

风电机组惯量响应与一次调频能力研究

郭江涛[✉], 陈烁, 曾瑞斌, 黄丽玲, 张一丰

(明阳智慧能源集团股份公司, 广东 中山 528437)

摘要: [目的] 风电大规模接入电网给电网运行的稳定性尤其频率稳定带来极大挑战。为改善大规模风电接入电网导致的调频能力不足, 提升风电并网频率适应性能力, 风电机组亟须具备调频功能及响应及时性。[方法] 文章采用基于转子动能和桨距角备用的调频系统方案, 在电网频率变化时可快速精确地为电网提供有功支撑。首先, 在对惯量响应和一次调频算法逻辑进行理论分析的基础上, 进行主控算法设计; 然后, 在联合仿真平台进行功能性验证; 最后, 在某项目进行实测。[结果] 仿真和测试结果表明: 基于转子动能和桨距角备用的调频系统方案可应对多种电网频率变化, 快速提供有功支撑。[结论] 风电机组的调频系统方案可在多种频率变化工况下进行快速地惯量响应(响应时间小于 500 ms)和一次调频响应(响应时间小于 5 s), 并为电网提供稳定的有功支撑, 有助于辅助电网频率恢复, 有效提升风电机组的频率适应性。

关键词: 惯量响应; 一次调频; 有功支撑; 联合仿真; 主控算法; 频率变化

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0082-09

开放科学(资源服务)二维码:



Research for Inertia Response and Primary Frequency Regulation Ability of Wind Turbine

GUO Jiangtao[✉], CHEN Shuo, ZENG Ruibin, HUANG Liling, ZHANG Yifeng

(Mingyang Smart Energy Group Limited, Zhongshan 528537, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Large-scale connection of wind power to the power grid poses great challenges to the stability (especially frequency stability) of grid operation. In order to solve the problem of inadequate frequency regulation capability caused by large-scale connection of wind power to the power grid and improve the frequency adaptability of wind power grid connection, wind turbines need to have frequency regulation function and response timeliness. [Method] This paper adopted a frequency regulation system scheme based on rotor kinetic energy and pitch angle reserve, which could provide active support for the power grid quickly and accurately during the power grid frequency change. Firstly, the main control algorithm was designed based on the theoretical analysis of inertia response and primary frequency regulation algorithm logic. Then, the functional verification was carried out on the co-simulation platform. Finally, the actual test was carried out in a project. [Result] The simulation and test results showed that the frequency regulation system scheme based on rotor kinetic energy and pitch angle reserve could cope with a variety of grid frequency changes and quickly provided active support. [Conclusion] The frequency regulation system scheme of wind turbines can perform a fast inertia response (with the response time less than 500 ms) and primary frequency regulation response (with the response time less than 5 s) under various frequency change conditions and provide active support for the power grid, which can help recover the grid frequency and effectively improve the frequency adaptability of wind turbines.

Key words: inertia response; primary frequency regulation; active support; co-simulation; main control algorithm; frequency change

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-02-03 修回日期: 2023-03-28

基金项目: 广东省 2022 年省级促进经济高质量发展海洋六大产业专项资金项目“省级 MW 级超大型海上风力发电机组及关键部件的研发”(粤自然资合[2022]25 号)

0 引言

风功率具有间歇性、随机性等特点,伴随风电大规模并网,且风电机组为保证发电量最优,一般运行在最大功率跟踪模式下,输出的有功功率随风速变化^[1-2];当风速突变时,必然带来风机输出功率突变,进而导致电网频率波动,且由于风电机组网侧变流器通常采用电网电压定向的控制方式,无法响应电网频率的变化,电网稳定性势必面临巨大挑战^[3-5]。因此,风电机组具备惯量响应和一次调频调节能力是风电发展和提升风电机组并网频率适应性的必然趋势。

伴随《风力发电机组电网适应性测试规程》(GB/T 36994—2018)的实施,风电机组必须具备惯量响应和一次调频能力^[6],需对电网频率变化率和频率偏差迅速响应,参与系统调频,支撑系统频率恢复。风电机组惯量响应能力针对系统频率变化率,当频率变化率超过阈值时,模拟同步发电机组惯量特性,快速提供有功支撑,减缓电网频率变化速率;一次调频能力针对系统频率偏差,模拟同步发电机组下垂控制特性,减小电网频率变化。

风电机组调频能力研究大多集中于风电机组惯量响应和一次调频控制方向^[7-9]:惯量响应控制通过调节叶轮存储的动能输入/输出来改变风机输出功率,抑制系统频率的变化速率^[10-11];一次调频控制主要包括超速备用控制和桨距角备用控制,均通过改变风电机组的机械功率输出量调节风机输出功率^[12-13]。朱家文等^[14]提出1种风电机组惯量支撑与一次调频协调控制策略,基于风电机组桨距角特性整定风机的减载控制,降低了初期电网扰动的变化率,但存在电网频率二次跌落的可能。赵晟凯等^[15]提出风电机组自适应惯量和一次调频协调控制策略,有效改善传统超速减载风能利用率和调节裕度,并减少储能配置容量。茅靖峰等^[16-17]通过桨距角备用控制的方式预留备用容量,在一次调频期间可提供稳定的有功支撑,避免了储能配置,但减少了风能利用率。单煜等^[18-20]提出采用下垂控制实现风电场的一次调频,但并未对惯量响应能力进行验证。

