

考虑双馈异步发电机转速限制的电网频率协调控制策略

李生虎¹, 王鹏飞¹, 朱国伟²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 安徽省电力公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230061)

摘要: 双馈异步发电机(DFIG)参与惯性调频能减小频率变化率, 一次调频能减小稳态频率偏差。为解决上述两种策略协调控制过程中因频率偏差和微分系数选择而易导致异步发电机转子转速越限的问题, 提出一种考虑转速限制的电网频率协调控制策略。通过控制 DFIG 的输出功率, 确保转速偏差和频率偏差成正比。以转子转速为约束, 整定频率信号的比例系数。根据电网频率变化情况, 调整输出功率参考值, 使得转速保持恒定, 且有利于频率的恢复。仿真结果验证了所提策略能有效防止转子转速越限, 有助于提高系统频率的稳定性。

关键词: 双馈异步发电机; 频率偏差; 转速限制; 系数整定; 协调控制

Coordinated grid frequency control strategy of doubly-fed induction generator considering its rotor speed constraints

LI Shenghu¹, WANG Pengfei¹, ZHU Guowei²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Economics and Technology Research Institute, Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

Abstract: The doubly-fed induction generator (DFIG) participating in inertia and primary frequency regulation can reduce the rate of change of frequency and steady state frequency deviation respectively. A coordinated grid frequency control strategy considering its rotor speed constraints is proposed to solve the problem that the rotor speed is easy to exceed its constraints due to the frequency deviation and differential coefficients selection when coordinating the aforementioned two frequency control strategies. Controlling the DFIG output power can ensure that the rotor speed deviation is proportional to the frequency deviation. The coefficients of frequency signal are set based on the rotor speed constraints. According to the change of grid frequency, the output power reference value is adjusted to ensure constant rotor speed and assist the frequency recovery. Simulation results verify that the proposed control strategy can effectively keep the rotor speed within its limits and enhance the system frequency stability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277049).

Key words: doubly-fed induction generator; frequency deviation; rotor speed constraints; coefficients setting; coordinated control

0 引言

双馈异步发电机(DFIG)由于其变流器容量小和发电效率高的特点, 已成为风电场主力机型。但由于变流器的控制, 使得转子转速与频率解耦, 降低了系统的等效惯性, 不利于系统频率的稳定, 因此需要在 DFIG 输出功率信号上附加频率信号, 使得风电机组类似同步发电机响应电网频率的变化^[1-3]。

目前, 风力发电机参与系统调频的技术主要包括虚拟惯性控制^[4]、下垂控制^[5-6]和频率协调控制^[7-9]。惯性控制利用转速下降释放转子动能, 提供暂态频率支撑; 下垂控制和协调控制需要风力机减载运行以提供备用, 前者提供稳态频率支撑, 后者需要完成稳态和暂态频率支撑。减载运行一般由超速和变桨完成, 文献[10]根据划分的风速, 采用超速与变桨协调控制进行备用, 能够有效降低机械损耗, 较为实用。

为模拟同步发电机对频率的支撑特性, 附加功

率控制信号一般由风电机组连接点频率微分和偏差信号产生, 通过转子运动方程将转速和频率联系起来。风电机组的备用容量、风力机的捕捉功率和转子释放的动能都与转速有关, 而转速存在安全运行约束。这些因素导致了控制过程中频率信号的比例系数存在约束, 难以合理选择以保证对频率支撑的效果的同时转速不越限。针对此问题, 文献[5]根据不同风速下转子释放的机械动能和备用容量之和来整定下垂系数, 使得稳态时转速不会低于最优转速, 但需要人为设置一次调频时间。文献[11]在超速备用下, 控制输出功率使得转速偏差与频率偏差成正比, 能保证稳态时转速不低于最优转速, 但不能保证在暂态过程中转速也在安全约束范围内。

本文在超速和变桨进行有功备用的情况下, 提出一种考虑双馈异步发电机转速限制的惯性和一次调频协调控制策略。以频率偏差、频率微分和转子转速信号来产生电磁转矩参考值, 通过设定频率微分信号与频率偏差信号的系数之比, 确保转速偏差和频率偏差成正比。以转子转速为约束, 整定频率偏差和微分信号系数。对系统频率变化进行分析, 在频率最大跌落点或频率跌落整定点, 调整输出功率参考值, 使得转速保持不变。最后编写仿真程序, 应用于改进的 WSCC 3 机 9 节点系统, 验证所提控制策略能有效地防止转速越限。

