

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200381

# 大规模海上风电场的双层分布式有功控制

薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 徐彬

(电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

**摘要:** 传统集中式的风电场有功控制策略在风电场规模较大时面临中央控制器计算负担重、鲁棒性差等问题, 完全分布式控制的收敛性受通信延迟和迭代次数的影响显著。为此, 提出了一种双层分布式的控制结构。上层控制基于分布式一致性算法进行设计, 降低通信系统的建设投资和缓解集中控制器的求解负担。下层控制采用基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)和交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)的垂直分布式控制策略, 提高收敛速度。实验证明, 所提方法将大规模带约束的优化问题分解成多个可并行求解的小规模问题, 最终实现了最优的控制效果。

**关键词:** 大规模海上风电场; 分层分布式控制; 模型预测控制; ADMM 算法; 有功控制

## Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm

XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, XU Bin

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,  
Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Traditional centralized wind farm active power control strategy has a series of problems such as excessive calculation load on the central controller and too expensive construction of the communication network when the scale of the wind farm is large. The convergence of fully decentralized control is significantly affected by communication delay and the number of iterations. In order to find an active control strategy suitable for large-scale offshore wind farms, this paper combines distributed control and centralized control to transform the traditional single-layer control structure into a bi-level distributed control structure. The upper level control is designed based on a distributed consensus protocol, which reduces the construction investment in the communication system and relieves the solution burden of the centralized controller. The lower level control uses a vertical distributed control strategy based on Model Predictive Control (MPC) and Alternating Direction Multiplier of Multipliers (ADMM) to improve convergence speed. Experiments prove that the proposed method decomposes the large-scale constrained optimization problem into multiple small-scale problems that can be solved in parallel, and finally achieves an optimal control effect.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877127).

**Key words:** large-scale offshore wind farm; bi-level distributed control; model predictive control; ADMM algorithm; active power control

## 0 引言

近年来, 海上风电由于其资源条件稳定、距离负荷中心近等优势, 逐渐成为世界各国风电行业发展的重要方向。随着对风能的不断开发, 风电场, 特别是海上风电场的数量和规模都在快速发展<sup>[1-4]</sup>。根据国家能源局网站上公布的数据, 2019年我国新

增风电装机容量 2 574 万 kW, 其中海上风电新增装机 198 万 kW, 全国风电发电量 4 057 亿 kWh, 首次突破 4 000 亿 kWh, 占全部发电量的 5.5%, 截止到 2019 年底, 累计并网装机容量达到 2.1 亿 kW, 其中海上风电累计装机 593 万 kW<sup>[5]</sup>。我国首部海上风力发电场国家标准《海上风力发电场设计标准》于 2019 年 10 月 1 日起开始实施, 这一国家标准的发布将更好地指导我国海上风电场设计工作, 对我国海上风电事业的发展将起到重要的促进作用<sup>[6]</sup>。可

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877127)

以预见，未来一段时间我国海上风电装机规模将保持高速增长态势。

随着海上风电场的规模和数量的不断增加，其对电力系统的影响力也将不断提升，传统小规模风电场的控制方法已经不能适应未来海上风电系统的需求<sup>[7]</sup>。相较于陆上风电场，海上风电场由于其开发规模大、基础建设成本高、扩展不易等特点，将对其控制系统提出更高的要求。在这样的背景下，开展风电场有功功率控制的研究，提出更加经济、高效的有功控制策略，对于保证大规模海上风电场及风电场集群的安全、稳定、经济运行，提高风电场的可控性和可调度性，充分发挥其辅助服务的能力具有重大意义。

目前，按照控制结构，现有研究中风电场的控制方法主要分为两类：集中式控制方法和分布式控制方法。在集中式控制中，文献[8]在分析变速恒频风力发电机组与大型风力发电场控制系统关系的基础上，提出风力发电场的集中功率控制策略。文献[9]根据风电场是否具备风电功率预测系统建立了5种不同的风电场功率分配算法模型，以单个区域中的多个风电场的未来1 h功率预测数据来计算5种算法下所有风电场的总出力及相应的损失电量。文献[10]考虑风电场、分散接入风电机组的调节性能差异，针对运行实际需求提出一套面向集群控制主站的有功功率控制策略，实现风电场有功控制模式的在线决策和相应模式下的有功功率指令值的在线快速计算。文献[11]以实现最大风能利用和风机最小调节频度快速响应有功功率指令为目标，提出了一种大规模风电场风电机组间以及风电机组间有功功率分配策略。

在分布式控制研究方面，文献[12]在考虑非线性约束的包含风电集群和传统电源的多区互联系统频率响应模型的基础上，提出考虑超短期风电预测功率、结合拉盖尔函数的分布式模型预测控制方法，实现电网频率在运算时步内的超前控制。文献[13]基于文献[12]的研究内容，增加不同类型的负荷扰动，证明分布式模型预测控制方法的鲁棒性和有效性。文献[14]提出了一种风电场的分布式模型预测控制，用于通过双分解快速梯度法实现最佳有功功率控制。

总的来说，集中控制方法需要中央控制单元，中央控制器接收每一台风机传递的信息，对这些信息进行计算处理后将得到的输出功率参考值下发到各个风机。对于大型风电场或风电场集群来说，中央控制器的计算和通信负担较重，算法的可扩展性较差。同时，集中式控制易受单点故障的影响，鲁

棒性不高。对于完全分布式控制，每台风机仅与其相邻风机进行通信，并且每个风机控制器并行解决控制问题，从而有效地减轻中央控制器的计算负担。但是，在具有大量风机的大规模风电场中，通信延迟和迭代次数将显著影响计算的收敛性，进而影响控制效果。

