

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*

姜莹¹, 边晓燕¹, 李东东¹, 周歧斌²

(1. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090;

2. 上海市防雷中心, 上海 201615)

摘要: 为了使双馈异步风机(DFIG)能够更好地参与微电网频率调节并减少有功控制成本,综合考虑风机向微电网输送有功功率和提供备用容量参与系统调频两方面因素,提出了变减载率超速控制法。计及风速出现概率,采用概率加权求和法,考虑减载成本、调频效益和调频恢复成本求解超速控制成本(COC),得到变减载率曲线。通过对一个含DFIG的微电网系统进行仿真分析,验证所提方法可有效改善微电网频率动态特性,减少风机有功控制成本,有利于微电网的稳定运行。

关键词: 微电网; 可变减载率; 概率加权求和; 超速控制; 双馈异步风力发电机

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)09-0118-07

Research on Doubly Fed Induction Generator Participation in Microgrid Frequency Modulation Based on Variable Load Shedding Ratio Over-Speed Control*

JIANG Ying¹, BIAN Xiaoyan¹, LI Dongdong¹, ZHOU Qibin²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Lightning Protection Center, Shanghai 201615, China)

Abstract: In order to obtain better frequency regulation and less the cost of active power control of micro power grid with the doubly fed induction generator (DFIG) integrated, an approach of probability weighted sum was proposed for variable load shedding ratio over-speed control, considering the active power of the wind turbine to the micro power grid and providing the reserve capacity to participate in the system frequency modulation. Occurrence probability of wind speed, using probability weighted sum method, considering the cost of shedding load, effect of frequency modulation and cost of frequency modulation recovery for the cost of over-speed control (COC), then obtain the variable load shedding ratio curve. Through the simulation of a micro power grid system with the DFIG integrated, the proposed method was verified to effectively improved the dynamic characteristics of the micro power grid frequency, and reduced the cost of active power control of the wind turbine. It was beneficial to the stable operation of microgrid.

Key words: Microgrid; variable load shedding ratio; probability weighted sum method; over-speed control; doubly fed induction generator (DFIG)

* 基金项目: 上海市科委科技创新项目(14DZ1200905);上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900);上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”(15SG50)

作者简介: 边晓燕(1976—),女,博士,教授,研究方向为风机控制、电力系统有功控制,电力系统分析与稳定性。

姜莹(1993—),女,硕士研究生,研究方向为风机控制、电力系统有功控制。

李东东(1976—),男,博士,教授,研究方向为新能源并网、风机控制、电力系统分析与运行。

0 引言

近年来,随着人们对全球变暖及能源危机问题的重视,风力发电受到越来越多的关注。双馈异步风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)作为风力机组中的主流机型,将有功无功进行解耦控制,致使系统频率与转子转速解耦,风机无法响应系统的频率变化。微电网普遍规模较小,且风机渗透率高,导致微电网的频率波动较常规电网更为严重,需要风机参与系统调频。

国内外学者关于风机参与系统调频的研究大致可以分为以下三类:转子动能控制^[1-5]、功率备用控制^[6-9]以及相互之间的协调控制^[10-16]。其中,文献[6]令风机在高风速段参与调频,控制转速及桨距角,并依据经济性整定高风速段门槛值;文献[10]结合超速备用和模拟惯性控制,通过检测系统频率偏差调整输出有功参与系统调频;文献[11]按照风速分段,低、中风速采用超速控制,高风速采用桨距角控制。此类文献均采用了超速备用法,使 DFIG 脱离最大风能追踪,工作于固定减载率的次优功率曲线上。但是,当 DFIG 采用固定减载率的超速控制法时,不能根据风速的变化实时调整风电机组的备用容量。若减载率过小,则无法使风机更好地参与系统调频;若减载率过大,则过分牺牲风机输出有功功率,增加有功控制成本。

因此,本文提出变减载率超速控制法:综合考虑风机向微电网输送有功功率与提供备用容量参与系统调频两方面因素,采用概率加权求和法,根据风速出现概率不同,考虑减载成本、调频效益和调频恢复成本求解超速控制成本,得出不同风速下变减载率曲线,使风机同时满足参与微电网频率调节和减少有功控制成本的需要。其中,为了避免转子转速超过转速上限值,该方法只适用于中低风速情况。为了验证所提方法的有效性,搭建了一个含 DFIG 的微电网模型进行仿真分析。

