

# 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术

李少林<sup>1</sup>, 秦世耀<sup>1</sup>, 王瑞明<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 杨靖<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司 新能源与储能运行控制国家重点实验室 北京 100192;  
2. 浙江运达风电股份有限公司 风力发电系统国家重点实验室 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 针对风电机组不主动参与电网频率调节的问题, 量化评估了大容量双馈风电机组利用风轮转动动能进行调频的能力, 提出了基于附加转矩的风电机组虚拟惯量调频控制方法, 并研究了其实现原理与控制策略, 建立了大容量双馈风电机组 Bladed+MATLAB 联合仿真模型, 实现了虚拟惯量调频全过程动态仿真。首次在 MW 级风电机组上进行了虚拟惯量调频现场试验, 揭示了大容量风电机组虚拟惯量调频的动态特性与技术特点。试验结果表明了理论与仿真分析的准确性及控制策略的有效性。

**关键词:** 风电; 双馈风电机组; 虚拟惯量; 调频; 联合仿真; 现场试验

中图分类号: TM 315; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.021

## 0 引言

双馈风电机组是目前风电开发的主流机型之一, 其通过快速控制的电力电子变流装置并网, 使其转速与电网频率解耦, 实现了发电系统与电网的解耦控制。与常规火电机组相比, 双馈风电机组具有控制灵活、响应速度快等优点, 但其功率输出缺乏对系统频率的快速响应与主动支撑。随着局部电网中风电渗透率不断升高, 电力系统调频能力逐渐下降, 在大功率缺失或系统故障情况下, 极易引发全网频率故障, 不具备调频能力的风电大规模接入给电力系统的安全稳定运行带来了巨大挑战。为此, 世界主要风电发达国家与地区均通过并网导则对风电的调频能力进行了规范<sup>[1-4]</sup>, 提出了明确的要求。

目前, 风电/光伏等间歇式电源通过自动发电控制(AGC)系统参与电力系统二次调频<sup>[5]</sup>, 变速恒频双馈风电机组也可通过有功-频率控制实现调频, 风电调频越来越受到学术界的关注和研究<sup>[6-6]</sup>。文献[6]提出了一种风电机组虚拟惯量控制方法, 仿真研究了虚拟惯量控制对电网频率的调节作用及影响, 但缺乏虚拟惯量调频能力评估及机组调频特性研究。文献[7]研究了风电机组变桨调频原理, 提出了限功率运行情况下的风电机组的调频控制策略, 但变桨调频由于预留功率备用影响了风电运行的经济性。文献[8]提出了一种基于飞轮储能(FESS)的风电功率综合调控策略, 能够使风电出力具有类似于同步发电机的惯量响应特性, 但增加了系统成本和复杂性。文献[9]基于直驱永磁型风电系统, 对整个风速变化区内风电系统参与调频进行了小扰动稳定分析, 仿真证明了风电系统能够安全

稳定地参与电网调频。概括而言, 不考虑增加储能, 风电机组调频技术主要包括虚拟惯量调频和变桨控制调频, 其中虚拟惯量调频风电机组正常运行在最大功率点跟踪状态, 通过风电机组电磁转矩控制, 实现风轮惯性储能的快速吞吐, 达到电网调频的目的; 而变桨控制调频风电机组运行在变桨限功率状态, 技术实现相对简单, 但影响了风电场的发电收益。目前虚拟惯量调频研究多停留在仿真研究阶段, 缺乏调频动态过程研究, 技术特点反映不足, 且未见大容量风电机组虚拟惯量调频应用与试验研究的报道。

本文重点针对大容量风电机组虚拟惯量调频技术进行研究, 量化分析了大容量商用风电机组虚拟惯量调频能力; 提出了基于附加转矩的风电机组虚拟惯量调频方法, 研究了其实现原理与控制策略, 进行了双馈发电机调频控制环与主控系统调频方案设计, 并分析评估了调频期间的能量损失; 通过 Bladed+MATLAB 联合仿真和现场试验, 揭示了虚拟惯量调频动态特性与技术特点, 对高比例风电接入后电力系统调频策略制定具有重要的参考意义。

## 1 惯性储能调频能力分析 with 评估

双馈风电机组转动动能主要存储在风电机组传动链中, 传动链主要由叶轮、传动轴、齿轮箱、双馈发电机组组成, 如图 1 所示。图中  $J_r$ 、 $J_{ls}$ 、 $J_{hs}$  和  $J_g$  分别为

