

DOI: 10.19666/j.rlfed.202211263

双风轮风电机组的主动共振穿越控制研究

张志龙, 方 钊, 刘亚娟, 张文广
(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

[摘 要] 高柔塔双风轮风力发电机组能够打破传统单风轮风电机组的风能利用极限, 提高低风速地区的风能利用效率。高柔塔的固有频率位于风电机组的运行转速范围内, 故而存在速度禁区。在风电机组正常运行控制的基础上, 提出了一种共振穿越控制算法, 防止风电机组叶轮在运行过程中与塔筒产生共振。该算法通过坎贝尔图找到共振区间, 在最优转矩控制的基础上增加转速控制, 实现快速共振穿越。在 SIMULINK 软件上开发的简单风电机组模型上针对稳态风和 3 种不同湍流强度场景进行了大量仿真试验, 观察共振穿越算法的有效性和准确性。仿真结果表明, 该算法在以上场景下均能实现准确的共振穿越。

[关 键 词] 双风轮风电机组; 高柔塔; 共振穿越; 速度禁区; 风力发电

[引用本文格式] 张志龙, 方钊, 刘亚娟, 等. 双风轮风电机组的主动共振穿越控制研究[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 130-135. ZHANG Zhilong, FANG Zhao, LIU Yajuan, et al. Research on active resonance ride through control of dual-rotor wind turbine[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 130-135.

Research on active resonance ride through control of dual-rotor wind turbine

ZHANG Zhilong, FANG Zhao, LIU Yajuan, ZHANG Wenguang
(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Dual-rotor wind turbine with high-soft tower can break the limits of wind energy utilization of conventional single-wheel wind turbines and improve the efficiency of wind energy utilization in low wind speed areas. The natural frequency of the flexible tower is within the operating speed range of the wind turbine, so there is a speed exclusion zone. Based on the normal operation control of wind turbine, a resonance crossing control algorithm is proposed to prevent the resonance between the wind turbine impeller and the tower during operation. The algorithm finds the resonance interval through Campbell diagram, and adds speed control on the basis of optimal torque control to achieve fast resonance crossing. A large number of simulation tests were carried out on a simple wind turbine model developed on Simulink for steady-state wind and in three scenarios with different turbulence intensities. The simulation results show that the algorithm can achieve fast and effective resonance traversal under all the above conditions.

Key words: dual-rotor wind turbine; flexible tower; resonance crossing; speed exclusion zone; wind power generation

2021 年我国风力发电量 6 526 亿 kW·h, 同比增长 40.5%, 全年新增风电装机 4 747 万 kW, 全国风电平均利用率 96.9%^[1]。为了更有效地开发和利用风能, 风力发电机的大规模化和普及化已成为必然趋势。与此同时, 随着风力发电的高速发展, 在低风速地区进行风电开发早已成为现实^[2-5]。为了加大对低风速地区风能的利用, 提出加高风机塔筒,

可有效增加发电量。但更高的塔筒会导致塔筒刚度降低, 固有频率下降, 甚至降低到风机额定转频以下, 从而引发共振, 严重影响塔筒的使用安全^[6-8]。

塔筒振动主要由风轮转动引起, 研究人员通过对塔筒共振特性的分析, 结合风电机组的运行特性, 采用共振穿越控制技术, 在塔筒共振频率附近设计速度隔离区, 当风轮转速到达速度隔离区边

收稿日期: 2022-11-15 网络首发日期: 2023-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1506602); 国家自然科学基金面上项目(62273144)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFB1506602); General Program of National Natural Science Foundation of China (62273144)

第一作者简介: 张志龙(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大型风电机组滑模变桨控制建模与仿真技术, 18810805795@163.com。

通信作者简介: 刘亚娟(1985), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为风力发电系统控制与运维, yajuan.liu.12@gmail.com。

缘时,控制发电机的转矩限定发电机转速,避免进入塔筒的共振区。当转矩通过控制达到一定限值时释放转矩,风轮在转矩和风速的共同作用下快速通过共振区,最大限度的减小共振带来的危害^[9-10]。叶少青^[11]提出一种高柔塔共振禁区穿越控制的实现方法,并在风力发电机组上进行了测试实验。郑北超等^[12]提出通过设立转速隔离区域有效避开塔架共振,采用塔架加阻降低塔顶振动幅度和载荷,分析及抑制塔架涡激振动的方法,并在 2 MW 机组上验证了该方法的有效性。因此,主动共振穿越控制是解决这些问题的有效途径。

