

# 基于模糊自抗扰的风电场储能虚拟惯量控制

崔海林<sup>1,4</sup>, 李泰<sup>1,2,3</sup>, 潘荣睿<sup>1</sup>

(1. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003;

2. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 江苏辉能电气有限公司, 江苏 镇江 212132;

4. 江苏省常州技师学院, 江苏 常州 213032)

**摘要:**随着风电机组在电力系统并网增多,能够支撑电网频率的惯性愈发降低,系统频率的稳定性受到了影响,为此,提出一种基于模糊自抗扰储能惯量控制的双馈风电机组电网频率调整方法。该方法通过设计模糊自抗扰控制器来控制储能系统的运行,进而为电网有功频率提供支撑;为有效估计和补偿系统的不确定性及扰动,利用模糊规则自动修改整定扩张状态观测器参数。最后,应用Matlab/Simulink来分析模糊控制和模糊自抗扰控制的储能惯量控制结构下电网频率及其他机组参数。仿真表明,所提方法具有更好的电网频率调节功能,同时,提高了系统的鲁棒性和抗干扰能力。

**关键词:**风电机组;储能系统;虚拟惯量;模糊控制;自抗扰控制

**中图分类号:**TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21355

## Virtual Inertia Control of Wind Energy Storage Based on Fuzzy Auto Disturbance Rejection

CUI Hailin<sup>1,4</sup>, LI Tai<sup>1,2,3</sup>, PAN Rongrui<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu,

China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013,

Jiangsu, China; 3. Jiangsu Phono Electric Co., Ltd., Zhenjiang 212132, Jiangsu, China;

4. Changzhou Technician College Jiangsu Province, Changzhou 213032, Jiangsu, China)

**Abstract:** In the power system, with the increase of wind turbine connected to the grid, the inertia which can support the grid frequency is increasingly reduced, the stability of the system frequency is affected. For this reason, a method of grid frequency adjustment of doubly fed wind turbine based on fuzzy auto disturbance rejection energy storage inertia control was proposed. In order to provide active frequency support for power grid, to effectively estimate and compensate the uncertainty and disturbance of the system, a fuzzy auto disturbance rejection control (ADRC) was designed to control the energy storage system, fuzzy rules were used to automatically modify the parameters of the extended state observer. Finally, Matlab/Simulink was used to analyze the power grid frequency and other unit parameters under the energy storage inertia control structure based on fuzzy control and fuzzy auto disturbance rejection control. The simulation results show that the grid frequency adjustment method based on fuzzy auto disturbance rejection energy storage inertia control has a better power grid frequency adjustment ability, at the same time, the robustness and anti-interference ability of the system are improved.

**Key words:** wind turbine; energy storage (ES) system; virtual inertia; fuzzy control; auto disturbance rejection control (ADRC)

随着新能源的发展,电力电子类设备并网增多,能够支撑电网频率的风电场惯性降低<sup>[1]</sup>。双馈风力发电机通过变频器与电网连接,使得转速与电网频率解耦,无法对系统频率变化做出自动

响应<sup>[2]</sup>。新的电网导则<sup>[3]</sup>要求,当频率发生跌落时并网风电机组应当具备惯性支持功能。

虚拟惯量控制能够在电网频率跌落时,为电网提供惯量支持<sup>[4]</sup>。风电系统中旋转设备和储能能

**基金项目:**国家自然科学基金(51307074);江苏省博士后基金(1801061B)

**作者简介:**崔海林(1993—),女,硕士,Email:1960853492@qq.com

(energy storage, ES)设备具有潜在惯性支持能力,文献[5]利用转子动能提供惯性支持,然而在风电机组转子转速恢复时会引起电网频率二次跌落;文献[6]利用模糊控制的转子转速恢复器来进行转子动能惯性控制,该方法难以适应变化的电网做出自适应参数控制;文献[7]研究模糊控制器对储能燃料电池荷电状态的影响,然而风速的不确定性和系统的多个未知扰动,系统惯性、驱动力矩等参数变化范围较大,难以抵抗未知参数扰动;文献[8]利用扩张状态观测器来渐近估计电网频率总扰动,然而需要整定的参数过多,影响了控制精度;文献[9]采用主动自抗扰控制的最大功率跟踪控制方法来补偿转子电流扰动,然而风电机组受功率扰动的同时仍受到转子电流扰动的影响。基于此,在电网频率波动的情况下提高系统的抗干扰能力是不可或缺的。

