

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230187

计及转子动能损失和风速相关性的风电场有效惯量估计

李东东, 张先明, 姚寅, 徐波

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 随着以新能源为主体的新型电力系统建设持续推进, 风力发电在全国各区域电网的渗透率快速提升。然而, 大规模风电场无法提供惯量支撑, 风机引入虚拟惯量控制后, 缺乏对风电场虚拟惯量估计及其变化态势的准确感知。对此, 根据风机虚拟惯量控制机理和外界风速影响提出一种风电场有效惯量估计方法。该方法首先考虑虚拟惯量响应阶段风机工作点偏移造成的机械能损失, 在此基础上提出有效惯量的概念并研究有效惯量与风速的关系。其次, 考虑风电场内风速的随机性、相关性, 提出了基于 Copula 函数、尾流效应和时延效应的风速时空分布模型。最后, 综合得到风电场有效惯量的时空分布估计。根据甘肃某风场的实际风速及出力数据构建仿真算例, 结果表明, 所提算法能在变化风速下有效估计风电场内各机组有效惯量的大小和时变特性, 能实时反映各机组虚拟惯量支撑能力, 为掌握系统频率抗扰性提供数据基础。

关键词: 惯量估计; 风力发电; Copula 函数; 最大功率点跟踪

Estimation of effective inertia of a wind farm considering rotor kinetic energy loss and wind velocity correlation

LI Dongdong, ZHANG Xianming, YAO Yin, XU Bo

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the continuous development of new power systems, the penetration rate of wind power generation in various regional power grids has increased to a high level. However, large-scale wind farms generally cannot provide inertia support. Even after the introduction of virtual inertia control for wind turbines, there is still a lack of accurate estimation and analysis of virtual inertia and its changing dynamics in wind farms. Therefore, an effective inertia estimation method for a wind farm is proposed from the virtual inertia control mechanism of the fan and the influence of external wind speed. In this method, the mechanical-energy loss caused by the offset of wind turbine working point in the virtual inertia response phase is first considered. On this basis, the concept of effective inertia is proposed and the relationship between effective inertia and wind speed is studied. Second, the randomness and correlation of wind speed in a wind farm is considered. A spatial and temporal distribution model of wind speed is proposed based on the Copula function, wake effect and propagation delay. Finally, the estimation of the spatial and temporal distribution of the effective inertia of the wind farm is obtained. A simulation example is constructed based on the actual wind speed and output data of a wind farm in Gansu Province. The simulation results reveal that the proposed algorithm can effectively estimate the effective inertia of each wind turbine in a wind farm and the time-varying characteristics with varying wind speed. It can reflect the virtual inertia support capacity capability of each wind turbine in real time and provide a data basis for mastering the frequency immunity of the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977128).

Key words: inertia estimation; wind power; Copula function; maximum power point tracking

0 引言

在环境污染和气候变化日益加剧的大环境下,

世界各国都在加快能源转型。电力系统正逐步向着高比例可再生能源接入和高度电力电子化的趋势发展^[1-5]。其中, 风力发电在新能源装机容量中占主要部分, 未采用虚拟惯量控制的风电机组并网后无法提供转动惯量, 导致系统频率的抗扰性下降和稳定性劣

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977128)

化, 而采用虚拟惯量控制的风机与常规同步机组的运行方式和响应特性亦有明显不同, 亟需研究适用于风电场虚拟惯量支撑能力的评估方法。

目前, 针对风电场的惯量支撑特性及其能力评估, 国内外学者提出了虚拟惯量和有效惯量等多种惯量评价指标以及评估方法。文献[6]提出虚拟惯量控制, 使风机具备类似于同步机的惯量响应能力并参与系统调频。文献[7]介绍含风电虚拟惯性响应的电力系统惯性时间常数计算方法, 以惯性时间常数描述风机虚拟惯量支撑能力。文献[8-9]提出了面向新能源电力系统频率时空动态的节点等效惯量指标, 但未考虑新能源不确定性对指标的影响。文献[10]分析双馈风机的频率响应模型, 利用劳斯近似法推导出虚拟惯量表达式, 实现虚拟惯量的在线估计。但该方法的准确性受频率控制参数和风机运行状态的影响。文献[11-14]利用正常运行时始终存在的不平衡功率和频率扰动, 通过辨识模型实现惯量的连续估计, 但未考虑新能源强波动性和不确定性。上述文献提出的虚拟惯量指标未考虑新能源虚拟惯量支撑阶段的能量转化过程, 以及外部风光自然资源的影响。

由于风机参与虚拟惯量响应时, 能量全部由转子动能提供。对此考虑动能转化过程的有效惯量指标被提出。文献[15-17]从能量的角度提出转子可释放净能量的概念, 作为衡量风机虚拟惯量大小的指标, 但未考虑能量释放过程中的损耗, 仅部分转子动能参与虚拟惯量响应。对此, 文献[18]考虑风机虚拟惯量响应过程中转子动能损耗量, 提出有效惯量的概念, 以衡量风机虚拟惯量响应对系统的实际贡献量, 但文章假设转子动能损耗量为定值, 显然与实际不符。

由于系统发生扰动的随机性、风速的波动性, 使风电参与惯量响应的调频能量具有不确定性。已有的关于风机虚拟惯量水平评估的研究都是基于恒定风速, 忽视了变化风速对评估的影响。大型风电场内风电机组数量多、各机群相距较近, 机组间风速及运行状态存在显著的相关性。文献[9-20]考虑多种风速影响因素, 建立了风电功率预测的条件 Copula 联合分布函数。文献[21]考虑了风速的时空相关性, 基于多元正态分布函数建立了风速时空分布相关性模型。文献[22]分析不同风况下的风电调频能力, 提出变系数风电调频策略。然而单一的风速相关性分析方法应用于风电场级别的惯量估计时, 存在计算效率低、实际惯量支撑能力缺少验证等问题。

本文提出基于风速时空分布模型并考虑转子动能损失的风电场有效惯量估计方法。该方法有以下

创新: 分析不同风速下风机参与虚拟惯量响应的转子动能损失, 提出更加完善的评估风机虚拟惯量大小的指标——有效惯量; 提出精准且便捷的风电场风速分布模型。利用多种相关性分析方法构建风电场风速时空分布模型, 适用于机组数量较多的大规模风电场; 以风速为输入量, 建立实时高效的风电场有效惯量时空分布估计模型, 通过获取变化的风速数值实现有效惯量值的滚动更新。

本文首先介绍考虑转子损失动能的风机有效惯量估计方法; 然后论述风电场风速时空分布模型构建流程, 为风电场有效惯量的估计提供风速数据; 最后通过实际风电场求解有效惯量分布, 验证该方法的有效性。结论部分总结全文并对未来研究做出展望。

