

9-14-2020

## Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doublyfed induction generator based on the rotor kinetic energy control

Xu ZHNAG

*School of Electrical and Electronic engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*

Xiaobing ZHA

*School of Electrical and Electronic engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*

Shuai YUE

*School of Electrical and Electronic engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

ZHNAG, Xu; ZHA, Xiaobing; and YUE, Shuai (2020) "Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doublyfed induction generator based on the rotor kinetic energy control," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 19.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.019

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/19>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# 基于转子动能控制的 DFIG 调频能力分析 分析与调频方案

张 旭, 查效兵, 岳 帅

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘 要:**电力系统中风电渗透率不断提高, 弃风现象却越来越严重, 风电缺乏火电和水电的调峰调频能力是制约风电利用效率的主要原因之一。在此背景下, 首先分析风机矢量控制和转子动能控制策略原理、转子动能控制策略的作用过程; 并基于风机运行区域和转子动能控制适用范围的分析, 提出一种与 DFIG 调频控制能力相适应的调频方案。该方案能够根据风机运行状况, 合理控制 DFIG 参与系统调频。同时根据风速调整控制参数, 能够在不增加额外投资的条件下有效地发挥风电的调频能力, 避免了风机过度调频带来的危害, 提高了风电运行的效益。仿真表明该方案能够充分发挥 DFIG 自身的调频能力。

**关 键 词:**频率调整; 转子动能控制; 双馈风力发电机; 运行区域; 调频能力

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.019 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2020)03-0141-07

## Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly-fed induction generator based on the rotor kinetic energy control

ZHNAG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai

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

**Abstract:** The wind power penetration of power system is increasing rapidly, while the wind abandoning phenomenon is getting more serious. The lack of thermal power and hydropower's peaking and frequency regulation ability is one of the main reasons to restrict the utilization efficiency of wind power. Under this circumstance, the wind generator vector control, rotor kinetic energy control strategy principle and rotor kinetic energy control strategy process are analyzed in this paper. Firstly, based on the analysis of the range of wind generator operating area and rotor kinetic energy control, a frequency regulation scheme is proposed to match the wind generator's frequency control capability. According to the running condition, DFIGs are controlled reasonably to participate in system frequency regulation. Control parameters could be optimized by the wind speed, which can effectively give full play to the frequency regulation ability of wind power without any additional investment, avoiding the risk of wind generators excessive participating in frequency regulation and improving the operational efficiency of wind power. Finally, the validity of the scheme is verified by a simulation in DigSILENT/PowerFactory.

**Key words:** frequency regulation; rotor kinetic energy control; DFIG; running area; frequency regulation capability

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 能源基金会(美国)(G-1403-20188)

通信作者: 张 旭(1975-), 男, 博士, 讲师, 主要从事风电参与电力系统调频及电力系统故障诊断研究; E-mail: zxtemper@163.com

中国风电装机容量不断增加,但电网中的弃风现象却日益严重。风电缺乏火电、水电的调峰调频能力是制约风电利用效率的一个主要原因<sup>[1-2]</sup>。

为使风电具有火电、水电一样的调频能力,大量文献对风电的调频问题做了相关研究。文献[3]指出大量风电以变流器并网的方式并网使得风机出力与系统频率解耦,风机无法响应系统频率变化;文献[4]指出变速恒频风电机组为追求最大风力利用率而失去了调频能力;文献[5-6]和文献[7-9]分别通过风机转子超速控制和桨距角控制降低风能利用率,使风机运行于次优功率点,留出有功备用用于一次调频,降额运行虽然能够提高风机的调频能力,但是一定程度上降低了风电利用效率,不利于风电场的经济运行;文献[10-12]提出利用储能系统快速吸收和释放能量的能力去辅助风电参与系统调频,附加储能系统虽然能够很好地改善系统频率响应特性,但昂贵的储能设备费用难以满足大规模风电并网的需求;文献[13-15]提出在双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)内部有功控制环节中附加额外的有功参考信号,实现风机转子动能与电能的相互转化,以增强系统抗负荷扰动能力。然而这些控制策略的作用效果与风机的运行状态密切相关,调频能力随风速的变化而变化,同时过度参与调频会起到相反的效果。

为此,该文基于对双馈风力发电机矢量控制、转子动能控制策略原理、转子动能控制策略适用范围的分析,提出一种与风机调频控制能力相适应的调频方案。该方案能够有效地发挥风电的调频能力,避免风机过度调频带来的危害。同时,该方案不需要增加额外的投资,提高了风电运行的效益。最后在 DIgSILENT/PowerFactory 中,仿真验证了该方案的有效性和合理性。