在最大风功率跟踪情况下,受负荷波动和风速不确定的作用,为保证电网能实时提供电网频率支撑,提出一种基于模糊自抗扰(fuzzy logic control auto disturbance rejection control, FLC-ADRC)的储能惯量控制方法,针对自抗扰控制器内部参数不利于实际操作和整定,引进模糊规则,结合各自优势,给出模糊自抗扰控制器算法,在 Matlab/Simulink 中进行系统建模与仿真。仿真结果证实了与采用模糊逻辑(fuzzy logic control, FLC)储能惯量控制的方法相比,所提出的基于 FLC-ADRC 的储能惯量控制方法响应速度快、鲁棒性好、频率稳定。

### 1 双馈风电机组惯量控制方法

风电系统模型如图 1 所示,该模型由双馈风力发电机,转子侧、网侧变流器以及电网等组成。

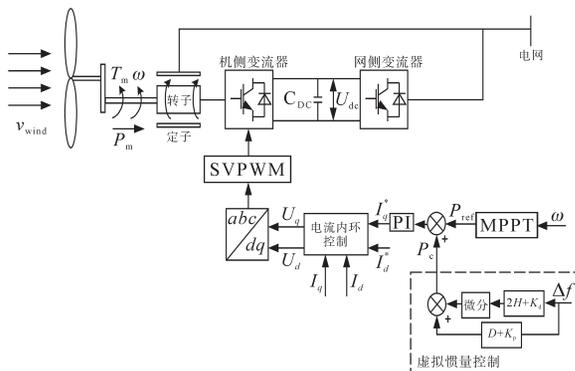


图1 风电系统模型框图

Fig.1 Block diagram of wind power system model

### 1.1 双馈风力发电机模型

双馈风力发电机在同步坐标系下的数学模型<sup>[10]</sup>为

$$\begin{cases} u_s = -R_s i_s + p\Psi_s + j\omega_1\Psi_s \\ \Psi_s = -L_s i_s + L_m i_r \\ T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \\ P_s = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$\Psi\_s, P\_s, u\_s, i\_s, i\_r\$ 分别为定子磁链、定子有功功率、定子电压、定子电流和转子电流; \$p, L\_s, L\_m, \omega\_1, R\_s\$ 分别为微分算子、定子自感、定子互感、同步角速度、定子电阻; \$T\_e, n\_p\$ 分别为电机电磁转矩和电机极对数。

### 1.2 最大风能捕获

风力机从叶片扫过面积中析取风能<sup>[11]</sup>为

$$P_w = 0.5\rho\pi R^3 C_p(\lambda, \beta) \omega^3 / \lambda \quad (2)$$

其中

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22(116/\beta - 0.4\theta - 5) e^{-12.5/\beta}$$

$$\lambda = \omega r / v_{wind}$$

$$\beta = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}$$

式中: \$P\_w\$ 为风力机从风能中析取的机械功率; \$\rho\$ 为空气密度; \$R\$ 为风机半径; \$r\$ 为风机叶片长度; \$\omega\$ 为系统实际角频率; \$v\_{wind}\$ 为风速; \$C\_p(\lambda, \beta)\$ 为功率系数,与桨距角 \$\theta\$ 和叶尖速比 \$\lambda\$ 有关。

调整风机转速可使 \$C\_p(\lambda, \beta)\$ 达到最优值,记为 \$C\_{pmax}(\lambda, \beta)\$,对应地,叶尖速比则为 \$\lambda\_{opt}\$。此时风力机析取风能达到最大值,即 \$P\_{wmax} = k\_{opt} \omega^3\$, 其中, \$k\_{opt} = 0.5\rho\pi R^3 C\_{pmax}(\lambda, \beta) / \lambda\_{opt}\$。

