

# 基于运行状态评估的 双馈风机自适应虚拟同步发电机控制

高澈<sup>1</sup>, 田新首<sup>2</sup>, 李琰<sup>2</sup>, 迟永宁<sup>2</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 唐冰婕<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

## Adaptive Virtual Synchronous Generator Control of DFIG Based on Operation State Evaluation

GAO Che<sup>1</sup>, TIAN Xinshou<sup>2</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, CHI Yongning<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, TANG Bingjie<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems

(China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Because mechanical part of doubly fed induction generator (DFIG) is decoupled from electrical part, total equivalent rotary inertia of power system decreases with continuous growth of wind power penetration, bringing pressure to frequency regulation of power system. Firstly, frequency response control method of DFIG based on virtual synchronous generator control was analyzed in the paper. Secondly, energy change evaluation method of DFIG in process of frequency regulation was given. Then an adaptive virtual synchronous generator control of DFIG based on operation state evaluation was proposed. At last, time domain simulation was carried out on basis of theoretical study. Simulation results showed that the adaptive virtual synchronous generator control of DFIG could provide frequency support to power grid at all operating conditions, frequency stability of power system was improved, and operation stability of DFIG was guaranteed in process of frequency regulation.

**KEY WORDS:** DFIG; state evaluation; adaptive virtual synchronous generator control; frequency stability

**摘要:** 双馈风机机械与电气解耦, 使得接入电网总有效转动惯量降低, 增加电网频率调节压力。分析了双馈风机通过虚拟同步发电机控制实现对系统频率响应技术, 研究了双馈风机在调频过程中在不同运行工况下能量变化评估方法, 提出基于机组状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制。在理论研究基础上进行时域仿真, 结果表明, 基于运行状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制在不同出力水

平下可以对系统频率提供有效支撑, 提高系统频率稳定性, 同时调频过程中保证机组运行稳定。

**关键词:** 双馈风机; 状态评估; 自适应虚拟同步发电机控制; 频率稳定性

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1828

## 0 引言

随能源需求持续增加, 及环境保护呼声不断提高, 开发可持续发展能源模式是当今世界发展大趋势。风力发电的快速发展逐渐占据系统中的重要位置, 也使机网交互作用更加复杂<sup>[1-2]</sup>。而变速风机对外弱惯量特性及普遍不具备调频能力, 大规模风电并网给电网频率稳定性带来压力, 各国风电并网导则<sup>[3]</sup>对并网系统频率提出相关要求, 因此在风电机组或风电场中需要通过附加惯量控制及一次调频能力来提高其并网性能, 国内外学术界及相关技术应用方面对此开展大量工作<sup>[4]</sup>。

目前, 国内外学术界对双馈风电对频率稳定支撑研究<sup>[5-14]</sup>开始增多。文献[5]比较研究了风电参与频率控制的多种方法, 如虚拟惯量、下垂、转子转速、桨距角及协调控制等。文献[6-10]研究了机组留取备用参与频率控制的方法, 如变速法、调桨法或二者之间的协调法。文献[11-14]研究如何利用机组旋转设备的动能参与系统频率控制方法, 主要通过引入附加频率响应功能实现。而近些年虚拟同步发电机技术的发展, 由于其在调频调压方面的优势开始应用于新能源并网系统中, 提高了并网系统的稳定性<sup>[15-19]</sup>。在技术的实际应用

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577174)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51577174).

方面, GE 风机厂商在 2003 年提供支持频率控制技术的风电机组<sup>[20]</sup>, 而加拿大魁北克地区通过风电场配置的 PMU 实测数据, 验证了虚拟惯性控制和一次调频辅助控制在风电场和电网运行中的应用效果<sup>[21-22]</sup>。但是由于虚拟同步发电机控制受机组初始运行工作点及控制特点影响大, 采用虚拟同步发电机控制技术的风电机组参与调频动态过程复杂, 目前相关研究缺乏对虚拟同步发电机控制与机组运行状态耦合关系及相适应控制策略研究。

