

文章编号: 1006-2467(2021)S2-0042-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.S2.007

基于极限学习机的双馈感应风力发电机综合 自适应调频参数优化方法

金皓纯¹, 葛敏辉¹, 徐波²

(1. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120; 2. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对新能源并网带来的系统频率稳定问题, 双馈感应风力发电机(DFIG)多采用虚拟惯量及下垂控制参与电力系统的调频。为了能够充分发挥DFIG的调频能力, 通过分析频率动态响应各阶段虚拟惯量及下垂系数的作用机理, 提出对虚拟惯量及下垂系数的自适应控制。基于极限学习机预测不同等级风速下的各项调频指标, 通过对调频指标建立目标函数对综合自适应调频控制参数的优化, 并提出最优减载率有功备用控制方案。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 双馈感应风力发电机; 极限学习机; 综合自适应控制; 频率动态响应

中图分类号: TM 743

文献标志码: A

Optimization of DFIG Comprehensive Adaptive Frequency Regulation Parameters Based on Extreme Learning Machine

JIN Haochun¹, GE Minhui¹, XU Bo²

(1. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China; 2. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient system frequency regulation ability caused by wind turbines connected to the grid, doubly fed induction generators (DFIG) mostly use virtual inertia and droop control to participate the frequency regulation of the power system. However, traditional control strategies cannot fully utilize the frequency regulation capability of DFIG. In order to further improve the frequency stability of the system, the adaptive control of the virtual inertia and the droop coefficient are realized by analyzing the effects of the virtual inertia and the droop coefficient in each stage of the frequency dynamic response. Then, based on the extreme learning machine to predict the various frequency regulation index at different levels of wind speed, the objective function of the frequency regulation index is established to achieve the optimization of the comprehensive adaptive frequency regulation parameters, and the variable load shedding rate active standby control scheme adapted to the wind speed is proposed. The simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); extreme learning machine; integrated adaptive control; frequency dynamic response

收稿日期: 2021-10-20

作者简介: 金皓纯(1983-), 男, 浙江省绍兴市人, 高级工程师, 从事调度自动化、电力监控系统网络安全研究。

通信作者: 徐波, 男, 博士; E-mail: xubo@shiep.edu.cn.

双馈感应风力发电机(DFIG)一般采用最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)运行方式,通过控制转子电流即可实现变速恒频运行和有功、无功功率的解耦控制,这些优良的性能使其成为当前风电市场的主流机型^[1-4]。然而,双馈感应风力发电机通过电力电子变换装置输出部分电能,导致其输出功率与频率解耦。当系统频率发生功率扰动时,双馈感应风力发电机无法像传统发电机释放自身的旋转动能来提供惯量支撑或改变原动机出力提供有功备用^[5-6]。随着风电渗透率的不断提高,系统的调频备用功率持续降低,导致电网存在隐患^[7-8]。

针对双馈感应风力发电机因无法响应系统频率变化而不能参与系统的调频的问题,国内外专家提出了大量控制策略与改进方案。文献[9-10]在MPPT运行基础上增加了虚拟惯性和下垂控制,参与系统的频率调节,然而不同风速下,机组调频能力不同,采用传统定系数控制方法的调频效果较差。为了适应风速的变化,文献[11]采用试错法分析不同虚拟惯量及下垂系数的调频效果选择最优参数,与超速控制结合实现一次调频功能。但试错法得到的优化参数具有一定片面性,同时定减载率可能过分牺牲风能或造成有功备用不足。而且在频率变化不同阶段调频系数也发挥不同的作用,因此在适应风速变化的同时还需适应频率的变化。文献[12-15]通过分析虚拟惯量在频率变化不同阶段的作用,从而自适应改变虚拟惯量系数的大小,然而其应用对象为虚拟同步机,并未考虑系统实际情况确定控制参数优化。文献[16]在频率下降及上升阶段改变虚拟惯量的大小,同时引入超级电容器作为备用功率,进行下垂控制参与一次调频。然而并未确定具体控制策略及调频参数,且由于技术成熟度和产业规模的影响,目前储能系统的成本很高,实现困难。

本文通过频率变化率及偏差将频率动态响应划分不同阶段,分析虚拟惯量及下垂系数在各阶段与频率稳定性的关系,从而实现对虚拟惯量及下垂系数的协同自适应控制。此外,基于极限学习机在不同等级风速下预测各项调频指标,建立了调频指标的目标函数对综合自适应调频控制参数寻优,并提出了风机在超速减载控制下的最优减载率控制方案,即提供稳态频率调节所需持续有功备用。最后在MATLAB/Simulink中建立两区四机风机并网模型,仿真结果表明采用综合自适应控制能有效提高电力系统频率稳定性。

1 双馈感应风力发电机运行特性

双馈感应风力发电机转子的质量远大于同步发电机转子的质量,且具备变速恒频运行能力,故其中存储了大量旋转动能,在频率扰动初期可快速提供惯量支撑。其存储的动能的大小为

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

式中: J 为风力机和发电机的等效转动惯量; ω 为转子转速。

定义双馈感应风力发电机的惯性时间常数 H 为额定转速下转子动能与额定容量的比值,即

$$H = \frac{E_k}{S_n} = \frac{\frac{1}{2} J \omega_n^2}{S_n} \quad (2)$$

式中: ω_n 为额定角速度; S_n 为额定容量。

设双馈感应风力发电机初始转速为 ω_0 , t 时刻的转速为 $\omega(t)$,则转子释放动能表达式为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} J (\omega_0^2 - \omega^2(t)) \quad (3)$$

