

新能源电力系统分布式模型预测负荷 频率控制

张怡,常鹏飞

(华北理工大学 电气工程学院,河北 唐山 063210)

摘要:随着大规模风电、光伏发电在电网中的不断渗透,新能源机组参与到负荷频率控制中已成必然。然而,由于风电和光伏发电出力不稳定,并入电网后会影响到电网的有功平衡,进而引起频率不稳定。针对含有常规机组、风电机组和光伏机组的新能源电力系统研究提出了一种基于分布式模型预测的负荷频率控制方法。该控制器通过系统中的状态信息和预测数据,同时考虑相邻控制区域的信息和系统约束,求解得到各区域控制量以实现局部目标的有效协调。仿真对比结果表明采用该方法的系统动态响应性能表现更佳。

关键词:负荷频率控制;分布式模型预测控制;风电;光伏

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22426

Distributed Model Predictive Load Frequency Control for Power System with Renewable Energy

ZHANG Yi, CHANG Pengfei

(School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology,
Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: With the increasing penetration of large-scale wind and PV power within the power system, they will inevitably participate in the load frequency control (LFC). Since the power output of wind and PV is unstable, which would affect the power balance of grid, thus cause unstable frequency. A LFC method based on distributed model predictive control (DMPC) was proposed for the power system containing conventional units, wind turbines and photovoltaic units. The controller used the state information and prediction data in the system, and considered the information and system constraints of adjacent control areas, and obtained the control variables of each area to achieve effective coordination of local goals. The simulation results show that the dynamic response performance of the system using this method is better.

Key words: load frequency control (LFC); distributed model predictive control (DMPC); wind turbine; photovoltaic power

在我国电力工业发展过程中,减少煤等不可再生能源的燃烧,采用新能源发电已成为重要任务。新能源发电方式与传统发电方式相融合组成新的分布式能源网络,可有效解决当前环境和能源危机。风能和太阳能是当前运用最为广泛的新能源发电方式,截止到2019年底,我国风光发电装机总量超过4.1亿kW,占全国总装机容量的21%^[1]。随着新能源技术的不断突破,新能源发电水平持续提升,发电成本显著下降,发电利用水平不断提高,新能源机组参与到负荷频率控制过程中已成必然^[2]。

负荷频率控制(LFC)对电网安全稳定运行来说非常重要,通过控制各发电单元的功率输出来实时跟踪负荷变化,使得区域与区域间的交换功率在计划值,系统的频率稳定在50 Hz^[3]。由于风、光的随机性和间歇性,风电机组、光伏机组介入电网后会对电网的频率稳定和有功平衡造成影响。近年来,与负荷频率控制有关的先进控制算法如神经网络控制、模糊控制等被广泛应用^[4]。

作为计算机控制技术的新方法,模型预测控制(model predictive control, MPC)由于易建模、动态性能佳等优点,在各领域有了广泛应用^[5]。在电

基金项目:国家自然科学基金(61803154);河北省自然科学基金(F2019209553)

作者简介:张怡(1983—),女,博士,副教授,Email:zy110806@163.com

力领域也有了一定的应用,尤其适用于输出不确定、风电、光伏介入下的新能源电力系统。文献[6]提出了一种基于分布式模型预测控制(DMPC)的风电场参与自动发电控制(automatic generation control, AGC)的方法,系统中有负荷波动时,根据各区域风电集群、火电机组与负荷情况,选择适当的风电场与火电机组作为调频电源。文献[7]基于MPC和大系统分层递阶理论,提出了一种大规模风电介入的有功调度控制方法。文献[8]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。然而,上述文献未考虑诸如风速、桨距角等物理约束对发电系统的影响。

针对包含风电、光伏和常规机组的新能源互联电力系统,提出了一种基于分布式模型预测控制的负荷频率控制方法。日间光伏机组有出力时,不同风速条件下,对各区域设计对应风速条件下的目标函数,并将常规机组的发电速率约束、风速约束、桨距角约束等物理约束考虑在内。在Matlab/Simulink中建立四区域互联电力系统LFC模型,并在不同工况下进行了仿真,结果表明DMPC算法下系统频率偏差超调量更小,频率恢复速度更快,系统动态性能更好。