本文采用惯量响应和一次调频的综合控制方式可在电网频率扰动时,增发或减少相应的有功功率抑制其频率的变化,提升风电机组的并网适应性。

同时设计风电机组的惯量响应和一次调频主控制器算法,在联合仿真平台及项目现场实际测试验证算法的正确性及有效性。

1 惯量响应和一次调频机理分析

风电机组惯量响应功能是响应电网频率变化率,可通过调节转子存储动能来短时进行功率支撑,响应速度快;一次调频功能是响应电网频率偏差,通过调节桨距角进行长时功率支撑,响应速度较慢。惯量响应和一次调频机理^[21]在多处文献已有阐述,此处不再赘述。以下内容根据标准对风电机组惯量响应和一次调频能力进行分析。

1.1 惯量响应

1) 触发条件

要实现风电机组的惯量响应功能,且在频率恢复过程中不触发惯量响应功能,需满足以下条件:

条件 1: 打开惯量响应使能开关(关闭一次调频使能开关)

$$\text{条件 2: } \begin{cases} \frac{df}{dt} > df_+ \\ \frac{df}{dt} < df_- \\ \Delta f \frac{df}{dt} > 0 \end{cases}$$

条件 3: 风电机组正常运行且网侧功率:

$$P > 20\%P_n$$

式中:

df/dt ——频率变化率(Hz/s);

df_+ ——频率变化率上限,一般取 0.3 Hz/s(Hz/s);

df_- ——频率变化率下限,一般取 -0.3 Hz/s(Hz/s);

Δz ——频率偏差量(Hz);

P_n ——风电机组额定有功功率(kW)。

上述条件 2 可满足在频率变化阶段,风电机组惯量响应功能触发,在频率恢复阶段风电机组惯量响应功能不触发。条件 3 的功率限制以防在风电机组进行惯量响应时功率降低至 10% 左右时进入共振穿越区,导致故障停机。

2) 惯量响应有功功率给定值计算

当惯量响应功能触发后,主控系统会根据式(1)得出机组的有功功率变化值。

$$\Delta P_{\text{iner}} = -\frac{T}{f_N} \frac{df}{dt} P_n \quad (1)$$

式中:

ΔP_{iner} ——有功功率变化值 (kW);

T ——惯性时间常数 (s);

f_N ——电网工频频率 (Hz)。

风机惯量响应期间其有功功率增发量主要来自于风机叶片储存的动能,考虑风电机组载荷极限及风电机组安全运行,对惯量响应有功功率变化值 ΔP_{iner} 进行限幅,得出 ΔP_{iner} 的新表达式。

$$\Delta P_{\text{iner}} = \text{limit}(\text{low}_{\text{iner}} \times P_n, \text{high}_{\text{iner}} \times P_n) \quad (2)$$

式中:

low_{iner} ——惯量响应功率变化限幅下限值,一般取 -10% (pu);

$\text{high}_{\text{iner}}$ ——惯量响应功率变化限幅上限值,一般取 10% (pu)。

综上可得出,风电机组在惯量响应期间的有功功率给定值为:

$$P_{\text{ref}} = P_0 + \Delta P_{\text{iner}} \quad (3)$$

式中:

P_{ref} ——惯量响应期间风电机组有功功率给定值参考值 (kW);

P_0 ——频率开始变化时刻的有功功率值 (kW)。

1.2 一次调频

1) 触发条件

条件 1: 打开一次调频使能开关(关闭惯量响应使能开关)

条件 2: $f < f_{d-}$ 或 $f > f_{d+}$

条件 3: 风电机组限功率运行且网侧功率:

$$P > 20\%P_n$$

式中:

F ——实际电网频率 (Hz);

f_{d-} ——频率下限阈值,取 49.8 Hz;

f_{d+} ——频率上限阈值,取 50.2 Hz。

2) 一次调频有功功率给定值计算

当 $f < f_{d-}$ 时,一次调频有功变化量如式 (4) 所示:

$$\Delta P_{\text{pri}} = -K_{f1} \frac{f - f_{d-}}{f_N} P_n \quad (4)$$

当 $f > f_{d+}$ 时,一次调频有功变化量如式 (5) 所示:

$$\Delta P_{\text{pri}} = -K_{f2} \frac{f - f_{d+}}{f_N} P_n \quad (5)$$

如图 1 所示,在一次调频过程中,需配合变桨系统进行开桨与收桨,风机逐渐释放约 $10\%P_n$ 的功率,最多再限制 $20\%P_n$ 功率,需对一次调频有功变化值 ΔP_{pri} 进行限幅处理,其新的表达式如下:

$$\Delta P_{\text{pri}} = \text{Limit}(\text{low}_{\text{fre}} \times P_n, \text{high}_{\text{fre}} \times P_n) \quad (6)$$

式 (4-6) 中:

