

DOI: 10.7667/PSPC160983

# 全风况下双馈风机参与调频的协调控制策略研究

赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 双馈风机的转子转速与系统频率相互解耦, 风电大规模并网将导致系统调频能力下降, 调频成本增加。为了结合附加惯性控制、超速控制和桨距角控制三种调频措施的优点, 使双馈风机在全风况条件下具备一次调频能力, 提出在最大功率追踪区采用附加惯性与超速控制相结合; 而在恒转速和恒功率区则采用附加惯性与桨距角控制的协调控制策略。针对风能利用系数与桨距角和叶尖速比的复杂非线性数学关系, 在传统桨距角控制策略基础上通过增加补偿桨距角和频率响应环节, 简化了桨距角控制参与系统一次调频的控制策略。最后通过仿真验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 双馈风机; 一次调频; 超速控制; 桨距角控制; 协调策略

## Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind

ZHAO Dongmei, XU Ruiqing, ZHENG Lixin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Large scale wind power integration will decrease the system's frequency control capability and increase its cost as the speed of DFIG is decoupled from the grid frequency. To enhance primary frequency control ability of DFIG in all wind conditions and combine the advantages of auxiliary inertial control, over-speed control and pitch control, this paper proposes a new strategy that in maximum power tracking area coordinated inertia and over-speed control strategy is adopted while in other operate areas, pitch angle control and auxiliary inertial control are combined to achieve frequency regulation. Because of the complicated nonlinear relationship between wind energy utilization coefficient and pitch angle and tip speed ratio, this paper adds a pitch angle compensation and a frequency response module into traditional pitch control, which simplifies the pitch control strategy. Lastly, simulation results verify the validity of proposed method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050201).

**Key words:** DFIG; primary frequency control; over-speed control; pitch control; coordination strategy

## 0 引言

风力发电技术成熟、成本相对较低, 对于调整能源结构、节约资源、保护生态环境有重要作用, 已逐渐成为最具发展潜力的新能源发电技术。随着温室效应的加剧以及全球能源互联网构想的提出, 我国风电产业正恢复快速增长并有望保持, 风电装机容量逐年增加。特别是在北京和北方地区出现大面积雾霾后, 控制空气污染成为发展风电的又一驱

动因素<sup>[1-2]</sup>。然而, 受自然条件的制约, 风电功率大规模并网势必会对电压稳定、频率稳定、电能质量等方面产生影响<sup>[3]</sup>, 尤其是系统频率稳定方面。

频率稳定是电力系统安全运行的重要标志, 它反映了电力系统中有功功率供需平衡的基本状态。针对双馈风机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)的运行特点, 国内外学者关于风电参与调频的可行性进行了大量研究。在一些风电发展较快的国家, 如英国、西班牙等, 已经出台了风电参与调频的导则。在电网实际运行中, 风电机组已能及时响应系统频率变化, 维持频率稳定<sup>[4-9]</sup>。目前 DFIG 机组参与一次调频的控制策略主要有附加惯性控制<sup>[10-14]</sup>、

转子超速控制<sup>[15-19]</sup>和桨距角控制<sup>[20-23]</sup>三种。文献[10]针对 DFIG 机组取代常规电源而减小系统惯量,率先提出了一种利用转子动能模拟同步机组惯性响应的附加控制方法。随着研究的深入该方法得到不断改进。文献[12]通过分析不同风速下附加惯性环节调节系数对调节效果的影响,指出不同风速下风机参与频率调节的能力不同,需设置不同的调节系数,并采用试错法得到最佳系数。然而,DFIG 机组一般运行在最大功率跟踪状态,依靠转子动能无法持续提供频率支撑,当转速下降至极限值时需退出调频以防止频率二次跌落。文献[19]针对惯性仅能短期支撑的特点提出了一种新的结合超速备用和模拟惯性的频率调节策略,使双馈风机具备长期参与系统一次调频的能力。但是当转子转速达到极限值时超速法便失去作用。文献[22]则提出通过调节桨距角使风机正常运行时预留 20% 的功率储备用于频率调节。考虑到经济性,风机可以在最大功率追踪模式和调频模式之间切换。当系统负荷突变时,控制环节响应频率变化减小风机桨距角,增加有功功率输出。但文献中未给出通过调节桨距角使风机减载运行的具体控制方案。

