

基于 CFD 的垂直轴风机特性的叶片优化与系统能源设计

范晨兴¹, 杨建飞^{1,2*}, 邱鑫^{1,2}, 于皓¹, 戚国阳¹

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 江苏 南京 210023)

CFD-based Blade Optimisation and System Energy Design for Vertical Axis Wind Turbine Characteristics

FAN Chenxing¹, YANG Jianfei^{1,2*}, QIU Xin^{1,2}, YU Hao¹, QI Guoyang¹

(1. School of Electric and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing 210023, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problem of inefficient utilization of wind resources in small-scale distributed energy systems, this paper proposes and studies the performance characteristics of an improved drag-type vertical axis wind turbine (VAWT). [Methods] Based on the traditional Savonius wind turbine, the starting ability and power generation efficiency of the wind turbine were improved by increasing the number of fan blades and optimizing the design of blade torsion. The simulation analysis of the wind turbine structure was carried out by using the CFD method, and the fluid-structure coupling behavior of the wind turbine was discussed from the aerodynamic point of view at different twist angles and starting wind speeds, with emphasis on the analysis of the pressure distribution, the change of the flow field and the force characteristics. On this basis, combined with the torque characteristics of the wind turbine, the mathematical model of the wind turbine system was constructed using Matlab, and the sliding mode direct torque control method was introduced to realize the dynamic simulation of the power generation process. [Results] By analyzing the key power generation characteristic curves such as voltage and current, and comparing and verifying them with the measured data, the results showed that the established model had good accuracy and engineering applicability. [Conclusion] The research results provide theoretical support and practical reference for the structural

optimization and intelligent control of resistance-type vertical-axis wind turbine, which is of great significance for promoting the application of small wind power generation equipment in distributed energy systems.

Key words: Savonius wind turbine; fluid dynamic; torque characteristics; sliding mode direct torque control; dynamic simulation

摘要:【目的】针对小型分布式能源系统中风力资源利用效率不高的问题,本文提出并研究了一种改进阻力型垂直轴风机(VAWT)的性能特性。【方法】以传统Savonius风机为基础,通过增加扇叶数量并优化叶片扭度设计,提升风机的起动能力与发电效率。采用CFD方法对风轮结构进行仿真分析,从空气动力学角度探讨了不同扭角度和起动风速下风轮的流固耦合行为,重点分析了压力分布、流场变化及受力特性。在此基础上,结合风轮的转矩特性,利用Matlab构建风机系统的数学模型,并引入滑模直接转矩控制方法,实现了发电过程的动态仿真。【结果】对电压、电流等关键发电特性曲线的分析,并与实测数据进行对比验证,结果表明所建立的模型具有良好的准确性和工程适用性。【结论】研究成果为阻力型VAWT的结构优化与智能控制提供了理论支持与实践参考,对推动小型风力发电设备在分布式能源系统中的应用具有重要意义。

关键词: Savonius 风机; 流体动力学; 转矩特性; 滑模直接转矩控制; 动态仿真

基金项目: 江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX25-0711)

Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX25-0711)

0 引言

随着全球能源紧张,风能作为清洁能源备受

关注^[1-3]。垂直轴风机 (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) 因结构简单、适应多变风向等优势^[4], 在分布式能源领域应用广泛, 但其效率受气动特性限制。因此, 深入分析其运行机理、优化结构与控制策略是当前研究重点。

郑智睿等^[5]针对单个与多个风机尾流特性进行研究, 采用三叶片 NACA0018 标准航空翼型; 寇薇等^[6]研究了一种组合型 VAWT 的结构设计, 以更好的提升自启动性能; Eltayesh 等^[7]在翼型上设置了凹坑来提高性能, 在内部增设 S 型叶片提高自启动能力; Al-Gbur 等^[8]将新的叶片几何形状与导向间隙流相结合的优化方法, 以提高 Savonius 风机的性能与效率; Ahmad 等^[9]提出在 H 型风机的内圈增设三个小型的翼型叶片, 从而使得系统具备高效率与良好的自启动能力。

本文主要研究 Savonius 型 VAWT, 相较于其他阻力型风机, 其在低风速启动性能、全风向适应性、低噪音及高安全性等方面表现突出。现有研究表明, 该机型虽在特定场景中优势显著, 仍需通过模拟仿真与试验研究进一步优化其风能利用效率。本文分析了该类风机的运行特性, 并对叶片不同扭角进行了仿真求解, 探讨了其运行规律, 提高了对该类风机空气动力学特性的认识, 为进一步优化设计提供参考。

1 风机模型介绍及基本理论分析

本研究基于传统 Savonius 型阻力式风机设计^[10], 通过整合垂直轴与水平轴风机的结构特点, 创新性地开发了一种三叶片阻力型垂直轴风机。该模型采用三层叶片 45°螺旋上升布局, 叶片间呈 120°均匀分布, 显著提升了风能捕获效率、气流连续性及转子动态平衡性, 使系统运行更加稳定可靠。

风轮直径、总长度均为 0.24 m, 支架高度为 2 m。考虑到其应用于小型分布式能源系统, 风机额定功率约为 10 W, 具有良好的低风速响应特性。试验与仿真结果表明, 该风机的启动风速范围为 2.5~3 m/s, 额定运行风速区间为 4~9 m/s, 能够在多变的风速条件下保持稳定运行。

Savonius 风机二维模型如图 1 所示, 其参数如表 1 所示。当风沿水平方向吹向风机叶片时, 气流在叶片表面分流, 并对其施加不同的作用力。

由于叶片所处位置不同, 其迎风角度各异, 导致气流在叶片凸面和凹面产生不同的压力分布, 从而形成不平衡的气动力。受气流影响, 不同叶片分别对旋转轴施加不同的转矩, 进而形成合转矩, 使风机围绕旋转轴旋转。

