



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118092147 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 30

(21) 申请号 202410521165.7

(56) 对比文件

(22) 申请日 2024.04.28

CN 116816597 A, 2023.09.29

WO 2022198764 A1, 2022.09.29

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 118092147 A

审查员 严明蒙

(43) 申请公布日 2024.05.28

(73) 专利权人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 王立林 郑松岳 王立忠 吴立建 洪义

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公司 33200

专利代理师 万尾甜 韩介梅

(51) Int. Cl.

G05B 11/42 (2006.01)

权利要求书4页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

海上风电机组的工业规划控制器设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,该方法为:1) 构建规划控制器架构,规划控制器采用双闭环架构:内环为风电机组标准工业控制器,外环为参数规划器;2) 利用风电机组非线性动力学数学模型,建立工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型;3) 基于预测模型,根据风电机组在运行过程中的转速稳定性、功率、载荷控制目标,确定参数规划器的目标函数、状态约束;4) 基于来流风速、波浪和风电机组状态,迭代求解参数规划器的目标函数,更新风电机组标准工业控制器参数。该方法在不改变现有工业控制器架构的条件下,通过动态调整工业控制器的参数,可以综合提升风电机组运行稳定性。



1. 一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1,建立风电机组工业规划控制器架构,规划控制器采用双闭环架构:内环为风电机组标准工业控制器,外环为参数规划器;

步骤2,利用风电机组非线性动力学数学模型,建立所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型;所述风电机组标准工业控制器的核心参数包括变桨和偏航的比例系数、变桨和偏航的积分系数以及转矩最优系数;

步骤3,基于所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型,根据风电机组在运行过程中的转速稳定性、功率、载荷控制目标,确定所述参数规划器的目标函数、状态约束;

步骤4,基于来流风速、波浪和风电机组状态,迭代求解所述参数规划器的目标函数,确定所述风电机组标准工业控制器的最优参数序列,并将最优参数序列的第一个向量作为所述风电机组标准工业控制器参数;

所述步骤2中,所述风电机组非线性动力学数学模型包括风电机组风轮-传动链-发电机的动力学模型、风电机组塔架-支撑结构的动力学模型和风电机组叶片变桨、发电机转矩、机舱偏航的控制动力学模型;所述步骤2具体包括以下步骤:

步骤2-1,构建风电机组风轮-传动链-发电机的动力学模型,公式表示如下:

$$\dot{\omega}_r = \frac{P_r(\omega_r, \beta, V_{wind})}{\omega_r J_r} - \frac{\omega_r D_s}{J_r} + \frac{\omega_g D_s}{J_r N_g} - \frac{\delta K_s}{J_r} \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_g = \frac{\omega_r D_s}{J_g N_g} - \frac{\omega_g D_s}{J_g N_g^2} + \frac{\delta K_s}{J_g N_g} - \frac{T_g}{J_g} \quad (2)$$

$$\dot{\delta} = \omega_r - \frac{\omega_g}{N_g} \quad (3)$$

其中, $\dot{\omega}_r$ 、 $\dot{\omega}_g$ 和 $\dot{\delta}$ 分别表示风轮转速 ω_r 、发电机转速 ω_g 、传动链扭角 δ 对时间的一阶导数; P_r 为风轮捕获功率,是关于风轮转速 ω_r 、叶片变桨角度 β 、轮毂处风速 V_{wind} 的函数; J_r 和 J_g 分别为风轮和发电机转动惯量; D_s 和 K_s 分别为传动链的阻尼系数和刚度系数; N_g 为齿轮箱变比; T_g 为发电机电磁转矩;

步骤2-2,构建风电机组塔架-支撑结构的动力学模型,表示如下:

$$\ddot{x}_{fa} = -\frac{K_t}{M_t} x_{fa} - \frac{D_t}{M_t} \dot{x}_{fa} + \frac{1}{M_t} F_t(\omega_r, \beta, V_{wind}) \quad (4)$$

$$\ddot{x}_{ss} = -\frac{K_t}{M_t} x_{ss} - \frac{D_t}{M_t} \dot{x}_{ss} + \frac{3}{2hM_t} T_g \quad (5)$$

其中, \ddot{x}_{fa} 为塔筒前后向形变加速度, \ddot{x}_{ss} 为塔筒侧向形变加速度; \dot{x}_{fa} 为塔筒前后向形变速度, \dot{x}_{ss} 为塔筒侧向形变速度; x_{fa} 为塔筒前后向形变位移, x_{ss} 为塔筒侧向形变位移; M_t 、 D_t 和 K_t 分别为塔架的质量、结构阻尼和刚度系数; F_t 为风轮面承受的推力,是关于风轮转速 ω_r 、叶片变桨角度 β 、轮毂处风速 V_{wind} 的函数; h 为塔架的高度;

步骤2-3,构建风电机组叶片变桨、发电机转矩、机舱偏航的控制动力学模型;模型被表述为:

$$\dot{\beta}_{1,2,3} = (\beta_{1,2,3}^{ref} - \beta_{1,2,3})/t_{au,pitch} \quad (6)$$

$$\dot{T}_{Gen} = (T_{Gen}^{ref} - T_{Gen})/t_{au,torque} \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_{Yaw} = (\theta_{yaw}^{ref} - \theta_{yaw})/t_{au,yaw} \quad (8)$$

其中, $\dot{\beta}_{1,2,3}$ 、 \dot{T}_{Gen} 和 $\dot{\theta}_{Yaw}$ 分别为变桨角、发电机转矩和偏航角对时间的一阶导数;
 $t_{au,pitch}$ 、 $t_{au,torque}$ 和 $t_{au,yaw}$ 分别为叶片、发电机、机舱的时间常数; $\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、 T_{Gen}^{ref} 和 θ_{yaw}^{ref} 分别为3
 个叶片变桨参考值、发电机转矩参考值和机舱偏航角参考值;

$\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、 T_{Gen}^{ref} 和 θ_{yaw}^{ref} 的计算公式如下:

$$\beta_{1,2,3}^{ref} = K_{p,bla} * (\omega_{g_ref}^{rate} - \tilde{\omega}_g) + K_{i,bla} * \int_0^T (\omega_{g_ref}^{rate} - \tilde{\omega}_g) dt \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_{Gen}^{ref} = K_{opt} * \tilde{\omega}_g^2, v_{wind} \leq v_{wind}^{rated} \\ T_{Gen}^{ref} = P_{ref}^{rate} / \tilde{\omega}_g, v_{wind} > v_{wind}^{rated} \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta_{yaw}^{ref} = K_{p,yaw} * (\theta_{wind} - \tilde{\theta}_{nacelle}) + K_{i,yaw} * \int_0^T (\theta_{wind} - \tilde{\theta}_{nacelle}) dt \quad (11)$$

其中, $K_{p,bla}$ 、 $K_{p,yaw}$ 、 $K_{i,bla}$ 和 $K_{i,yaw}$ 分别是变桨控制器的比例系数、偏航控制器的比例系数、变桨控制器的积分系数、偏航控制器的积分系数; K_{opt} 为额定风速以下的最优转矩系数;
 v_{wind}^{rated} 、 $\omega_{g_ref}^{rate}$ 和 P_{ref}^{rate} 分别为额定风速、额定发电机转速和额定功率; $\tilde{\omega}_g$ 为发电机转速测量值; θ_{wind} 和 $\tilde{\theta}_{nacelle}$ 分别为来流风向和测量机舱角度;

步骤2-4,所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型的构建方法为,将风轮-传动链-发电机、塔架-支撑结构以及控制的动力学模型转换为状态预测方程,表述为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{B}_d \mathbf{d} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{x} = [\omega_r, \omega_g, \delta, \dot{x}_{fa}, \dot{x}_{ss}, \beta_{1,2,3}, T_{Gen}, \theta_{yaw}]^T$ 是风电机组状态向量, $\beta_{1,2,3}$ 、 T_{Gen} 和 θ_{yaw} 分别为3个叶片变桨角度、发电机转矩和机舱偏航角; $\dot{\mathbf{x}}$ 是 \mathbf{x} 关于时间的一阶导数; $\mathbf{u} = [K_{p,bla}, K_{i,bla}, K_{opt}, K_{p,yaw}, K_{i,yaw}]^T$ 是核心参数向量; $\mathbf{d} = [v_{wind}, \theta_{wind}]^T$ 是风电机组风浪环境向量; \mathbf{A} 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与风电机组状态相关的变量组成的矩阵; \mathbf{B} 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与核心参数相关的变量组成的矩阵; \mathbf{B}_d 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与风电机组风浪环境相关的变量组成的矩阵。

