

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007044



采用风机限转矩控制的 微电网一次调频方法

赵熙临, 吴恒

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 对风电主导的微电网一次调频方法进行研究. 首先, 提出双馈感应式风机(DFIG)限转矩惯性控制方法, 使风机能在短时内提取大量转子动能, 对微电网进行频率支撑; 然后, 提出附加桨距角调整的补偿方法, 通过桨距角变化使风机捕获更多机械功率, 减少电网频率二次跌落幅度; 最后, 在 Matlab/Simulink 环境下, 构建微电网模型并进行仿真. 仿真结果表明: 在不同的风速下, 文中方法能提升微电网频率调整的动态响应能力, 有效地减少电网频率二次跌落幅度.

关键词: 微电网; 双馈感应式风机; 限转矩控制; 桨距角控制; 一次调频

中图分类号: TM 315; TM 743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)04-0530-07

Primary Frequency Control Method Using Limited Torque Control for Microgrid

ZHAO Xilin, WU Heng

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Research on the primary frequency control method of microgrid dominated by wind power. Firstly, limited torque inertia control method for doubly fed induction wind turbines (DFIG) is proposed, which enables the wind turbine to extract a large amount of rotor kinetic energy in a short time to support the frequency of the microgrid. Then, compensation method for additional pitch angle adjustment is proposed by changing the pitch angle, the wind turbine can capture more mechanical power and reduce the secondary drop range of the grid frequency. Finally, in the Matlab/Simulink environment, the microgrid model is constructed and simulated. The simulation results show that under different wind speeds, the proposed methods can improve the dynamic response ability of the frequency adjustment of the microgrid, and effectively reduce the secondary drop range of the grid frequency.

Keywords: microgrid; doubly fed induction wind turbines; limited torque control; pitch angle control; primary frequency control

传统能源的短缺使清洁能源得到了广泛的应用, 由小型分布式能源组成的微电网受到众多学者的关注. 微电网作为一个可控的供电单元, 既能与大型电网并网运行, 也能与主系统分离, 进行孤岛运行^[1-2]. 当微电网孤岛运行时, 风电、光伏等分布式发电单元需要参与微电网的频率调整^[3-5].

针对风电主导的微电网频率控制, 国内外学者大多关注于风机的惯性控制. 一般而言, 风机的惯性控制通过附加频率辅助控制回路, 使风机在短时内释放转子动能, 从而补偿系统有功功率的缺失, 具有

收稿日期: 2020-07-24

通信作者: 赵熙临(1969-), 男, 教授, 博士, 主要从事电力系统自动化的研究. E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603127)

支撑频率的作用^[6-7].文献[8]提出下垂控制方法,使风机模拟同步发电机响应频率偏差,提取转子动能,参与系统调频^[9].文献[10]提出虚拟惯性控制方法,通过响应电网的频率偏差率,更快地释放转子动能,在短时内对电网提供频率支撑.文献[11]提出综合惯性控制方法,使风机同时响应频率偏差和频率偏差率两种信号,提高风机对系统的响应能力.然而,传统虚拟惯性控制受转速恢复模块的影响,短时内提取的动能十分有限^[12].因此,一些学者提出限转矩控制方法^[13],当频率偏差触发控制后,将风机的功率瞬间增大,并限制在转矩的极限内.限转矩控制方法使风机对频率的变化做出快速响应,在短时内提取大量动能对电网提供频率支撑,但在转速恢复过程中,存在严重的频率二次跌落问题^[14].为减少风机惯性控制对电网频率二次跌落的影响,众多学者从不同角度进行了分析^[15-17].基于此,本文提出一种采用风机限转矩控制的微电网一次调频方法.

