

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211029

# 计及虚拟惯量控制的 DFIG 等效惯量在线评估与响应特性分析

王彤, 邢其鹏, 李鸿恩, 王增平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 虚拟惯量控制的引入提高了双馈风机的频率调节能力, 然而其惯量表现形式依赖于不同控制方式, 导致其惯量响应特性不尽相同, 亟需实现对其惯量水平及变化特征的准确感知。对基于转子动能虚拟惯量控制的双馈风机等效惯性定量表征及响应特性问题展开研究。首先, 基于利用转子动能的虚拟惯量控制策略, 建立了双馈风机在转子转速时间尺度下的简化模型, 进而理论推导了双馈风机等效惯性常数的数学解析式。其次, 针对解析式中双馈风机控制参数的“黑箱”问题, 提出了一种基于自适应扩展卡尔曼滤波的控制参数在线辨识方法。在此基础上, 利用双馈风机稳态运行下的量测信息在线评估双馈风机等效惯性常数, 定量表征双馈风机的惯量支撑能力。最后, 在改进的四机两区仿真系统上验证了该方法的准确性。仿真分析结果表明: 虚拟惯量控制参数主要影响惯量响应过程的初始阶段和恢复阶段, 速度控制器参数主要影响惯量响应过程的恢复阶段和稳定阶段。

**关键词:** 双馈风机; 虚拟惯量控制; 等效惯量; 控制参数; 自适应扩展卡尔曼滤波; 惯量响应特性

## Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control

WANG Tong, XING Qipeng, LI Hong'en, WANG Zengping

(State Key Laboratory of Alternate Electric Power Systems with New Energy Resources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** The introduction of virtual inertia control improves the frequency regulation ability of a DFIG. However, its manifestation of inertia depends on different control modes, resulting in different response characteristics. It is important to determine an accurate perception of its inertia level and change characteristics. In this paper, the quantitative characterization and response characteristics of the equivalent inertia of a DFIG based on virtual inertia control of rotor kinetic energy are studied. First, a simplified model of a DFIG in rotor speed timescale is established based on a virtual inertia control strategy utilizing rotor kinetic energy, and then the mathematical expression of equivalent inertia constant of the DFIG is derived theoretically. Secondly, given that there is a problem of unknown control parameters, an online evaluation method of control parameters based on adaptive extended Kalman filter is proposed. The equivalent inertia constant of the DFIG is calculated and the inertia support ability of the DFIG is quantitatively evaluated based on the measurement information of the DFIG in steady-state operation. Finally, the accuracy of the proposed method is verified on an improved 4-machine 2-area simulation system, and the simulation results show that the virtual inertia control parameters mainly affect the initial stage and recovery stage of the inertia response process, and the speed controller parameters mainly affect the recovery stage and stability stage of that process.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

**Key words:** doubly fed induction generator; virtual inertia control; equivalent inertia; control parameters; adaptive extended Kalman filter; inertia response characteristics

## 0 引言

在碳达峰、碳中和的时代背景下, 加快构建以

新能源为主体的新型电力系统是电力行业的必由之路。发展风电是实现国家能源战略, 兑现国际承诺的重要举措<sup>[1-3]</sup>。作为风电市场的主要机型, 双馈风机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)灵活快速的控制特性使其转子动能与输出有功功率相对解耦, 基本不具备惯量支撑能力<sup>[4]</sup>。随着风电机组渗

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51637005); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助(LAPS20021)

透率的提高, 电力系统整体惯量水平势必会被削弱, 严重恶化系统抗扰能力和稳定特性<sup>[4]</sup>。我国最新发布的《电力系统安全稳定导则 GB38755-2019》中明确要求新能源场站应具有足够的惯量支撑能力。

目前, 虚拟惯量控制技术<sup>[5-6]</sup>已成为提高电力系统惯量水平的重要手段, 在 DFIG 传统控制策略的基础上将电网频率偏差相关量引入变流器有功控制环节, 通过吸收或释放转子动能来抵抗电网频率波动, 进而向电网提供惯量支撑。DFIG 惯量响应特性与变流器类型、控制方式和机组运行工况息息相关<sup>[2]</sup>。含虚拟惯量控制的 DFIG 接入电网后, 系统惯量不再是无法改变的固有特性, 其时空变化特征将愈加突出, 扰动后的惯量响应过程将会更加复杂多变, 这使得传统电网的惯量分析技术的局限性日益凸显。

电力系统的惯量评估问题作为当前的研究热点<sup>[7-8]</sup>, 可为电网规划和调度运行提供科学参考, 对提高电力系统抗扰能力意义重大。根据评估方法分类, 可分为以下两类: 基于摇摆方程原理的评估方法<sup>[9-13]</sup>和基于准稳态运行数据的机器学习方法<sup>[14-15]</sup>。基于摇摆方程原理的评估方法是指根据扰动引起的功率不平衡量、频率变化率以及惯性时间常数之间的数学关系来计算获取惯量, 具体可分为以下几种方式: 基于系统在频率事件后的功率偏差和频率变化率的量测数据直接计算等效惯量<sup>[9-10]</sup>、根据摇摆方程推导机电振荡模态与等效惯量间的数学表达式, 提取机电振荡特征参数实现等效惯量在线评估<sup>[11-12]</sup>、结合摇摆方程与参数辨识技术, 从中提取惯量响应环节进而对等效惯量进行估计<sup>[13]</sup>。然而, 基于摇摆方程原理的评估方法一般需要外加扰动信号, 无法结合稳态运行下的量测信息对等效惯量实施在线跟踪和连续监测。针对此问题, 基于准稳态运行的惯量评估方法<sup>[14-15]</sup>对历史数据中的等效惯量及频率波动进行相关性分析, 构建含有等效惯量的学习模型, 利用准稳态下的频率量测数据实时评估惯量。然而, 上述评估方法大多聚焦于整个系统或部分区域的等效惯量, 关于 DFIG 自身惯量及响应特性的研究<sup>[16-17]</sup>相对较少。一般情况下, 同步机组的惯性时间常数已经给定, 且其数值基本不会发生变化。但对于 DFIG 来说, 其惯性响应特性较为复杂, 对系统整体惯性的时空分布特性影响较大。而系统暂态稳定以及暂态失稳模式不仅与系统总惯性相关, 与整个系统的惯性分布更为相关<sup>[18]</sup>。准确评估含虚拟惯量控制的 DFIG 自身等效惯量、深入分析其惯量响应特性可以为风电机组虚拟惯量的合理分配提供科学依据, 有利于调度运行人员掌握系统惯量的时