2.根据权利要求1所述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,其特征在于,所述步骤1中:风电机组标准工业控制器的输入包括参数规划器给定的控制器核心参数以及机组实时运行状态和风-浪-流环境参数,输出包括叶片变桨参考值、发电机转矩参考值和机舱偏航角参考值;参数规划器的输入是机组实时运行状态和风-浪-流环境参数,输出是预测得到的未来N个周期的核心参数向量序列,并利用第一个向量来整定所述风电机组标准工业控制器的核心参数;所述参数规划器的执行周期 T_{plan} 大于等于所述风电机组标准工业控制器的控制周期 T_{ctrl} ,定义为: $T_{plan} = n * T_{ctrl}$ 。

3.根据权利要求1所述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,其特征在于,

所述步骤3包括如下步骤:

步骤3-1,将所述状态预测方程从连续时间状态转为离散时间状态,离散的周期为特定规划周期 T_{plan} ,离散化的状态预测方程表述为:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{A}^k \mathbf{x}^k + \mathbf{B}^k \mathbf{u}^k + \mathbf{B}_d^k \mathbf{d}^k \quad (13)$$

其中, $\mathbf{x}^k = [\omega_r^k, \omega_g^k, \delta^k, \dot{x}_{fa}^k, \dot{x}_{ss}^k, \beta_{1,2,3}^k, T_{Gen}^k, \theta_{yaw}^k]^T$ 为第k时刻的风电机组状态向量, \mathbf{x}^{k+1} 为第k+1时刻的风电机组状态向量, $\mathbf{u}^k = [K_{p_bla}^k, K_{i_bla}^k, K_{opt}^k, K_{p_yaw}^k, K_{i_yaw}^k]^T$ 为第k时刻的核心参数向量; $\mathbf{d}^k = [v_{wind}^k, \theta_{wind}^k]^T$ 为第k时刻的风电机组风浪环境向量; \mathbf{A}^k 、 \mathbf{B}^k 和 \mathbf{B}_d^k 分别为第k时刻离散化的矩阵A、矩阵B和矩阵 B_d ;

步骤3-2,在特定规划周期 T_{plan} 内,所述参数规划器的目标函数用以下成本函数来表示:

$$J_{CF} = \min_{\mathbf{u}_{k:k+N-1}} \sum_{i=1}^N [Q_1 * \text{norm}(\omega_r^{k+i} - \omega_r^{ref})^2 + Q_2 * \text{norm}(\omega_g^{k+i} - \omega_g^{ref})^2 + Q_3 * \text{norm}(\delta^{k+i})^2 + Q_4 * \text{norm}(\dot{x}_{fa}^{k+i})^2 + Q_5 * \text{norm}(\dot{x}_{ss}^{k+i})^2 + Q_6 * \text{norm}(\beta_{1,2,3}^{k+i})^2 + Q_7 * \text{norm}(T_{Gen}^{k+i})^2 + Q_8 * \text{norm}(\theta_{yaw}^{k+i})^2] \quad (14)$$

其中, J_{CF} 为成本函数的值; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 、 Q_7 、 Q_8 分别为转子转速、发电机转速、传动链扭角、塔架前后向形变速度、塔架侧向形变速度、叶片变桨、发电机转矩和机舱偏航的权重因子; $\text{norm}(\cdot)$ 为变量的归一化函数;

步骤3-3,所述参数规划器的状态约束为:

对风电机组候选给定叶片变桨、发电机转矩和机舱偏航的有限控制集、发电机转速取值进行约束:

$$\beta_{min} \leq \beta_{1,2,3} \leq \beta_{max} \quad (15)$$

$$T_{GenMin} \leq T_{Gen} \leq T_{GenMax} \quad (16)$$

$$\theta_{YawMin} \leq \theta_{Yaw} \leq \theta_{YawMax} \quad (17)$$

$$\dot{\beta}_{min} \leq \dot{\beta}_{1,2,3} \leq \dot{\beta}_{max} \quad (18)$$

$$\dot{T}_{GenMin} \leq \dot{T}_{Gen} \leq \dot{T}_{GenMax} \quad (19)$$

$$\dot{\theta}_{YawMin} \leq \dot{\theta}_{Yaw} \leq \dot{\theta}_{YawMax} \quad (20)$$

$$\omega_g^{cutin} \leq \omega_g \leq 1.1 \omega_g^{rate} \quad (21)$$

其中, β_{min} 、 T_{GenMin} 、 θ_{YawMin} 和 β_{max} 、 T_{GenMax} 、 θ_{YawMax} 分别是叶片变桨幅值、转矩幅值、机舱偏航幅值的最小和最大限制; $\dot{\beta}_{min}$ 、 \dot{T}_{GenMin} 、 $\dot{\theta}_{YawMin}$ 和 $\dot{\beta}_{max}$ 、 \dot{T}_{GenMax} 、 $\dot{\theta}_{YawMax}$ 分别是叶片变桨速率、转矩速率、机舱偏航速率的最小和最大限制; ω_g^{cutin} 为切入转速, ω_g^{rate} 为发电机额定转速值。

4. 根据权利要求3所述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,其特征在于,所述步骤4包括以下步骤:

在每个参数规划器的执行周期 T_{plan} 内,基于实测的来流风速和波浪、预测以及实测的风电机组状态,使用智能优化算法或二次规划求解算法迭代求解所述参数规划器的目标函

数,更新所述风电机组标准工业控制器核心参数的最优序列。

5.根据权利要求4所述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,其特征在于,所述智能优化算法为粒子群算法,采用粒子群算法迭代求解所述参数规划器的目标函数,具体步骤为:

1)由m个粒子组成的群体在空间中进行搜索,经过第j次迭代的第i个粒子所表征的风电机组标准工业控制器的核心参数及其参数变化率的向量分别表示为 U_i^j 和 \dot{U}_i^j ,在第j轮迭代中第I个粒子的成本函数 J_{CF} 的最小值对应的向量表示为 U_I^{min-j} ,群体内所有粒子经过的全局最优点表示为 U_g^{min-j} ,在第j+1次第i个粒子的速度和位置迭代方程为:

$$\dot{U}_i^{j+1} = \omega \dot{U}_i^j + c_1 r_1 (U_I^{min-j} - U_i^j) + c_2 r_2 (U_g^{min-j} - U_i^j) \quad (22)$$

$$U_i^{j+1} = U_i^j + \dot{U}_i^{j+1} \quad (23)$$

其中, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 为均匀分布与[0,1]之间的两个随机数, ω 为惯性权重;

2)当迭代次数达到设定值后,根据粒子群算法获得风电机组标准工业控制器的预测参数序列 $U^* = [u_k^*, u_{k+1}^*, \dots, u_{k+N}^*]$;将所述序列 U^* 的第一个向量

$u_k^* = [K_{p,bla}^k, K_{i,bla}^k, K_{opt}^k, K_{p,yaw}^k, K_{i,yaw}^k]^T$ 作为风电机组标准工业控制器的参数。

6.一种电子设备,其特征在于,包括:

一个或多个处理器;

存储器,用于存储一个或多个程序;

当所述一个或多个程序被所述一个或多个处理器执行,使得所述一个或多个处理器实现如权利要求1-5任一项所述的方法。

7.一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机指令,其特征在于,所述计算机指令用于使计算机执行如权利要求1-5任一项所述方法的步骤。

海上风电机组的工业规划控制器设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及工业控制器设计方法,具体涉及一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法。

背景技术

[0002] 大型化海上风电机组结构柔性特征显著,同时也经受着更为极端的环境荷载作用。根据数据调查,风电机组的风-功率曲线、风-推力曲线等运行的实际参数和理论设计值差异较大。风电机组在实际运行中面临很大的不确定性,给机组的发电质量、结构载荷以及稳定控制带来了挑战。因此,需要开发一种风电机组运行控制器架构,用来改善现有的海上风电机组运行,提高机组运行性能。