表 1 Savonius 风机的具体参数

Tab. 1 Specific parameters for Savonius wind turbine

参数名称	参数值
叶片数目	3
高径比	1
高度/mm	24
半径/mm	24
来流风速/(m·s ⁻¹)	3
正常来流风速/(m·s ⁻¹)	4~9

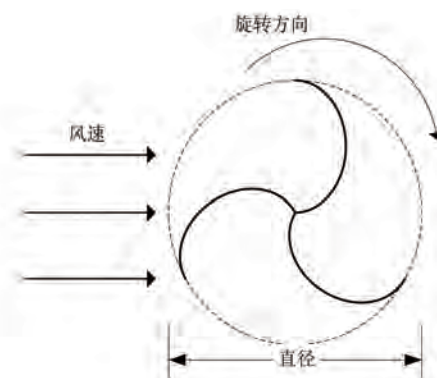


图 1 Savonius 风机的二维模型

Fig. 1 2D model of the Savonius wind turbine

对于 Savonius 垂直轴三叶片风机, 本文分别进行 0°到 100°的扭角建模, 对不同度数的风机单独进行仿真分析, 来确定最优叶片的仿真结果区间。

与水平轴风机不同的是, 最优垂直轴风机以叶尖速比 (Tip Speed Ratio, TSR)、转矩系数 C_t 和风能利用系数 C_p 作为性能的评判标准^[11-12], 如式 (1)~式 (3) 所示:

$$TSR = \frac{R\omega}{v} \quad (1)$$

$$C_t = \frac{2T}{\rho D A v^2} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{2T\omega}{\rho A v^3} \quad (3)$$

式中: R 为风轮半径; ω 为风轮角速度; v 为来流风速; D 为风轮直径; T 为风机转矩; ρ 为空气密度, 取 1.185 kg/m³; A 为风机的扫掠面积。

风机转子轴功率、风能功率分别为

$$P_t = \frac{2\pi n T}{60} \tag{4}$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \tag{5}$$

式中: P_t 为风机转子轴功率; P_w 为风能的功率; n 为转子轴转速。

风轮内部模型如图 2 所示。风轮叶片的实度 δ 为风机叶片的投影面积占风机面积的比值, 是衡量风机效率的重要参数, 其表达式为

$$\delta = \frac{BC}{2\pi R} \tag{6}$$

式中: B 为叶片个数; C 为叶片弦长。

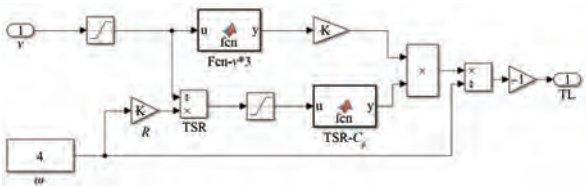


图 2 风轮内部模型
Fig. 2 Internal model of wind turbine

在风速不变、不同 TSR 条件下, 得到不同的 C_p 。进一步优化 TSR 的取值范围, 能够有效提升 C_p , 同时为确定最佳扭度结构提供依据, 从而推动垂直轴风机的实际应用与推广。

2 风机三维建模与仿真分析

2.1 风机三维建模

小型 VAWT 模型如图 3 所示, 风轮主要由连接盘和叶片组成, 而叶片由流线型直板和一个半圆形弯板组成。通过连接盘将叶片分为两层, 每层的 3 个叶片彼此相差 120° 排列。针对直叶片型 Savonius 风机动转矩振荡幅度较大、平均动转矩系数较小的缺点, 本文考虑通过扭曲变形的方式对直叶片进行变异设计, 从而达到改善风机动转矩输出性能的目标。后续将对单个周期内动转矩的变化方式进行分析及讨论, 对不同扭角 Savonius 风机叶片的动转矩曲线、平均动转矩系数等进行系统的分析对比。

为简化计算过程并提高精度, 对模型进行优化, 将永磁电机和传动轴部分合并。风机模型的流场分为静止域和旋转域, 静止域模拟了风机所处的广泛风场环境; 旋转域包含了风机的风轮及



图 3 无扭度单叶片风机
Fig. 3 Torsionless single-blade fan

部分支撑结构, 高 0.3 m, 圆的底部区域为 0.28 m。风机的计算模型如图 4 所示, 风机流场及网格区域的剖分如图 5 所示。

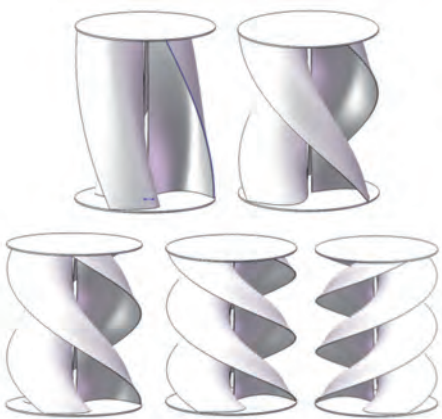


图 4 三维风机的计算模型
Fig. 4 Computational model of 3D wind turbine

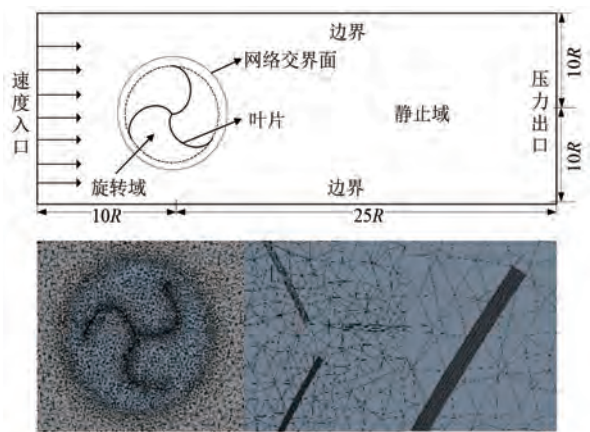


图 5 风机流场及网格剖分截面
Fig. 5 Wind turbine flow field and grid section cross section

2.2 边界条件与求解设置

在对 VAWT 进行 CFD 仿真分析时, 为提高模拟的准确性与数值稳定性, 系统设计了边界

条件与求解设置,并对其物理合理性和数值收敛性进行了优化。本次模拟工况聚焦于风机在低风速环境下的运行性能,设定进口风速为 3 m/s,以反映微风环境中风机的起动特性。该速度范围具有代表性,为常用于小型阻力型风机仿真的典型工况。转速设定为 1 000 r/min,并结合已有试验数据进行调整后确定,旨在捕捉风机运行的关键特征。入口边界条件模拟来流风速;出口边界条件其静压值设为 0 Pa,以模拟空气自由流出至大气环境。