为实现全风况条件下 DFIG 机组有效参与一次调频,充分结合附加惯性控制、超速控制以及桨距角控制的优点和适用区域,本文根据 DFIG 机组运行区域,提出了一种新的协调控制策略:在最大功率追踪区采用惯性与超速相协调;而在恒转速和恒功率区则是惯性与桨距角联合的控制策略。针对风能利用系数与桨距角和叶尖速比的复杂非线性关系,本文还提出了一种简化的桨距角控制方案,通过引入桨距补偿值和建立频率与桨距角的近似线性关系,使 DFIG 机组能响应频率变化。最后,通过仿真验证了本文所提控制策略的有效性。

## 1 DFIG 频率控制原理。

### 1.1 附加惯性控制

同步发电机转子运动方程如式(1)所示。

$$2H\omega \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_E \quad (1)$$

式中:  $H$  是发电机组惯性时间常数;  $P_T$  和  $P_E$  分别是机械功率和电磁功率。频率突变后,电磁功率会随转速变化而减缓频率突变。但由于双馈风机转子转速与频率相互解耦,DFIG 机组无法在频率变化时主动提供惯性支持。附加惯性控制是指通过附加惯性控制环节使机组响应频率变化,提供类似常规机组的转动惯量,其计算公式如式(2)所示。

$$\Delta P_1 = -K_d \frac{df_{\text{meas}}}{dt} \quad (2)$$

式中:  $f_{\text{meas}}$  是系统频率;  $K_d$  是惯性环节调节系数;  $\Delta P_1$  是惯性环节产生的功率。当频率变化时,惯性环节能及时修正转子侧有功功率给定值,变流器响应功率指令快速调节转子转速以释放转子动能或吸收电网多余功率,减缓频率突变。附加惯性环节使风电机组具备类似同步机组的惯性响应能力,但由于其运行在最大功率点,没有功率备用。若要较长时间提供频率支撑,DFIG 机组还需减载运行。

### 1.2 减载控制

DFIG 机组减载运行主要有转子超速控制法和桨距角控制法。前者通过控制转子转速使风机运行在非最优功率点,降低机组有功出力,增加有功功率备用;后者则是通过调节桨距角增加或减少机组出力。图 1 是 DFIG 机组减载运行原理图。

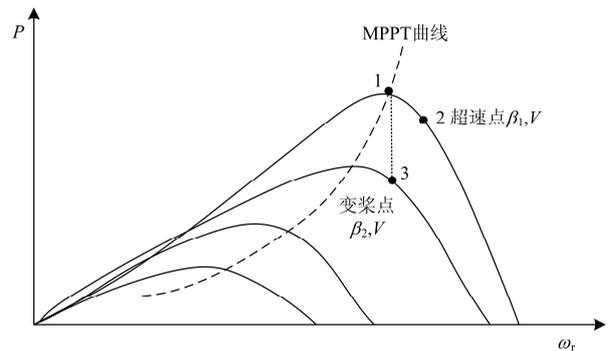


图 1 DFIG 机组减载运行原理图

Fig. 1 De-loaded operation principles of DFIG

图中实线表示某一风速下不同桨距角机组输出有功与转子转速的关系。当风速为  $V$  时,1 是最优功率控制点,此时风能利用系数最大,输出功率最大。2 是超速运行点,转子转速大于最优转速,风能利用系数减少,机组有功功率下降,风机储存更多动能的同时减载运行;在转子转速不变的情况下,调节桨距角使其从  $\beta_1$  增加至  $\beta_2$ ,风机运行至 3 处,同样机组捕获的功率减小。