1 风机有效惯量估计

本节主要论述风速与有效惯量的关系, 通过分析风机正常运行模型, 并结合虚拟惯量控制得到风机有效惯量表达式。有效惯量估计技术路线如图 1 所示。

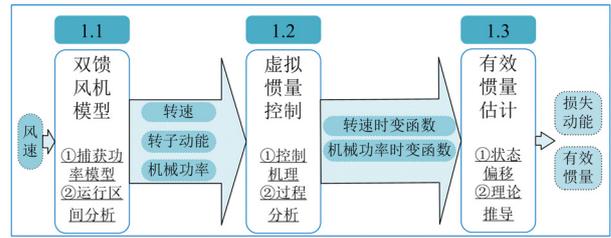


图 1 有效惯量估计技术路线

Fig. 1 Technical route of effective inertia estimation

1.1 双馈风机捕获功率模型

依据贝茨理论^[23], 风机正常运行状态下, 捕获机械功率 P_m 由式(1)决定。

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V^3 \\ C_p(\lambda, \beta) = a_1 \left(\frac{a_2}{\lambda_i} - a_3 \beta - a_4 \right) e^{-\frac{a_5}{\lambda_i}} \\ \lambda_i = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \\ \lambda = \frac{\omega R}{V} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, 取为 1.23 kg/m^3 ; A 为叶片扫过面积; V 为流经风机的风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, 是关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数; λ_i 为叶片末端线速度与风速的比值; R 为叶片半径;

ω 为风轮旋转角速度; 参数 a 的取值需依据具体风机型号确定, 本文取 $a_1 = 0.22$, $a_2 = 116$, $a_3 = 0.4$, $a_4 = 5$, $a_5 = 12.5$ 。

风机运行状态分为启动阶段、最大功率追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 区、恒转速区和恒功率区, 见 1.2 节图 2。MPPT 区 λ 恒定为最优值 λ_{opt} ; 恒转速区风速与转速关系可线性化拟合; 恒功率区转速达到最大, 不受风速影响。故各区间风机风速与转速的关系如式(2)所示。

$$\omega = \begin{cases} \frac{G\lambda_{opt}V}{R} & V_B < V \leq V_F \\ \frac{\omega_{max} - \omega_F}{V_G - V_F}(V - V_F) & V_F < V \leq V_G \\ \omega_{max} & V_G < V \leq V_{max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: G 为齿轮箱传递系数; V_{max} 为风机最大捕获风速。

1.2 虚拟惯量控制的转子动能损失

双馈风机机械部分与电气部分解耦, 无法主动响应系统扰动, 但自身存储大量转子动能, 通过快速有功控制释放转子动能可表现出强大的虚拟惯性。传统 PD 型控制通过模拟同步发电机自然惯性和下垂控制实现虚拟惯量响应, 其提供的额外有功功率 ΔP 如式(3), 控制结构如附录 A 图 A1 所示。

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

式中: K_d 为微分系数; K_p 为比例系数; Δf 为频率变化差值。

虚拟惯量响应导致转子转速下降和运行点偏移, 图 2 为各运行点偏移过程, 图中不同风速下的正常运行点 CDEFG 经虚线偏移至点 C'D'E'F'G'。该过程使 P_m 降低。

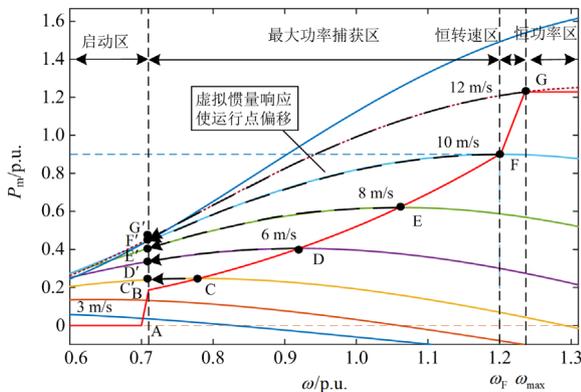


图 2 各区间风机运行点偏移曲线

Fig. 2 Fan operating point offset curve in each section

风机虚拟惯量响应为电网提供短时额外有功功率支撑。该过程分为虚拟惯量响应和转速恢复两个阶段, 如图 3 所示, P_e 为输出电磁功率。

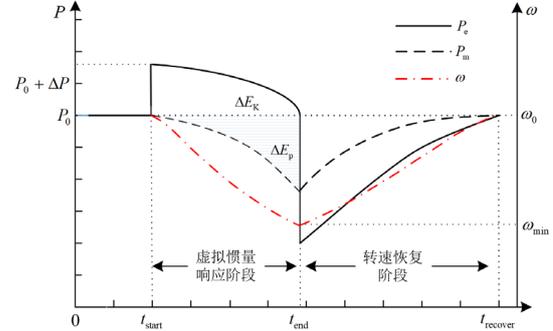


图 3 风机附加虚拟惯量的调频过程

Fig. 3 Frequency modulation process of fan attaching virtual inertia

虚拟惯量响应阶段, 风机由初始转速 ω_0 下降到最低转速 $\omega_{min} = 0.7$ p.u.。虚拟惯量结束后, 一次、二次调频响应, 风机进入转速恢复阶段。本文关于风机惯量评估的研究只与虚拟惯量响应阶段有关。图中 ΔE_p 对应的阴影面积为捕获机械能损失量, 后文统称为转子损失动能。

1.3 考虑转子损失动能的有效惯量估计

双馈风机转子转速下降释放动能参与虚拟惯量响应。结合图 3 从外部能量角度分析, 转子释放动能 ΔE_D 为 P_e 与 P_m 差值关于时间的积分, 如式(4)所示。

$$\Delta E_D = \int_{t_{start}}^{t_{end}} [P_e(t) - P_m(t)] dt \quad (4)$$

式中: t_{start} 、 t_{end} 分别为风机虚拟惯性响应起始和终止时刻; $P_e(t)$ 、 $P_m(t)$ 分别为风机电磁功率和机械功率随时间变化的函数。

从内部转子转速变化的角度分析, 转速降到 ω_{min} 时, 为避免二次跌落, 机组必须立刻退出虚拟惯量响应。故转子释放动能 ΔE_D 为

$$\Delta E_D = \frac{1}{2} J \omega_0^2 - \frac{1}{2} J \omega_{min}^2 \quad (5)$$

