



# 风光互补发电系统的分级递阶分布式预测控制

孔小兵<sup>1</sup>, 刘向杰<sup>1\*</sup>, 韩梅<sup>2</sup>

1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

2. 北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100176

\* 通信作者. E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2018-04-01; 接受日期: 2018-06-28; 网络出版日期: 2018-10-26

国家自然科学基金 (批准号: 61603134, 61673171, 61533013) 和中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: 2017ZZD004, 201-7MS033) 资助项目

**摘要** 现代电力系统是可再生能源、清洁能源与信息互联网高度融合的分布式能源网络系统, 这其中, 风力发电、太阳能发电系统具有间歇性且受到较多外部条件约束. 协同优化风力发电、太阳能发电控制可以在满足负荷需求的同时, 减少机械损耗, 延长机组使用寿命, 保证电网的安全经济运行. 针对大规模且地理分散的风光互补发电系统, 本文提出一种分级递阶分布式预测控制策略. 上层优化控制器采用迭代分布式预测控制策略, 不仅实现功率优化分配, 而且能够实现减少风机低速轴机械损耗、降低系统发电成本的经济性目标. 下层控制器采用监督预测控制算法可同时保证子系统的跟踪性能和经济性能. 所构造的分级递阶分布式预测控制策略通过各子系统间的协同优化, 实现了分布式能源的“即插即用”. 仿真实验证明, 本文提出的分级递阶分布式预测控制策略能够有效地实现微网的安全可靠、优质高效、灵活互动等要求.

**关键词** 风光互补发电系统, 分级递阶控制, 分布式预测控制, 风力发电, 太阳能发电

## 1 引言

我国的电力工业发展过程中, 节能减排已成为首要任务. 构建一个可再生能源、清洁能源与信息互联网高度融合的分布式能源网络系统, 重构现代能源体系, 能够有效解决当前能源与环保的危机, 实现我国经济的可持续发展<sup>[1]</sup>.

太阳能和风能是两种重要的清洁可再生能源, 其能量密度低、稳定性差, 且受地理分布、季节变化、昼夜差别等因素影响, 单独的风力发电和太阳能发电通常会导致发电和用电负荷的不平衡. 由于太阳能和风能具有天然的昼夜互补性和季节互补性, 使得风光互补发电成为一种必然, 其发电控制问题也日益成为研究焦点<sup>[2]</sup>.

**引用格式:** 孔小兵, 刘向杰, 韩梅. 风光互补发电系统的分级递阶分布式预测控制. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1316-1332, doi: 10.1360/N112018-00076  
Kong X B, Liu X J, Han M. Hierarchical distributed model predictive control of hybrid wind and solar generation system (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1316-1332, doi: 10.1360/N112018-00076

早期风光互补发电系统规模较小,要求风能和太阳能发电系统进行最大跟踪控制,储能系统处理负荷需求与输出功率的不平衡,对风光互补发电系统的控制要求较低<sup>[3]</sup>.随着风光互补发电系统规模的逐渐增大,外界对输出功率稳定性和系统运行经济性的要求也越来越高,控制问题越来越复杂,传统的控制策略只考虑对负荷需求进行跟踪,不考虑机械磨损对系统硬件使用寿命的影响和储能系统的高成本因素,已经无法满足系统的运行管理需求.

分级递阶控制是一种将控制任务分层逐个解决的控制策略,具有结构灵活、参数易调节等优点,能够满足生产运行中安全、平稳、高效、降耗等不同层面的需求,是针对实际复杂大规模系统设计全局优化控制的有效手段.在高层进行实时优化,实现经济目标和全局优化,在低层利用动态模型和从高层传递来的设定值设计跟踪控制器<sup>[4,5]</sup>.这种分级优化策略尤其适合解决风光互补发电系统这样一类复杂工业过程对象的控制问题.因此,采用分级递阶结构,在上层对各发电子系统的发电功率进行优化分配,下层对各系统输出功率进行设定值跟踪是实现风光互补发电系统安全经济运行的有效手段.

模型预测控制近年来成为实现分级递阶优化的有效手段<sup>[6]</sup>,尤其适用于能源输出具有不确定性且受到很多外界条件约束的风电、太阳能等新能源系统<sup>[7,8]</sup>.

针对大规模且地理分散的风光互补发电系统,在功率分配层采用传统的集中式预测控制器会有较大的计算量,且很难保证各子系统跟踪控制器的通用性和一致性.分布式预测控制把集中控制方式的在线求解问题分散到各子系统中去分布实现,从而降低了问题的规模和复杂性,减小了发电子系统的切入切出对系统的影响,使系统更加灵活.文献[9]探讨了在离网模式下,风光互补发电系统优化控制问题,采用分布式预测控制对系统中各个发电子系统电压源整流器进行控制,进而实现整个系统输出功率的控制.文献[10]将分布式预测控制应用在风力发电系统有功功率控制过程中,通过发电子系统之间的相互协调控制功率的输出.文献[7]针对大规模风力发电场采用分布式预测控制,通过迭代算法获得全局最优解为各风力机组提供出力给定值.

本文针对大规模风光互补发电系统,提出一种基于分级递阶结构的分布式模型预测控制策略(hierarchical distributed model predictive control, HDMPCC).在上层功率分配层考虑各子系统间的协同,提出了一种基于全局最优的迭代分布式预测控制策略,在保证满足负荷需求的情况下有效地减小系统损耗,实现分布式能源“即插即用”.为了保证下层级子系统的跟踪性能,采用监督预测控制器实现各子系统功率跟踪.仿真实验证明,本文提出的分级递阶分布式预测控制策略能够有效地实现微网的安全可靠、优质高效、灵活互动等要求.

## 2 独立式风光互补发电系统结构模型

由于直流输电不需考虑无功补偿和频率控制等问题,比交流输电具有更高的可控性,因此本文研究的独立式风光互补发电系统采用直流输电方式.图1为独立式风光互补发电系统的结构示意图,系统由1组太阳能发电系统、 $n_w$ 组风力发电系统、储能系统、直流母线和负载组成,其中, $v_{dc}$ 为直流母线电压, $i_s, u_s$ 为太阳能发电系统输出电流、控制电压, $i_w^j, u_w^j, \omega_r^j, T_\alpha^j$  ( $j = 1, \dots, n_w$ )为第 $j$ 组风力发电系统输出电流、控制电压、风轮转速、风轮输出转矩, $T, \lambda_s$ 为温度、光照强度, $v$ 为风速, $V_{pt}, I_{pt}$ 为光伏电池两端的输出电压、电流.

如图1所示,太阳能发电系统、风力发电系统、负荷、储能系统等通过整流器与直流母线相连.因此,本系统可以通过控制各个子系统整流器改变系统输出电流的大小进而控制整个发电系统的输出功率,满足系统负荷功率需求.