1 转速限制和桨距角控制

风力机捕捉功率 P_{wt} (p.u.) 与转子转速 ω_t (p.u.) 和桨距角 β 均有关, 其表达式为

$$P_{wt} = \frac{1}{2P_N} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中: P_N 为风电机组额定功率; R 为风轮半径; ρ 为空气密度; v_w 为风速; $\lambda = \omega_t \omega_b R / v_w$ 为叶尖速比; ω_b 为风力机额定机械转速; C_p 为风能捕捉系数^[12]。

根据文献[10]对风速的划分和风力机恒定百分比减载运行策略, 其运行情况如图 1 所示, BC、CE 分别为低、中风速下减载运行曲线, AD、DF 为与之对应的最大功率追踪方式。

定义风力机减载水平 η 为

$$\eta = 1 - \frac{P_{del}}{P_{opt}} \quad (2)$$

式中, P_{opt} 、 P_{del} 分别为最大捕捉功率和减载捕捉功率, 分别对应图中曲线 AF 段和 BCE 段, AF、BC 段叶尖速比 λ_{opt} 、 λ_{del} 恒定, CE 段转速恒定。双馈异步发电机转速 ω_t 正常运行范围为 0.7~1.2 p.u.。

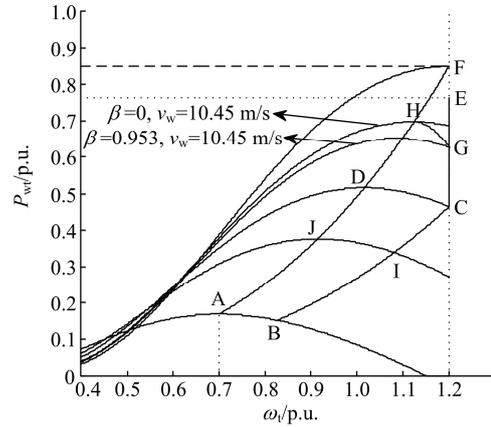


图 1 调频过程中的转速限制

Fig. 1 Rotor speed constraints in frequency regulation

在低风速下, 当电网出现功率缺额, DFIG 通过降低转速来释放动能, P_{wt} 将会沿着曲线 IJ 移动, 若附加功率中参数设置不合理, 将会导致转速越过最低转速。同时, 由于 DFIG 需要参与一次调频, 其稳态时转速将不低于最优转速, 以充分利用备用容量, 因此转速需在 IJ 之间。文献[13]认为, 在超速备用下, 转速在最优转速点 ω_{opt} 和初始减载点 ω_{del} 之间, P_{wt} 可以近似为一条以 J 点(ω_{opt} , P_{opt})为顶点, 经过 I 点(ω_{del} , P_{del})的抛物线。其表达式为

$$P_{wt} = a_0 \omega_t^2 + b_0 \omega_t + c_0 \quad (\omega_{opt} \leq \omega_t \leq \omega_{del}) \quad (3)$$

式中: $a_0 = -\eta P_{opt} / (\omega_{del} - \omega_{opt})^2$; $b_0 = -2a_0 \omega_{opt}$; $c_0 = P_{opt} + a_0 \omega_{opt}^2$ 。它们均是与 v_w 和 η 有关的常数。

而在中风速下, 调频过程中 β 和 ω_t 同时变化, 理论上从减载点 G 到最大捕捉功率点 H 之间, 有多种连接方式, 这取决于桨距角的控制方式。文献[9]将这两点之间看作是一条直线, 本文将控制桨距角 β 使风力机捕捉功率 P_{wt} 近似为一条以 H 点(ω_{opt} , P_{opt})为顶点, 经过 G 点(ω_{tmax} , P_{del})的关于转速 ω_t 抛物线, 即 $P_{wref}(\omega_t) = P_{wt}(\omega_t, \beta)$, 对应曲线 GH, 其中捕捉功率参考值 $P_{wref}(\omega_t)$ 表达式为

$$P_{wref}(\omega_t) = a_1 \omega_t^2 + b_1 \omega_t + c_1 \quad (\omega_{opt} \leq \omega_t \leq \omega_{tmax}) \quad (4)$$

