

兆瓦级风电机组低电压穿越过程运行特性分析

朱志权

(上海电气风电集团股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 针对目前研究中陆上大型双馈风电机组低电压穿越(LVRT)过程运行特性研究不足,且缺乏测试仿真对比验证分析的现状,对某兆瓦级陆上风电机组,建立 GH Bladed 仿真模型,研究低电压故障过程中机组运行特性及关键部位载荷特性。同时,对该机组实际型式试验测试数据进行分析,对特定 LVRT 工况进行仿真,对比分析故障对于机组运行特性影响以及对塔架载荷的影响。仿真及测试结果都表明 LVRT 故障对机组塔架载荷有重要影响,且在大风工况下影响更大。

关键词: 风电机组; 低电压穿越; 机械载荷; 测试验证

中图分类号: TM315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0087-06

doi: 10.12177/emca.2022.081

Analysis on Operation Characteristics of MW-Level Wind Turbine During Low Voltage Ride Through

ZHU Zhiquan

(Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: In view of the lack of research on the operation characteristics of large onshore doubly fed wind turbine during low voltage ride through (LVRT) and the lack of comparative verification of test and simulation, a GH Bladed simulation model is established for a MW-level onshore wind turbine to study the operation characteristics and load characteristics of key components during low voltage fault. At the same time, the actual type test data of the turbine are analyzed, and the specific LVRT conditions are simulated to compared and analyze the influence of the fault on the operation characteristics and the tower load. The simulation and test results show that the LVRT fault has an important impact on the tower load, and the impact is greater under strong wind conditions.

Key words: wind turbine; low voltage ride through (LVRT); mechanical load; test verification

0 引言

低电压穿越(LVRT)是对并网风机在电网出现电压跌落时仍保持并网的一种特定的运行功能要求。风电机组的 LVRT 能力是风电机组并网的技术指标之一,随着风电装机容量的迅猛增加,为保证风电健康可持续发展,风力发电系统需具有较强的 LVRT 能力,同时能方便地为电网提供无功功率支持。电网电压跌落会对运行机组动态特性造成瞬间的影响,包括发电机电磁转矩、发电机转速、机组输出有功功率、风轮转速以及机组桨距

角等。而除了运行特性,风电机组 LVRT 的实质指的是电网电压跌落时风电系统能量的不平衡,根据能量守恒定律,当电网电压瞬间跌落,机组输出功率瞬间下降,机组风轮叶片捕获的能量将转化为其他形式,如机组关键部件振动,即当此种巨大的能量不平衡发生时,可能造成风电机组传动链的转矩不平衡或扭振^[1],以及对塔筒的载荷冲击。

部分文献研究了风电机组重要部件在正常工况下机械载荷特性仿真与测试验证情况,也有文献研究了机组在 LVRT 过程中重要部件如主轴、塔架的仿真与测试载荷特性,但是这些文献研究

收稿日期: 2022-06-20; 收到修改稿日期: 2022-07-18

作者简介: 朱志权(1979—),男,硕士,高级工程师,研究方向为风力发电机组电气控制、测试验证技术。

对象实际测试机组都为小兆瓦机组,即 4 MW 以下机组,并且未对实际 LVRT 故障工况进行测试与仿真对比验证分析。

4 MW 及以上机组为大兆瓦机组,为研究 LVRT 故障对大兆瓦双馈机组行为及重要部件的载荷特性影响,本文运用 GH Bladed 仿真软件建立某 4.X MW 大型双馈风力发电机组仿真模型并进行仿真分析,利用该机组已有型式试验数据对该机组实际运行特性进行分析,同时对 LVRT 故障实测工况进行仿真和对比验证分析,深入研究 LVRT 故障对大兆瓦机组重要部件的影响。

1 LVRT 机组行为分析

在兆瓦级双馈风电机组发生 LVRT 期间,电网电压的跌落造成风电机组输出电磁功率与机组风轮捕获能量瞬间不平衡,发电机转速上升。当发电机转速达到发电机额定转速时,变桨系统动作,通过调节叶片桨距角降低风力机的风能转换系数,使输入和输出功率平衡,发电机转速下降^[2]。由于机组变桨速率有一定的限制,捕获风能降低的速度远不及因为电网电压跌落导致机组有功功率降低的速度。文献[3]建立了双馈型风电机组双馈电机数学模型以及传动链系统动力学模型,分析了电压跌落时风电机组有功出力降低导致发电机电磁转矩减小,轴承部分产生较大应力变化,从而对轴承和塔筒的机械载荷产生的冲击。文献[4]分析了塔架左右方向运动响应模型及特性,风电机组塔架左右方向一阶模态运行特性是一个典型的欠阻尼二阶系统,在电网电压故障情况下,双馈发电机组电磁转矩的突变易激发塔架左右方向晃动。