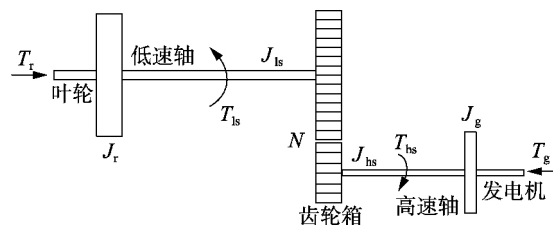


图 1 双馈风电机组传动链模型  
Fig.1 Drive train model of DFIG-WT

收稿日期: 2017-06-10; 修回日期: 2018-02-12  
基金项目: 国家电网公司科技项目(NYB17201700151)  
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(NYB17201700151)

风轮、低速轴、高速轴与发电机的等效转动惯量  $J_r$ 、 $T_{ls}$ 、 $T_{hs}$  和  $T_g$  分别为叶轮气动转矩、低速轴输入转矩、高速轴齿轮输出转矩和发电机电磁输出转矩,  $N$  为齿轮箱变比。

通常情况下叶轮和发电机的转动惯量远大于传动轴、齿轮箱,因此计算中仅考虑叶轮和发电机部分,则双馈风电机组传动链等效转动惯量为:

$$J_T = J_r + J_g N^2 \quad (1)$$

则双馈风电机组转速从初始转速  $\omega_0$  变化到当前转速  $\omega_1$ ,风电机组释放和吸收的旋转动能为:

$$\Delta E_k = E_0 - E_1 = \frac{1}{2} J_T (\omega_0^2 - \omega_1^2) = \int (P_m - P_e) dt \quad (2)$$

其中  $E_0$ 、 $E_1$  分别为风轮初始旋转动能和调频结束后风轮旋转动能;  $P_m$ 、 $P_e$  分别为调频期间风轮的机械功率和发电机电磁功率。

风电机组惯量时间常数为:

$$T_J = J_T \omega_n^2 / (2S_n) \quad (3)$$

其中  $S_n$ 、 $\omega_n$  分别为风电机组额定容量和额定转速。

以某 2.0 MW 商用双馈风电机组为例,机组基本参数见附录表 A1。由式(1)和式(3)可得机组传动链等效转动惯量  $J_T = 1.42 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,惯量时间常数  $T_J = 7.53 \text{ s}$ 。

设风电机组允许的最小转速为  $n_{\min} = 700 \text{ r/min}$ ,风电机组运行在额定转速情况下,惯性储能最大,由式(2)可得:  $\Delta E_{k\max} = 10.5 \text{ MJ}$ 。同理可得风电机组运行在不同工况下 ( $\pm 0.2$  的转差范围内) 最大惯性储能调频能力与按照 10%  $P_n$  为电网提供调频服务的情况如表 1 所示(有功功率为标么值)。可以看出:该商用双馈风电机组即使在较低的转速 850 r/min(功率输出 0.19 p.u.) 的情况下,也可以为电网提供至少 12.8 s 的有功功率支撑。

表 1 某 2.0 MW 双馈风电机组惯性储能调频能力  
Table 1 Capability of frequency regulation based on rotor kinetic energy control for 2.0 MW DFIG-WT

发电机转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	有功 功率	惯性储能/ MJ	有功支撑 时间/s
1 200	0.54	10.5	52.2
1 150	0.48	9.2	45.8
1 100	0.42	7.9	39.6
1 050	0.36	6.7	33.7
1 000	0.31	5.6	28.0
950	0.27	4.5	22.7
900	0.23	3.5	17.6
850	0.19	2.6	12.8
800	0.16	1.7	8.3

## 2 虚拟惯量调频控制技术

### 2.1 基于附件转矩的虚拟惯量调频控制策略

如前所述,风电机组虚拟惯量调频控制的基本

思路是通过发电机电磁转矩控制,实现风轮旋转动能的快速吞吐,从而达到参与电网调频的目的。已有的附加有功功率的虚拟惯量调频控制需要通过发电机转速求解出发电机电磁转矩,最终对发电机电磁转矩进行控制,可能将发电机转速的波动耦合到发电机转矩中,造成风电机组传动链转矩脉动,不利于风电机组的载荷与疲劳寿命<sup>[6]</sup>。本文提出基于附加转矩控制风电机组虚拟惯量调频控制方法,通过引入附加转矩对电网频率偏差进行控制,可使风电机组快速响应电网频率变化,具备调频能力,具有传动链转矩稳定、简单易实施等特点。风电机组虚拟惯量调频控制框图如图 2 所示,其中  $V_{\text{wind}}$  为实时风速,  $\omega_R$  为风轮转速,  $f_{\text{ref}}$ 、 $f$  分别为电网频率参考值和实测值,  $T_{\text{inertia}}$ 、 $T_{\text{ref}}$  分别为虚拟惯量调频附加转矩和发电机电磁转矩给定值。