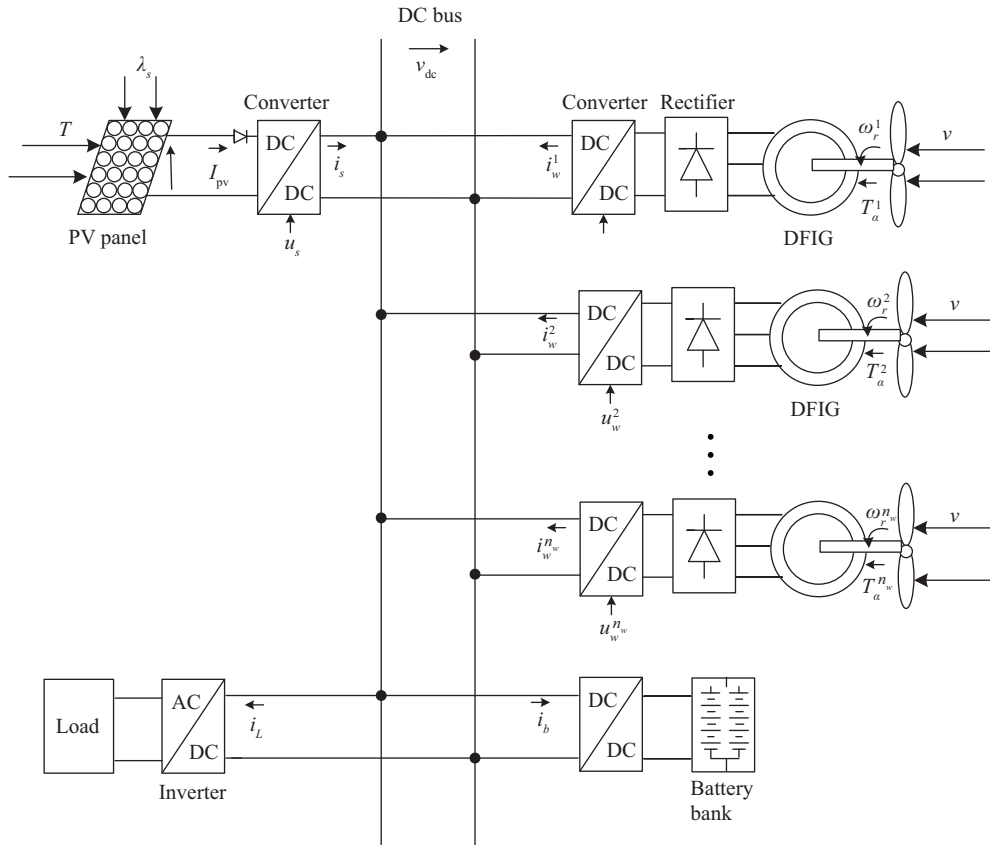


图 1 独立式风光互补发电系统结构示意图  
Figure 1 Hybrid wind and solar generation system

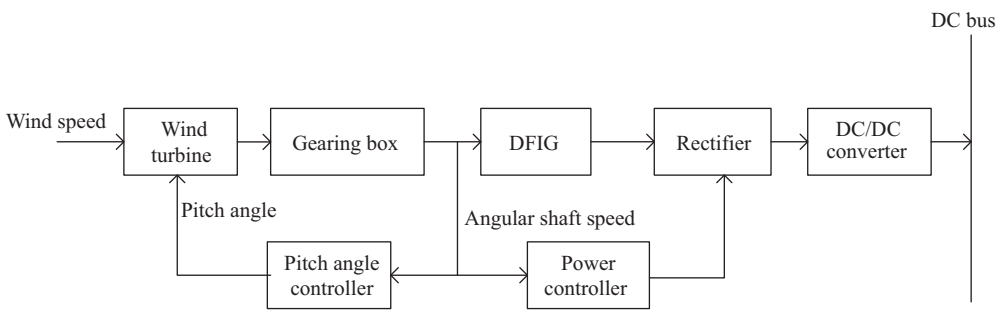


图 2 风力发电系统结构框图  
Figure 2 The structure of wind generation system

2.1 风力发电系统建模

如图 2 所示, 典型的风力发电系统由风机、传动系统、双馈发电机、整流器组成 [7]. 为考虑风力发电系统运行的安全性、经济性和电网负荷跟踪跟踪性能, 分别建立风力发电系统的低速轴扭矩机械模型和双馈电机电气模型.

### 2.1.1 低速轴扭矩模型

根据国家可持续能源实验室提出的风机非线性模型, 风机转矩可表示为

$$T_a = \frac{0.5\pi\rho R^2 v^3 C_p(v, \omega_r, \theta)}{\omega_r}, \quad (1)$$

其中,  $\rho$  是空气密度,  $R$  是风机转子半径,  $\theta$  是桨距角,  $\lambda = \frac{R\omega_r}{v}$  是叶尖速比, 风能利用系数  $C_p$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$C_p = (0.44 - 0.0167\theta) \times \sin\left(\frac{\pi \times (\lambda - 3)}{15 - 0.3 \times \theta}\right) - 0.00184 \times (\lambda - 3) \times \theta, \quad (2)$$

刚性传动系统动态性能可描述为

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_r + N_g^2 J_g} (T_a - N_g T_g), \quad (3)$$

其中,  $N_g$  是传动比,  $J_r, J_g$  分别为风机、电机转动惯量,  $T_g$  为发电机转矩.

风力发电系统输出功率为

$$P_g = \mu T_g \omega_g, \quad (4)$$

其中, 电机转速  $\omega_g = N_g \omega_r$ ,  $\mu$  为电机效率.

低速轴扭矩可表示为<sup>[12]</sup>

$$T_s = \frac{N_g^2 J_g}{J_r + N_g^2 J_g} T_a + \frac{N_g J_r}{J_r + N_g^2 J_g} T_g. \quad (5)$$

考虑桨距角控制系统的惯性, 采用增益调解 PI 控制器对桨距角进行控制<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \theta &= -\frac{K_p}{K_c} \dot{\omega}_f - \frac{K_i}{K_c} (\omega_f - \omega_{\text{grated}}), \\ \dot{\omega}_f &= \frac{1}{\tau_g} \omega_g - \frac{1}{\tau_g} \omega_f, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\omega_f$  为风机转速  $\omega_r$  经过滤波后得到的测量值,  $\omega_{\text{grated}}$  为电机额定转速,  $K_p$  和  $K_i$  为 PI 控制器的比例与积分系数,  $K_c$  代表与上一时刻风力发电系统期望功率输出和桨距角相关的修正系数,  $\tau_g$  是滤波器时间常数.

针对第  $i$  ( $i = 1, \dots, n_w$ ) 组风力发电系统, 定义状态  $x_T^i = [\theta^i \ \omega_r^i \ \omega_f^i]^T$ , 控制变量  $u_T^i = P_w^i$ , 输出变量  $y_T^i = T_s^i$ , 综合式 (1)~(6) 可得低速轴扭矩模型

$$\begin{aligned} \dot{x}_T^i &= f_T^i(x_T^i) + G_T^i(x_T^i) u_T^i, \\ y_T^i &= h_T^i(x_T^i, u_T^i), \end{aligned} \quad (7)$$

其中,

$$f_T^i(x_T^i) = \begin{bmatrix} -\frac{K_p^i N_g^i}{K_c} x_2^i + \frac{K_p^i - K_I^i \tau_g^i}{K_c^i \tau_g^i} x_3^i + \frac{K_I^i}{K_c^i} \omega_{\text{grated}}^i \\ \frac{0.5\pi\rho R^2 v^3 C_p(v, x_2^i, x_1^i)}{(J_r^i + (N_g^i)^2 J_g^i) x_2^i} \\ \frac{1}{\tau_g^i} x_2^i - \frac{1}{\tau_g^i} x_3^i \end{bmatrix}, \quad G_T^i(x^i) = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ \frac{1}{(J_r^i + (N_g^i)^2 J_g^i) x_2^i} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$h^i(x^i, u^i) = \frac{(N_g^i)^2 J_g^i}{J_r^i + (N_g^i)^2 J_g^i} \frac{0.5\pi\rho R^2 v^3 C_p(v, x_2^i, x_1^i)}{x_2^i} + \frac{J_r^i}{J_r^i + (N_g^i)^2 J_g^i \mu} \frac{u_T^i}{x_2^i}.$$

选择采样时间  $T$ , 将模型离散化得到

$$\begin{cases} x_T^i(k+1) = x_T^i(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} (f_T^i(x_T^i(\tau)) + G_T^i(x_T^i(\tau))u_T^i(k))d\tau, \\ y_T^i(k) = h_T^i(x_T^i(k), u_T^i(k)) \end{cases} \quad (8)$$

s.t.  $0 \leq \theta^i < \theta_{\max}^i$ ,  $-\Delta\theta_{\max}^i < \Delta\theta^i < \Delta\theta_{\max}^i$ ,  $0 \leq u_T^i \leq P_{w-\max}^i$ ,

其中,  $\theta_{\max}^i$ ,  $\Delta\theta_{\max}^i$  和  $P_{w-\max}^i$  分别为桨距角最大值、桨距角变化率最大值和第  $i$  组风力发电系统最大发电功率.

### 2.1.2 双馈电机模型

基于定子磁链定向, 第  $i$  组风力发电系统中双馈发电机的动态过程可以表示成如下微分方程<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}^i}{dt} = -\frac{R_r^i}{\delta^i} i_{dr}^i + \omega_s^i i_{qr}^i + \frac{1}{\delta^i} u_{dr}^i, \\ \frac{di_{qr}^i}{dt} = -\omega_s^i i_{dr}^i - \frac{R_r^i}{\delta^i} i_{qr}^i + \frac{1}{\delta^i} u_{qr}^i - \frac{\varphi_s^i}{\delta^i}, \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $i_{dr}^i$  和  $i_{qr}^i$  为转子 d-q 轴电流, 控制变量  $u_{dr}^i$  和  $u_{qr}^i$  为转子 d-q 轴电压,  $\delta^i = L_r^i - \frac{(L_m^i)^2}{L_s^i}$ ,  $\omega_s^i = \omega_1 - \omega_m^i$ ,  $\omega_1$  为同步角速度,  $\omega_m^i = n_p \omega_g^i$  为转子角速度,  $n_p$  为电机极对数,  $L_s^i$  和  $L_r^i$  为电机定子和转子自感,  $L_m^i$  为互感,  $R_r^i$  为转子线圈电阻,  $\varphi_s^i$  为定子磁链,  $R_r^i = r_r + (\frac{L_m^i}{L_s^i})^2 r_s$ ,  $r_r$ ,  $r_s$  分别为转子、定子电阻.