[0003] 现有的风电机组工业控制器架构基于单输入-单输出的比例-积分(Proportional-integral, PI)控制器,即在低风速区转矩控制器追踪最优转速参考值进行最大风功率捕获,在高风速区转矩和变桨控制器分别维持机组工作在额定有功功率输出和额定风轮转速值。为了优化机组运行性能,使机组实际运行性能接近理论设计值,提出了参数整定控制算法,如模糊自适应控制、滑模变结构控制以及模型参考自适应控制策略被相继提出。然而,此类参数整定控制改变了现有工业控制器的架构,具有风电机组运行失效的潜在风险,该方案难以被整机厂商和业主接受。

[0004] 海上风电机组配备了大量传感器以监测外部风-浪-流环境和机组运行状态,如何利用好外部环境和机组运行状态数据信息,在不改变原有工业控制器架构的前提下提升风电机组综合运行性能的研究内容匮乏,亟需进行深入研究。

发明内容

[0005] 本发明提供了一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,其目的是为了解决现有工业控制器在运行过程中理论设计值和实际运行值存在偏差,无法满足机组稳定运行、发电质量、结构载荷等性能需求;此外,海上风电机组配备了大量传感器,在不改变原有工业控制器架构前提下,通过设计可动态调整核心控制参数的工业规划控制器来综合优化机组运行性能。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:

[0007] 一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1,建立风电机组工业规划控制器架构,规划控制器采用双闭环架构:内环为风电机组标准工业控制器,外环为参数规划器;

[0009] 步骤2,利用风电机组非线性动力学数学模型,建立所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型;所述风电机组标准工业控制器的核心参数包括变桨和偏航的比例系数、变桨和偏航的积分系数以及转矩最优系数;

[0010] 步骤3,基于所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型,根据风电机组在运行过程中的转速稳定性、功率、载荷控制目标,确定所述参数规

划器的目标函数、状态约束；

[0011] 步骤4,基于来流风速、波浪和风电机组状态,迭代求解所述参数规划器的目标函数,确定所述风电机组标准工业控制器的最优参数序列,并将最优参数序列的第一个向量作为所述风电机组标准工业控制器参数。

[0012] 上述技术方案中,进一步地,所述步骤1中:

[0013] 将现有的风电机组工业控制器作为规划控制器的内环,内环输入包括参数规划器给定的控制器核心参数以及机组实时运行状态和风-浪-流环境参数,内环输出为叶片变桨参考值 $\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、发电机转矩参考值 T_{Gen}^{ref} 、机舱偏航角 θ_{Yaw}^{ref} ,用于执行风电机组的控制。

[0014] 参数规划器作为规划控制器的外环,参数规划器的输入是由传感器测量的机组实时运行状态和风-浪-流环境参数,输出是通过模型预测算法迭代求解得到未来N个周期的核心控制参数向量序列,并利用第一个向量来整定所述风电机组标准工业控制器的核心参数;

[0015] 参数规划器的执行周期 T_{plan} 大于等于工业控制器的控制器周期 T_{ctrl} ,定义为: $T_{plan} = n * T_{ctrl}$ 。即,风电机组执行n个周期的控制后,对工业控制器进行一次核心控制参数的更新。

[0016] 更进一步地,所述风电机组非线性动力学数学模型包括风电机组风轮-传动链-发电机的动力学模型、风电机组塔架-支撑结构的动力学模型和风电机组叶片变桨、发电机转矩、机舱偏航的控制动力学模型;所述步骤2进一步包括:

[0017] 步骤2-1,构建风电机组风轮-传动链-发电机的动力学模型,公式表示如下:

$$[0018] \quad \dot{\omega}_r = \frac{P_r(\omega_r, \beta, V_{wind})}{\omega_r J_r} - \frac{\omega_r D_s}{J_r} + \frac{\omega_g D_s}{J_r N_g} - \frac{\delta K_s}{J_r} \quad (1)$$

$$[0019] \quad \dot{\omega}_g = \frac{\omega_r D_s}{J_g N_g} - \frac{\omega_g D_s}{J_g N_g^2} + \frac{\delta K_s}{J_g N_g} - \frac{T_g}{J_g} \quad (2)$$

$$[0020] \quad \dot{\delta} = \omega_r - \frac{\omega_g}{N_g} \quad (3)$$

[0021] 其中, $\dot{\omega}_r$ 、 $\dot{\omega}_g$ 和 $\dot{\delta}$ 分别表示风轮转速 ω_r 、发电机转速 ω_g 、传动链扭角 δ 对时间的一阶导数; P_r 为风轮捕获功率,是关于风轮转速 ω_r 、叶片变桨角度 β 、轮毂处风速 V_{wind} 的函数; J_r 和 J_g 分别为风轮和发电机转动惯量; D_s 和 K_s 分别为传动链的阻尼系数和刚度系数; N_g 为齿轮箱变比; T_g 为发电机电磁转矩。

[0022] 步骤2-2,构建风电机组塔架-支撑结构的动力学模型,该模型主要考虑塔顶处前后向和侧向形变,该模型表述为:

$$[0023] \quad \ddot{x}_{fa} = -\frac{K_t}{M_t} x_{fa} - \frac{D_t}{M_t} \dot{x}_{fa} + \frac{1}{M_t} F_t(\omega_r, \beta, V_{wind}) \quad (4)$$

$$[0024] \quad \ddot{x}_{ss} = -\frac{K_t}{M_t} x_{ss} - \frac{D_t}{M_t} \dot{x}_{ss} + \frac{3}{2hM_t} T_g \quad (5)$$

[0025] 其中, \ddot{x}_{fa} 为塔筒前后向形变加速度, \ddot{x}_{ss} 为塔筒侧向形变加速度; \dot{x}_{fa} 为塔筒前后向形变速度, \dot{x}_{ss} 为塔筒侧向形变速度; x_{fa} 为塔筒前后向形变位移, x_{ss} 为塔筒侧向形变位移; M_t 、 D_t 和 K_t 分别为塔架的质量、结构阻尼和刚度系数; F_t 为风轮面承受的推力,是关于风轮转速 ω_r 、叶片变桨角度 β 、轮毂处风速 V_{wind} 的函数; h 为塔架的高度。

[0026] 步骤2-3,构建风电机组叶片变桨、发电机转矩、机舱偏航的控制动力学模型。模型被表述为:

$$[0027] \quad \dot{\beta}_{1,2,3} = (\beta_{1,2,3}^{ref} - \beta_{1,2,3})/t_{au,pitch} \quad (6)$$

$$[0028] \quad \dot{T}_{Gen} = (T_{Gen}^{ref} - T_{Gen})/t_{au,torque} \quad (7)$$

$$[0029] \quad \dot{\theta}_{Yaw} = (\theta_{yaw}^{ref} - \theta_{yaw})/t_{au,yaw} \quad (8)$$

[0030] 其中, $\dot{\beta}_{1,2,3}$ 、 \dot{T}_{Gen} 和 $\dot{\theta}_{Yaw}$ 分别为变桨角、发电机转矩和偏航角对时间的一阶导数; $t_{au,pitch}$ 、 $t_{au,torque}$ 和 $t_{au,yaw}$ 分别为叶片、发电机、机舱的时间常数; $\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、 T_{Gen}^{ref} 和 θ_{yaw}^{ref} 分别为3个叶片变桨参考值、发电机转矩参考值和机舱偏航角参考值;

[0031] $\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、 T_{Gen}^{ref} 和 θ_{yaw}^{ref} 的计算公式如下:

$$[0032] \quad \beta_{1,2,3}^{ref} = K_{p,bla} * (\omega_{g_ref}^{rate} - \tilde{\omega}_g) + K_{i,bla} * \int_0^T (\omega_{g_ref}^{rate} - \tilde{\omega}_g) dt \quad (9)$$

$$[0033] \quad \begin{cases} T_{Gen}^{ref} = K_{opt} * \tilde{\omega}_g^2, v_{wind} \leq v_{wind}^{rated} \\ T_{Gen}^{ref} = P_{ref}^{rate} / \tilde{\omega}_g, v_{wind} > v_{wind}^{rated} \end{cases} \quad (10)$$

$$[0034] \quad \theta_{yaw}^{ref} = K_{p,yaw} * (\theta_{wind} - \tilde{\theta}_{nacelle}) + K_{i,yaw} * \int_0^T (\theta_{wind} - \tilde{\theta}_{nacelle}) dt \quad (11)$$