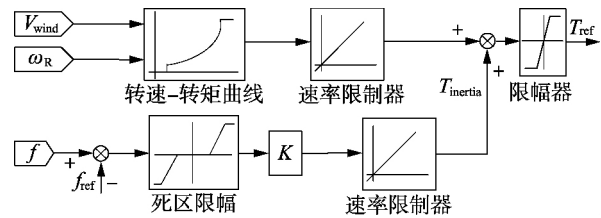


图 2 风电机组虚拟惯量调频控制框图

Fig.2 Control block diagram of virtual inertia frequency regulation for WT

当系统频率偏差超过死区阈值时,频率偏差放大  $K$  倍后,经速率限制环节产生附加转矩,叠加到风电机组原有气动参考转矩上,形成风电机组参考电磁转矩。此环节会产生一个类似于同步机下垂特性,对系统提供有功频率支持,  $K$  值越大则风电机组调频能力越强,但是风轮转速恢复所需的时间也越长。风电机组虚拟惯量调频能力的大小与风轮转动惯量及发电机转速直接相关,风轮转动惯量越大、发电机转速越高,风电机组虚拟惯量控制调频能力越强。

### 2.2 双馈风电机组虚拟惯量调频控制环设计

在定子电压定向矢量控制下,大容量双馈电机转子电压和定子功率方程分别如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r p i_{rq} + \frac{L_m}{L_s} u_{sq} - \frac{L_m}{L_s} \omega_r \psi_{sd} + \omega_{\text{slip}} \sigma L_r i_{rd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r p i_{rd} - \frac{L_m}{L_s} \omega_r \psi_{sq} - \omega_{\text{slip}} \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} \frac{1}{L_s} u_{sq} (\psi_{sq} - L_m i_{rq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{1}{L_s} u_{sq} (\psi_{sd} - L_m i_{rd}) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $u$ 、 $i$  分别为电压、电流,  $\psi$  为磁链,下标  $d$ 、 $q$  分

别表示  $d$ 、 $q$  轴分量;  $R_s$ 、 $R_r$  分别为双馈发电机定子、转子等效电阻;  $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  分别为双馈发电机定子、转子等效电感及互感;  $\omega_r$  为发电机转速;  $\omega_{slip}$  为转差角频率;  $p$  表示微分算子;  $\sigma=(L_s L_r-L_m^2)/(L_s L)$  为漏磁系数。

由式(4)、(5)并结合图 2 所示风电机组虚拟惯量调频控制,可得双馈风电机组虚拟惯量调频控制框图如图 3 所示。图中上标“\*”代表指令值;  $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_{slip}$  分别为电网角度、发电机角度和定转子转差角度;  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  为三相开关信号;  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为电网三相电压;  $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  为转子三相电流;  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  为定子三相电流。通过双馈发电机速度传感器计算得出发电机转速  $\omega_r$  与虚拟惯量调频控制环节产生的发电机电磁转矩给定值  $T_{ref}$  相乘,产生发电机有功控制外环有功功率给定值,即通过发电机频率偏差与有功功率闭环控制实现风电机组虚拟惯量调频。

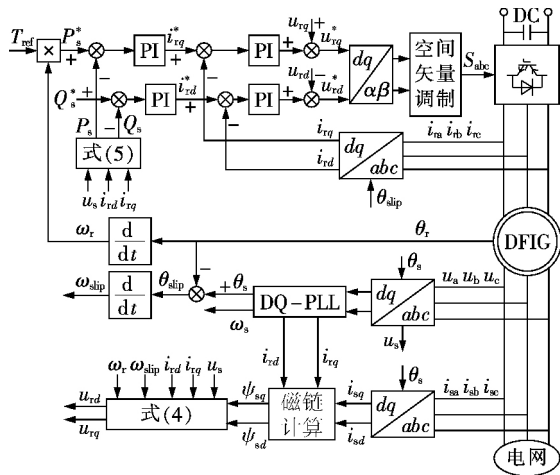


图 3 双馈风电机组虚拟惯量调频控制框图

Fig.3 Control block diagram of virtual inertia frequency regulation for DFIG-WT

### 2.3 虚拟惯量调频运行原理与能量损失分析

当电网频率发生变化超过死区阈值时,风电机组运行点将偏离原有预设转速-转矩曲线,如图 4 所示,其中粗实线为风电机组原有预设的最优转速-转矩曲线(皆为标么值)。假设风电机组初始运行在  $A$  点,当系统频率跌落时,增大发电机电磁转矩,风电机组运行至  $B$  点,风电机组将释放传动链所存储的旋转动能,风电机组转速将逐渐降低,风电机组运行至  $C$  点,若此时系统频率恢复正常,发电机电磁转矩恢复正常,风电机组运行至  $D$  点,随着风电机组转速逐步恢复,风电机组运行至预设转速-转矩曲线  $A$  点,风电机组恢复正常运行。电网频率跌落期间风电机组电磁转矩按曲线  $A-B(C)-D-A$  运行,风电机组的机械转矩按曲线  $A-A_1-A$  运行。电网频率上升期间风电机组电磁转矩按曲线  $A-E(F)-G-A$  运行,风电机组的机械转矩按曲线  $A-A_2-A$  运行。系统频