为模拟湍流效应,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型在工程 CFD 中应用广泛,具有良好的稳健性,适用于流动分离的捕捉。相比之下, SST $k-\omega$ 等模型在低雷诺系数工况下对网格质量更为敏感,初期验证中出现不稳定现象,故最终选用 $k-\varepsilon$ 模型以平衡精度与计算效率。求解器采用压力-速度耦合的半隐式压力耦合方程算法,具有较强的收敛性能。时间步长依据风轮角速度与叶片综合考虑选择,设定仿真总时长为 1 s,时间步长为 0.001 s,对应每秒 1 000 个时间步,可有效捕捉风轮旋转过程中的流场变化。每步最大迭代次数设为 30 次,确保在合理时间内获得稳定解。上述设置在多轮试算中表现出良好的数值稳定性和收敛特性,同时兼顾计算成本与仿真精度,为后续的风机气动特性分析提供了可靠的数据基础。

2.3 数值模型

在分析仿真结果时,通过对质量、动量和能量守恒方程的分析,解释不同工况下风机性能的变化。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (7)$$

动量守恒定律采用纳维-斯托克斯方程,能量守恒定律描述了流体在流动过程中能量的转化与传输。对于三维流动,能量守恒方程为

沿 X 方向

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v_x \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (8)$$

沿 Y 方向

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v_y \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (9)$$

沿 Z 方向

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v_z \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (10)$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} e) =$$

$$- \rho \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \quad (11)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{v}$ 为流体的速度量; P 为流体压力; μ 为动态黏性系数; $\mathbf{f}$ 为外部体力(如重力等); ∇ 为哈密顿算子; e 为单位质量内能; T 为温度; k 为热导率; Φ 为粘性耗散项,表示因流体内部摩擦而引起的能量转化。

2.4 发电系统联合仿真与计算

利用 Ansys 和 Matlab 的优势,分步计算仿真实现风力发电系统的高效建模与分析。首先,在 Fluent 中进行风轮的气动仿真,计算转矩和风轮转速等关键数据,不考虑转轴摩擦等因素,并将这些数据输入至 Matlab 中的发电机模型,模拟机电能量转换过程并计算发电功率。通过分步骤仿真提高了计算精度,能更准确地预测系统的性能。分布联合仿真的原理图如图 6 所示。



图 6 分布联合仿真原理

Fig. 6 Principle of distributed joint simulation

定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (12)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (13)$$

电机运动平衡方程为

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T_e - T_L \quad (14)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为定子在 d 轴、 q 轴上的电压分量和电流分量; p 为电机极对数; ψ_f 为永磁体磁链; J 为转动惯量; θ 为转子的角位移; B 为转子的阻尼系数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩。

在如图 7 所示的 Simulink 模型中, 为了更精确且高效地模拟风力发电机的发电特性^[13-15], 采用了滑模直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 策略^[16-21]。仿真设定两种风速条件: 低风速

3 m/s 及动态风速 7~9 m/s, 以模拟风机真实运行环境。通过示波器可视化三相定子电流、转速、电磁转矩及转矩角等关键参数。

滑模 DTC 系统包含以下模块: 3~9 m/s 动态范围的自然风速模块、基于电流/转速反馈生成转矩指令的 dq 轴滑模控制模块、空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 模块、实时磁场控制的磁链估计模块、调节误差转速的 PI 模块以及输出电磁参数的永磁同步电机模块^[22-23]。各模块协同实现变风速下的高效转矩、转速控制, 动态特性仿真精度高。

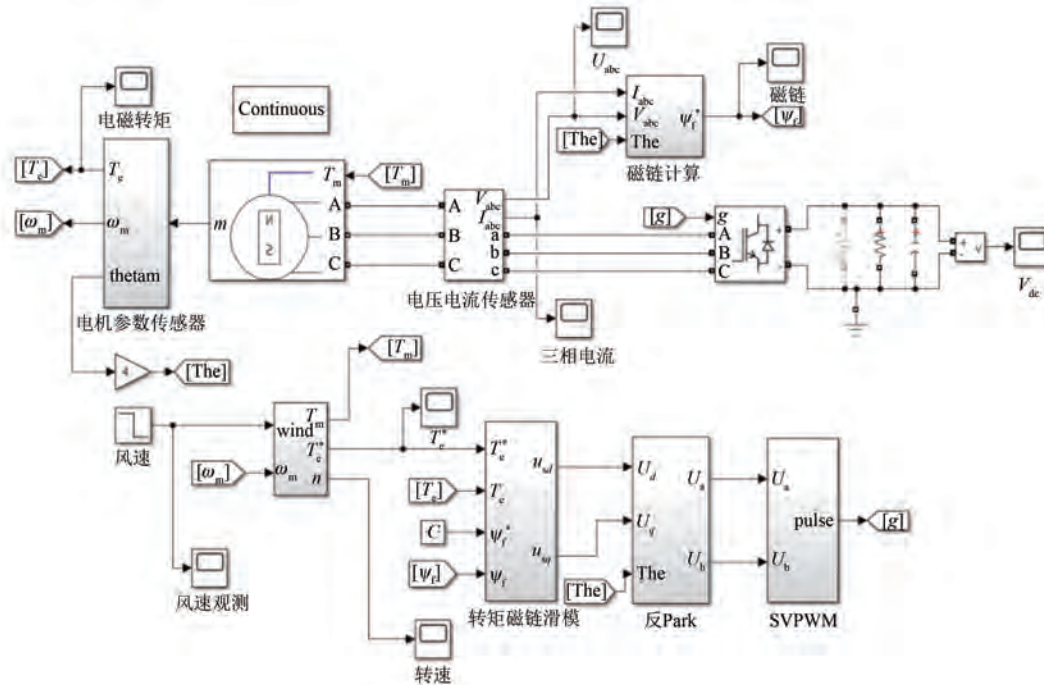


图 7 发电系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of power generation system