然而通过改变转子转速以释放动能的方法无法提供持续的频率支撑,因为转速会跌越安全限值,造成风机退出调频,使频率出现二次跌落,且利用转子动能进行功率支撑与MPPT控制发生冲突。如图1所示,在不增加储能的情况下,为让风机具有一定有功备用,须超速减载运行^[8]。B点风机处于减载工作状态,负荷突增时转子转速降低,释放旋转动能提供暂态频率支撑。同时风机的功率运行点向MPPT运行点靠拢,并持续增发有功备用支撑稳态频率。减载备用功率为

$$\Delta P_{del} = P_{MPPT} d_e \quad (4)$$

式中: P_{MPPT} 为风机采用MPPT控制时的输出功率; d_e 为超速减载控制的减载率。

为使风机参与电网暂稳态频率调整,可在MPPT控制运行的基础上加入采用比例微分控制

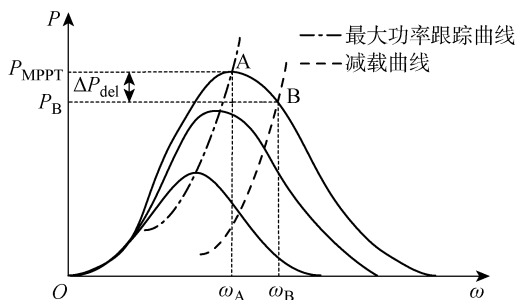


图1 超速减载原理图

Fig. 1 Principle diagram of overspeed and load shedding

的有功增量^[9]. 其表达式如下:

$$\Delta P_v = -K_d \frac{df}{dt} - K_p \Delta f \tag{5}$$

式中: K_d 为虚拟惯量系数; df/dt 为频率变化率; K_p 为下垂系数; Δf 为系统频率偏差.

2 综合自适应控制策略

由上述分析可知,比例微分系数决定了机组有功增量大小. 但受风速的影响,风机转速不断变化,若采用较大的控制系数易导致机组失稳,而较小的控制系数则不能充分发挥机组的调频能力,因此固定调频系数无法较好地适应风速的变化. 而且为进一步改善系统频率稳定,在频率动态变化的不同阶段比例微分系数取值也应不同. 综上所述,对 DFIG 调频控制系数 K_d 和 K_p 的整定需要进一步深入研究.

2.1 基于风速的自适应控制

双馈感应风力发电机的转速会随风速不断改变,而风速具有不确定性,因此在频率波动时风机能

提供的调频能量会有所不同. 所以应当在不同风速下,考虑风机可参与系统调频程度自适应改变虚拟惯量及下垂系数的大小,以此来适应风速的变化. 即在高风速时设置较大的调频系数,承担相应的调频任务,而在低风速时,调频系数不宜设置过大,应保证风机自身的安全稳定运行^[11]. 风机的虚拟惯量系数 K_d 和下垂系数 K_p 受到风速的约束,可表达为

$$\left. \begin{aligned} K_d &= F_1(v) \\ K_p &= F_2(v) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: $F_1(v)$ 、 $F_2(v)$ 均为风速 v 的函数.

2.2 综合自适应控制策略

当系统出现功率扰动后,发电功率与负荷功率不平衡会导致系统的频率的偏离,以负荷突增为例,频率及频率变化率动态变化过程如图 2 所示.

根据系统频率及频率变化率的正负可以将频率的动态响应过程划分为 4 个阶段(a-b, b-c, c-d, d-e),DFIG 虚拟惯量系数 K_d 及下垂系数 K_p 的值应在各阶段自适应调节,从而改善系统频率稳定性,每个阶段系统频率及其变化率的状态如表 1 所示.

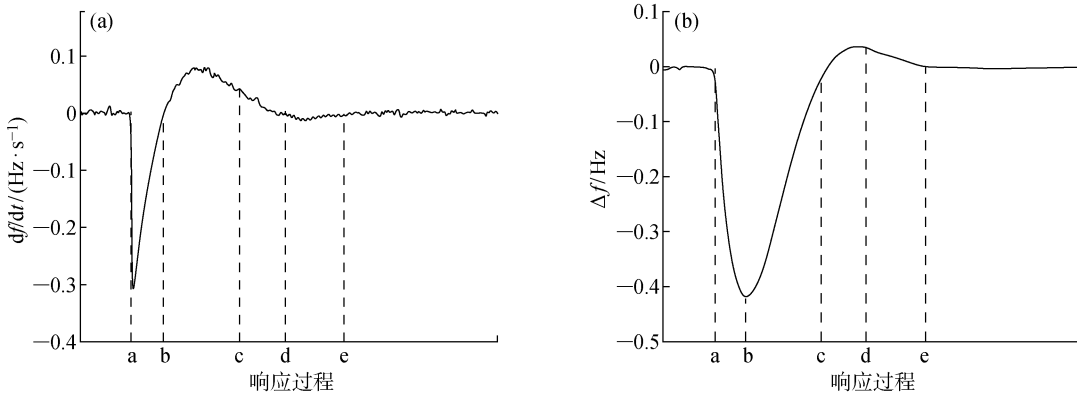


图 2 频率偏差及频率变化率曲线

Fig. 2 Curves of frequency deviation and rate of change of frequency

表 1 频率偏差及频率变化率

Tab. 1 Frequency deviation and rate of change of frequency

区间	Δf	df/dt	符号	阶段
a-b	<0	<0	同号	偏离
b-c	<0	>0	异号	恢复
c-d	>0	>0	同号	偏离
d-e	>0	<0	异号	恢复

