

DOI: 10.7652/xjtuxb201711018

双馈风力机转子动能在系统频率 跌落时的响应能力分析

桑懿谦^{1,2}, 夏俊荣³, 戴义平^{1,2}, 赵嘉⁴

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 中国电力科学研究院南京分院, 210003, 南京; 4. 陕西电力科学研究院, 710100, 西安)

摘要: 针对转子动能参与调频的研究主要集中于控制策略上, 并未详细、定量研究不同工况下转子释放动能的问题, 以 1.5 MW 某双馈风力发电机为原型、采用 Matlab/Simulink 软件建立了简化的风力机动态模型, 并以 1.5 MW 风力发电机的实时运行数据验证了该模型的正确性; 同时, 提出了转子释能持续时间的概念, 并在所建的风力机动态模型下得到中低风速(6~8 m/s)下机组转子释放动能的能力随着风速的变化, 继而设计了转子惯性响应控制器, 研究了不同风速下风力机在系统频率跌落时的响应能力, 得到转速及功率输出的响应曲线。研究表明: 所提模型具有普遍的适用性; 在相应研究条件下, 风力机转子释能时间可达 15 s, 风力机输出可增加约 15% 的有功功率; 风速在 6~8 m/s 下, 风电机组转子释放动能的能力随着风速的增加而降低。该结果可为双馈感应风力发电机参与电网调频的研究提供参考。

关键词: 风力发电机; 调频; 控制策略; 转子动能; 转子惯性响应

中图分类号: TM 74 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0130-07

Response Ability Analysis for Doubly-Fed Wind Generator Rotor Kinetic Energy as System Frequency Falling

SANG Yiqian^{1,2}, XIA Junrong³, DAI Yiping^{1,2}, ZHAO Jia⁴

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Nanjing Branch of China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 4. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Studies of rotor kinetic energy participating in frequency regulation are mainly focused on the control strategies, and less attention is paid on the ability of rotor releasing kinetic energy under different working conditions. A simplified dynamic simulation model of a 1.5 MW doubly-fed induction wind turbine generator (DFIG) was established with Matlab/Simulink, and verified by the operating data of a 1.5 MW wind turbine generator. The duration time was proposed and the variation of the ability of rotor releasing kinetic energy was obtained in a low and middle speed region (6-8 m/s). Then a rotor inertial response controller was designed. The dynamic responses under different wind speed conditions were investigated as the system frequency falls, and the response curves of revolving speed and active power were completed. The results show the general applicability of this model. The time of rotor releasing energy reaches up to 15 s, and the active power increases by 15%. The ability of rotor releasing kinetic energy decreases with the increasing wind speed from 6 m/s to 8 m/s.

Keywords: wind turbine generator; frequency regulation; control strategy; rotor kinetic; rotor inertial response

近年来,风电行业得益于国家政策和政策支持,且具有成本较低、可大规模开发的优势,因此得到迅速发展^[1]。国家能源局统计表明:2016 年前三季度全国风电新增并网容量为 10 GW,截止 2016 年 9 月底风电累计发电量达到 $1.39 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,发电量已占到全国总发电量的 2.7%。风电在利用规模扩大的同时,也带来了系统频率稳定性的问题。研究表明,风电机组转子中储有可观的转动动能,且风电机组在电网频率波动时能够提供转子惯性响应和有功备用,以支持系统的频率调节^[2-3]。

Morren 等提出风电机组模拟常规机组转子惯性响应特性参与电力系统调频的概念^[4]。Kayikci 等对风电机组的转子惯性响应进行了研究,并给出了相应的稳定控制算法^[5]。Ramtharan 等给出了双馈风力发电机组(DFIG)通过转矩转速调节运行于减负荷工况的一次调频控制器设计,结果表明,即使风速低于额定值,也能提供一定的调频备用容量^[6]。曹军等在传统变速双馈风电机组解耦控制中加入了机组频率控制环节,该控制策略能够使转子动能在一定程度上参与系统的频率调节^[7]。张昭遂等将转子超速与变桨距结合,提出超速及其与变桨距协调的频率控制策略,实现了机组静态频率特性的整定,同时结合常规机组,使风力机在不同风速下能够参与系统的频率调节^[8-13]。