式中, J 为转动惯量。将式(2)代入式(5)可得全风速下 ΔE_D 表达式。初始时刻, $P_e = P_m$, 随后风机持续输出额外功率以实现对系统频率的支撑, 以初始电磁功率 $P_e(0)$ 为基础值, 定义增发并参与虚拟惯量响应的能量为有效惯量 ΔE_K , 定义式为

$$\Delta E_K = \int_{t_{start}}^{t_{end}} [P_e(t) - P_e(0)] dt \quad (6)$$

由图 3 可知, ΔE_K 包含两部分: 一是转子释放动能 ΔE_D , 在图中为虚拟惯量响应期间电磁功率和

机械功率曲线围成的面积；二是捕获机械能损失量 ΔE_p ，定义为损失动能。则 ΔE_K 可由式(7)表示。

$$\begin{cases} \Delta E_K = \Delta E_D - \Delta E_p \\ \Delta E_p = -\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} [P_m(t) - P_m(0)] dt \end{cases} \quad (7)$$

式(6)求解有效惯量需获知 $P_c(t)$ ，由于虚拟惯性控制参数过于复杂、扰动大小无法事前得到，不易于 $P_c(t)$ 的直接求解，故该问题转化为 $P_m(t)$ 解析式的求解，利用式(7)求有效惯量更贴合实际。

以 MPPT 区为例，虚拟惯量响应持续时间较短，可认为过程中风速保持不变，且无变桨调节 ($\beta = 0$)。同时如图 3 所示，在 PD 型虚拟惯量控制下，惯量支撑功率 ΔP 逐渐减小，风机转速则随时间近似为线性变化^[24]，则转速随时间的变化函数可用式(8)近似拟合。

$$\omega(t) = \frac{\omega_{\min} - \omega_0}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}} t + \omega_0 \quad (8)$$

其中：

$$\omega_0 = \frac{\lambda_{\text{opt}} V}{R} \quad (9)$$

进而可得叶尖速比随时间变化函数为

$$\lambda(t) = \frac{\omega(t)R}{V} = \left[\frac{\omega_{\min} - \frac{\lambda_{\text{opt}} V}{R}}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}} t + \frac{\lambda_{\text{opt}} V}{R} \right] \cdot \frac{R}{V} \quad (10)$$

将式(10)代入式(1)得风能利用系数随时间 t 变化的时变函数 C_i 。

$$\begin{aligned} C_p(t) &= C_p(\lambda, \beta, t) = C_i(\lambda(t), \beta = 0) = \\ &a_1 \left(\frac{a_2}{\lambda_i(t)} - a_4 \right) e^{-a_5 \frac{1}{\lambda_i(t)}} = \\ &a_1 \left[a_2 \times \left(\frac{1}{\lambda(t)} - 0.035 \right) - a_4 \right] e^{-a_5 \times \left(\frac{1}{\lambda(t)} - 0.035 \right)} = \\ &a_1 \left[a_2 \times \left(\frac{V}{\omega(t)R} - 0.035 \right) - a_4 \right] e^{-a_5 \times \left(\frac{V}{\omega(t)R} - 0.035 \right)} \end{aligned} \quad (11)$$

结合式(7)、式(11)得损失动能为

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= -\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \left(\frac{1}{2} \rho A C_p(t) V^3 - P_0 \right) dt = \\ &-\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \left[\frac{1}{2} \rho A (C_p(t) - C_p(0)) V^3 \right] dt \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(5)、式(12)得有效惯量求解表达式为

$$\begin{aligned} \Delta E_K &= \Delta E_D - \Delta E_p = \frac{1}{2} J \omega_0^2 - \frac{1}{2} J \omega_{\min}^2 + \\ &\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \left[\frac{1}{2} \rho A (C_p(t) - C_p(0)) V^3 \right] dt \end{aligned} \quad (13)$$

可知 MPPT 区单机有效惯量是关于风速、转速的函数。其中转速利用式(9)可由风速代替，其他风速区间的有效惯量推导方法类似，故不再详细展开，仅在 3.1 节对其他风速区间的有效惯量推导核心步骤进行解释。对于场站级别有效惯量的求解，需考虑风电场内的风速相关性，构建风速时空分布模型并结合式(13)进行求解。

2 风电场风速时空分布模型

综合上节可得，风机所处位置的风速是影响风机有效惯量大小的决定性因素，也是有效惯量评估的重要依据。风场内配备测风塔用于获取第一手风能资料，测风塔风速数据未经其他机组桨叶干扰，具有较高准确性，可作为建立风电场风速模型的初始数据。风场内各机组排布较为密集，机组间风速相关性明显。本节利用尾流效应和 Copula 函数相结合的方法，构建风电场风速时空分布模型，以预测各机组实时风速，为风电场有效惯量估计提供数据支撑。

2.1 尾流效应和时延效应

气流传播方向下游风机的捕获风速低于上游风机，该现象称为尾流效应。风机间距越小，风轮面积越大，上游风机对下游风机的影响就越显著。因此，风电场风速模型需要计及尾流效应的影响；同时，气流在风机间的传播需要一定时间，延迟可达几分钟，研究风电场动态问题采用的时间尺度较小，因而不能忽略时延效应的影响。

简化尾流模型如附录 A 图 A2 所示，上下游机组 WT1 和 WT2 间风速关系^[25]如式(14)所示。

$$\begin{cases} V_2 = V_1(1-d) \\ d = \left(1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left(\frac{R}{R + KX} \right)^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中： V_1 为吹向风电机组 WT1 的风速； V_2 为离开风电机组 WT2 的风速； d 为风速下降系数，大小与推力系数 C_T 、叶片半径 R 、机组间距离 X 和尾流下降系数 K 有关。陆上风电场一般取 $K = 0.075$ ^[26]。

大型风电场中，假定风速 $V_{x=0}$ 从 WT1 传递到 WT2 的延迟时间为 τ ，则 t 时刻考虑时延的风机 WT2 风速 $V_{x=X}(t)$ 如式(15)所示。

$$\begin{cases} V_{x=X}(t) = V_{x=0}(t - \tau) \\ \tau = \frac{X}{\bar{V}} = \int_0^X \frac{dx}{V_x} \end{cases} \quad (15)$$

式中， \bar{V} 为时间 τ 内流经两风机间的平均风速。结合式(14)可得延迟时间表达式为

$$\tau = \int_0^x \frac{dx}{V_{x=0} \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left(\frac{R}{R + KX} \right) \right]} \quad (16)$$

在风机地理位置分布已知的前提下, 利用尾流效应和时延效应可快速实现相邻机组的风速预测。而测风塔与各机组间的风速相关性分析利用 2.2 节所述的 Copula 函数进行构建。