式中: $a_1 = -\eta P_{opt} / (\omega_{tmax} - \omega_{opt})^2$, $b_1 = -2a_1 \omega_{opt}$; $c_1 = P_{opt} + a_1 \omega_{opt}^2$ 。下标 0 表示低风速, 1 表示中风速, 下文将省略。

桨距角的控制方式如图 2 所示, 图中: T_{servo} 为桨距角执行机构响应时间常数; β_{ref} 为桨距角参考值; s 为拉普拉斯算子。

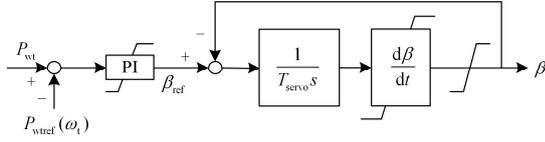


图2 桨距角控制框图

Fig. 2 Pitch angle control

2 惯性和一次调频协调控制策略

2.1 频率的协调控制策略

DFIG 的输出功率可以通过变流器调节控制, 变流器调节过程很快, 可近似认为其输出功率 P_{DFIG} 与其参考值 P_{ref} 相等, 即 $P_{\text{DFIG}} \approx P_{\text{ref}}$ 。将 DFIG 的传动系统简化为单质量块模型, 忽略其机械损耗和异步发电机定、转子损耗, 且认为系统频率变化很小, 则有 $P_{\text{DFIG}} \approx \omega_t T_e$, T_e 为异步发电机的电磁转矩。则其转子运动方程可表示为

$$2H_g \frac{d\omega_t}{dt} = \frac{P_{wt}}{\omega_t} - \frac{P_{\text{DFIG}}}{\omega_t} \approx \frac{P_{wt}}{\omega_t} - \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_t} \quad (5)$$

式中, H_g 为以异步发电机自身额定容量为基准的惯性时间常数。

将风电机组连接点频率 f 的偏差和微分信号引入到 DFIG 附加电磁转矩上, 同时加上转速负反馈项, 则其电磁转矩参考值 T_{eref} 为

$$T_{\text{eref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{\omega_t} = T_{\text{del}} - k_d \frac{df}{dt} - k_p \Delta f + c \left(\frac{1}{\omega_t} - \frac{1}{\omega_{\text{del}}} \right) \quad (6)$$

式中, k_d 、 k_p 分别为频率微分信号和频率偏差信号的比例系数; T_{del} 为减载运行时的电磁转矩。

联立式(3)(或式(4))、式(5)和式(6), 两边同时进行 Laplace 变换, 可以得到

$$\frac{\Delta\omega_t(s)}{\Delta f(s)} = \frac{sk_d + k_p}{2H_g s - a} \quad (7)$$

令 $k_d = 2H_g k$, $k_p = -ak$, k 为中间比例系数, 再经过反 Laplace 变换有

$$\Delta\omega_t = k\Delta f \quad (8)$$

式(8)表明, 采用式(6)的附加转矩控制, 只要系数 k_d 和 k_p 之比为上述定值, 则 $\Delta\omega_t$ 与 Δf 之比将恒定为 k , 且 k 值取决于频率信号系数。

2.2 频率信号系数的整定

类似于同步发电机有功功率对频率支撑的表达式, 虚拟惯性时间常数 H_{vir} 和调差系数 K_{vir} 与额外有功对应的关系为

$$\Delta P_{\text{DFIG}} = -2H_{\text{vir}} \frac{df}{dt} - K_{\text{vir}} \Delta f \quad (9)$$

按照上式的定义, H_{vir} 、 K_{vir} 的表达式为

$$\begin{cases} H_{\text{vir}} = kH_g(\omega_{\text{del}} + \Delta\omega_t) \\ K_{\text{vir}} = -k(a(2\omega_{\text{del}} + \Delta\omega_t) + b) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知, k 值越大, H_{vir} 、 K_{vir} 越大, DFIG 的调频能力越强。但其备用容量有限, 过大的 k 值可能导致转子转速越限, 因此需要根据备用容量和转速限制确定 k 值。