鉴于当前的研究主要集中于利用风力机转子动能参与电网调频的策略研究,并未与具体的机组动态模型相结合,而且忽略了转子释放动能能力的分析,本文以 1.5 MW 双馈型风力发电机为原型建立了风力机的整体动态模型,在此基础上详细研究了风力发电机的转子释能能力,设计了转子惯性响应控制器,研究了当电网频率跌落时,风力发电机动态模型加入转子惯性控制器后模型的响应特性。最后,在上述工作的基础上,研究了风力机转子动能在系统频率跌落时参与系统调频的能力。

1 1.5 MW 双馈风力发电机组建模

本文将风力发电机组整体建模分为 4 大模块:风能模块,异步发电机-传动系统模块,变流器模块,风电机组运行的主要控制器,其中控制器包括转矩控制器和桨距角控制器。本文不进行频率变化时的无功控制研究,因此不考虑无功控制器的设计。文

中功率、转矩、转速、频率单位均基于标么制。

1.1 风能转化模型

风轮将风的动能转化为风力机叶轮的机械能,其转化的功率

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (1)$$

式中: ρ 为当地空气密度,海平面上取 1.225 kg/m^3 ; V 为来流风速; A 为风轮扫掠面积; C_p 为风能利用系数,根据贝茨理论^[14]其最大值为 59.3%。 C_p 拟合公式如下^[15]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^5 - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}$$

式中: λ 为叶尖速比; $c_1 \sim c_9$ 为常数; β 为桨距角。

1.2 传动模块模型

本文使用标么化的双质量块模型,并忽略传动模块自身阻尼,由此得到如下方程^[16]

$$\left. \begin{aligned} 2H_{WT} \frac{d\omega_{WT}}{dt} &= T_{WT} - K(\theta_{WT} - \theta_G) - D(\omega_{WT} - \omega_G) \\ 2H_G \frac{d\omega_G}{dt} &= K(\theta_G - \theta_{WT}) + D(\omega_G - \omega_{WT}) - T_G \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: H_{WT} 、 H_G 分别为风力机模块和发电机转子模块的时间常数; T_{WT} 为风轮转子机械转矩; T_G 为发电机电磁转矩; θ_{WT} 、 θ_G 、 ω_{WT} 、 ω_G 分别为风轮和发电机转子质量块的角位移和角速度; K 、 D 分别为轴的刚度系数和阻尼系数。变速风力机中^[16-17], $H_{WT} = 2.5 \sim 12.5 \text{ s}$, $H_G = 0.4 \sim 1 \text{ s}$, $K = 0.15 \sim 1.2$ 。

1.3 异步发电机变流器模型

系统与网侧变频器、转子与转子侧变流器的联系方程如下

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{grid}} &= \frac{\text{Im}(\dot{V}_1 \cdot \dot{V}_s^*)}{X_T} \\ P_r &= \text{Re}(\dot{U}_r \cdot \dot{I}_r^*) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: P_r 为通过转子侧变流器的有功功率; P_{grid} 为通过网侧变流器的有功功率,本文中为 P_{cmd} ; U_r 、 I_r^* 分别为转子励磁电压和励磁电流; V_s^* 为发电机母线并网电压; V_1 为网侧变流器输入电压; X_T 为并联变压器等值阻抗。当风力机运行时,转子侧变流器和网侧变流器的有功功率相等,即 $P_{\text{grid}} = P_r$ 。

假设电压、电流、功率因数角保持恒定,考虑变

频器的结构,可将其等效为一个直流电容,用一个低通滤波器代替^[18]。调整后的 P_{cmd} 通过变频器模块得到传动系统侧发电机功率,再反馈给传动系统模块。

1.4 控制系统模型

1.4.1 转矩控制器 转矩控制器的作用是在风速小于额定风速时控制风力机叶轮的旋转速度,以得到最佳的叶尖速比,实现发电功率最大化。图 1 为云南某风场的 1.5 MW、额定风速为 11 m/s 的风力机在 2016-08-09 全天的实测运行数据。从图中可以看出,该风力机转子转速标幺值在 0.7~1.2 区间,当风速小于额定风速时,转子转速和风力发电机最佳输出功率之间存在一定的关系,见图 1 中的 BC 段,即风力机运行在最大功率跟踪点(MPPT)。