K_{f1}, K_{f2} ——调频系数,分别取值 10 和 20(pu);

low_{fre} ——一次调频功率变化限幅下限值,一般取 10% (pu);

high_{fre} ——一次调频功率变化限幅上限值一般取 20% (pu)。

风电机组在一次调频期间的有功功率给定值为:

$$P_{\text{ref}} = P_0 + \Delta P_{\text{pri}} \quad (7)$$

2 惯量响应与一次调频控制算法

风电机组的惯量响应和一次调频功能由主控系统和变流器共同完成。其主控系统的控制算法逻辑如图 1 所示。变流器实时检测三相电网电压,同时上传频率、频率变化率、惯量响应及一次调频标志位至主控系统,主控系统根据变流器上传的信号结合惯量响应功能和一次调频功能使能标志位信号进行动作。当惯量响应使能标志位为 1 时,变流器检测电网频率变化率 df/dt 超过阈值时,变流器惯量响应标志位置 1,同时将标志位上传至主控系统,主控系统锁定当前有功功率并记录为 P_0 ,有功功率给定值按式 (3) 给定;当一次调频标志位为 1 时,机组按主控设定值进行限功率运行(一般限制在 $0.5 P_n$),变流器实时检测电网频率偏差超过阈值时,变流器惯量响应标志位置 1,同时将一次调频标志位上传至主控系统,主控系统锁定当前有功功率并记录为 P_0 ,一次调频期间有功功率给定值按式 (7) 给定,频率恢复后,机组立刻切换至限功率运行状态;在惯量响应和一次调频运行过程及正常运行过程中,变流器接收主控下发的转矩指令 T_{ref} 进行变流器控制。

根据标准要求,惯量响应过程响应时间要求不超过 500 ms,一次调频过程响应时间要求不超过 5 s。惯量响应和一次调频功率调节时间可分为两个阶段:第一阶段为变流器和主控系统的通讯延时,经过实际测试该过程一般为 200 ms 左右;第二阶段为功率

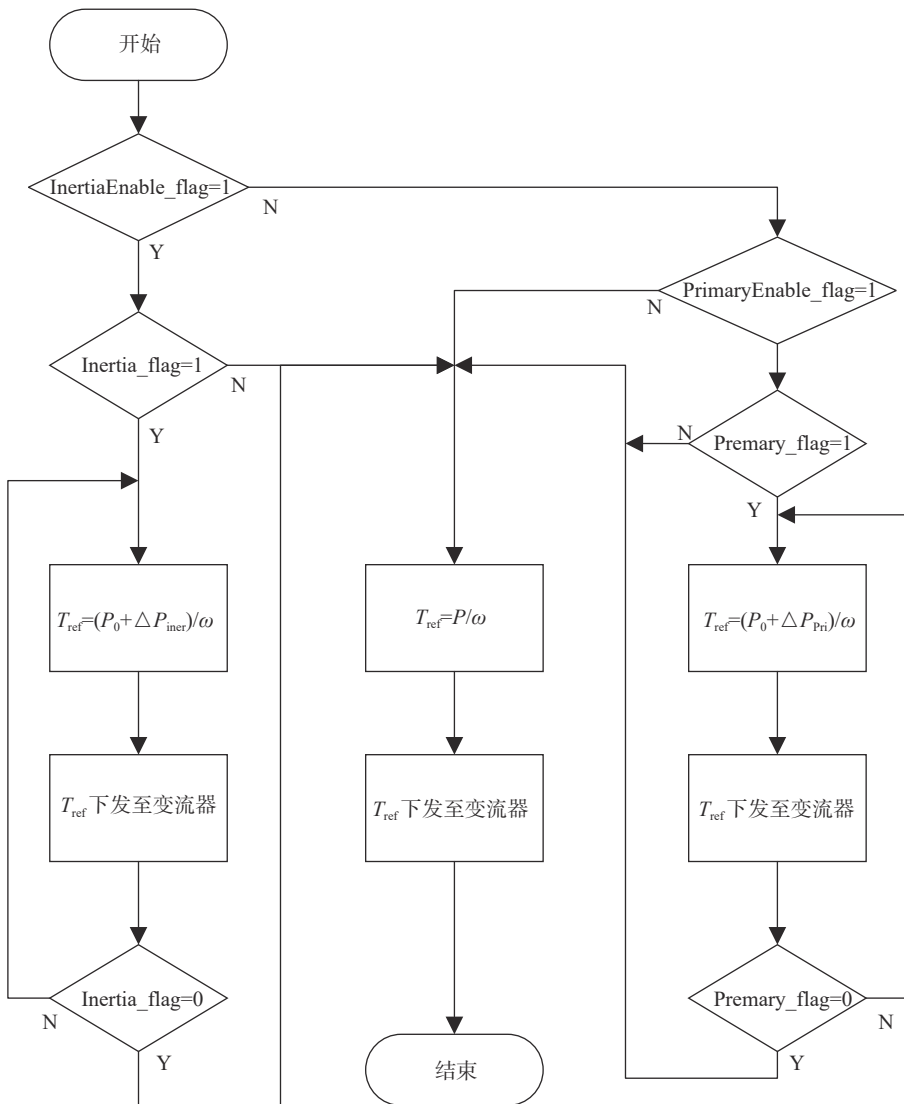


图 1 惯量响应和一次调频算法控制框图

Fig. 1 Inertia response and primary frequency regulation algorithm control block diagram

调节时间: 惯量响应功率由于响应速度快, 功率调节时间一般在 200 ms(功率调节速率一般设置为 $100\%P_n/s$, 可根据响应时间进行适当调整)即可保证有功功率进入标准要求误差带; 一次调频功率调节时间一般在 2~3 s(功率调节速率一般设置为 $10\%P_n/s$, 可根据响应时间进行适当调整)即可保证有功功率进入标准要求误差带。

3 仿真结果分析

为验证风电机组惯量响应和一次调频能力算法的正确性和有效性, 在联合仿真平台分别建立风电机组仿真模型。风电系统主要参数如表 1 所示:

表 1 风电系统参数

Tab. 1 Parameters of wind power system

名称	参数
风机额定容量	4 MW
机组额定电流	3 347 A
额定风速	11 m/s
齿轮箱增速比	21
PMSG 直轴电感	0.16 mH
PMSG 交轴电感	0.20 mH
定子电压	690 V