2.2 基于 Copula 函数的风速相关性分析

对于多维随机变量, 依据 Sklar 定理^[27-29]设 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 维随机变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的联合分布函数, $F_k(x_k) (k=1, 2, \dots, n)$ 为各变量的边缘分布函数。若边缘分布函数 F_1, F_2, \dots, F_n 连续, 则存在唯一的 Copula 函数 $C(\bullet)$ 使随机变量 x_1, x_2, \dots, x_n 满足式(17)。

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (17)$$

Copula 函数的选取基于与经验 Copula 函数欧式距离最小的原则, 选择最优 Copula 函数具体步骤如下。

步骤一, 引入经验 Copula 函数。随机变量 x 、 y 的经验分布函数分别为 $F_n(x)$ 和 $H_n(y)$, 经验 Copula 函数定义为

$$C_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{[F_n(x_i) \leq u]} \times I_{[H_n(y_i) \leq v]} \quad (18)$$

式中: $u, v \in [0, 1]$; $F_n(x_i) \leq u$ 时, $I_{[F_n(x_i) \leq u]} = 1$, 否则为 0; $I_{[H_n(y_i) \leq v]}$ 的取值同理。

步骤二, 采用极大似然估计法计算各类理论 Copula 函数的相关未知参数; 则理论 Copula 函数与经验 Copula 函数间的欧式距离平方如式(19)所示。

$$d_p^2 = \sum_{i=1}^n \left| C_n(u_i, v_i) - C_p(u_i, v_i) \right|^2 \quad (19)$$

式中: $C_p(u_i, v_i)$ 表示理论 Copula 函数, p 为理论 Copula 函数类型; d_p^2 为理论 Copula 函数与经验 Copula 函数间的欧式距离平方。

步骤三, 选取 d_p^2 最小值所对应的 Copula 函数为最优 Copula 函数。

若测风塔与各个机组均确定 Copula 函数, 会严重影响计算效率。为减少 Copula 函数的数量, 仅选取风电场内不同区域的典型机组, 计算其与测风塔风速的相关性, 在确保一定准确度的情况下, 能显著提高计算效率。

综合上述两节内容, 构建风电场风速时空分布模型。该模型能基于测风塔处的实时风速预测各机组所处位置的实时风速, 为各机组有效惯量的估计

提供数据支撑。该模型具备以下优势和创新性: (1) 能提高风电场风速时空分布计算效率和拟合精度; (2) 尾流效应和 Copula 函数的结合能扩大应用场景, 适用于大规模风电场风速建模; (3) 与风电场分区建模思路契合, 对分区后的机群之间以及机群内部采用不同的建模方法, 充分发挥尾流效应和 Copula 函数各自的优势。

场站级别有效惯量的计算过程如下: 若风电场 N 内有 n 台机组, 第 i 台有效惯量 ΔE_{K-i} 由式(13)求解, 则风电场有效惯量 ΔE_{K-N} 可由式(20)求解。

$$\Delta E_{K-N} = \sum_{i=1}^n k_1 k_2 \Delta E_{K-i} \quad (20)$$

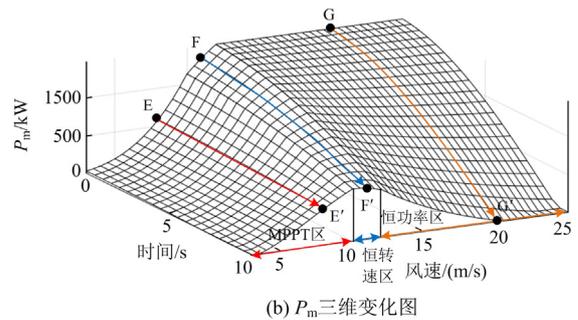
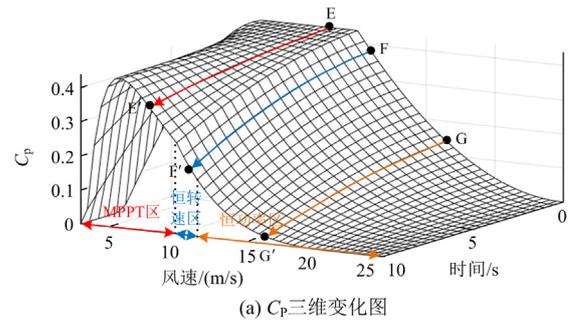
式中引入修正系数 k_1 , 原因详见 3.1 节, 其大小由第 i 台机组风速 V_i 决定。 $V_i \leq 5$ m/s 时, $k_1 = 0$; $V_i > 5$ m/s 时, $k_1 = 1$ 。 k_2 为启停系数, 由风机运行状态决定, 风机正常运行时 $k_2 = 1$, 若发生故障处于停运状态时 $k_2 = 0$ 。

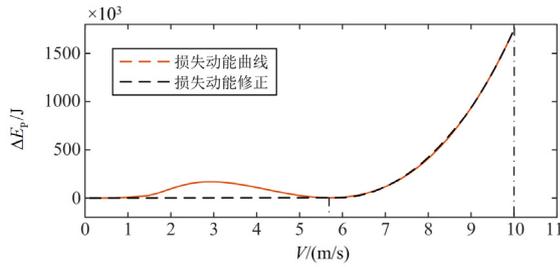
3 仿真验证

3.1 单机有效惯量

本文以中国甘肃某风场为算例, 风机型号为 GW82, 运行参数见附录 A 表 A1。

根据式(1)、式(11)计算可得图 4, 其中图 4(a)为 C_p 在不同初始风速下随虚拟惯量响应持续时间的变化, 图 4(b)为 P_m 在不同风速下随虚拟惯量响应持续时间的变化。





(c) 不同初始风速下损失动能与风速关系

图4 捕获功率及损失动能变化图

Fig. 4 Variation of captured power and lost kinetic energy

由图4(a)、图4(b)可得, 风速为5 m/s时, C_p 不随时间变化, 因为该风速下风机转速无下降空间; 图中点E、点F和点G沿各自曲线下落到点E'、点F'和点G', 分别对应MPPT区、恒转速区和恒功率区下的典型变化情况。风速大于5 m/s时, 如E点至E'点, C_p 不断下降, 脱离MPPT区, P_m 也随时间不断减小。可见, 各运行区间下 C_p 和 P_m 的初始值、结束值和变化程度各不相同, 这也是本文在惯量估计算法中必须考虑风速的原因。

由图4(a)、图4(b)和式(12)可得不同初始风速下损失动能如图4(c)所示, 可见初始风速越大, 惯量响应阶段用于弥补捕获机械功率变化的能量就越大。风速低于5 m/s时(启动区), 风机不允许参与惯量响应, 没有损失动能, 若仍采用式(12)计算则存在损失动能。故启动区损失动能应修正为0, 因此引入修正因数 k_1 。