根据频率偏差及频率变化率是否同号可以将 4 个阶段分为偏离阶段和恢复阶段. 在频率动态响应初期阶段(a-b),频率偏差和频率变化率同号均为负值,频率快速下降为偏离阶段,系统频率偏离稳态值在 b 点达到最大频率偏差,而虚拟惯量控制通过响

应系统频率变化率可以短时提供较大功率支撑,增大系统的等效惯量. 由式(5)可知虚拟惯量系数 K_d 与系统频率变化率成反比关系,所以在这一阶段需要增大 K_d 阻止系统频率的快速下降,防止产生过大系统频率偏差触发低频减载. 同理,在频率响应 c-d 阶段,频率偏差和频率变化率同号均为正值,需要增大 K_d .

在频率动态响应 b-c 阶段,频率偏差和频率变化率异号,这一阶段系统频率偏差 Δf 趋向于 0,频率趋向于稳态值,如增加 K_d ,会减慢频率的恢复速度,不利于频率快速稳定,则应当减小 K_d ,使系统频率尽可能快地恢复到稳态值. 同理,在频率响应 d-e 阶段,频率偏差和频率变化率异号,频率趋向于稳态

值,需要减小 K_d .

基于上述分析可实现 DFIG 虚拟惯量系数 K_d 的自适应控制算法,即由频率偏差和频率变化率共同决定 K_d 的大小;当两者同号时频率处于偏离阶段,应当增大虚拟惯量值的大小,当两者异号应当减小虚拟惯量值的大小.其表达式为

$$K_d = \begin{cases} K_{d0}, & \Delta f \frac{df}{dt} \leq 0 \\ K_{d0} + k_1 \left| \frac{df}{dt} \right|, & \Delta f \frac{df}{dt} > 0 \text{ 且 } \left| \frac{df}{dt} \right| > M \\ K_{d0}, & \left| \frac{df}{dt} \right| \leq M \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_{d0} 为虚拟惯量系数稳态值; k_1 为虚拟惯量调节系数; M 为频率变化率的阈值,目的是滤除 $\frac{df}{dt}$ 接近 0 时产生的微小波动,以避免 $\Delta f \frac{df}{dt}$ 判定值因正负判断紊乱而失效.

在频率动态响应的各个阶段,虚拟惯量系数 K_d 和下垂系数 K_p 对频率稳定性分别起到不同的作用^[5].在频率变化初期,虚拟惯量控制能对频率变化率快速响应提供有功支撑,减小频率偏差及频率变化率,但频率趋于稳定的调整时间随之增加.随着 K_p 的增加,频率的偏移峰值随之降低,但使系统到达峰值的速度更快,即加快了 a-c 阶段系统频率的变化.当频率达到稳态时,虚拟惯量控制不再起作用,而由下垂控制起主要作用.对式(5)进行变化可得:

$$K_p \Delta f = \Delta P_v - K_d \frac{df}{dt} \quad (8)$$

当系统频率达到稳态时,下垂系数决定系统的稳态频率偏差,该值越大则稳态频率偏差越小,同时影响频率趋于稳定的时间.因此在系统频率趋向稳态或处于稳态时,应增大 K_p ,从而减小系统频率的稳态偏差,加快频率的恢复速度.

因此,为进一步改善系统频率的动态响应,由频率偏差和频率变化率共同决定 K_p ,即当两者异号时,频率处于恢复阶段,应增大 K_p 值,其表达式为

$$K_p = \begin{cases} K_{p0}, & \Delta f \frac{df}{dt} > 0 \text{ 且 } \left| \frac{df}{dt} \right| > M \\ K_{p0} + k_2 |\Delta f|, & \Delta f \frac{df}{dt} \leq 0 \\ K_{p0}, & \left| \frac{df}{dt} \right| \leq M \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_{p0} 为下垂系数稳态值; k_2 为下垂控制调节

系数.

3 基于极限学习机的控制参数优化

由上述分析可知,本文提出的综合自适应控制策略考虑了风速及频率动态响应过程的影响,使得 DFIG 调频控制参数能适应风速及频率变化并主动参与系统的频率支撑.此外,还需根据调频效果及机组运行状态对表达式中各参数进行优化,考虑的调频效果指标包括:频率最大偏差 Δf_{\max} 、频率稳态偏差 Δf_{ste} 及频率恢复时间 Δt_{ste} .同时,还需考虑 DFIG 自身的运行状态指标.首先在调频过程中,风机的转速并不能持续的下降或上升,且变化范围不超过 0.33 p. u.,否则会造成系统频率的二次跌落.其次,还需考虑转速恢复时间,即当转速达到最低点后应尽快恢复至稳态以保证机组自身的稳定运行.基于以上评估指标可对综合自适应控制中的调频参数进行优化.由于调频参数与各项评估指标之间为复杂的非线性关系,数据量庞大,因此考虑基于极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)对综合自适应调频参数进行优化.