### 1.3 风电系统PD惯量控制

附加功率外环惯量控制结构如图 2 所示。

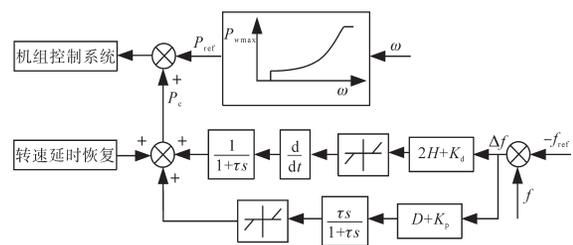


图2 附加功率外环惯量控制结构图

Fig.2 Inertia control structure of additional power outer loop

引入频率变化率 \$d\Delta f/dt\$ 和频率偏差 \$\Delta f\$ 反馈调整转矩输出值,并简化滤波器环节。死区环节只对较大的扰动产生作用,不影响风电机组的稳态运行,也不会降低发电量。

惯量响应目标有功功率如下式:

$$P_c = K_d \frac{d\Delta f}{dt} + K_p \Delta f \quad (3)$$

式中: $P_c$ 为惯量响应目标有功功率; $K_d$ 为微分参数; $K_p$ 为比例参数。

为了改善系统频率的暂态性能,利用储能系统模拟出的同步发电机惯性响应来增加电力系统的等效惯量。

电力系统的惯量响应<sup>[12]</sup>可表示为

$$\Delta P_c = 2H \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f \quad (4)$$

式中: $H$ 为虚拟惯量时间常数; $D$ 为阻尼。

考虑风电机组的惯量响应则为

$$\Delta P_c = (2H + K_d) \frac{d\Delta f}{dt} + (D + K_p) \Delta f \quad (5)$$

## 2 模糊自抗扰储能惯量控制

风电场系统结构如图3所示。

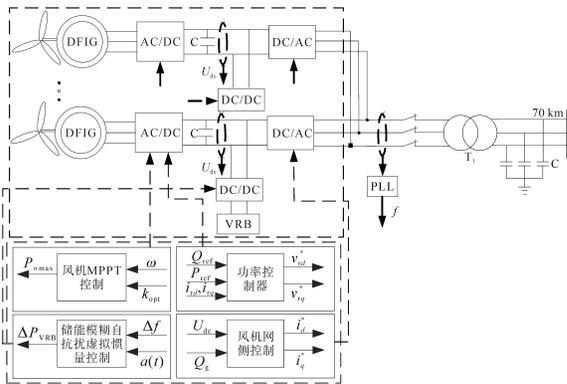


图3 风电场系统结构图

Fig.3 Wind farm system structure

### 2.1 模糊自抗扰控制器设计

设计的模糊自抗扰控制器如图4所示。

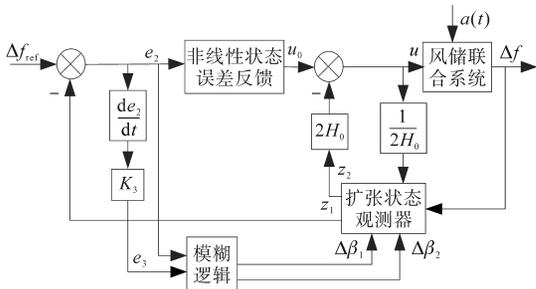


图4 模糊自抗扰控制器结构框图

Fig.4 Structure diagram of FLC-ADRC

#### 2.1.1 扩张状态观测器(ESO)

当电力系统发生负荷扰动后,标准一阶系统形式的系统频率动态响应<sup>[13]</sup>可表示为

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{2H} \Delta P_{VRB} + \frac{1}{2H} (-D\Delta f + \Delta P_C + \Delta P_T - \Delta P_L) \quad (6)$$

式中: $P_C$ 为常规同步发电机提供的功率; $P_{VRB}$ 为储能虚拟惯量控制所产生的有功功率增量参考值; $P_T$ 为相邻系统间的交换功率; $P_L$ 为系统有功负荷; $\Delta P_C, \Delta P_{VRB}, \Delta P_T, \Delta P_L$ 为相对应的增量。

若知 $H$ 值的估计值为 $H_0$ ,则式(6)改写成:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{2H_0} \Delta P_{VRB} + \left( \frac{1}{2H} - \frac{1}{2H_0} \right) \Delta P_{VRB} + \left[ \frac{1}{2H} (-D\Delta f + \Delta P_C + \Delta P_T - \Delta P_L) \right] \quad (7)$$