1 微电网模型

DFIG 的简化模型^[18-19],如图1所示.图1中: v 为风速; β 为桨距角; P_t 为风机捕获的机械功率; ω_t 为风力涡轮机的转速; ω_g 为转子转速; C_p 为风能利用系数; T_t 为机械转矩; T_{em} 为电磁转矩; T_{em}^* 为电磁转矩参考值; J_{eq} 为等效转动惯量; n 为变速比; P_{WT} 为风机输出功率; $\omega_{g,max}$ 为转子转速最大值; τ_c 为DFIG的时间常数; τ_p 为桨距角执行器的时间常数;PI为控制器.不失一般性,研究由双馈感应式风机(DFIG)和柴油机组成的微电网调频问题.

1.1 DFIG 模型

风机捕获的机械功率输出取决于桨距角、风速等变量,其空气动力学模型^[15]为

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v^3. \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为空气密度; A 为叶片的扫风面积; λ 为叶尖速比,计算公式为

$$\lambda = R_r \omega_t / v. \quad (2)$$

式(2)中: R_r 为叶片半径.

C_p 由 λ, β 决定,即

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \times \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{21}{\lambda_i}\right) + 0.0068\lambda, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}. \quad (4)$$

风力涡轮机输出的机械转矩 T_t 为

$$T_t = P_t / \omega_t. \quad (5)$$

储存在转子上的动能 E_k ^[11]为

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_t^2. \quad (6)$$

式(6)中: J 为旋转轴系的转动惯量.

当风电机组正常运行时,一般利用全功率变流器和变桨距系统实现最大功率跟踪(MPPT).最大功率跟踪曲线^[14]表达式为

$$P_{opt}^* = \begin{cases} \frac{K_{opt} \omega_0^3}{\omega_0 - \omega_{min}} (\omega_g - \omega_{min}), & \omega_{min} \leq \omega_g < \omega_0, \\ K_{opt} \omega_g^3, & \omega_0 \leq \omega_g \leq \omega_1, \\ \frac{P_{max} - K_{opt} \omega_1^3}{\omega_{max} - \omega_1} (\omega_g - \omega_{max}) + P_{max}, & \omega_1 < \omega_g \leq \omega_{max}, \\ P_{max}, & \omega_g > \omega_{max}. \end{cases} \quad (7)$$

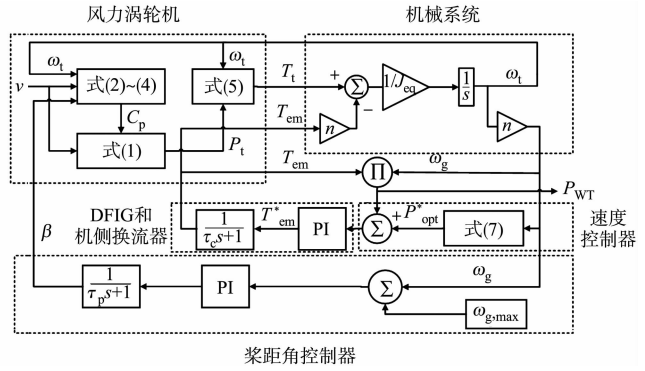


图1 DFIG的简化模型

Fig. 1 Simplified model of DFIG

式(7)中: P_{opt}^* 为最优功率参考值; P_{max} 为风机最大输出功率; K_{opt} 为 MPPT 曲线的比例系数; ω_{min} 为转速最小值; ω_0 为进入 MPPT 区的转速; ω_1 为进入恒转速区的转速; ω_{max} 为转速最大值.

1.2 柴油机模型

当微电网发生较大负荷扰动时,仅凭风机的补偿能力无法满足系统的需求,因此需要柴油机参与微电网的发电控制.根据柴油机的发电特性,可将柴油机等效为一阶惯性环节,并用传递函数的形式来表达,其数学模型^[20],如图 2 所示.图 2 中: T_g 为调速器时间常数; K_g 为柴油机频率因子; ΔP_c 为控制器控制信号; ΔP_g 为柴油机的输出功率变化量.