## 1 DFIG 矢量控制技术

矢量控制技术是基于磁场定向原理,通常选取同步旋转坐标系,通过坐标变化实现电磁转矩和无功功率的解耦控制。DFIG 中常用的矢量控制技术主要有:基于定子磁链定向的矢量控制和基于定子

电压定向的矢量控制。经过同步旋转  $dq$  坐标变换后,DFIG 的磁链、电压、功率方程<sup>[16]</sup>为

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \\ U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_1 \psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_s \psi_r \\ P_s = -\operatorname{Re} \left[ \frac{3}{2} U_s \hat{I}_s \right] \\ Q_s = -\operatorname{Im} \left[ \frac{3}{2} U_s \hat{I}_s \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\psi_s$ 、 $\psi_r$  表示 DFIG 的定、转子磁链矢量; $U_s$ 、 $U_r$  表示定、转子电压矢量; $I_s$ 、 $I_r$  表示定、转子电流矢量; $P_s$ 、 $Q_s$  表示定子有功、无功功率。 $\omega_1$  表示旋转转速, $\omega_s$  表示转差电角速度。忽略定子绕组,则  $R_s = 0$ 。

采用定子磁链定向时,同步旋转坐标的  $d$  轴定向为定子磁链,有:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = |\psi_s| = \psi_s \\ \psi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3L_m}{2L_s} \omega_1 \psi_s i_{rq} \\ Q_s = \frac{3\omega_1 \psi_s L_m}{2L_s} \left( i_{rd} - \frac{\psi_s}{L_m} \right) \end{cases} \quad (3)$$

采用定子电压定向时,有:

$$\begin{cases} u_{sd} = |U_s| = U_s = -\omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = 0 = \omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)、(4)可得:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3L_m}{2L_s} U_s i_{rd} \\ Q_s = -\frac{3U_s}{2\omega_1 L_s} (U_s + \omega_1 L_m i_{rq}) \end{cases} \quad (5)$$

经过以上推导可认为,通过  $dq$  坐标变换,可以实现 DFIG 有功与无功的近似解耦控制,即通过控制转子电流  $d$  轴分量控制有功功率;通过控制转子电流  $q$  轴控制无功功率。系统频率变化与有功功率的变化密切相关,采取一定的控制方式使 DFIG 有功出力与系统频率建立一定的关系,可实现 DFIG 响应系统频率变化,维持系统频率稳定。

## 2 转子动能控制

### 2.1 控制原理

转子动能控制的原理是利用风机转子中蕴含的动能,当系统频率降低的时候,控制转子减速释放动能支持系统频率;当系统频率上升的时候,控制转子加速吸收能量抑制系统频率上升。

风机转子总蕴含的动能:

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

式中  $J$  为风机的机械转动惯量; $\omega$  为风机转速。风机转速变化前后,动能与电磁功率的转换能量为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (7)$$

式中  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为控制前后转子的转速。

通常转子动能控制是在 DFIG 有功功率控制回路中同时引入系统的频率偏差和变化率,从而使风机能够根据系统的变化实时改变风机的出力,参与系统频率调整。其有功参考值可表示为

$$\Delta P = -K_{df} \frac{df}{dt} - K_{pf} \Delta f \quad (8)$$

式中  $K_{df}$  为惯性控制系数; $K_{pf}$  为下垂控制系数。转子动能控制环节如下图 1 所示。

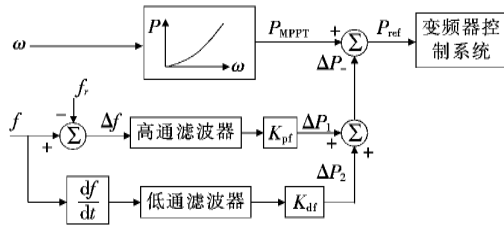


图 1 转子动能控制

Figure 1 Block diagram of rotor kinetic energy control

结合系统方程,可得系统的功-频关系:

$$(2H + K_{df}) \frac{df}{dt} = P_w - P_E - (D + K_{pf}) \Delta f \quad (9)$$

式中  $H$  为同步发电机的惯性常数; $P_w$  为风机的输入机械转矩; $P_E$  为系统输出电磁转矩; $D$  为系统阻尼系数。 $K_{df}$  表征着风机的转动惯量; $K_{pf}$  表征着风机部分所能提供的阻尼系数。设置合适的  $K_{df}$  和  $K_{pf}$ ,能够有效地改善风机的动态频率响应能力,为