率上升与跌落时分析方法类似,此处不再赘述。

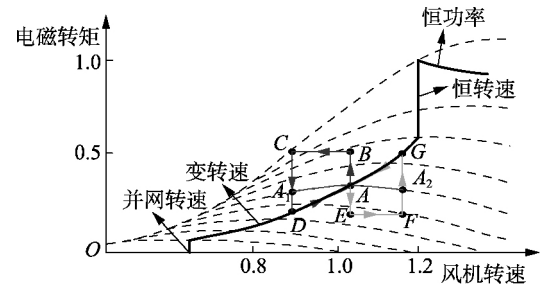


图 4 风电机组转速-电磁转矩曲线

Fig.4 Curve of rotor speed-electromagnetic for WT

如上所述,电网频率跌落期间,通过发电机电磁转矩控制释放风轮的旋转动能,为系统提供有功-频率支撑,会导致风电机组转速下降,调频服务结束后,风电机组运行在较低转速,其对应有功功率会出现短暂下凹;且调频期间风轮转速偏离最大功率跟踪点,会引起风轮机械功率损失。以某 2.0 MW 商用双馈风电机组实际参数,当风电机组有功输出大于 20%  $P_n$  (6 m/s 左右风速对应有功输出) 时,不同风况下按照 10%  $P_n$  为电网提供 10 s 有功频率支撑期间机械能损失与超发能量变化情况如图 5 所示 (有功功率为标么值)。

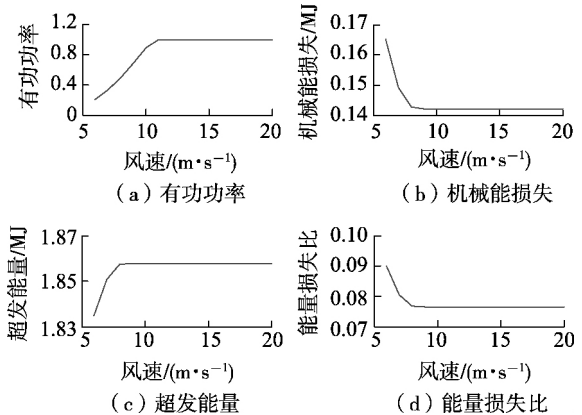


图 5 调频期间机械能损失与超发能量变化

Fig.5 Mechanical energy loss and excess energy output during frequency regulation process

可见,在低风速段,随着风速变大机械能损失呈下降趋势,而超发能量呈上升趋势,且均在风速 8 m/s 左右(对应额定转速)时变为恒定值。在整个调频期间,风轮机械能损失与超发能量比约在 7%~9% 之间;调频结束后,有功下凹量与额定功率比约在 6%~10% 之间,具体与风轮桨叶翼形、功率曲线与恢复策略相关。

### 2.4 主控系统调频实现方案设计

风电机组调频控制主要在主控系统中进行,具体实现需主控系统与变流器的协同配合。主控系统电网检测模块采样频率低、精度差,可通过变流器电网检测模块检测电网频率后发送给主控系统,为主

控系统调频控制提供决策依据,调频期间变流器跟随主控系统有功功率指令。主控系统在收到变流器给出的电网频率信号后,判断是否频率故障,若频率故障且超出阈值,主控系统进行调频程序初始化,屏蔽部分与频率相关的故障和告警信号,按照预定策略进行调频控制,同时判断频率故障是否消除,若频率故障消除则主控系统机型正常运行程序初始化,恢复之前屏蔽的故障或告警信号,风电机组恢复至正常运行发电。

### 3 系统仿真与分析

为研究虚拟惯性储能调频动态特性,验证调频控制策略的可行性与有效性,搭建了能够准确反映风电机组气动、机械和发电机电磁暂态特性的 Bladed+MATLAB 联合仿真系统,如图 6 所示。在 GH Bladed 中搭建了包括风电机组风轮、传动链等在内的气动、机械部分的仿真模型,能够准确反映调频过程中风轮气动特性及惯性储能;在 MATLAB/Simulink 中建立能够反映双馈变流器、发电机及电网电气部分的电磁暂态仿真模型,Bladed 模型与 Simulink 模型之间用 Socket 通信形式进行参数传递和时间同步。