1 微电网系统

1.1 系统建模

本文搭建了一个含 DFIG 的微电网系统模型,如图 1 所示。

该系统由一台额定功率为 20 MW 的燃气轮

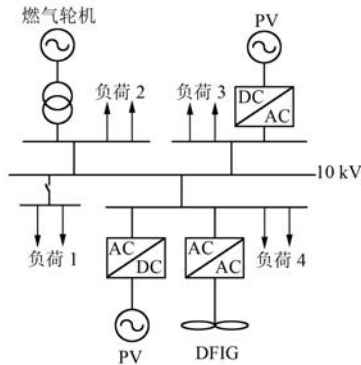


图 1 含 DFIG 的微电网系统

机、两座最大输出功率为 1 MW 的光伏电源(PV)和一台额定功率为 5 MW 的 DFIG 组成,固定负荷 2、3、4 总和为 15 MW、可变负荷 1 为 2 MW。其中,燃气轮机由同步发电机替代并配有调速器和自动电压调节器,系统额定频率为 50 Hz。同步发电机及 DFIG 在频率控制中的主要参数取值如表 1 所示。

表 1 微电网系统主要参数值

参数名称	参数值
同步机惯性时间常数 H/s	5
同步机调差系数 R	0.05
DFIG 惯性时间常数 H_f/s	4
DFIG 虚拟惯量控制系数 K_1	4

1.2 DFIG 频率控制模型

DFIG 响应系统频率变化的控制模型如图 2 所示,包含有可变减载率超速控制模块、虚拟惯量控制模块、下垂控制模块和转速保护模块。其中,可变减载率超速控制模块可根据风速的变化实时调整减载率取值。由于本文所研究的风速均低于额定风速,所以暂不考虑桨距角控制模块。

2 超速控制

2.1 超速控制原理

根据空气动力学知识,风力机输出的机械功率为

$$P = \frac{1}{2} \rho S_w v^3 C_p \tag{1}$$

式中: ρ ——空气密度;

S_w ——风力机叶片迎风扫掠面积;

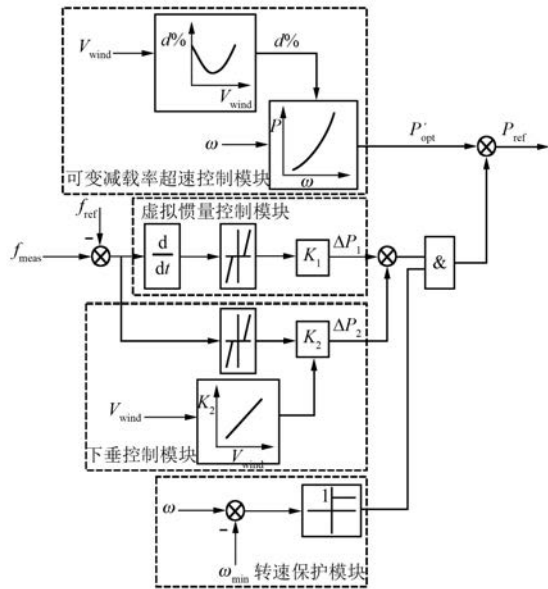


图2 DFIG 频率控制模型

v ——进入风力机扫掠面之前的空气流速
(即未干扰风速);
 C_p ——风能利用系数。

其中, C_p 与风速、叶片转速、风轮直径、桨距角均有关。在某一固定的风速 v 和桨距角 β 下, C_p 会随着风力机转速的变化而变化, 从而使风力机输出的机械功率发生变化。根据式(1)可导出不同风速下定桨距风力机输出功率和转速的关系, 将功率-转速曲线上的最大功率点 P_{opt} 连线则为最佳功率曲线(MPPT 曲线), 如图3所示。

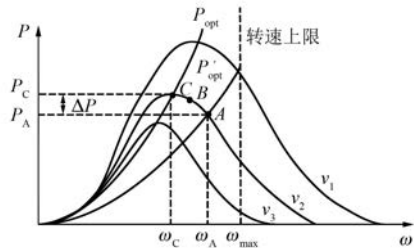


图3 不同风速下风机功率-转速曲线

在正常情况下, 风机实现最大风能追踪。当需要风机参与系统调频时, 风机将脱离 MPPT 曲线, 通过超速或减速两种方法给系统提供一定的备用容量, 但是由于减速控制会引起静态不稳定问题所以不予考虑^[17]。超速减载控制的原理如图3所示, P_{opt} 为 MPPT 曲线, P'_{opt} 为减载 $d\%$