将本文方法扩展到全风速, 在高风速风机启动变桨调节实现功率恒定, 结合式(1)在功率值恒为 P_{max} 的情况下逆推得到高风速下的桨距角大小, 如附录A图A3所示为桨距角随风速变化散点图, 利用函数拟合得到桨距角关于风速的表达式 $\beta(V)$ 并代入式(1), 后续步骤与MPPT区一致, 得到全风速下转子释放动能、损失动能和有效惯量随风速变化曲线如图5所示。

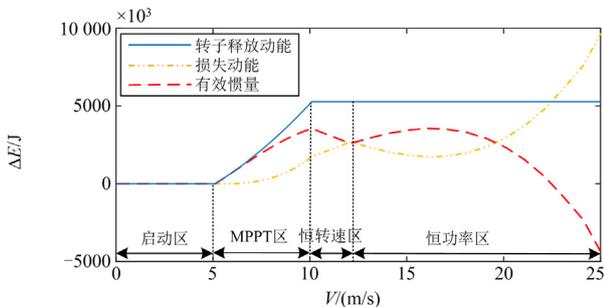


图5 全风速下动能与有效惯量变化曲线

Fig. 5 Kinetic energy and effective inertia change curve at full wind speed

由转子释放动能曲线可知, 低风速区转子释放动能与风速呈正相关, 当风速达到10 m/s, 转子释放动能不再变化。由损失动能变化曲线可知, 在恒转速区损失动能绝对值与风速呈正相关, 在恒功率区损失动能先减后增。有效惯量曲线由式(13)求得。对其进行分区定性分析, 如下所述。

1) MPPT区(5~10 m/s): 风机有效惯量与风速呈正相关特性。

2) 恒转速区(10~12 m/s): 风机逐渐达到满发状态, 转子转速保持不变, 转子释放动能为固定值。在惯量响应阶段, 随着转速的下降, 捕获机械功率大幅下降, 导致损失动能增加, 有效惯量逐步降低。

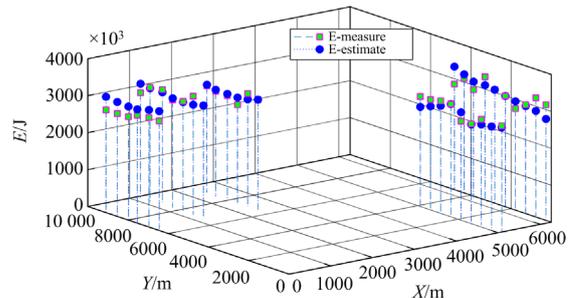
3) 恒功率区(12~16 m/s): 通过变桨调节维持功率的恒定, 保持较低的风能捕获利用系数以应对高风速对风机的冲击。惯量响应时, 捕获机械功率随转速下降, 但仍能维持较高水平, 因而损失动能较低, 有效惯量持续增加。

4) 恒功率区(16~25 m/s): 风速接近风机允许运行范围的上限, 有切机的风险, 故桨距角调节程度进一步增加, 此时风能利用系数仅为MPPT区的10%~16%, 若参与惯量响应, 风能利用系数随转速下降到极低的水平, 损失动能过大致使有效惯量不增反降, 甚至低于0。

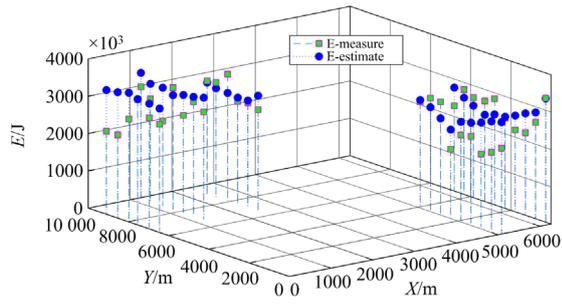
3.2 风电场有效惯量

以甘肃省某风电场为算例, 风机布置如附录A图A4所示, 选取测风塔风速数据进行建模。风机及风电场参数见附录A表A1。利用风电场内每台风机历史数据进行算例验证。

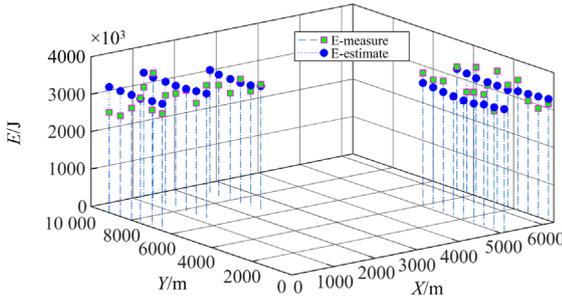
分析历史风速数据并绘制各机组风速日变化曲线(见附录A图A5), 可确定风电场在00:00、08:00、16:00三个时刻风机分别处于中低速、低风速和高风速范围内。对三个时刻的风电场有效惯量时空分布进行算例分析。利用本文所提风速模型构建风电场各机组有效惯量时空分布, 与利用实际风速数据求得的有效惯量进行比较, 验证本文方法在各风速区间下的有效性和准确度。得到以下三组时刻的有效惯量空间分布图, 如图6所示。



(a) 00:00时刻风机实际惯量与估计惯量分布图



(b) 08:00时刻风机实际惯量与估计惯量分布图



(c) 16:00时刻风机实际惯量与估计惯量分布图

图 6 各时刻风机实际惯量与估计惯量分布图

Fig. 6 Distribution of actual and estimated inertia of the wind turbine at each moment

1) 风电场有效惯量典型场景分析

00:00 时刻为典型中风速场景, 图中绿色点为依据该时刻该位置机组的实际风速得到的有效惯量实际值; 蓝色点为依据本文所提算法得到的有效惯量估计值。由图 6(a)和式(20)得该时刻风电场内 38 台机组的有效惯量实际值为 1.434×10^8 J, 而依据本文有效惯量时空分布模型求得的 38 台机组有效惯量估计值之和为 1.520×10^8 J, 误差为 5.9%。本文算法具有较高的准确度。

08:00 时刻为典型低风速场景, 风机运行于 MPPT 模式下。通过图 6(b)可知该时刻风电场有效惯量实际值为 1.018×10^8 J, 有效惯量估计值为 1.113×10^8 J, 误差为 9.0%。准确度低于 00:00 时刻中风速情况, 这是因为 MPPT 区受风速影响大, 对风速模型精确度要求高。