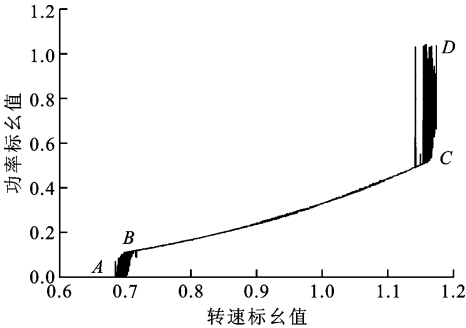


图 1 1.5 MW 风力机转速与功率的关系

根据图 1 做出以下合理近似:当发电机功率高于额定功率的 0.5 倍时,最佳转速标幺值为 1.2。发电机功率低于额定功率的 0.5 时,拟合出图 1 中 BC 段的计算公式如下

$$\omega_{\text{ref}} = -1.25P_g^2 + 1.88P_g + 0.57 \tag{5}$$

式中: ω_{ref} 为最佳转速参考值; P_g 为发电机输出功率。

结合风能转化模型得到的最佳转子转速参考曲线如图 2 所示。

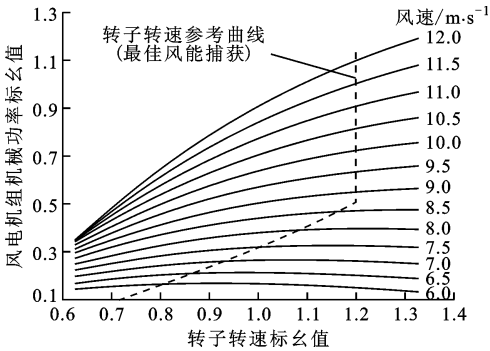


图 2 最佳功率点跟踪曲线

风力机转速和风速的关系为

$$V = \frac{\omega_r R}{\lambda} \tag{6}$$

结合式(1)与式(6),风力机运行在最佳转子参考曲线时有

$$P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \rho S \left(\frac{\omega_{\text{ref}} R}{\lambda_{\text{opt}}} \right)^3 C_{p, \text{max}} \tag{7}$$

式中: P_{opt} 为最佳参考功率; λ_{opt} 为最佳叶尖速比; $C_{p, \text{max}}$ 为不同叶尖速比下的最佳风能利用系数。对应的最优转矩为

$$T_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \rho S \frac{\omega_{\text{ref}}^2 R^3}{\lambda_{\text{opt}}^3} C_{p, \text{max}} \tag{8}$$

转矩控制器见图 3 中的转矩控制器模块^[7]。最佳转速和实际转速之差,先通过比例积分控制器得到转矩,再乘以实际转速便可得到调整后的功率 P_{cmd} 。考虑到实际中存在惯性延迟,将得到的功率经过一阶惯性环节,得到实际的受控功率,从而实现转子转速的控制。

1.4.2 桨距角控制器 桨距角控制系统的结构比较复杂,建模方法有多种。本文采用的模型方程如下^[19]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_\beta}{dt} &= \omega_g - \omega_{\text{ref}} \\ \beta_{\text{cmd}} &= K_{P, \beta} (\omega_g - \omega_{\text{ref}}) + K_{I, \beta} \theta_\beta \\ \frac{d\beta}{dt} &= \frac{\beta_{\text{cmd}} - \beta}{H_J} \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中: θ_β 为伺服机构角位移; H_J 为桨距角控制器的时间常数; $K_{P, \beta}$ 、 $K_{I, \beta}$ 为控制器的比例系数。