根据风速 v_w 的不同, 风电机组释放最大备用容量时, 转速对应的最大偏差 $\Delta\omega_{t\text{max}}$ 为

$$\Delta\omega_{t\text{max}} = \begin{cases} \frac{v_w}{\omega_{\text{tb}} R} (\lambda_{\text{del}} - \lambda_{\text{opt}}) & (\text{低风速}) \\ \omega_{t\text{max}} - \frac{v_w \lambda_{\text{opt}}}{\omega_{\text{tb}} R} & (\text{中风速}) \end{cases} \quad (11)$$

DFIG 参与调频时, 设暂态频率最大允许跌落值为 $|\Delta f|_{\text{set}}$ 。采用上述控制策略时, 当频率偏差最大时, 对应转速偏差也最大, 此时, DFIG 的备用容量恰好全部投入。为避免转速越限, 由式(8)、式(11)可以得到最大的 k 值为

$$k = \frac{\Delta\omega_{t\text{max}} f_s}{|\Delta f|_{\text{set}}} \quad (12)$$

式中, f_s 为基准频率。

由式(10)和式(12)可知, 风电机组表现出来的 H_{vir} 和 K_{vir} 与 v_w 、 η 有关, 且是根据 f 实时变化的。实际上, 由于定、转子损耗的存在, 式(3)存在的误差(或中风速下桨距角调节的延时)以及频率测量环节的延时, k 比设定值略偏小, 但并不影响控制策略的效果。

风电机组参与系统调频, 能够一定程度上减小频率变化率和稳态频率偏差, 但频率的变化趋势仍为先减小后增大。在上述控制中, k 是按照最大频率跌落整定, 稳态时频率偏差必然低于 $|\Delta f|_{\text{set}}$, 备用容量不能完全利用。当负荷增量较大时, 备用容量不足, 频率跌落最大值 $|\Delta f|_{\text{max}}$ 将超过 $|\Delta f|_{\text{set}}$, 转速将越过最优转速, 可能导致其越限。因此, 为避免转速越限, 需要对上述控制策略进行调整。

3 考虑转速限制的改进控制策略

DFIG 频率调整控制如图 3 所示, 系统根据当前的 v_w 和 η 确定各项参数。风电机组参与调频启动后, 根据风电机组连接点频率调整输出功率参考值。

(1) 负荷突增量较小时, 此时频率最大偏差 $|\Delta f|_{\text{max}} \leq |\Delta f|_{\text{set}}$, 当 $|\Delta f| = |\Delta f|_{\text{max}}$ 时, $df/dt = 0$, 转速偏差也达到最大, 为避免转速随频率恢复而上升, 不利于频率恢复, 则此时通过频率判断模块, 保持 P_{ref} 不变, 使得输出功率保持不变, 则 DFIG 能根据频率最大跌落值确定参与调频的深度, 且能够使得

转速不会低于当前风速下最优转速。

(2) 负荷突增量较大时, 有功备用不足, 若按上述策略, 频率偏差最大值 $|\Delta f|_{\max}$ 将会超过设定值 $|\Delta f|_{\text{set}}$, 因而转速会超过最优转速。故当 $|\Delta f| = |\Delta f|_{\text{set}}$ 时, 转速为最优转速, 其偏差达到最大允许值, DFIG 释放出最大转子动能, 且风力机捕捉功率最大。为避免转速继续降低, 通过频率判别模块, 向逻辑判断模块发出信号, 调整 $P_{\text{ref}} = P_{\text{wt}}$ 使得转速保持在最优转速, 且 DFIG 将备用容量全部投入参与调频。