随着风电行业的发展,为了进一步提高风能利用率,人们将目光投向双风轮发电机组,以求打破传统单风轮风力发电机的瓶颈,获取更多风能。Kim 等人^[13]最先设计出由双转子风力涡轮机组成的新型动力传递系统。Jung 等人^[14]在 Kim 的设计方案基础上进一步研究了反转双风轮风力发电机的风能捕获率,并建立了 30 kW 的原型样机和 1 MW 的商业样机。运用 Ellip Sys 三维技术研究了双风轮发电机组在不同转速及距离下的工作特性。Kubo 等人^[15-16]应用空气动力学理论对同侧双风轮结构进行了优化。Ozbay 等人^[17]实验研究了双转子风力发电机。杨承志等^[18]对新型双风轮风力机气动特性的三维流场进行了模拟数值。周云龙等^[19-20]对当叶片数目不同的双风轮风力发电机和相同规格大小的单风轮风力发电机运行特性进行了测试,利用 Bin 方法从测试得到的数据中提取了其运行特性特征值,获得了发电机发电功率及发电效率等相关特性曲线,并对其性能特性进行了系统的分析和评估。与单风轮风机相比较,新型双风轮风力发电机在相同容量下,单机成本更低,风能利用率更高,风机叶轮尺寸更小,且运行稳定性也更高。因此,加大对新型双风轮风力发电机的研发是未来风力发电技术研究的必然趋势。

本文分析了高柔塔双风轮发电机组关键部件之间的耦合振动特性;结合坎贝尔图推导出了机组的共振区间,提出了一种双风轮发电机组共振穿越算法,并定义了共振穿越控制实现的判定条件;在 6 个不同场景下仿真测试,验证了该共振穿越算法的准确性和有效性。

1 双风轮风机模型

风力发电机的整体模型由气动系统、传动系统、发电机系统组成。风经过风机时通过双风轮机

组主控系统及前、后风轮控制器控制前后风轮的运动,然后经过发电机变流控制器和并网变流控制器控制前、后传动轴动作,最后通过双端变流器控制双转子发电机运作形成整套的双风轮机组模型,模型示意如图 1 所示。

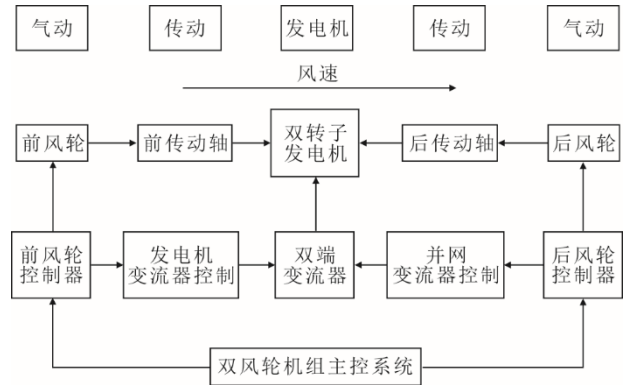


图 1 双风轮风力发电机整体模型
Fig.1 Overall model of the dual-rotor wind turbine

不考虑尾流影响,双风轮发电机组共振穿越控制可用前风轮机组或后风轮机组为例进行建模。图 2 为前风轮机组模型。

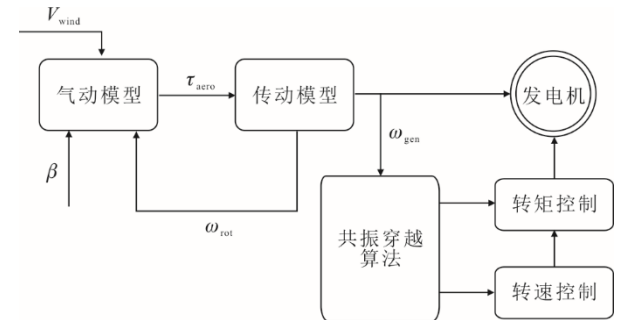


图 2 前风轮机组模型
Fig.2 The front wind turbine unit model

1.1 气动模型

风机转子所产生的气动转矩为:

$$\tau_{aero} = \frac{0.5\rho AV_{wind}^3 C_p(\beta, \lambda)}{\omega_{rot}} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; V_{wind} 为风速; ω_{rot} 为转子转速; C_p 为功率系数; β 为桨距角; λ 为叶尖速比。