空分布情况, 进而为实际系统安全预警和实时紧急控制策略提供理论参考。

本文对含虚拟惯量控制的 DFIG 等效惯性定量表征及响应特性问题展开研究。首先, 在转子转速时间尺度下建立了计及锁相环和比例微分虚拟惯量控制的 DFIG 模型; 然后, 结合 DFIG 等效惯性常数的数学定义式, 推导了 DFIG 等效惯性常数在此模型下的数学频域解析式; 同时利用自适应扩展卡尔曼滤波(Adaptive Extended Kalman Filter, AEKF)参数辨识技术来获取 DFIG 等效惯性常数解析式中的控制参数; 在此基础上, 结合 DFIG 稳态运行下的量测数据计算其等效惯性常数, 并根据等效惯性常数的变化特征, 分析了虚拟惯量控制和速度控制器的控制参数对 DFIG 惯量响应过程各阶段的影响。

## 1 含虚拟惯量控制的 DFIG 模型

### 1.1 DFIG 转子转速尺度暂态模型

多时间尺度控制是 DFIG 并网系统的关键特征, 转子转速时间尺度<sup>[19]</sup>可用于该时间尺度下的储能元件(转子)的动态特性研究, 适合于利用转子动能的虚拟惯量响应特性分析。因此, 为了更加清晰和有针对性地解决 DFIG 等效惯量评估问题, 本文建立了 DFIG 在转子转速时间尺度下的简化模型, 并做出如下假设:

- 1) 忽略磁链的动态变化以及定子电阻损耗;
- 2) 不考虑风速和机械转矩的变化;
- 3) 电流内环控制响应速度远快于转子转速尺度, 认为转子电流快速跟踪指令值<sup>[19]</sup>;
- 4) 网侧变流器相对于转子侧变流器动态较小, 所以忽略网侧变流器动态<sup>[19]</sup>;
- 5) 最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)产生转子转速指令  $\omega_r^*$  会经过一个较大时间常数的低通滤波器后生成实际控制所用的转速指令值  $\omega_r^*$ , 因此, 为简化建模与分析, 可近似认为  $\omega_r^*$  不变<sup>[19]</sup>。

转子侧变流器控制通过定子电压定向矢量控制实现, 由转子电流控制的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{X_m}{X_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) = -\frac{3}{2} p \frac{X_m}{X_s} \psi_{ds} i_{qr} \quad (1)$$

式中:  $\psi_{ds}$  和  $\psi_{qs}$  分别为  $d$  轴定子磁链和  $q$  轴定子磁链;  $X_s$  为定子电感;  $X_m$  为定转子互感;  $i_{dr}$  和  $i_{qr}$  分别为定子绕组  $d$  轴电流和转子绕组  $q$  轴电流;  $T_e$  为电磁转矩;  $p$  为定子绕组极对数。

不考虑机械转矩的变化, 转子运动方程增量频

域表达式为

$$2H_d s \Delta \omega_r = -\Delta T_e \quad (2)$$

式中:  $T_e$  为 DFIG 的电磁转矩增量;  $H_d$  为 DFIG 固有惯性常数;  $\omega_r$  为 DFIG 转子转速;  $s$  为频域算子。

### 1.2 锁相环模型

DFIG 借助于锁相环实现定子电压定向控制, 如图 1 经典的三相同步锁相环等效模型所示,  $\omega_{pll}$  为锁相环估算的旋转角速度。当定子电压幅值  $U_s \approx 1$  p.u. 和系统基准角频率  $\omega_0 \approx 1$  p.u. 时, 该锁相环可用式(3)的传递函数表示<sup>[20]</sup>。

$$\delta_{pll} \approx \frac{K_{p\_pll} \cdot s + K_{i\_pll}}{s^2 + K_{p\_pll} \cdot s + K_{i\_pll}} \delta_s \quad (3)$$

式中:  $\delta_{pll}$  为锁相环输出的相角;  $K_{i\_pll}$  与  $K_{p\_pll}$  为锁相环的积分与比例增益;  $\delta_s$  为定子电压相角。

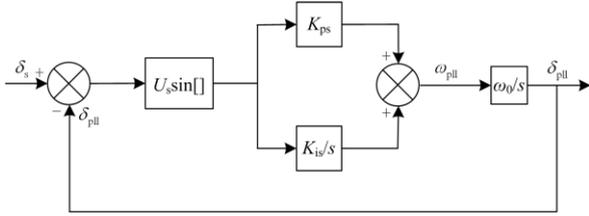


图 1 锁相环等效模型

Fig. 1 Phase-locked loop equivalent model

### 1.3 虚拟惯量控制模型

附加虚拟惯量控制的频率动态响应过程中, 电磁转矩指令值的变化包括虚拟惯量控制提供的  $\Delta T_{vic}$  和最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 模块提供的  $\Delta T^*$ 。

#### 1.3.1 基于锁相环频率的比例微分虚拟惯量控制

比例微分虚拟惯量控制在 DFIG 传统控制策略的基础上将电网频率偏差比例、微分相关量引入变流器有功控制环节来调节 DFIG 的实际输出功率, 进而实现对电网的惯量支撑。DFIG 通过锁相环估算  $dq$  坐标系旋转角速度来测量系统频率, 因此可以得到虚拟惯量控制提供的电磁转矩参考值  $T_{vic}$  为

$$T_{vic} = -K_{dvic} \frac{s \cdot \omega_{pll}}{1 + T_f \cdot s} - K_{pvic} (\omega_{pll} - \omega_0) \quad (4)$$