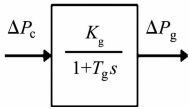


图 2 柴油机的数学模型
Fig. 2 Mathematical model of diesel engine

2 基于限转矩的风机一次调频方法

2.1 风机的惯性控制

风机的惯性控制本质上是根据系统状态实现转子动能的快速吞吐,在短时内对电网频率起到支撑的作用^[11].为了使风机具有同步发电机的惯量特性,传统虚拟惯性控制在风电机组的转子侧变流器附加控制环节,从而改变风电机组的有功功率输出^[10].由于传统虚拟惯性控制在短时内可提供的惯性较小,为适应更大的负荷波动,探讨短时内能够提供更多惯性的控制方法具有现实意义.

限转矩控制由频率偏差触发,使风电机组的输出功率参考值迅速提高至当前时刻转速对应的转矩极限功率,此后风机有功功率输出随转速变化以斜坡方式逐渐减小.由于限转矩控制响应速度比传统虚拟惯性控制更快,且短时内能够提供的惯性更多,故发生负荷扰动时,相较于传统虚拟惯性控制,限转矩控制可以显著地提高系统频率的最低点^[14].

2.2 限转矩控制的原理

当发生负荷扰动时,限转矩控制的响应过程可以分为动能提取和转速恢复两个阶段.整个响应过程中,限转矩控制的运行特性图^[13],如图 3 所示.图 3 中: P_{ref} 为电磁功率参考值;p. u. 为标么值;点 O 为 DFIG 停机时的状态;点 A~E 分别为 DFIG 运行于 MPPT 模式、转矩极限、机械功率与电磁功率平衡、减载模式、重新运行于 MPPT 模式的状态; $P_{T,\text{lim}}$ 为转矩极限功率; P_{MPPT} 为 MPPT 模式下的电磁功率; P_A, P_D 分别为点 A, D 的电磁功率; ω_C, ω_E 分别为点 C, E 的转子转速; ΔP_{de} 为电磁功率减载量.

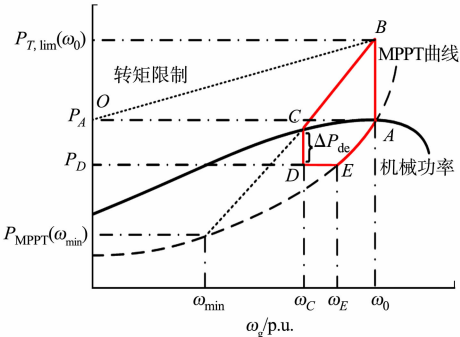


图 3 限转矩控制的运行特性图
Fig. 3 Operational characteristics of figure on torque limit control

在动能提取阶段(曲线 A-B-C),当风机正常运行时,工作点(点 A)位于 MPPT 曲线上,此时,电磁功率与机械功率相等;当发生负荷扰动时,频率偏差超过死区,DFIG 将电磁功率参考值提升至点 B,此时,增发电磁功率值取决于该时刻的风速(OB 对应不同转速下转矩极限的有功功率参考值),该阶段 DFIG 电磁功率 P_1 为

$$P_1 = \frac{P_{T,\text{lim}}(\omega_0) - P_{\text{MPPT}}(\omega_{\text{min}})}{\omega_0 - \omega_{\text{min}}}(\omega_g - \omega_{\text{min}}) + P_{\text{MPPT}}(\omega_{\text{min}}). \tag{8}$$

为了避免出现转速过小导致风机宕机的情况,默认 ω_{min} 为 0.67 p. u.,转速变化率 $d\omega_r/dt$ 的最大值为 0.45 p. u. \cdot s⁻¹.