为此, 本文首先分析双馈风机虚拟同步发电机控制原理及运行特点; 其次给出双馈风机运行状态的评估方法, 并对某基于最大功率跟踪控制的机组运行状态进行评估; 再次基于对双馈风机运行状态评估提出双馈风机自适应虚拟同步发电机控制策略; 最后在仿真软件中建立含高比例风电电力系统仿真模型, 仿真分析验证本文所提控制合理性与有效性。

## 1 双馈风机虚拟同步发电机控制原理分析

双馈风机与传统同步发电机组不同, 其采用变流器控制使得机械与电气完全解耦, 对系统表现为无惯量和无一次调频能力。由于双馈风机控制灵活、适应性强, 可适应各类运行环境, 可通过改进双馈风机的控制技术模拟同步发电机组的特性, 实现双馈风机对频率的响应。基于同步发电机组转子运动方程把虚拟惯性控制引入双馈风机控制算法中<sup>[16]</sup>, 可得双馈风机有功频率控制方程如式(1)。另外, 增加系统频差响应功能, 即有功-频率下垂控制环节, 构成调频控制器, 其原理如式(2)。

$$2H_{\text{vsg}} \frac{d\omega_{\text{vsg}}}{dt} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} - K_d(\omega_{\text{vsg}} - \omega_g) \quad (1)$$

$$P_{\text{in}} - P_{\text{ref}} = \frac{1}{D_p}(\omega_{\text{ref}} - \omega_g) \quad (2)$$

式中:  $H_{\text{vsg}}$  为虚拟惯性时间常数;  $P_{\text{in}}$  与  $P_{\text{out}}$  分别为风电机组输入与输出功率;  $P_{\text{ref}}$  为有功功率参考值;  $\omega_{\text{vsg}}$  与  $\omega_g$  分别为虚拟角频率与系统角频率;  $\omega_{\text{ref}}$  为角频率参考值;  $K_d$  为阻尼系数;  $D_p$  为有功功率下垂系数。

联立式(1)与式(2)得双馈风机有功-频率控制器传递函数为

$$\omega_{\text{vsg}} = \frac{1}{2H_{\text{vsg}}s} \left[ \frac{1}{D_p}(\omega_{\text{ref}} - \omega_g) + P_{\text{ref}} - P_{\text{out}} - K_d(\omega_{\text{vsg}} - \omega_g) \right] \quad (3)$$

同理, 模拟同步发电机励磁系统, 可得双馈风

机无功-电压控制器原理为

$$E_{\text{vsg}} = E_{\text{set}} - D_q Q_{\text{out}} + (Q_{\text{ref}} - Q_{\text{out}}) \left( k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) \frac{1}{1 + T_a s} \quad (4)$$

式中:  $E_{\text{vsg}}$  为参考虚拟电压;  $E_{\text{set}}$  为机端电压参考值;  $Q_{\text{out}}$  为风电机组输出无功功率;  $Q_{\text{ref}}$  为风机无功参考值;  $T_a$  为延迟环节时间常数;  $k_{p1}$  与  $k_{i1}$  分别为比例与积分系数。

根据式(1)~(4), 可得基于虚拟同步发电机控制原理的双馈风机系统如图 1。图中: PLL(phase-locked loop)为锁相环;  $P_E$  为机组有功功率测量值;  $Q_E$  为机组无功功率测量值; MPT(maximum power tracking)为最大功率跟踪控制。