1.1 LVRT 故障

GB/T 36995—2018^[5] 规定了风电机组在 LVRT 时应具有图 1 中曲线 1 的电压-时间范围内不脱网连续运行的能力。

LVRT 测试使用电压跌落发生装置在测试点产生电压跌落,负载测试时按照表 1 设置电压跌落幅值及持续时间进行测试。

1.2 Bladed 建模仿真分析

Bladed 是英国 Garrad Hassan 公司开发的针对风力发电机组领域建模及载荷计算的软件,该软件被广泛应用于陆上及海上风电机组的建模仿

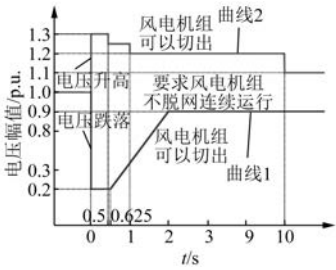


图 1 风电机组 LVRT 故障曲线

真,主要用于输出各个部件的时序载荷、极限载荷与疲劳载荷,以及风电机组各部件设计及选型。除了常规的风电机组运行工况,Bladed 还可以对机组一些非正常运行情况进行仿真,包括限功率或限转速运行工况、屏蔽或开启某项特殊控制策略下的运行工况、以及 LVRT 工况等。

表 1 电压跌落测试电压规格

序号	电压跌落幅值	电压跌落持续时间/
	$U_T/(p.u.)$	ms
1	0.90~0.05	2 000±20
2	0.75±0.05	1 705±20
3	0.50±0.05	1 214±20
4	0.35±0.05	920±20
5	0.20±0.05	625±20

在 Bladed 软件中,利用 turbine faults 模块中的 generator faults,设定 LVRT 时的电网电压分布以及电压开始跌落的时间,仿真低电压故障穿越工况。着重分析机组分别在小风及大风风况下故障穿越过程中运行参数的情况以及载荷响应情况;仿真工况选择电网电压跌落程度最大的恶劣工况(电压跌落 80%)进行仿真,以分析在最恶劣情形下机组运行安全性。

1.3 小风下电压跌落 80% 工况仿真分析

使用稳态风况进行仿真分析,平均风速设定为 5 m/s,按照表 1 在 Bladed 软件的故障模块设定电压跌落幅值为额定电压的 80%,故障触发时间为开始仿真后第 60 s,故障持续时间为 625 ms。

电压跌落仿真过程运行参数及载荷响应如图 2 所示。从图 2 中可以看出,在发生 LVRT 故障时,由于电网电压跌落,发电机扭矩急剧跌落,发电机输出电磁功率与捕获能量不平衡,转速快速上升,由正常转速约 113.75 r/s 上升至最高

115 r/s, 由于未达到仿真机组发电机额定转速 178 r/s, 机组变桨系统未动作。同时由图 2(f) 和图 2(g) 可以看到, 机组的机舱左右方向位移和塔