## 2 双馈风机协调控制策略

DFIG 机组的运行范围可分为最大功率追踪区、恒转速区和恒功率区<sup>[23]</sup>。风机在最大功率追踪区最大限度地利用风能,根据风速控制转子转速使其按最大功率曲线运行;当风速增大转速达到限定值时,进入恒转速区,功率继续增加;当风速继续增加使功率达到额定值时,风机进入恒功率区,为保持功率恒定,需增加桨距角。为实现全风况下风机参与

一次调频, 本文的控制策略是: 在最大功率追踪区采用附加惯性与超速协调; 而在恒转速区或恒功率区采用惯性与桨距角相协调的控制策略。

## 2.1 附加惯性与超速协调控制

双馈风机风功率的数学方程组<sup>[23]</sup>如式(3)所示。

$$\begin{cases} P = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V_w^3 \\ C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda = \omega R / V_w$  是叶尖速比, 其中  $\omega$  是风轮旋转角速度,  $R$  是叶片半径;  $V_w$  是风速;  $\rho$  是空气密度;  $C_p$  表示风能利用系数, 是叶尖速比和桨距角  $\beta$  的函数;  $\lambda_i$  为函数计算过程中的中间变量。桨距角为 0 时, 存在一个最优叶尖速比使得风能利用系数最大 ( $C_{pmax}$ ), 风机最大限度地捕获风能。当转子转速低于限定值, 风机便可通过控制转速保持最优叶尖速比  $\lambda_{opt}$ , 使其工作在最大功率追踪状态。由此可得风机最大功率追踪曲线方程为

$$P_{opt} = K_{opt} \omega^3 \quad (4)$$

式中,  $K_{opt} = (1/2) \rho (C_{pmax} / \lambda_{opt}^3) \pi R^5$ ,  $K_{opt}$  是功率跟踪系数。在某一风速下, DFIG 机组根据最大功率追踪曲线确定其最优功率点, 如图 2 所示, 风机运行在最优功率点 1 处。

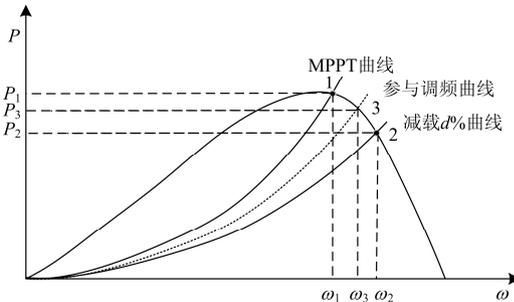


图 2 风机减载调频曲线图

Fig. 2 De-loaded and frequency control curves of DFIG

当风机减载  $d\%$  运行时, 此时输出功率  $P_2$  为

$$P_2 = (1 - d\%) P_1 = \frac{1}{2} (1 - d\%) \rho C_{pmax} \pi R^2 V_w^3 \quad (5)$$

$$C'_p = (1 - d\%) C_{pmax} \quad (6)$$

式中,  $C'_p$  表示减载后的风能利用系数。桨距角为 0, 通过查找风能利用系数与桨距角和叶尖速比表格数据, 便可求出减载时的叶尖速比和转子转速, 然后风机根据参考转子转速使其加速至超速点完成减载操作。这便是 DFIG 机组超速减载过程, 此时修改

风机运行功率曲线, 风机便运行于减载状态。

为了完善 DFIG 机组超速控制参与一次调频的策略, 本文在最大功率追踪区采用附加惯性控制与超速协调的控制策略, 其工作原理如图 3 所示。 $d\%$  是减载量, 风机开始按  $d\%$  减载运行。当频率突变时, 惯性环节首先响应增加机组功率输出, 减缓频率变化。附加控制环节模拟机组一次调频, 根据频率偏差增加机组出力  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = -K_d \frac{df_{meas}}{dt} - K_G (f_{meas} - f_{ref}) \quad (7)$$