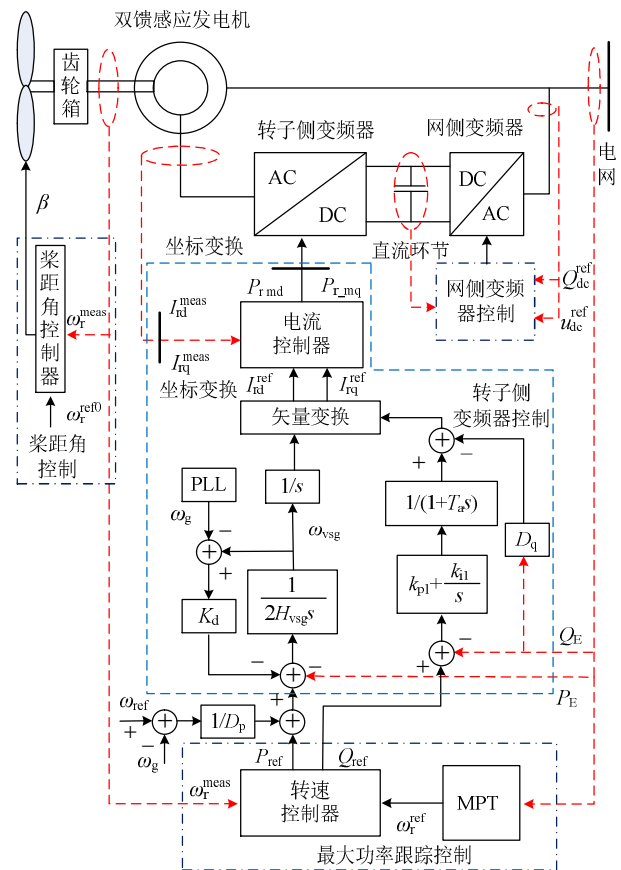


图 1 基于虚拟同步发电机控制原理的双馈风机系统

Fig. 1 Overall DFIG system based on virtual synchronous generator control

双馈风机采用虚拟同步发电机控制时, 能通过建立功率变化和内电势之间简单直接的数学联系, 使风机对电网表现出固有惯量属性, 在电网动态过程中提供动态支撑, 减小频率变化率, 提高系统频率稳定性。但是双馈风机在不同工作点具有差异性的转子转速且动态特性多变, 在响应系统频率变化的动态过程中, 机组自身运动特性不容忽视。双馈风机吸收机械功率可用下式表示:

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\beta, \lambda) V_{eq}^3 \\ C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5.0 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \\ \lambda_i = \frac{1}{1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1)} \\ \lambda = \omega_r R / V_{eq} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_w$  为风机吸收机械功率(W)； $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $A$  为扫风面积； $V_{eq}$  为风速； $C_p(\beta, \lambda)$  为风能转换效率系数； $R$  为叶片半径。

## 2 双馈风机自适应虚拟同步发电机控制

### 2.1 双馈风机运行状态评估

以某型号双馈风机为例，转子转速范围  $0.7 \text{ pu} \leq \omega_r \leq 1.2 \text{ pu}$ ，最大功率跟踪控制运行曲线如图2，运行曲线<sup>[11]</sup>由式(5)确定，划分以下运行区间如图中所示：1) 低出力区，曲线 AB，转子转速最小，输出功率满足  $0 \text{ pu} \leq P_E \leq 0.21 \text{ pu}$ 。2) 中出力区，曲线 BC，风能转换效率系数  $C_p$  最优，输出功率满足  $0.21 \text{ pu} < P_E \leq 0.83 \text{ pu}$ 。3) 高出力区，曲线 CD，转子转速最大，输出功率满足  $0.83 \text{ pu} < P_E \leq 1 \text{ pu}$ 。双馈风机通过虚拟同步发电机控制实现惯量响应时，由于机组不同运行工况转子转速不同，导致储存动能也不同，而调频过程中转子转速变化将恶化风功率捕获效率，在进行机组惯量特性分析及对外表现虚拟惯量特性时首先需要评估机组的运行状态。

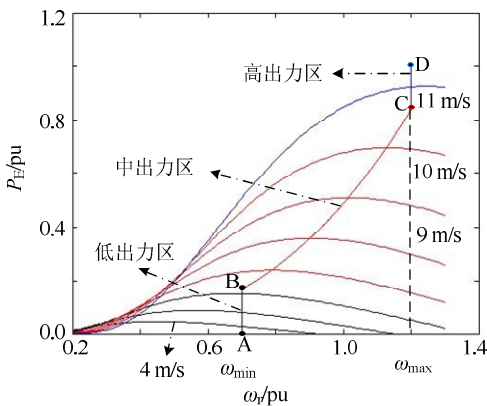


图2 双馈风机最大功率跟踪控制曲线  
Fig. 2 Maximum power tracking curve of DFIG

双馈风机采用虚拟同步发电机控制实现的惯量响应可以用双馈风机等效虚拟转动惯量  $J_{vir}$  表示。同时由于双馈风机与传统同步机不同，不同状态转子转速是变化的，双馈风机等效虚拟转动惯量也是变化的。基于机组自身运行过程的物理特性，机组参与调频过程中能量的变化将包含以下几部分：一是机组动能变化；二是风功率捕获量变化；三是额外能量损耗。则机组调频过程中的能量变化为

$$\Delta E_k = \Delta E_D + \Delta E_M + \Delta E_P \quad (6)$$

式中： $\Delta E_k$  为机组总能量变化； $\Delta E_D$  为机组动能变化量； $\Delta E_M$  为机组机械功率捕获量变化； $\Delta E_P$  为调频过程中额外能量损耗量。