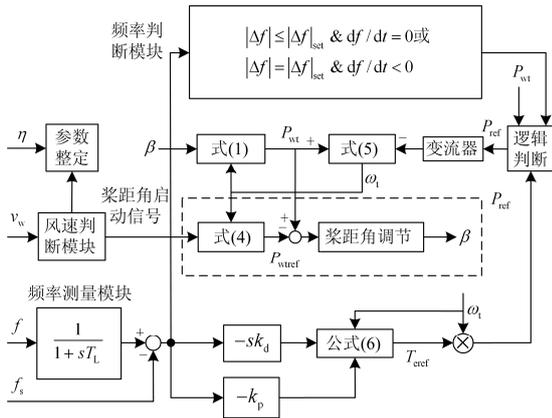


图 3 考虑转速限制的改进频率协调控制策略

Fig. 3 Improved coordinated frequency control strategy considering rotor speed constraints

4 算例分析

本文采用改进的 WSCC 标准测试系统, 如图 4 所示, 同步发电机组采用 5 阶动态模型, 并加入励磁和调速系统, 网络和负荷采用恒阻抗模型。假设风电场中均为双馈异步发电机, 并等值为一台发电机, 经过变压器升压后接到母线 9 上, 其容量为 $40 \times 1.5 \text{ MW}$, DFIG 的模型和控制见文献[12]。在 Matlab 上编程进行仿真, 来验证所提控制策略。DFIG 及系统主要参数如下。

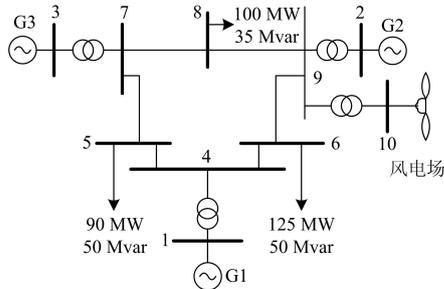


图 4 改进的 WSCC 测试系统

Fig. 4 Modified WSCC test system

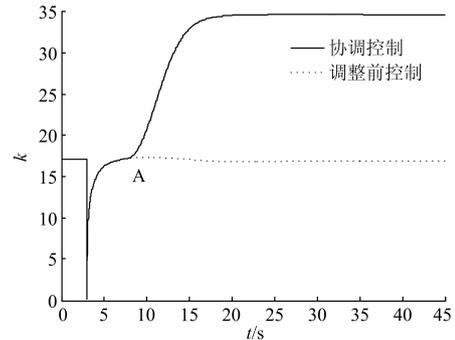
风力机及异步发电机参数: $R=32.86 \text{ m}$; $H_g=3.5 \text{ s}$; $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$; $\omega_{\text{tb}}=2.034 \text{ rad/s}$; 定子电阻

$R_s=0.011 \text{ p.u.}$, 定子电抗 $X_s=0.182 \text{ p.u.}$, 转子电阻 $R_r=0.009 \text{ p.u.}$, 转子电抗 $X_r=0.144 \text{ p.u.}$, 励磁电抗 $X_m=5.89 \text{ p.u.}$ 。桨距角控制参数: PI 参数中, 比例和积分系数分别取 47.5 与 0.022 p.u. ; $T_{\text{servo}}=0.5 \text{ s}$ 。三台同步机的惯性时间常数分别为: 3.0 s 、 6.4 s 、 3.01 s ; 调速系统的下垂系数均取 0.04 。

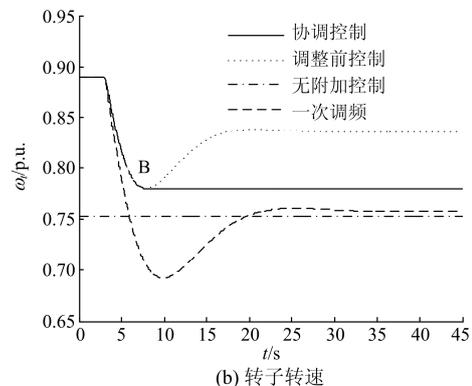
取 $\eta=10\%$, $|\Delta f|_{\text{set}}=0.4 \text{ Hz}$, $f_s=50 \text{ Hz}$ 。在中、低风速下, $t=3 \text{ s}$ 时, 节点 8 负荷突然增大, 突变量为 0.07 p.u. 。前文所提到改进协调控制策略的前提是转速偏差和频率偏差的比值 k 时刻保持在设定值附近, 特别是在调整时刻, 故需要验证实际 k 值, 称改进前使得转速与频率偏差一直成正比的策略为调整前控制, 改进后的称为协调控制。对比双馈异步发电机无附加控制、调整前控制、协调控制和一次调频时, 风电机组连接点频率和转子转速变化情况。