电机输出功率可以表示为

$$P_g^i = -\frac{3}{2} \frac{1}{L_s^i} \omega_g^i L_m^i i_{qr}^i \varphi_s^i. \quad (10)$$

定义状态  $x_{w_i} = [i_{dr}^i \ i_{qr}^i]^T$ , 控制量  $u_{w_i} = [u_{dr}^i \ u_{qr}^i]^T$ , 输出量  $y_{w_i} = P_g^i$ , 则双馈电机动态模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_{w_i} = A_w^i x_{w_i} + B_w^i u_{w_i} + F_w^i, \\ y_{w_i} = C_w^i x_{w_i}, \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$A_w^i = \begin{bmatrix} -\frac{R_r^i}{\delta^i} & \omega_s^i \\ -\omega_s^i & -\frac{R_r^i}{\delta^i} \end{bmatrix}, \quad B_w^i = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta^i} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\delta^i} \end{bmatrix}, \quad F_w^i = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\varphi_s^i}{\delta^i} \end{bmatrix}, \quad C_w^i = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{3}{2} \frac{\omega_g^i \varphi_s^i L_m^i}{L_s^i} \end{bmatrix}.$$

选择采样时间  $T$ , 将模型离散化得到

$$\begin{cases} x_{w_i}(k+1) = f_{w_i}(x_{w_i}(k), u_{w_i}(k)) = A_{mw}^i x_{w_i}(k) + B_{mw}^i u_{w_i}(k) + F_{mw}^i, \\ y_{w_i}(k) = g_{w_i}(x_{w_i}(k)) = C_{mw}^i x_{w_i}(k) \end{cases} \quad (12)$$

s.t.  $0 \leq y_{w_i}(k) \leq P_{w-\max}^i$ ,  $u_{w-\min}^i \leq u_{w_i}(k) \leq u_{w-\max}^i$ ,  $\Delta u_{w-\min}^i \leq \Delta u_{w_i}(k) \leq \Delta u_{w-\max}^i$ ,

其中,  $A_{mw}^i = e^{A_w^i T}$ ,  $B_{mw}^i = (\int_0^T e^{A_w^i \tau} d\tau) B_w^i$ ,  $C_{mw}^i = C_w^i$ ,  $F_{mw}^i = (\int_0^T e^{A_w^i \tau} d\tau) F_w^i$ ,  $u_{w-\max}^i$  和  $u_{w-\min}^i$  是  $u_{w_i}(k)$  的最大、最小值,  $\Delta u_{w-\min}^i$  和  $\Delta u_{w-\max}^i$  是  $\Delta u_{w_i}(k)$  的最小、最大值.

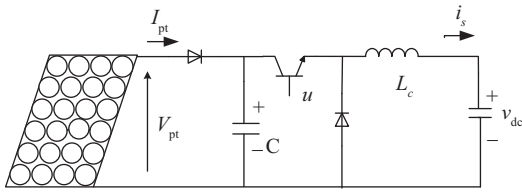


图 3 太阳能发电系统的等效电路

Figure 3 The equivalent circuit of solar power generation with DC/DC converter

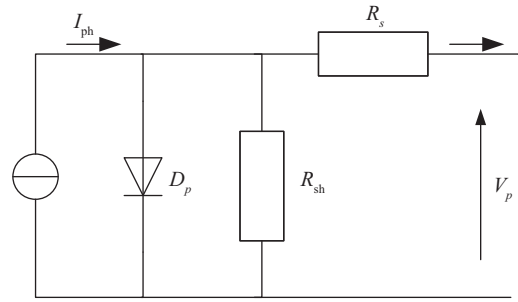


图 4 光伏电池模型等效电路

Figure 4 Model of the PV cell

## 2.2 太阳能发电系统建模

在太阳能发电系统中, 通过电池板将太阳能直接转化为电能. 如图 3 所示太阳能发电系统主要由实现能量转换的光伏阵列和改善电能质量、控制输出功率的 DC/DC 变流器组成.

Buck 电路作为 DC/DC 变流器连接光伏阵列与直流母线, 系统微分方程可表示为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} \frac{di_s}{dt} = -\frac{v_{dc}}{L_C} + \frac{V_{pt}}{L_C}u, \\ \frac{dV_{pt}}{dt} = \frac{I_{pt}}{C} - \frac{i_s}{C}u, \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $C$  和  $L_C$  分别是电感和电容的大小,  $u$  为变流器开关控制信号 (取值 0 或 1), 光伏阵列的输出电压  $V_{pt}$  和电流  $I_{pt}$  可由如图 4 所示的  $n_s$  块光伏电池串联、 $n_p$  块并联组成的光伏阵列等效电路获得

$$\begin{cases} V_{pt} = n_s \times V_p, \quad I_{pt} = n_p \times I_p, \\ I_p = I_{ph} - I_0 \times k - (V_p + I_p \times R_s)/R_{sh}, \\ I_{ph} = (I_{sc} + k_i \times (T - T_{ref})) \times \lambda_s/\lambda_{ref}, \\ k = \exp\left(\frac{q \times (V_p + I_p \times R_s)}{n_s \times A \times T}\right) - 1, \\ I_0 = k_0 \times T^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{k_B \times T}\right), \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $I_{sc}$  为短路电流,  $k_i$  代表与短路电流大小相关的温度系数,  $\lambda_{ref}$  为参考光照强度,  $T_{ref}$  为参考气温,  $q$  为电子电量,  $A$  为理想因子,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $E_g$  为半导体器件的能级距离,  $k_0$  为常量系数.

系统输出功率可以表示为

$$P_s = v_{dc}i_s = v_{pt}i_{pt}. \quad (15)$$

当变流器中开关频率足够大时, 控制变量可以等效为 PWM 占空比控制, 因此可以用占空比  $u_s$  代替  $u$ , 太阳能发电系统模型可以表示成如下微分方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_s = f_s(x_s) + G_s(x_s)u_s, \\ y_s = H_s(x_s), \end{cases} \quad (16)$$

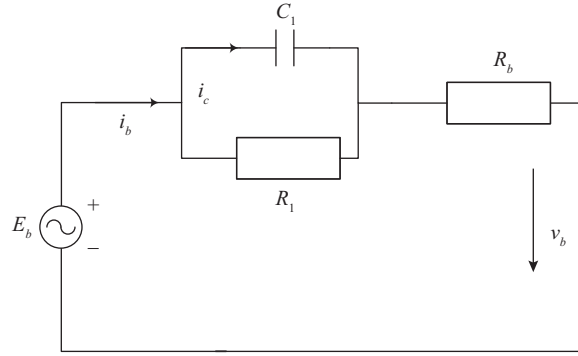


图 5 蓄电池模型

Figure 5 Battery model

其中,

$$x_s = \begin{bmatrix} i_s \\ V_{pt} \end{bmatrix}, \quad f_s(x_s) = \begin{bmatrix} -\frac{v_{dc}}{LC} + \frac{V_{pt}}{LC} \\ \frac{I_{pt}}{C} - \frac{i_s}{C} \end{bmatrix}, \quad G_s(x_s) = \begin{bmatrix} -\frac{V_{pt}}{LC} \\ \frac{i_s}{C} \end{bmatrix}, \quad H_s(x_s) = v_{dc}i_s, \quad y_s = P_s.$$

选择采样时间  $T$ , 将模型离散化得到

$$\begin{cases} x_s(k+1) = f_s(x_s(k), u_s(k)), \\ y_s(k) = g_s(x_s(k)) = C_s x_s(k) \end{cases} \quad (17)$$

s.t.  $0 \leq y_s(k) \leq P_{s-\max}(k), 0 \leq u_s(k) \leq 1,$

其中,  $f_s(x_s(k), u_s(k)) = x_s(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} (f_s(x_s(\tau)) + G_s(x_s(\tau))u_s(k))d\tau$ ,  $C_s = [v_{dc} \ 0]$ ,  $P_{s-\max}$  是太阳能发电系统能输出的最大功率.