$K_G$  是一次调频系数。由于风功率保持不变, 转子转速开始下降, 风机运行点从 2 处开始上升, 进而吸收的风功率增加。此时根据附加环节增发的功率值改变风机参考功率并按新的减载水平  $d'\%$  修改风机功率曲线使其在 3 处重新达到平衡。 $P_3$  和新的减载量计算公式如式(8)、式(9)所示。

$$P_3 = P_2 + \Delta P \quad (8)$$

$$d'\% = d\% - \Delta P / P_1 \quad (9)$$

由于系统频率变化时双馈风机输出功率增加, 降低了系统稳态频率偏差, 当系统频率恢复正常时, 双馈风机重新按照初始减载指令运行于 2 处。

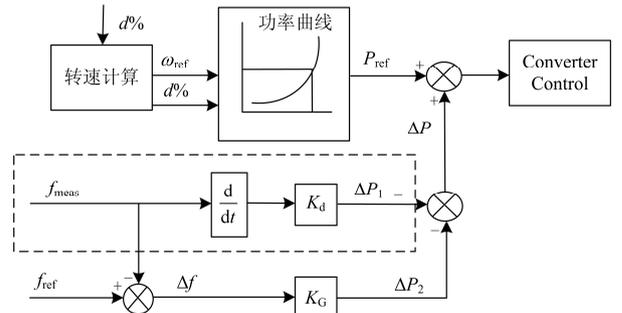


图 3 风机附加控制环节

Fig. 3 Auxiliary control of DFIGs

## 2.2 附加惯性与桨距角协调控制

DFIG 机组超速控制在转速达到限定值时便失去作用。此时只能通过桨距角控制法调节风机出力以达到参与系统调频的目的。

大型风机体型巨大, 频繁调节桨距角会对其运行寿命产生一定影响。表 1 是海南文昌、四更、感城、峨蔓 4 个风电场 2013—2014 年大于恒转速风速的统计分析结果。数据每 15 min 一个, 统计全年结果。从表 1 中可以看出, 一年中风机在恒转速或者恒功率区的运行工况只占全年运行时间的 10% 左右。因此, DFIG 机组在中高速下运行时间短, 在此区间采用桨距角控制法参与系统一次调频能最大限度地降低其对风机的磨损。

表 1 海南风电场大于恒转速风速概率统计结果

Table 1 Probability statistic result of wind speed higher than constant speed wind in Hainan wind farm

风电场	一年中风速大于转子恒转速风速概率	
	2013 年	2014 年
文昌	9.33%	7.48%
四更	8.61%	7.73%
感城	10.93%	10.52%
峨蔓	9.78%	10.12%

大型双馈风机桨距角调节是通过液压变桨执行机构来完成的。但液压变桨机构主要由液压泵、液压缸、曲柄连杆机构等组成，变桨动作不能瞬间完成，具有一定的时滞性，这就导致采用桨距角控制的一次调频措施有一定的延迟。随着技术的不断改进，液压变桨机构的延时已不超过 1 s，且在最大载荷状态下，最小变桨速度达到 5° 每秒<sup>[24]</sup>。为了减缓中高风速下系统故障后的频率突变率，本文利用风机附加惯性环节模拟的虚拟惯量，快速响应频率变化，再结合桨距角控制技术调节机组出力以减小频率偏差。

DFIG 机组运行在最大功率追踪区时，桨距角为 0，式(5)根据

$$\partial C_p(\lambda, \beta) / \partial \lambda = 0 \quad (10)$$

求得最优叶尖速比 $\lambda_{opt}=6.4$ ，此时风能利用系数最大；当进入恒转速区时，某固定风速下叶尖速比保持不变，随着风速的增加，叶尖速比不断降低。图 4 是不同叶尖速比下风能利用系数与桨距角的关系曲线。可以看出，叶尖速比固定时，风能利用系数与桨距角近似成线性关系。且在 $\lambda_{opt}$ 附近，相同桨距角下 $C_p$ 相差不大。线性拟合 $\lambda_{opt}=6.4$ 曲线得到 $C_p$ 与桨距角的近似线性关系：