[0035] 其中, $K_{p,bla}$ 、 $K_{p,yaw}$ 、 $K_{i,bla}$ 和 $K_{i,yaw}$ 分别是变桨控制器的比例系数、偏航控制器的比例系数、变桨控制器的积分系数、偏航控制器的积分系数; K_{opt} 为额定风速以下的最优转矩系数; v_{wind}^{rated} 、 $\omega_{g_ref}^{rate}$ 和 P_{ref}^{rate} 分别为额定风速、额定发电机转速和额定功率; $\tilde{\omega}_g$ 为发电机转速测量值; θ_{wind} 和 $\tilde{\theta}_{nacelle}$ 分别为来流风向和测量机舱角度。

[0036] 步骤2-4,所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型的构建方法为,将风轮-传动链-发电机、塔架-支撑结构以及控制的动力学模型转换为状态预测方程,其被表述为:

$$[0037] \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{B}_d\mathbf{d} \quad (12)$$

[0038] 其中, $\dot{\mathbf{x}}$ 是 \mathbf{x} 关于时间的一阶导数, $\mathbf{x} = [\omega_r, \omega_g, \delta, \dot{x}_{fa}, \dot{x}_{ss}, \beta_{1,2,3}, T_{Gen}, \theta_{yaw}]^T$ 是风电机组状态向量, $\beta_{1,2,3}$ 、 T_{Gen} 和 θ_{yaw} 分别为3个叶片变桨角度、发电机转矩和机舱偏航角; $\mathbf{u} = [K_{p,bla}, K_{i,bla}, K_{opt}, K_{p,yaw}, K_{i,yaw}]^T$ 是核心参数向量; $\mathbf{d} = [v_{wind}, \theta_{wind}]^T$ 是风电机组风浪环境向量; \mathbf{A} 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与风电机组状态相关的变量组成的矩阵; \mathbf{B} 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与核心参数相关的变量组成的矩阵; \mathbf{B}_d 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与风电机组风浪环境相关的变量组成的矩阵。

[0039] 更进一步地,所述步骤3进一步包括:

[0040] 步骤3-1,将步骤2-4的状态预测方程从连续时间状态转为离散时间状态,离散的周期为特定规划周期 T_{plan} , 离散化的状态预测方程表述为:

$$[0041] \quad \mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{A}^k \mathbf{x}^k + \mathbf{B}^k \mathbf{u}^k + \mathbf{B}_d^k \mathbf{d}^k \quad (13)$$

[0042] 其中, $\mathbf{x}^k = [\omega_r^k, \omega_g^k, \delta^k, \dot{x}_{fa}^k, \dot{x}_{ss}^k, \beta_{1,2,3}^k, T_{Gen}^k, \theta_{yaw}^k]^T$ 为第 k 时刻的风电机组状

态向量, \mathbf{x}^{k+1} 为第 $k+1$ 时刻的风电机组状态向量,

$\mathbf{u}^k = [K_{p_bla}^k, K_{i_bla}^k, K_{opt}^k, K_{p_yaw}^k, K_{i_yaw}^k]^T$ 为第 k 时刻的核心参数向量;

$\mathbf{d}^k = [v_{wind}^k, \theta_{wind}^k]^T$ 为第 k 时刻的风电机组风浪环境向量; \mathbf{A}^k 、 \mathbf{B}^k 和 \mathbf{B}_d^k 分别为第 k 时刻离散化的矩阵 \mathbf{A} 、矩阵 \mathbf{B} 和矩阵 \mathbf{B}_d 。

[0043] 步骤3-2,在特定规划周期 T_{plan} 内,所述参数规划器以风电机组的功率捕获质量提升和载荷降低的综合优化为目标,目标函数可以用以下成本函数来表示:

$$J_{CF} = \min_{\mathbf{u}_{k:k+N-1}} \sum_{i=1}^N [Q_1 * norm(\omega_r^{k+i} - \omega_r^{ref})^2 + Q_2 * norm(\omega_g^{k+i} - \omega_g^{ref})^2 + Q_3 * norm(\delta^{k+i})^2 + Q_4 * norm(\dot{x}_{fa}^{k+i})^2 + Q_5 * norm(\dot{x}_{ss}^{k+i})^2 + Q_6 * norm(\beta_{1,2,3}^{k+i})^2 + Q_7 * norm(T_{Gen}^{k+i})^2 + Q_8 * norm(\theta_{Yaw}^{k+i})^2]$$

(14)

[0045] 其中, J_{CF} 为成本函数的值; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 、 Q_7 、 Q_8 分别为转子转速、发电机转速、传动链扭角、塔架前后向形变速度、塔架侧向形变速度、叶片变桨、发电机转矩和机舱偏航的权重因子,权重因子大小基于发电质量和结构载荷降低的帕累托理论,依据实时外部环境特征进行整定; $norm(\cdot)$ 为变量的归一化函数。

[0046] 步骤3-3,所述参数规划器的状态约束为:

[0047] 对风电机组候选给定叶片变桨、发电机转矩、偏航的有限控制集、发电机转速取值进行约束:

$$[0048] \quad \beta_{min} \leq \beta_{1,2,3} \leq \beta_{max} \quad (15)$$

$$[0049] \quad T_{GenMin} \leq T_{Gen} \leq T_{GenMax} \quad (16)$$

$$[0050] \quad \theta_{YawMin} \leq \theta_{Yaw} \leq \theta_{YawMax} \quad (17)$$

$$[0051] \quad \dot{\beta}_{min} \leq \dot{\beta}_{1,2,3} \leq \dot{\beta}_{max} \quad (18)$$

$$[0052] \quad \dot{T}_{GenMin} \leq \dot{T}_{Gen} \leq \dot{T}_{GenMax} \quad (19)$$

$$[0053] \quad \dot{\theta}_{YawMin} \leq \dot{\theta}_{Yaw} \leq \dot{\theta}_{YawMax} \quad (20)$$

$$[0054] \quad \omega_g^{cutin} \leq \omega_g \leq 1.1\omega_g^{rate} \quad (21)$$

[0055] 其中, β_{min} 、 T_{GenMin} 、 θ_{YawMin} 和 β_{max} 、 T_{GenMax} 、 θ_{YawMax} 分别是叶片变桨幅值、转矩幅值、机舱偏航幅值的最小和最大限制; $\dot{\beta}_{min}$ 、 \dot{T}_{GenMin} 、 $\dot{\theta}_{YawMin}$ 和 $\dot{\beta}_{max}$ 、 \dot{T}_{GenMax} 、 $\dot{\theta}_{YawMax}$ 分别是叶片变桨速率、转矩速率、偏航速率的最大和最小限制; ω_g^{cutin} 为切入转速, ω_g^{rate} 为发电机额定转速值。

[0056] 更进一步地,所述步骤4进一步包括:

[0057] 在每个参数规划器的执行周期 T_{plan} 内,基于实测的来流风速和波浪、预测以及实测的风电机组状态,使用智能优化算法或二次规划求解算法迭代求解所述参数规划器的目标函数,更新所述风电机组标准工业控制器核心参数的最优序列。二次规划求解算法原理是梯度下降法;智能求解算法,如粒子群算法可以快速求解多步预测问题,并能找到全局最优解。

[0058] 更进一步地,所述使智能优化算法为粒子群算法,采用粒子群算法迭代求解所述参数规划器的目标函数,具体步骤为:

[0059] 1) 由 m 个粒子组成的群体在空间中进行搜索,经过第 j 次迭代的第 i 个粒子所表征的风电机组标准工业控制器的核心参数及其参数变化率的向量分别表示为 \mathbf{U}_i^j 和 $\dot{\mathbf{U}}_i^j$,在第 j 轮迭代中第 l 个粒子的成本函数 J_{CF} 的最小值对应的向量表示为 $\mathbf{U}_l^{\min-j}$,群体内所有粒子经过的全局最优点表示为 $\mathbf{U}_g^{\min-j}$,在第 $j+1$ 次第 i 个粒子的速度和位置迭代方程为:

$$[0060] \quad \dot{\mathbf{U}}_i^{j+1} = \omega \dot{\mathbf{U}}_i^j + c_1 r_1 (\mathbf{U}_l^{\min-j} - \mathbf{U}_i^j) + c_2 r_2 (\mathbf{U}_g^{\min-j} - \mathbf{U}_i^j) \quad (22)$$

$$[0061] \quad \mathbf{U}_i^{j+1} = \mathbf{U}_i^j + \dot{\mathbf{U}}_i^{j+1} \quad (23)$$

[0062] 其中, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 为均匀分布与 $[0,1]$ 之间的两个随机数, ω 为惯性权重,数值取决于对当前速度的继承。