本文提出一种分区分层的大规模风电场(集群)有功控制方法。首先，将大型海上风电场集群分解为多个子风电场。其次，提出了一种双层的分布式有功控制方法。对于分区之间的有功分配，即上层控制，提出了基于一致性算法的分布式控制方法，根据各分区当前的可利用风电出力，实现分区间的实时等比例分配；对于各分区内部的有功控制，即下层控制，则采用基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)和交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)的垂直分布式控制方法，建立以减小疲劳载荷为优化目标的最优控制问题，并基于ADMM框架将一个大规模带约束的优化问题分解为多个可并行求解的小规模优化问题，最终实现最优的控制效果。

## 1 双层分布式控制结构

### 1.1 海上风电系统的结构

典型的大规模海上风电场结构如图1所示，各风电机组出力通过中压集电馈线收集，通过升压变压器汇集到高压电缆，继而通过风电场侧换流变压器经二次升压后送入换流器，最终通过VSC-HVDC输电系统送至陆地交流系统。

### 1.2 双层分布式控制策略

以图1中的海上风电场为例，根据风电场拓扑结构，可以将其划分为8个分区(WG1—WG8)，每个分区包含彼此距离相近的多台风机。基于此，建立如图2所示的双层分布式有功控制策略，将风电场的有功控制过程按分区划分为两个层级，即上层控制和下层控制。

上层控制是依据分布式一致性算法设计的。在该层控制中，分区控制器与本区域内风电机组通信，控制器获取区域内风机的当前运行状态信息，并与相邻分区的控制器进行通信，获取相邻分区的可利用风电出力。根据在分布式控制框架中的角色，分区控制器被划分为两类，“Leader”和“Follower”。前者直接接受电网调度部门关于整个风电场的有功调度指令，其数量较少，通常设置一个或者两个；后者则不获取整个风电场的有功指令，只与相邻分区的控制器交换信息。上层控制的通信网络拓扑结构如图3所示，属于双连通图，符合“N-1”原则，

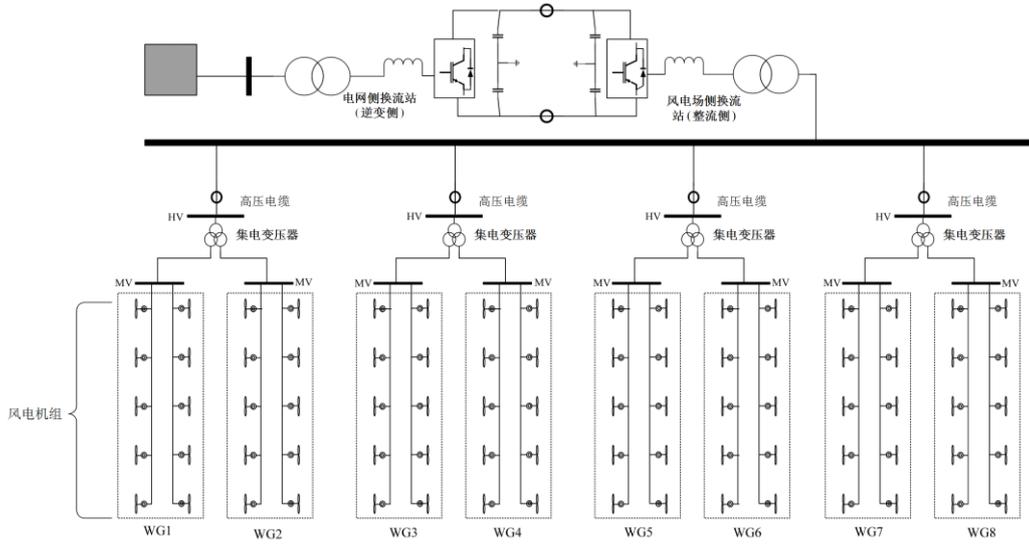


图 1 典型的大规模海上风电场结构

Fig. 1 Typical structure of large-scale offshore wind farm

即任何两个分区之间的通信链路发生故障，通信网络仍将是连通图。

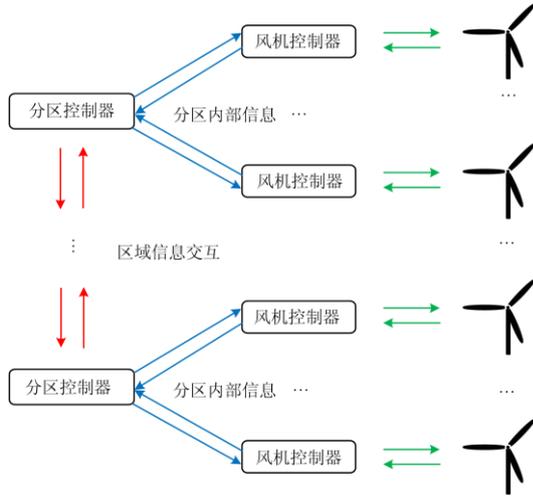


图 2 双层分布式有功控制结构

Fig. 2 Structure of bi-level distributed control

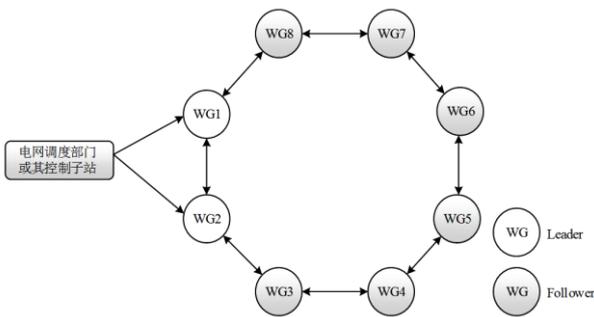


图 3 上层控制通信拓扑图

Fig. 3 Communication topology in upper-level control

下层控制是基于模型预测控制 (MPC) 和 ADMM 算法设计的。将具有非线性特征的风电机组在运行点处线性化，推导出其增量状态方程，以此作为模型预测控制的基础，以优化风电机组的疲劳载荷为目标，建立基于 MPC 的最优化控制问题的数学模型，利用 ADMM 算法进行分布式求解。