3.1 极限学习机模型

极限学习机是一种改进的单隐层神经网络的算法,能克服传统的单隐层神经网络需要多次迭代的缺点^[17].从学习效果来看,ELM 具有训练参数少、学习效率快、泛化能力强和易于在全球极小值收敛的优点.给定 m 个训练样本集合 $\{\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i\}$,其中 $\mathbf{x}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{im}]^T, i = 1, 2, \dots, m$. ELM 的结构如图 3 所示,图中 n, L, m 分别表示输入层、隐藏层与输出层的层数.

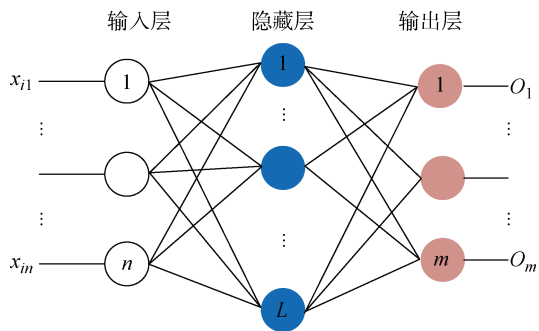


图 3 ELM 网络结构

Fig. 3 Network structure of ELM

那么,具有 L 个隐藏层的 ELM 输出为

$$O_i = \sum_{j=1}^L \beta_j g(\mathbf{w}_j \cdot \mathbf{x}_i + b_j) \quad (10)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

式中： $g(\cdot)$ 为神经元激活函数，本文取 Sigmoid 函数； $\boldsymbol{w}_i = [\boldsymbol{w}_{i1} \ \boldsymbol{w}_{i2} \ \cdots \ \boldsymbol{w}_{im}]$ 为输入权值向量； $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_L]^T$ 为输出权值向量； b_j 为输入层和隐含层之间的偏置值。由式(10)可以得到一个矩阵形式的方程：

$$\boldsymbol{H}\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{Y} \tag{11}$$
$$\boldsymbol{Y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_m]^T$$
$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} g(\boldsymbol{w}_1 \cdot \boldsymbol{x}_1 + b_1) & \cdots & g(\boldsymbol{w}_m \cdot \boldsymbol{x}_1 + b_L) \\ \vdots & & \vdots \\ g(\boldsymbol{w}_1 \cdot \boldsymbol{x}_m + b_1) & \cdots & g(\boldsymbol{w}_m \cdot \boldsymbol{x}_m + b_L) \end{bmatrix}$$

为求得在训练集上最优效果的 $\boldsymbol{\beta}$ ，就需使其训练误差达到最小。即 $\boldsymbol{\beta}$ 可以由式(11)的极小 2 范数最小二乘解获得：

$$\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{H}^+ \boldsymbol{Y} \tag{12}$$

式中： \boldsymbol{H}^+ 为 \boldsymbol{H} 的穆尔-彭罗斯广义逆矩阵。

3.2 基于极限学习机的调频参数优化

本文根据 DFIG 调节效果及自身运行状态来确定综合自适应控制调频参数的取值，基于上述分析考虑的评估指标包括：频率最大偏差 Δf_{\max} ，频率稳态偏差 Δf_{ste} 及频率恢复时间 Δt_{ste} 、转速最大偏差 $\Delta \omega_{\min}$ 及转速恢复时间 Δt_{ω} 。在不同风速下使用 ELM 精确预测各项评估指标，并建立目标函数进行寻优，即可得到对应的最优调频参数。极限学习机优化调频参数流程图如图 4 所示。

首先获得 ELM 数据集，在如图 5 所示的仿真

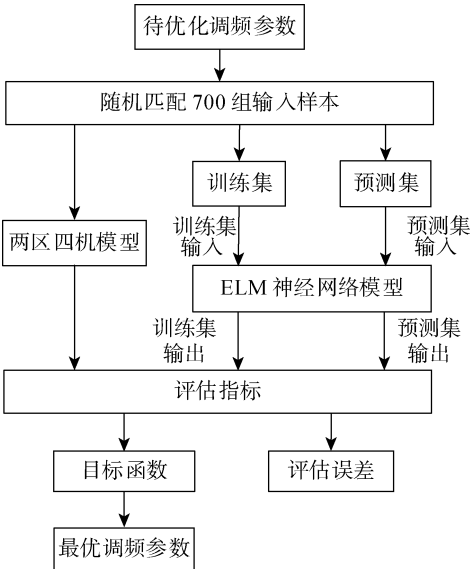


图 4 ELM 参数训练优化流程图
Fig. 4 Flow chart of ELM parameter training optimization

模型中进行高低中 3 种不同等级风速的仿真。将模型中 G1 替换为 160 台 1.5 MW 双馈感应风力发电机的风电场。负荷 L1 和 L2，突变负荷 Ld 和 Le 的数值分别为 752, 748, 100, 100 MW。设置负荷 Le 在 20 s 时突增 100 MW，认为风电场各台风机风速近似相同，通过多台风机的集中可将风电场视为单台等值机组^[11]。不同等级风速下各调频参数取值范围如表 2 所示。