$$C_p = -0.014\beta + 0.43 \quad (11)$$

若风机减载 10%运行， $\beta$  应增加 3.10°。

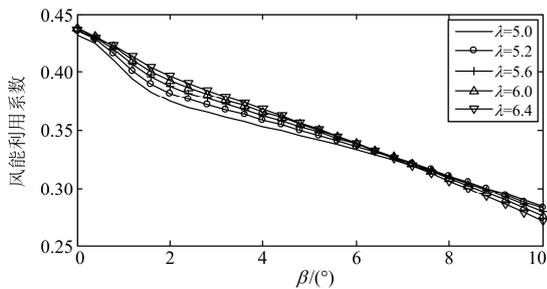


图 4 不同叶尖速比下风能利用系数与桨距角的关系曲线

Fig. 4  $C_p$  curves when pitch angel vary with different  $\lambda$ s

为保证控制策略的有效性，简化桨距角调频控制方案，本文设计了如图 5 所示的控制方案。在传

统桨距角控制结构基础上添加桨距补偿环节和频率响应环节实现减载调频功能：桨距补偿环节根据当前风速下功率参考值  $P_{ref}$  确定机组减载运行的桨距值  $\beta_{off}$ ；频率响应环节是频率与桨距角的近似表达式，根据  $\beta_{off}$  确定风机桨距角与频率的函数关系，使桨距角能响应频率变化，输出桨距角修正量  $\Delta\beta$ ，调节风机桨距值。

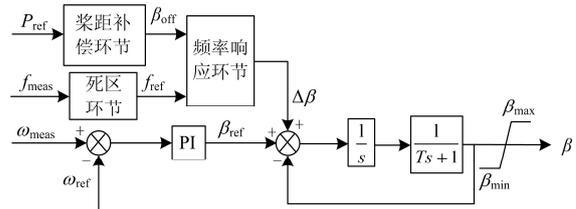


图 5 桨距角控制结构图

Fig. 5 Pitch control diagram

目前国内外风机参与调频一般设置减载 10%左右且以风机输出功率 0.75 p.u.点作为最大功率追踪区和恒转速区的分界点，根据式(11)桨距角提升 4°就能满足工程应用要求。另外，风机进入恒转速区后输出功率仍低于额定值，且不同风速条件下风机参与调频的能力不同。为防止桨距角跳变，其补偿环节方程如式(12)所示，文中设定双馈风机输出功率为 1 p.u.时补偿角为 4°。此后，随着功率的下降，补偿角减少，直至功率降至 0.75 p.u.，补偿角为 0°，即在恒转速区桨距角控制调频方法退出运行。

$$\beta_{off} = \begin{cases} 16P_{ref} - 12 & 0.75 < P_{ref} \leq 1 \\ 0 & P_{ref} \leq 0.75 \end{cases} \quad (12)$$

频率响应模块在  $\beta_{off}$  基础上建立桨距角修正值与系统频率的线性关系，如式(15)所示。

$$\Delta\beta = K(f_{ref} - 50) + \beta_{off} \quad (13)$$

式中， $K$  是频率响应系数，当频率低于 49.2 Hz 时，DFIG 机组最大限度地输出功率，而  $\beta_{off} \leq 4$ ，因此文中  $K$  设置为 5。电网频率的安全范围是  $50 \pm 0.2$  Hz，所以死区环节方程为

$$f_{ref} = \begin{cases} 50 & 49.8 \leq f_{meas} \leq 50.2 \\ f_{meas} & f_{meas} \geq 50.2 \cup f_{meas} \leq 49.8 \end{cases} \quad (14)$$

当系统频率稳定时，桨距角修正量为  $\beta_{off}$ ，机组恢复减载运行；当系统频率低于安全范围时，通过频率响应环节能够降低风机桨距角，增加机组出力，参与系统的一次调频。