假设调频过程中机组额外能量损耗量不变为常数，则有：

$$\Delta E_P = m \quad (7)$$

因机组动能变化量与机组初始运行状态强相关，则有：

$$\Delta E_D = \frac{1}{2P_D^2} J_D (\omega_0^2 - \omega_{min}^2) \quad (8)$$

式中： $P_D$  为极对数； $J_D$  为转动惯量； $\omega_0$  为转子转速初值。

机组调频过程中的转子转速变化引起风能捕获效率变化，进而改变机组机械功率捕获量，其可由下式给出：

$$\Delta E_M = \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_w(t) - P_0) dt \quad (9)$$

式中： $t_{on}$  为调频过程初时刻； $t_{off}$  为调频过程结束时刻； $P_0$  为初始机械功率； $P_w(t)$  为调频过程的机械功率，由式(5)给出。

机组参与调频过程的能量变化与等效虚拟转动惯量关系表示为

$$J_{vir} = \frac{2P_D^2}{\omega_c^2} \Delta E_k \quad (10)$$

进而，联立式(6)–(10)得：

$$J_{vir} = \frac{J_D}{\omega_c^2} (\omega_0^2 - \omega_{min}^2) + \frac{2P_D^2}{\omega_c^2} \left[ \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_w(t) - P_0) dt + m \right] \quad (11)$$

由式(11)知，双馈风机等效虚拟转动惯量一方面受自身转动惯量影响，另一方面受机组初始状态、能量损耗和调频过程约束。联立式(5)与式(11)，得双馈风机在不同出力水平下的等效虚拟转动惯量如下：

$$\begin{cases} J_{virL} = 0 \\ J_{virM} = (1/\omega_c^2) (J_D (\omega_0^2 - 0.7^2) + 2P_D^2 m - 2P_D^2 \int_{t_{on}}^{t_{off}} \left( \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p^{max} V_{eq}^3 - 0.11 \rho \pi R^2 V_{eq}^3 \times \right. \\ \left. (116 \frac{V_{eq}}{\omega_r R} - 0.035) - 5.0 \right) e^{-12.5(\frac{V_{eq}}{\omega_r R} - 0.035)} dt) \\ J_{virH} = (1/\omega_c^2) (J_D (1.2^2 - 0.7^2) + 2P_D^2 m - 2P_D^2 \int_{t_{on}}^{t_{off}} 0.11 \rho \pi R^2 V_{eq}^3 \left( (116 \frac{V_{eq}}{1.2R} - 0.035) - \right. \\ \left. 5.0 \right) e^{-12.5(\frac{V_{eq}}{1.2R} - 0.035)} - (116 \frac{V_{eq}}{\omega_r R} - 0.035) - \\ \left. 5.0 \right) e^{-12.5(\frac{V_{eq}}{\omega_r R} - 0.035)} dt) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $J_{virL}$  为机组低初始出力水平下的等效虚拟转动惯量； $J_{virM}$  为机组中初始出力水平下的等效虚拟转动惯量； $J_{virH}$  为机组高初始出力水平下等效虚拟转动惯量。

由式(12)知，双馈风机等效虚拟转动惯量由初始转子角速度  $\omega_0$ 、调速时间  $t$  和风速  $V_{eq}$  决定。如果机组参与系统调频过程中动能可以实现均匀释放，另外考虑到机组应用最大功率跟踪控制时的机组出力、转子转速与风速是单调的，则双馈风机等效虚拟转动惯量可分别表示成与风速、转子转速或机组出力的单调函数，联立式(5)与式(12)可以用状态评估函数  $f(P_0)$  表示式(12)机组等效虚拟转动惯量与机组初始出力的函数关系如式(13)。式(13)反映了机组在不同运行状态时可参与系统调频的特性。

$$f(P_0) = \begin{cases} J_{virL}(P_0), & P_0 \leq 0.21 \text{ pu} \\ J_{virM}(P_0), & 0.21 \text{ pu} < P_0 \leq 0.83 \text{ pu} \\ J_{virH}(P_0), & P_0 > 0.83 \text{ pu} \end{cases} \quad (13)$$