### 2.3 储能系统建模

在独立式风光互补系统中, 广泛采用钠硫电池作为储能系统, 其模型如图 5 所示, 动态特性可由下述公式描述<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} v_b &= E_b + R_1 i_c - i_b(R_b + R_1), \\ \frac{di_c}{dt} &= -\frac{1}{R_1 C_1} i_c + \frac{di_b}{dt}. \end{aligned} \quad (18)$$

系统的输出功率为

$$P_b(k) = v_b(k)i_b(k) = E_b i_b(k) + R_1 i_c(k)i_b(k) - (R_b + R_1)(i_b(k))^2. \quad (19)$$

综合式 (18) 和 (19), 选择采样时间  $T$ , 储能系统离散化得到

$$\begin{cases} x_b(k+1) = f_b(x_b(k), u_b(k)) = A_{mb}x_b(k) + B_{mb}u_b(k), \\ y_b(k) = g_b(x_b(k)) \end{cases} \quad (20)$$

s.t.  $-i_b^{\min} \leq i_b(k) \leq i_b^{\max},$

其中,

$$x_b = \begin{bmatrix} i_c(k) \\ i_b(k) \end{bmatrix}, \quad A_{mb} = \begin{bmatrix} 1 - T/R_1 C_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_{mb} = \begin{bmatrix} T \\ T \end{bmatrix},$$

$u_b = \Delta i_b(k)$ ,  $y_b = P_b$ ,  $g_b(x_b(k)) = E_b i_b(k) + R_1 i_c(k) i_b(k) - (R_b + R_1)(i_b(k))^2$ ,  $i_b^{\max}$  为储能系统允许的最大充、放电电流.

在储能电池的工作过程中, 充放电状态是一种重要的指标, 表征蓄电池可输出的电量占电池额定容量的百分比, 可以描述为

$$\begin{aligned} q_B(k+1) &= q_B(k) - \eta \Delta T_B P_b(k) \\ \text{s.t. } 0.2 &\leq q_b \leq 0.8, \end{aligned} \quad (21)$$

其中,  $\eta$  为储能电池充、放电效率,  $\Delta T_B$  为 MW-to-MWh 的转换因子.

### 3 分级递阶分布式预测控制

风光互补发电系统的分级递阶分布式预测控制系统如图 6 所示. 系统的上层基于全局的非线性模型设计分布式预测控制器, 其目标是协同各子系统优化功率分配, 实现经济目标和安全性能指标, 其输出作为下层子发电系统的优化设定值. 上层优化的主要作用是维持整个发电系统功率平衡, 在获得最大生产效益的同时尽量降低运行维护成本. 下层采用监督预测控制实现上层优化给定值的精确跟踪控制. 所构造的分布式预测控制器将上述优化问题从集中式的结构转变为分布式的结构, 降低了计算复杂度, 同时有助于实现独立风光互补发电系统中各分布式电源的“即插即用”和智能化目标<sup>[7]</sup>.

#### 3.1 功率分配层 – 分布式预测控制器

分布式预测控制目标函数的设计是实现发电子系统功率优化分配的关键. 首先, 系统发电功率须满足负荷需求, 维持功率平衡, 保证直流母线电压稳定; 其次, 由于太阳能发电系统没有机械损耗、能量转换效率较高, 因此, 太阳能发电成本较低, 必须尽可能充分利用太阳能, 不足部分由风力发电系统提供; 再次, 风力发电系统中低速轴扭矩负荷过大会影响系统的使用寿命, 因此, 在目标函数中考虑风机机械负担保持在稳定的水平, 避免剧烈波动, 降低维护费用; 同时, 系统运行过程中应尽可能减小蓄电池的充放电次数, 延长蓄电池使用寿命, 降低运行成本. 功率分配层的优化问题可以写作

$$\begin{aligned} & \left[ P_{W_j}^{\text{ref}}, P_S^{\text{ref}}, P_B^{\text{ref}} \right] \\ &= \arg \min J = \arg \min (J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5) \\ &= \arg \min \sum_{i=1}^N \left( \left\| P_l(k+i) - P_s(k+i) - \sum_{j=1}^{n_w} P_w^j(k+i) - P_b(k+i) \right\|_{Q_L}^2 + \| P_s(k+i) - P_s^{\max} \|_{Q_s}^2 \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i=1}^{n_w} \| P_w^i(k+i) - P_{w\text{-cmd}}^i \|_{Q_w^i}^2 + \sum_{j=1}^{n_w} \| y_T^j(k+i) - \hat{T}_w^i(k+i) \|_{Q_T}^2 + \| q_B(k+i) - \hat{q}_B \|_{Q_B}^2 \right) \quad (22) \\ \text{s.t. } & \begin{cases} x_T^i(k+1) = x_T^i(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} (f_T^i(x_T^i(\tau)) + G_T^i(x_T^i(\tau))u_T^i(k)) d\tau, \\ y_T^i(k) = h_T^i(x_T^i(k), u_T^i(k)), \end{cases} \quad (23) \end{aligned}$$



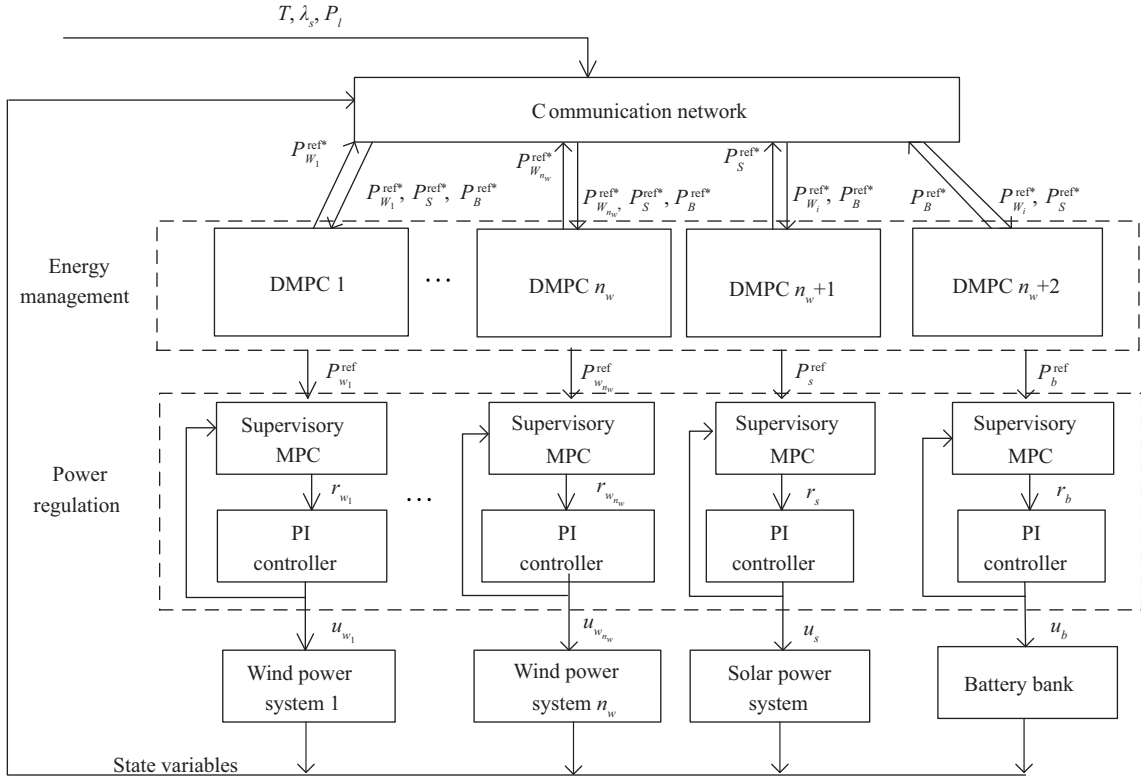


图 6 风光互补发电系统控制结构图

Figure 6 Control structure of hybrid wind and solar generation system

$$0 \leq \theta^i < \theta_{\max}^i, \quad -\Delta\theta_{\max}^i < \Delta\theta^i < \Delta\theta_{\max}^i, \quad 0 \leq u_T^i \leq P_{w-\max}^i, \quad (24)$$

$$0 \leq P_s \leq P_{s-\max}, \quad (25)$$

$$q_B(k+1) = q_B(k) - \eta\Delta T_B P_b(k), \quad 0.2 \leq q_B \leq 0.8, \quad (26)$$