[0063] 2) 当迭代次数达到设定值后,根据粒子群算法获得风电机组标准工业控制器的预测参数序列, $\mathbf{U}^* = [\mathbf{u}_k^*, \mathbf{u}_{k+1}^*, \dots, \mathbf{u}_{k+N}^*]$ 。将所述序列 \mathbf{U}^* 的第一个向量 $\mathbf{u}_k^* = [K_{p,bla}^k, K_{i,bla}^k, K_{opt}^k, K_{p,yaw}^k, K_{i,yaw}^k]^T$ 作为风电机组标准工业控制器的参数。

[0064] 本发明还提供一种电子设备,包括:

[0065] 一个或多个处理器;

[0066] 存储器,用于存储一个或多个程序;

[0067] 当所述一个或多个程序被所述一个或多个处理器执行,使得所述一个或多个处理器实现如上所述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法。

[0068] 本发明还提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机指令,所述计算机指令用于使计算机执行上述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法的步骤。

[0069] 本发明的有益效果在于:

[0070] 本发明提供了一种提升运行性能的海上风电机组规划控制器设计方法。海上风电机组工业规划控制器采用双闭环架构,内环是现有的风电机组标准工业控制器旨在不改变现有整机厂/业主的成熟控制器方案;外环的参数规划器动态调节工业控制器核心参数实现多目标优化。

[0071] 对于规划器中预测模型的建立,基于风电机组风轮-传动链-发电机-塔架-支撑结构及控制的动力学模型,构建了工业控制器核心参数与风电机组状态之间的状态预测方程。根据风电机组在运行过程中的转速稳定性、功率、载荷控制目标,确定参数规划器的目标函数、状态约束。基于实测的来流风速和波浪、预测以及实测的风电机组状态,迭代求解目标函数,确定最优工业控制器参数的最优序列,并将最优序列的第一个向量作为控制器参数。

[0072] 本发明在不改变现有工业控制器架构的条件下,通过动态调整工业控制器的参数,可以综合提升风电机组运行稳定性,优化功率输出质量,降低部件结构载荷,提高风电机组运行的可靠性和高效性具有重要的工程应用价值。

附图说明

- [0073] 图1为本发明的海上风电机组工业规划控制器架构图；
 [0074] 图2为基于快速粒子群算法的非线性成本函数求解器；
 [0075] 图3为海上风电机组的风速-波浪外部环境工况曲线；
 [0076] 图4为变桨、转矩子控制系统参数变化实时对比曲线；
 [0077] 图5为对应工况的转速、功率、叶片根部载荷、塔架底部载荷优化效果实时对比曲线。

具体实施方式

[0078] 以下结合附图,对本发明的具体实施方式作进一步详述,以使本发明技术方案更易于理解和掌握。

[0079] 本发明实施例提供一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法,如图1所示为工业规划控制器架构图。

[0080] 所述工业规划控制器的设计方法,具体步骤如下:

[0081] 步骤1,建立风电机组工业规划控制器架构,规划控制器采用双闭环架构:内环为风电机组标准工业控制器,外环为参数规划器;

[0082] 步骤2,利用风电机组非线性动力学数学模型,建立所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型;所述风电机组标准工业控制器的核心参数包括变桨和偏航的比例系数、变桨和偏航的积分系数以及转矩最优系数;

[0083] 步骤3,基于所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型,根据风电机组在运行过程中的转速稳定性、功率、载荷控制目标,确定所述参数规划器的目标函数、状态约束;

[0084] 步骤4,基于来流风速、波浪和风电机组状态,迭代求解所述参数规划器的目标函数,确定所述风电机组标准工业控制器的最优参数序列,并将最优参数序列的第一个向量作为所述风电机组标准工业控制器参数。

[0085] 步骤1中:风电机组标准工业控制器的输入包括参数规划器给定的控制器核心参数以及机组实时运行状态和风-浪-流环境参数,输出包括叶片变桨参考值、发电机转矩参考值和机舱偏航角参考值;参数规划器的输入是机组实时运行状态和风-浪-流环境参数,输出是预测得到的未来N个周期的核心参数向量序列,并利用第一个向量来整定所述风电机组标准工业控制器的核心参数;所述参数规划器的执行周期 T_{plan} 大于等于所述风电机组标准工业控制器的控制周期 T_{ctrl} ,定义为: $T_{plan} = n * T_{ctrl}$ 。

[0086] 步骤2中,所述风电机组非线性动力学数学模型包括风电机组风轮-传动链-发电机的动力学模型、风电机组塔架-支撑结构的动力学模型和风电机组叶片变桨、发电机转矩、机舱偏航的控制动力学模型;步骤2具体包括以下步骤:

[0087] 步骤2-1,构建风电机组风轮-传动链-发电机的动力学模型,公式表示如下:

$$[0088] \quad \dot{\omega}_r = \frac{P_r(\omega_r, \beta, V_{wind})}{\omega_r J_r} - \frac{\omega_r D_s}{J_r} + \frac{\omega_g D_s}{J_r N_g} - \frac{\delta K_s}{J_r} \quad (1)$$

$$[0089] \quad \dot{\omega}_g = \frac{\omega_r D_s}{J_g N_g} - \frac{\omega_g D_s}{J_g N_g^2} + \frac{\delta K_s}{J_g N_g} - \frac{T_g}{J_g} \quad (2)$$

$$[0090] \quad \dot{\delta} = \omega_r - \frac{\omega_g}{N_g} \quad (3)$$

[0091] 其中, $\dot{\omega}_r$ 、 $\dot{\omega}_g$ 和 $\dot{\delta}$ 分别表示风轮转速 ω_r 、发电机转速 ω_g 、传动链扭角 δ 对时间的一阶导数; P_r 为风轮捕获功率,是关于风轮转速 ω_r 、叶片变桨角度 β 、轮毂处风速 V_{wind} 的函数; J_r 和 J_g 分别为风轮和发电机转动惯量; D_s 和 K_s 分别为传动链的阻尼系数和刚度系数; N_g 为齿轮箱变比; T_g 为发电机电磁转矩。

[0092] 步骤2-2,构建风电机组塔架-支撑结构的动力学模型,该模型主要考虑塔顶处前后向和侧向形变,该模型表述为:

$$[0093] \quad \ddot{x}_{fa} = -\frac{K_t}{M_t} x_{fa} - \frac{D_t}{M_t} \dot{x}_{fa} + \frac{1}{M_t} F_t(\omega_r, \beta, V_{wind}) \quad (4)$$

$$[0094] \quad \ddot{x}_{ss} = -\frac{K_t}{M_t} x_{ss} - \frac{D_t}{M_t} \dot{x}_{ss} + \frac{3}{2hM_t} T_g \quad (5)$$

[0095] 其中, \ddot{x}_{fa} 为塔筒前后向形变加速度, \ddot{x}_{ss} 为侧向形变加速度; \dot{x}_{fa} 为塔筒前后向形变速度, \dot{x}_{ss} 为塔筒侧向形变速度; x_{fa} 为塔筒前后向形变位移, x_{ss} 为塔筒侧向形变位移; M_t 、 D_t 和 K_t 分别为塔架的质量、结构阻尼和刚度系数; F_t 为风轮面承受的推力,是关于风轮转速 ω_r 、叶片变桨角度 β 、轮毂处风速 V_{wind} 的函数; h 为塔架的高度。

[0096] 步骤2-3,构建风电机组叶片变桨、发电机转矩、机舱偏航的控制动力学模型。模型被表述为:

$$[0097] \quad \dot{\beta}_{1,2,3} = (\beta_{1,2,3}^{ref} - \beta_{1,2,3})/t_{au,pitch} \quad (6)$$

$$[0098] \quad \dot{T}_{Gen} = (T_{Gen}^{ref} - T_{Gen})/t_{au,torque} \quad (7)$$

$$[0099] \quad \dot{\theta}_{yaw} = (\theta_{yaw}^{ref} - \theta_{yaw})/t_{au,yaw} \quad (8)$$

[0100] 其中, $\dot{\beta}_{1,2,3}$ 、 \dot{T}_{Gen} 和 $\dot{\theta}_{yaw}$ 分别为变桨角、发电机转矩和偏航角对时间的一阶导数; $t_{au,pitch}$ 、 $t_{au,torque}$ 和 $t_{au,yaw}$ 分别为叶片、发电机、机舱的时间常数; $\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、 T_{Gen}^{ref} 和 θ_{yaw}^{ref} 分别为叶片变桨参考值、发电机转矩参考值和机舱偏航角参考值;