在动能提取阶段,电磁功率与机械功率的差值 ΔP 均大于 0,说明该过程中转子处于减速状态;转速变化率 $d\omega_r/dt$ 随 ΔP 的减小而减小,当点 C 变为 0 时,转速达到整个响应阶段的最小值,转子动能释放完毕.在转速恢复阶段(曲线 C-D-E-A),为了使转速尽快恢复,调整电磁转矩的参考值,使其略低于机械功率.减载后的 DFIG 从点 C 运行至点 D,此时的电磁功率 P_2 为

$$P_2 = P_C - \Delta P_{\text{de}}. \tag{9}$$

ΔP_{de} 使风机功率出现骤降,导致电网频率发生二次跌落.随后电磁功率参考值在 P_D 维持一段时间,直至转速重新回到 MPPT 曲线上的点 E,其电磁功率 P_3 为

$$P_3 = P_{\text{MPPT}} = k_g \omega_r^3. \tag{10}$$

式(10)中: k_g 为最大功率追踪系数.

此时,电磁功率仍小于机械功率,转子将会加速,并沿着 MPPT 曲线重新运行至点 A,完成整个转速恢复的过程.

综上可知,在动能提取阶段,限转矩控制能够快速响应系统频率的变化,提供大量的转子动能;在转速恢复阶段,为了使转子加速恢复,对风机进行一定程度的减载会加剧电网频率的二次跌落.

2.3 基于桨距角补偿的限转矩控制

由式(1)~(4)可知:当桨距角减少时,风机将捕获更多的机械功率,这部分机械功率可用于转速恢复^[11,18]. 根据系统频率偏差调整桨距角的大小,可使风机从源头上捕获更多的机械功率,补偿限转矩恢复过程中由电磁功率减载量 ΔP_{de} 造成的风机有功功率缺失,缓解电网频率二次跌落. 风机的运行曲线,如图 4 所示. 由图 4 可知:当发生负荷扰动时,调整桨距角可使工作点由点 B 运行至点 A,输出功率可从 $P_{t,B}$ 提升至 $P_{t,A}$,转子转速由 ω_B 提升至 ω_A . 该过程提升的机械功率 ΔP_β 为

$$\Delta P_\beta = P_{t,A} - P_{t,B}. \tag{11}$$

该过程捕获的机械功率一部分是为了补偿风机的功率跌落 P_{C-D} (曲线 C-D),缓解 ΔP_{de} 给系统带来的二次跌落,另一部分则是为了提供加速转子恢复的功率 P_{D-A} (曲线 D-A),即

$$\Delta P_\beta = P_{C-D} + P_{D-A}. \tag{12}$$

根据以上分析,构建基于桨距角补偿的风机限转矩控制框图,如图 5 所示. 图 5 中: Δf 为频率偏差; K_{pa} 为桨距角频率特性斜率; $\Delta\beta$ 为桨距角控制信号; β^* 为桨距角的跟踪信号; β_0 为初始桨距角.

桨距角频率控制策略通过附加的桨距角控制信号 $\Delta\beta$,使桨距角的跟踪信号 β^* 能够响应 Δf 的变化. 同时,为了留出用于调频的裕度,一般将 β_0 设置为正值,使风机运行于减载状态.

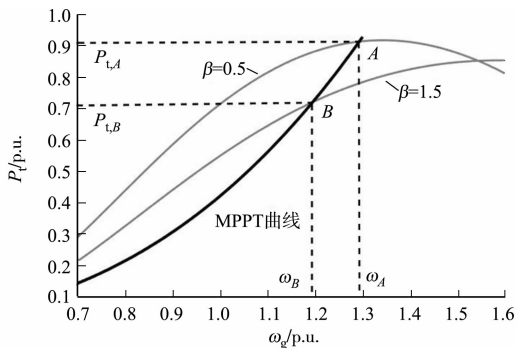


图 4 风机的运行曲线

Fig. 4 Operation curves of wind turbine

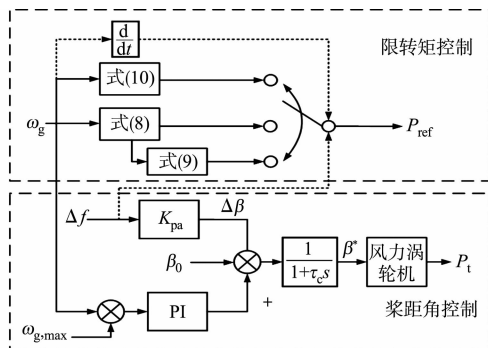


图 5 基于桨距角补偿的风机限转矩控制框图

Fig. 5 Block diagram of limited torque control based on pitch angle control for wind turbine