## 2 基于分布式一致性算法的上层控制

### 2.1 基于分布式一致性算法的上层控制

风电场各分区之间的拓扑结构用一个有向图  $D=(V, \xi)$  来表示，其中  $V=(1, 2, \dots, N)$  表示每个分布式节点的集合， $N$  为节点数； $\xi \subseteq V \times V$  表示节点之间的有向路径。定义上层控制的邻接矩阵为  $A=[a_{ij}]$ ，其中  $a_{ij}$  为非负的邻接元素。如果在节点  $i$  到节点  $j$  之间存在一个有向路径，那么就称节点  $i$  和节点  $j$  是相邻节点。在风电场的有向图  $D$  中，任意两个节点之间都是双向连通的，即该无向图为连通图。在不失一般性的情况下，邻接矩阵  $A(D)$  可以表示为

$$[A(D)]_{ij} = \begin{cases} 1 & (i, j) \in \xi \\ 0 & (i, j) \notin \xi \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 全风电场可利用出力的分布式估算

分区  $i$  的可利用出力  $P_{WG,i}^{avi}$  是这个分区内部所有风机的最大可利用出力的总和，每个风机的最大可利用出力通过从每个风机中收集到的运行信息中得到。因此各个分区的可利用出力表示为

$$P_{WG,i}^{avi} = \sum_{j=1}^{N_T^{(i)}} P_{WT,j}^{avi}, \quad \forall i \in N_G \quad (2)$$

式中:  $N_G$  和  $N_T^{(i)}$  分别表示分区和分区  $i$  中风机的集合;  $P_{WT,j}^{avi}$  表示风机  $j$  的最大可利用出力。则通过计算得到整个风电场的总可利用出力为

$$P_{WF}^{total,avi} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{WG,i}^{avi} \quad (3)$$

上层控制中各个分区间采用分布式控制, 每个分区控制器只与相邻的分区交换信息, 这意味着没有一个分区直接知道整个风电场的总可利用出力。因此采用一种基于分布式平均一致性原理的分布式估算方法, 来实现总可利用出力的同步估算。

$$\hat{P}_{WG,i}^{total,avi} = \mu \sum_{j=1}^{N_G} a_{ij} \left[ \hat{P}_{WG,j}^{total,avi}(t) - \hat{P}_{WG,i}^{total,avi}(t) \right] \quad (4)$$

式中,  $\mu$  是一个常数, 对式(4)的收敛具有显著的影响。在有限的时间内, 每个分区估算的全风电场平均可利用出力都将收敛到  $P_{WF}^{total,avi} / N_G$ , 当估算出  $\hat{P}_{WG,i}^{total,avi}$  时, 每个分区控制器可以估算出风电场的总可利用出力为

$$\hat{P}_{WF}^{total,avi} = N_G \cdot \hat{P}_{WG,i}^{total,avi}, \quad \forall i \in N_G \quad (5)$$

### 2.3 分区间有功功率的分布式分配

上层控制的控制目标为: 在满足电网调度部门的有功调度指令的前提下, 根据各分区当前的可利用风电出力, 实现各分区间的实时等比例分配<sup>[15]</sup>。定义一个分区的有功功率利用比为  $\varphi_i = P_{WG,i}^{ref} / P_{WG,i}^{avi}, \forall i \in N_G$ , 则上层控制的控制目标可以表示为

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_{N_G} = \varphi^* \quad (6)$$

式中:  $P_{WG,i}^{ref}$  为分区  $i$  的有功出力参考值;  $\varphi^*$  为有功功率最佳利用比。

Leaders 和 Followers 两种分区控制器在分布式控制过程中承担了不同的角色。对于 Leaders 分区来说, 其控制器直接从电网调度部门接收到全风电场的有功出力参考值, 结合估算出的全风电场可用出力, 可以直接计算出所需的有功功率最佳利用比, 如式(7)所示。

$$\varphi_i(t) \begin{cases} \frac{P_{WF}^{ref}}{\hat{P}_{WF}^{total,avi}}, & P_{WF}^{ref} \leq \hat{P}_{WF}^{total,avi} \\ 1, & P_{WF}^{ref} > \hat{P}_{WF}^{total,avi} \end{cases} \quad (7)$$

对于 Followers 来说, 它们根据平均一致性算法追踪 Leaders 所设定的利用率, 如式(8)所示。

$$\dot{\varphi}_i(t) = \varepsilon \sum_{j=1}^{N_G} a_{ij} \left[ \varphi_j(t) - \varphi_i(t) \right] \quad (8)$$

式中,  $\varepsilon$  为增益常数, 影响收敛的速度。一旦收敛得出最佳利用率, 各分区的有功出力参考值可以通过式(9)得出

$$P_{WG,i}^{ref} = \varphi_i \cdot P_{WG,i}^{avi}, \quad \forall i \in N_G \quad (9)$$