16:00 时刻为典型高风速场景, 风机运行于恒功率模式。由图 6(c)可知, 有效惯量实际值为 1.207×10^8 J, 有效惯量估计值为 1.234×10^8 J, 误差低至 1.9%, 因高风速下风机输出功率达到峰值, 转速恒定不受风速影响。有效惯量估计受风速时空分布模型的影响较小, 有效惯量估计准确度高达 98%。

2) 评估结果分析

有效惯量评估能为调度人员掌握风电场内各风

机虚拟惯量支撑能力提供依据。具有保守型特点的评估结果对实际工作生产具有更好的应用价值。对此, 需分析每台机组有效惯量估计效果, 表 1 为三个时刻评估数据的准确性及保守性分析。表中各误差值为估计误差百分比。定义评估数据在实际值 90%~100%范围内为保守型数据, 超过 100%或低于 90%为非保守型数据。定义在实际值 90%~110%范围内为精准数据, 分别计算精准数据、保守型数据的台数以及百分比。

表 1 评估方法在不同风速下准确性、保守性比较

Table 1 Comparison of accuracy and conservativeness of assessment methods at different wind speeds

场景	总体平均 误差/%	最大误 差/%	最小误 差/%	保守数据 占比	精准数据 占比
00:00 (中风速)	5.9	13	0.14	52.6% (20/38)	86.9% (33/38)
08:00 (低风速)	9.0	39	0.28	47.3% (18/38)	52.7% (20/38)
16:00 (高风速)	1.9	24	0.05	63.1% (24/38)	92.2% (35/38)

由表 1 分析可知, 本文所提风电场有效惯量评估方法平均误差低于 9.0%。高风速场景下平均误差为 1.9%, 准确度较高。针对个别机组评估误差较大的情况, 如 08:00 时刻存在误差达到 39%的机组, 表明仅通过尾流效应、时延效应以及 Copula 函数等相关性方法虽能避免不良数据的影响, 但不能彻底解决个别时刻个别位置风速不确定性的问题, 须后续进一步研究。在中高风速下, 保守型数据占一半以上, 精准型数据占 86.9%, 对于实际生产调度具有积极参考意义。低风速下精准数据占比较低, 为 52.7%。说明本文方法在中高风速场景下具有较高准确度。低风速场景下精确数据占比不高, 但在 80%~120%准确度范围内的评估占比达到 92%, 具有良好的准确度。

3) 指标对比分析

关于评估风机虚拟惯量支撑能力大小的指标, 文献[9]从调频能量的角度提出可释放转子动能概念来估计风机调频潜力, 将该方法应用至本文所提算例中, 三个典型场景下可释放转子动能如表 2 所示。

由表 2 分析可知, 传统惯量估计方法只考虑了转子动能, 忽略了惯量支撑中的损失动能, 虽能描述风机虚拟惯量支撑潜力, 却不能反映风机真实惯量水平, 存在明显的局限性, 而本文所提有效惯量指标弥补了该缺陷。由表 2 中数据可知, 损失动能

占可释放转子动能的 35.8%~50.5%，占比极高，相当部分的转子动能并未参与惯量支撑。说明在评估风机惯量水平时不可忽略用于弥补运行点偏移所造成的转子损失动能，进而证明本文所提惯量估计指标的必要性及优越性。

表 2 不同惯量评估方法的结果比较

Table 2 Comparison of the results of different inertia

时刻	assessment methods		
	可释放转子动能/J	有效惯量/J	损失动能占比/%
00:00 时刻(中风速)	2.367×10^8	1.520×10^8	35.8
08:00 时刻(低风速)	1.868×10^8	1.113×10^8	40.4
16:00 时刻(高风速)	2.492×10^8	1.234×10^8	50.5

4) 风电场有效惯量滚动更新验证

本文所提风电场有效惯量估计算法仅需获取测风塔实时测量风速，便可实现有效惯量估计值的滚动更新。为验证本文算法的实际应用效果，取某日测风塔从 12:00 开始的实际测量风速值，间隔为 10 min，共得到 144 组数据。利用本文所提算法得到风电场有效惯量估计上下限值。其中置信度取 90%。仿真验证结果如图 7 所示。

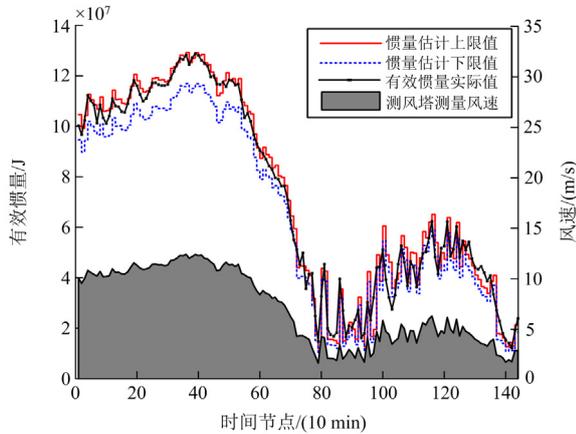


图 7 风电场惯量实际值与估计值的滚动更新比较

Fig. 7 Rolling update comparison of actual and estimated inertia of wind farm

图 7 中阴影部分为各时间节点测风塔的测量风速值，黑色点线图风电场有效惯量实际值，其求解基于 38 台机组的机端测量风速。红色阶梯曲线和蓝色阶梯曲线分别为有效惯量估计上下限。由图 7 分析可知：在一天 144 次风速测量数据的输入下，本文所提有效惯量估计算法能准确衡量实际惯量水平。只在 49、62、75、138 四处时间节点出现实际

值超越评估值上下限的状况，越限率仅为 2.8%，说明本文算法在实际应用中具备较高的准确度。同时惯量实际值整体贴合估计算法的上限值，越限节点多为越上限情况。说明本文算法的估计结果具备一定的保守性，符合实际需求。

4 结论

针对当前风电场惯量评估问题，本文基于多种相关性分析的风速时空分布模型，并考虑虚拟惯量支撑阶段运行点偏移造成的机械能损失，对风机虚拟惯量估计方法进行修正，提出有效惯量的定义及评估方法，得到风电场有效惯量时空分布。根据甘肃某风场构建算例，结果表明：

1) 本文所提风速时空分布模型计算简便，Copula 模型构建后，仅需测风塔实时风速即可获取风场整体风况，在保证结果可靠性的基础上降低输入数据诉求。

2) 风机转子动能和有效惯量与当前风速相关，过低、过高风速下风机有效惯量水平过低，惯量支撑能力不足。有效惯量在高风速区间存在极大值点，而超高风速下风机有效惯量较低甚至为负值，即对实际调频无贡献，甚至产生负面影响，因此不应参与虚拟惯量响应。