3 计算结果仿真分析

3.1 流场分析

针对不同 VAWT 进行了详细的转矩和 C_p 分析。通过风机转矩输出, 能够分析各个设计参数对风机效率和稳定性的影响^[24]。风速为 3 m/s 时, 风机变形在 0~100°范围内的转矩输出结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 风机的转矩响应呈现出明显的规律性变化。风机变形 60°~100°区间, 风机的转矩相对较小, 随着扭角的减小, 相对转矩逐渐增大, 但在风机变异为 40°时, 则是转矩峰值。这表

明风机在扭度不同时, 转矩会受到影响, 特定风速下, 调节风机的变形, 能够实现较为理想的转矩输出。在瞬态计算中, 80°变形结构的起动转矩较小且性能表现优异, 因此本研究选取该结构, 进一步分析不同风速条件下的转矩特性及风能利用率。

对于 80°扭角风机的转矩系数, 时间曲线的计算结果如图 9 所示。瞬态计算了 942 个时间步长, 一共 9.42 s, 在模型仿真步数达到 750 步, 即 7.5 s 后, 计算结果基本收敛, 周期内的转矩系数计算结果已经保持一致。因此取计算模型 7.5 s 后的计算结果进行分析。

对 Savonius 风机叶片的动转矩进行处理, 提

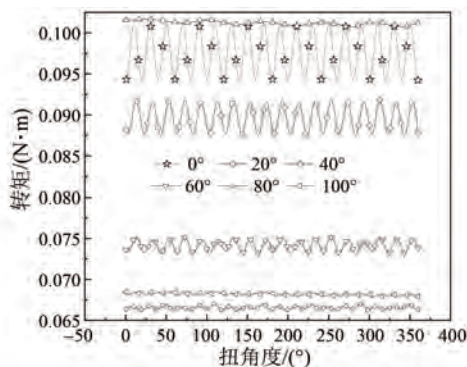
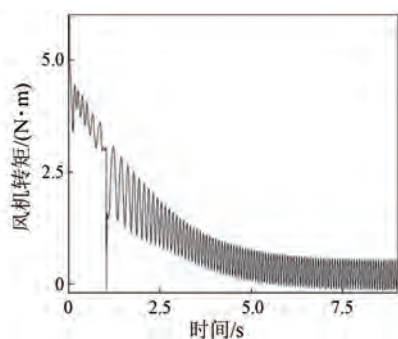
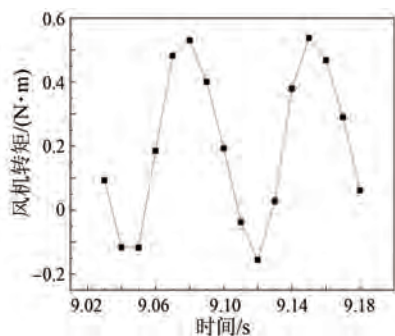


图 8 在风速 3 m/s 不同扭角度的转矩结果

Fig. 8 Torque results for twist angles at wind speed 3 m/s

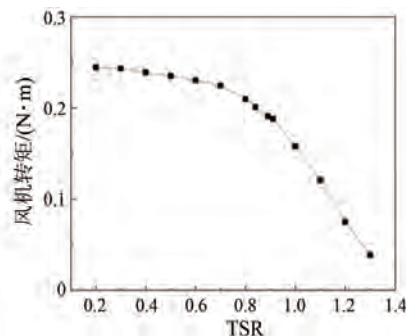
图 9 C_t 942 时间步长计算结果Fig. 9 Calculation result of C_t 942 time step

取一个完整周期内的动转矩离散点,收敛结果如图 10 所示。

图 10 C_t 单周期计算结果Fig. 10 C_t single cycle calculation result

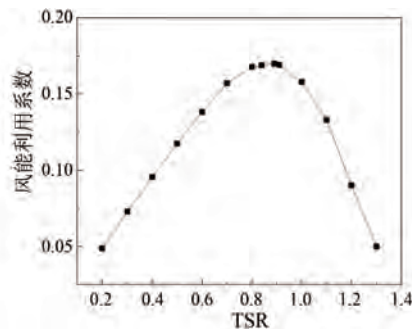
由图 10 可知,一个周期的转矩系数存在两个波峰与两个波谷。叶片在单周期内的最大转矩系数为 0.53,最小为 -0.15,说明叶片在一个周期内仍然有负转矩的作用。一个周期内的平均转矩系数为 0.201。

通过改变动网格速度条件,以模拟不同 TSR 下的转矩系数变化,如图 11 所示。由图 11 可知,

图 11 不同 TSR 的平均 C_t 曲线Fig. 11 Average C_t curve for different blade TSR

随着 TSR 上升,风机的转矩系数呈下降趋势。

根据平均转矩系数与 TSR,即可算得平均风能利用系数,如图 12 所示。

图 12 不同 TSR 下 80° 叶片的 C_p Fig. 12 C_p of 80° blades at different TSR

由图 12 可知,螺旋型 Savonius 风机在 TSR 为 0.89 时取得最大值,对应的风能利用系数 C_p 为 0.17。与平均转矩系数的下降点相对一致,根据式(1)可计算出 8m/s 时风机的理想最优转速为 47.122 5 rad/s,即 450 r/min。

对于 80° 风机变形的压力分析如图 13 所示。由图 13 可知,风轮弯曲的前点迎风侧受到的压力较高,远超出风轮的内部受力面。在叶片的压力侧,约 50% 的弦长处出现压力峰值约 37 Pa,该峰值位于叶片凸面的停滞点,而在根部附近则表现出较低的负压力。

3 m/s 时压力与风速的流场分析如图 14 所示。由图 14 可知,风轮叶片在根部的几何形状变化较为平滑,导致压力逐渐下降。叶片在凸面上表现出较高的正压,而凹面则出现较低的负压,这种压力差导致较大的阻力,并且降低了该位置的总转矩输出,风机整体做正功,有利于风机运行。