1.2 传动模型

采用双质量模型来表示传动系统动力学。该模型的输入为发电机反向转矩和气动转矩。低速轴双质量模型用线性微分方程^[21]描述:

$$J_{rot} \frac{d}{dt} \omega_{rot} = \tau_{aero} - K(\theta_{rot} - \theta_{gen}) - D \cdot \frac{d}{dt}(\theta_{rot} - \theta_{gen}) \quad (2)$$

$$J_{gen} \frac{d}{dt} \omega_{gen} = -\tau_{gen} - K(\theta_{gen} - \theta_{rot}) - D \cdot \frac{d}{dt}(\theta_{gen} - \theta_{rot}) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{rot} = \omega_{rot}, \quad \frac{d}{dt} \theta_{gen} = \omega_{gen} \quad (4)$$

式中： ω_{rot} 和 ω_{gen} 为风机转子和发电机转速； θ_{rot} 为低速轴的角位置； θ_{gen} 为高速轴的角位置； J_{rot} 为转子转动惯量； J_{gen} 为发电机转动惯量； K 为低速轴和高速轴的刚度系数； D 为两轴的阻尼系数。

1.3 发电机模型

发电机模型为：

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} n_{pp} \omega_{gen} i_q \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} n_{pp} \omega_{gen} i_d - \frac{\psi_m n_{pp} \omega_{gen}}{L_q} \quad (6)$$

$$\tau_m = \frac{3}{2} n_{pp} [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (7)$$

式中： L_d 和 L_q 分别为 d 、 q 轴自感系数； R_s 为定子绕组电阻； i_d 和 i_q 分别为 d 、 q 轴电流和电压； ψ_m 为转子永磁体诱导进入定子绕组的磁通量； n_{pp} 为极对数； ω_{gen} 为发电机转速。

2 双风轮共振穿越算法

本文在不考虑双风轮风电机组前后风轮耦合的情况下，针对双风轮风电机组的前叶轮提出了一种共振穿越算法。假设前叶轮共振穿越时，不考虑后风轮的影响单独控制，该算法同样适用于双风轮机组的后叶轮。

2.1 共振区间的寻找

双风轮风电机组共振区间的寻找基于风电机组关键部件的固有频率，推导出对应的前后风轮转速和前后发电机转速，从而得到共振区间。通过对已有的坎贝尔图进行分析，寻找各个部件之间可能存在的共振区域^[22]。

风机坎贝尔图可以反映整机各部件相互耦合之后的模态特性。坎贝尔图中包含了各部件耦合模态频率及各模态振动时相互影响的情况。当模态频率在风轮变速运行范围内，与 1P、3P、6P 等包络线相交时，即为风机危险运行点，此时需重点分析该部件在相应运行转速下的振动阻尼情况及相应的特殊控制手段。图 3 为双叶轮机组风电机组前风轮与传动链坎贝尔图，shaft1 表示前传动链，rotor 为前风轮。

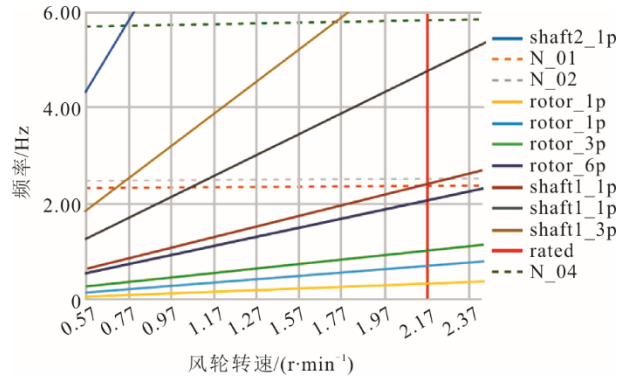


图 3 双风轮风电机组前风轮与传动链坎贝尔图
Fig.3 Campbell diagram of the front wind wheel and drive chain of the dual-rotor wind turbine unit