2.2 自适应虚拟同步发电机控制策略

基于虚拟同步发电机控制原理与机组参与调频过程运行特性，本文提出一种基于运行状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制，基本原理如图 3。该控制策略实现最大功率控制的同时可以参与系统频率调节，主要特点为参与系统频率调节过程中可同时根据系统状态(系统频率变化)和机组状态(机组参与调频能力)对控制行为作出实时调整。其主要控制功能实现过程为：1) 动态识别系统状态变化，通过锁相环检测系统同步角频率变化，跟踪系统运行状态，识别系统频率变化情况。2) 动态识别机组运行状态，机组状态评估函数根

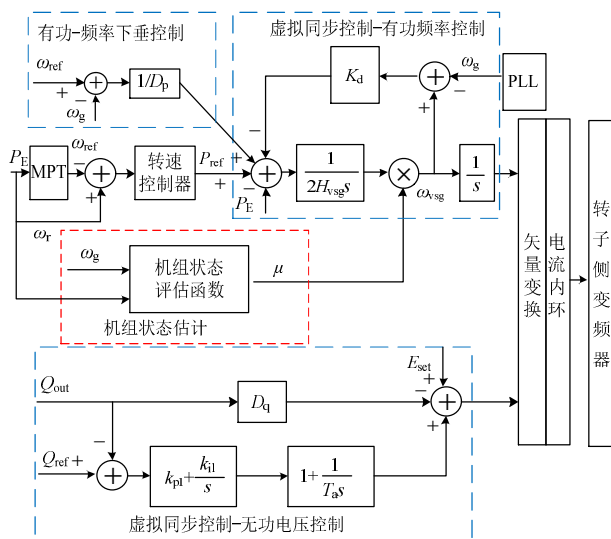


图3 基于运行状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制

Fig. 3 Adaptive virtual synchronous generator control of DFIG based on operation state evaluation

据系统同步角频率变化判断机组是否参与系统调频过程，通过检测机组有功出力水平实时跟踪机组运行状态，根据自身调节能力确定机组参与系统调频的程度。

图 3 所示双馈风机自适应虚拟同步发电机控制中机组状态评估函数的输出由式(14)给定，定义  $\mu$  为双馈风机虚拟转动惯量响应状态约束因子。该控制策略参与系统频率调整的过程如下：1) 机组通过锁相环检测系统同步角频率变化，判断机组是否参与系统频率调整。2) 当系统频差小于等于死区时，机组不参与调频，有功-频率下垂控制不起作用，机组状态评估函数输出为 1，机组按照基于最大功率跟踪控制的虚拟同步发电机控制状态运行。3) 当系统频差大于死区时机组参与调频，有功-频率下垂控制与机组评估函数被激活，机组参与系统频率控制的程度由频率变化值和虚拟转动惯量响应状态约束因子决定，其中频差首次大于死区到频率恢复至频差小于死区为该次调频周期，状态评估函数  $f(P_0)$  为频差首次大于死区时的取值，并作为本次频率调节过程的状态约束值，其值由下式给定：

$$\mu = \begin{cases} f(P_0), & |\Delta\omega_g| > \text{死区} \\ 1, & |\Delta\omega_g| \leq \text{死区} \end{cases} \quad (14)$$