架左右方向的载荷在电压跌落时增大, 幅值有波动趋势。但是小风下对于塔架左右载荷影响幅度较小, 最大载荷增大 19% 左右。

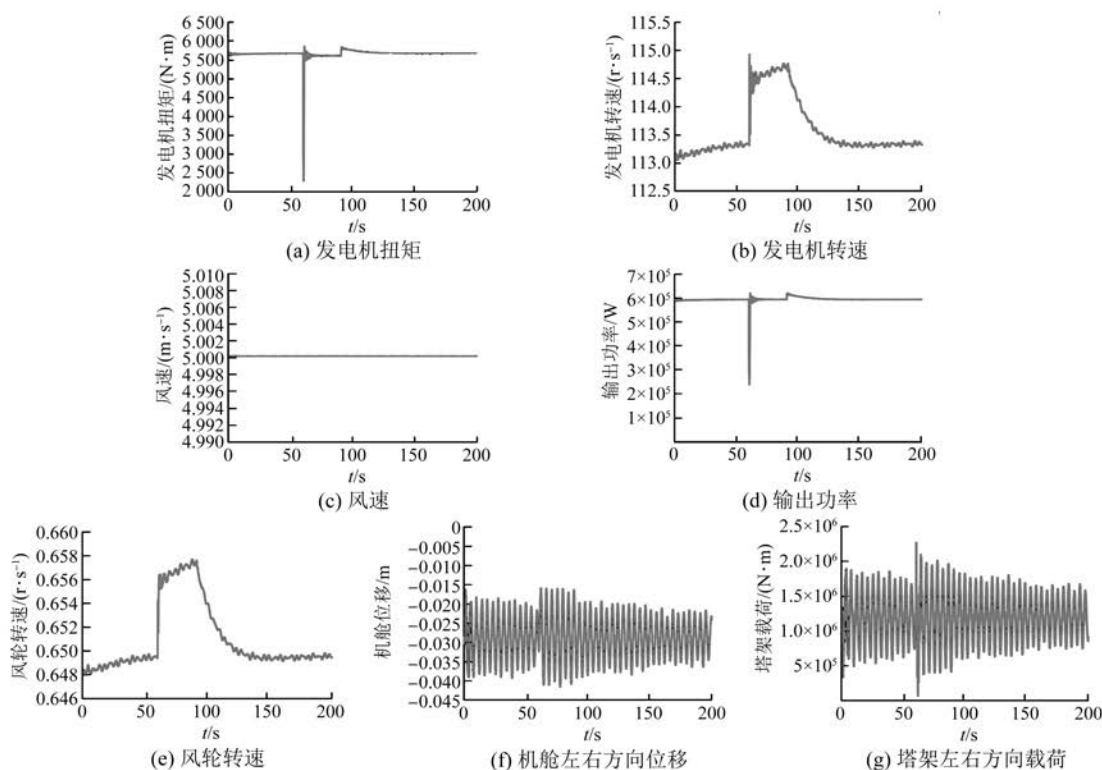


图2 小风下电压跌落 80% 仿真响应结果

1.4 大风下电压跌落 80% 工况仿真分析

使用稳态风况进行仿真分析, 平均风速设定为 13 m/s, 按照表 1 在 Bladed 软件的故障模块设定电压跌落幅值为跌落 80%, 故障触发时间为开始仿真后第 60 s, 故障持续时间为 625 ms。同时

对于未触发 LVRT 故障的正常发电工况进行仿真, 将两次仿真结果进行对比分析。

机组正常运行工况和大风下电压跌落 80% 工况仿真过程运行参数及载荷响应如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在大风风况下机组发生 LVRT

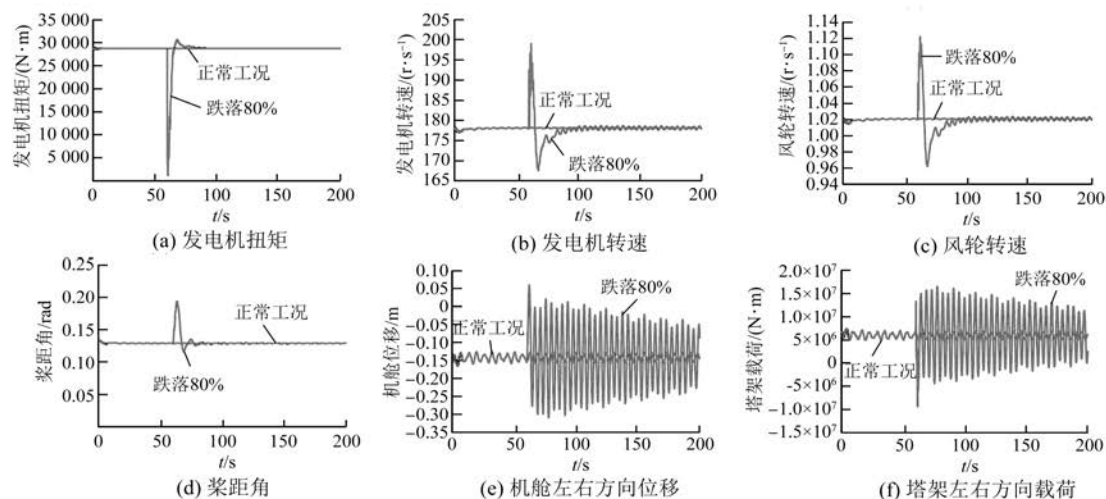


图3 大风下电压跌落 80% 与正常工况下仿真响应结果

故障时,由于电网电压跌落,发电机扭矩急剧跌落,发电机输出电磁功率与捕获能量不平衡,转速快速上升,由正常转速约 177.95 r/s 上升至最高 198.67 r/s,超过了机组的发电机额定转速,因此机组的变桨系统开始收桨来降低捕获的风能,从而使输入输出功率平衡,发电机转速回落,直至恢复正常。同时由图 3(e)和图 3(f)可以看出,机组的机舱左右方向位移和塔架左右方向的载荷在电压跌落时增大,且变化幅值比小风工况时的更大,在故障穿越时机舱左右方向最大位移增大 87.6%,塔架左右方向最大载荷增加 124%。