(1) 低风速下

低风速的范围为 $6.5 \sim 9.45 \text{ m/s}$ 。取 $v_w=7 \text{ m/s}$, 图 5 分别表示不同频率控制策略下的比值 k 、转速和频率的变化情况。图 5(a)中, $0 \sim 3 \text{ s}$ 的 k 为计算得到值。负荷突增后, 由于频率测量环节延时, k 值在 $3 \sim 5 \text{ s}$ 内略有偏差, 此后, 保持在设定值附近不变, 且由式 (1)和式(3)产生的最大误差不超过 0.15% , 因此其主要误差为定、转子损耗所产生。频率偏差最大时(图 5(c)中 C 点), 此时转速偏差也达到最大值(图 5(b)中 B 点), 这表明了频率偏差最大点进行调整的合理性。



(a) 转速偏差与频率偏差的比值 k



(b) 转子转速

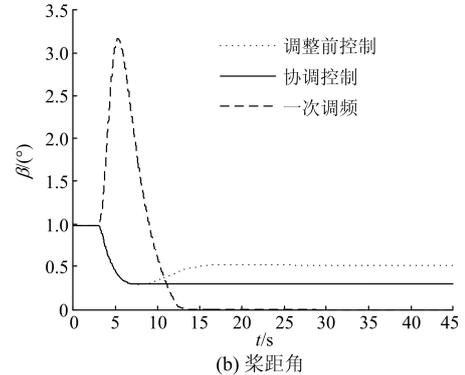
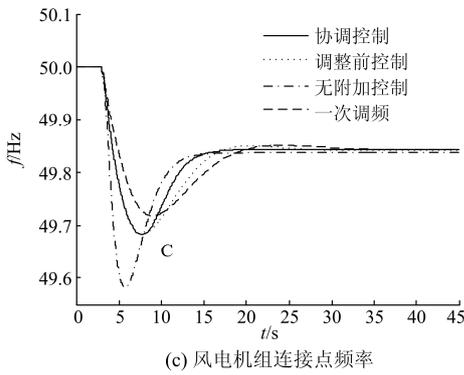


图 5 低风速时不同频率控制策略下比值 k 、频率和转速对比
Fig. 5 Comparison of ratio k , frequency and rotor speed with different frequency control strategies at low wind speed

图 5(b)、图 5(c)中给出 4 种控制下转速和频率的变化曲线。采用协调控制时，在频率最低点时，转速偏差达到最大，此后能保持不变，同时转速不会低于最优转速，保证了在低风速下，参与调频过程中转速不会越限，且风电机组参与调频的深度是根据频率偏差最大值确定的；与无附加控制相比，对暂稳态频率均有所提升。与调整前相比，在 B 点后，转速保持不变，有利于频率的恢复和提升稳态频率值；相比传统的定 K_{vir} 一次调频，若 K_{vir} 设置过大，则如图 5(b)所示，转速将会越限。协调控制根据风速和备用容量的不同，其参数也不同，这提高了 DFIG 参与调频的适应能力，有利于系统频率的稳定性。

(2) 中风速下

中风速的范围为 9.45~11.2 m/s，取 $v_w=10.5$ m/s。图 6 为在相同的负荷变化下的 k 、 β 、 ω_r 、 f 的变化情况。由图 6(a)可以看出， k 基本不变，说明桨距角调节达到理想的效果。由图 6(b)—图 6(d)可知：采用功率控制时，桨距角一直减小，捕捉功率增大，有利于风电机组对电网频率的支撑；而一次调频时，风力机捕捉功率在减载点与最优点之间为一条直线，采用转速控制时^[10]，桨距角先增大后减小，捕