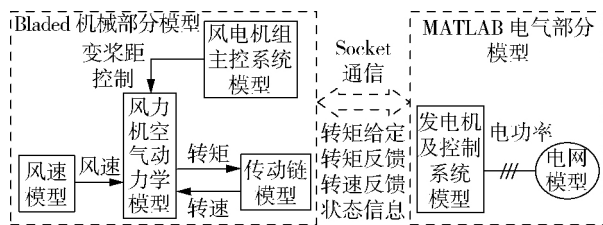


图 6 Bladed+MATLAB 联合仿真系统结构框图

Fig.6 Block diagram of Bladed and MATLAB co-simulation system

基于联合仿真系统,进行电网频率故障情况下风电机组虚拟惯性调频的全过程动态仿真研究。因单台机组的调频能量不足以改变系统频率,因此仿真中采用含内阻的无穷大电源作为电网模型。为突出重点、便于调频指标计算与分析,电网频率变化采用阶跃下降与上升方式,且主控系统暂不设置调频下垂曲线,仅以调频死区阈值作为是否调频的条件。调频期间风电机组提供的额外有功功率支撑量为恒定值  $10\%P_n$ ,当电网频率恢复至阈值以内,风电机组立即停止对电网的有功功率支撑。仿真中风电机组调频死区设置为  $\pm 0.2$  Hz,有功功率支撑最大时长设置为 10 s,风速采用 Bladed 软件的湍流风模型。

图 7 为双馈风电机组频率下降时虚拟惯性调频全过程仿真波形图。

由图 7(a)~(c) 可看出,初始条件下,风电机组并网电压频率为 50 Hz,风电机组正常运行,其实际输出功率输出有功功率约为 650 kW,对应电磁转矩

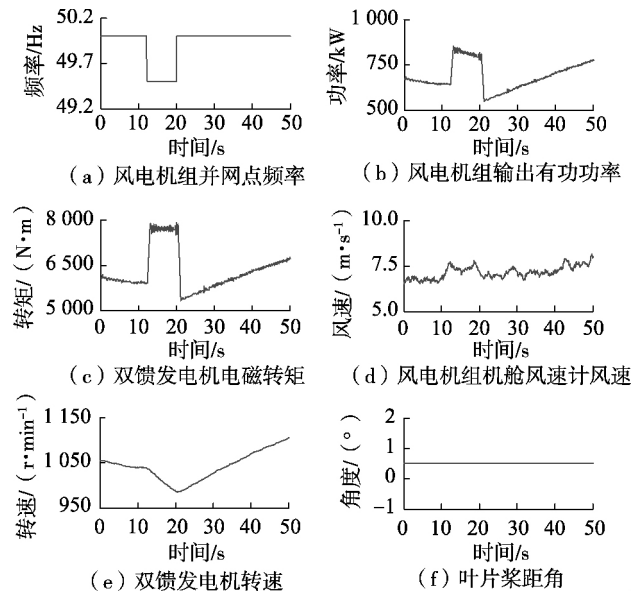


图 7 双馈风电机组频率下降时虚拟惯性调频仿真波形

Fig.7 Simulative results of virtual inertia frequency regulation for DFIG-WT under frequency drop

为  $5930 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在 12 s 时,并网点频率突然阶跃下降至 49.5 Hz 并触发调频死区阈值 49.8 Hz,发电机电磁转矩突增至  $7650 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,风电机组输出有功功率增至 845 kW,有功功率调频响应时间约为 450 ms;20 s 时,并网点频率恢复至正常值,风电机组电磁转矩与有功功率逐渐恢复至正常值,频率恢复后短时间内,发电机电磁转矩与风电机组输出有功功率出现了短时下凹;在风电机组并网点频率下降的 8 s 时间内,风电机组提供的有功支撑约为  $9.75\% P_n$ ,且随着调频时间的推移,有功功率呈下降趋势。由图 7(d)~(f) 可看出,整个调频期间,风速变化基本平稳,风轮桨距角未动作,基本处于  $0.4^\circ$  位置;发电机转速在频率下降初始时刻约为  $1042 \text{ r/min}$ ,频率下降期间持续下降,频率恢复时刻降至  $980 \text{ r/min}$ ,在整个调频过程中风电机组释放动能约为 1.38 MJ。由于调频期间有功功率支撑通过发电机电磁转矩控制,发电机电磁转矩为恒定值,而转速有所下降,因此调频期间风电机组输出有功功率呈下降趋势;另由于调频期间惯性储能的吐出,发电机转速逐渐降低,切换至正常控制模式,风电机组有功功率将出现短时下凹,之后随着风速逐渐恢复至风速对应实际功率值。图 8 为频率上升时虚拟惯性调频全过程仿真波形图,调频动态过程及分析与频率下降时基本类似。

### 4 现场试验分析

双馈风电机组虚拟惯性调频现场试验原理图如图 9 所示。将电网运行模拟装置串联于风电机组升压变压器高压侧与 35 kV 电网之间,利用电网运行模拟装置在风电机组升压变压器高压侧模拟产生电网频率变化,检验风电机组在电网频率变化时的响