其中, 预测时域与控制时域大小均为  $N$ ,  $J_1 = \sum_{j=1}^N \|P_l(k+j) - P_s(k+j) - \sum_{i=1}^{n_w} P_w^i(k+j) - P_b(k+j)\|_{Q_L}^2$  是系统安全运行指标, 即保障电网负荷需求;  $J_2 = \sum_{i=1}^N \|P_s(k+i) - P_s^{\max}\|_{Q_s}^2$  是太阳能发电成本, 即尽可能充分利用无机械损耗的太阳能发电;  $J_3 = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_w} \|P_w^i(k+j) - P_{w-\text{cmd}}^i\|_{Q_w^i}^2$  和  $J_4 = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_w} \|y_T^i(k+j) - \hat{T}_s^i(k+j)\|_{Q_T}^2$  是风力发电成本, 即尽量减少功率波动和低速轴扭矩波动带来的损耗, 降低维护费用;  $J_5 = \sum_{j=1}^N \|q_B(k+j) - \hat{q}_B\|_{Q_B}^2$  是储能系统使用成本, 即尽可能减小蓄电池的充放电次数, 延长蓄电池使用寿命. 定义优化解中  $P_S^{\text{ref}}, P_{W_j}^{\text{ref}}, P_B^{\text{ref}}$  为

$$\begin{aligned} P_S^{\text{ref}} &= [P_s^{\text{ref}}(k) \ P_s^{\text{ref}}(k+1) \ \cdots \ P_s^{\text{ref}}(k+N-1)]^T, \\ P_{W_j}^{\text{ref}} &= [P_{w_j}^{\text{ref}}(k) \ P_{w_j}^{\text{ref}}(k+1) \ \cdots \ P_{w_j}^{\text{ref}}(k+N-1)]^T, \\ P_B^{\text{ref}} &= [P_b^{\text{ref}}(k) \ P_b^{\text{ref}}(k+1) \ \cdots \ P_b^{\text{ref}}(k+N-1)]^T, \end{aligned}$$

$P_l$  是电网负荷需求,  $P_{w-\text{cmd}}^i$  是根据气象条件计算的第  $i$  组风机分配功率,  $\hat{T}_s^i$  是第  $i$  组风机低速轴静态扭矩参考值,  $\hat{q}_B = 0.7$ .

分布式模型预测控制, 是将上述的优化问题分散到  $n_w + 2$  个子系统中分布求解. 为保证全局最

优, 每个子系统都采用全局的优化性能指标 (22) 作为优化指标进行纳什寻优. 采用通信网络保证各子系统之间的信息通信, 因此能够获得收敛于集中控制的最优解, 消除性能偏差<sup>[15]</sup>. 具体步骤如下:

**Step1.** 在  $k$  时刻, 通信网络接收各个子系统的状态值, 功率需求  $P_l$  以及  $k-1$  时刻的优化解  $[P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]$ , 初始化  $l=0$ ,  $[P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^l = [P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]$ .

**Step2.**  $P_{W_j}^{\text{ref}*} = \arg \min J|_{[P_{W_i}^{\text{ref}}(i=1, \dots, n_w, i \neq j); P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]}$  约束于 (23), (24);  $P_S^{\text{ref}*} = \arg \min J|_{[P_{W_i}^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]}$  约束于 (25);  $P_B^{\text{ref}*} = \arg \min J|_{[P_{W_i}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}]}$  约束于 (26).

**Step3.**  $[P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^{l+1} = [P_{W_j}^{\text{ref}*}; P_S^{\text{ref}*}; P_B^{\text{ref}*}]$ .

**Step4.** 给定精度  $\varepsilon$ , 检查是否满足预估收敛条件  $\|[P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^{l+1} - [P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^l\| \leq \varepsilon$ , 若满足收敛条件, 则优化问题 (22) 的解为  $[P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^{l+1}$ , 迭代结束, 转 Step5; 否则, 令  $[P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^l = [P_{W_j}^{\text{ref}}; P_S^{\text{ref}}; P_B^{\text{ref}}]^{l+1}$ ,  $l = l + 1$ , 返回 Step3.

**Step5.** 计算  $k$  时刻即时优化解  $P_i^{\text{ref}}(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times N} P_i^{\text{ref}}$  ( $i = w_j, s, b, j = 1, \dots, n_w$ ), 把该优化解作为给定值作用于下层子发电系统.

**Step6.** 滚动移位到下一时刻, 即  $k+1 \rightarrow k$ , 返回 Step1, 重复以上过程.

### 3.2 功率跟踪层 – 监督预测控制

监督预测控制是近年来针对复杂工业工程发展起来的有效的优化控制手段. 系统在不改变已有 PI 控制器的基础上, 增加监督预测功能. 如图 6 所示, 监督预测控制器通过优化目标函数获得下层 PI 控制器的设定值  $r$ <sup>[16]</sup>, 其实质是在功率分配层和跟踪 PI 层中间增加一个基于系统非线性动态模型的预测控制, 把从功率分配层获得的给定值通过预测控制器进行优化传递给 PI 控制器作为优化给定值, 可以有效地改善系统的稳定性. 第  $i$  组发电子系统下层 PI 调节器的性能表达式为

$$u_i(k) = \left( k_i^{\text{sp}} + \frac{k_i^{\text{si}}}{1-z^{-1}} \right) (r_i(k) - y_i(k)), \quad (27)$$

其中,  $i = w_j, s, b, j = 1, \dots, n_w$ ,  $r_i$  为 PI 层的参考给定值,  $k_i^{\text{sp}}$  和  $k_i^{\text{si}}$  分别为比例和积分系数.

定义第  $i$  组发电子系统的监督层控制目标为

$$\min J_i = \sum_{p=1}^{N_p} \left[ Q_{\text{out}}^p (y_i(k+p|k) - P_i^{\text{ref}}(k+p))^2 \right] + \sum_{p=1}^{N_c} \left[ Q_{\Delta u}^p (\Delta u_i(k+p-1))^2 \right] \quad (28)$$

$$\text{s.t. } x_i(k+1) = f_i(x_i(k), u_i(k)),$$

$$y_i(k) = g_i(x_i(k)),$$

$$u_i(k+pt) = u_i(k+p-1) + \Delta u_i(k+p),$$

$$u_i^{\min} \leq u_i(k+p) \leq u_i^{\max},$$

$$\Delta u_i^{\min} \leq \Delta u_i(k+p) \leq \Delta u_i^{\max} \quad (p = 1, \dots, N_c),$$

$$y_i^{\min} \leq y_i(k+p) \leq y_i^{\max} \quad (p = 1, \dots, N_p),$$

$$u_i(k+p) = \left( k_i^{\text{sp}} + \frac{k_i^{\text{si}}}{1-z^{-1}} \right) (r_i(k+p) - y_i(k+p)),$$

其中,  $Q_{\text{out}}^p$ ,  $Q_{\Delta u}^p$  为权重系数,  $N_p$  为预测时域,  $N_c$  为控制时域, 此优化问题可采用序列二次规划 (sequential quadratic programming, SQP) 求解.

表 1 风力发电系统参数

Table 1 The parameters in wind generation system

Parameter in wind turbine	Value	Parameter in DFIG	Value
$R$ (m)	63	$n_p$	2
$\mu$	0.944	The rated power (MW)	5
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	$\omega_{grated}$ (rpm)	1173.7
The rated $\omega_r$ (rad/s)	1.2670	$r_r, r_s$ (m $\Omega$ )	1.1/0.86
$J_r$ (kg·m <sup>2</sup> )	2950000	$L_s, L_r$ (mH)	0.17/0.13
The rated $v$ (m/s)	11.4	$L_m$ (mH)	1.83

表 2 太阳能及储能系统参数

Table 2 The parameters in solar generation system and energy storage system

Parameter in solar generation system	Value	Parameter in energy storage system	Value
$n_s/n_p$	50/2	$\Delta T_B$	0.25
$k_0$	446	$\eta$	0.92
$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	106.04	$C_1$ (F)	12.195
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.256	$R_1$ (m $\Omega$ )	0.41
$q$ (C)	$1.6 \times 10^{-19}$	$R_b$ (m $\Omega$ )	1.88
$k_B$	$1.38 \times 10^{-23}$	$E_b$ (V)	2.1
$E_g$ (J)	$1.76 \times 10^{-19}$	$i_b^{\max}$ (A)	400

## 4 仿真实验

仿真过程中选择风机数目  $n_w = 5$ , 功率分配层的分布式预测控制采样时间  $T = 1$  s, 功率跟踪层的监督预测控制采样时间  $T = 20$  ms,  $N = N_p = N_c = 10$ . 各个发电系统参数如表 1 和 2 所示.