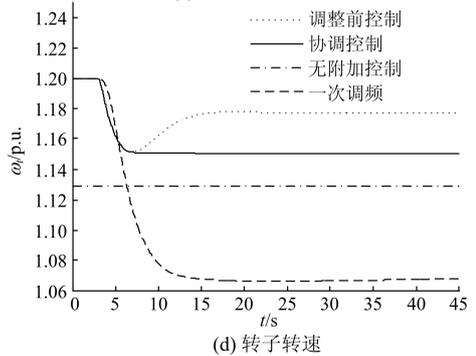
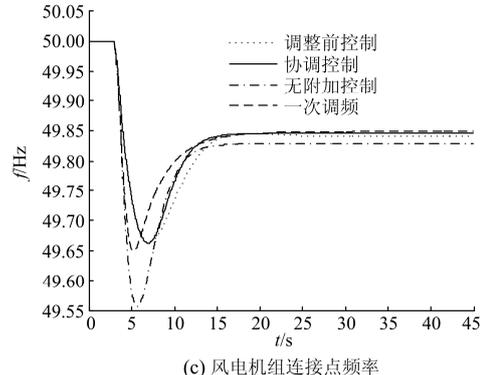


图 6 中风速时不同频率控制策略下比值 k 、桨距角、频率、转速对比

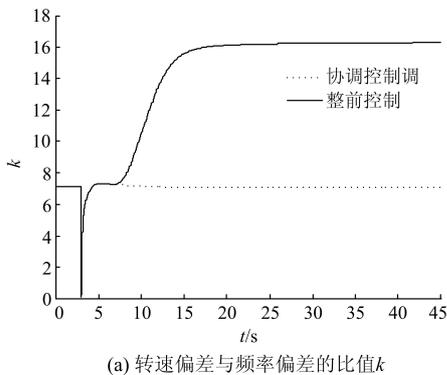
Fig. 6 Comparison of ratio k , pitch angle, frequency and rotor speed with different frequency control strategies at medium wind speed

捉功率损失较大，导致转速偏差较大，不利于 DFIG 参与调频。协调控制始终将转速控制在最优转速范围内，避免了转速越限，同时具有较好的调频效果。

5 结论

本文针对双馈异步发电机在中、低风速下参与调频，提出一种考虑转速限制的惯性和一次调频协调控制策略。仿真结果表明：

(1) 采用本文的控制策略可以使得调频过程中，转速不会低于最优转速，能有效防止转速越限，有利于风电机组本身的稳定。风电机组能够根据频率



(a) 转速偏差与频率偏差的比值 k

跌落最大值释放备用能量, 具有较好的调频效果;

(2) 本文的控制策略中参数随风速和备用容量的不同而不同, 增加了 DFIG 参与调频的适应能力;

(3) 中风速下, 相比于转速控制, 桨距角采用功率控制时, 能够避免桨距角朝期望相反的方向变化, 不会引起捕捉功率损失过大而导致转速越限。

参考文献

- [1] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 638-646.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646.
- [2] 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.
- [3] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [4] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.
CHENG Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33.
- [5] 潘文霞, 全锐, 王飞. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 126-131.
PAN Wenxia, QUAN Rui, WANG Fei. A variable droop control strategy for doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 126-131.
- [6] 李生虎, 朱国伟. 基于有功备用的风电机组一次调频能力及调频效果分析[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(10): 28-33.
LI Shenghu, ZHU Guowei. Capability and effect of primary frequency regulation by wind turbine generators with active power reserve[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(10): 28-33.
- [7] 姚亮, 陈峦, 郑彬, 等. 风-火互补发电系统区域频率控制的策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 46-52.
YAO Liang, CHEN Luan, ZHENG Bin, et al. Research on area frequency control strategy of wind-fire hybrid power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 46-52.
- [8] 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 Chunqing, 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.
- [9] AKBARI M, MADANI S M. Analytical evaluation of control strategies for participation of doubly fed induction generator-based wind farms in power system short-term frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(3): 324-333.
- [10] 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 doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25.
- [11] 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.
- [12] 李生虎. 风力电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [13] YE H, PEI W, QI Z. Analytical modeling of inertial and droop responses from a wind farm for short-term frequency regulation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3414-3423.

收稿日期: 2016-08-22; 修回日期: 2016-09-19

作者简介:

李生虎(1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制和柔性输电; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

王鹏飞(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电系统分析控制; E-mail: wangpengfei@mail.hfut.edu.cn

朱国伟(1990—), 男, 硕士, 研究方向为风电系统分析控制。

(编辑 葛艳娜)