3.1 风电机组惯量响应能力

3.1.1 0.5 Hz/s 频率变化率

电网扰动装置频率以 0.5 Hz/s 的变化率由 50 Hz

变化为 51.5 Hz/s。其频率变化波形及风电机组相关量的波形图如图 2 所示。从图中发电机转速 Gspeed 和转矩 Torque 波形可以看出,在惯量响应期间,发电机转速控制平稳,转矩在频率变化时刻响应频率的变化率。在 20 s 处频率开始变化时刻,有功功率此时为 1.003 pu,在惯量响应期间有功功率 P 约为 0.89 pu,有功功率变化量为 0.113 pu,达到标准要求 10%;响应时间约为 297 ms(其中包含 170 ms 左右的通讯延时及响应延时,有功功率变化下降时间约为

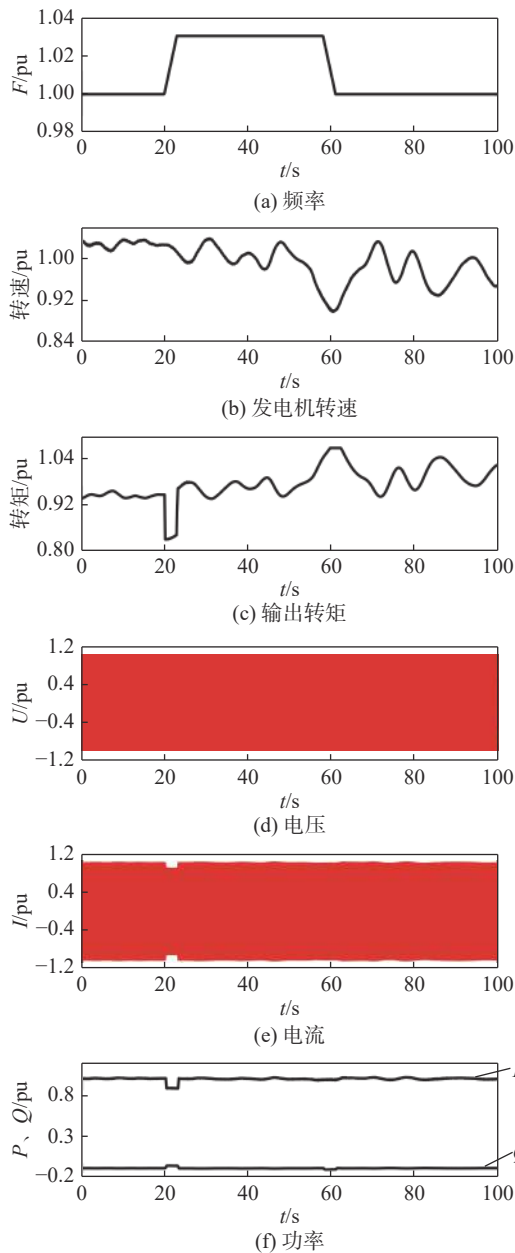


图 2 0.5 Hz/s 频率变化率响应波形图

Fig. 2 Frequency change rate (0.5 Hz/s) response waveform

127 ms),约为标准要求时间 500 ms 一半左右;在 0.5 Hz/s 变化率工况下,控制算法控制效果明显。

3.1.2 -0.5 Hz/s 频率变化率

在频率由 50 Hz 变化为 48 Hz 的-0.5 Hz/s 频率变化率工况下,由图 3 发电机转速 Gspeed 波形可以看出,由于初始功率约 1 pu 左右,在惯量响应期间为实现惯量支撑,风电机组会释放转子存储的动能,发电机转速短时上升;整个频率变化期间,发电机转速