各个分区按照计算得出的参考值调整各自的有功出力, 通过输电线路将满足电网调度要求的有功功率输送到陆上交流电网中。

## 3 基于模型预测控制和分布式优化的下层控制

在下层控制中, 分区控制器以追踪上层控制给出的功率参考值和减小疲劳载荷为目标, 调节分区内部每台风机的有功出力。在本文中, 风电机组的疲劳载荷主要从轴的扭转引起的传动系统载荷和塔架的挠曲引起的塔架结构载荷两方面进行考虑<sup>[16]</sup>。同时, 与导致风电机组结构破坏的动应力相比, 其静载荷可以忽略。因此, 减小风电机组的疲劳载荷可以等效为抑制低速轴转矩  $T_g$  和杆塔推力  $F_t$  的波动, 从而对优化问题进行一定简化。

### 3.1 风机的预测模型

本文使用的风机模型是美国国家可再生能源实验室(NREL)的非线性变速风机系统<sup>[17]</sup>。由于桨距角的变化在有功控制过程中对风机的状态有着重要的影响, 因此在建立风电机组的非线性模型时需考虑桨距角伺服系统的动力学特性。同时, 由于分区控制器的控制周期为秒级, 为了降低计算的复杂性, 发电机的快速动力学可以忽略不计, 即  $P_g \approx P_g^{ref}$ 。

风电机组机械部分的空气动力学模型可以表示为

$$T_a = \frac{0.5\pi\rho R^2 V_w^3 C_p(\lambda, \theta)}{\omega_r} \quad (10)$$

$$F_t = 0.5\pi\rho R^2 V_w^3 C_t(\lambda, \theta) \quad (11)$$

式中:  $T_a$  为气动力矩;  $R$  为叶片长度;  $\omega_r$  为转子转速;  $V_w$  为有效风速;  $\theta$  为桨距角;  $C_p$  为功率系数;  $C_t$  为推力系数;  $\lambda$  为叶尖速比。对驱动系统建模如式(12)、式(13)所示。

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r} (T_a - \eta_g T_g) \quad (12)$$

$$\omega_g = \eta_g \omega_r \quad (13)$$

式中:  $\eta_g$  为齿轮箱的变比;  $T_g$  为发电机的转矩;  $J_t = J_r + \eta_g^2 J_g$ , 为通过转子转动惯量  $J_r$  和发电机转

动惯量  $J_g$  获得的等效转动惯量。由此可以得出

$$T_s = T_a - J_r \dot{\omega}_r = \frac{\eta_g^2 J_g}{J_t} T_a + \frac{\eta_g J_r}{J_t} \quad (14)$$

风机控制器通过控制桨距角和发电机转矩来调节捕获的风能。将测得的发电机转速  $\omega_g$  通过低通滤波器滤波, 得到滤波后的转速  $\omega_f$  为

$$\omega_f = \frac{1}{1+sT_f} \omega_g \quad (15)$$

根据  $\omega_f$  与其额定值  $\omega_g^{\text{rated}}$  的偏差, 桨距角  $\theta^{\text{ref}}$  可以通过增益调度 PI 控制器得出, 如式(16)所示。

$$\theta^{\text{ref}} = \left( \frac{K_p}{K_c} + \frac{K_i}{sK_c} \right) (\omega_f - \omega_g^{\text{rated}}) \quad (16)$$

其中  $K_p$  和  $K_i$  分别表示 PI 控制器的比例增益和积分增益。  $K_c = K_0 + K_1\theta$ , 其中  $K_0$  和  $K_1$  是常数。桨距角伺服系统建模为一阶滞后函数。

$$\theta = \frac{1}{1+sT_\theta} \theta^{\text{ref}} \quad (17)$$

式中,  $T_\theta$  为时间常数。发电机的转矩  $T_g$  可以描述为

$$T_g = \frac{P_w}{\mu_g \omega_f} \quad (18)$$

式中,  $\mu_g$  为发电机的效率。假设当前时间是  $t_0$ , 风速在短时间内是恒定的, 定义气动转矩、发电机转矩、桨距角、桨距角指令值、发电机转速、滤波后转速和发出功率在  $t_0$  时刻分别为  $T_{a,0}$ 、 $T_{g,0}$ 、 $\theta_0$ 、 $\theta_0^{\text{ref}}$ 、 $\omega_{g,0}$ 、 $\omega_{f,0}$  和  $P_{w,0}$ 。为了简化计算, 定义  $\beta = K_c \theta$ 。可以推出在操作点的增量状态空间模型表示为

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u + E \quad (19)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (20)$$

式中:  $\Delta x = [\Delta \beta^{\text{ref}}, \Delta \beta, \Delta \omega_g, \Delta \omega_f]$ ,  $\Delta u = P_w^{\text{ref}}$ ,  $\Delta y = [\Delta F_t, \Delta T_s, \Delta P_w]$ 。状态空间矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{K_p}{T_f} & -\frac{K_p}{T_f} + K_i \\ \frac{K_{c,0}}{T_\theta K_{c,0}} & -\frac{1}{T_\theta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta_g K_{\beta T}}{J_t} & \frac{\eta_g K_{\omega T}}{J_t} & \frac{\eta_g^2 P_{w,0}}{\mu_g J_t \omega_{f,0}^2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_f} & -\frac{1}{T_f} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\eta_g^2}{\mu_g J_t \omega_{f,0}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} K_i (\omega_{f,0} - \omega_g^{\text{rated}}) \\ \frac{K_{c,0}}{T_\theta} (\theta_0^{\text{ref}} - \theta_0) \\ \frac{\eta_g}{J_t} (T_{a,0} - \eta_g T_{g,0}) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\eta_g^2 J_g K_{\beta T}}{J_t} & \frac{\eta_g^2 J_g K_{\omega T}}{J_t} & -\frac{\eta_g J_r P_{w,0}}{\mu_g J_t \omega_{f,0}^2} \\ 0 & K_{\beta F} & K_{\omega F} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} \frac{\eta_g J_r}{\mu_g J_t \omega_{f,0}} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