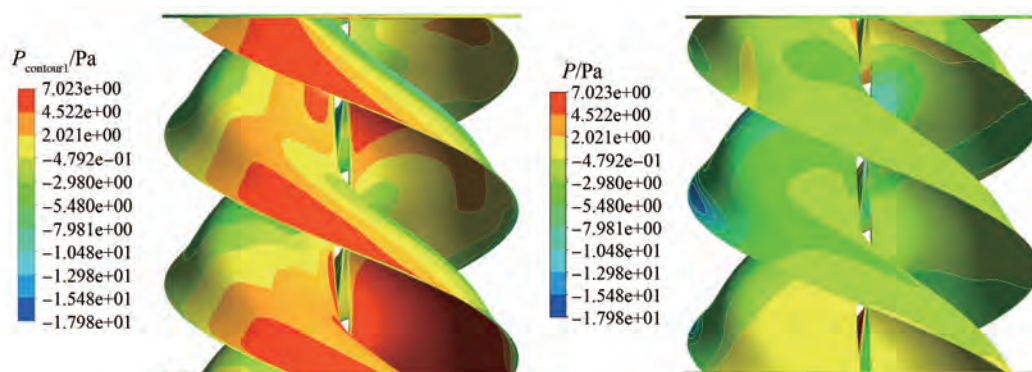


图 13 对于 80° 风机变形的压力分析

Fig. 13 Pressure analysis for 80° fan deformation

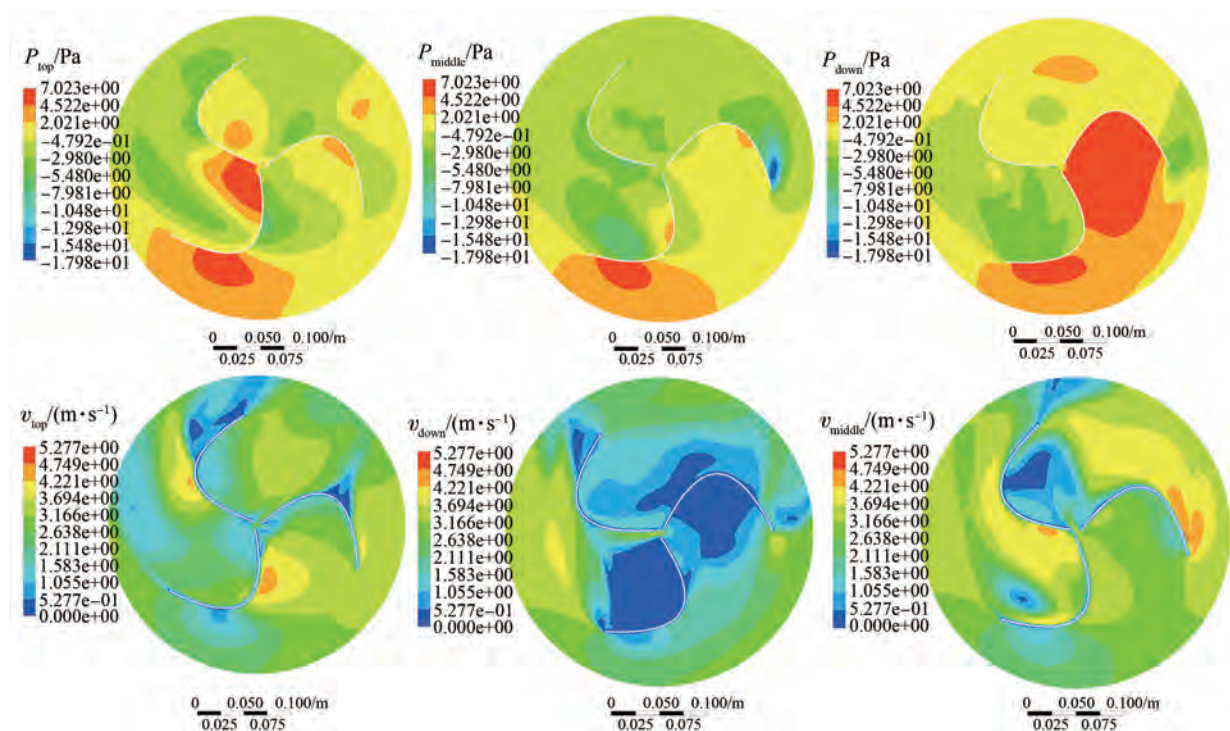


图 14 在 3 m/s 时压力与风速的流场分析

Fig. 14 Flow field analysis of pressure and wind speed at 3 m/s

风速变化的转矩转速曲线簇如图 15 所示,采用最优转矩追踪最大功率方法的关键是拟合出控制曲线,实现最优化的转矩控制目标。

3.2 发电功率分析

风能发电的基本原理是将机械功率转化为电能,并通过发电机提供电力给负载。在实际应用中,直接测量机械功率较为困难,因此通常通过测量发电功率等参数来评估发电性能。

仿真试验利用 Simulink 搭建风机的发电模型,结合滑模 DTC 策略,获得发电的特性曲线,如

图 16 所示。

由图 16 可知,转子角速度在 0.15 s 内迅速上升至 30 rad/s 并保持恒定,角位移线性增加,验证了系统的稳定运行能力。电磁转矩在起动阶段略有波动,随后快速趋于稳定,稳态值约为 0.2 N·m,表明控制系统能够在低风速条件下提供持续驱动。