系统提供暂态频率支撑。

### 2.2 调频过程分析

如图 2 所示,风机在未发生负荷扰动时的出力为  $P_0$ ,转速为  $\omega_0$ 。假设系统在  $t_0$  时刻发生扰动(以负荷增加例);若此时风机未附加转子动能控制策略,此时风机的  $P_0$  和转速  $\omega_0$  都会保持不变,见虚直线  $AD$  和  $GI$ ;若此时风机附加转子动能控制策略,则风机系统会响应系统频率的变化。此时转子转速会减小,同时出力  $P_m(t)$  增大;但与此同时转速减小偏离最佳转速,使得风机的风能利用系数减小,风机的输入功率  $P_w(t)$  减小。风机输出功率  $P_m(t)$  变化轨迹为实线  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  所示,相应的输入功率  $P_w(t)$  变化轨迹为  $A \rightarrow E \rightarrow D$  所示,其中  $C$  点与  $E$  点重合。此过程中,风机先经过  $\Delta t_1 (t_0 \rightarrow t_1)$  时间减速释放转子动能,然后经过  $\Delta t_2 (t_1 \rightarrow t_2)$  时间吸收能量恢复原来的转速。 $S_{ABC}$  为风机转子减速过程中释放的转子动能, $S_{CD}$  为转子转速恢复过程中转子吸收的能量, $S_{ABC} = S_{CD}$ ,其中:

$$\begin{cases} S_{ABC} = \int_{t_0}^{t_1} (P_m(t) - P_w(t)) \\ S_{CD} = \int_{t_1}^{t_2} (P_w(t) - P_m(t)) \end{cases} \quad (10)$$

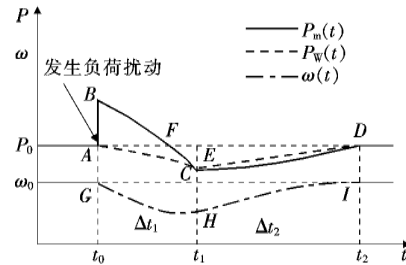


图 2 转子动能控制响应原理图

Figure 2 Response diagram of rotor kinetic energy control

风机实际过程中能够作为系统频率提供支撑的有效动能为  $S_{ABF}$ ,  $S_{ABF}$  越大,风电机组对系统调频的贡献越大。

## 3 基于转子动能调频能力分析的调频方案

### 3.1 转子动能调频能力分析

正常情况下,风机运行区域分为启动区(AB段)、最大功率跟踪区(BC段)、恒转速区(CD段)、

恒功率区(DE 段),如图 3 所示,实际运行中可根据风机设备参数得到分区。启动区:转子转速很小,无法参与系统调频;最大功率跟踪区(BC 段):转速会根据风速进行实时调整以保证风机具有最大的风能利用系数,此时风速为最佳风速;恒转速区和恒功率区:风机的转速稳定在最大值。转速与风速的关系如图 3 所示。

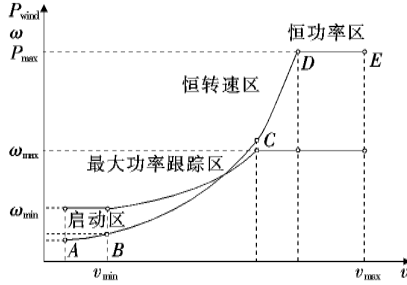


图 3 风机运行区域

Figure 3 DFIG running area

由转子动能的控制原理可知,转子动能的调频能力受制于风机的转速极限。根据风机在不同运行区域的运行状态,可得转子动能控制在风机不同运行区域的调频能力,如表 1 所示。

表 1 风机转子动能控制策略调频能力分析

Table 1 Frequency regulation analysis of DFIG's kinetic energy control strategy

| 风机运行   | 启动区  | 最大功率跟踪区       | 恒转速区     | 恒功率区     |
|--------|------|---------------|----------|----------|
| 转速     | 定值   | 与风速有关         | 最大值      | 最大值      |
| 转速变化范围 | 不能变化 | 可增大也可减小       | 只能减小     | 只能减小     |
| 调频能力   | 没有变化 | 能够响应负荷增大和负荷减小 | 只能响应负荷增大 | 只能响应负荷增大 |