2.2 共振穿越控制器

共振穿越控制采用 PI 控制器执行，控制器如图 4 所示。共振穿越控制器通过 S_controller 启动。

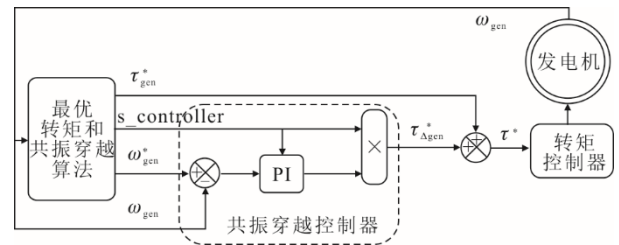


图 4 共振穿越控制器
Fig.4 The resonance traversal controller

共振穿越控制器主要包括切换控制和共振穿越控制 2 部分。

切换控制分为由正常控制进入共振穿越控制以及由共振穿越控制返回正常控制 2 种情况。对应的控制器切换情况有 4 种：当发电机转速达到共振下限 V_{low} 时，即发电机转矩 τ_{gen} 大于转矩下限 τ_{low} 时，切换到共振穿越控制器；当发电机转速下落到共振上限 V_{high} 时，即发电机转矩 τ_{gen} 小于转矩上限 τ_{high} 时，切换到共振穿越控制器；当发电机转速快速从共振下限增加到大于共振上限时，切换到正常控制器；当发电机转速快速从共振上限下降到小于共振下限时，切换到正常控制器。共振穿越算法流程如图 5 所示。

根据风机部件固有频率，推导出共振点，选取共振点上下 10% 的转速区域设置为共振区间。为方便验证共振穿越准确率，假设共振区间为 960~1170 r/min，根据风机模型的转速-转矩曲线，得到共振区间上限和下限的转速分别对应的转矩大小，通过 MATLAB Function 模块实现控制器的切换。图 6 为控制器切换模块。

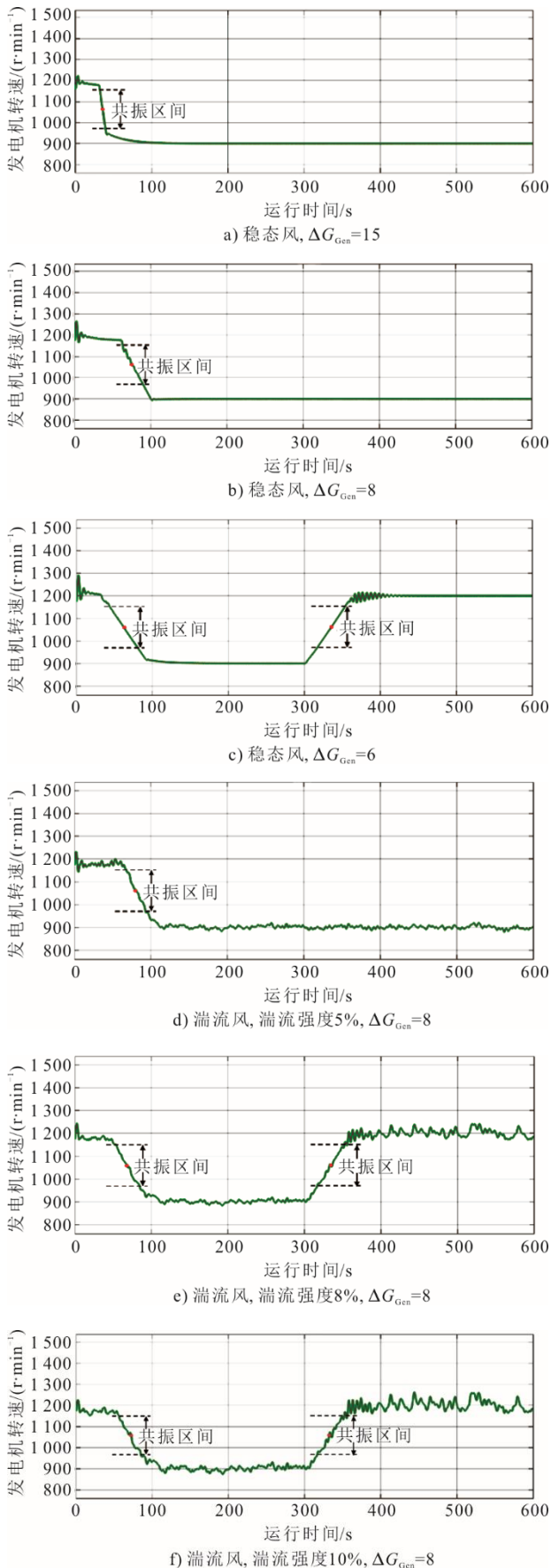


图9 共振穿越仿真结果

Fig.9 Simulation results of resonance traversal

3) 场景3 由图9c)可知, 稳态风、转速参考值变化量 $\Delta G_{Gen}=6$ 时, 有2次穿越过程。向下穿越过程 $T=41.667\text{ s}$, $T_r=42.563\text{ s}$, $T_r<1.1T$; 向上穿越过程 $T=41.667\text{ s}$, $T_r=45.382\text{ s}$, $T_r<1.1T$ 。可以判断, 在此场景下实现了共振穿越。通过大量仿真验证可知, 场景3下能够准确实现共振穿越。