[0101] $\beta_{1,2,3}^{ref}$ 、 T_{Gen}^{ref} 和 θ_{yaw}^{ref} 的计算公式如下:

$$[0102] \quad \beta_{1,2,3}^{ref} = K_{p,bla} * (\omega_{g_ref}^{rate} - \tilde{\omega}_g) + K_{i,bla} * \int_0^T (\omega_{g_ref}^{rate} - \tilde{\omega}_g) dt \quad (9)$$

$$[0103] \quad \begin{cases} T_{Gen}^{ref} = K_{opt} * \tilde{\omega}_g^2, v_{wind} \leq v_{wind}^{rated} \\ T_{Gen}^{ref} = P_{ref}^{rate} / \tilde{\omega}_g, v_{wind} > v_{wind}^{rated} \end{cases} \quad (10)$$

$$[0104] \quad \theta_{yaw}^{ref} = K_{p,yaw} * (\theta_{wind} - \tilde{\theta}_{nacelle}) + K_{i,yaw} * \int_0^T (\theta_{wind} - \tilde{\theta}_{nacelle}) dt \quad (11)$$

[0105] 其中, $K_{p,bla}$ 、 $K_{p,yaw}$ 、 $K_{i,bla}$ 和 $K_{i,yaw}$ 分别是变桨控制器的比例系数、偏航控制器的比例系数、变桨控制器的积分系数、偏航控制器的积分系数; K_{opt} 为额定风速以下的最优转矩系数; v_{wind}^{rated} 、 $\omega_{g_ref}^{rate}$ 和 P_{ref}^{rate} 分别为额定风速、额定发电机转速和额定功率; $\tilde{\omega}_g$ 为发电机转速测量值; θ_{wind} 和 $\tilde{\theta}_{nacelle}$ 分别为来流风向和测量机舱角度。

[0106] 步骤2-4,所述风电机组标准工业控制器的核心参数与风电机组状态之间的预测模型的构建方法为,将风轮-传动链-发电机、塔架-支撑结构以及控制的动力学模型转换为

状态预测方程,其被表述为:

$$[0107] \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{B}_d\mathbf{d} \quad (12)$$

[0108] 其中, $\mathbf{x} = [\omega_r, \omega_g, \delta, \dot{x}_{fa}, \dot{x}_{ss}, \beta_{1,2,3}, T_{Gen}, \theta_{yaw}]^T$ 是风电机组状态向量, $\beta_{1,2,3}$ 、 T_{Gen} 和 θ_{yaw} 分别为3个叶片变桨角度、发电机转矩和机舱偏航角; $\dot{\mathbf{x}}$ 是 \mathbf{x} 关于时间的一阶导数; $\mathbf{u} = [K_{p_bla}, K_{i_bla}, K_{opt}, K_{p_yaw}, K_{i_yaw}]^T$ 是核心参数向量; $\mathbf{d} = [v_{wind}, \theta_{wind}]^T$ 是风电机组风浪环境向量; \mathbf{A} 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与风电机组状态相关的变量组成的矩阵; \mathbf{B} 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与核心参数相关的变量组成的矩阵; \mathbf{B}_d 是由所述风电机组非线性动力学数学模型中与风电机组风浪环境相关的变量组成的矩阵。

[0109] 步骤3包括如下步骤:

[0110] 步骤3-1,将所述状态预测方程从连续时间状态转为离散时间状态,离散的周期为特定规划周期 T_{plan} , 离散化的状态预测方程表述为:

$$[0111] \quad \mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{A}^k \mathbf{x}^k + \mathbf{B}^k \mathbf{u}^k + \mathbf{B}_d^k \mathbf{d}^k \quad (13)$$

[0112] 其中, $\mathbf{x}^k = [\omega_r^k, \omega_g^k, \delta^k, \dot{x}_{fa}^k, \dot{x}_{ss}^k, \beta_{1,2,3}^k, T_{Gen}^k, \theta_{yaw}^k]^T$ 为第 k 时刻的风电机组状态向量, \mathbf{x}^{k+1} 为第 $k+1$ 时刻的风电机组状态向量,

$\mathbf{u}^k = [K_{p_bla}^k, K_{i_bla}^k, K_{opt}^k, K_{p_yaw}^k, K_{i_yaw}^k]^T$ 为第 k 时刻的核心参数向量;

$\mathbf{d}^k = [v_{wind}^k, \theta_{wind}^k]^T$ 为第 k 时刻的风电机组风浪环境向量; \mathbf{A}^k 、 \mathbf{B}^k 和 \mathbf{B}_d^k 分别为第 k 时刻离散化的矩阵 \mathbf{A} 、矩阵 \mathbf{B} 和矩阵 \mathbf{B}_d ;

[0113] 步骤3-2,在特定规划周期 T_{plan} 内,所述参数规划器的目标函数用以下成本函数来表示:

$$[0114] \quad J_{CF} = \min_{\mathbf{u}_{k:k+N-1}} \sum_{i=1}^N [Q_1 * \text{norm}(\omega_r^{k+i} - \omega_r^{ref})^2 + Q_2 * \text{norm}(\omega_g^{k+i} - \omega_g^{ref})^2 + Q_3 * \text{norm}(\delta^{k+i})^2 + Q_4 * \text{norm}(\dot{x}_{fa}^{k+i})^2 + Q_5 * \text{norm}(\dot{x}_{ss}^{k+i})^2 + Q_6 * \text{norm}(\beta_{1,2,3}^{k+i})^2 + Q_7 * \text{norm}(T_{Gen}^{k+i})^2 + Q_8 * \text{norm}(\theta_{Yaw}^{k+i})^2]$$

(14)

[0115] 其中, J_{CF} 为成本函数的值; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 、 Q_7 、 Q_8 分别为转子转速、发电机转速、传动链扭角、塔架前后向形变速度、塔架侧向形变速度、叶片变桨、发电机转矩和机舱偏航的权重因子; $\text{norm}(\cdot)$ 为变量的归一化函数;

[0116] 步骤3-3,所述参数规划器的状态约束为:

[0117] 对风电机组候选给定叶片变桨、发电机转矩和机舱偏航的有限控制集、发电机转速取值进行约束:

$$[0118] \quad \beta_{min} \leq \beta_{1,2,3} \leq \beta_{max} \quad (15)$$

$$[0119] \quad T_{GenMin} \leq T_{Gen} \leq T_{GenMax} \quad (16)$$

$$[0120] \quad \theta_{YawMin} \leq \theta_{Yaw} \leq \theta_{YawMax} \quad (17)$$

$$[0121] \quad \dot{\beta}_{min} \leq \dot{\beta}_{1,2,3} \leq \dot{\beta}_{max} \quad (18)$$

$$[0122] \quad \dot{T}_{GenMin} \leq \dot{T}_{Gen} \leq \dot{T}_{GenMax} \quad (19)$$

$$[0123] \quad \dot{\theta}_{YawMin} \leq \dot{\theta}_{Yaw} \leq \dot{\theta}_{YawMax} \quad (20)$$

$$[0124] \quad \omega_g^{cutin} \leq \omega_g \leq 1.1\omega_g^{rate} \quad (21)$$

[0125] 其中, β_{min} 、 T_{GenMin} 、 θ_{YawMin} 和 β_{max} 、 T_{GenMax} 、 θ_{YawMax} 分别是叶片变桨幅值、转矩幅值、机舱偏航幅值的最小和最大限制; $\dot{\beta}_{min}$ 、 \dot{T}_{GenMin} 、 $\dot{\theta}_{YawMin}$ 和 $\dot{\beta}_{max}$ 、 \dot{T}_{GenMax} 、 $\dot{\theta}_{YawMax}$ 分别是叶片变桨速率、转矩速率、机舱偏航速率的最小和最大限制; ω_g^{cutin} 为切入转速, ω_g^{rate} 为发电机额定转速值。

[0126] 步骤4包括以下步骤:

[0127] 在每个参数规划器的执行周期 T_{plan} 内, 基于实测的来流风速和波浪、预测以及实测的风电机组状态, 使用智能优化算法或二次规划求解算法迭代求解所述参数规划器的目标函数, 更新所述风电机组标准工业控制器核心参数的最优序列。

[0128] 使智能优化算法为粒子群算法, 采用粒子群算法迭代求解所述参数规划器的目标函数, 算法的流程图如图2所示, 具体步骤为:

[0129] 1) 由 m 个粒子组成的群体在空间中进行搜索, 经过第 j 次迭代的第 i 个粒子所表征的风电机组标准工业控制器的核心参数及其参数变化率的向量分别表示为 U_i^j 和 \dot{U}_i^j , 在第 j 轮迭代中第 l 个粒子的成本函数 J_{CF} 的最小值对应的向量表示为 U_l^{min-j} , 群体内所有粒子经过的全局最优点表示为 U_g^{min-j} , 在第 $j+1$ 次第 i 个粒子的速度和位置迭代方程为:

$$[0130] \quad \dot{U}_i^{j+1} = \omega \dot{U}_i^j + c_1 r_1 (U_l^{min-j} - U_i^j) + c_2 r_2 (U_g^{min-j} - U_i^j) \quad (22)$$

$$[0131] \quad U_i^{j+1} = U_i^j + \dot{U}_i^{j+1} \quad (23)$$

[0132] 其中, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 为均匀分布与 $[0,1]$ 之间的两个随机数, ω 为惯性权重;

[0133] 2) 当迭代次数达到设定值后, 根据粒子群算法获得风电机组标准工业控制器的预测参数序列 $U^* = [u_k^*, u_{k+1}^*, \dots, u_{k+N}^*]$; 将所述序列 U^* 的第一个向量 $u_k^* = [K_{p,bla}^k, K_{i,bla}^k, K_{opt}^k, K_{p,yaw}^k, K_{i,yaw}^k]^T$ 作为风电机组标准工业控制器的参数。

[0134] 本发明还提供一种电子设备, 包括: 一个或多个处理器; 存储器, 用于存储一个或多个程序; 当所述一个或多个程序被所述一个或多个处理器执行, 使得所述一个或多个处理器实现如上所述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法。

[0135] 本发明进一步还提供一种计算机可读存储介质, 其上存储有计算机指令, 所述计算机指令用于使计算机执行上述的一种海上风电机组的工业规划控制器设计方法的步骤。

[0136] 实施例一

[0137] 将设计得到的海上风电机组的工业规划控制器应用于考虑 p-y-M- Θ 桩土结构的 DTU-10MW 风电机组模型。环境参数设置为: (a) IEC 标准的 8m/s 湍流风, 湍流强度 20.30%, 波浪峰值高度为 1.31m, 波浪周期为 5.67s, 风浪夹角为 90deg; (b) IEC 标准的 20m/s 湍流风, 湍流强度 14.42%, 波浪峰值高度为 2.76m, 波浪周期为 6.99s, 风浪夹角为 90deg。

[0138] 图3展示了环境参数 (a) 和环境参数 (b) 所对应的海上风电机组的风速、波浪外部

环境工况时序图。图4展示了变桨、转矩子控制系统参数变化的标准控制器和规划控制器实时对比曲线, (a) 为环境参数 (a) 所对应的转矩最优参数时序变化对比图, (b) 为环境参数 (b) 所对应的变桨比例参数、积分参数时序变化对比图, 由图可知本发明提出的规划控制器采用参数规划器调节工业控制器的参数。图5展示了环境参数 (a) 和环境参数 (b) 所对应的有功功率、转子转速、叶片根部挥舞弯矩、塔筒底部前后向弯矩、塔筒底部侧向弯矩的标准控制器和规划控制器实时对比曲线, 由图可知本发明提出的规划控制器能够有效抑制功率、转速波动, 以及降低叶片、塔架等关键部件的结构载荷, 综合提升了海上风电机组的运行性能。

[0139] 以上只是本发明的典型实例, 除此之外, 本发明还可以有其它多种具体实施方式, 凡采用等同替换或等效变换形成的技术方案, 均落在本发明要求保护的范围内。

[0140] 还需要说明的是, 术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含, 从而使得包括一系列要素的过程、方法、商品或者设备不仅包括那些要素, 而且还包括没有明确列出的其他要素, 或者是还包括为这种过程、方法、商品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下, 由语句“包括一个……”限定的要素, 并不排除在包括所述要素的过程、方法、商品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0141] 本领域技术人员应明白, 本申请的实施例可提供为方法、系统或计算机程序产品。因此, 本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且, 本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质 (包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等) 上实施的计算机程序产品的形式。

[0142] 虽然上面已经参考各种实施例描述了本发明, 但是应当理解, 在不脱离本发明的范围的情况下, 可以进行许多改变和修改。因此, 其旨在上述详细描述被认为是例示性的而非限制性的, 并且应当理解, 权利要求 (包括所有等同物) 旨在限定本发明的精神和范围。以上这些实施例应理解为仅用于说明本发明而不适用于限制本发明的保护范围。在阅读了本发明的记载的内容之后, 技术人员可以对本发明作各种改动或修改, 这些等效变化和修饰同样落入本发明权利要求所限定的范围。