### 3.2 调频方案

基于以上转子动能控制调频能力的分析,提出图 4 所示的调频控制方案,以充分发挥风场内部风机的调频潜能,同时避免风机过度参与调频而导致系统频率的降低。通过外部测量模块获得风速,确定风机的运行区域。风机的运行状态和系统频率偏差输入判定模块,进行判定:若风机处于启动区,不参与调频;若风机处于最大功率跟踪区域,激活转子动能控制模块参与系统调频;若风机处于恒功率区和恒转速区,此时如果系统频率偏差  $\Delta f > 0$  (负荷

减小),不参与调频,特别当  $\Delta f > 0.5$  Hz(负荷下降严重)时,使部分风机切机;如果  $\Delta f < 0$  (负荷增大)时,激活转子动能控制模块参与系统调频。为避免系统中的瞬时波动对风机的影响,加入死区,抑制干扰。

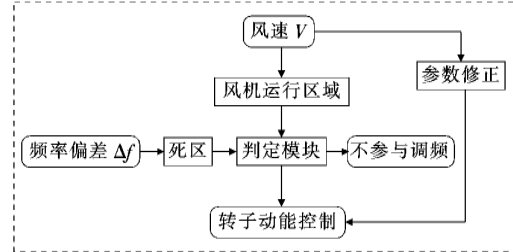


图 4 基于转子动能控制的调频方案

Figure 4 Frequency regulation scheme based on rotor kinetic energy control

考虑到风机转子动能与转速密切相关,在 MPPT 的作用下,转子动能控制主要依赖于风机运行的风速,为此需要根据风速优化控制参数以充分发挥风机的调频能力。在转子动能控制的功率环中增设一个与风速相关的修正系数:

$$K = \begin{cases} \frac{V}{V_n}, & V_{\min} < V < V_n \\ 1, & V_n \leq V \leq V_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $V$  表示风机运行的实际风速; $V_n$  表示风机运行的额定风速; $V_{\max}$  表示风机运行的最大风速。则有功参考值变为

$$\Delta P = -K(K_{df} \frac{df}{dt} + K_{pf} \Delta f) \quad (12)$$

## 4 仿真验证

仿真采用的系统如图 5 所示<sup>[6,17]</sup>。该系统含有 11 个节点,风场经过变压器并入  $B_6$  号母线上,风电场  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  的容量均为 800 MW。系统负荷  $L_1$ 、 $L_2$  大小分别为 1 600、967 MW; $L_0$  为扰动负荷。设

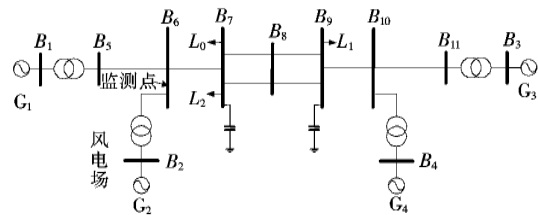


图 5 仿真系统

Figure 5 Simulation system diagram

定系统在 70 s 时刻系统负荷发生扰动,扰动大小为 100 MW。考虑到在中国电网中,大规模风电多以集群的方式接入电网,一个风电集群包含多个风电场。为更好地反映实际情况,该文中的仿真对象为一个含有 10 个 50 MW 风电场的风电集群,将其等效为一个 500 MW 的风电场  $G_2$ 。

当风速为 8 m/s(最大功率跟踪区),负荷下降 100 MW 时,风机的响应特性如图 6 所示。在未发生负荷扰动时,系统频率为 50 Hz,风机转速为

0.932 7 p. u., 风机总的出力为 197.8 MW。当负荷突然下降 100 MW 时:若风机未配备转子动能控制环节,风机的转速和功率会发生微小的波动,不能参与系统频率调整,此时系统频率波动的最高值为 50.143 11 Hz;若风机配备了转子动能控制环节,风机会增加转速,减小出力响应系统频率的变化,此时系统频率波动的最高值为 50.118 01 Hz,减小了 0.025 10 Hz。