由此, 风电机组的离散化状态空间方程可紧凑表示为

$$\Delta x(k+1) = A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k+1) + E_d \quad (21)$$

$$\Delta y(k) = C_d \Delta x(k) + D_d \Delta u(k) \quad (22)$$

### 3.2 模型预测控制

模型预测控制本质上是一种基于模型的有限时域闭环最优控制算法, 是一种致力于将更长时间跨度的最优化控制问题分解为若干个更短时间跨度, 或者有限时间跨度的最优化控制问题的方法, 并且在一定程度上仍然追求最优解<sup>[18-20]</sup>。

在设计目标函数时, 首先考虑使轴转矩以及杆塔所受推力的变化尽可能小, 以减少疲劳载荷, 从而延长风电机组的运行寿命; 其次还需要考虑分区内各风机之间有功功率的公平分配。因此可以得到目标函数表示为

$$\min \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_G} \|P_{w,i}^{\text{ref}}(k) - P_{pd,i}\|_{Q_p}^2 + \|\Delta T_{s,i}(k)\|_{Q_T}^2 + \|\Delta F_{t,i}(k)\|_{Q_F}^2 \quad (23)$$

式中:  $P_{pd,i}$  为分区按照传统比例分配方式控制时风机  $i$  的有功出力;  $Q_p$  为保证有功功率公平分配的权重系数;  $Q_T$  和  $Q_F$  为使风电机组的轴转矩和杆塔推力的变化最小的权重系数。通常传统的比例分配策略是按照各台风机的可用出力进行等比例分配的。

$P_{pd,i}$  可以通过式(24)得出。

$$P_{pd,i} = P_{\text{WG}}^{\text{ref}} \cdot \frac{P_{\text{WT},i}^{\text{avi}}}{P_{\text{WG}}^{\text{avi}}} \quad (24)$$

根据式(21)和式(22)中所推出的离散化增量状态空间方程,可以得出以 $\Delta x$ 为控制变量的基于模型预测控制的目标函数形式为

$$\min f(\Delta x) + g(\Delta x) \quad (25)$$

式中: $f(\Delta x)$ 为原目标函数中第一项; $g(\Delta x)$ 为原目标函数中后两项。

该优化问题的约束条件应从单台风机和风机所在分区两方面来考虑。对于风电场的一个分区来说,分区内所有风机的有功出力之和应该追踪上层控制所给出的该分区有功出力参考值,即

$$\sum_{j=1}^{N_T^{(i)}} P_{WG,j}^{\text{ref}} = P_{WG,i}^{\text{ref}}, \quad \forall i \in N_G \quad (26)$$

对于一台风机来说,其有功出力应处于该风机的可利用出力范围之内,即

$$0 \leq P_{W,j}^{\text{ref}} \leq P_{W,j}^{\text{avi}}, \quad \forall j \in N_T^{(i)} \quad (27)$$

### 3.3 基于 ADMM 算法的分布式求解算法

ADMM 算法是目前应用比较广泛的求解分布式优化问题的方法之一,其融合了对偶上升法的可分解性以及乘子法良好的收敛性,具有形式简单、收敛性好、鲁棒性高的特点<sup>[21-22]</sup>。ADMM 的标准形式如式(28)所示。

$$\begin{cases} \min f(x) + g(z) \\ \text{s.t. } Ax + Bz = c \end{cases} \quad (28)$$

式中: $f$ 和 $g$ 为凸函数; $x \in R^n$ ;  $z \in R^m$ ;  $A \in R^{p \times n}$ ;  $B \in R^{p \times m}$ ;  $c \in R^p$ 。

ADMM 算法分为 3 步<sup>[23]</sup>: 1) 求解本地最优化问题,更新本地变量; 2) 更新全局辅助变量; 3) 更新拉格朗日乘子。可以表示如式(29)所示。

$$\begin{aligned} \text{step1: } x^{k+1} &= \arg \min_x L(x, z^k, \lambda^k) \\ \text{step2: } z^{k+1} &= \arg \min_z L(x^{k+1}, z, \lambda^k) \\ \text{step3: } \lambda^{k+1} &= \lambda^k + \rho(Ax^{k+1} + Bz^{k+1} - c) \end{aligned} \quad (29)$$

式中, $\rho$ 为 ADMM 算法的迭代步长。

由于有功控制问题的特殊结构,即目标函数是多个解耦目标函数之和,而约束之间是互相耦合的(总和满足上层控制给出的分区有功值),因此可以利用 ADMM 算法,将该问题拆解为多个子优化问题,再通过与分区控制器迭代计算,逐步使得约束满足。为处理约束条件,引入辅助变量 $\Delta z$ ,将原问题改写成 ADMM 形式

$$\begin{cases} \min f(\Delta x) + g(\Delta z) \\ \text{s.t. } \Delta x = \Delta z \\ \sum_{j=1}^{N_T^{(i)}} P_{WG,j}^{\text{ref}} = P_{WG,i}^{\text{ref}}, \quad \forall i \in N_G \\ 0 \leq P_{W,j}^{\text{ref}} \leq P_{W,j}^{\text{avi}}, \quad \forall j \in N_T^{(i)} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $f(\Delta x)$ 需要上层控制的信息,其优化可在分区控制器进行; $g(\Delta z)$ 部分只与各风机自身信息有关,可以在风机本地完成。这两部分优化问题并行处理,再按照 ADMM 算法进行迭代计算,最终收敛到一致。