将基于桨距角控制的二次跌落补偿方法运用于限转矩风机的一次调频中. 一方面,可以发挥限转矩控制在负荷扰动响应初期的优势,即转子在短时内释放出大量动能,有效地提高频率的最低点,为微电网在短时内提供频率支撑;另一方面,通过调整桨距角补偿风机功率跌落和转速恢复所需能量,不仅减少了频率二次跌落,而且可以使得转速快速地恢复至稳定状态.

3 仿真分析

3.1 仿真系统

在 Matlab/Simulink 环境下构建微电网模型,如图 6 所示. 风机采用 Vestas 型 5 MW 双馈感应式发电机;柴油机组的额定输出功率为 2 MW;桨距角初始角度为 1.1° . 在不同风速下进行仿真实验,验证文中方法的有效性.

风机的参数,如表 1 所示. 表 1 中: P_{base} 为基本功率; n_p 为发电机极对数; K_p 为功率系数; $\beta_{\text{max}}, \beta_{\text{min}}$ 分

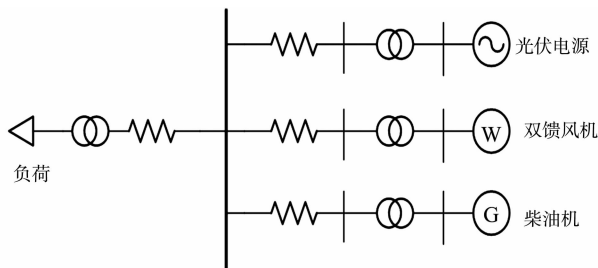


图 6 微电网模型

Fig. 6 Model of microgrid

别为桨距角最大值和最小值; T_w 为滤波器时间常数; $d\beta/dt$ 为桨距角最大调节速率。

柴油机的参数,如表 2 所示.表 2 中: T_g 为调速器时间常数; ΔP_G 为柴油机组功率偏差; ΔP_L 为负荷扰动; K_L 为负荷阻尼系数; H 为发电机转动惯量; K_G 为柴油机频率因子。

表 1 风机的参数

Tab. 1 Parameters of DFIG

参数	取值	参数	取值	参数	取值
P_{base}/MW	5	A/m^2	11 300	n_p	2
$K_p/m \cdot s^{-3}$	1.901×10^{-3}	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	1.225	$\beta_{max}/(^{\circ})$	30
R_r/m	58.5	T_w/s	10	$\beta_{min}/(^{\circ})$	0
$\frac{d\beta}{dt}/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	0.5	τ_p/s	0.3		

表 2 柴油机的参数

Tab. 2 Parameters of diesel engine

参数	取值	参数	取值	参数	取值
$\Delta f/Hz$	—	T_g/s	0.1	$\Delta P_G/p. u.$	—
$K_G/p. u. \cdot Hz^{-1}$	20	$\Delta P_L/p. u.$	—	$K_L/Hz \cdot p. u.^{-1}$	2
$H/kg \cdot m^2$	6				

3.2 不同风速下微电网频率响应分析

在限转矩控制过程中,由于不同风速对应的转矩极限使风机的输出功率不同,造成的二次跌落影响也不相同.因此,为了验证不同风速下文中方法的有效性,在 200 s 时,增加 0.1 p. u. 的负荷波动,对不同风速下微电网一次频率响应进行分析。

当风速为 $9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,将文中方法与传统虚拟惯性与桨距角结合控制、限转矩控制、传统虚拟惯性控制等方法进行对比分析,4 种控制方法的仿真结果,如图 7 所示。