1 问题描述

现代新能源互联电力系统由 N 个控制区域组成,区域之间通过联络线相连并有专用的通信网络用以实现信息交换,当系统发生负荷波动时,DMPC给各发电机组下发指令以控制输出功率,从而跟踪负荷波动。四区域新能源互联电力系统结构如图1所示。图中,区域1和区域3为火电区域,区域2为风电区域,区域4为光伏区域。每个区域有一个分布式控制器,各区域通过联络线与相邻区域连接,并配有专用的通信网络用以信息交换。

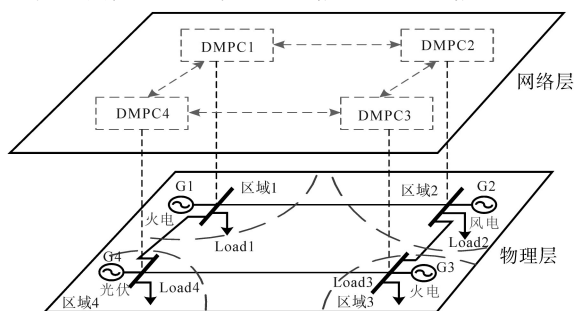


图1 四区域互联电力系统结构图

Fig.1 Structure diagram of the four-area interconnected power system
接下来,分别建立火电、风电和光伏区域的

负荷频率控制模型。

1.1 火电机组模型

火电机组主要由发电机、汽轮机和调速器构成,简化的线性模型如图2所示。图中, ACE_i 为区域控制偏差, K_{Bi} 为频率偏差因子, R_i 为调差系数, T_{Gi} 为火电机组时间常数, T_{Ti} 为汽轮机时间常数, K_{Pi} 为发电机增益, T_{Pi} 为发电机时间常数, K_{sij} 为区域间交互增益, ΔX_{gi} 为调节阀位置变化量, Δf_i 为频率偏差, ΔP_{gi} 为输出功率变化量, $\Delta P_{tie,i}$ 为联络线功率偏差。

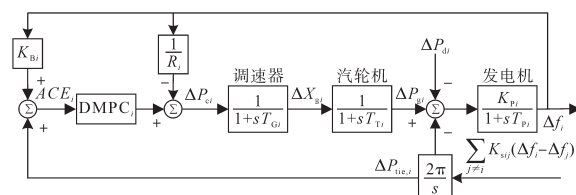


图2 火电机组线性模型

Fig.2 Linear model of thermal power plant

各组成单元动态描述为如下:

1) 调速器:

$$\Delta \dot{X}_{gi} = -\frac{1}{R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_{Gi}} \Delta X_{gi} + \frac{1}{T_{Gi}} u_i \quad (1)$$

2) 汽轮机:

$$\Delta \dot{P}_{Gi} = -\frac{1}{R_i T_{Ti}} \Delta f_i - \frac{\Delta P_{Gi}}{T_{Ti}} - \frac{1}{T_{Ti} T_{Gi}} \Delta X_{gi} + \frac{1}{T_{Ti} T_{Gi}} u_i \quad (2)$$

3) 发电机:

$$\Delta \dot{f}_i = -\frac{1}{T_{Pi}} \Delta f_i + \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \Delta P_{gi} - \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \Delta P_{tie,i} - \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} \Delta P_{di} \quad (3)$$

4) 区域间联络线交换功率偏差:

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = 2\pi \sum_{j \neq i} K_{sij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (4)$$

火电机组的状态空间可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{F}_i \mathbf{w}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{x}_i(t) = [\Delta f_i \quad \Delta P_{tie,i} \quad \Delta P_{gi} \quad \Delta X_{gi}]^T$$

$$\mathbf{u}_i = \Delta P_{ci} \quad \mathbf{w}_i = \Delta P_{di} \quad \mathbf{y}_i = ACE_i$$