综上所述，文中结合了超速控制和桨距角控制优缺点，两种方案分别适用于 DFIG 机组的不同运行区域，实现了全风况条件下风机参与一次调频的目标。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真系统

本文在 DIgSILENT PowerFactory 仿真软件中搭建了如图 6 所示的仿真系统模型。其中 G 由 4 台额定功率为 5 MW 的双馈风机组成; GS 是指常规同步发电机组, 额定有功功率为 60 MW, 并且配备了调速器和电力系统稳定器; 有功负荷为 50 MW。

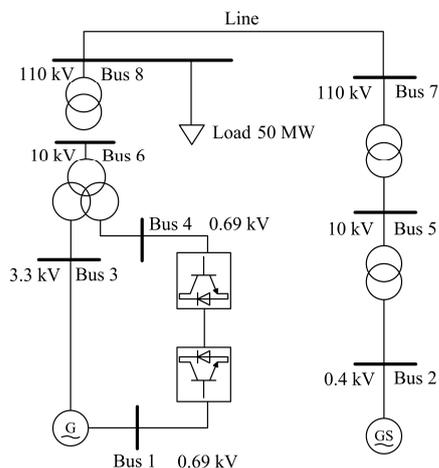


图 6 仿真系统模型

Fig. 6 Simulation power system model

#### 3.2 超速控制仿真分析

在系统一次调频的时间尺度下(30 s), 风电的波动性较小, 所以在超速控制仿真环节风速设为定值 12 m/s, 机组通过超速控制工作在 10% 减载状态。仿真中采用标幺值, DFIG 机组的功率基准值为其额定功率, 转速基准值为额定转速。

仿真中有功负荷在 10 s 时增加 10%, DFIG 机组在不同控制策略下系统频率响应和风机转子转速对比如图 7、图 8 所示。

图 7、图 8 显示, 负荷突增后, 风机在无附加控制策略情况下系统频率下降幅度和速率最大, 最低点频率为 49.57 Hz, 并且由于双馈风机转子转速与系统频率相互解耦, 风机转子转速几乎不受影响。附加的惯性控制环节能够响应系统频率变化, 转子转速迅速下降, 释放动能, 能有效减缓负荷突增后系统频率下降的速率和幅度, 最低点频率值相比无控制减少了 0.13 Hz, 但惯性控制不能改变频率的稳态值, 仍为稳定值 49.8 Hz。由于一次调频是有差调节, 负荷波动后系统频率会偏离正常值。转子惯量支持时间短暂, 不到 5 s 风机转速就开始恢复, 经过小幅振荡后恢复至初始值。采用惯性与超速协调控制时, 频率下降速率和幅度都最小, 最低点频率偏差相比无控制减少了 0.24 Hz, 稳定频率偏差减少

了 0.05 Hz; 转子转速不断下降, 最后稳定在 0.97 p.u.。惯性与超速协调控制能同时响应频率变化率和频率偏差, 其效果要优于各单独控制措施; 惯性减缓频率变化, 超速控制后能不断增加功率输出, 较好地满足一次调频要求。