后的功率曲线。以风速 v_2 为例, 当实现最大风能追踪时风机运行于 C 点, 而采用超速控制追踪 P'_{opt} 曲线时风机运行于 A 点, 即采用超速控制后风机预留了 ΔP 的有功功率用以参与系统调频。

$$\Delta P = P_{opt} \cdot d\% \tag{2}$$

采用超速控制不仅为风机预留了一部分备用容量, 同时增加转子转速也为风机储存了更多的转子动能, 提高风机调频能力。

当系统频率下降时, DFIG 转子侧附加的功率控制环节将响应系统频率变化, 增大风机有功参考值, 风机的电磁转矩也随之增大。由于机械转矩无法发生突变, 风机转速将会降低, 运行点由 A 点向 B 点移动, 输出有功增加, 并且转子动能也会得到释放。随着机械转矩的增加, 电磁转矩与机械转矩将会在某一点达到平衡。如若在 C 点达到平衡。则表示风机已将备用容量全部释放, 回到 MPPT 状态。为了避免转子转速超过转速上限值, 该控制方法只适用于中低风速。文献[18]指出风机输出的有功功率达到额定功率 80% 及以上的概率少于 10%, 因此超速控制在绝大部分时间内均能使用。

2.2 减载率取值范围分析

丹麦风电并网导则中要求风机每分钟能够变化的有功功率范围为额定功率的 10% ~ 100%^[19]。当电网频率发生变化时, 同步发电机的静态调差系数为

$$\delta = \frac{1}{K_G} = - \frac{\Delta f}{\Delta P} \tag{3}$$

式中: K_G ——发电机单位调节功率。

由式(2)、式(3)可得, 风力发电机的静态调差系数可表示为

$$\delta^* = \frac{1}{K_G^*} = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{\Delta f}{d\% \cdot f_0} \tag{4}$$

一般同步发电机的静态调差系数为 3% ~ 5%, 电网装机容量在 300 万 kW 以下时供电频率允许偏差为 0.5 Hz^[20], 系统额定频率为 50 Hz。因此, 由式(4)可得风力发电机若要具备与一般同步发电机相似的静态功频特性, 则减载率的取值范围为 20% ~ 33%。综合分析实际与理论情况, 本文所考虑的减载率取值范围为 0 ~ 30%。

3 基于概率加权求和法的减载率取值分析

不同风速下,风机能够输出的最大有功功率不同,减载率 $d\%$ 的取值不仅会影响风机的调频效果,而且会影响系统稳态运行时风机发电效率。下面通过概率加权求和法对不同风速下减载率 $d\%$ 的取值进行分析。

3.1 固定风速下的减载率取值分析

以风速 10 m/s 为例,在图 1 所示微电网系统中,10 s 投入 2 MW 临时负荷 1,仿真时长为 40 s。通过调节下垂系数 K_2 ,保持转子转速不低于图 3 中的 C 点,以防发生静态失稳。不同减载率 $d\%$ 取值下微电网频率、DFIG 输出有功功率如图 4 所示。

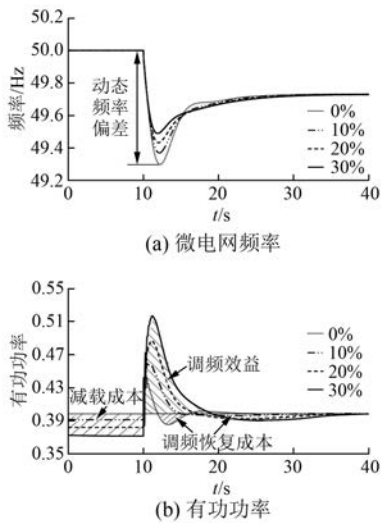


图 4 10 m/s 风速下减载率取值分析

图 4(a) 中动态频率偏差为频率跌落的最大值;图 4(b) 中减载成本代表减载后的有功损失;调频效益代表调频期间多发的有功功率;调频恢复成本代表调频恢复期间的有功损失。由图 4 可知超速控制减缓了系统的频率跌落,减载率越大,动态频率偏差越小,调频效益越大,但减载成本和调频恢复成本也越大。同时增大减载率相当于提高转子转速,可以释放更多的转子动能来参与系统调频,减缓频率跌落。下面通过概率加权求和法求解超速控制成本 COC 来计算 10 m/s 风速下的最优减载率。