3) 本文所提有效惯量估计算法准确度较高且具有一定保守性，总体评估准确度高达 94.3%。同时对比现有估计方法，得到同一风电场损失动能占调频能量比例高达 50.5%的情况，体现了本文研究的必要性以及所提估计指标的优越性。

本文所提有效惯量估计算法能在实际运行中适应多变的风况，评估结果能反映风机参与虚拟惯量响应的真实贡献，为各风机虚拟惯量控制策略提供参考。对于系统层面，风电虚拟惯量能减小系统频率受扰后地变化率和下降程度，故本文所提算法能更真实地表征风电场频率抗扰能力的大小，具有广阔的实际应用前景。

附录 A

表 A1 风力发电机参数

Table A1 Parameters of wind turbine

参数	取值	参数	取值
额定风速 v_n /(m/s)	10	机组数量	33
切入风速 v_{cut-in} /(m/s)	3	额定功率/kW	1500
切出风速 $v_{cut-out}$ /(m/s)	25	额定电压/V	575
叶片半径 R /m	41	惯性时间常数/s	5.04

表 A2 惯量响应起始到结束两时间节点数据分析

Table A2 Analysis of data at two time points from the start to the end of the inertial response

风速/ (m/s)	转速/ (r/min)	捕获利用系 数减小倍数	损失率(损失动能/ 可释放转子动能)	有效惯量
10	14	0.721	0.328	3.54×10^6
11	14.6	0.676	0.418	3.06×10^6
12	15.2	0.644	0.509	2.59×10^6
13	15.2	0.611	0.442	2.94×10^6
14	15.2	0.575	0.385	3.24×10^6
15	15.2	0.533	0.345	3.45×10^6
16	15.2	0.482	0.327	3.55×10^6
17	15.2	0.442	0.337	3.50×10^6
18	15.2	0.390	0.375	3.30×10^6
19	15.2	0.333	0.446	2.92×10^6
20	15.2	0.271	0.556	2.34×10^6
21	15.2	0.202	0.710	1.53×10^6
22	15.2	0.123	0.909	0.48×10^6
23	15.2	0.031	1.162	-0.86×10^6
24	15.2	0.026	1.437	-2.31×10^6
25	15.2	0.021	1.869	-4.59×10^6

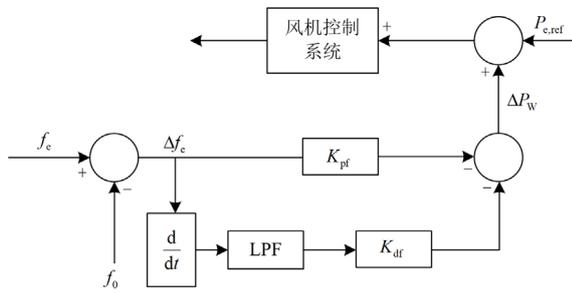


图 A1 双馈风机虚拟惯量控制

Fig. A1 Virtual inertia control of a doubly-fed wind turbine

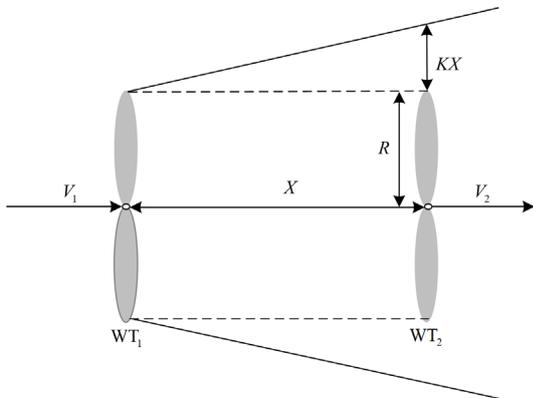


图 A2 风速尾流效应简化模型

Fig. A2 Simplified model of wind wake effect

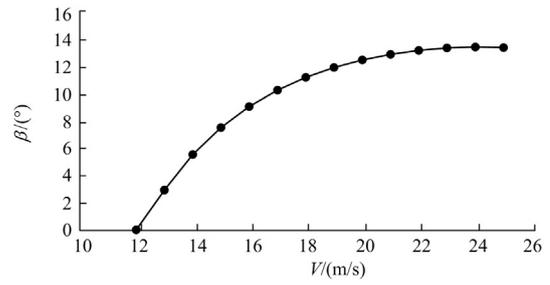


图 A3 桨距角与风速拟合曲线

Fig. A3 Pitch angle vs wind speed fitted curve

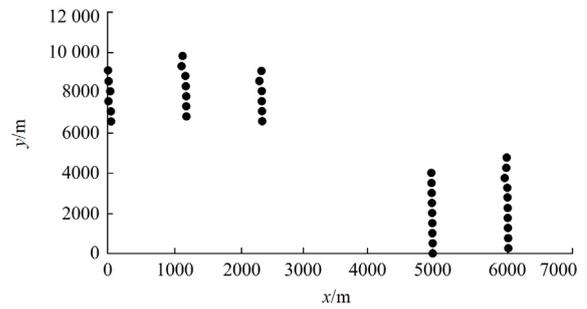


图 A4 机组地理位置分布图

Fig. A4 Geographical distribution of the unit

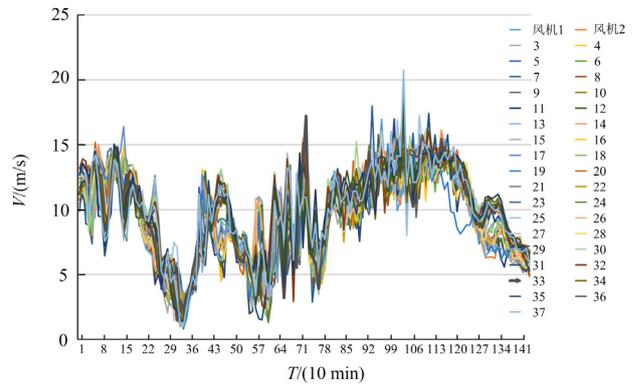


图 A5 风电场内各机组风速日变化曲线

Fig. A5 Daily wind speed variation curve for each unit in the wind farm

参考文献

[1] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.
 LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18.