式中:  $K_{dvic}$  和  $K_{pvic}$  为虚拟惯量控制的微分和比例增益;  $T_f$  为滤波器的时间常数。

#### 1.3.2 最大功率追踪模块

最大功率追踪模块包含 MPPT 控制和速度控制器。在实际应用中, 某风速下的转子最优转速参考值通常根据机组的实时输出功率大小来计算<sup>[21]</sup>。作

为风电厂家的核心技术, 文献[22]中介绍了一种根据风机输出的有功功率  $P_e$  计算转速参考值  $\omega_r^*$  的算法, 其可表示为

$$\omega_r^* = \begin{cases} 1.2 & P_e \geq 0.46 \\ -0.75P_e^2 + 1.59P_e + 0.63 & P_e < 0.46 \end{cases} \quad (5)$$

当实际检测到的转速  $\omega_r$  与 MPPT 获得的转速参考值  $\omega_r^*$  间出现转速偏差时, 以转速偏差作为输入量经速度控制器调节发电机电磁转矩参考值来帮助转子转速恢复到最佳运行状态。最大功率追踪模块下的电磁转矩参考值  $T^*$  的传递函数表达式为

$$T^* = (\omega_r - \omega_r^*) (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}) \quad (6)$$

式中:  $K_{ps}$  和  $K_{is}$  分别为速度控制器的比例增益和积分增益。

由式(3)、式(4)和式(6)联立可得电磁转矩参考值的增量表达式, 如式(7)所示。

$$\Delta T_e = (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}) \Delta \omega_r - (\frac{K_{dvic} \cdot s}{1 + T_f \cdot s} + K_{pvic}) \cdot \frac{K_{p\_pll} \cdot s + K_{i\_pll}}{s^2 + K_{p\_pll} \cdot s + K_{i\_pll}} \Delta \omega_s \quad (7)$$

### 1.4 含虚拟惯量控制的 DFIG 简化模型

根据前述分析, 含虚拟惯量控制的 DFIG 在转子转速尺度下的 DFIG 简化模型如图 2 所示, 主要计及发电机暂态模型、传动链模型、锁相环模型、比例微分虚拟惯量控制、MPPT 控制与速度控制器。

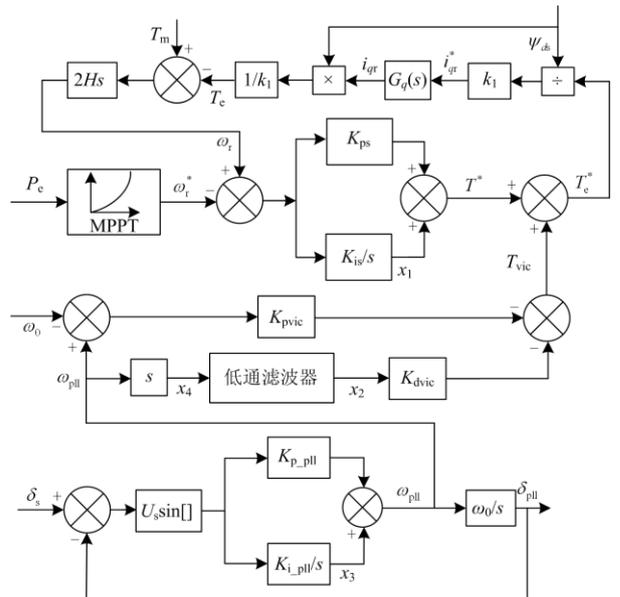


图 2 含虚拟惯量控制的 DFIG 模型

Fig. 2 Model of DFIG incorporating virtual inertia control

其中:  $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$  为引入的状态变量, 变量  $x_4 = d\omega_{pll}/dt$ ;  $k_1 = -2X_s/(3pm)$ 。后文将基于此简化模型, 对DFIG的等效惯量进行推导与分析。

## 2 含虚拟惯量控制的DFIG等效惯性常数

发电机组的惯量大小可以用转动惯量  $J$ 、惯性常数  $H$  和惯性时间常数  $T_j$  来衡量。对于利用转子动能的DFIG虚拟惯量控制来说, 其等效惯性常数的数学定义式为<sup>[23]</sup>

$$H_{ei} = \frac{\Delta\omega_r}{\Delta\omega_s} \frac{\omega_{r0}\omega_{s0}}{\omega_N^2} H_d \quad (8)$$

式中:  $\Delta\omega_r$  和  $\Delta\omega_s$  分别为DFIG转子转速变化和电网角速度变化;  $\omega_{r0}$  和  $\omega_{s0}$  分别为扰动发生时刻的转子转速初始值和电网角速度初始值;  $\omega_N$  为DFIG额定角速度。

联立式(2)、式(7)和式(8), 可得DFIG等效惯性常数  $H_{ei}$  的频域表达式为

$$H_{ei} = \frac{(K_{dvic}s^2 + K_{pvic}s(1 + T_f s))}{(2Hs^2 + K_{ps}s + K_{is})(1 + T_f s)} \cdot \frac{(K_{ppll} \cdot s + K_{ipll})\omega_{r0}\omega_{s0}H_d}{(s^2 + K_{ppll} \cdot s + K_{ipll})\omega_N^2} \quad (9)$$

如式(9)所示, DFIG的惯量响应特性取决于其控制方式和机组运行工况。其中, 风机基本参数  $H_d$  和  $\omega_N$  可根据铭牌数据或技术手册获得;  $\omega_{s0}$  可根据实时量测数据得到, 且稳态时电网角速度基本保持恒定, 数值近似为 1 p.u.; 不考虑风速的变化, 稳态时  $\omega_{r0}$  等于转子转速参考值  $\omega_r^*$ ,  $\omega_r^*$  的数值与风电场的实时风速有关。实际中可根据功率-转速最优曲线即式(5)表达式计算DFIG的转子转速参考值。而由于商业保密等, 新能源厂家提供的多为黑箱模型, 控制器参数一般被厂家视作机密, 属于未知参数。因此, 要想评估DFIG的等效惯量, 首先要获取DFIG各控制结构的控制参数。