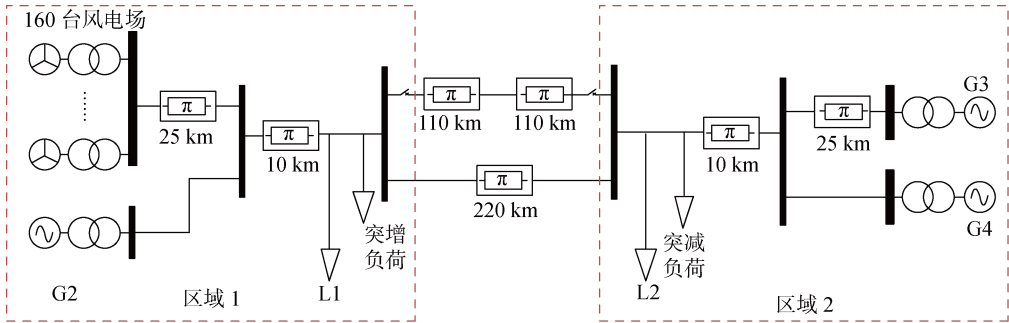


图 5 两区四机风机并网模型
Fig. 5 Four-machine two-area system with doubly fed induction generators

表 2 不同风速下调频参数取值范围
Tab. 2 Value range of frequency regulation parameters at different wind speeds

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	K_{p0}	K_{d0}	k_1	k_2
8	0~20	0~5	0~70	0~70
10	0~40	0~10	0~70	0~70
12	0~50	0~20	0~70	0~70

然后在高中低每种等级风速下随机匹配 700 组调频参数作为极限学习机的数据集输入样本，同时通过仿真获得频率动态响应指标及 DFIG 调频指标作为极限学习机的数据集输出样本，将其中 600 组作为训练集加入到图 4 模型中，对 ELM 模型进行随机特征映射及参数求解，得到可以精确体现调频参数和评估指标之间非线性关系的 ELM 模型，剩余 100 组作为测试集用来评估最终泛化能力。表 3

表 3 不同风速下评估指标预测误差

Tab. 3 Forecast errors of evaluation indicators at different wind speeds

$v/(m \cdot s^{-1})$	$\Delta f_{\max}/Hz$	$\Delta f_{ste}/Hz$	$\Delta \omega_{\min}/(p.u.)$	$\Delta t_{ste}/s$	$\Delta t_{\omega}/s$
8	0.013	0.027	0.019	0.17	0.34
10	0.029	0.035	0.022	0.24	0.46
12	0.035	0.028	0.013	0.32	0.35

为不同风速下测试集输出与实际数据之间的误差,可见 ELM 模型经过训练后具有较高的预测精度。

为了兼顾风机调频效果和稳定运行,根据各项指标的相对重要性赋予对应的权重,然后对各项指标进行加权求和建立目标函数,待优化的目标函数的表达式为

$$F = \min[0.6(\Delta f_{\max} + \Delta f_{ste}) + 0.1\Delta \omega_{\min} + 0.3(\Delta t_{ste} + \Delta t_{\omega})]$$
 (13)

约束条件为调频时机组转速允许的变化范围:

$$|\Delta \omega_{\min}| < 0.33$$
 (14)

最后在 DFIG 转速约束下对输出评估指标寻优,在形成的目标函数中 F 的值最小时,即为基于加权求和的评估指标整体最优解,其对应输入参数的即为最优调频参数. 最终得到高低中 3 种不同等级风速下的 DFIG 最优调频参数如表 4 所示。

为使风机充分利用风能资源,在满足调频能力的同时减少有功控制成本,使减载备用功率与下垂

表 4 不同风速下最优调频参数

Tab. 4 Optimal frequency regulation parameters at different wind speeds

$v/(m \cdot s^{-1})$	K_{p0}	K_{d0}	k_1	k_2
8	12	0	25	25
10	25	4	45	49
12	40	5	63	49

控制参与稳态调频所需有功功率平衡,将不同风速下的最优自适应参数及对应的稳态频率偏差代入式 (6),可得风机参与稳态调频所需提供的持续有功支撑即为超速减载备用,再结合式 (5) 和 (9) 可得不同风速下 DFIG 最优减载系数表达式为

$$d_e = \left| \frac{(K_{p0} + k_2 |\Delta f_{ste}|) \Delta f_{ste}}{P_{MPPT}} \right|$$
 (15)

4 仿真验证

4.1 恒定风速下的仿真结果分析

为验证所提策略,采用如图 5 所示的仿真模型. 在恒定风速 10 m/s 下对比无附加控制、传统虚拟惯量控制、虚拟惯量自适应控制和综合自适应控制策略在出现功率扰动时系统频率(f)、DFIG 转速、有功功率(P_{act})及调频参数的变化. 设置负荷 L_e 在 10 s 时突增 100 MW,仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,当系统发生功率扰动后,风电机组在未附加功率控制时,因其机械和电磁控制解耦,不