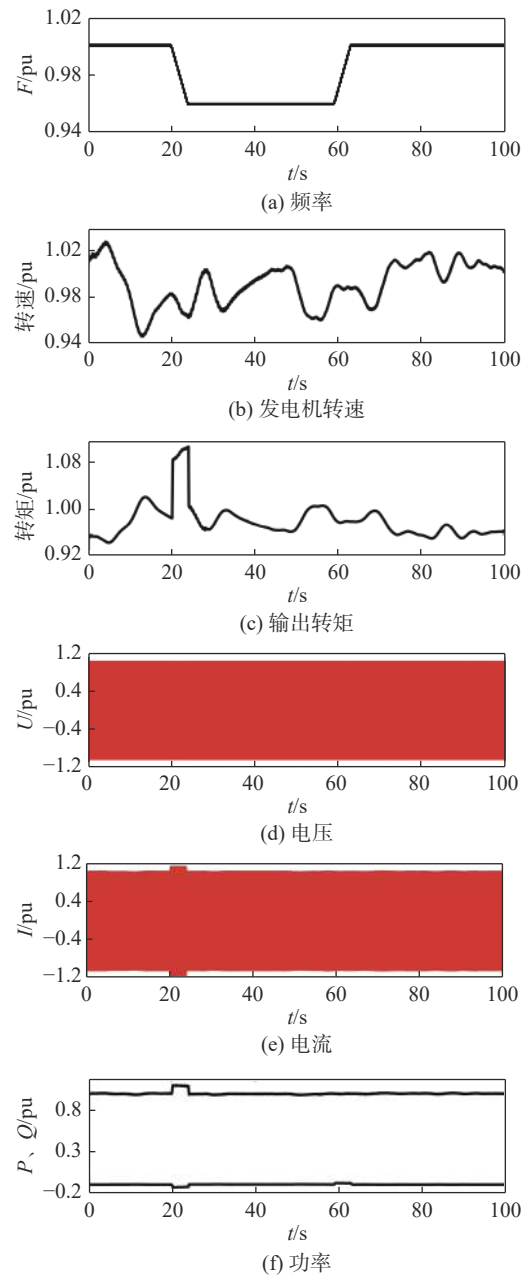


图 3 -0.5 Hz/s 频率变化率响应波形图

Fig. 3 Frequency change rate (-0.5 Hz/s) response waveform

控制稳定,并未出现超速和失速的现场,主控系统控制稳定。其有功功率在频率变化前约为 1.003 pu,惯量响应期间有功功率变化至 1.097 pu 左右,响应时间约为 340 ms 左右(通讯延时及响应时间约 160 ms),频率恢复期间,有功功率最大值约 1.011 pu,最小值约为 0.985 pu,有功功率控制稳定。整个-0.5 Hz/s 频率变化率的惯量响应期间,风电机组有功功率响应速度在标准要求之内,且有功功率恢复过程中,其偏差仅为 0.026 pu 左右,联合仿真模型及控制程序作用效果明显,且在频率恢复过程中并未出现频率二次跌落的问题。

3.2 风电机组一次调频能力

一次调频功能实现采用桨距角备用的形式实现,在频率变化前通过变桨系统收桨预留足够的备用容量,在一次调频过程中配合变桨系统收/开桨实现长时功率支撑。

3.2.1 一次调频 50~51.5 Hz

在联合仿真平台中模拟频率偏差,频率变化设置为 200 Hz/s,频率值设置由 50 Hz 变化至 51.5 Hz。联合仿真模型中电网频率、风电机组桨距角,风电机组输出转矩、三相电压电流及并网点有功功率 P 及无功功率 Q 变化波形图如图 4 所示。

在电网频率变化时,主控系统根据变流器上传信号进入一次调频状态,此时桨距角 Pitch 逐渐响应功率变化,由一次调频前的 7.5°左右,逐渐增大至 12°左右(桨距角实际状态根据风速实时变化)。整个一次调频期间有功功率由一次调频前 0.535 pu 变化至 0.327 pu,其响应时间约 3.906 s(小于标准要求的 5 s),整个一次调频过程中约向电网提供约 0.208 pu 且 3% 左右波动的有功支撑(满足标准要求的 0.2 pu 且波动小于 4%);并网点无功功率 Q 仅在频率变化时刻,产生约 2 个周期的暂态波动。整个一次调频 50~51.5 Hz 的过程中,有功功率控制稳定,主控系统控制效果良好。

3.2.2 一次调频 50~48 Hz

以上节相同的设置方式,将频率设置为 50 Hz 至 48 Hz,风电机组相关量波形图如图 5 所示。在电网频率变化时,风电机组响应频率变化,主控系统下发至变流器的转矩 $Torque$ 响应频率的变化,有功功率由一次调频前的 0.537 pu 增发至 0.637 pu,为电网提供约 0.1 pu 的有功支撑,可有助于频率恢复。整个一次调频期间,有功功率响应时间约 2.046 s,风电

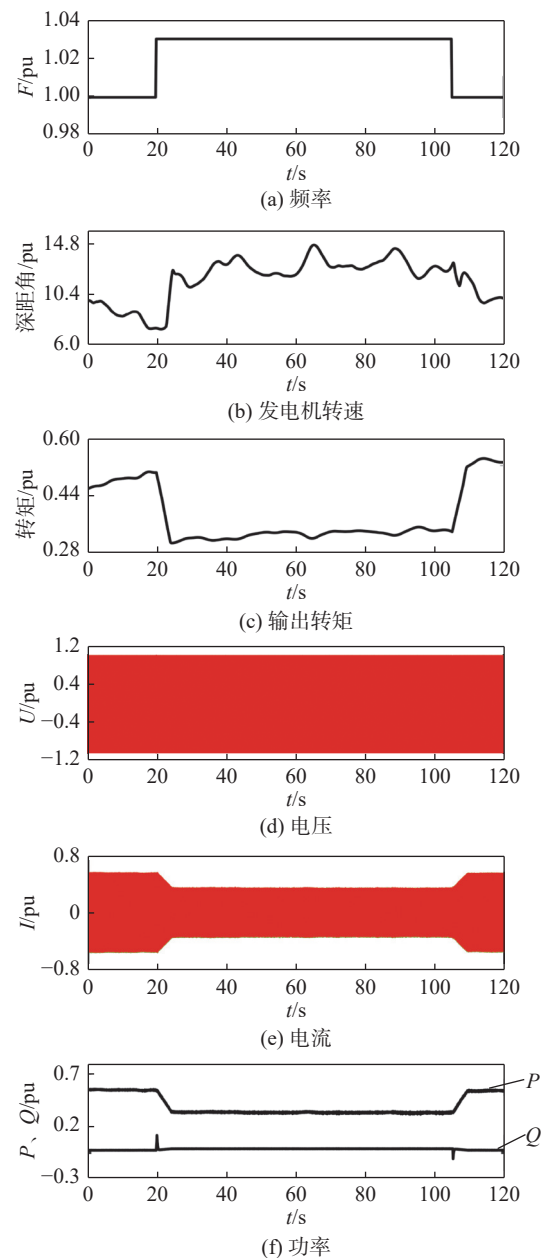


图4 一次调频 50~51.5 Hz 波形图

Fig. 4 Primary frequency regulation 50~51.5 Hz waveform

机组有功功率响应迅速且控制稳定。

4 实测结果分析

为进一步验证惯量响应和一次调频算法的正确性和有效性,在某项目现场采用移动式电网适应性测试车进行风电机组惯量响应与一次调频能力测试,电网适应性测试车串联于风电机组升压变压器和电网之间,产生相应的频率扰动,其测试结果及指标分别如图 6~图 9 和表 2 所示。