需要说明的是, 本文针对一种给定的基于转子动能虚拟惯量控制的DFIG模型展开研究, 进而分析其惯量响应特性。而如今新能源厂家众多、型号多样, 通用化建模难度巨大, 实际应用中很难完全匹配本文的控制结构。但是对于利用转子动能进行虚拟惯量控制的DFIG来说, 其等效惯量大小均可以采用如式(8)所示的DFIG等效惯性常数定义式来定量表征。因此, 随着新能源控制结构及其性能标准化、规范化发展, 在已知DFIG具体模型和控制结构的条件下, 完全可以采用本文所述的研究思路和理论方法来分析此类虚拟惯量控制下的DFIG惯

量响应问题。

## 3 基于AEKF的DFIG控制参数辨识方法

扩展卡尔曼滤波EKF<sup>[24-25]</sup>是一种非线性最小方差估计, 具有收敛速度快、抗干扰性强和估计精度高的优点。本文针对风电场信息量测的噪声对辨识精度的影响, 在传统的EKF算法基础上引入Sage-Husa估值器自适应技术, 通过估计随机噪声的统计特征来提高控制参数的辨识精度。

根据前文分析, 用于AEKF的状态方程和量测方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = K_{is}\Delta\omega_r \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{T_f}(x_4 - x_2) \\ \frac{dx_3}{dt} = -K_{ipll}u_{ds} \\ \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{-x_1 - K_{ps}\Delta\omega_r + K_{pvic}\Delta\omega_{pll} + K_{dvic}x_2}{2H_d} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta T^* = x_1 + K_{ps}\Delta\omega_r \\ \Delta T_{vic} = -K_{pvic}\Delta\omega_{pll} - K_{dvic}x_2 \\ \omega_{pll} = -K_{ppll}u_{ds} + x_3 \end{cases} \quad (11)$$

为了提高辨识精度, 减少因阶次较高而出现发散现象, 本文分为两组辨识。第一组选择的初始状态变量为  $X_1 = [x_1, x_2, \Delta\omega_r]$ , 扩展状态变量为  $X'_1 = [K_{dvic}, K_{pvic}, T_f, K_{ps}, K_{is}]$ , 量测量为  $Z_1 = [\Delta T_{vic}, \Delta T^*]$ , 输入向量为  $\mu_1 = [\Delta\omega_{pll}, x_4]$ ; 第二组选择的初始状态变量为  $X_2 = [x_3]$ , 扩展状态变量  $X'_2 = [K_{ipll}, K_{ppll}]$ , 量测量  $Z_2 = [\omega_{pll}]$ , 输入向量  $\mu_2 = [u_{ds}]$ 。

EKF作为常用的一种经典的非线性估计方法, 在许多领域具有广泛的应用, 其具体步骤可参见文献[24]。根据DFIG的数学模型和Sage-Husa估值器自适应技术, AEKF方法的主要步骤如下所述。

### 1) 预测更新

状态变量预测如式(12)所示。

$$\hat{x}_{k/k-1} = \hat{x}_{k-1} + f(\hat{x}_{k-1}, \hat{u}_{k-1})t_s + q_{k-1} \quad (12)$$

式中:  $\hat{x}_{k-1}$  为  $t_{k-1}$  时刻下更新的状态量输出;  $\hat{x}_{k/k-1}$  为状态量预测值;  $f$  为状态方程;  $\hat{u}_{k-1}$  为输入向量;  $t_s$  为采样周期;  $q_{k-1}$  为系统过程噪声平均值。

误差协方差矩阵预测如式(13)所示。

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + Q_k \quad (13)$$

式中:  $\Phi_k = I + \partial f(\hat{x}_{k-1})/\partial \hat{x}_{k-1} \cdot t_s$  为状态转移矩阵;  $P_{k-1}$  为  $t_{k-1}$  状态下的误差协方差矩阵;  $P_{k/k-1}$  为误差

协方差矩阵的预测值； $\mathbf{Q}_k$  为系统噪声协方差矩阵。

2) 增益矩阵和测量更新

增益矩阵计算如式(14)所示。

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (14)$$

式中： $\mathbf{K}_k$  是在  $t_k$  时刻下的卡尔曼滤波增益阵；

$\mathbf{H}_k = \partial h(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) / \partial \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$  是与预测值相对应的观测矩阵； $\mathbf{R}$  是测量噪声协方差矩阵。

误差协方差矩阵更新为

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (15)$$

状态变量更新为

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (z_k - \hat{z}_k) \quad (16)$$

式中， $\hat{z}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + r_k$ ， $r_k$  为测量噪声的平均值。

3) 随机噪声评估

采用 Sage-Husa 估计器对过程噪声协方差和量测噪声协方差进行实时估计，在迭代过程中对随机噪声进行自适应化处理，以提高辨识精度。有偏噪声估计可以防止滤波发散，但会造成较大的估计误差，因此本文采用了将无偏噪声估计和有偏噪声估计相结合的方法，其计算方程式为

$$\mathbf{q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [\hat{\mathbf{x}}_{jj} - f(\hat{\mathbf{x}}_{j-1j-1})] \quad (17)$$

$$\mathbf{r}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [z_j - h(\hat{\mathbf{x}}_{jj-1})] \quad (18)$$