为验证本文所构造分级递阶分布式模型预测控制 (HDMPC) 系统的有效性, 构造了集中式预测控制系统 (hierarchical centralized MPC, HCMPC) 进行比较. 与 HDMPC 不同的是, HCMPC 功率分配层采用集中式预测控制器, 即将所有子系统的模型及优化变量集中在一个控制器中进行优化. 为进行公平比较, HCMPC 采用与 HDMPC 相同的目标函数和调整参数.

### 4.1 正常气象条件下运行仿真

我国西北地区不仅太阳能资源丰富而且因靠近冬季风的风源地风能也很多, 已建有大量的风光互补发电站. 在仿真研究中模拟西部地区夏日中午正常晴朗天气情况下光照强度、温度和外界负荷需求, 以及五组风机风速变化情况, 仿真时间为 200 s<sup>[17, 18]</sup>. 如图 7, 光照强度在 75~88 MW/cm<sup>2</sup> 之间平稳变化, 温度在 40°C 周围波动, 负荷需求在 74 s 由 20 MW 跌落到 18.5 MW, 在 157 s 再次跌落到 16 MW. 图 8 显示 5 台风机风速在 8 m/s 到 12 m/s 之间小幅波动情况.

仿真结果如图 9 所示, 在负荷需求平稳时, 由于气象条件的变化, 功率分配层通过基于全局最优的分布式预测控制协同各子系统的发电功率, 维持发电功率和负荷需求的平衡. 负荷需求在 74 s 处跌落, 由于风力发电有机械损耗, 成本较高, 功率分配层对各发电系统的功率进行优化分配, 因此各风力发电子系统输出功率有所下降, 太阳能发电保持满发. 由于风速持续降低, 在 115 s 处风力发电系统和光伏发电系统保持最大发电功率也无法满足负荷需求, 因此蓄电池输出功率对电网进行补充. 在 157 s

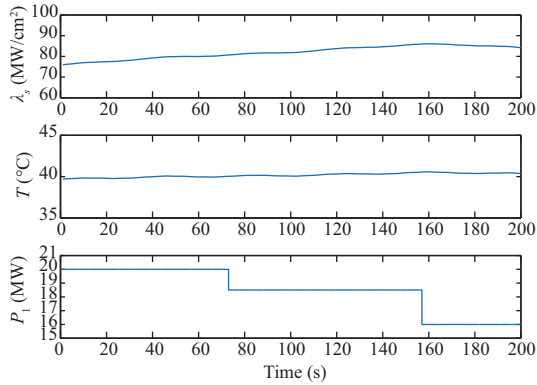


图 7 (网络版彩图) 正常气象条件下光照强度、温度和负荷需求

Figure 7 (Color online) Insolation, PV panel temperature, and load demand under normal environment condition

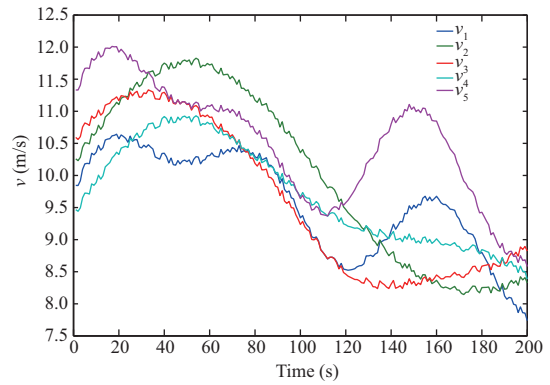


图 8 (网络版彩图) 正常气象条件下风速

Figure 8 (Color online) The wind speed under normal environment condition

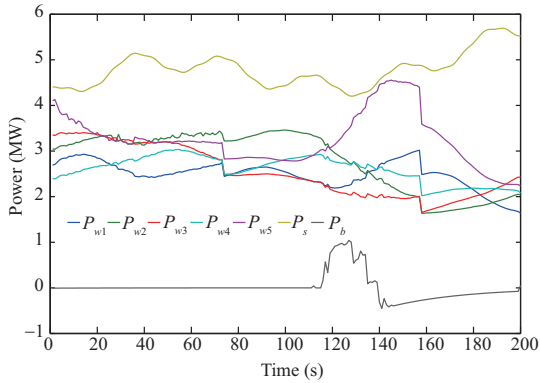


图 9 (网络版彩图) 正常气象条件下各子系统发电功率

Figure 9 (Color online) Power trajectories of each subsystem under normal environment condition

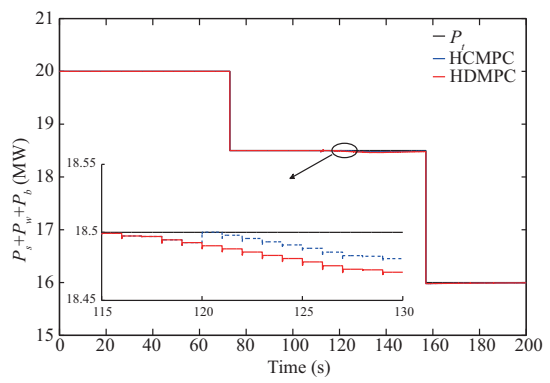


图 10 (网络版彩图) 正常气象条件下 HCMPC 和 HDMPC 策略发电功率比较

Figure 10 (Color online) Comparisons of power trajectories using HCMPC and HDMPC under normal environment condition

处负荷需求再次跌落, 发电成本较高的风力发电子系统输出功率也随之跌落, 由于最大太阳能发电功率和各风力发电子系统的输出功率之和可以满足系统负荷需求, 因此为延长使用寿命储能系统停止充放电。

由于本文在功率分配层采用的是基于全局最优的分布式预测控制, 能够获得收敛于集中控制的最优解, 因此在相同目标函数下 HCMPC 和 HDMPC 两种分级递阶控制策略的上层功率优化值非常接近. 由于 HCMPC 和 HDMPC 两种控制策略的功率跟踪层同样采用相同的控制器和参数, 因此其功率响应曲线也非常接近, 如图 10 所示。

预测控制系统中, 提高预测时域可改善控制性能, 但是相应的计算量也随之增大, 尤其是对非线性系统. 以下就控制性能和计算量两个方面对这两种控制策略进行比较, 即考察整个仿真时域上功率输出值与负荷需求的误差平方和 (sum squared error, SSE) 以及所需的相对优化时间. 仿真随后在不同

表 3 整个仿真时域上计算量和误差平方和的比较

Table 3 The comparison of computer burden and sum squared error (SSE) over the entire simulation

$N = N_p = N_c$	Number of WT	HCMPC		HDMPC	
		Computer burden	SSE	Computer burden	SSE
6	5	0.91	0.379	0.523	0.395
	10	1.624	0.386	1.007	0.403
8	5	1.243	0.368	0.714	0.379
	10	2.286	0.371	1.245	0.382
10	5	1.583	0.364	0.8917	0.372
	10	2.9682	0.365	1.6493	0.377

预测时域下进行, 其结果列于表 3. 由表 3 可以看出, HCMPC 和 HDMPC 两种控制策略的控制效果近似, HCMPC 计算量随着预测时域的增加而显著增加. 由于 HDMPC 是把大规模的在线优化问题转化成多个小规模分布优化问题, 因此计算量随着预测时域的增加呈有限线性增加. 在相同预测时域和风电子系统数目的情况下, HDMPC 策略计算量明显低于 HCMPC 策略, 预测时域越长, 子系统数目越多, 其优势越明显. HDMPC 策略在保证系统性能与控制实时性方面实现了很好的折中.

#### 4.2 气象条件剧烈变化情况下运行仿真

我国西北地区由于距冬季风源地近、远离海洋、气候干旱、植被覆盖率低、地面摩擦力小等原因, 常常出现风速、气温、光照强度剧烈变化等情况. 风力发电和太阳能发电在气象条件剧烈变化时很容易出现出力空缺和出力不稳定, 难以保证持续、稳定供电, 这给风光互补发电系统的控制带来了很大的挑战. 为了验证本文提出控制策略的有效性, 在气象条件剧烈变化的情况下进行 200 s 仿真验证. 为模拟剧烈变化的气象条件, 增大光照强度和温度的波动范围. 如图 11 所示, 200 s 内光照强度在 70~92 MW/cm<sup>2</sup> 之间波动, 温度在 39°C~42°C 之间变化, 负荷需求在 67 s 由 23 MW 跌落到 18 MW, 在 134 s 上升到 22 MW. 如图 12 所示, 在风速上增加高频扰动信号, 5 台风机风速在 9~15 m/s 之间大幅波动.