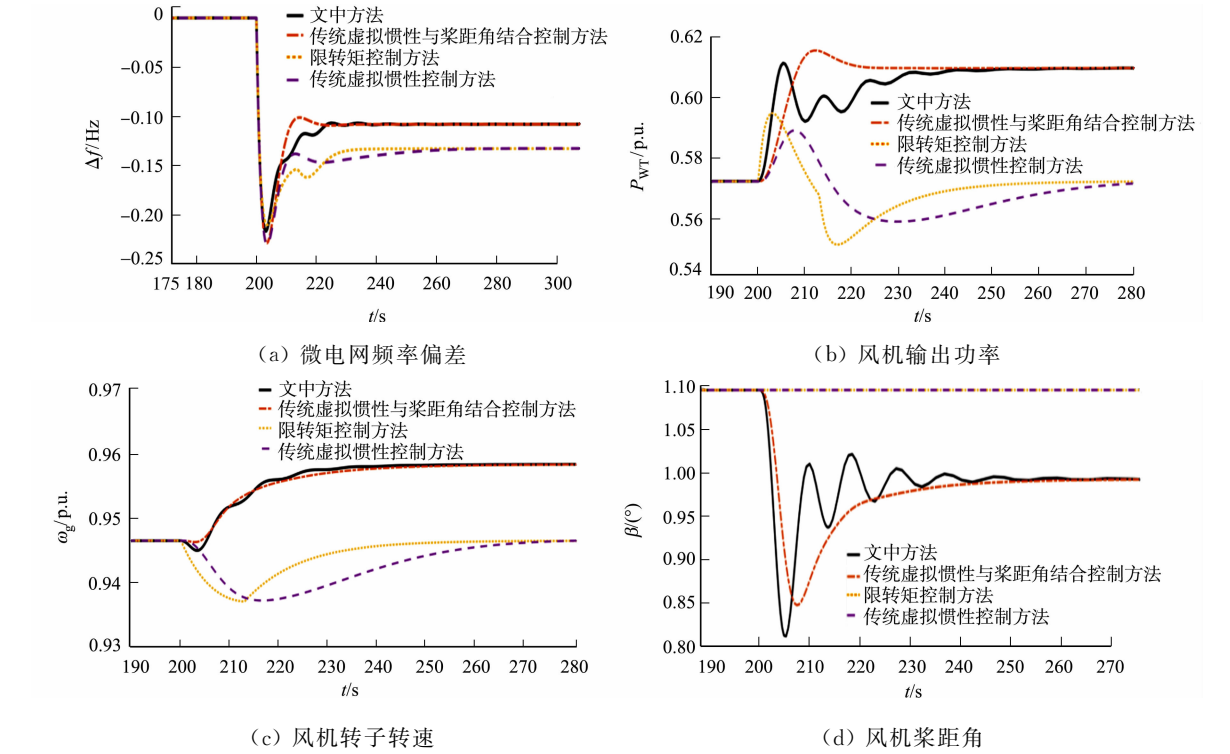


图 7 4 种控制方法的仿真结果($v=9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Simulation results of four control methods ($v=9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

由图 7(a)可知:当负荷突变时,相较于传统虚拟惯性与桨距角结合控制方法,文中方法的暂态频率最低点提高了 0.011 Hz,能够有效地抑制转速恢复过程中的频率二次跌落,同时,稳态频率误差提高了一 0.107 Hz;相较于虚拟惯性控制方法,文中方法的响应速度更快,能够更好地提高频率最低点。

由图 7(b)可知:在响应初期,相较于传统虚拟惯性控制方法、传统虚拟惯性与桨距角结合控制方法,文中方法的曲线斜率更大,说明文中方法在短时可以提取更大的惯性以弥补系统的功率缺失;相较于限转矩控制方法,文中方法在转速恢复阶段避免了风机功率大幅跌落,减小了频率的二次跌落。