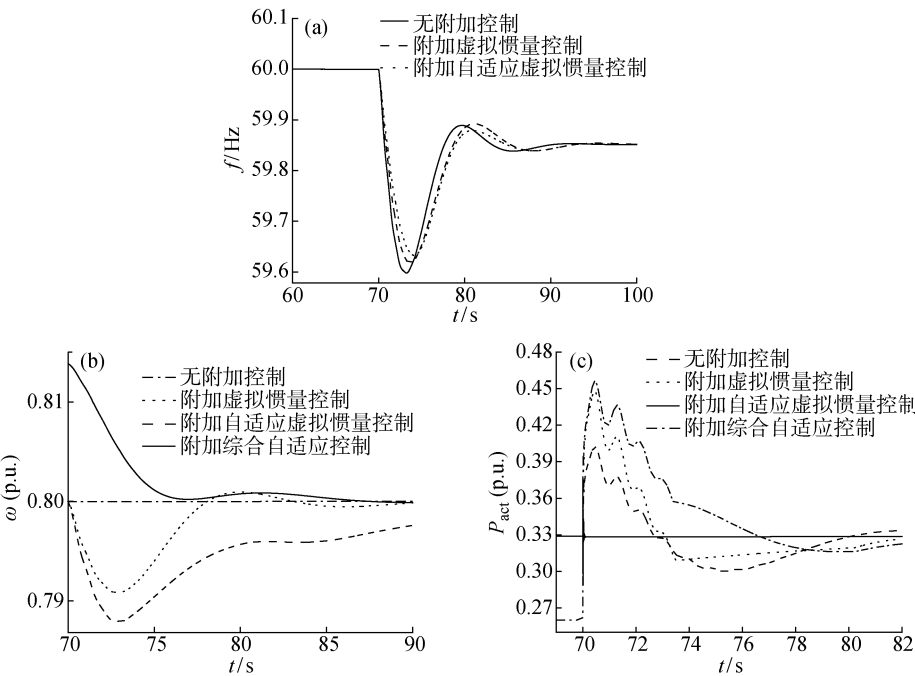


图 6 不同控制策略调频效果对比

Fig. 6 Comparison of frequency regualtion effects of different control strategies

响应系统频率变化提供功率支撑,其转子转速不发生变化.在恒定虚拟惯量系数控制下,风机转速下降释放转子动能,频率最大偏差减小,但恢复阶段频率恢复速度较慢,且风机转速出现二次波动.在自适应虚拟惯量控制下,偏离阶段虚拟惯量系数增大,从而提供更多转子旋转动能,DFIG 转子转速下降程度加大,但转速仍能恢复且未出现二次波动,频率最大偏差进一步减小;在恢复阶段虚拟惯量系数减小,减小虚拟惯量附加功率的阻碍作用,加快了频率恢复速度.而加入综合自适应控制后,风机运行在超速减载模式下初始转速高于最大功率追踪下的初始转速,从而在暂态阶段提供更多的转子旋转动能,并留有一定有功备用.加入下垂系数控制进一步降低最大频率偏差,当系统达到稳态,增大下垂系数,充分利用预留给减载功率提供持续有功功率支撑,有效减小了稳态频率偏差.

综合自适应控制下的虚拟惯量和下垂系数的变化情况如图 7 所示.分析可知,虚拟惯量系数和下垂系数分别参与频率的暂态和稳态恢复阶段,有效提高了系统频率稳定性.

为验证所提控制策略在负荷突减情况下的有效性,设置负荷 L_d 在运行到 10 s 时突减 100 MW.对

比无附加控制、传统虚拟惯量控制、虚拟惯量自适应控制和综合自适应控制时系统频率的变化,如图 8 所示.由图可知,负荷突减时,自适应虚拟惯量控制下的频率最大偏差减小,同时加快频率恢复速度.综合自适应控制下利用减载功率有效减小了稳态频率偏差.

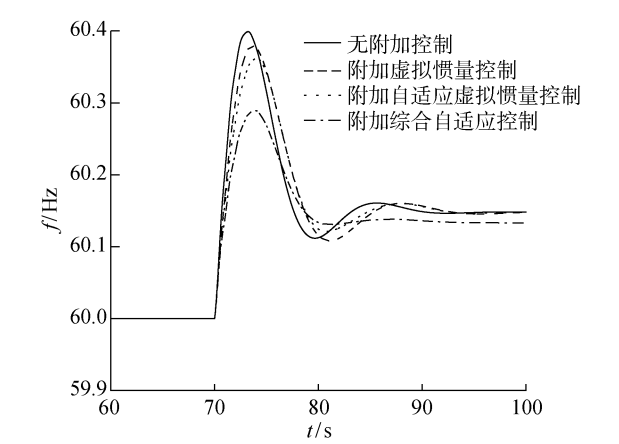


图 8 负荷突减时不同控制方式下频率变化曲线
Fig. 8 Curves of frequency variation in different control modes in case of sudden load reduction

4.2 随机风速下的仿真结果分析

为进一步验证所提综合自适应控制策略的有效性,设置如图 9 所示的随机风速.在功率扰动时分别采用无附加控制和综合自适应控制在功率扰动时,分别对比系统频率的变化及风电机组有功功率,仿真结果如图 10 所示.在随机风速模型中,设置负荷 L_e 在 20 s 时突增 100 MW, 50 s 时负荷 L_d 突减 100 MW.