由于风速变化剧烈会导致风机低速轴扭矩波动增大, 风机低速轴扭矩增大会严重威胁风机寿命. 在功率分配层的目标函数中考虑风机轴扭矩波动带来的损耗, 采用分布式预测控制协同各子发电系统满足负荷需求, 维持功率平衡. 如图 13 所示, 在太阳能发电不能满足负荷需求时, 为减小风速剧烈变化导致的风机输出功率波动和机械损耗, 经过 HDMPC 功率分配层优化, 储能系统频繁充放电满足外界负荷需求. 如图 14 所示, 在气象条件剧烈变化情况下, 本文提出的 HDMPC 策略与 HCMPC 策略输出功率都能够快速稳定地满足负荷需求.

传统的功率分配策略 (conventional energy management strategy, CEMS) 是按照先光伏发电后风力发电最后蓄电池输出功率分配规则进行的, 没有针对系统动态性能进行优化设定<sup>[19]</sup>. 由于 HDMPC 和 HCMPC 策略的功率分配层目标函数中含有低速轴扭矩项  $J_4$ , 因此与传统的功率分配策略相比, HDMPC 和 HCMPC 策略能够有效地降低各风电机组的低速轴扭矩, 延长机组寿命. 如图 15 所示, 由于 HCMPC 和 HDMPC 策略在功率分配层采用相同的目标函数 (22), 其低速轴扭矩变化情况相似 (以风机 4 为例), 都明显优于常规功率分配策略.

定义风机低速轴扭矩的标准差:  $\sigma(T_s) = \sqrt{\frac{1}{L}(T_s - \bar{T}_s)^2}$ , 其中,  $L$  为仿真长度,  $\bar{T}_s$  为整个仿真时域中扭矩  $T_s$  的平均值.

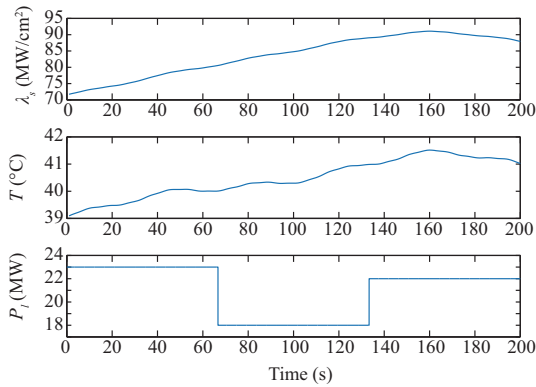


图 11 (网络版彩图) 气象条件剧烈变化下光照强度、温度和负荷需求

Figure 11 (Color online) Insolation, PV panel temperature, and load demand under frequently varying environment condition

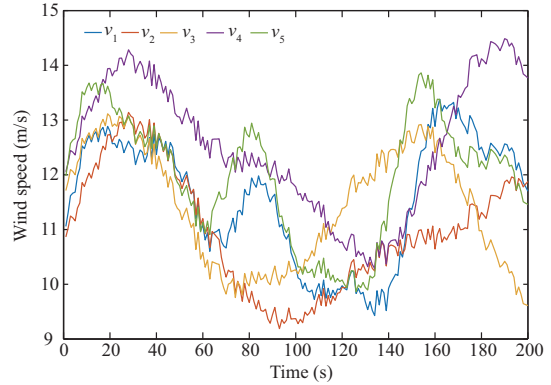


图 12 (网络版彩图) 气象条件剧烈变化下风速

Figure 12 (Color online) The wind speed under frequently varying environment condition

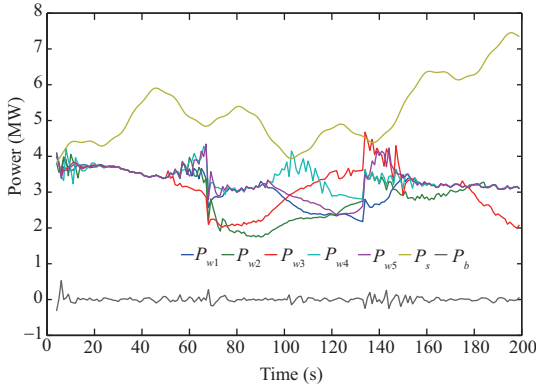


图 13 (网络版彩图) 气象条件剧烈变化下各子系统发电功率

Figure 13 (Color online) Power trajectories of each sub-system under frequently varying environment condition

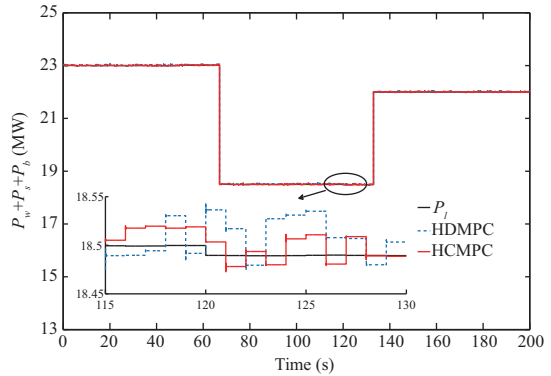


图 14 (网络版彩图) 气象条件剧烈变化下 HCMPC 和 HDMPC 策略发电功率比较

Figure 14 (Color online) Comparisons of power trajectories using HCMPC and HDMPC under frequently varying environment condition

表 4 风机低速轴扭矩标准差

Table 4 The standard deviation of shaft torque twisting the low-speed shaft in wind turbines

WT	CEMS	HCMPC	HDMPC
WT1	5.52	2.68	2.68
WT2	5.63	2.53	2.54
WT3	5.34	2.41	2.43
WT4	5.51	2.55	2.55
WT5	5.46	2.47	2.48

表 4 比较了不同控制策略下风机低速轴扭矩的标准差, 采用 HDMPC 和 HCMPC 的功率分配策略, 风机扭矩的抖动明显减小. 由于风力发电系统运行过程中难免会遇到风速变化剧烈的情况, 有效

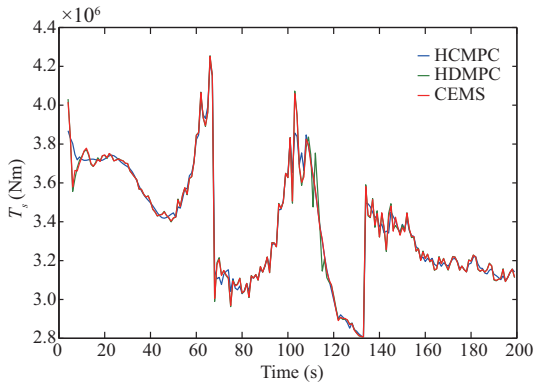


图 15 (网络版彩图) 气象条件剧烈变化下 HCMPC 和 HDMPC 策略风机 4 低速轴扭矩对比

Figure 15 (Color online) Comparisons of torsional shaft torque using HCMPC and HDMPC under frequently varying environment condition

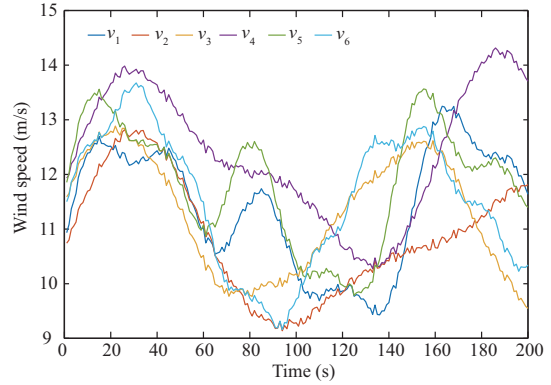


图 16 (网络版彩图) 各风机所在位置风速变化情况  
Figure 16 (Color online) Wind speed

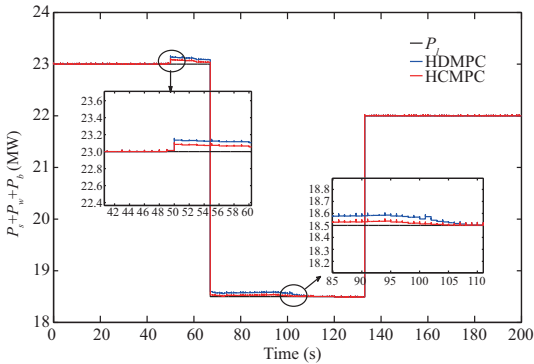


图 17 (网络版彩图) 发电功率响应曲线对比  
Figure 17 (Color online) Comparisons of generated power

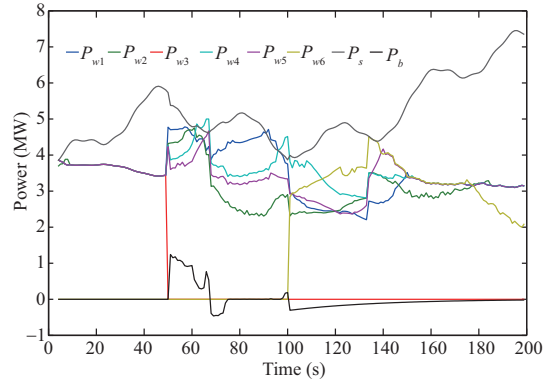


图 18 (网络版彩图) 各子系统发电功率响应曲线  
Figure 18 (Color online) Power trajectories for each sub-system

降低风机低速轴扭矩波动对延长风机的使用寿命有着重要的意义. 同时, 太阳能不能满足负荷需求时由风机之间协调完成, 避免了频繁充放电对蓄电池造成巨大的损伤.