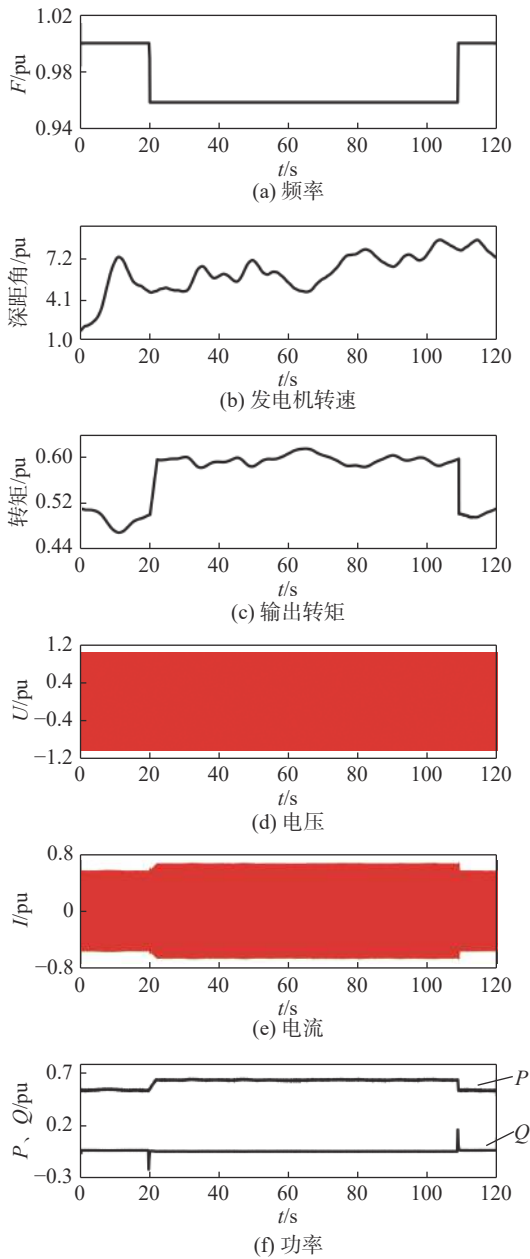


图 5 一次调频 50~48 Hz 波形图

Fig. 5 Primary frequency regulation 50~48 Hz waveform

表 2 风电机组惯量响应及一次调频特性

Tab. 2 Inertia response and primary frequency regulation characteristics of wind turbine

工况	频率变化/pu	扰动前有功值/pu	有功调节量/pu	响应时间/s
惯量响应	50~48.0	0.967	0.101	0.444
	50~51.5	0.962	0.152	0.424
一次调频	50~48.0	0.539	0.106	2.270
	50~51.5	0.551	0.210	4.050