图 7 给出了不同风速条件下负荷上升 100 MW

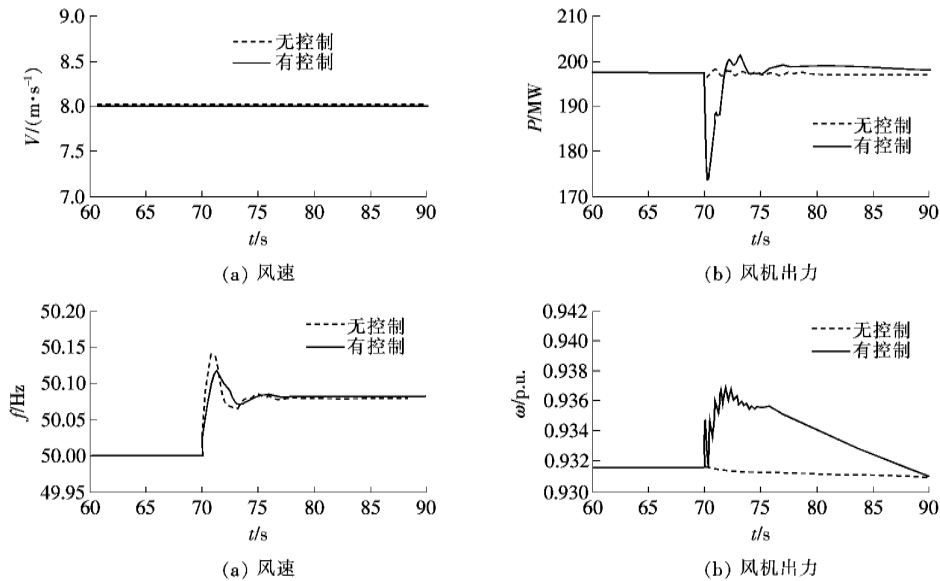


图 6 风速 8 m/s 负荷下降时风机的响应特性

Figure 6 DFIG's response characteristics when wind speed is 8m/s and load drops

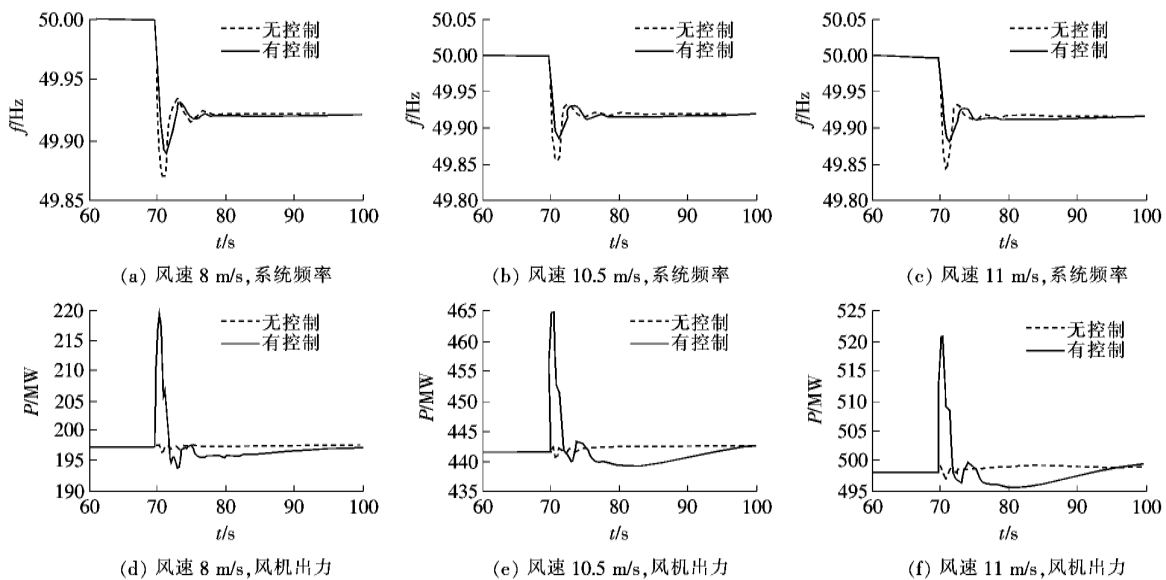


图 7 不同风速条件,负荷上升时转子动能控制的作用效果

Figure 7 Effects of rotor kinetic energy control under different wind speed conditions when the load rises

时,转子动能控制作用下系统频率和风机出力的变化情况。图中显示风速为 8 m/s(最大功率跟踪区)、10.5 m/s(恒转速区)、11 m/s(恒功率区)时,转子动能控制都能够有效地抑制频率波动,减小最大频率偏差。对最大频率偏差的贡献如表 2 所示。