4) 场景4 由图9d)可见, 湍流风、湍流强度5%, 转速参考值变化量 $\Delta G_{Gen}=8$ 时, $T=31.25\text{ s}$, $T_r=33.48\text{ s}$, $T_r<1.1T$, 可以判断, 在此场景下实现了共振穿越。通过大量仿真验证可知, 场景4下能够准确实现共振穿越。

5) 场景5 由图9e)可见, 湍流风、湍流强度8%, 转速参考值变化量 $\Delta G_{Gen}=8$ 时, 有2次穿越过程。向下穿越过程 $T=31.25\text{ s}$, $T_r=32.36\text{ s}$, $T_r<1.1T$; 向上穿越过程 $T=31.25\text{ s}$, $T_r=33.82\text{ s}$, $T_r<1.1T$ 。可以判断, 在此场景下实现了共振穿越, 通过大量仿真验证可知, 场景5下能够准确实现共振穿越。

6) 场景6 由图9f)可见, 湍流风、湍流强度10%, 转速参考值变化量 $\Delta G_{Gen}=8$ 时, 有2次穿越过程。向下穿越过程 $T=31.25\text{ s}$, $T_r=34.18\text{ s}$, $T_r<1.1T$; 向上穿越过程 $T=31.25\text{ s}$, $T_r=33.74\text{ s}$, $T_r<1.1T$ 。可以判断, 在此场景下实现了共振穿越, 通过大量仿真验证可知, 场景6下能够准确实现共振穿越。

不考虑彼此作用下的后风轮控制器设计与仿真和前风轮均很相似, 实验结果可以进行类比迁移, 因此不再赘述。由上述仿真场景可以看到, 无论是风况发生变化, 还是转速参考值变化量发生改变, 当发电机转速达到共振区间临界值时, 均能快速切换到共振穿越控制器, 依据判定条件判定均实现了共振穿越功能。在实验次数足够多的情况下, 认为在目前采用的模型和场景下, 设计的共振穿越控制器能够实现准确共振穿越。

4 结 论

本文考虑了风电机组塔筒和叶轮之间的共振情况, 并通过已有数据进行推导, 得到了塔筒的固有频率, 并以此为基础得到了风电机组前叶轮及后叶轮转速的共振区间; 针对双风轮风电机组的共振穿越方法, 提出了一种可实现、可验证的主动共振穿越算法。另外, 关于共振穿越准确率的问题, 定义了一种共振穿越控制实现的判定条件。大量仿真验证结果表明, 该算法在稳态风场景和3种不同湍流强度场景下仍然能够实现准确共振穿越, 证明基于上述假设共振区间和模型下的共振穿越控制算法的有效性。

[参考文献]