发电机的定子侧三相交流电如图 17 所示。由图 17 可知,定子电流呈现三相对称特性,在 0~0.05 s 内迅速建立且无谐波畸变,稳态时保持

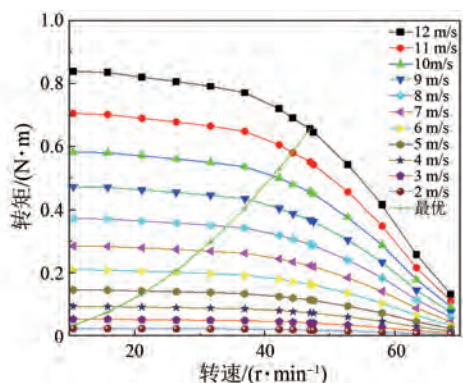


图 15 风速变化的转矩转速曲线簇

Fig. 15 Cluster of torque-speed curves for wind speed variation

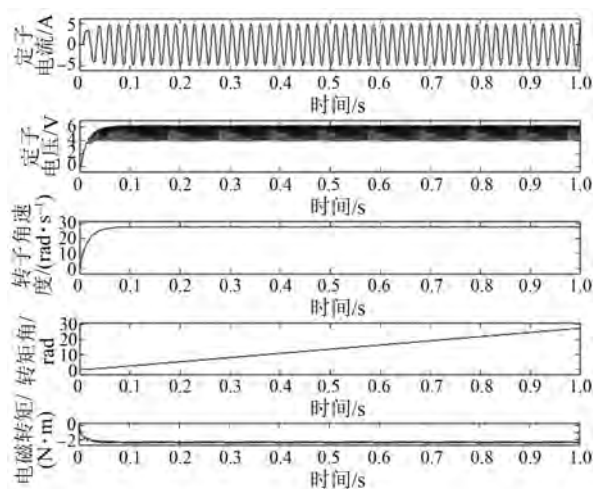


图 16 发电机特性曲线

Fig. 16 Generator characteristic curves

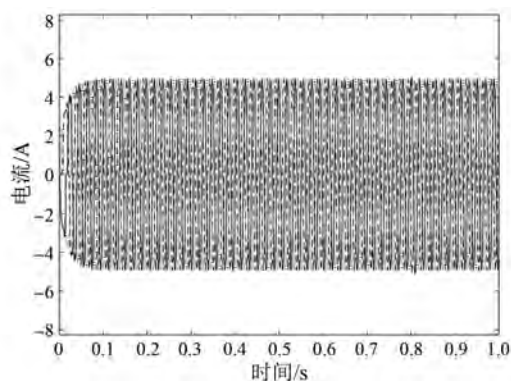


图 17 发电机三相交流电

Fig. 17 Three-phase alternating current for generator

± 5 A 幅值的周期性波动。

测量负载的电压、电流和功率曲线如图 18 所示。仿真设定电阻为 2Ω , 电容为 1×10^{-3} F, 时间为 1 s。根据仿真结果可知, 通过有效的控制策

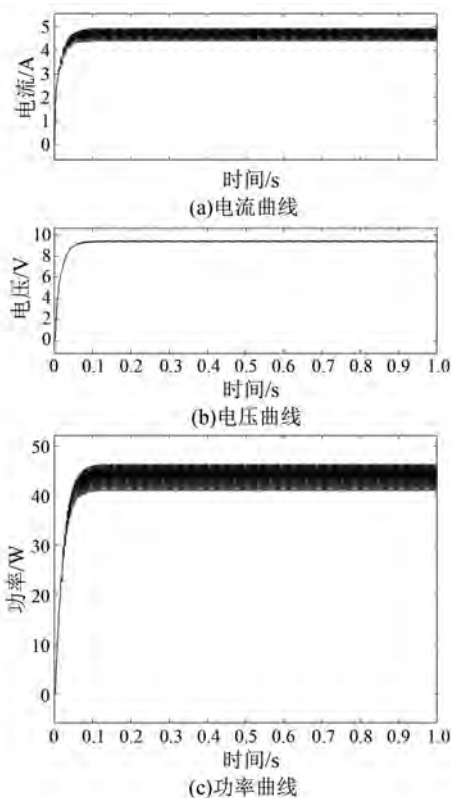


图 18 发电机负载参数曲线

Fig. 18 Generator load parameter curves

略, 风机经整流后效果理想, 电压、电流振荡较小, 反馈时对储能设备不会造成较大冲击。

为了进一步模拟自然界的真实风速, 对自然风速进行仿真, 如图 19 所示, 风速的波动范围较大, 计算时间为 1.6 s, 风速在 7~9 m/s 之间波动。

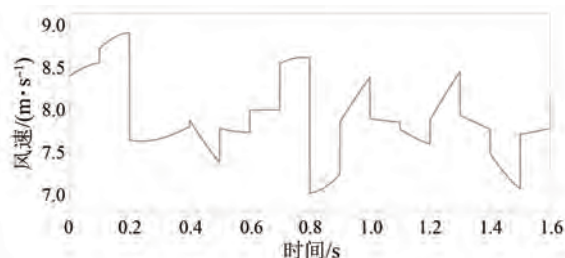


图 19 风速变化曲线

Fig. 19 Wind speed variation curve

观测转速与实际转速对比如图 20 所示。由图 20 可知, 当风机输入变化时, 系统通过滑模观测器实时跟踪最大功率点对应的转速。观测转速与实际转速的偏差控制在 ± 5 r/min 范围内, 验证了该观测器在转速解算中的有效性和稳定性。