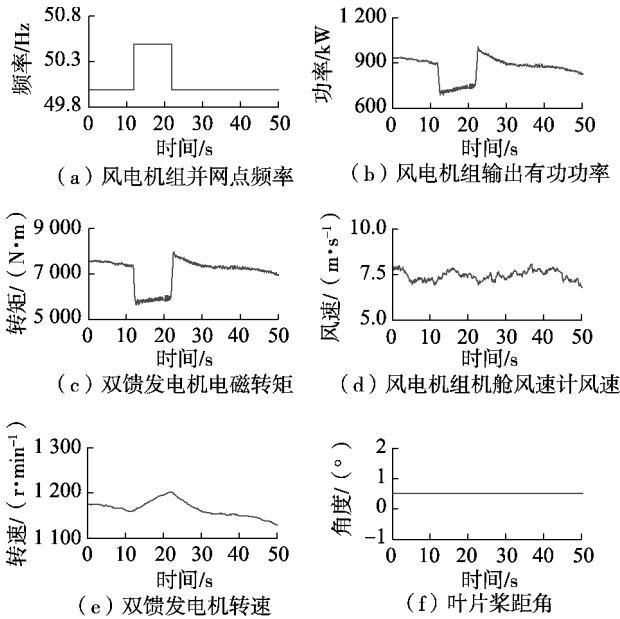


图 8 双馈风电机组频率上升时虚拟惯量调频仿真波形  
Fig.8 Simulative results of virtual inertia frequency regulation for DFIG-WT under frequency swell

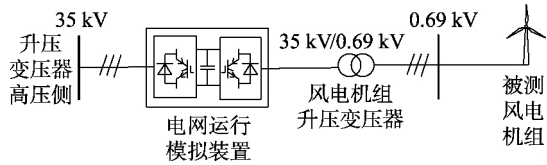


图 9 双馈风电机组调频现场试验原理图  
Fig.9 Test schematic diagram of frequency regulation for DFIG-WT

应与调频能力。试验装置基于背靠背变流原理,通过风机侧变流器调制指令的修改可在并网点模拟发生所需电网频率扰动<sup>[17]</sup>。通过采集风电机组并网点三相电压、电流、风速、转速与桨距角等信息,综合分析被测机组虚拟惯量调频动态过程与特点,验证虚拟惯量调频控制策略及机组的调频能力,试验条件与机组调频相关参数设置与仿真基本一致。

图 10 为双馈风电机组频率下降时虚拟惯量调频现场试验波形图。由图 10(a) 可看出,在 5 s 时电网运行模拟装置在风电机组并网点产生 0.5 Hz 的频率跌落,持续 8 s 后频率恢复正常;风电机组有功功率在频率跌落瞬间由 620 kW 突增至 815 kW 左右,之后有功功率随着转速的下降略有下降,而在电网频率恢复正常后有功功率出现短暂下凹,最低达到 580 kW,随后恢复到正常功率输出,有功调频响应时间约为 480 ms。由图 10(b)、(c) 可看出,风电机组有功调频期间,发电机组转速由 1 034 r/min 下降至 985 r/min,风电机组释放惯性储能约 1.09 MJ;在整个风电机组调频过程中,风轮桨距角一直保持为 0.4° 未动作,调频仅是利用风轮旋转惯性储能,转矩处风速基本维持在 7 m/s 左右。图 11 为双馈风电

机组频率上升时虚拟惯量调频现场试验波形图,调频动态过程及分析与频率下降时基本类似。

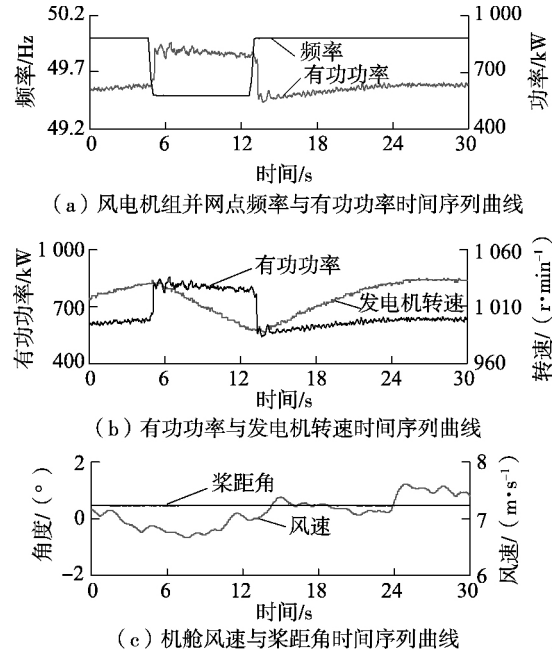


图 10 双馈风电机组频率下降时虚拟惯量调频试验波形  
Fig.10 Experimental results of virtual inertia frequency regulation for DFIG-WT under frequency drop