3 算例分析

为验证本文所提控制策略，建立如图 4 算例系统，该系统风电渗透率约 17%。装机及负荷情况详见表 1，双馈风机相关参数详见表 2。

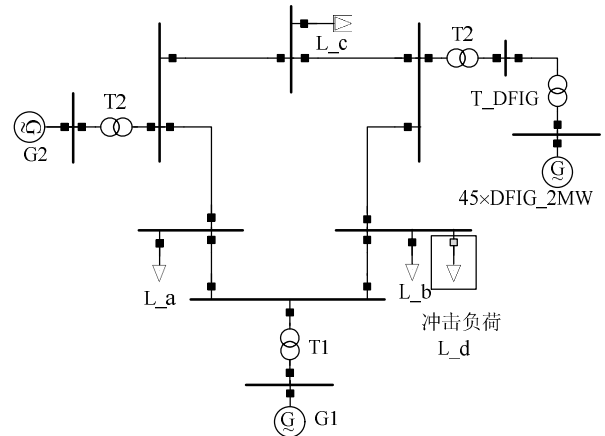


图4 仿真系统示意图

Fig. 4 Structure of simulation system

表1 系统装机及负荷

Tab. 1 Installed capacity and load of simulation system

元件	容量/MW	元件	容量/MW
L_a	120	DFIG	90
L_b	90	G1	240
L_c	100	G2	190
L_d	30	—	—



表 2 双馈风电机组相关参数  
Tab. 2 Related parameters of DFIG

参数	$P_n$ /MW	$U_n$ /V	$R_s$ /pu	$L_s$ /pu	$R_r$ /pu	$L_r$ /pu	$L_m$ /pu
取值	2	690	0.01	0.1	0.01	0.1	3.5
参数	$D_p$	$K_d$	$H_{vsg}$	$K_{pl}$	$K_{il}$	$D_q$	$T_a$
取值	0.05	10	0.5	0.1	0.4	0.05	0.2

3.1 系统突增负荷时稳定性

仿真事件设置为：图 4 中冲击负荷突然投入，导致功率不平衡频率下降。考虑双馈风机分别采用常规虚拟同步发电机控制与基于状态评估的自适应控制，分析双馈风电场在不同出力下调频特性。图 5 给出风电场高出力(0.9 pu)时双馈风机采用不同控制策略系统频率、机组出力的对比曲线。图 6 给出风电场低出力(0.2 pu)时双馈风机采用不同控制策略系统频率、机组出力的对比曲线。

由图 5 与图 6 可知：系统负荷突增时，双馈风机采用自适应虚拟同步发电机控制时，风电高出力时，频率最低值 49.0 Hz，出力最大变化量 9.4 MW；风电场低出力时，频率下降最低值 48.6 Hz，出力基本不变；该控制方法在机组不同运行工况下实现

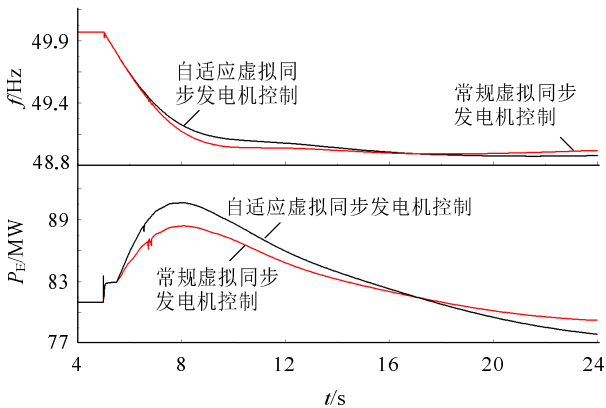


图 5 系统突增负荷时风电高出力下响应特性

Fig. 5 Comparison curves of the response characteristics under high output active power

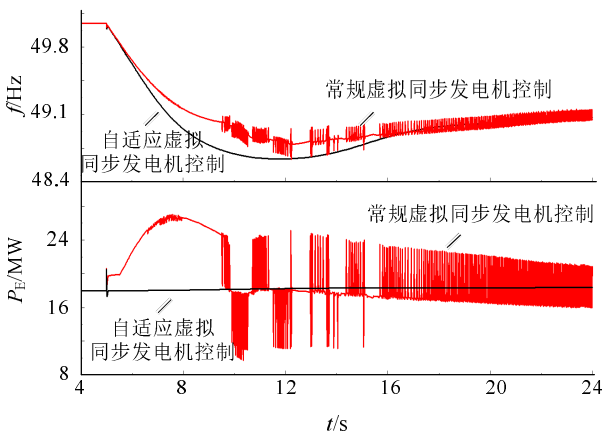


图 6 系统突增负荷时风电低出力下响应特性

Fig. 6 Comparison curves of the response characteristics under low output active power