表 2 不同风速条件下转子动能控制作用效果

Table 2 Effects of rotor kinetic energy control under different wind speed conditions

| 风速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 无控制时最<br>低点频率/Hz | 有控制时最<br>低点频率/Hz | 最大频率偏<br>差减小值/Hz |
|---|------------------|------------------|------------------|
| 8.0                                       | 49.868 33        | 49.887 19        | 0.018 86         |
| 10.5                                      | 49.849 66        | 49.882 79        | 0.033 13         |
| 11.0                                      | 49.842 98        | 49.879 31        | 0.036 33         |

数据显示,当风速越大时,风机对系统频率的贡献越大。这是因为风速越大时,风机转速越大,可利用的转子动能越大,对系统频率贡献越大。但是转子动能控制对系统稳态频率偏差的贡献几乎为零,这是因为在风速不变的情况下风机转速变化后会恢复到原来的值,转子吸收和释放的能量相等,转速恢复后风机的出力不变,对稳态频率几乎没有贡献。转子动能控制依赖于转子转速的变化,由于转子转速变化较快,故该方法的响应速度也比较快,但是转子转速改变后,风机就失去了调频能力,持续时间较短。

以上仿真结果表明了转子动能控制策略能够提高系统惯性,改善系统频率特性,同时也验证了根据风机在不同运行区域的调频能力提出的调频方案能够有效地发挥风机自身的调频潜力。

## 5 结语

该文基于对转子动能控制策略的原理、作用过程、调频能力的分析,提出了与转子动能控制策略调节范围适应的调频方案,通过仿真验证了该方案的有效性,并得出以下结论:

1)风机装设转子动能控制环节后,可减小负荷扰动引起的频率波动,减小最大频率偏差,提高系统的惯性响应能力;

2)转子动能控制策略的作用效果与风机运行的转速密切相关,在不同的运行区域调频差异性较大;

3)转速越大时,转子动能控制策略的作用越强,但是受到转子转速极限制约,在负荷下降的时候,作用效果较差;

4)随着风机制造和安装技术的不断发展,风电机组单机容量的不断增加,转子半径不断增大,风机转子中的旋转动能会得到提高,转子动能控制策略的作用效果将在风机参与系统过程中发挥巨大作用;

5)该调频控制方案,能够根据风速修正下垂控制系数和惯性控制系数,充分发挥风机的调频能力的同时增强了该控制策略的实用性。

## 参考文献:

- [1] 周任军,张浩,范文帅,等.基于条件风险方法的含风电系统旋转备用优化调度[J].电力科学与技术学报,2015,30(1): 3-9.  
ZHOU Renjun, ZHANG Hao, FAN Wenshuai, et al. Spinning reserve optimal dispatch in wind power integrated system with CVaR method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 3-9.
- [2] Kamel R M, Christodoulides P. Standalone micro grid power quality improvement using inertia and power reserves of the wind generation systems[J]. Renewable Energy, 2016, 97: 572-584.
- [3] 林涛,叶婧,陈汝斯,等.考虑稳态频率约束的含大规模风电电力系统机组组合研究[J].电力科学与技术学报,2014,29(4): 18-24.  
LIN Tao, YE Jing, CHEN Rvsi, et al. Study on unit commitment with steady-state frequency constraints of power system including large-scale wind turbine[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 18-24.
- [4] Dreidy M, Mokhlis H, Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 144-155.
- [5] 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+43.  
ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. Frequency regulation by doubly 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+43.
- [6] 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.
- [7] Gevorgian V, Zhang Y, Ela E. Investigating the impacts of wind generation participation in interconnection frequency response[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1004-1012.
- [8] 范冠男,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.
- [9] Ghosh S, Kamalasadan S, Senroy N, et al. Doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farm control framework for primary frequency and inertial response application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(3): 1861-1871.
- [10] 刘世林,文劲宇,孙海顺. 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 95-102.
- LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun. Hybrid energy storage system and its control strategies intended for wind power conditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 95-102.
- [11] Vidyanandan K V, Senroy N. Frequency regulation in a wind-diesel powered microgrid using flywheels and fuel cells[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 780-788.
- [12] Choi J W, Heo S Y, Kim M K. Hybrid operation strategy of wind energy storage system for power grid frequency regulation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 736-749.
- [13] De Rijcke S, Tielens P, Rawn B, et al. Trading energy yield for frequency regulation: optimal control of kinetic energy in wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2469-2478.
- [14] 丁磊,尹善耀,王同晓,等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-34+95.
- DING Lei, YING Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 29-34+95.
- [15] 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.
- LIU Binbin, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 17-22.
- [16] 贺益康,胡家兵,徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2012.
- [17] Mauricio J M, Marano A, Gomez-Exposito A, et al. Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 173-180.