令

$$a(t) = \frac{1}{2H} (-D\Delta f + \Delta P_C + \Delta P_T - \Delta P_L) + \left( \frac{1}{2H} - \frac{1}{2H_0} \right) \Delta P_{VRB}$$

则式(7)可改写成:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = a(t) + \frac{1}{2H_0} \Delta P_{VRB} \quad (8)$$

式中: $a(t)$ 为所有总有功不平衡(不包括储能系统)对 $d\Delta f/dt$ 的干扰。

为补偿系统有功功率不平衡,可采用储能虚拟惯量控制方法,对应地设计为

$$\Delta P_{VRB} \approx -\frac{K_{VRB}}{1 - K_{VRB}} 2H_0 \frac{d\Delta f}{dt} = -K_{VRB} \cdot 2H_0 \hat{z}_2 \quad (9)$$

式中: $K_{VRB}$ 为储能系统惯量响应参与系数,其取值范围为 $0 \leq K_{VRB} \leq 1$ 。

加入模拟同步发电机一次调频的有功功率参考增量,则式(9)变为

$$\Delta P_{VRB} = -K_{VRB} \cdot 2H_0 \hat{z}_2 - K_{pf} \hat{z}_1 \quad (10)$$

式中: $K_{pf}$ 为等效频率调节效应系数; $\hat{z}_1, \hat{z}_2$ 为 $z_1, z_2$ 的状态观测值。

式(10)模拟了同步发电风机的惯量响应和一次调频特性。

基于式(8),令状态变量 $x = \Delta f$ ,控制输入 $u = \Delta P_{VRB}$ ,系统未知总扰动为 $a(t)$ ,则可得:

$$\dot{x} = a(t) + \frac{1}{2H_0} u \quad (11)$$

依据式(11)可用ESO来对状态变量 $x$ 和新的扩张状态变量 $a(t)$ 进行非线性估计。于是,令新的状态变量 $z_1 = x, z_2 = a(t)$ ,输出 $y = z_1 = x$ ,ESO可改进为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - \hat{z}_1 \\ \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + \frac{1}{2H_0} u - \beta_{01} e_1 \\ \dot{\hat{z}}_2 = -\beta_{02} fal(e_1, \alpha_1, \delta_1) \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$fal(e_n, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e_n}{\delta^{1-\alpha}} & |e_n| \leq \delta \\ |e_n|^\alpha \text{sign}(e_n) & |e_n| > \delta \end{cases} \quad n=1,2$$

式中:  $\hat{z}_1, \hat{z}_2$  为  $z_1, z_2$  的状态观测值,  $\hat{z}_1$  将趋近于  $x$  (即  $\Delta f$ ),  $\hat{z}_2$  将渐近于  $a(t)$ ;  $e_1$  为观测器误差;  $u$  为控制输入;  $\beta_{01}, \beta_{02}$  分别为可调增益参数影响, 应合理选取  $\beta_{01}, \beta_{02}$ ;  $\alpha$  为非线性因子, 影响控制精度;  $\delta$  为滤波因子, 选择合适参数可以避免高频振荡。

### 2.1.2 非线性状态反馈控制器(NSEFL)

非线性状态反馈控制器可表示为

$$\begin{cases} e_2 = \Delta f_{ref} - z_1 \\ u_0 = \beta_{03} fal(e_2, \alpha_2, \delta_2) \\ u = u_0 - 2H_0 z_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\beta_{03}$  为比例系数;  $u_0$  为控制输入。

## 2.2 模糊规则

由于自抗扰控制器的控制性能取决于控制器内部参数, 于是, 利用模糊规则, 在线实时整定其内部参数, 以实现自适应控制。将  $e_2$  和  $e_3$  ( $e_2$  的变化率) 作为模糊输入变量,  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$  分别为模糊输出变量, 利用模糊规则对参数  $\beta_{01}, \beta_{02}$  进行在线修改。在其各自论域上分别定义 5 个语言子集为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。这里取  $e_2, e_3$  的基本论域分别为  $\{-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2\}$  和  $\{-0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02\}$ ,  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$  的论域为  $\{-0.06, -0.03, 0, 0.03, 0.06\}$ , 取  $K_3 = 0.0001$ 。模糊推理采用 Mamdani 型,  $e_2, e_3$  的隶属度函数为三角形 (trimf), 去模糊化算法采用面积重心法, 得到如表 1 所示的模糊规则表,  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$  隶属度函数如图 5 所示。