了对系统频率下降时的支撑，且保证了机组运行稳定。双馈风机采用常规虚拟同步发电机控制时，风电高出力时，频率下降最低值 48.9 Hz，出力最大变化量 7.4 MW；风电场低出力时，系统频率与机组出力均发生振荡性失稳。

3.2 系统突甩负荷时稳定性

仿真事件设置为：图 4 中系统突然甩负荷(冲击负荷)，导致功率不平衡频率升高。考虑双馈风机分别采用常规虚拟同步发电机控制与基于状态评估的自适应控制，分析双馈风电场不同出力下调频特性。图 7 给出风电场高出力(0.9 pu)时双馈风机采用不同控制策略系统频率、机组出力的对比曲线。图 8 给出风电场低出力(0.2 pu)时双馈风机采用不同控制策略系统频率、机组出力的对比曲线。

由图 7 与图 8 可知：系统甩负荷时，双馈风机采用自适应虚拟同步发电机控制时，风电高出力时，频率最大值 51.0 Hz，出力最大变化量 7.7 MW；风电场低出力时，频率最大值 51.3 Hz，出力基本不变；该控制方法在机组不同运行工况下实现了对

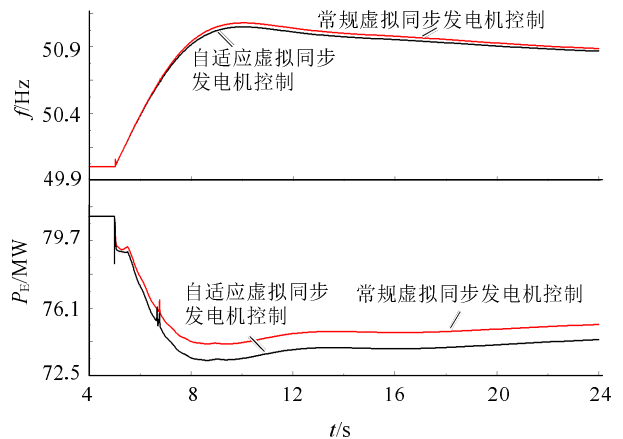


图 7 系统突甩负荷时风电高出力下响应特性

Fig. 7 Comparison curves of the response characteristics under high output active power

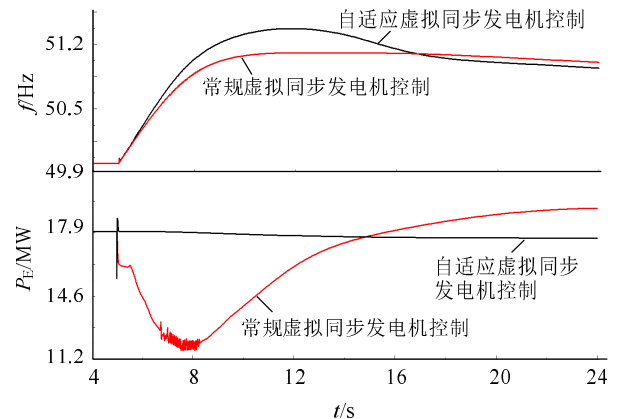


图 8 系统突甩负荷时风电低出力下响应特性

Fig. 8 Comparison curves of the response characteristics under low output active power

系统频率升高时的支撑,且保证了机组运行稳定。双馈风机采用常规虚拟同步发电机控制时,风电高出力时,频率最大值 51.03 Hz,出力最大变化量 5.8 MW;风电场低出力时,频率最大值 51.1Hz,出力最大变化量 5.6 MW,但此时机组输出功率局部发生振荡,存在失稳风险。

## 4 结论

本文针对双馈风电并网系统频率稳定性下降问题,分析了双馈风机虚拟同步发电机控制原理,评估了双馈风机不同运行状态下机组调频过程中能量变化,得出双馈风机等效虚拟转动惯量与转子转速、初始出力强相关,等效虚拟转动惯量在机组低出力时等于零,中出力时是有功出力的单调增函数,高出力时是有功出力的单调减函数。提出了基于机组状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制,该控制基于虚拟同步发电机控制技术跟踪频率变化,同时利用虚拟转动惯量响应状态约束因子动态识别机组运行状态参与系统调频,对系统提供动态有功功率支撑的同时,能够有效保证机组调频过程中的自身运行稳定。