2 LVRT 测试机组行为分析

2.1 测试系统

风电机组测试系统是基于多种通讯协议的分布式数据采集系统,可同步记录风电机组功率特性测试及载荷测试所需求的多种变量,例如风速、风向、温度、气压等气象参数;有功功率、无功功率等电气参数;风轮转速、桨距角、偏航误差、风轮方位角、机组运行状态等运行参数;以及叶片载荷、风轮载荷和塔架载荷等载荷量。图 4 给出了一个基于集成存储控制器(IMC)搭建的采集系统。

采集系统可以记录在 LVRT 测试期间风力发电机组基本运行参数以及塔架等关键部位的基本载荷。对 4.X MW 大型双馈风力发电机组型式试验数据进行分析。

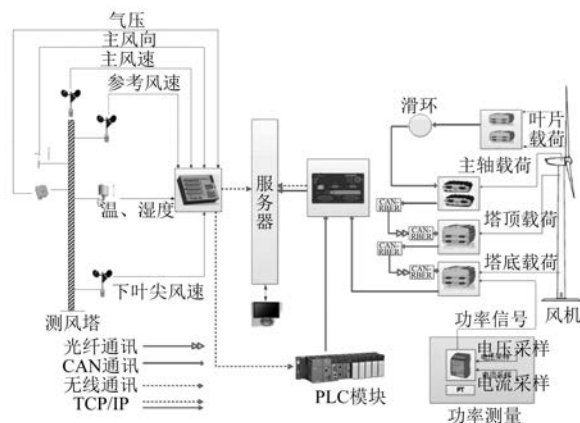


图 4 基于 IMC 设备搭建的采集系统

2.2 小风下电压跌落 80%测试结果

使用小风工况下电压跌落 80% 测试数据分析小风工况下发生故障穿越时刻测试机组响应特性。测试工况轮毂中心高度平均风速为 5.93 m/s,电网发生三相短路故障,电压跌落至额定电压的 20% (跌落幅值为额定电压 80%),跌落持续时间为 625 ms,机组故障穿越时刻运行参数及载荷响应如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在整个 LVRT 过程中机组未脱网,由于测试工况轮毂中心高度平均风速为 5.93 m/s,机组未达到额定功率,在电网电压跌落时机组有功功率瞬间跌落,机组风轮转速上升,转速未达到额定转速,桨距角未动作。主轴受到冲击发生扭振,扭矩幅值变化剧烈,在电网恢复的过程中,呈振荡恢复的趋势,而在小风工况下,对塔架左右测试载荷影响微小,仅出现了小幅度的振动。