表 1  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$  的模糊规则表  
Tab.1 Fuzzy rule table of  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$

$e$	$ec$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB/PB	PS/PS	PS/PS	PS/PS	ZO/ZO
NS	PS/PS	PS/PS	PS/PS	ZO/ZO	NS/NS
ZO	PS/PS	PS/PS	ZO/ZO	NS/NS	NS/NS
PS	PS/PS	ZO/ZO	NS/NS	NS/NS	NS/NS
PB	ZO/ZO	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NB/NB

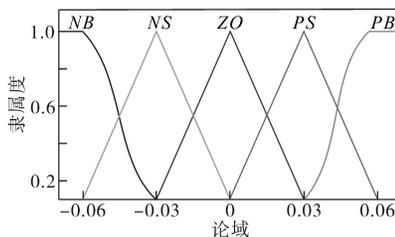


图 5  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$  隶属度函数

Fig.5 Membership function of  $\Delta\beta_{01}, \Delta\beta_{02}$

## 3 仿真分析

研究系统单线图如图 6 所示, 双馈风力发电系统的风电场由 500 台单机容量为  $1.67 \text{ MV} \cdot \text{A}$  的双馈风机组成, 并经过 70 km 输电线接入母线 1。三台同步发电机  $SG_1 \sim SG_3$ 、原动机调速器、同步机励磁调节器及输电线路使用的模型及参数同文献[14]。在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型, 设置在中风速情况下进行, 中等风速仿真如图 7 所示。

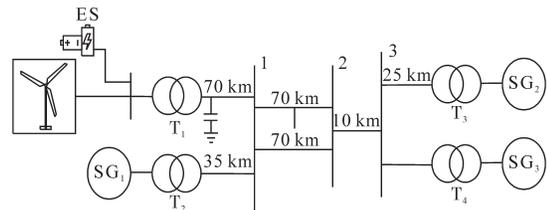


图 6 研究系统单线图

Fig.6 Single line diagram of research system

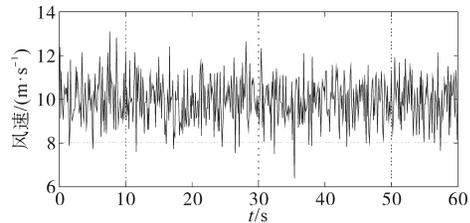


图 7 中等风速仿真结果图

Fig.7 Simulation results of medium wind speed

图 8 所示为电网频率仿真结果, 图 9 所示为有功功率仿真结果。

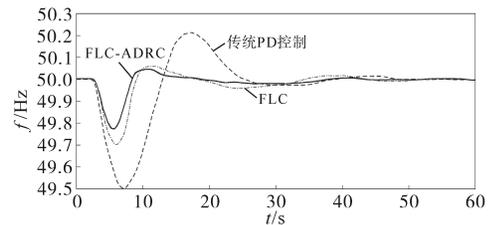


图 8 电网频率仿真结果图

Fig.8 Simulation results of grid frequency

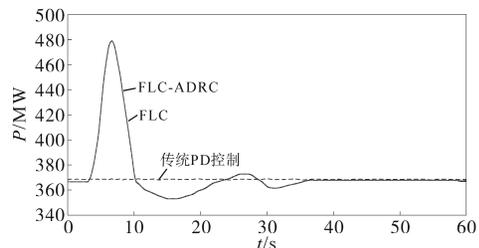


图 9 有功功率仿真结果图

Fig.9 Simulation results of active power

在图 8 中, 当第 6 s 负载突增时, 传统 PD 控制模式下, 系统频率由 50 Hz 下降到 49.5 Hz; 基于

FLC和FLC-ADRC储能惯量控制的系统频率最低值分别下降到49.7 Hz和49.8 Hz,相对于传统PD控制模式下分别提升了0.4%和0.6%。在图9中,传统PD控制模式下有功功率动态过程几乎不变,而FLC和FLC-ADRC的动态响应相似。分析可知,FLC和FLC-ADRC的储能惯量控制策略都给系统提供了有效的有功功率支撑,且基于FLC-ADRC储能惯量控制的电网动态过程较采用FLC明显改善。