由图 7(c),(d)可知:相较于虚拟惯性控制方法,文中方法在响应初期能够更快地提取转子动能,在转速恢复阶段,由于桨距角减小使机械功率高于电磁功率,转子能够加速恢复至 MPPT 状态。

当风速为 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (高风速)时,仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知:在风速增大的情况下,相较于传统虚拟惯性与桨距角结合控制方法,文中方法能够在短时间内提供更多的能量参与频率支撑,可将暂态频率最低点提高 0.011 Hz ,通过减小桨距角,捕获更多机械功率,抑制频率二次跌落,并将稳态误差提高 0.047 Hz . 因此,在不同风速下,文中方法都能够有效地提升风电参与微电网一次调频的性能。

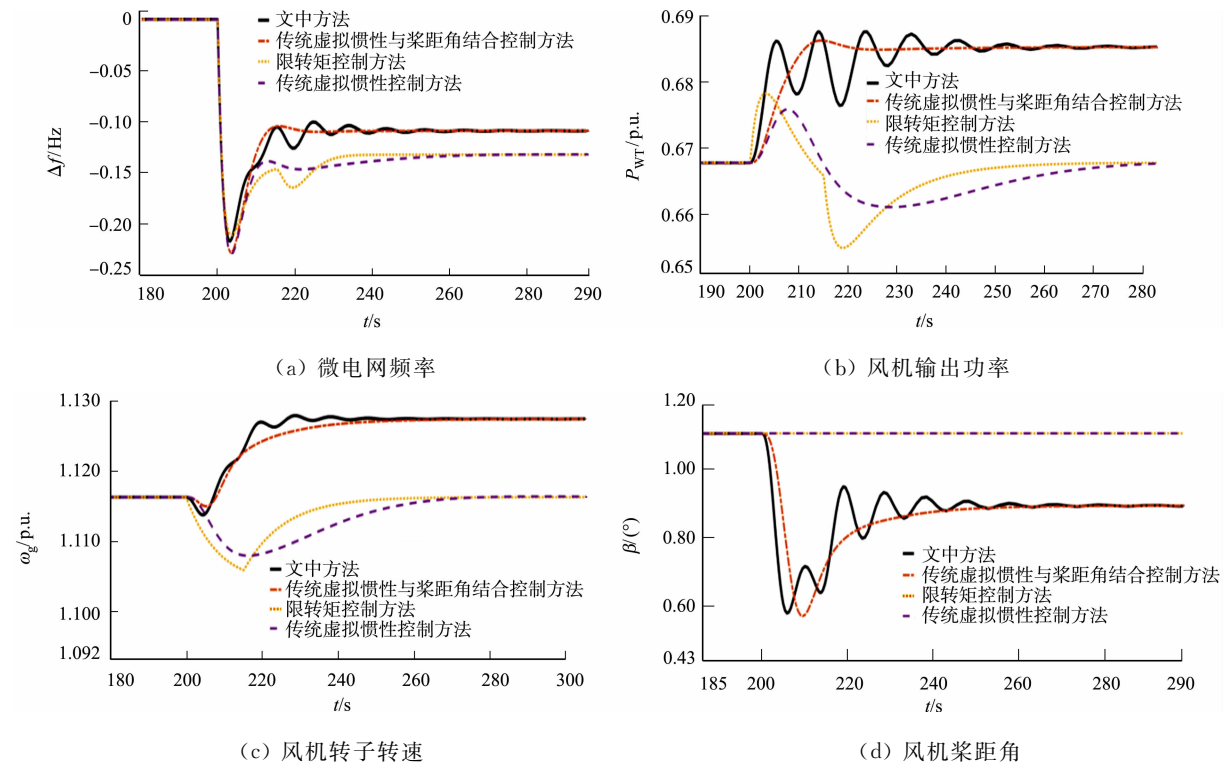


图 8 4 种控制方法的仿真结果($v=11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Simulation results of four control methods ($v=11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

4 结论

1) 限转矩控制方法可以使风机在短时可以提取更多的转子动能,为系统提供频率支撑,提高频率最低点和微电网系统频率调整的动态响应能力。

2) 附加的桨距角控制可以使风机在必要时捕获更多的机械功率,一方面,减少转速恢复过程中的电网频率二次跌落;另一方面,能够为微电网提供一定的功率支撑,减小微电网系统的稳态频率误差。

参考文献:

[1] 黄金鑫,李华强,陆杨.基于蒙特卡洛模拟和频谱分析法的孤岛微电网储能容量配置[J].电网技术,2020,44(5): 1622-1629. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2216.