桨距角控制器将转速误差信号通过比例积分控制器得到机组桨距角 β_{cmd} ,再通过一个一阶惯性环节并限制桨距角变化速率,得到桨距角实际值。

将上述各模块连接起来可以得到 DFIG 型风力发电机动态模型,如图 3 所示。

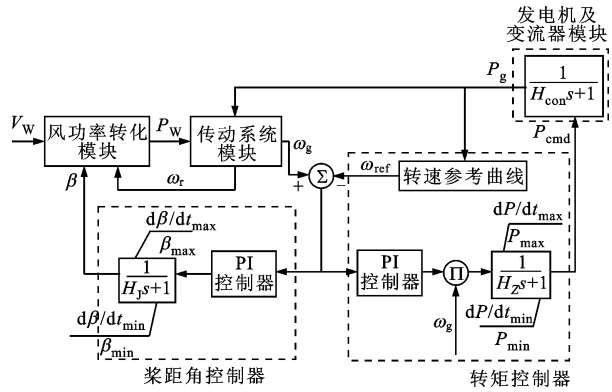
1.5 仿真参数设置及模型验证

仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	仿真值	参数	仿真值
H_{WT}/s	4.5	$dP \cdot (dt_{\text{max}})^{-1}$	0.45
H_G/s	1	$dP \cdot (dt_{\text{min}})^{-1}$	-0.45
K	1.2	P_{max}	1.12
D	2.3	P_{min}	0
H_{con}/s	0.02	$d\beta \cdot (dt_{\text{max}})^{-1}/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	5
H_z/s	0.05	$d\beta \cdot (dt_{\text{min}})^{-1}/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	-5
H_J/s	0.30	$\beta_{\text{max}}/(^{\circ})$	25
ω_{ref}	1.20	$\beta_{\text{min}}/(^{\circ})$	0
$K_{I, \beta}$	150	$K_{P, \beta}$	25

为了验证所建模型的正确性,本文将图 3 中的



V_w : 来流风速; P_w : 风力机吸收的风功率; P_g : 发电机输出功率; P_{cmd} : 机组控制指令功率; ω_r 、 ω_g 、 ω_{ref} : 风轮转子旋转角速度、发电机旋转角速度、转子参考转速; H_{con} 、 H_j 、 H_z : 变流器时间常数、桨距角控制器时间常数、转矩控制器时间常数; β : 桨距角; dP/dt_{max} 、 dP/dt_{min} : 功率变化率的上、下限; $d\beta/dt_{max}$ 、 $d\beta/dt_{min}$: 桨距角变化率的上、下限

图 3 DFIG 型风力发电机动态模型

仿真数据与云南某风场的 69 号机位的 1.5 MW 风力机组实时运行数据进行了对比, 结果如表 2 所示。

表 2 69 号机组运行数据与仿真结果对比

风速/ $m \cdot s^{-1}$	电功率/kW		误差/%
	实测	仿真	
14.31	1 560.2	1 680.00	7.7
12.57	1 552.2	1 680.00	8.2
11.32	1 466.5	1 483.50	1.1
10.38	1 307.7	1 228.05	6.1
9.67	1 094.6	1 040.25	5.0
8.89	801.3	842.10	5.1
7.68	531.5	554.85	4.4
6.55	335.2	344.55	2.8
6.29	289.5	305.40	5.5

表 2 数据表明: 当风速小于额定风速时, 本文所建模型的仿真结果与实际运行数据误差较小; 当风速大于额定风速时, 由于所设定的转速上限不同, 因此仿真与实际出现了较大误差。考虑到本文所建模型是以实际运行的 1.5 MW 风力机结构建立的, 所以该误差在合理的范围内, 从而验证了模型的正确性。

2 不同工况下转子释能能力分析

在外加负荷的作用下, 定义风力机转子转速从当前风速的稳定值降低到标幺值为 0.7 时所需时间为持续时间 t_p 。为了定量研究 t_p , 令图 3 中 β 为 0,