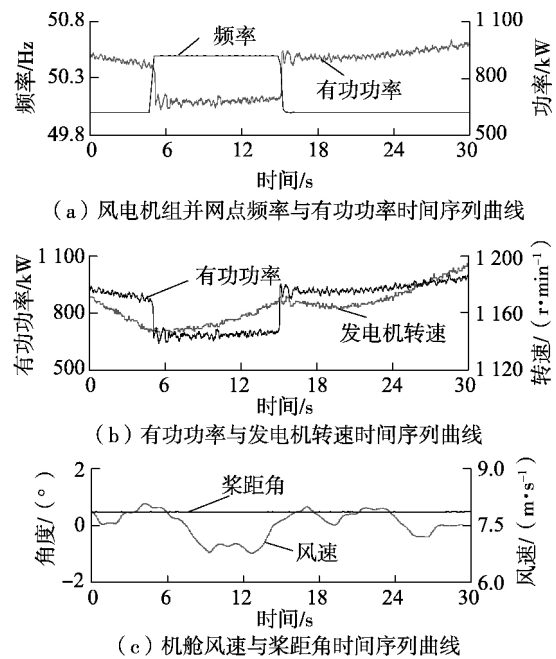


图 11 双馈风电机组频率上升时虚拟惯量调频试验波形

Fig.11 Experimental results of virtual inertia frequency regulation for DFIG-WT under frequency swell

现场试验结果表明:电网频率下降与上升期间,风电机组能够快速通过虚拟惯量控制参与电网频率调节,为电网提供有功功率支撑,具备一定的调频能力。

## 5 结论

风电机组在正常运行情况下可通过发电机电磁转矩与电网频率的闭环控制实现风轮转动能的快速吞吐,达到参与电网调频的目的,风电机组虚拟惯量调频具备以下特点。

(1) 虚拟惯量调频有功功率响应速度为电磁级,本文所提实现方案考虑频率检测及通信延迟,有功功率响应速度为百毫秒级(300~500 ms),响应速度完全满足电网调频的要求,可考虑利用其快速性改善系统频率故障初始时刻的频率故障极值。

(2) 虚拟惯量调频期间,由于风轮旋转惯性储能的吞吐,调频结束后,有功功率可能出现短暂下凹(频率跌落)或上凸(频率上升)现象,应考虑将功率下凹或上凸控制在电网可接受范围内,并做好与其他调频方式或其他调频机组的协调配合,消除有功下凹可能导致的系统频率二次跌落。

(3) 风电机组虚拟惯量控制调频能力与风轮转动惯量和转速(工况)直接相关。通常情况下,常规商用 MW 级风电机组在有功功率大于 20%  $P_n$  情况下,可提供有功功率限值为 10%  $P_n$ 、时长为 10 s 左右的虚拟惯量调频服务。

后续将进一步开展风电机组虚拟惯量调频与其他调频方式的协调控制及对机组机械传动应力与疲劳的影响研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] Hydro-Québec TransÉnergie. Transmission provider technical requirements for the connection of power plants to the Hydro-Québec transmission system [R]. Québec, Canada: Hydro-Québec Trans-Énergie 2009.
- [2] National Grid( Great Britain) Company. The grid code [R]. London, UK: National Grid( Great Britain) Company 2009.
- [3] E. ON Netz GmbH. Grid connection regulations for high and extra high voltage [R]. Bayreuth, Germany: E. ON Netz GmbH 2006.
- [4] Nordic Grid. Nordic grid code 2007 [R]. Helsinki, Finland: Nordic Grid 2007.
- [5] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [6] GONZALEZ F, CHIKUNI E, RASHAYI E. Effects of the synthetic inertia from wind power on the total system inertia after a frequency disturbance [C]//2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Cape Town, South Africa: IEEE, 2013: 826-832.
- [7] 范冠勇,刘吉臻,孟洪民,等. 电网限负荷条件下风电场一次调频策略[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2030-2037.  
FAN Guannan, LIU Jizhen, MENG Hongmin, et al. Primary frequency control strategy for wind farms under output restricted condition [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2030-2037.
- [8] 刘世林,文劲宇,高文根,等. 基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 34-39.  
LIU Shilin, WEN Jinyu, GAO Wengen, et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 34-39.
- [9] 李军军,吴政球. 风电参与调频的小扰动稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 1-9.  
LI Junjun, WU Zhengqiu. Small signal stability analysis of wind power generation participating in primary frequency regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 1-9.
- [10] 薛迎成,邵能灵,宋凯,等. 变速风力发电机提供调频备用容量研究[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 75-80.  
XUE Yingcheng, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Variable speed wind turbines provide primary reserve for frequency control [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2010, 30(8): 75-80.
- [11] ZHANG Z S, SUN Y Z, LIN J, et al. Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants [J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 38-47.
- [12] 李超,王洪涛,韦仲康,等. 含大型风电场的弱同步电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 96-103.  
LI Chao, WANG Hongtao, WEI Zhongkang, et al. Coordinated control of weakly-synchronized grid containing large wind farms [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2015, 35(4): 96-103.
- [13] FRANCISCO D, MELANIE H, ANDREAS S, et al. Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 68: 313-326.
- [14] ATTYA A B T, HARTKOPF T. Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops [J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(3): 210-224.
- [15] ZERTEK G, VERBIC A, PANTOSM. Optimised control approach for frequency control contribution of variable speed wind turbines [J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 17-23.
- [16] 郑重,杨振勇,李卫华. 风电与火电机组的一次调频技术分析及比较[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 92-101.  
ZHENG Zhong, YANG Zhenyong, LI Weihua. Analysis and comparison of primary frequency control technology for wind power and thermal power unit [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2017, 37(12): 92-101.
- [17] LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Study on grid adaptability testing methodology for wind turbines [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 79-85.