3.2 基于概率加权求和法的超速控制成本

为了使风机能够更好地参与微电网频率调节

并减少有功控制成本,本文计及风速出现概率,采用概率加权求和法,考虑减载成本、调频效益和调频恢复成本求解超速控制成本 COC,如式(5)所示。取超速控制成本 COC 最小值对应的减载率作为该风速下的最优减载率。

$$\min \text{COC} = \left(\int_0^{10} \Delta P_{d\%} \cdot dt + \int_{t_f}^t \Delta P_{\text{rec}} \cdot dt \right) \cdot m + \left(- \int_{10}^{t_f} \Delta P_{\text{eff}} \cdot dt \right) \cdot n \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{d\%}$ ——减载后的有功损失;
 ΔP_{rec} ——调频恢复期间的有功损失;
 ΔP_{eff} ——调频期间的有功增加;
 t_f ——调频结束时间;
 t ——调频恢复结束时间;
 m ——调频成本所占权重;
 n ——调频效益所占权重。

考虑到调频成本需越小越好,而调频效益需越大越好,将调频效益部分取负值与调频成本相加计算超速控制成本 COC。

其中,权重 m 和 n 的取值由某风机实测风速数据得到。若风速出现概率较高,则考虑减少风机预留的备用容量,适当增大调频成本所占权重,即增大 m 值、减小 n 值;若风速出现概率较低,则考虑增大风机的备用容量用以参与系统调频,适当增大调频效益所占权重,即增大 n 值、减小 m 值。

某风机实测风速概率密度分布如图 5 所示。当风速低于额定风速时,风速主要集中在 6~10 m/s 区间内。本文所研究的中低风速范围为 5~12 m/s,因此确定 m 、 n 取值如表 2 所示。

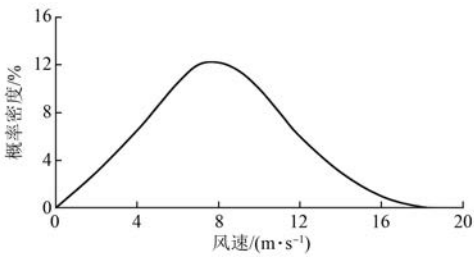


图 5 某风机实测风速概率密度分布

表 2 m 、 n 取值

风速/(m·s ⁻¹)	m	n
[5~6]、[10~12]	6	4
[6~10]	7	3

以风速 10 m/s 为例,采用概率加权求和法计算得到的超速控制成本 COC 如图 6 所示。

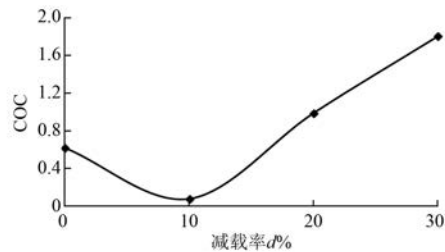


图 6 10 m/s 风速下 COC 与减载率 $d\%$ 曲线

由图 6 可知,在 10 m/s 风速下当减载率为 10% 时超速控制成本 COC 最小,因此风速为 10 m/s 情况下的最优减载率为 10%。

该方法综合考虑了风机既要向微电网输送有功功率,又要提供备用容量参与系统调频两方面因素,通过概率加权求和法计算超速控制成本,取成本最小从而得出一个最优减载率方案,使风机同时满足参与微电网频率调节和减少有功控制成本的需要。

3.3 变减载率曲线

不同风速下减载率取值采用如上所述的分析方法,最后得到变减载率曲线如图 7 所示。

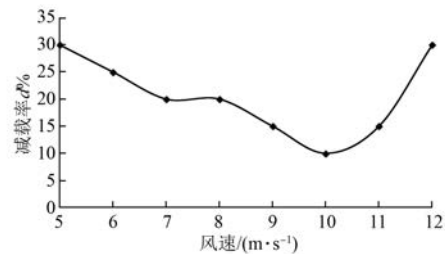


图 7 不同风速下减载率 $d\%$ 取值

其中,风速为 12 m/s 减载率为 30% 情况下风机的转子转速如图 8 所示,可以看出转子转速在减载率为 30% 时并没有超过最大转速 1.2 p.u.^[13],证明在该风速下将减载率取为 30% 是可行的。

4 实时风速下仿真分析

为了验证上述变减载率超速控制法的有效性,下面通过仿真对比固定 10% 减载率^[21-22]、可变减载率及未加超速控制三种方法下,微电网频率、DFIG 有功功率变化情况。在图 1 所示的微电