同时折断转速参考值控制, 以使转子动能得到充分的释放。不同风速在不同外加负荷 ΔP (输出功率增量的标幺值) 下持续时间的仿真结果如图 4、5 所示。

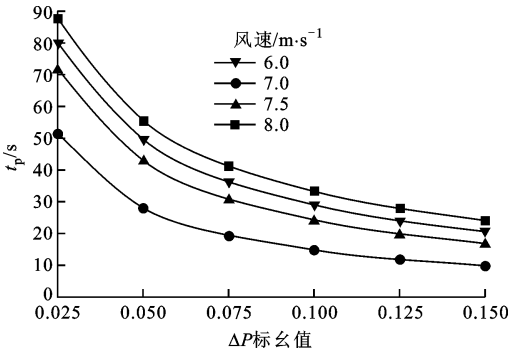


图 4 中低风速下持续时间的仿真结果

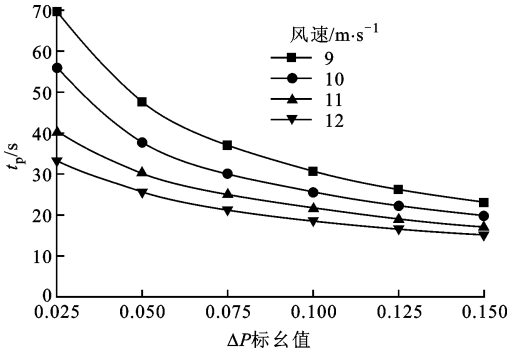


图 5 中高风速下持续时间的仿真结果

结合图 2 和图 4、5 可以看出: 在中低风速 (6~8 m/s) 下, 机组的最大稳态转速标幺值低于 1.2, 输出功率标幺值小于 0.5, 同一风速下随着外加负荷的增加, 转子释能的 t_p 越来越短, 在同一负荷下风速越高, t_p 越大; 在中高风速 (9~12 m/s) 下, 机组的最大稳态转速标幺值高于 1.2, 但受运行条件的限制而维持在 1.2, 输出功率标幺值小于 1 (大于 0.5), 同一风速下随着外加负荷的增加, 转子释能的 t_p 越来越短, 而在同一负荷下, 风速越高, t_p 越小。因此, 在中低风速下, 风电机组转子释放动能的能力随着风速的增加而减小, 即在中低风速条件下, 系统频率不容易恢复, 而在中高风速下, 机组的释能能力会随着风速的增加而增大。这是因为在中高风速下, 风电机组的转速已达最高, 随着风速的提高, 机组输出功率增大, 但是转子转速不变。如果转子释能 ΔP_{WT} 相同, 转速标幺值由 1.2 降低时, 风速越高, 总功率在对应的时间内下降得越大, 转子的减速转矩越多, 转子释能时间越短, 转子降至最低转速的速度也就越快。所以, 在较高风速工况下, 风力机参与频率调节后, 系统频率可以更快恢复。

3 转子动能在频率跌落时的响应能力

通过上述分析知,当系统频率降低时,机组通过释放转子动能可以暂时提供有功功率,以参与电力系统的一次调频调节。当转速小于最低转速(标幺值为 0.7)时,对应的风电功率会低于该风速下的稳态功率,而当转速恢复时会导致系统出现二次失衡。考虑到实际情况,在仿真时加入了转矩控制器,以防止转速过度降低。转子动能释放控制器(转子惯性响应控制器模块)如图 6 所示,其由两部分构成^[20],即

$$\Delta P_R = -K_{pf}\Delta f - K_{df}\frac{df}{dt} \quad (10)$$

其中: $-K_{pf}\Delta f$ 为同步发电机一次调频的功率频率变化,频率波动量先通过高通滤波器以消除稳态频率信号的影响; $-K_{df}\frac{df}{dt}$ 为同步发电机组转子的释能功率,且正比于系统频率的变化率。这里 K_{pf} 、 K_{df} 取 10。

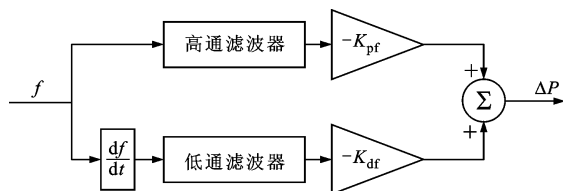


图 6 转子惯性响应控制器

将转子动能释能控制器输出功率与图 3 中的转矩控制器输出功率相加,可作为发电机及变流器模型的输入功率。以图 7 所示频率的扰动曲线作为转子释能控制器的输入,转子惯性响应如图 8 所示。以一台风力机为例,并假设风力机的输出功率对系统频率变化无影响。不同风速下机组响应特性仿真结果如图 9 所示。