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2021年中国风电吊装容量统计简报[J]. 风能, 2022(5): 38-52.
The Wind Energy Professional Committee of the Chinese Renewable Energy Society. Statistical briefing on China's wind power hoisting capacity in 2021[J]. Wind Energy, 2022(5): 38-52.
- [2] 张宇, 王凤昊, 刘洋, 等. 低风速地区风电场优化模型对发电质量的影响[J]. 电工电气, 2022(8): 41-47.
ZHANG Yu, WANG Fenghao, LIU Yang, et al. Research on the influences of the optimal electric field model on power generating quality in low wind speed regions[J]. Electrician Electrical, 2022(8): 41-47.
- [3] 张忍, 郭小锋, 黄鑫祥. 内陆低风速风力机叶片气动外形的多目标优化设计[J]. 中原工学院学报, 2021, 32(6): 30-34.
ZHANG Ren, GUO Xiaofeng, HUANG Xinxiang. Multi-objective aerodynamic shape optimization design of inland low wind speed wind turbine blades[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2021, 32(6): 30-34.
- [4] 郭珊珊, 韩巧丽, 王一博, 等. 实度对低风速风电机组风轮气动性能影响研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 373-381.
GUO Shanshan, HAN Qiaoli, WANG Yibo, et al. Research on effect of solidity on aerodynamic performance of wind turbines rotor with low wind speed[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(8): 373-381.
- [5] 王振宇. 低风速区 MW 级风电机组液压变桨关键控制技术[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022: 1.
WANG Zhenyu. Research on key control technology of MW hydraulic pitch control for wind turbine in low wind speed zone[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022: 1.
- [6] 马赫男. 风电机组柔性塔筒降载控制技术研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 1.
MA Henan. Research and application of load reduction control technology for flexible tower of wind turbines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 1.
- [7] 关乃元, 付兵, 赵俭斌. 基于 ABAQUS 的近海塔筒式风机模型建立与模态分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(10): 1-4.
GUAN Naiyuan, FU Bing, ZHAO Jianbin. Modeling and modal analysis of offshore tower fan based on ABAQUS[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(10): 1-4.
- [8] 陶涛, 龙凯, 白欣鉴, 等. 风电机组高柔塔二阶涡激振动特性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 498-503.
TAO Tao, LONG Kai, BAI Xinjian, et al. Study on the of the second-order vortex-induced vibration characteristics of high flexible towers of wind turbines[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(2): 498-503.
- [9] 曹堇鑫, 赵迪, 李彦蓉, 等. 兆瓦级直驱风力发电机组塔筒涡激振动分析[J]. 重型机械, 2021(6): 52-55.
CAO Yaoxin, ZHAO Di, LI Yanrong, et al. Analysis of vortex induced vibration for MW direct drive wind turbine tower[J]. Heavy Machinery, 2021(6): 52-55.
- [10] 李益, 凡威. 三桩基础海上风机整体结构的共振分析[J]. 中国新技术新产品, 2019(20): 15-16.
LI Yi, FAN Wei. Resonance analysis of integral structure of offshore wind turbine with three pile foundation[J]. China New Technology and New Product, 2019(20): 15-16.
- [11] 叶少青. 高柔塔风力发电机组禁区穿越控制策略及参数设定[J]. 电子质量, 2021(11): 29-32.
YE Shaoqing. Control strategy and parameter setting of exclusion zone crossing for wind turbine with high-soft tower[J]. Electronic Quality, 2021(11): 29-32.
- [12] 郑北超, 王瑞, 张丹. 120 m 柔性塔架开发关键技术及其试验研究[J]. 东方电气评论, 2021, 35(2): 54-57.
ZHENG Beichao, WANG Rui, ZHANG Dan. Key technology and experimental research on flexible tower development[J]. Dongfang Electric Review, 2021, 35(2): 54-57.
- [13] NO T S, KIM J E, MOON J H, et al. Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system[J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2124-2132.
- [14] JUNG S N, NO T S, RYU K W. Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system[J]. Renewable Energy, 2005, 30(5): 631-644.
- [15] KUBO K, HANO Y, MITARAI H, et al. Intelligent wind turbine unit with tandem rotors (discussion of prototype performances in field tests)[J]. Current Applied Physics, 2009, 10(2): S326-S331.
- [16] KUBO K, KANEMOTO T. Development of intelligent wind turbine unit with tandem wind rotors and double rotational armatures (2nd report, characteristics of tandem wind rotors)[J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2008, 3: 370-378.
- [17] OZBAY A, HUI H, WEI T. Experimental investigation on the wake characteristics and aeromechanics of dual-rotor wind turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 138(4): 45.
- [18] 周云龙, 杨承志, 李律万. 新型双风轮风力机气动特性的三维流场数值模拟[J]. 动力工程学报, 2012, 32(9): 698-704.
ZHOU Yunlong, YANG Chengzhi, LI Lüwan. 3D flow field numerical simulation on aerodynamic characteristics of new double-rotor wind turbines[J]. Journal of Power Engineering, 2012, 32(9): 698-704.
- [19] 周云龙, 李律万, 杨承志, 等. 新型双风轮单转子风力发电装置特性测试[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(3): 258-262.
ZHOU Yunlong, LI Lüwan, YANG Chengzhi, et al. Performance test for novel double-rotor wind turbine with single rotor[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(3): 258-262.
- [20] 周云龙, 杨承志, 岳巍澎. 一种新型双风轮风力发电装置的特性分析[J]. 中国电力, 2011, 44(4): 75-78.
ZHOU Yunlong, YANG Chengzhi, YUE Weipeng. Characteristic analysis for a new type of double-rotor wind turbine[J]. Electric Power, 2011, 44(4): 75-78.
- [21] LICARI J, LIANG J, JENKINS N, et al. Torsional damping considering both shaft and blade flexibilities[J]. Wind Engineering, 2012, 36(2): 181-195.
- [22] 王苑. 基于叶尖定时的叶片扭转及弯扭耦合振动参数辨识研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021: 1.
WANG Yuan. Parameter identification of blade torsional and bending-torsional coupling vibration based on blade tip timing[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2021: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)