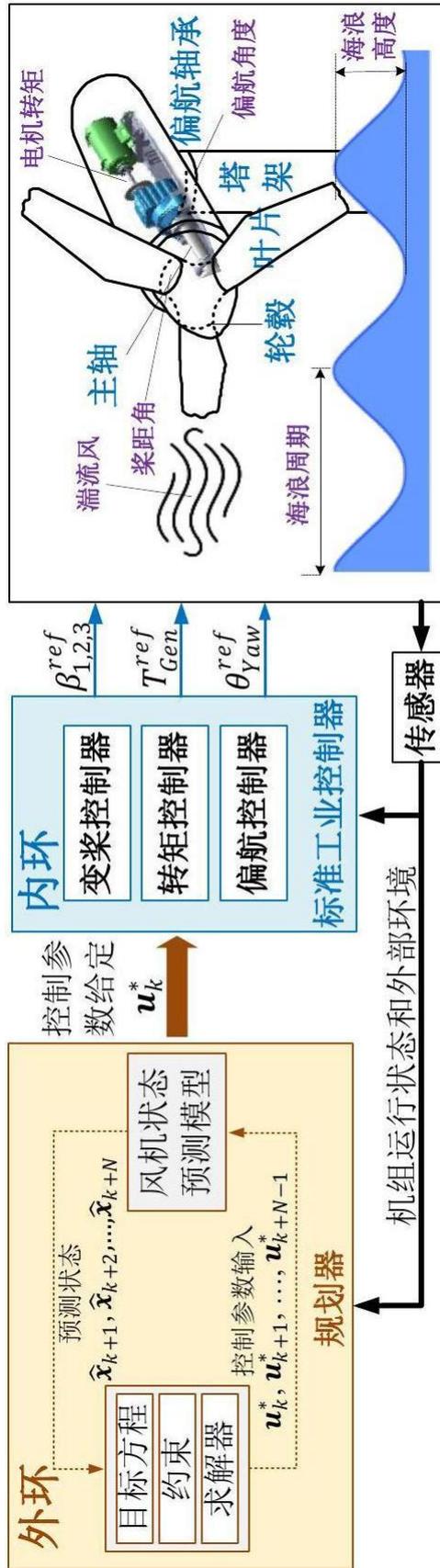


图 1

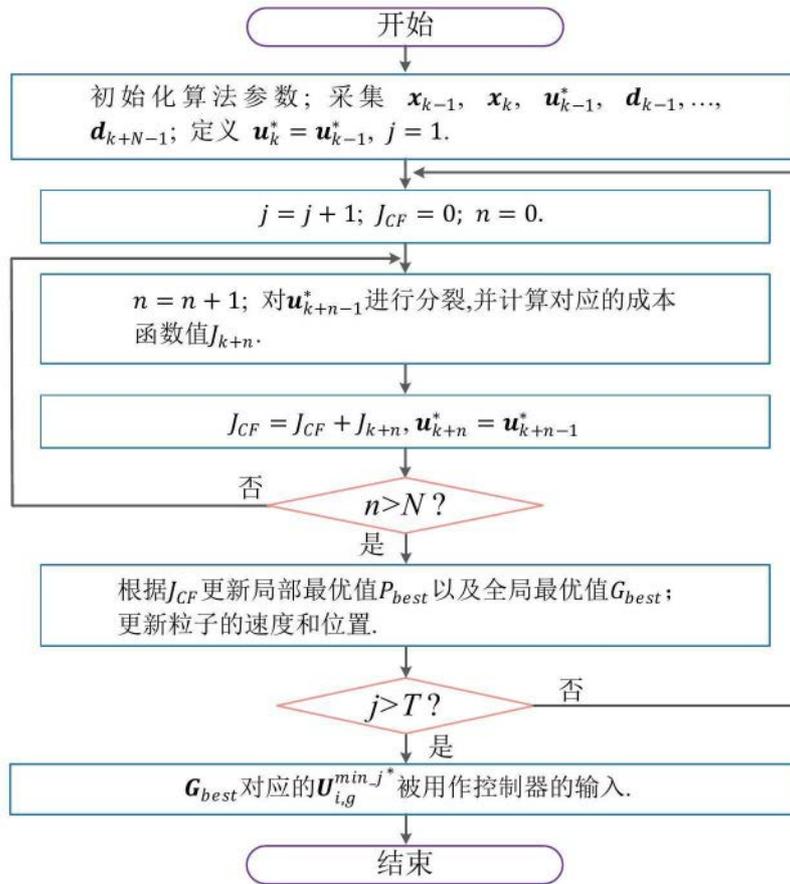


图 2

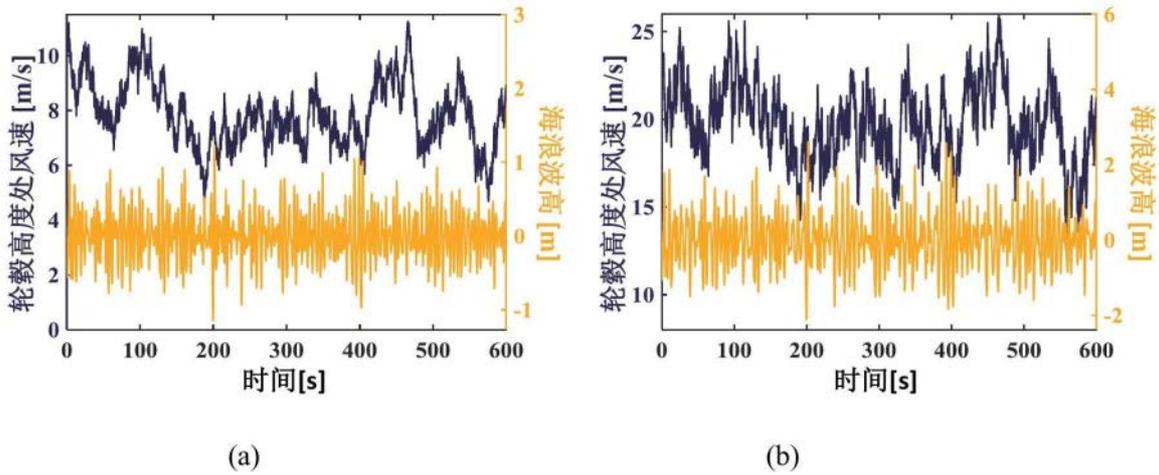
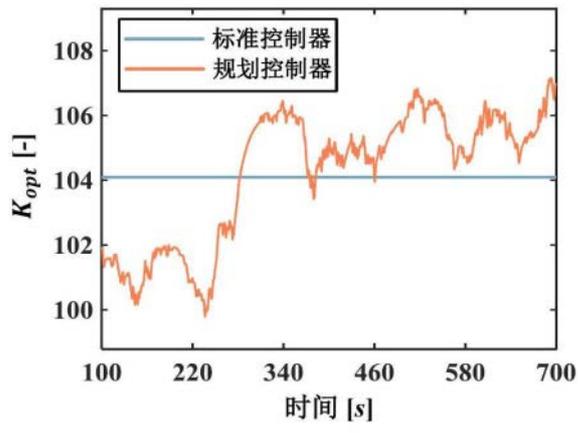
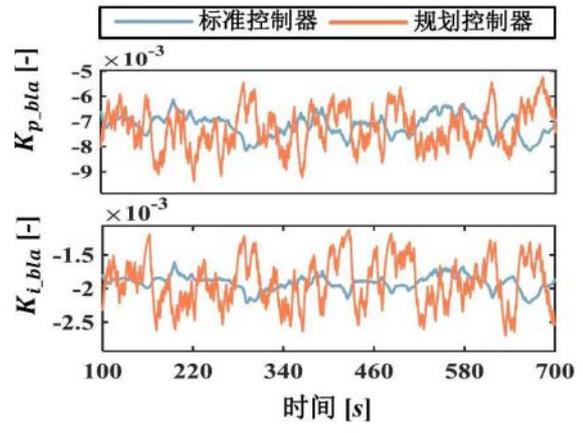


图 3



(a)



(b)

图 4

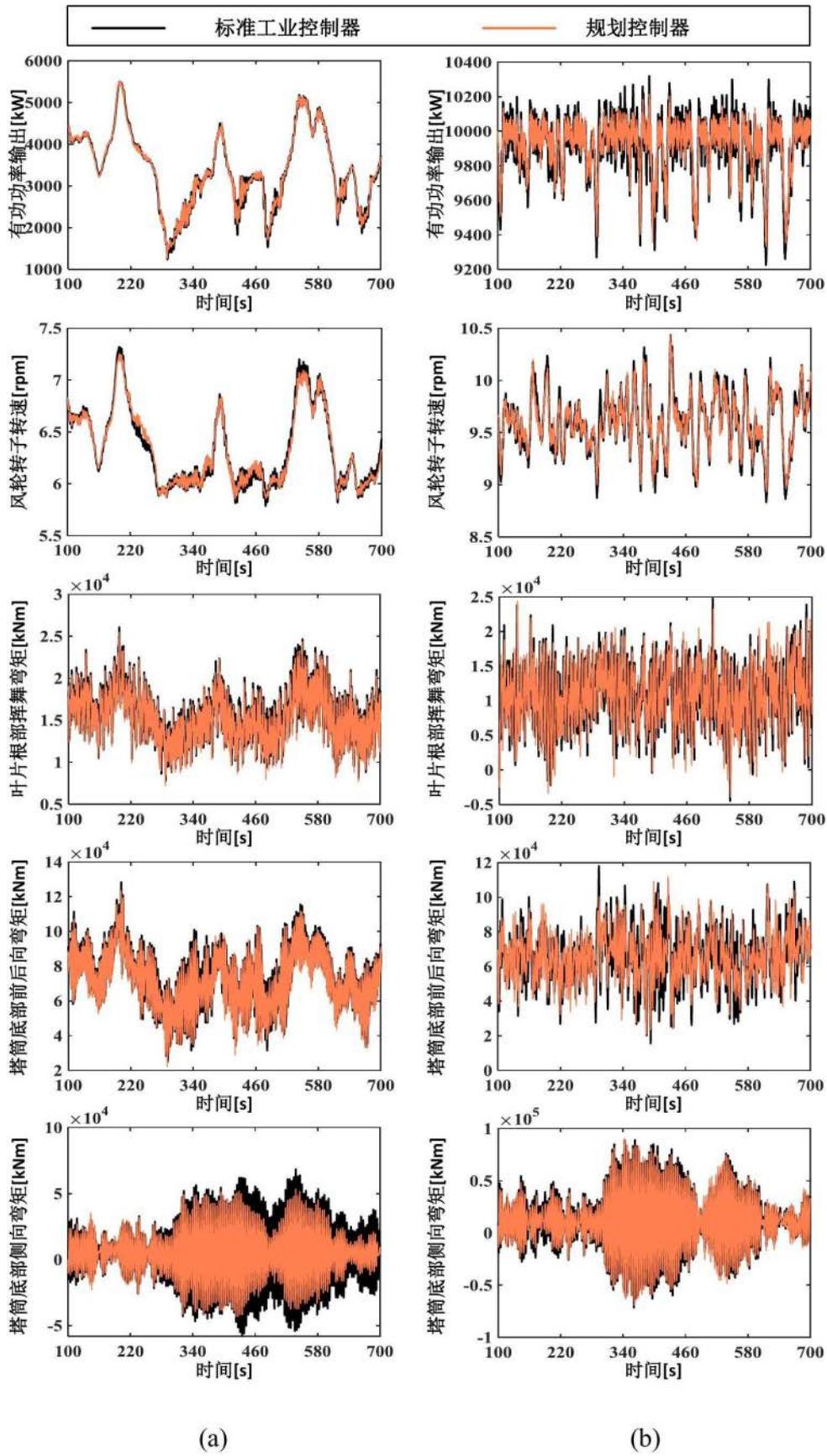


图 5