## 参考文献

- [1] 何成明,王洪涛,孙华东,等. 变速风电机组调频特性分析及风电场时序协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 1-6. He Chengming, Wang Hongtao, Sun Huadong, et al. Analysis on frequency control characteristics of variable speed wind turbines and coordinated frequency control strategy of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 1-6(in Chinese).
- [2] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154. Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).
- [3] Altin M, Gökse Ö, Teodorescu R, et al. Overview of recent grid codes for wind power integration[C]//International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasso, Romania: IEEE, 2010: 1152-1160.
- [4] Almeida R G D, Lopes J A P. Participation of doubly Fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-950.
- [5] Ramtharan G, Ekanayake J B, Jenkins N. Frequency support from DFIG wind turbine[J]. IET Renewable Power Generator, 2007, 1(1): 3-9.
- [6] Žertek A, Verbič G, Pantoš M. Optimized control approach for frequency-control contribution of variable speed wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 17-23.
- [7] Margarit I D, Papathanassiou S A, Hatziaargyriou 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.
- [8] 吴子双,于继来,彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 112-119. Wu Zishuang, Yu Jilai, Peng Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119(in Chinese).
- [9] 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 over speed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25(in Chinese).
- [10] Vidyanandan K V, Nilanjan S. Primary frequency regulation by unloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [11] 田新首,王伟胜,迟永宁,等. 基于双馈风电机组有效储能的变参数虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 19-26, 33. Tian Xinshou, Wang Weisheng, Chi Yongning, et al. Variable parameter virtual inertia control based on effective energy storage of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 19-26, 33(in Chinese).
- [12] Nayeem R U, Torbjörn T, Daniel K. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines-potential and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 601-612.
- [13] 王刚,侍乔明,崔志勇,等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控制的协调方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2794-2801. Wang Gang, Shi Qiaoming, Cui Zhiyong, et al. A coordinated strategy of virtual inertia control of wind turbine and governor control of conventional generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2794-2801(in Chinese).
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 侍乔明,王刚,付立军,等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 283-290. Shi Qiaoming, Wang Gang, Fu Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 283-290(in Chinese).
- [16] 张琛,蔡旭,李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485. Zhang Chen, Cai Xu, Li Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-485(in Chinese).
- [17] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175. Zheng Tianwen, Chen Laijun, Chen Tianyi, et al. Review and prospect

- of virtual synchronous generator technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175(in Chinese).
- [18] Bevrani H, Ise T, Miura Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014(54): 244-254.
- [19] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.  
Zhong Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348(in Chinese).
- [20] Miller N W, Price W W, Sanchez-Gasca J J. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine-generators for stability simulations[C]// 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Ont., Canada: IEEE, 2003: 1977-1983.
- [21] Fischer M, Engelken S, Mihov N, et al. Operational experiences with inertial response provided by type 4 wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 17-24.
- [22] Asmine M, Langlois C. Field measurements for the assessment of inertial response for wind power plants based on Hydro-Québec TransÉnergie requirements[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 25-32.



高澈

收稿日期: 2017-07-25。

作者简介:

高澈(1977), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术, E-mail: Che-gao@sgcc.com.cn;

田新首(1985), 男, 博士, 工程师, 通信作者, 主要研究方向为新能源发电与并网稳定性等, E-mail: tianxinshou@epri.sgcc.com.cn;

李琰(1977), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网规划、运行与控制, E-mail: liyan@epri.sgcc.com.cn;

迟永宁(1973), 男, 博士, 教授级高级工程师, 国际电工委员会 IEC SC 8A “可再生能源接入电网”技术分委会秘书, 主要研究方向为新能源并网技术及电力系统稳定研究, E-mail: chiyn@epri.sgcc.com.cn;

刘超(1984), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术, E-mail: liuchao@epri.sgcc.com.cn;

唐冰婕(1995), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电与并网稳定控制, E-mail: tbjtbj@163.com。

(责任编辑 王金芝)