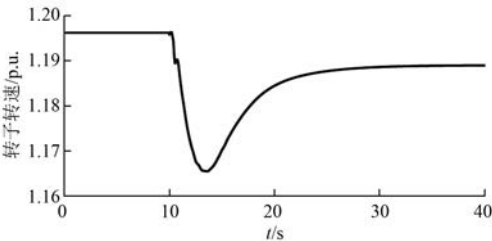


图 8 风速为 12 m/s 减载率为 30% 时 DFIG 转子转速

网系统中,DFIG 输入风速为一组实测风速数据,并在 45 s 时投入 2 MW 临时负荷 1,如图 9(a) 所示,仿真时长为 80 s。相应的微电网频率、DFIG 有功功率以及减载率取值分别如图 9 所示。

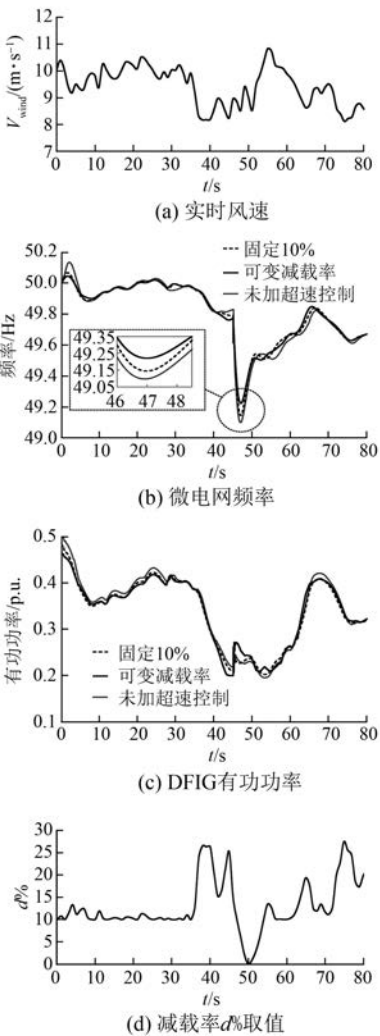


图 9 实时风速下仿真分析

实时风速下,由图 9(c) 可得可变减载率控制方法 DFIG 输出的有功功率稍低于固定减载率情

况,这部分有功功率为 DFIG 参与微电网频率控制提供了更多的备用容量,同时增大减载率相当于提高转子转速,释放更多的转子动能,提高微电网的动态频率特性。由图 9(b)可得,当 45 s 时投入临时负荷,可变减载率控制下的微网动态频率偏差远小于固定减载率情况。表 3 给出了固定 10% 和可变减载率两种情况下频率控制效果比较。其中,动态频率偏差缩小百分比 $r^{[23]}$ 定义为

$$r = \left| \frac{\Delta f - \Delta f_0}{\Delta f_0} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中: Δf ——采用固定 10% 或可变减载率控制下发生负荷变动时的动态频率偏差;
 Δf_0 ——未加超速控制下发生负荷变动时的动态频率偏差。

表 3 固定 10% 和可变减载率频率控制效果比较

控制方式	$r/\%$	COC
固定 10%	5.78	0.51
可变减载率	17.49	0.36

由表 3 可知,采用可变减载率超速控制法的动态频率偏差缩小百分比为 17.49%,而固定 10% 仅为 5.78%,可变减载率超速控制法的动态频率偏差缩小百分比约为固定 10% 的 3 倍,调频效果显著;可变减载率的超速控制成本为 0.36,固定 10% 为 0.51,可变减载率的超速控制成本明显低于固定 10% 控制方法。

由此可见,可变减载率超速控制法相较于传统的固定减载率超速控制法可以有效地改善微电网频率动态偏差,减少超速控制成本,使风机同时满足参与微电网频率调节和输送有功功率的需要,既能减少调频成本,又可以发挥出最大的调频效果。

5 结 语

本文提出了一种可变减载率的超速控制法,采用概率加权求和法求解超速控制成本得到变减载率曲线,并进行仿真验证,得到如下结论:

(1) 分析了固定风速下不同减载率取值对微电网频率和 DFIG 输出有功功率的影响。减载率越大,微电网动态频率偏差越小,调频效益越大,但减载成本和调频恢复成本也越大。