图10所示为转子转速仿真结果,图11所示为ES输出功率仿真结果。

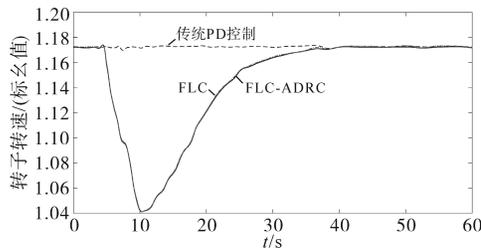


图10 转子转速仿真结果图

Fig.10 Simulation results of rotor speed

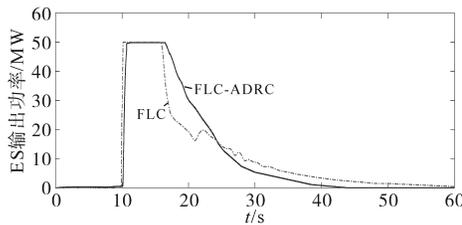


图11 ES输出功率仿真结果图

Fig.11 Simulation results of ES output power

在图10中,传统PD控制模式下转子转速几乎不变,FLC和FLC-ADRC可通过DFIG转子转速降低来释放动能,进而为频率提供部分支撑。在图11中,采用FLC-ADRC储能惯量控制的ES在10.2 s投入使用,相较于FLC晚0.2 s,FLC的ES控制比FLC-ADRC更早投入使用,FLC中所需的能量大于FLC-ADRC中所需的。因此,FLC-ADRC储能系统输出功率时长相对FLC的时长缩短了。

#### 4 结论

针对转子与电网频率解耦,双馈风电机组无法对系统频率提供有力支持,本文提出一种基于模糊自抗扰储能惯量控制方法,在储能惯量控制方法中引入自抗扰控制器,然而自抗扰控制器内部参数众多,于是采用模糊规则智能调节扩张状态观测器参数,达到为风电场电网频率提供有效支撑的目的。仿真表明,将模糊控制和自抗扰控

制相结合,与模糊虚拟惯量控制方法相比,模糊自抗扰控制能提高系统的动态性能、鲁棒性和抗干扰能力,提高电网频率跟踪精度。

#### 参考文献

- [1] Li Y J, Xu Z, Wong K P. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support[J]. IEEE Trans. on Power Syst., 2016, 32(4): 3027-3037.
- [2] 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 Trans. on Power Syst., 2016, 31(5): 3414-3423.
- [3] 国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)[EB/OL]. 2016-11-7[2020-01-05]. <http://www.chinapower.com.cn/focus/20161108/64097.html>.
- [4] Wang S, Hu J, Yuan X, et al. On inertial dynamics of virtual synchronous-controlled DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Trans. on Energy Convers., 2015, 30(4): 1691-1702.
- [5] Hippel S, Jauch C. Hydraulic-pneumatic flywheel system in a wind turbine rotor for inertia control[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 33-41.
- [6] Miao L, Wen J Y, Xie H L, 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.
- [7] Athari M H, Ardehali M M. Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 890-902.
- [8] Liu F, Wei L, Mei S, et al. ESO-based inertia emulation and rotor speed recovery for DFIGs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1209-1219.
- [9] Li S, Zhang K, Li J, et al. On the rejection of internal and external disturbances in a wind energy conversion system with direct-driven PMSG[J]. Isa Transactions, 2016, 61: 95-103.
- [10] Ayirir Wiam, Haddi Ali. Direct torque control-based power factor control of a DFIG[J]. Energy Procedia, 2019, 162: 296-305.
- [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): 20-26, 33.
- [12] 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.
- [13] 王攘攘,张广明,梅磊. 基于状态观测器的DC-DC升压变换器滑模控制[J]. 电气传动, 2019, 49(5): 55-58, 78.
- [14] 奚鑫泽,耿华,杨耕. 含主动轴系扭振阻尼的并网双馈风电场惯量控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 136-144.

收稿日期:2020-01-05

修改稿日期:2020-02-28