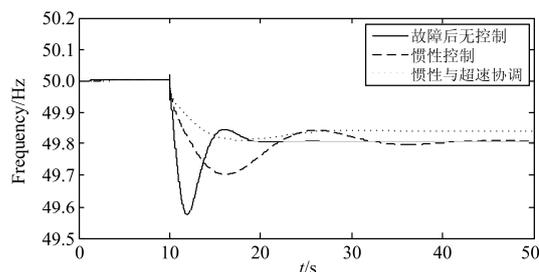


图 7 超速控制下频率响应对比

Fig. 7 Frequency response comparison with over-speed control

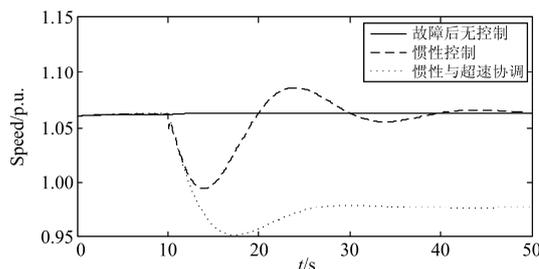


图 8 超速控制下风机转速响应对比

Fig. 8 Speed response comparison with over-speed control

#### 3.3 桨距角控制仿真分析

为验证惯性与桨距角协调控制策略的有效性, 本节仿真风速设定为 13 m/s, 按照所提方案改进桨距角控制模块, 使风机运行在减载状态。仿真中有功负荷在 10 s 时增加 10%, 双馈机组在不同控制策略下系统的频率响应和风机桨距角变化对比如图 9、图 10 所示。

图 9、图 10 显示, 风速升至 13 m/s 后, 双馈风机采用桨距角控制方式减载运行, 补偿桨距角环节发生作用, 桨距角基本控制在  $3^\circ$  附近。当负荷突然增加 10% 后, DFIG 在无附加控制的情况下系统频率下降幅度和速率最大, 最大频率偏差为 0.51 Hz; 惯性环节减缓了频率突变, 最大偏差为 0.40 Hz, 减少了 0.11 Hz; 而惯性与桨距角协调控制策略下频率下降最小, 最大频率偏差降低至 0.34 Hz, 由于风机提供一次调频, 最终频率稳定偏差减少了 0.06 Hz。在恒转速区或者恒功率区, 桨距角补偿环节实现了风机的减载运行, 惯性环节短暂增加了机组出力, 因此其桨距角有一段波动过程; 通过桨距角响应频率变化模块, 惯性与桨距角协调参与一次调频后,

双馈风机桨距角下降了 1.2°。所以，附加的频率响应环节能较好地响应系统频率变化，增加 DFIG 机组输出功率，减少稳定频率偏差。

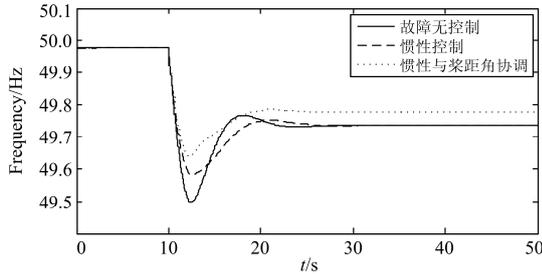


图 9 桨距控制下系统频率响应对比

Fig. 9 Frequency response comparison with pitch control

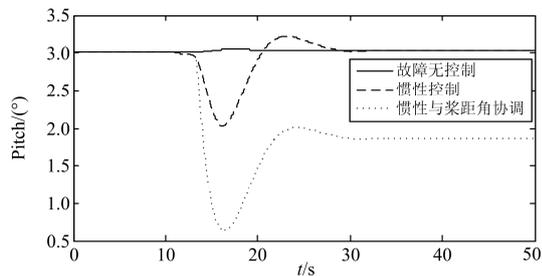


图 10 桨距控制下风机桨距角变化对比

Fig. 10 Pitch angle response comparison with pitch control

### 4 结论

本文根据风机运行区域不同，提出了一种在最大功率追踪区采用惯性与超速协调控制；在恒转速区或恒功率区采用惯性与桨距角相协调的控制策略，并改进了风机参与一次调频的桨距角控制方案。

在无附加控制情况下，系统发生故障后双馈风机不能响应频率变化，不能提供有效的频率支撑作用；加入附加惯性环节后，利用转子的惯量能有效模拟出类似于常规同步机组的惯性减缓系统频率变化，但稳定后不能使风机产生额外出力；在最大功率追踪区，风机采用惯性与超速相协调的控制方式，结合了惯性和超速减载的优点，能有效抑制频率波动幅值，提供备用容量参与长期调频，减小稳态偏差；在超速控制失效的恒转速区或恒功率区，采用本文提出的桨距角控制改进方案，通过调节桨距角减载运行，双馈风机在该风况下也能较好地参与一次调频。仿真结果表明，文中所提的控制策略能有效减小故障后频率波动幅值和稳态偏差，能有效地参与系统一次调频，使调频过程更加平稳。

### 参考文献

[1] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明. 2014 中国风电发展报告[R].