(2) 计及风速出现概率,采用概率加权求和

法,综合考虑减载成本、调频效益和调频恢复成本求解超速控制成本 COC,得出不同风速下的变减载率曲线。

(3) 通过实时风速下仿真表明采用可变减载率超速控制法相比于固定 10% 超速控制法,动态频率偏差的明显减小,超速控制成本大幅降低,可以发挥出最大的调频效果,使调频效果显著。

【参 考 文 献】

- [1] 杨俊虎,韩肖清,高文军.下垂控制微电网的频率调节特性的研究[J].山西电力,2013(5): 1-5.
- [2] 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): 20-26.
- [3] 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.
- [4] CHEN R, WU W, SUN H, et al. Supplemental control for enhancing primary frequency response of DFIG-based wind farm considering security of wind turbines[C] // Pes General Meeting | Conference & Exposition IEEE, 2014: 1-5.
- [5] CHEN W, TAN W. Load frequency control for power systems with wind turbines[C] // Control Conference (CCC), 2014 33rd Chinese, 2014: 4277-4282.
- [6] 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.
- [7] 李和明,张祥宇,王毅,等.基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J].中国电机工程学报,2012,32(7): 32-39.
- [8] WILCHES B F, CHOW J H, SANCHEZ G J J. A fundamental study of applying wind turbines for power system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016,31(2): 1496-1505.
- [9] PAHASA J, NGAMROO I. Model predictive control-based wind turbine blade pitch angle control for alleviation of frequency fluctuation in a smart grid[C] // International Electrical Engineering Congress, 2014: 1-4.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 赵晶晶, 吕雪, 符扬, 等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3815-3822.
- [13] 赵晶晶, 吕雪, 符扬, 等. 基于可变系数的双馈风力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.
- [14] PAHASA J, NGAMROO I. Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid [J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(1): 97-105.
- [15] WANG H, TAN W. Load frequency control of power systems with wind turbine through flywheels [C] // Control and Decision Conference IEEE, 2015: 3495-3499.
- [16] MIAO L, WEN J, XIE H, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2732-2742.
- [17] 李芸. 大规模风电场参与系统调频的控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [18] WU Z P, GAO W Z, WANG J H, et al. Acoordinated primary frequency regulation from permanent magnet synchronous wind turbine generation [C] // IEEE in Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), Denver, Co, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [19] ENERGINET D. Wind turbines connected to grid with high vottage above 100 kV[M]. Denmark: Energinet, 2004.
- [20] 电力工业部. 供电营业规则 [G]. 1996.
- [21] 张同军. 高渗透风机并网对电力系统暂态频率响应影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [22] 曹张洁. 双馈感应风电机组参与系统一次调频的控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [23] 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.

收稿日期: 2017 -02 -07

(上接第 117 页)

- [7] LIANG J Q, HOWARD D F, RESTREPO J A, et al. Feed forward transient compensation control for DFIG wind turbines during both balanced and unbalanced grid disturbances[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1452-1463.
- [8] XU L, WANG Y. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. IEEE Trans on Power System, 2007, 22(1): 314-323.
- [9] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜. 不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 48-56.
- [10] 胡家兵. 双馈异步风力发电系统电网故障穿越(不间断运行)研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [11] CHENG P, NIAN H. Collaborative control of DFIG system during network unbalance using reduced-order generalized integrator [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2015, 30(2): 453-464.
- [12] CHEN S Z, CHEUNG N, WONG K C, et al. Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2010, 25(2): 356-368.
- [13] HU J B, NIAN H, HU B, et al. Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach[J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2010, 25(4): 1028-1039.
- [14] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- [15] 郑雪梅, 李琳, 徐殿国. 双馈风力发电系统低电压过渡的高阶滑模控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29: 178-183.
- [16] 全宇. 适应畸变电网的双馈风力发电系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

收稿日期: 2016 -11 -29

携手节能减排 悠享生活空间

让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣

电机与控制应用

中文核心期刊 / 中国科技核心期刊

专业缔造权威 服务创造价值

高效节能 绿色电机

我们专注于

电机技术的研究

电机系统节能的解决方案

电机保护与控制技术的报道



扫描二维码
关注电机与控制应用

《电机与控制应用》创刊于1959年，由上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发售，邮发代号4-199，杂志集电科所在电工行业内，从技术研发、产品检测、标准制定及人才优势等各方面资源，专业服务于行业与用户，为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献，在中国电机及其应用领域享有很高的影响力。

《电机与控制应用》编辑部
电话：021-62574990-221

地址：上海市武宁路505号
传真：021-32230809

邮编：200063
E-mail: emca@seari.com.cn