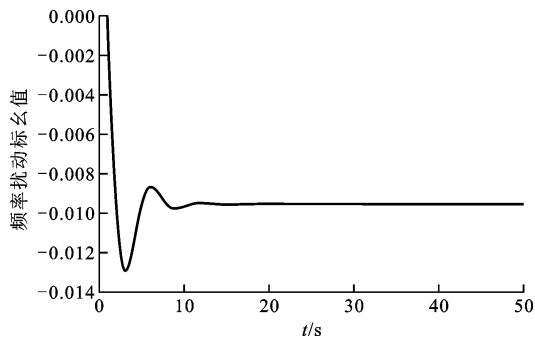


图 7 电力系统频率扰动曲线

从图 7~图 9 可以看出,当频率标幺值跌落至 0.012 时,转子转速降低,转子可额外提供约 15% 的

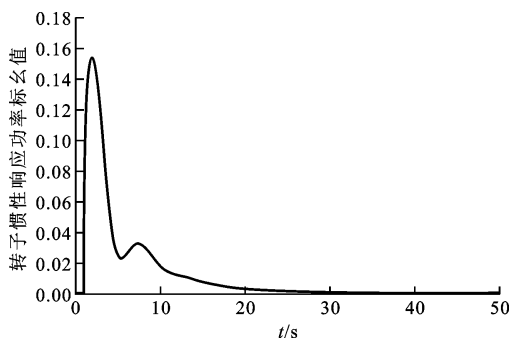
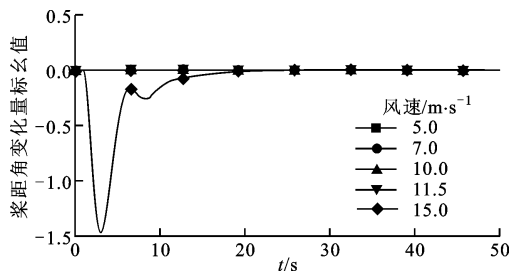
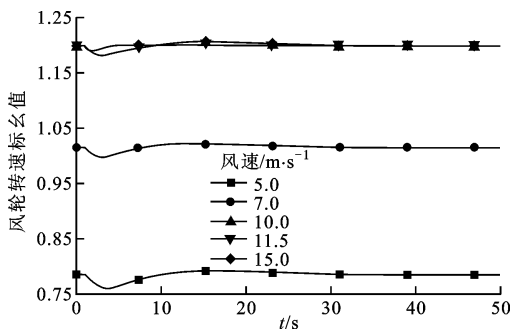


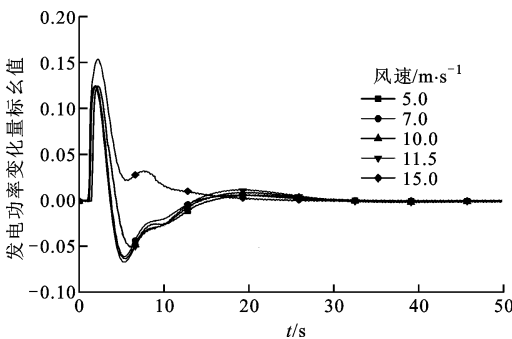
图 8 转子惯性响应曲线



(a) 不同风速下桨距角响应特性



(b) 不同风速下风轮转速响应特性



(c) 不同风速下发电机功率响应特性

图 9 不同风速下机组响应特性

动能。从图 9a、9b 可以看出:在高速(15 m/s)条件下,风力机转子转速受桨距角联动调节的影响而具有较好的动态特性;当风速小于额定风速(11.5 m/s)时,风力机转子转速动态响应的波动较大,且再次达到稳定所需的时间较长;在机组功率上升阶段,不同风速条件下风力机转子的惯性响应几乎相

同。从图 9c 可以看出:在高速条件下,发电机功率变化量始终为正,转子转速波动并未导致风电功率明显跌落;当风速小于额定风速,且在发电机功率跌落阶段时,功率的最大跌落量随着风速的增加而增大。根据仿真结果,在本文提出的转子惯性响应控制下,机组可以在电网频率发生扰动后,转子快速释放转动动能,以增加功率输出,补偿电力系统中的不平衡功率。在额定风速及以下时,尽管发电机功率输出会发生额外的跌落,但是转矩和转速控制器会及时动作,使功率得到恢复。

4 结 论

本文在所建风电机组动态控制模型的基础上,详细研究了利用 DFIG 型风力发电机的转子动能参与电网一次调频的能力,得出以下结论。

(1)本文所建的 1.5 MW DFIG 型风力发电机模型,并未针对具体的风力机型号和容量,所以具有普遍的适用性。

(2)风电机组能够通过释放转子动能临时增加机组的输出功率,以参与系统频率降低时电力系统的频率调节。在本文研究条件下,风力机转子释能时间可达 15 s 以上。

(3)中高速(9~12 m/s)下,风电机组的释能能力会随风速的增加而增大,中低速(6~8 m/s)下,风电机组转子释放动能的能力随着风速的增加而降低,即若仅有风电机组参与调频的系统,当系统频率降低,转子释放相同能量时,在较低(6 m/s)和较高(12 m/s)风速下,系统频率能更快恢复。

(4)在频率允许波动的范围内,本文研究的输出功率可以增加约 15%。

参考文献:

- [1] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [2] MARGARIS I D, PAPATHANASSIOU S A, HATZIARGYRIOU N D, et al. Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 189-199.
- [3] KEUNG P K, LI P, BANAKAR H, et al. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency

support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 279-287.