有偏噪声估计为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \mathbf{B}_k \mathbf{B}_k^T \\ \mathbf{B}_k = \hat{\mathbf{x}}_{jj} - f(\hat{\mathbf{x}}_{j-1j-1}) - \mathbf{q}_k \end{cases} \quad \mathbf{Q}_k \text{ 半正定} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \mathbf{C}_k \mathbf{C}_k^T \\ \mathbf{C}_k = z_j - h(\hat{\mathbf{x}}_{jj-1}) - r_k \end{cases} \quad \mathbf{R}_k \text{ 正定} \quad (20)$$

无偏噪声估计为

$$\mathbf{Q}_k = \frac{[(k-1)\mathbf{Q}_{k-1} + \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k^T \mathbf{K}_k]}{k}, \quad \mathbf{Q}_k \text{ 非半正定} \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_k = \frac{[(k-1)\mathbf{R}_{k-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k^T]}{k}, \quad \mathbf{R}_k \text{ 非正定} \quad (22)$$

式中， $\boldsymbol{\varepsilon}_k = z_k - \hat{z}_k$  为测量残差。

通过上述步骤不断迭代可以获得 DFIG 的控制参数，若风机控制参数不再发生变化，此后仅需风电场的实时量测信息和风机具体参数即可计算 DFIG 的等效惯性常数，摆脱了对大扰动事件的依赖。但是有时风电场模型参数需要改变<sup>[26]</sup>，当风机控制方式发生变化时，则需利用扰动后的量测数据重新在线辨识 DFIG 的控制参数。DFIG 等效惯量评估方法的完整流程示意图如图 3 所示。

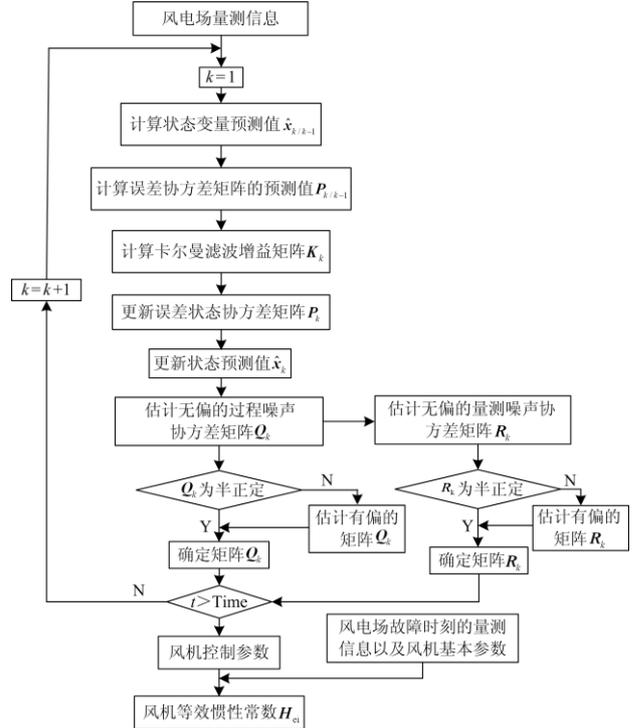


图 3 DFIG 等效惯量评估方法的流程示意图

Fig. 3 Flow diagram of DFIG equivalent inertia evaluation method

### 4 仿真分析

改进的四机两区仿真系统如图 4 所示，DFIG 替换节点 1 的同步机，利用 Matlab 平台验证上述辨识方法和等效惯量评估方法的准确性，并进一步探究控制参数对 DFIG 等效惯量的影响。

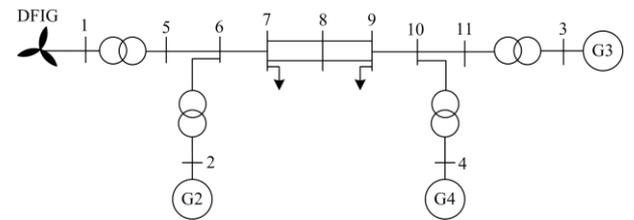


图 4 改进的四机两区系统

Fig. 4 Modified 4-machine 2-area system

#### 4.1 基于 AEKF 的控制参数辨识结果

为了提高辨识结果的准确性，本文基于仿真数据采用试错法<sup>[27]</sup>来确定系统噪声协方差矩阵  $\mathbf{Q}$ ，测量噪声协方差矩阵  $\mathbf{R}$  采用对角元为  $R_{ii} = 10^{-4}$  的对角矩阵。 $t = 1$  s 时，在系统中施加三相短路故障，持续时间为 0.1 s，仿真时间为 10 s，仿真步长为 0.01 s，将仿真结果得到的真值叠加高斯白噪声作为量测量。图 5 展示了辨识过程中控制参数不断迭代变化的曲线，表 1 给出了最终的详细辨识结果。

