.
- [19] 刘志超. 带弹性抗风索的柔性光伏支架的受力性能[D]. 南京: 东南大学, 2021:105.
- LIU ZhiChao. Mechanical behavior of flexible photovoltaic support with elastic wind resistant cable[D]. Nanjing: Southeast University, 2021:105(In Chinese).
- [20] 王芝云, 杨林青, 吴二军. 光伏支架受力性能影响参数有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(12):77-80.
- WANG ZhiYun, YANG LinQing, WU ErJun. Finite element analysis of the parameters affecting the mechanical performance of photovoltaic supports[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(12):77-80(In Chinese).
- [21] 林 雯, 方平治, 雷小途, 等. 台风条件下不同时段最大平均风速之间的转换系数研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(1):42-50.
- LIN Wen, FANG PingZhi, LEI XiaoTu, et al. Study on the converting coefficients of maximum wind speed with different averaging periods for landfall typhoons[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(1):42-50(In Chinese).