## 4 仿真分析和验证

### 4.1 仿真模型

为了测试本文所提出的双层分布式有功控制方案的控制性能,按照图 1 中的风电场结构,利用 Matlab/Simulink 平台建立了一个 80 台风电机组的风电场模型。这些风电机组被分为 8 个分区,每个分区 10 台风机。利用 SimWindFarm 工具箱对风电场风况进行动态模拟,具体的风机参数见表 1。

表 1 风力发电机参数

Table 1 Wind turbines parameters

符号	参数描述	数值
$\eta$	齿轮箱变比	97
$J_g$	发电机转动惯量/(kg m <sup>2</sup> )	534.116
$J_r$	转子转动惯量/(kg m <sup>2</sup> )	35 444 067
$\mu_g$	发电机效率	0.944
$\rho$	空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.223 1
$r$	扇叶长度	63
$T_r$	滤波时间常数	0.6
$T_\theta$	角度时间常数	0.1
$K_p$	桨距角控制比例增益常数	0.214 3
$K_i$	桨距角控制积分增益常数	0.091 8
$K_0$	增益调度系数	1
$K_1$	增益调度系数	2.132 3
$\omega_g^{\text{rated}}$	发电机额定转速/(rad/s)	122.91

在该模型中,将分区 WG1 和 WG2 定义为 Leaders,它们直接从电网调度部门接收指令。对于上层控制来说,平均可利用出力每 5 s 计算并更新一次。对于下层控制来说,控制周期 $T_C$ 、预测范围 $T_p$ 以及采样周期 $\Delta T_p$ 分别设置为 1、5 和 0.05  $\mu\text{s}$ 。增益常数 $\mu$ 和 $\varepsilon$ 分别设置为 0.5 和 0.3。为了检验本文提出的控制策略的性能,将仿真结果与文献[7]中按可利用出力的集中式比例分配方案的仿真结果进行了比较。

### 4.2 上层控制性能

本节中测试了上层分布式控制方案的控制性能,总仿真时间设置为 600 s。风电场的总可利用出

力以及电网调度部门的有功控制指令如图 4 中所示, 在  $t=0\sim 280$  s 期间, 总可利用出力在 250~400 MW 之间波动, 在  $t=280\sim 520$  s 期间, 风电场处于额定功率运行模式, 在  $t=520$  s 之后, 总可利用出力逐渐减小。在  $t=0\sim 230$  s 期间将调度命令设置为 200 MW, 然后在  $t=230\sim 530$  s 内设置为 300 MW,  $t=530$  s 之后, 将其设置为 250 MW。

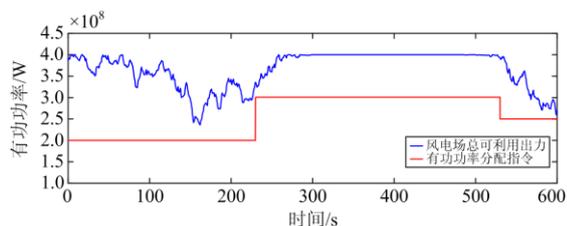


图 4 风电场总有功出力和有功分配指令

Fig. 4 Total available wind power and the dispatch command

每个分区估算的平均可利用出力如图 5 所示。从  $t=0$  到  $t=300$  s, 估算的平均可利用出力随每个分区的实时可利用出力而变化, 在  $t=300\sim 500$  s 内保持在 50 MW。与图 4 中的总可利用出力相比较可以看出, 每个分区的平均可利用出力可以较为准确地估算出来。图 6 中显示的是图 5 中估算的平均可利用出力的局部放大图, 可以看出, 在经过 30~40 次迭代(约 0.2 s)后, 每个分区估算的平均可利用出力可以收敛到其实际值, 这意味着该算法具有良好的收敛性。

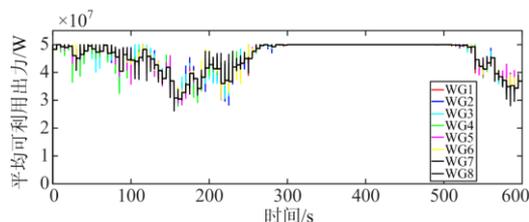


图 5 估算的各分区平均可利用出力

Fig. 5 Distributed estimation of the available power

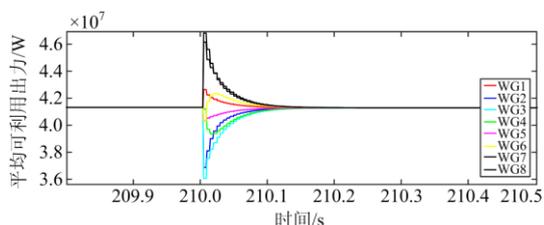


图 6 估算的各分区平均可利用出力(局部放大图)

Fig. 6 Distributed estimation of the available power (zoomed part)

每个分区的有功利用率如图 7 所示, 可以看出, 所有分区都保持一致的利用率, 这表明所提出的上

层控制策略可以有效地调节风电场的有功功率输出, 实现公平的有功功率分配。从图 8 中的局部放大图可以看出, 在  $t=161$  s 时, 开始进行利用率计算。Leaders 控制器首先到达最新的期望利用率, 然后 Followers 开始跟踪期望利用率。经过 80 次迭代(约 0.4 s), 所有分区都可以收敛到所需的值, 该速度对于实时性要求较低的分區控制来说足够快。