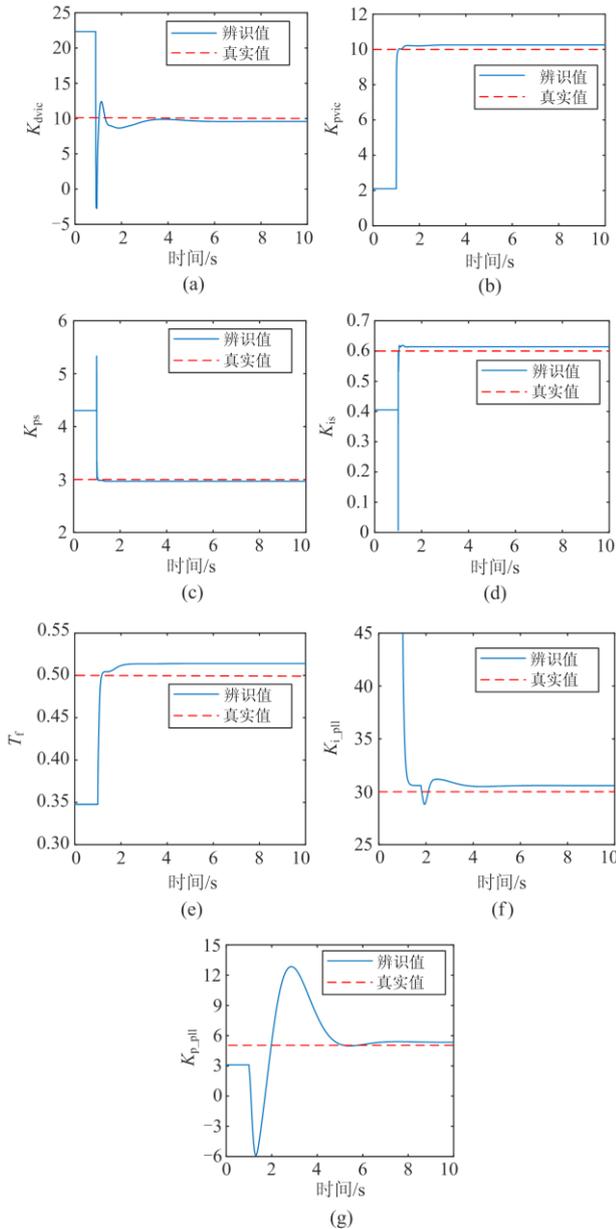


图 5 控制参数的辨识结果曲线

Fig. 5 Identification results curves of control parameters

表 1 控制参数辨识结果

Table 1 Identification results of control parameters

控制参数	真实值	辨识值	相对误差 $e_r/\%$
$K_{dvic}$	10	9.592	4.080
$K_{pvic}$	10	10.261	2.610
$K_{ps}$	3	2.968	1.067
$K_{is}$	0.6	0.622	3.667
$T_r$	0.5	0.521	4.200
$K_{i\_pll}$	30	30.818	2.727
$K_{p\_pll}$	5	5.344	6.880

由图 5 和表 1 的辨识结果可以看出, AEKF 方法可以准确地辨识 DFIG 的控制参数, 辨识结果存在的误差均在可接受的范围内, 这为接下来 DFIG 等效惯性常数的评估奠定了基础。

#### 4.2 DFIG 等效惯量在线评估

实际应用中, 在获取到风机基本参数和控制参数后, 根据实时量测到的风机输出功率(对应于  $\omega_{r0}$ ) 和电网频率 ( $\omega_{s0}$ ), 即可计算在此时发生频率扰动后 DFIG 的等效惯性常数  $H_{ei}$ 。以图 4 系统作为测试系统, 系统频率事故通过节点 7 处的负荷突增来模拟, 仿真时间为 5 s, 以扰动发生时刻作为起始时间。现有基于摇摆方程原理的在线计算方法和本文算法的比较结果如图 6 所示, 其中,  $H_{ei}$  的真实值利用仿真获取的  $\Delta\omega_r / \Delta\omega_s$  代入式(8)计算得到。

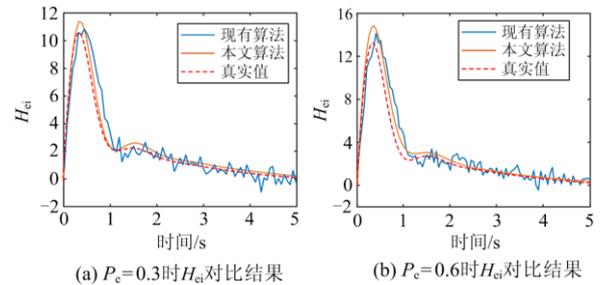


图 6 不同工况下两种算法的  $H_{ei}$  对比结果

Fig. 6 Comparison of  $H_{ei}$  of two algorithms under different working conditions

由图 6 可以看出, 本文算法的等效惯性常数  $H_{ei}$  的评估值与真实值随时间变化的趋势大体一致, 基本验证了本文所提的 DFIG 等效惯量在线评估方法的准确性。基于摇摆方程原理的惯量在线评估方法依赖于电网大扰动下的时间序列量测数据, 算法受量测噪声影响较大, 会出现一定的数值误差。相比于现有算法, 本文算法将辨识得到的控制参数常数值代入等效惯性常数计算式, 不会有数值波动和数值不稳定问题, 且在传统的 EKF 算法基础上引入 Sage-Husa 估值器自适应技术, 可通过估计随机噪声的统计特征来提高控制参数的辨识精度, 有效地消除了量测噪声的影响, 进而提高了方法的准确性。进一步观察图 6 曲线发现, DFIG 等效惯量的变化趋势主要分为 3 个阶段。

1) 初始阶段: 由于扰动发生时刻风机虚拟惯量控制无法作用, 系统的整体惯量较低, 频率变化速度较快。因此, 当虚拟惯量控制开始作用时, 惯量响应初期的虚拟惯量控制的微分信号输入值较大, 风机转子转速变化较快。并且在 DFIG 惯量响应作用下, 电网频率变化也会相对减缓, 进而使得  $\Delta\omega_r / \Delta\omega_s$  相对增大,  $H_{ei}$  快速达到最大值。

2) 恢复阶段：电网频率的变化量和变化速率在惯量响应持续作用下均有所放缓，DFIG 虚拟惯量控制下的比例微分输入信号减小。而伴随着 DFIG 转速偏差的不断增大，速度控制器的作用愈发凸显。在两者的共同作用下，风机的转子转速变化减缓，DFIG 等效惯性常数  $H_{ei}$  逐渐下降。

3) 稳定阶段：系统频率变化逐渐趋向于 0，DFIG 的虚拟惯量控制基本不起作用，风机转速在速度控制器的控制下逐渐恢复到指令值，惯量响应过程结束。DFIG 惯性常数  $H_{ei}$  最终趋于零值附近的一个稳态值。

### 4.3 控制参数对 DFIG 等效惯性常数的影响分析

经过上述分析可知，虚拟惯量控制和速度控制器对 DFIG 的等效惯量影响显著，DFIG 的惯量响应特性与其控制参数  $K_{dvic}$ 、 $K_{pvic}$ 、 $T_f$ 、 $K_{ps}$  和  $K_{is}$  有关。本节将采用控制变量(待分析的控制参数变化，其余控制参数不变)的方法逐次分析以上 5 个控制参数对 DFIG 等效惯性常数  $H_{ei}$  的影响。