[2] 张军六, 李佳朋, 唐震, 等. 基于本地测量的高比例新

- 能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 50-60.
- ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [3] 高启瑄, 吕世轩, 郑丽君, 等. 高渗透率条件下考虑功率协调性的可再生能源调频方式[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 122-131.
- GAO Qixuan, LÜ Shixuan, ZHENG Lijun, et al. Frequency regulation mode of renewable energy considering power coordination under the condition of high penetration[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 122-131.
- [4] 张祥宇, 沈文奇, 林毅, 等. 同步耦合双馈风机的虚拟惯量优化控制技术[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 126-133.
- ZHANG Xiangyu, SHEN Wenqi, LIN Yi, et al. Virtual inertia control optimization of synchronous coupled doubly-fed induction wind generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 126-133.
- [5] 苏鹏, 陈璐, 吴坚, 等. 新型电力系统多能源能量惯性动态优化控制模型[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 87-93.
- SU Peng, CHEN Lu, WU Jian, et al. Dynamic optimal control model of multi-energy inertia in new power system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 87-93.
- [6] WANG Tong, JIN Mingxin, LI Yongda, et al. Adaptive damping control scheme for wind grid-connected power systems with virtual inertia control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3902-3912.
- [7] 王彤, 邢其鹏, 李鸿恩, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 52-59.
- WANG Tong, XING Qipeng, LI Hongen, et al. Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 52-59.
- [8] 刘家豪, 王程, 毕天姝. 面向新能源电力系统频率时空动态的节点等效惯量指标及其应用[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16[2023-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220831.1105.004.html>.
- LIU Jiahao, WANG Cheng, BI Tianshu. Node equivalent inertia index for temporal-spatial frequency dynamics of renewable energy power system and its application[J]. Proceedings of the CSEE: 1-16[2023-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220831.1105.004.html>.
- [9] ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng. Impedance-based online estimation of nodal inertia and primary frequency regulation capability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2748-2760.
- [10] CHEN Pengwei, QI Chenchen, CHEN Xin. virtual inertia estimation method of DFIG-based wind farm with additional frequency control[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(5): 1076-1087.
- [11] 李世春, 夏智雄, 程绪长, 等. 基于类噪声扰动的电网惯量常态化连续估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4430-4439.
- LI Shichun, XIA Zhixiong, CHENG Xuchang, et al. Continuous estimation method of power system inertia based on ambient disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4430-4439.
- [12] 徐波, 章林炜, 俞向栋, 等. 基于系统辨识的电力系统惯量在线评估改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 62-69.
- XU Bo, ZHANG Linwei, YU Xiangdong, et al. An improved method of power system inertia online estimation based on system identification[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 62-69.
- [13] 李世春, 徐松林, 李惠子, 等. 风电场等效虚拟惯量快速估计方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4683-4692.
- LI Shichun, XU Songlin, LI Huizi, et al. Rapid estimation of equivalent virtual inertia of wind farm[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4683-4692.
- [14] 徐波, 杨逸欣, 余万强, 等. 基于状态空间模型与PEM迭代算法的电力系统惯量辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 123-130.
- XU Bo, YANG Yixin, YU Wanqiang, et al. Power system inertia identification based on a state space model and a PEM iterative algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 123-130.
- [15] 张峰, 李柏慷, 丁磊. 考虑风电调频能量联动分配的时变调频参数设定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 1-13.
- ZHANG Feng, LI Baikang, DING Lei. Parameter setting method of time-varying frequency regulation considering linked energy distribution of wind power for frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 1-13.
- [16] 聂永辉, 刘家僮, 孙斌, 等. 基于转子动能释放的风电并网系统非线性频率控制策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-11[2023-02-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221027.1139.009.html>.
- NIE Yonghui, LIU Jiatong, SUN Bin, et al. Research on nonlinear frequency control strategy of wind power grid

- connected system based on rotor kinetic energy release[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-11[2023-02-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221027.1139.009.html>.
- [17] 沈雅琦, 马静. 含虚拟惯量的双馈风电机组动态能量模型及振荡稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5506-5523.
SHEN Yaqi, MA Jing. Study on dynamic energy model of DFIG with virtual inertia control and oscillation stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5506-5523.
- [18] TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Virtual inertia optimization control of DFIG and assessment of equivalent inertia time constant of power grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(15): 1733-1740.
- [19] 段偲默, 苗世洪, 霍雪松, 等. 基于动态 Copula 的风光联合出力建模及动态相关性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 35-42.
DUAN Simo, MIAO Shihong, HUO Xuesong, et al. Modeling and dynamic correlation analysis of wind/solar power joint output based on dynamic Copula[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 35-42.
- [20] ZHANG Gang, LI Zhixuan, ZHANG Kaoshe, et al. Multi-objective interval prediction of wind power based on conditional copula function[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 802-812.
- [21] SUAL H. Bayesian estimation of copula parameters for wind speed models of dependence[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(16): 3823-3831.
- [22] 姚琦, 刘吉臻, 胡阳, 等. 含异步变速风机的风电场一次调频等值建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 185-192.
YAO Qi, LIU Jizhen, HU Yang, et al. Equivalent modeling and simulation for primary frequency regulation of wind farm with asynchronous variable-speed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 185-192.
- [23] 方云熠, 曾喆昭, 刘晴, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 145-151.
FANG Yunyi, ZENG Zhezhaohao, LIU Qing, et al. Maximum power point tracking with nonlinear disturbance rejection control for DPMSG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 145-151.
- [24] 刘璋玮, 刘锋, 梅生伟, 等. 扩张状态观测器在双馈风机虚拟惯量控制转速恢复中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1207-1217.
LIU Zhangwei, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Application of extended state observer in wind turbines speed recovery after inertia response control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1207-1217.
- [25] MIRSANE R S, TORABI F. An innovative method of investigating the wind turbine's inflow speed in a wind farm due to the multiple wake effect issue[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269: 116077.
- [26] CHEN K, LIN J, QIU Y, et al. Joint optimization of wind farm layout considering optimal control[J]. Renewable Energy, 2022, 182: 787-796.
- [27] RAIK B. Generation of time-coupled wind power infeed scenarios using pair-Copula construction[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1298-1306.
- [28] 韩帅, 张峰, 丁磊, 等. 基于混合 Copula 函数的风电场可用惯量评估方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 189-195.
HAN Shuai, ZHANG Feng, DING Lei, et al. Available inertia evaluation method of wind farm based on mixed Copula function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 189-195.
- [29] HU W, MIN Y, ZHOU Y, et al. Wind power forecasting errors modelling approach considering temporal and spatial dependence[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 489-498.

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-05-07

作者简介:

李东东(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、新能源并网和智能用电; E-mail: psldd@163.com

张先明(1997—), 男, 硕士, 研究方向为系统惯量评估; E-mail: 15166171897@163.com

姚寅(1986—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为计及新能源与电动汽车的智能电网系统。E-mail: yin.yao@shiep.edu.cn

(编辑 魏小丽)