### 4.3 某台风机切入切出情况下运行仿真

在实际运行过程中, 由于紧急维修原因需要切出某台风机, 或由于负荷剧增现有的风机数目不能满足需求, 需要切入备用风机. 为模拟实际系统运行过程, 在本组仿真中设定风机 3 在 50 s 时需要紧急维修切出系统, 备用风机 6 在 100 s 时因负荷陡增被切入系统. 光照强度、温度与外界负荷变化情况如图 11 所示, 6 组风机风速变化情况如图 16 所示.

图 17 显示发电功率阶跃响应过程, 图 18 显示各个发电子系统输出功率变化过程. 可以看出, 在本文提出的 HDMPC 策略协调下, 当某个发电子系统切出/切入时, 上层功率分配层会重新分配各子系统优化功率设定值, 保证系统输出能够快速满足负荷需求. 仿真表明本文提出的 HDMPC 策略具有一定的灵活性, 能够有效地实现独立风光互补发电系统中各分布式电源的“即插即用”.

## 5 结语

本文针对大规模且地理分散的风光互补发电系统,提出一种分级递阶分布式预测控制策略.在功率分配层将满足外界负荷需求、减少风机低速轴机械损耗、降低系统发电成本作为优化目标,考虑各子系统网络通信,运用迭代优化求解分布式预测控制策略获得全局最优解,下层采用监督预测控制实现功率跟踪.仿真表明,采用本文提出的控制策略在保证系统安全、稳定、经济运行的同时实现了分布式发电系统的“即插即用”灵活性.

## 参考文献

- 1 Ci S, Li H J, Chen X, et al. The cornerstone of energy internet: research and practice of distributed energy storage technology. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 762–773 [慈松, 李宏佳, 陈曦, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 762–773]
- 2 Qi W, Liu J F, Chen X Z, et al. Supervisory predictive control of standalone wind/solar energy generation systems. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2011, 19: 199–207
- 3 Qi W, Liu J F, Christofides P D. Distributed supervisory predictive control of distributed wind and solar energy systems. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2013, 21: 504–512
- 4 Kong X B, Liu X J, Lee K Y. An effective nonlinear multivariable HMPC for USC power plant incorporating NFN-based modeling. *IEEE Trans Ind Inf*, 2016, 12: 555–566
- 5 Kong X B, Liu X J, Lee K Y. Nonlinear multivariable hierarchical model predictive control for boiler-turbine system. *Energy*, 2015, 93: 309–322
- 6 Scattolini R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control – a review. *J Process Control*, 2009, 19: 723–731
- 7 Zhao H R, Wu Q W, Guo Q L, 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. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2015, 6: 840–849
- 8 Zhang B M, Chen J H, Wu W C. A hierarchical model predictive control method of active power for accommodating large-scale wind power integration. *Autom Electric Power Syst*, 2014, 38: 6–14 [张伯明, 陈建华, 吴文传. 大规模风电接入电网的有功分层模型预测控制方法. *电力系统自动化*, 2014, 38: 6–14]
- 9 Trifkovic M, Sheikhzadeh M, Nigim K, et al. Modeling and control of a renewable hybrid energy system with hydrogen storage. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2014, 22: 169–179
- 10 Tavakoli A, Negnevitsky M, Muttaqi K M. A decentralized model predictive control for operation of multiple distributed generators in an islanded mode. *IEEE Trans Ind Appl*, 2017, 53: 1466–1475
- 11 Abdin E S, Xu W. Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit. *IEEE Trans Evol Comput*, 2000, 3: 91–96
- 12 Zhao H R, Wu Q W, Guo Q L, et al. Distributed model predictive control of a wind farm for optimal active power control – part I: clustering-based wind turbine model linearization. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2015, 6: 831–839
- 13 Liu X J, Kong X B. Nonlinear model predictive control for DFIG-based wind power generation. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 2014, 11: 1046–1055
- 14 Kou P, Liang D L, Gao F, et al. Coordinated predictive control of DFIG-based wind-battery hybrid systems: using non-gaussian wind power predictive distributions. *IEEE Trans Energy Convers*, 2015, 30: 681–695
- 15 Zheng Y, Li S Y. Networked cooperative distributed model predictive control for dynamic coupling systems. *Acta Autom Sin*, 2013, 39: 1778–1786 [郑毅, 李少远. 网络信息模式下分布式系统协调预测控制. *自动化学报*, 2013, 39: 1778–1786]
- 16 Kong X B, Fan C, Liu X J. Distributed supervisory predictive control of main steam temperature for ultra-supercritical unit. *J Shanghai Jiao Tong Univ*, 2017, 51: 1252–1259 [孔小兵, 范昌, 刘向杰. 超超临界机组主汽温分布式监督预测控制. *上海交通大学学报*, 2017, 51: 1252–1259]
- 17 Hofierka J, Ri M. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications. In: *Proceedings of the Open Source GIS – GRASS Users Conference, Trento, 2002*
- 18 Grunnet J D, Soltani M, Knudsen T, et al. Aeolus toolbox for dynamic wind farm model, simulation and control. In: *Proceeding of European Wind Energy Conference and Exhibition, 2010*
- 19 Ma M M, Shao L Y, Liu X J. Coordinated control of micro-grid based on distributed moving horizon control. *ISA Trans*, 2018, 76: 216–223



## Hierarchical distributed model predictive control of hybrid wind and solar generation system

Xiaobing KONG<sup>1</sup>, Xiangjie LIU<sup>1\*</sup> & Mei HAN<sup>2</sup>

1. *State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

2. *Beijing Goldwind Science & Creation Windpower Equipment Co., Ltd, Beijing 100176, China*

\* Corresponding author. E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn

**Abstract** Distributed networked generation (DNG), which incorporates renewable energy and clean energy into information networks, has become increasingly important for modern power systems. In DNG, wind power and solar power generation are considered as intermittent systems with multiple constraints. The coordinated optimization of the wind power and solar power generation can effectively meet the load demand while guaranteeing the safety of power grids by reducing the wear and tear of generating units and prolonging the lifetime of grids. This study aims to construct a hierarchical distributed model predictive control (HDMPC) for large-scale, geographically dispersed wind-solar power generation systems. In HDMPC, the upper layer utilizes an iterative distributed control strategy to coordinate the power dispatch. Thus, it attains economic objectives, including the reduction in the torsional shaft torque transmitted to the gearbox in the wind turbine system and the generation cost. The lower layer utilizes the supervisory predictive control to realize economic and tracking properties. HDMPC enables the plug-and-play of distributed energy through the coordinated optimization of subsystems. Simulation experiments validated the advantages of the proposed method, which can meet the demands of safe, reliable, highly efficient, flexible, and interactive microgrid controlling.

**Keywords** hybrid wind and solar generation system, hierarchical control, distributed model predictive control, wind power generation, solar power generation



**Xiaobing KONG** was born in 1987. She received her Ph.D. degree in control theory and control engineering from the North China Electric Power University, Beijing, China, in 2014. Currently, she is working as a lecturer at the School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University. Her research interests include modeling, optimization, and nonlinear model predictive control of power plants.



**Xiangjie LIU** was born in 1966. In 1997, he received his Ph.D. degree in automatic control from the Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang, China. He is currently working as a professor at the School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China. His research areas include fuzzy control, intelligent control, and model predictive control and their applications in industrial processes.

processes.



**Mei HAN** was born in 1993. She received her master's degree in control theory and control engineering from the North China Electric Power University, Beijing, China, in 2017. She is currently an engineer with the Beijing Gold Wind Science & Creation Wind power Equipment Co., Ltd.