图 7 为  $H_{ei}$  随着虚拟惯量控制参数变化的时间曲线。由图 7(a)曲线可以看出，虚拟惯量控制微分增益  $K_{dvic}$  仅对初始阶段影响较大。随着  $K_{dvic}$  数值的增加，DFIG 提供的惯量支撑也会相应增加，但其对惯量响应速度和恢复阶段的惯量跌落影响较小。

图 7(b)展示了虚拟惯量控制比例增益  $K_{pvic}$  对  $H_{ei}$  的影响。可以清楚地看出  $K_{pvic}$  对初始阶段和恢复阶段的惯量响应特性均有影响。随着  $K_{pvic}$  的增大，DFIG 的惯量支撑能力和惯量持续时间均有所

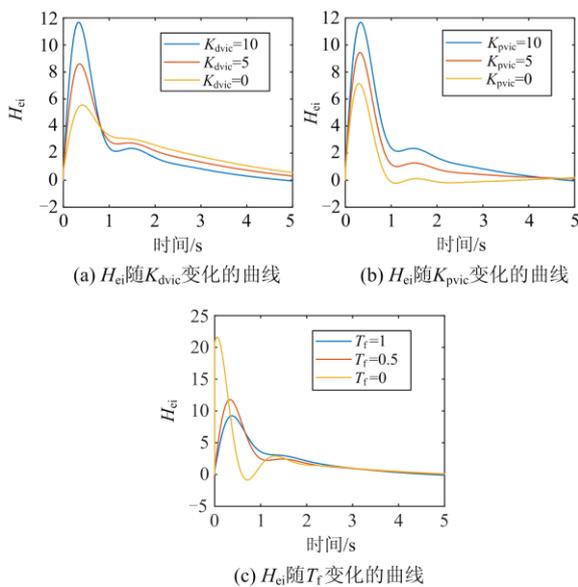


图 7 虚拟惯量控制参数对  $H_{ei}$  的影响

Fig. 7 Influence of virtual inertia control parameters on  $H_{ei}$

增加，且有效地减小了恢复阶段的惯量下降程度。图中黄色曲线为  $K_{pvic}=0$ (即经典的微分虚拟惯量控制)的  $H_{ei}$  变化趋势，其在恢复阶段等效惯性常数下降为负值，容易引起频率二次跌落。然而，由于相比于微分虚拟惯量控制额外引入了频率偏差信号，比例微分虚拟惯量控制在电网频率恢复之前始终有惯量支撑能力，可以有效减弱频率的二次跌落，延长惯量响应持续时间。

为了避免纯微分环节引入高频噪声信号，通常采用一阶低通滤波器对频率微分信号进行滤波。滤波器时间常数  $T_f$  对风机的惯量响应特性也具有一定的影响。扰动发生初始时刻，惯量控制来不及作用，系统的整体等效惯量较低，电网频率变化较快，虚拟惯量控制引入的频率微分信号较大，DFIG 具有很强的惯量支撑能力。如图 7(c)所示，当  $T_f$  为 0 时，DFIG 惯量快速释放，等效惯性常数  $H_{ei}$  迅速达到最大值，并快速跌落为负值。而随着  $T_f$  的增加，DFIG 的惯量会被缓慢释放，其惯量支撑时间会增长，惯量跌落程度会减弱，但与之相对的，DFIG 的惯量响应速度也会有所下降。

图 8 为速度控制器控制参数变化时  $H_{ei}$  的变化曲线。速度控制器的目的是控制转子转速处于最佳运行状态，其有利于惯量响应过程中风机转速的恢复。但是当系统频率跌落时，虚拟惯量控制作用后风机转速会下降，根据式(6)可知，速度控制器提供的电磁转矩增量为负值，会削弱风机的惯量支撑能力。如图 8 所示，速度控制器参数主要影响惯量响应过程的恢复阶段和稳定阶段，且随着速度控制器控制参数的增大，DFIG 的惯量响应能力会有所下降。其中，速度控制器比例增益  $K_{ps}$  主要影响惯量响应过程的恢复阶段，因为此阶段的风机转速偏差最大；而随着风机转速的不断恢复，风机转速偏差逐渐减小，风机转速偏差的累计误差相对增大，因此，积分增益  $K_{is}$  主要对稳定阶段的影响较大。

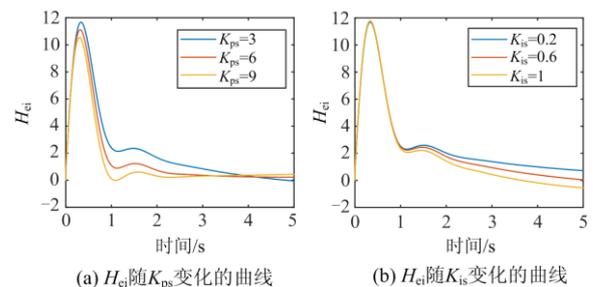


图 8 速度控制器控制参数对  $H_{ei}$  的影响

Fig. 8 Influence of control parameters of speed controller on  $H_{ei}$

综上所述, 虚拟惯量控制参数主要影响惯量响应过程的初始阶段和恢复阶段, 速度控制器参数主要影响惯量响应过程的恢复阶段和稳定阶段。虚拟惯量控制和速度控制器两者共同作用, 直接决定了DFIG的惯量响应特性。

## 5 结论

本文对含虚拟惯量控制的DFIG等效惯量在线评估问题进行研究, 主要内容可分为以下几个方面。

1) 构建了计及锁相环和虚拟惯量控制的DFIG转子转速时间尺度下的暂态模型; 在此模型基础上, 结合惯性常数的数学定义式, 推导得到了DFIG等效惯性常数的数学解析式。