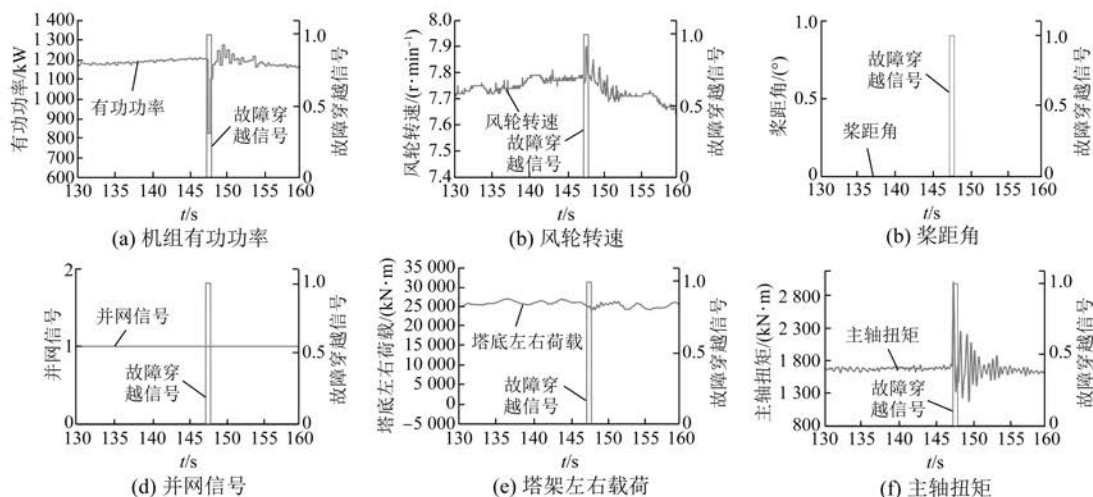


图 5 小风下电压跌落 80% 测试机组行为特性

2.3 大风下电压跌落 80% 测试结果

使用大风工况下电压跌落 80% 测试数据分析大风工况下发生故障穿越时刻测试机组响应特性,测试工况平均风速为 12.28 m/s,电网发生三相短路故障,电压跌落至额定电压的 20% (跌落幅值为额定电压 80%),跌落持续时间为 625 ms,机组故障穿越时刻运行参数及载荷响应如图 6 所示。

从图 6 可以看出,由于测试工况轮毂中心高度平均风速为 12.28 m/s,达到额定风速为大风工

况,故障时刻机组处于额定功率下运行状态,在电网电压跌落时机组有功功率瞬间跌落,机组风轮转速上升,转速达到额定转速,桨距角动作按照设定速率机组收桨,以减少风轮捕获能量。主轴受到冲击发生扭振,扭矩幅值变化剧烈,在电网恢复的过程中,呈振荡恢复的趋势,同时,在大风工况下机舱左右方向加速度明显增大振荡,塔架左右弯矩载荷明显增加。在恢复过程中,由于有一定的扭振存在,可以看出风轮转速在恢复过程中有一定的振荡过程。

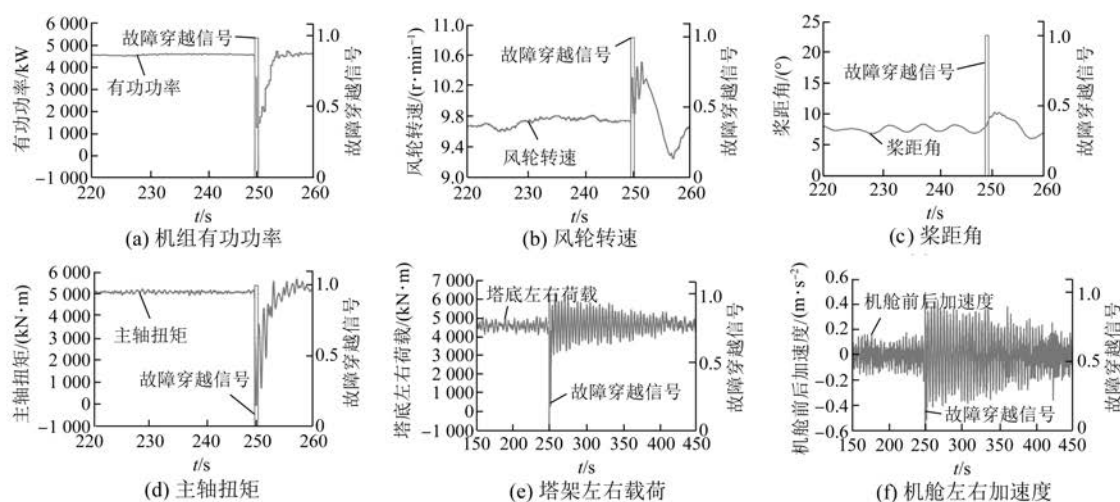


图 6 大风下电压跌落 80% 测试机组行为特性

3 测试工况仿真对比

使用测试数据识别出机组如叶片挥舞摆振一阶、塔架前后左右一阶等频率,以及实际生产部件质量、质心等来修正仿真模型,使仿真模型尽可能接近实际机组。使用修正后模型进行仿真,对测试结果和仿真结果进行对比分析。

在测试与仿真对比时,要尽可能保证风资源环境的一致性,在实际风速随机变化的前提下,进行 LVRT 测试工况的仿真时需要根据实际测试状态,在 Bladed 软件中设定合适的时间点触发 LVRT,以尽可能保证仿真与测试环境的相似性,复现实际测试工况。