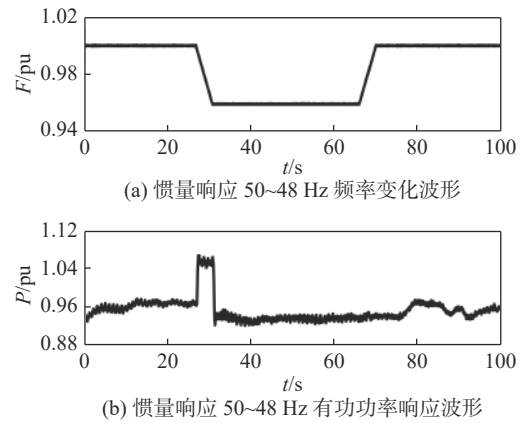


图 6 风电机组惯量响应 50~48 Hz 测试结果

Fig. 6 Inertia response (50~48 Hz) test results of wind turbine

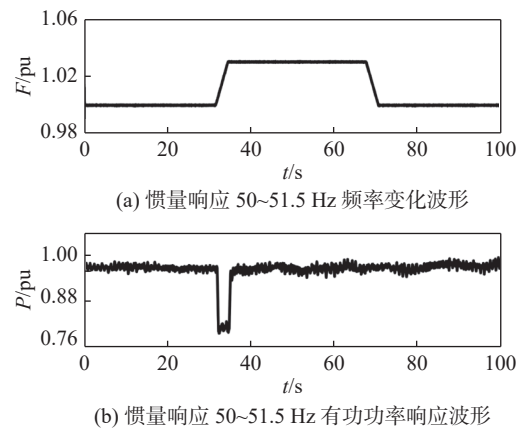


图 7 风电机组惯量响应 50~51.5 Hz 测试结果

Fig. 7 Inertia response (50~51.5 Hz) test results of wind turbine

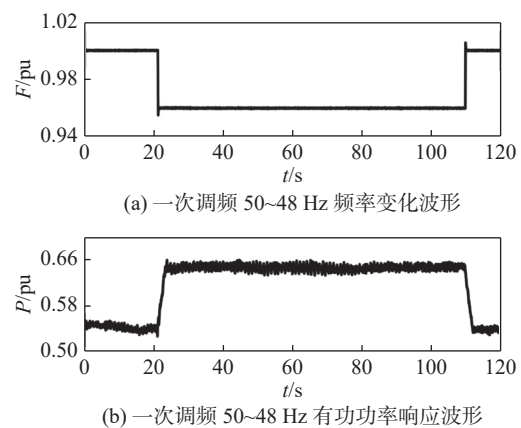


图 8 风电机组一次调频 50~48 Hz 测试结果

Fig. 8 Primary frequency modulation (50~48 Hz) test results of wind turbine

惯量响应使能开关开启后,在检测到电网频率变化率超过 0.3 Hz/s 后,风电机组进行惯量响应,响

应时间基本在 440 ms 左右, 满足标准要求; 有功变化量也在标准要求之内。

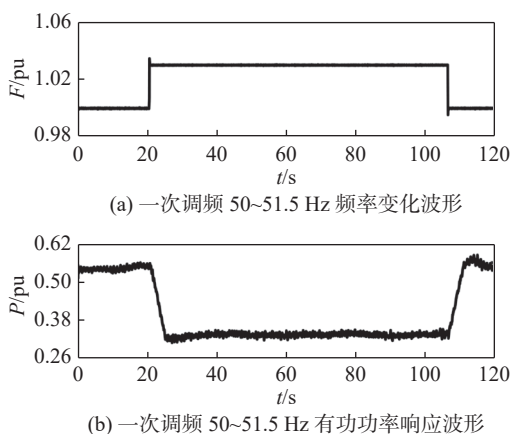


图9 风电机组一次调频 50~51.5 Hz 测试结果

Fig. 9 Primary frequency modulation (50~51.5 Hz) test results of wind turbine

一次调频使能开关开启后, 在检测到电网频率偏差超过阈值(\pm 次调频 Hz)时, 风电机组参与系统调频, 适当增发或降低相应有功功率, 支撑系统频率恢复, 其响应时间也远快于标准要求的 5 s。

5 结论

本文采用惯量响应和一次调频相结合的综合控制方式, 可向电网提供相应的有功支撑, 用以抑制频率或频率变化率的变化, 能有效改善风电机组的频率适应性能力, 通过仿真和实测研究得出:

1) 风电机组能在迅速响应电网的频率扰动, 向电网提供有功支撑, 提升风电机组的并网频率适应性能力。

2) 通过联合仿真平台验证主控制系统算法的正确性和有效性。

3) 现场测试结果表明被测风电机组满足最新的电网适应性测试规程, 更进一步验证算法有效性。

参考文献:

[1] 张梅, 李少林, 李丹, 等. 东北电网风电惯量及一次调频实测与分析 [J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1624-1631. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1779.
ZHANG M, LI S L, LI D, et al. Measurement and analysis of wind power inertia response and primary frequency regulation characteristics in northeast China power grid [J]. Power system technology, 2022, 46(4): 1624-1631. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1779.

[2] WANG L, HUANG B Y, SUN H S, et al. Analysis of SSR characteristics in DFIGs based wind farm integrated to a series-compensated network [J]. The journal of engineering, 2019(18): 4858-4863. DOI: 10.1049/joe.2018.9337.

[3] PRADHAN C, BHENDE C N, SAMANTA A K. Adaptive virtual inertia-based frequency regulation in wind power systems [J]. Renewable energy, 2018, 115: 558-574. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.065.

[4] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170. DOI: 10.7667/PSPC170002.
LI J H, FENG X C, YAN G G, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system [J]. Power system protection and control, 2018, 46(2): 163-170. DOI: 10.7667/PSPC170002.

[5] 薛静玮, 吴晓升, 叶荣, 等. 大规模风电接入输入电网的源网联合规划 [J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(3): 68-74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2019.03.011.
XUE J W, WU X S, YE R, et al. Source-network joint planning for large-scale wind power connected to transmission grid [J]. Power system and clean energy, 2019, 35(3): 68-74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2019.03.011.

[6] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组 电网适应性测试规程: GB/T 36994—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Wind turbines-test procedure of grid adaptability: GB/T 36994—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[7] 郭雁一夫, 刘红文, 叶伟, 等. 风电场惯量响应和一次调频方案的研究与实现 [J]. 控制与信息技术, 2022(1): 53-58. DOI: 10.13889/j.issn.2096-5427.2022.01.009.
GUO Y Y F, LIU H W, YE W, et al. Research and realization of wind farm inertia response and primary frequency regulation scheme [J]. Control and information technology, 2022(1): 53-58. DOI: 10.13889/j.issn.2096-5427.2022.01.009.

[8] 颜湘武, 王德胜, 隗小雪, 等. 风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5911-5922. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201129.
YAN X W, WANG D S, WEI X X, et al. Research on the wind power-storage joint control based on fault ride-through and frequency regulation of wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5911-5922. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201129.

[9] 秦毅, 刘国海. 基于惯量响应支撑功率的电力系统一次调频功率估算 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 79-83. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.04.012.
QIN Y, LIU G H. Primary frequency power estimation of power system based on inertia response support power [J]. Electrical measurement & instrumentation, 2022, 59(4): 79-83. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.04.012.