2) 针对风机控制参数的“黑箱”问题, 提出了一种基于自适应扩展卡尔曼滤波的控制参数在线辨识方法; 在获取到风机参数后, 根据DFIG等效惯性常数的数学解析式, 仅需风机稳态运行下的输出功率和电网频率的量测信息即可对DFIG的等效惯性进行实时计算。

3) 根据DFIG等效惯性常数的变化特征, 分析了虚拟惯量控制和速度控制器的控制参数对DFIG惯性响应特性的影响。虚拟惯量控制参数主要影响惯量响应过程的初始阶段和恢复阶段, 速度控制器参数主要影响恢复阶段和稳定阶段。

## 参考文献

- [1] 赵福林, 俞啸玲, 杜诗嘉, 等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 42-51.  
ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 42-51.
- [2] 李德鑫, 宗崇林, 黄大为, 等. 大规模风电汇聚外送的区域送端电力系统两级优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 35-44.  
LI Dexin, ZONG Chonglin, HUANG Dawei, et al. Two-level optimal dispatching of regional sending-end power system for large-scale clustering wind power transmission[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 35-44.
- [3] LI J, LIU C, ZHANG PF, et al. Difference between grid connections of large-scale wind power and conventional synchronous generation[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 486-493.
- [4] 王同森, 程雪坤. 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 29-36.  
WANG Tongsen, CHENG Xuekun. Variable droop coefficient control strategy of a DFIG considering rotor speed limit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 29-36.
- [5] 张雪娟, 束洪春, 孙士云, 等. 双馈风机参与系统调频对系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 18-29.  
ZHANG Xuejuan, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Effect analysis of a doubly-fed induction generator participating in system frequency modulation on system transient power angle stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 18-29.
- [6] 彭喜云, 刘瑞叶. 变速恒频双馈风力发电机辅助系统调频的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 56-61.  
PENG Xiyun, LIU Ruiye. Research on the frequency regulation of aiding system of VSCF double-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 56-61.
- [7] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6842-6856.  
ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, et al. Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6842-6856.
- [8] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.  
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.
- [9] AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, MALEKPOUR M, PAOLONE M, et al. A new approach to the online estimation of the loss of generation size in power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2103-2113.
- [10] WALL P, TERZIJA V. Simultaneous estimation of the time of disturbance and inertia in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 2018-2031.
- [11] CAI G, WANG B, YANG D, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4291-4299.
- [12] PANDA R K, MOHAPATRA A, SRIVASTAVA S C. Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions

- on Power Systems, 2020, 35(4): 3122-3132.
- [13] ZHANG J, XU H. Online identification of power system equivalent inertia constant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8098-8107.
- [14] TUTTELBERG K, KILTER J, WILSON D, et al. Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7249-7257.
- [15] CAO X, STEPHEN B, ABDULHADI I F, et al. Switching Markov Gaussian models for dynamic power system inertia estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(5): 3394-3403.
- [16] 刘皓明, 任秋业, 张占奎, 等. 双馈风机等效惯性时间常数计算及转差率反馈惯量控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 49-57.
- LIU Haoming, REN Qiuye, ZHANG Zhankui, et al. Calculation of equivalent inertia time constant for doubly-fed induction generators and slip-feedback inertia control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 49-57.
- [17] LIU M, CHEN J, MILANO F. On-line inertia estimation for synchronous and non-synchronous devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2693-2701.
- [18] 赵振元, 陈维荣, 戴朝华, 等. 系统惯性时间常数对互联电网暂态稳定水平的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 102-107.
- ZHAO Zhenyuan, CHEN Weirong, DAI Chaohua, et al. Influence of system inertia time constants on transient stability level of interconnected AC power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 102-107.
- [19] 唐王倩云, 张睿, 胡家兵. 用于系统暂态行为分析的双馈风机转子转速控制时间尺度暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3037-3046.
- TANG Wangqianyun, ZHANG Rui, HU Jiabing. Modelling of DFIG-based WT for power system transient responses analysis in rotor speed control timescale[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3037-3046.
- [20] LIU J, TANG F, ZHAO J, et al. Coherency identification for wind-integrated power system using virtual synchronous motion equation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2619-2630.
- [21] 应杰. 基于幅相运动方程的双馈风电机组机电尺度建模与特性分析及对电力系统稳定影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- YING Jie. Modeling and characteristics analysis of doubly fed induction generator based wind turbine in electromechanical time-scale based on amplitude-phase motion equations method and its impact on power system stability[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [22] CLARK K, MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies[R]. Schenectady: GE Energy, 2010.
- [23] 李世春, 邓长虹, 龙志君, 等. 风电场等效虚拟惯性时间常数计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 22-29.
- LI Shichun, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Calculation of equivalent virtual inertial time constant of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 22-29.
- [24] 陈振, 刘向东, 靳永强, 等. 采用扩展卡尔曼滤波磁链观测器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 75-81.
- CHEN Zhen, LIU Xiangdong, JIN Yongqiang, et al. Direct torque control of permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter observer of flux linkage[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 75-81.
- [25] 柴林杰, 蔡亦浓, 高铭, 等. 基于加权平均插值和容积卡尔曼滤波的配电网预测辅助状态估计[J]. 电力建设, 2021, 42(8): 1-9.
- CHAI Linjie, CAI Yinong, GAO Ming, et al. A forecasting aided state estimation for distribution network based on weighted average interpolation and cubature Kalman filter[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 1-9.
- [26] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.
- YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.
- [27] ZERDALI E. A comparative study on adaptive EKF observers for state and parameter estimation of induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1443-1452.

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-12-07

作者简介:

王 彤(1985—), 女, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制、暂态稳定分析与紧急控制; E-mail: hdwangtong@126.com

邢其鹏(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统暂态稳定分析与控制; E-mail: xqpncepu@163.com

王增平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为继电保护、变电站综合自动化、广域保护等。E-mail: wangzp1103@sina.com

(编辑 周金梅)