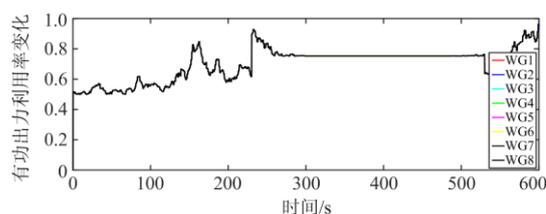


图 7 各分区有功利用率

Fig. 7 Utilization ratio of wind farms

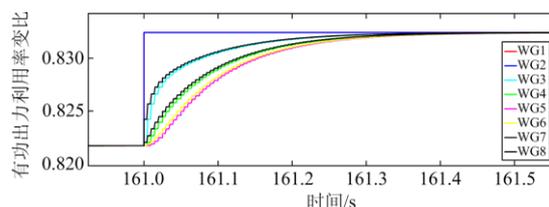
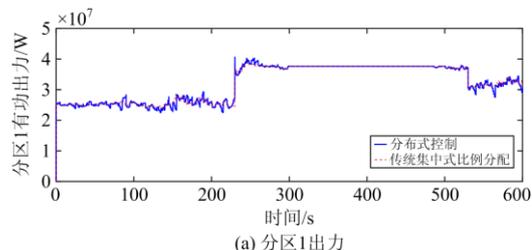


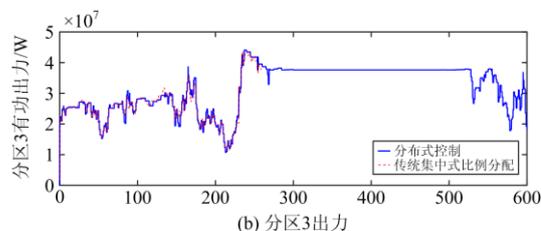
图 8 各分区有功利用率(局部放大图)

Fig. 8 Utilization ratio of wind farms (zoomed part)

将提出的分布式控制方案与集中式比例控制方案进行比较, 比较中选取了两个有代表性的分区(分区 1, 分区 3), 其各自有功出力以及风电场总有功出力如图 9 所示。可以看出, 分布式控制方案具有与集中式比例控制方案相似的控制性能, 并且它们都可以有效地调节风电场的有功功率输出以跟踪电网调度部门设置的功率指令。但是, 与集中控制相比, 分布式控制方案省去了中央监控器和控制器,



(a) 分区1出力



(b) 分区3出力

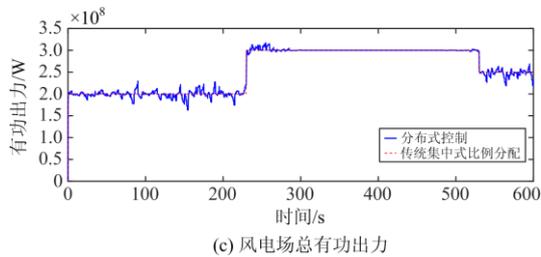


图 9 风电场有功出力

Fig. 9 Output power of wind farm

并大大降低了通信成本，具有更低的成本和更高的稳定性。此外，由于每个分区仅与相邻分区交换信息，因此风电场具有良好的即插即用功能，为扩展风电场提供了便利。

### 4.3 下层控制性能

本小节介绍了分区内风机间的基于 ADMM 和 MPC 的垂直分布式控制的性能。类似地，对传统集中式比例控制方案进行了仿真，以与本文提出的方法进行比较。选择风机 6 作为代表性风机来对结果进行说明。优化控制的权重因子  $Q_P$ 、 $Q_T$  和  $Q_F$  分别设置为 1、20 和 1000。

仿真结果如图 10 所示。可以看出，本文中提出的控制方案具有良好的收敛性，优化得到的风电机

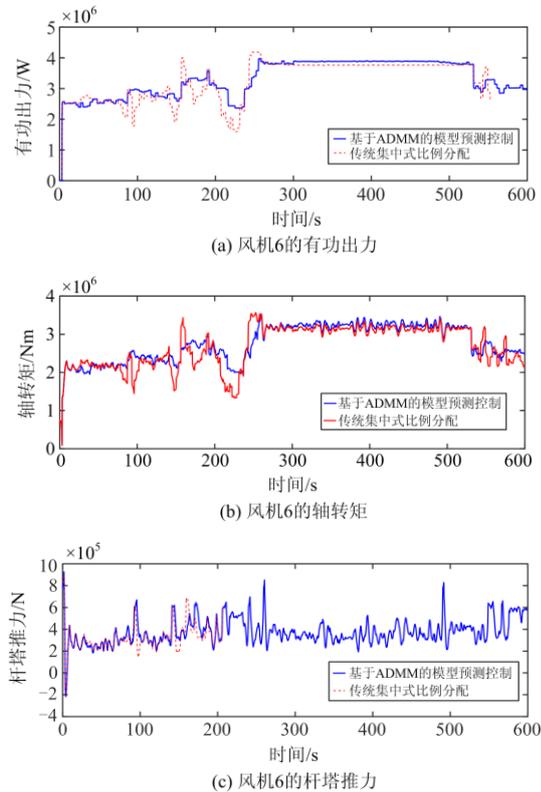


图 10 下层控制策略的控制性能

Fig. 10 Lower-level control performance

组出力与集中式比例控制的出力比较接近。同时，与集中式比例控制相比，在本文的控制方案下风电机组的轴转矩以及杆塔推力的变化更小，风电机组的出力更平滑。因此，本文的控制方案在满足上级有功功率调度要求的前提下，可以最大程度降低风电机组的疲劳载荷，延长风电机组的使用寿命。