[10] 颜湘武, 孙雪薇, 崔森, 等. 基于转子动能与超级电容器储能的双馈风电机组惯量和一次调频改进控制策略 [J]. 电工技术学

- 报, 2021, 36(增刊1): 179-190. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190034](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190034).
- YAN X W, SUN X W, CUI S, et al. Improved control strategy for inertia and primary frequency regulation of doubly fed induction generator based on rotor kinetic energy and supercapacitor energy storage [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2021, 36(Suppl. 1): 179-190. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190034](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190034).
- [11] 颜湘武, 崔森, 宋子君, 等. 基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 111-120. DOI: [10.7500/AEPS20200120001](https://doi.org/10.7500/AEPS20200120001).
- YAN X W, CUI S, SONG Z J, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(14): 111-120. DOI: [10.7500/AEPS20200120001](https://doi.org/10.7500/AEPS20200120001).
- [12] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(11): 81-92. DOI: [10.16081/j.epae.202107029](https://doi.org/10.16081/j.epae.202107029).
- LIU H B, PENG X Y, ZHANG C, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system [J]. *Electric power automation equipment*, 2021, 41(11): 81-92. DOI: [10.16081/j.epae.202107029](https://doi.org/10.16081/j.epae.202107029).
- [13] 史学健, 杨培宏, 亢岚, 等. 风电场参与系统一次调频控制策略研究 [J]. *水力发电*, 2022, 48(7): 103-108, 119. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2022.07.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2022.07.019).
- SHI X J, YANG P H, KANG L, et al. Study on integrated control strategy for wind farm in primary frequency regulation of power grid [J]. *Water power*, 2022, 48(7): 103-108, 119. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2022.07.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2022.07.019).
- [14] 朱家文, 陈卓, 刘人志, 等. 风电机组惯量支撑与一次调频综合控制策略 [J]. *电子科技*, 2023, 36(5): 1-8. DOI: [10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2023.05.002](https://doi.org/10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2023.05.002).
- ZHU J W, CHEN Z, LIU R Z, et al. Integrated control strategy of wind turbine inertia support and primary frequency regulation [J]. *Electronic science and technology*, 2023, 36(5): 1-8. DOI: [10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2023.05.002](https://doi.org/10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2023.05.002).
- [15] 赵晟凯, 邹欣, 李旭霞, 等. 直驱风电系统自适应惯量和一次调频协调控制策略 [J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(9): 76-84. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3814.2020.09.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3814.2020.09.012).
- ZHAO S K, ZOU X, LI X X, et al. Adaptive inertia and primary frequency modulation coordinated control strategy of PMSG system [J]. *Power system and clean energy*, 2020, 36(9): 76-84. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3814.2020.09.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3814.2020.09.012).
- [16] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制 [J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(22): 80-86. DOI: [10.7667/PSPC171714](https://doi.org/10.7667/PSPC171714).
- MAO J F, WU B W, WU A H, et al. Adaptive robust MPPT control for wind power generation system [J]. *Power system protection and control*, 2018, 46(22): 80-86. DOI: [10.7667/PSPC171714](https://doi.org/10.7667/PSPC171714).
- [17] TAN Y J, MEGAHAPOLA L, MUTTAQI K M. A suboptimal power-point-tracking-based primary frequency response strategy for DFIGs in hybrid remote area power supply systems [J]. *IEEE transactions on energy conversion*, 2016, 31(1): 93-105. DOI: [10.1109/TEC.2015.2476827](https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2476827).
- [18] 单煜, 汪震, 周昌平, 等. 基于分段频率变化率的风电机组一次调频控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(11): 19-26. DOI: [10.7500/AEPS20211102002](https://doi.org/10.7500/AEPS20211102002).
- SHAN Y, WANG Z, ZHOU C P, et al. Control strategy of primary frequency regulation for wind turbine based on segmented rate of change of frequency [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(11): 19-26. DOI: [10.7500/AEPS20211102002](https://doi.org/10.7500/AEPS20211102002).
- [19] ERLICH I, WILCH M. Primary frequency control by wind turbines [C]//Anon. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, USA, July 25-29, 2010. New York: IEEE, 2010: 1-8. DOI: [10.1109/PES.2010.5589911](https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589911).
- [20] 夏祥武, 田梦瑶. 风电并网一次调频控制性能研究 [J]. *电气传动*, 2021, 51(5): 70-75. DOI: [10.19457/j.1001-2095.dqcd20820](https://doi.org/10.19457/j.1001-2095.dqcd20820).
- XIA X W, TIAN M Y. Research on the performance of primary frequency control of wind power grid connected [J]. *Electric drive*, 2021, 51(5): 70-75. DOI: [10.19457/j.1001-2095.dqcd20820](https://doi.org/10.19457/j.1001-2095.dqcd20820).
- [21] 秦世耀. 风电机组惯量及一次调频优化控制研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2021.004038](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2021.004038).
- QIN S Y. Research on optimal control strategy of inertia and primary frequency regulation for wind turbines [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2021.004038](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2021.004038).

作者简介:



郭江涛

郭江涛 (第一作者, 通信作者)

1986-, 男, 工程师, 电气及其自动化专业学士, 主要从事风电技术研究及现场测试验证工作(e-mail)guojiangtao@mywind.com.cn。

陈烁

1995-, 男, 工程师, 电力电子与电气传动专业硕士, 主要从事风电技术研究工作(e-mail)chenshuo01@mywind.com.cn。

曾瑞斌

1992-, 男, 电气及其自动化专业学士, 主要从事风电技术研究及现场测试验证工作(e-mail)zengruibin@mywind.com.cn。

黄丽玲

1998-, 女, 自动化专业学士, 主要从事风电技术研究工作(e-mail)huangliling@mywind.com.cn。

张一丰

1990-, 男, 计算机应用技术专业学士, 主要从事风电技术研究及现场测试验证工作(e-mail)zhangyifeng02@mywind.com.cn。

(编辑 孙舒)