## 作者简介:



李少林

李少林(1984—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,硕士,研究方向为风力发电并网技术、电力电子与电力传动(E-mail: lsl1984a@163.com);

秦世耀(1977—),男,山西太原人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为新能源发电与并网检测技术、电机与电器(E-mail:

qinsya@126.com);

王瑞明(1976—),男,山西忻州人,高级工程师,硕士,研究方向为新能源发电技术、电力系统(E-mail: wangrma@126.com)。

(下转第156页 continued on page 156)

- [13] 刘振兴. 电机故障在线监测诊断新原理和新技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.  
LIU Zhenxing. Research on new principles and techniques of faults on-line monitoring and diagnosis for electrical machines [D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [14] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 421-423.
- [15] 刘炯. 感应电机定子绕组匝间短路故障诊断方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
LIU Tong. Research on stator winding interturn short circuit faults diagnosis of induction motor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

作者简介:



马宏忠

魏海增(1991—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态监测和故障诊断(E-mail: 805051548@qq.com)。

马宏忠(1962—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力设备状态监测以及故障诊断、新能源发电(E-mail: hhumhz@163.com);

张艳(1991—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为双馈异步发电机故障诊断(E-mail: 530167282@qq.com);

## Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in DFIG based on instantaneous average power in rotor side

MA Hongzhong, ZHANG Yan, WEI Haizeng, FU Mingxing, HUANG Chunmei  
(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** A method of stator winding inter-turn short circuit diagnosis for DFIGs( Doubly-Fed Induction Generators) is proposed due to the measurability of rotor parameters of DFIGs. With the consideration of high-order harmonic, the expressions of instantaneous rotor average power in conditions of normal and stator winding inter-turn short circuit are deduced, then the multi-loop mathematical model of DFIGs is established, and the simulation calculation of rotor average instantaneous power in conditions of normal and stator winding inter-turn short circuit in different degrees is carried out. The variation of harmonic component of instantaneous rotor average power is obtained by the spectrum analysis of simulative results, which verifies the correctness of theoretical analysis. The results also show that the rotor average instantaneous power spectrum is intuitional and simple, the 2nd-order harmonic components are not affected by slip ratio and the high-order harmonic components have strong sensitivity to stator winding inter-turn short circuit.

**Key words:** doubly-fed induction generator; rotor average instantaneous power spectrum; stator inter-turn short circuit; multi-loop method; spectrum analysis

(上接第150页 continued from page 150)

## Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine

LI Shaolin<sup>1</sup>, QIN Shiyao<sup>1</sup>, WANG Ruiming<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Wind Power System Zhejiang Windy Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the wind turbines do not initiatively participate in the frequency regulation of power grid, the capability of large-capacity DFIG-WT( DFIG-based Wind Turbine) using stored inertia energy of the rotor to participate in the frequency regulation of the power grid is evaluated. A control strategy of virtual inertia frequency regulation of wind turbine based on accessory torque is proposed, and its implementation principles and control strategies are studied respectively. A Bladed and MATLAB co-simulation system of large-capacity DFIG-WT is established, realizing the whole process dynamic simulation of virtual inertia frequency regulation. The field test is carried out on a MW class DFIG-WT by large capacity grid emulator for the first time, and the dynamic and technical characteristics of the virtual inertia frequency regulation are revealed. The simulative and experimental results support the theoretical analysis and verify the proposed control strategy.

**Key words:** wind power; DFIG-based wind turbine; virtual inertia; frequency regulation; co-simulation; field test