不同风速条件下发电机三相电流如图 21 所示。由图 21 可知, 即便在风速波动较大的情况

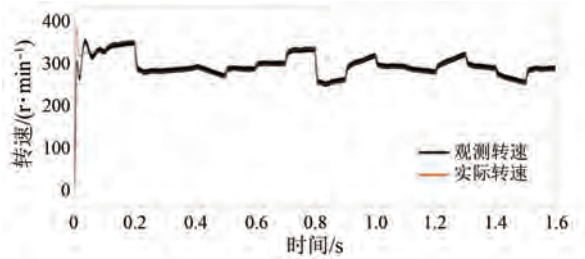


图 20 观测转速与实际转速对比

Fig. 20 Comparison of observed speed and actual speed

下,发电机的三相电流都较平稳,说明跟踪仍然保持稳定,控制效果比较明显,反应了较为真实的风机运行曲线。

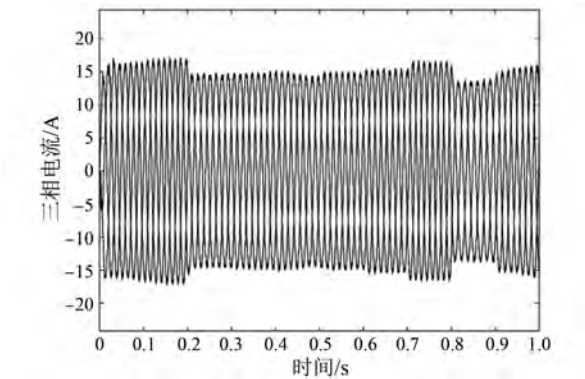


图 21 不同风速条件下发电机三相电流

Fig. 21 Generator three-phase currents under different wind speed conditions

4 试验结果分析

为了验证仿真结果的正确性,根据 Savonius 风机的 DTC 系统建立了风力发电控制平台进行试验研究,如图 22 所示。

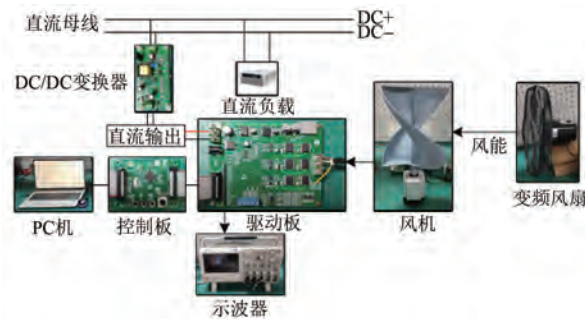


图 22 风力发电系统控制平台

Fig. 22 Wind power system control platform

为验证系统的控制性能,对系统的三相扩展反电势观测波形进行采集,如图 23 所示。由图

23 可知,观测波形为标准的正弦波,单相波形幅值为 5 V,在恒定风速条件下,系统维持稳定转速运行,转矩与电压输出均保持平稳,且反电势波形观测结果准确可靠。

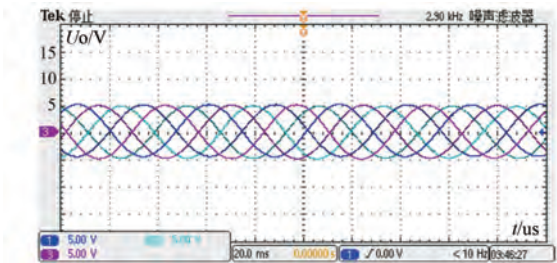


图 23 系统三相扩展反电势

Fig. 23 System three-phase extended reverse potential

电压采样波形如图 24 所示。由图 24 可知,电压采样波形幅值限制在 5 V 范围内,且与风机三相电压输出匹配,说明电压采样的结果符合要求。

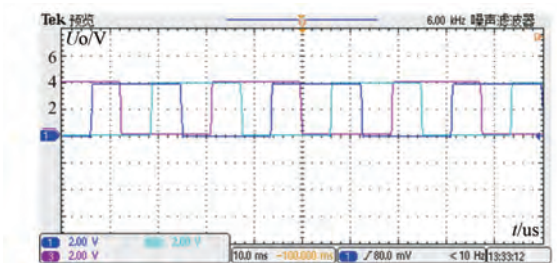


图 24 电压采样波形

Fig. 24 Voltage sampling waveform

为验证系统在变化风速下的控制性能,采用 4~9 m/s 的阶跃变化风速(持续 5 s),同步监测系统电压响应特性。风速连续变化的情况下得到连续的单相电压波形如图 25 所示。

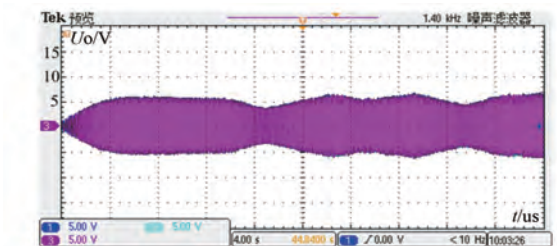


图 25 变化风速条件下系统单相电压波形

Fig. 25 System single-phase voltage waveforms under varying wind speed conditions

由图 25 可知,电压幅值在 4~7 V 范围波动,系统电压灵敏地跟随了风速变化,功率输出维持在 0.25 W。

在 8 m/s 波动风速条件下,本研究对比分析未启用和启用最优转矩算法时的直流电压输出特性,如图 26 所示。

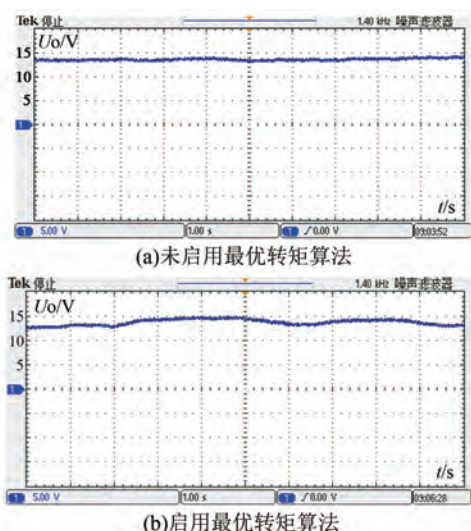


图 26 变化风速条件下直流电压波形

Fig. 26 DC voltage waves for varying wind speed conditions

由图 26 可知,未启用算法的系统因惯性影响无法实时跟踪风速变化对应的最优转矩;而启用算法后,系统能快速响应风速波动,实现最优转矩的实时跟踪。试验结果表明,该算法使输出功率提升约 6%,显著增强了风机在波动风速条件下的能量捕获效率。

5 结语

本文创新性地开发了一种三叶片阻力型 VAWT,显著提升了风能捕获效率、气流连续性及转子动态平衡性,使系统运行更加稳定可靠。通过建立三维模型,对 VAWT 的性能进行了详细分析。同时,采用滑模 DTC 策略,合理设置参数,实现系统稳定运行。本文研究成果为进一步优化垂直轴风机发电系统设计提供参考。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

范晨兴进行了方案设计、理论推导与论文撰

写,范晨兴、于皓、戚国阳进行了试验研究,杨建飞、邱鑫参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, theoretical derivation, and paper composition were conducted by Fan Chenxing. The experimental research was carried out by Fan Chenxing, Yu Hao, and Qi Guoyang. The paper review and modification were participated in by Yang Jianfei and Qiu Xin. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 杨慧杰, 杨文通. 小型垂直轴风力发电机在国外的新发展[J]. 电力需求侧管理, 2007, (2): 68-70.
- YANG H J, YANG W T. The new development of foreign small vertical axis wind generators [J]. Power Demand Side Management, 2007, (2): 68-70.
- [2] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98.
- XU L, RUAN X B, ZHANG B H, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.
- [3] 金浩, 胡以怀, 冯是全. 垂直轴风力机在风力发电中的应用现状及展望[J]. 环境工程, 2015, 33(增刊1): 1033-1038.
- JIN H, HU Y H, FENG S Q. Current situation and prospect on vertical axis wind turbine in wind power generation [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 1033-1038.
- [4] PREEN R J, BULL L. Toward the coevolution of novel vertical-axis wind turbines [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(2): 284-294.
- [5] 郑智睿, 王妮妮, 赵斌, 等. 不同错列布置下垂直轴风力机尾流特性[J]. 流体机械, 2023, 51(2): 98-104.
- ZHENG Z R, WANG N N, ZHAO B, et al. Wake characteristics for the VAWT in different staggered arrangements [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(2): 98-104.