由图 10 可知,在随机风速下发生功率扰动时本文所提综合自适应控制策略,以及基于极限学习机优化后的调频参数,能够充分利用双馈感应风力发电机转子旋转动能及减载备用功率提供暂稳态有功

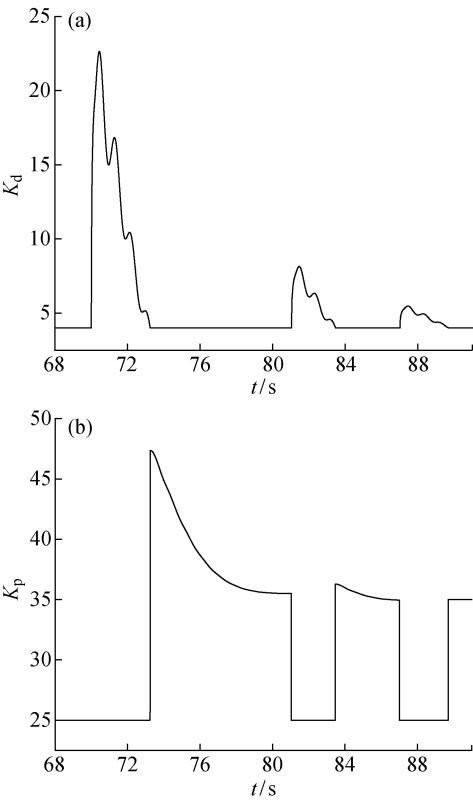


图 7 虚拟惯量及下垂系数变化曲线

Fig. 7 Curves of virtual inertia and droop coefficient variation

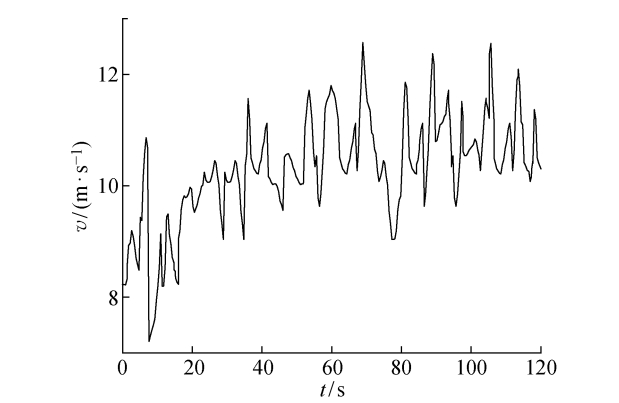


图 9 随机风速曲线

Fig. 9 Curve of random wind speed

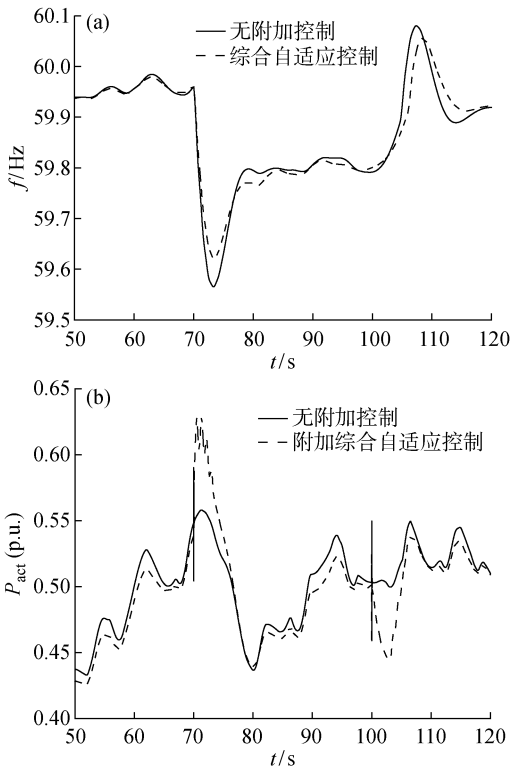


图 10 随机风速下调频效果对比

Fig. 10 Random wind speed frequency regulation effect

支撑,有效减小在频率动态响应过程中的频率偏差,加快频率恢复速度,有利于系统频率的快速稳定,提高了DFIG的调频能力。

5 结语

本文在对双馈感应风力发电机调频控制机理分析的基础上,提出频率动态响应的不同阶段确定双馈感应风力发电机的虚拟惯量系数和下垂控制系数的自适应方法,同时基于极限学习机提出了双馈感应风力发电机综合自适应调频参数优化方法。通过理论分析与仿真验证,结果表明:在风速变化不大或者随机风速情况下,本文方法能够确定最优综合自适应控制参数,并且根据稳态频率偏差确定风机在超速减载控制下的最优减载率,提高了双馈感应风力发电机的调频能力。

参考文献:

[1] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 638-646.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, *et al.*. Prospect of technology for large scale wind farm participating into power grid frequency regulation [J]. **Power System Technology**, 2014, 38(3): 638-646.