对大风下电压跌落 80% 工况进行仿真,将测试数据中的风速、偏航误差、空气密度、计算出的湍流强度等作为仿真输入参数,根据实际发生故

障穿越时间点设定故障触发时间,在 Bladed 故障模块设定电压跌落幅值为跌落 80%、故障持续时间 625 ms,对修正后的模型进行瞬态运行工况仿真。测试与仿真结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在大风下发生三相电压跌落时,测试、仿真、理论分析一致,都表现出了相同的行为特性,机组在故障穿越时的有功功率急剧下降,风轮转速升高,同时受能量不平衡影响,机舱左右加速度增大,出现振荡趋势,机组塔架左右载荷增大。结果验证了理论分析,同时也更真实地反映了 LVRT 时刻机组运行和载荷特性,故障穿越对机组载荷的影响不可忽略,需要关注分析。在仿真与测试对比结果中,该 4.X MW 机组塔架左右仿真载荷结果大于测试载荷,在设计时使用仿真载荷对塔架进行校核计算,LVRT 时引发的塔架大载荷在安全范围之内。

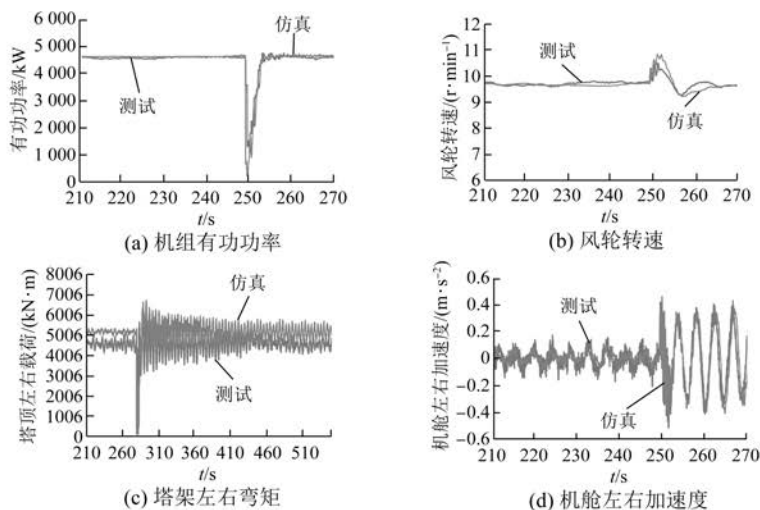


图7 大风下电压跌落 80%测试与仿真对比结果

4 结 语

LVRT 过程会引起风电机组运行特性变化,也会对机组结构部件造成冲击载荷。针对某 4.X MW 大型双馈机组,本文使用 GH Bladed 建立模型并仿真 LVRT 过程工况,对已开展型式试验的该机组进行 LVRT 测试期间数据分析,研究故障期间机组行为及机械载荷特性以及测试验证对比分析,确保机组设计的安全性。仿真和测试结果表明:

(1) 在 LVRT 过程中,电网电压的跌落带来的能量不平衡会导致机组传动链扭振,同时造成塔架载荷冲击,使塔架载荷瞬时增大,在故障恢复的过程中有一定的振荡。

(2) 在大风工况下, LVRT 对于机组的影响远大于小风工况,机舱左右振动的幅度显著增加,仿真情况塔架载荷的最大载荷比正常工况载荷增加超过 120%。

(3) 机组设计时必须考虑 LVRT 故障下载

荷,通过测试与仿真结果对比,验证机组的设计载荷包络测试载荷,机组设计处于安全范围中。

【参考文献】

- [1] 秦世耀,李少林,王瑞明,等. 风电机组传动链柔性建模及电网故障响应特性研究[J]. 太阳能学报, 2015,36(3):727.
- [2] 贺敬,李庆,秦世耀,等. 双馈风电机组叶片变化对 LVRT 性能的影响研究[J]. 可再生能源, 2014,32(12):1828.
- [3] 付德义,秦世耀,薛扬,等. 风电机组低压电穿越过程机械载荷特性研究[J]. 太阳能学报, 2016,37(5):1100.
- [4] 应有,孙勇,杨靖,等. 大型双馈风电机组电网故障穿越过程载荷特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020,44(12):131.
- [5] 中国机械工业联合会. 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程:GB/T 36995—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

(上接第 33 页)

- [21] 晏亭太. 智能自适应 PID/PD 控制器设计及仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [22] 史江. 永磁同步电机控制系统 PI 参数优化研究[D]. 天津:河北工业大学, 2013.

- [23] 刘威,郭直清,姜丰,等. 协同围攻策略改进的灰狼算法及其 PID 参数优化[J/OL]. 计算机科学与探索, 2022-07-29. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5602.tp.20210714.1741.002.html>.

携手节能减排 悠享生活空间

让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