北京: 中国环境科学出版社, 2014.

[2] 田书欣, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于调频层面的风电弃风分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 18-26.

TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Analysis on wind power curtailment at frequency adjustment level[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 18-26.

[3] 刘斯伟, 李庚银, 周明. 双馈风电机组对接入区域系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 56-61.

LIU Siwei, LI Gengyin, ZHOU Ming. Impact analysis of doubly-fed induction generator on the transient angle stability of the region with wind power integrated[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 56-61.

[4] 王立新, 程林, 孙元章, 等. 双馈风电机组附加控制对轴系振荡影响的评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 34-40.

WANG Lixin, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. A method for evaluating influence of ancillary control on torsional oscillations of dfig-based wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 34-40.

[5] 张祥宇, 付媛, 王毅, 等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-169.

ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 159-169.

[6] 李欣然, 马亚辉, 曹一家, 等. 一种双馈式风力发电系统的等效模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 210-217.

LI Xinran, MA Yahui, CAO Yijia, et al. An equivalent model of doubly-fed wind generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 210-217.

[7] 徐箭, 施微, 徐琪. 含风电的电力系统动态频率响应快速评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 22-27.

XU Jian, SHI Wei, XU Qi. A fast assessment method for power system dynamic frequency response to wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 22-27.

[8] National Grid (Great Britain) Company. The grid code[R]. London: National Grid (Great Britain) Company, 2006.

[9] ELKRAFT SYSTEM and ELTRA. Wind turbines connected to grids with voltages above 100 kV[R]. Errits: ELKRAFT SYSTEM and ELTRA, 2004.

[10] MORREN J, 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.

- [11] 曹军, 王虹富, 邱家驹. 变速恒频双馈风电机频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.  
CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju. 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.
- [12] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 59-68.  
ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Frequency regulation of the wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG cooperative strategy with variable coefficients between virtual inertia and over-speed control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 59-68.
- [13] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.  
BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chuning, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [14] WANG Y, DELILLE G, BAYEM H, et al. High wind power penetration in isolated power systems — assessment of wind inertial and primary frequency responses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2412-2420.
- [15] 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.
- [16] DE ALMEIDA R G, PEAS LOPES J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-950.
- [17] DE ALMEIDA R G, CASTRONUOVO E D, PEAS LOPES J A. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 718-725.
- [18] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机频率控制[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 overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25.
- [19] 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, YIN 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.
- [20] 韩兵, 周腊吾, 陈浩, 等. 大型风机的独立变桨控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 1-8.  
HAN Bing, ZHOU Lawu, CHEN Hao, et al. Methods of individual pitch control for large wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 1-8.
- [21] MARINELLI M, MASSUCCO S, MANSOLDO A, et al. Analysis of inertial response and primary power-frequency control provision by doubly fed induction generator wind turbines in a small power system[C] // 17th Power Systems Computation Conference, 2011.
- [22] 朱晓荣, 赵猛, 王毅. 双馈感应风力发电机组复合频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 20-24.  
ZHU Xiaorong, ZHAO Meng, WANG Yi. Composite frequency control strategy of doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 20-24.
- [23] 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.
- [24] 孔屹刚. 风力发电技术及其 MATLAB 与 BLADED 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-08-12

作者简介:

赵冬梅(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析运行和电力系统智能技术; E-mail: zhao-dm@ncepu.edu.cn

许瑞庆(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网, 电力系统分析与控制; E-mail: xuruiqing103@126.com

郑立鑫(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网, 微网控制与运行。E-mail: zhenglixin0724@163.com

(编辑 魏小丽)