- [4] MORREN J, De HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [5] KAYIKCI M, MILANOVIĆ J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 859-867.
- [6] RAMTHARAN G, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines [J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 3-9.
- [7] 曹军,王虹富,邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju, et al. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 78-82.
- [8] 张昭遂,孙元章,李国杰,等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 20-25.
ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. Frequency regulation by double fed induction generator wind turbines based on coordinated over speed control and pitch control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25.
- [9] 李灿,李超,康正,等. 含变速恒频风电场的电网频率协调控制策略 [J]. 电网与清洁能源, 2014(7): 62-67.
LI Can, LI Chao, KANG Zhen, et al. Frequency coordinated control strategy of variable-speed constant-frequency wind farms in power grids [J]. Power System and Clean Energy, 2014(7): 62-67.
- [10] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by de-loaded wind turbines using variable droop [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [11] 付媛,王毅,张祥宇,等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.

- [12] GOWAID I A, EL-ZAWAWI A, EL-GAMMAL M. Improved inertia and frequency support from grid-connected DFIG wind farms [C]// Power Systems Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-9.
- [13] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2385-2391.
- DING Lei, YI Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2385-2391.
- [14] 吴双群, 赵丹平. 风力发电原理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 43-44.
- [15] SLOOTWEG J G, POLINDER H, KLING W L. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(4): 516-524.
- [16] 阿赫玛托夫. 风力发电用感应发电机: Induction generators for wind power [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 76-87.
- [17] 王毅, 朱晓荣, 赵书强. 风力发电系统的建模与仿真 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 25-29.
- [18] 林志明, 潘东浩, 王贵子, 等. 双馈式变速变桨风力发电机组的转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009(32): 118-124.
- LIN Zhiming, PAN Donghao, WANG Guizi, et al. Torque control of doubly-fed variable speed variable pitch wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 118-124.
- [19] WU X, WANG W, DAI H, et al. Application of models of the wind energy conversion system to wind power dynamic analysis [C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 1406-1411.
- [20] XUE Y, TAI N. Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine [J]. Renewable Energy, 2011, 36(6): 1671-1677.

(编辑 苗凌)

(上接第 105 页)

- [14] 黄康, 赵韩, 陈奇. 两圆柱体表面接触承载能力的分形模型研究 [J]. 摩擦学学报, 2008, 28(6): 529-533.
- HUANG Kang, ZHAO Han, CHEN Qi. Research of fractal contact model on contact carrying capacity of two cylinders' surface [J]. Tribology, 2008, 28(6): 529-533.
- [15] 陈奇, 黄康, 张彦, 等. 基于分形接触模型的齿轮接触强度影响参数分析 [J]. 中国机械工程, 2013, 16(16): 2208-2211.
- CHEN Qi, HUANG Kang, ZHANG Yan, et al. Analysis of influence parameters on gear's contact strength based on fractal contact model [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 16(16): 2208-2211.
- [16] CHEN Qi, XU Fan, LIU Peng, et al. Research on fractal model of normal contact stiffness between two spheroidal joint surfaces considering friction factor [J]. Tribology International, 2016, 97: 256-264.
- [17] HUANG Kang, XIONG Yangshou, WANG Tao. Research on the dynamic response of high-contact-ratio spur gears influenced by surface roughness under EHL condition [J]. Applied Surface Science, 2017, 392: 8-18.
- [18] 陈奇, 黄守武, 张振, 等. 考虑摩擦因素的两圆柱体表面接触承载能力的分形模型研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 114-121.
- CHEN Qi, HUANG Shouwu, ZHANG Zhen, et al. Research on fractal contact model for contact carrying capacity of two cylinders' surfaces considering friction factors [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 114-121.
- [19] BERRY M V, LEWIS Z V. On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function [J]. Proceedings of The Royal Society, 1980, 370: 459-471.
- [20] CHEN Qi, ZHAO Yucai, MA Yunbo, et al. Testing experiment of characteristic-scale coefficient about cylinder surface [J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(5): 687-697.
- [21] 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 122.
- [22] LITVIN F L, FUENTES A. Gear geometry and applied theory [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2004: 59.
- [23] 田红亮, 陈甜敏, 郑金华, 等. 平行轴圆柱副接触分析 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 1-8.
- TIAN Hongliang, CHEN Tianmin, ZHENG Jinhua, et al. Contact analysis of cylindrical pair with parallel axes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 1-8.

(编辑 葛赵青)