此外，下层控制的优化问题被拆解为两部分，其中一部分在风机本地求解，另一部分在分区控制器求解，两部分优化问题并行解决。由于部分数据在本地解出，该控制可以起到降低分区控制器运算压力以及减小通信量的作用。同时，由于两部分优化问题并行求解，在分区控制器与各风电机组之间传递的为不敏感信息，起到了一定的隐私保护的作用。

## 5 结论

针对大规模海上风电场(集群)，本文建立了双层分布式有功控制策略。在上层控制中，利用分布式一致性算法估算全风电场的可利用出力，并获得每个分区的有功利用率。在下层控制中，基于 MPC 建立最优化控制问题的数学模型，利用 ADMM 算法进行分布式求解。

仿真分析的结果表明，风电场可以准确地追踪有功分配指令，并且最大程度上减少风力发电机的轴转矩以及杆塔推力的变化，从而减小疲劳载荷，适用于大规模海上风电场的实时控制。它消除了对高性能中央控制器的需求，简化了大型风电场的通信网络，并有效降低了风电机组的疲劳载荷。

## 参考文献

- [1] 郑海, 杜伟安, 李阳春, 等. 国内外海上风电发展现状[J]. 水电与新能源, 2018, 32(6): 75-77. ZHENG Hai, DU Wei'an, LI Yangchun, et al. Current situation of the offshore wind power development all over the world[J]. Hydropower and New Energy, 2018, 32(6): 75-77.
- [2] 文锋. 我国海上风电现状及分析[J]. 新能源进展, 2016, 4(2): 152-158. WEN Feng. Developments and characteristics of offshore wind farms in China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016, 4(2): 152-158.
- [3] 卢智雪, 刘天琪, 丁媛媛, 等. 海上风电场故障特性及保护配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 144-151. LU Zhixue, LIU Tianqi, DING Yuanyuan, et al. Study on fault characteristics and protection cooperation of the offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 144-151.
- [4] 傅春翔, 汪天呈, 酆洪柯, 等. 用于海上风电电网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 144-151.

- 2019, 47(20): 119-126.
- FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.
- [5] 国家能源局. 2019 年风电并网运行情况[EB/OL]. [2020-02-28]. [2020-03-26]. [http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c\\_138827910.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm).
- [6] 国家能源局. 首部海上风力发电场国家标准将实施[EB/OL]. [2019-08-21]. [2020-03-26]. [http://www.nea.gov.cn/2019-08/21/c\\_138326144.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-08/21/c_138326144.htm).
- [7] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
- CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [8] 惠晶, 顾鑫. 大型风电场的集中功率控制策略研究[J]. 华东电力, 2008, 38(6): 57-61.
- HUI Jing, GU Xin. Research on centralized power control strategies for large wind farms[J]. East China Electric Power, 2008, 38(6): 57-61.
- [9] 刘伟, 黄越辉, 刘纯, 等. 风电场功率分配算法[J]. 中国电力, 2011, 44(8): 53-56.
- LIU Wei, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Study on algorithms of power curtailment among wind farms[J]. Electric Power, 2011, 44(8): 53-56.
- [10] 林俐, 朱晨宸, 郑太一, 等. 风电集群有功功率控制及其策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 9-16.
- LIN Li, ZHU Chenchen, ZHENG Taiyi, et al. Active power control of wind farm cluster and its strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 9-16.
- [11] 奚志江, 连倩, 汪一, 等. 大规模风电场有功功率控制策略[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 475-480.
- XI Zhijiang, LIAN Qian, WANG Yi, et al. An active power control strategy for large-scale wind farms[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2): 475-480.
- [12] 孙铂皓, 汤涌, 仲悟之, 等. 基于分布式模型预测控制的包含大规模风电集群互联系统超前频率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6291-6302.
- SUN Bohao, TANG Yong, ZHONG Wuzhi, et al. Multi-area interconnected power system advanced frequency control strategy considering large scale wind power cluster integration based on DMPC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6291-6302.
- [13] SUN Bohao, TANG Yong, YE Lin, et al. A frequency control strategy considering large scale wind power cluster integration based on distributed model predictive control[J]. Energies, 2018, 11(6).
- [14] ZHAO Haoran, WU Qiuwei, GUO Qinglai, et al. Distributed model predictive control of a wind farm for optimal active power control-part II: implementation with clustering-based piece-wise affine wind turbine model[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 6(3): 840-849.
- [15] 国家电力监管标准化委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2011.
- State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011.
- [16] ZHAO Haoran, WU Qiuwei, HUANG Sheng, et al. Fatigue load sensitivity-based optimal active power dispatch for wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1247-1259.
- [17] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.
- [18] 韩自奋, 景乾明, 张彦凯. 风电预测方法与新趋势综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 178-187.
- HAN Zifen, JING Qianming, ZHANG Yankai. Review of wind power forecasting methods and new trends[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 178-187.
- [19] 邹涛, 丁宝苍, 张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [20] CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, TAO Yubo, et al. Asymmetric GARCH type models for asymmetric volatility characteristics analysis and wind power forecasting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 356-366. DOI: 10.1186/s41601-019-0146-0.
- [21] MOLZAHN D K, DÖRFLER F, SANDBERG H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
- [22] CHANG T H, LIAO Weicheng, HONG Mingyi, et al. Asynchronous distributed ADMM for large-scale optimization—part II: linear convergence analysis and numerical performance[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(12): 3131-3144.
- [23] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2011, 3(1): 1-12.

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-06-12

作者简介:

薛 帅(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 740025909@qq.com

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: houleig@sdu.edu.cn

(编辑 张爱琴)