[2] MOHAMMADI F. Integration of AC/DC microgrids into power grids[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3313-3324. DOI:10.3390/su12083313.

[3] 边晓燕,姜莹,李东东,等.基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J].电机与控制应用, 2017, 44(9): 118-124. DOI:10.3969/j.issn.1673-6540.2017.09.022.

[4] SIMON E, KRZYSZTOF R. Influence of PLL on synthetic inertia of DFIG wind turbine in droop controlled micro-

- grids[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(18): 5314-5319. DOI: 10. 1049/JOE. 2018. 9316.
- [5] ABDULHAMEED A, AHMAD B, HASSAN E. Primary frequency response enhancement for future low inertia power systems using hybrid control technique[J]. Energies, 2018, 11(4): 699. DOI: 10. 3390/en11040699.
- [6] 刘彬彬, 杨健维, 廖凯, 等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 17-22. DOI: 10. 7500/AEPS20150930009.
- [7] LIU Juelin, YANG Zhifang, YU Juan, *et al.* Coordinated control parameter setting of DFIG wind farms with virtual inertia control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 122(12): 985-997. DOI: 10. 1016/j. ijepes. 2020. 106167.
- [8] LIU Yancheng, ZHUANG Xuzhou, ZHANG Qinjin, *et al.* A novel droop control method based on virtual frequency in DC microgrid[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119(7): 963-974. DOI: 10. 1016/j. ijepes. 2020. 105946.
- [9] BAO Yuqing, LI Yang. On deloading control strategies of wind generators for system frequency regulation[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(4): 623-635. DOI: 10. 1002/etep. 1855.
- [10] 张志恒, 王毅, 李和明, 等. 基于虚拟惯量的双馈风电机组惯性控制方式研究[J]. 现代电力, 2013, 30(6): 47-50. DOI: 10. 19725/j. cnki. 1007-2322. 2013. 06. 010.
- [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. DOI: 10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 2014. 27. 018.
- [12] 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. DOI: 10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 2014. 25. 013.
- [13] KANG M, KIM K, MULJADI E, *et al.* Frequency control support of a doubly-fed induction generator based on the torque limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4574-4583. DOI: 10. 1109/TPWRS. 2015. 2514240.
- [14] 赵晶晶, 李敏, 何欣芹. 基于限转矩控制的风储联合调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4982-4990. DOI: 10. 19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 181472.
- [15] 乔颖, 郭晓茜, 鲁宗相, 等. 考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 807-815. DOI: 10. 13335/j. 1000-3673. pst. 2019. 0467.
- [16] 刘瑞. 双馈风机参与系统调频的二次跌落优化控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019. DOI: 10. 27140/d. cnki. ghbbu. 2019. 001213.
- [17] 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. DOI: 10. 13335/j. 1000-3673. pst. 2015. 09. 002.
- [18] OCHOA D, MARTINEZ S. Frequency dependent strategy for mitigating wind power fluctuations of a doubly-fed induction generator wind turbine based on virtual inertia control and blade pitch angle regulation[J]. Renewable Energy, 2018, 128: 108-124. DOI: 10. 1016/j. renene. 2018. 05. 047.
- [19] ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LIN Guojie, *et al.* Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants[J]. Renewable Power Generation Iet, 2012, 6(1): 38-47. DOI: 10. 1049/iet-rpg. 2010. 0208.
- [20] 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. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6753. 2015. 05. 008.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)