[2] 邵昊舒,蔡旭. 大型风电机组惯量控制研究现状与展望[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(10): 1166-1177.
SHAO Haoshu, CAI Xu. Research status and prospect of inertia control for large scale wind turbines [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2018, 52(10): 1166-1177.
[3] 秦晓辉,苏丽宁,迟永宁,等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(09): 36-43.
QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, *et al.*. Analysis of inertia support and primary frequency modulation function positioning of virtual synchronous generators in large power grids[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(09): 36-43.
[4] GEORGETA B, REMUS P, CRISTIAN P, *et al.*. Spatial assessment of wind power potential at global scale A geographical approach[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2018, 200(32): 1065-1086.
[5] 李少林,王伟胜,张兴,等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-70.
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, *et al.*. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(15): 64-70.
[6] LEE J, MULJADI E, SORENSEN P, *et al.*. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2016, 7(1): 279-288.
[7] 柴建云,赵杨阳,孙旭东,等. 虚拟同步发电机技术在风发电系统中的应用与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(09): 17-25.
CHAI Jianyun, ZHAO Yangyang, SUN Xudong, *et al.*. Application and prospect of virtual synchronous generator technology in wind power generation system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(09): 17-25.
[8] 张冠锋,杨俊友,孙峰,等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, *et al.*. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2017, 32(22): 225-232.
[9] 邢鹏翔,侍乔明,王刚,等. 风电机组虚拟惯量控制的响应特性及机理分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1302-1310.

- XING Pengxiang, SHI Qiaoming, WANG Gang, *et al.* Response characteristics and mechanism analysis about virtual inertia control of wind generators[J]. **High Voltage Engineering**, 2018, 44(4): 1302-1310.
- [10] 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.
- ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, *et al.* Wind-solar diesel microgrid frequency adjustment technology based on variable coefficient-based virtual inertia and overspeed control of doubly-fed wind turbines [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2015, 30(5): 59-68.
- [11] LI D, ZHU Q, LIN S, *et al.* A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2017, 32(1): 397-398.
- [12] 程启明, 余德清, 程尹曼, 等. 基于自适应旋转惯量的虚拟同步发电机控制策略[J]. **电力自动化设备**, 2018, 38(12): 79-85.
- CHENG Qiming, YU Deqing, CHENG Yinman, *et al.* Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive rotational inertia[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2018, 38(12): 79-85.
- [13] 杨旭红, 姚凤军, 郝鹏飞, 等. 基于改进型 RBF 神经网络的 VSG 转动惯量自适应控制[J]. **电测与仪表**, 2021, 58(2): 112-117.
- YANG Xuhong, YAO Fengjun, HAO Pengfei, *et al.* Adaptive control of VSG moment of inertia based on improved RBF neural network [J]. **Electrical Measurement and Instrumentation**, 2021, 58(2): 112-117.
- [14] 颜湘武, 孙颖, 李晓宇, 等. 基于双馈风力发电场虚拟惯量控制策略优化[J]. **华北电力大学学报**, 2020, 47(6): 42-51.
- YAN Xiangwu, SUN Ying, LI Xiaoyu, *et al.* Optimization of virtual inertia control strategy for doubly-fed wind farms [J]. **Journal of North China Electric Power University**, 2020, 47(6): 42-51.
- [15] 兰飞, 潘益丰, 时萌, 等. 双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(12): 51-59.
- LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, *et al.* Variable coefficient virtual inertia optimal control for doubly-fed wind turbines [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(12): 51-59.
- [16] HUANG G, SONG S J, GUPTA D. Semi-supervised and unsupervised extreme learning machines [J]. **IEEE Transactions on Cybernetics**, 2014, 44(12): 2405-2417.
- [17] 张林林, 胡熊伟, 李鹏, 等. 基于极限学习机的电力系统暂态稳定评估方法[J]. **上海交通大学学报**, 2019, 53(6): 749-756.
- ZHANG Linlin, HU Xiongwei, LI Peng, *et al.* Power system transient stability assessment based on extreme learning machine [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2019, 53(6): 749-756.

(本文编辑: 王一凡)

(上接第 36 页)

- ZHANG Feng, JIANG Yuan, LI Yu, *et al.* Design and implementation of automatic matching system for power dispatching operation mode and stability limit [J]. **Electronic Technology & Software Engineering**, 2018(10): 127-129.
- [12] 王衡, 姜源, 王开科, 等. 基于稳控策略规则库的电网运行分析预警系统[J]. **中国设备工程**, 2018(11): 128-130.
- WANG Heng, JIANG Yuan, WANG Kaike, *et al.* Power network operation analysis and early warning system based on stability control strategy rule base [J]. **China Plant Engineering**, 2018(11): 128-130.
- [13] 吴云亮, 邓韦斯, 姚海成, 等. 基于两级结构的电网运行断面特征选择与在线生成[J]. **科学技术与工程**, 2020, 20(27): 11137-11142.
- WU Yunliang, DENG Weisi, YAO Haicheng, *et al.* Power system operation section feature selection and online generation based on two-stage structure [J]. **Science Technology and Engineering**, 2020, 20(27): 11137-11142.
- [14] 丁道敏. 电网运行与维护面临的挑战及对策[J]. **自动化应用**, 2016(11): 109-110.
- DING Daomin. Challenges and countermeasures of power grid operation and maintenance [J]. **Automation Application**, 2016(11): 109-110.

(本文编辑: 石易文)