- [6] 寇薇, 苑宾, 李琦, 等. 一种组合型垂直轴风力发电机的结构设计[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(5): 25-28.
- KOU W, YUAN B, LI Q, et al. Combined vertical axis wind turbine design [J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(5): 25-28.
- [7] ELTAYESH A, CASTELLANI F, NATILI F, et al. Aerodynamic upgrades of a darrieus vertical axis small wind turbine [J]. Energy for Sustainable Development, 2023, 73: 126-143.
- [8] AL-GBURI K A H, ALNAIMI F B I, AL-QURAISHI B A J, et al. Enhancing Savonius vertical axis wind turbine performance: A comprehensive approach with numerical analysis and experimental investigations [J]. Energies, 2023, 16(10): 4204.
- [9] AHMAD M, SHAHZAD A, AKRAM F, et al. Design optimization of double-darrieus hybrid vertical axis wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2022, 254: 111171.
- [10] 杨建飞, 胡育文, 刘建, 等. 两相导通 BLDCM DTC 电压空间矢量分析[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 95-104.
- YANG J F, HU Y W, LIU J, et al. Analysis on voltage spacial vector in two-phase conduction direct torque control of brushless DC motor [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 95-104.
- [11] 刘冬. 永磁同步风力发电机系统的建模仿真及其智能控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- LIU D. Modeling and intelligent control for wind permanent synchronous generator systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [12] 姜礼洁. 永磁同步风力发电系统 MPPT 分数阶控制策略研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2022.
- JIANG L J. Research on MPPT fractional order control strategy for permanent magnet synchronous wind power generation system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.
- [13] 陈勇志, 张立嘉, 刘旭东. 基于时变扰动观测器的永磁同步电机预设性能滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 148-158.
- CHEN Y Z, ZHANG L J, LIU X D. Preset performance sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on time-varying disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 148-158.
- [14] 庞彬, 郑涵升, 周紫烨, 等. 考虑不平衡磁拉力的双馈异步风力发电机轴承外圈故障动力学建模[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 30-37.
- PANG B, ZHENG H S, ZHOU Z Y, et al. Dynamic modeling of outer race faults in bearings of doubly-fed induction wind generators considering unbalanced magnetic pull [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 30-37.
- [15] 任明洋, 骆皓, 朱坤硕, 等. 基于空间极对数宽频带耦合的双转子同步风力发电机电磁特性分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 85-95.
- REN M Y, LUO H, ZHU K S, et al. Electromagnetic characteristic analysis of dual-rotor synchronous wind generator based on spatial pole-pair wide-band coupling [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 85-95.
- [16] 马毓敏, 赵南南, 刘金颂, 等. 永磁直驱风力发电机非奇异终端滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 86-94.
- MA Y M, ZHAO N N, LIU J S, et al. Non-Singular terminal sliding mode control for direct-drive permanent magnet wind generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 86-94.
- [17] 胡芳, 饶志蒙, 罗德荣. 盘式对转永磁风力发电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 115-120.
- HU F, RAO Z M, LUO D R. Design and analysis of disc-type counter-rotating permanent magnet wind generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(4): 115-120.
- [18] 赵南南, 杨旭, 邹琳, 等. 基于鲸鱼优化算法的风力发电机组变桨模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 80-89.
- ZHAO N N, YANG X, ZOU L, et al. Pitch fuzzy control strategy for wind turbine based on whale optimization algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 80-89.
- [19] CHEN J, YANG H X, YANG M, et al. A comprehensive review of the theoretical approaches for the airfoil design of lift-type vertical axis wind turbine [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1709-1720.
- [20] QUARESMA A L, ROMÃO F, PINHEIRO A N. A Comparative assessment of reynolds averaged Navier-Stokes and large-eddy simulation models: Choosing the best for pool-type fishway flow simulations [J].

- Water, 2025, 17(5): 686-686.
- [21] YAHDOU A, DJILALI A B, BOUDJEMA Z, et al. Improved vector control of a counter-rotating wind turbine system using adaptive backstepping sliding mode [J]. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2020, 53(5): 645-651.
- [22] 赵振宙, 郑源, 周大庆, 等. 基于数值模拟 Savonius 风力机性能优化研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(7): 907-911.
- ZHAO Z Z, ZHENG Y, ZHOU D Q, et al. Performance optimization of Savonius wind turbine based on numerical simulation [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2010, 31(7): 907-911.
- [23] 田文龙, 宋保维, 毛昭勇. 椭圆叶片 Savonius 风力机叶轮气动性能数值计算[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(32): 5796-5802.
- TIAN W L, SONG B W, MAO Z Y. Numerical calculation of aerodynamic performance of elliptical blade Savonius wind turbine rotor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(32): 5796-5802.
- [24] 丁涛, 刘继昂, 方露梦, 等. 基于多次 Bezier 曲线的 Savonius 风力机叶片优化设计[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(4): 959-965.
- DING T, LIU J A, FANG L M, et al. Blade optimization design of Savonius wind turbine based on multiple Bezier curves [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2017, 38(4): 959-965.
-
- 收稿日期:2025-05-27
收到修改稿日期:2025-07-17
作者简介:
范晨兴(1999-),男,硕士研究生,研究方向为垂直轴风机的系统设计与优化,2909693819@qq.com;
*通信作者:杨建飞(1982-),男,博士,教授,研究方向为永磁同步电机控制,1426461555@qq.com。