式中: $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i, \mathbf{C}_i, \mathbf{F}_i$ 分别为系数、输入、输出和扰动矩阵; $\mathbf{x}_i(t)$ 为状态变量; $\mathbf{u}_i$ 为控制量; $\mathbf{w}_i$ 为扰动变量; $\mathbf{y}_i$ 为输出变量。

1.2 风电机组模型

风力发电系统是将风能转化为电能的系统,由多个风机组成一个风电场,单个风机一般由机械传动系统、发电机、电力电子变换器等构成。

风机整体结构如图3所示。

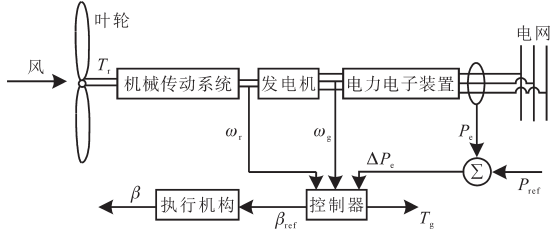


图3 风力发电系统结构图

Fig.3 Structure of wind generation system

从系统层面看,关注重点是整个风电场对电力系统的影响,可将整个风电场视为一台风力发电机。该台风机的状态空间模型可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_w(t) = \mathbf{A}_w \mathbf{x}_w(t) + \mathbf{B}_{1w} \mathbf{u}_w(t) + \mathbf{B}_{2w} \mathbf{w}_w(t) \\ \mathbf{z}_w(t) = \mathbf{C}_w \mathbf{x}_w(t) + \mathbf{D}_{1w} \mathbf{u}_w(t) + \mathbf{D}_{2w} \mathbf{w}_w(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{x}_w = [\Delta\theta_g \quad \Delta\omega_r \quad \Delta\omega_g \quad \Delta\beta]^T$$

$$\mathbf{u}_w = [\Delta\beta_{ref} \quad \Delta T_g]^T \quad \mathbf{w}_w = \Delta v_{wind} \quad \mathbf{z}_w = [\Delta\omega_g \quad \Delta T_g]^T$$

式中: $\mathbf{x}_w$ 为状态变量; $\mathbf{u}_w$ 为控制量; $\mathbf{w}_w$ 为扰动变量,选取风速波动; $\mathbf{z}_w$ 为输出变量; $\Delta\theta_g$ 为转子与低速轴旋转角度差; $\Delta\omega_r$ 为转子转速偏差; $\Delta\omega_g$ 为发电机转速偏差; $\Delta\beta$ 为桨距角控制量偏差; $\Delta\beta_{ref}$ 为桨距角控制量偏差参考值; ΔT_g 为发电机转矩偏差。

1.3 光伏机组模型

光伏发电利用“光生伏特效应”将太阳光照辐射转化为电能,光伏发电并网系统主要包括将光能转化为电能的电池板、升高输出电压的升压变换器、逆变器和控制系统4个部分。光伏电池板输出直流电经DC/DC变换后作为逆变器的直流电源,后经DC/AC逆变器转化为交流电送至电网,这里升压变换器选用Boost电路。太阳能发电系统等效电路如图4所示。当变换器中的开关频率足够大时,控制量可以视为占空比控制,通过调节占空比可控制输出电压。

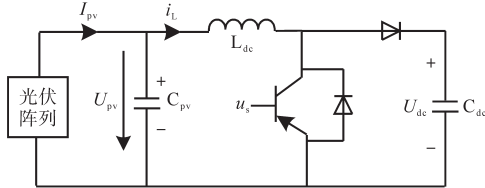


图4 光伏发电系统结构

Fig.4 The structure of PV power generation system

光伏系统的状态空间可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{u}_s(t) + \mathbf{F}_s \mathbf{w}_s(t) \\ \mathbf{y}_s(t) = \mathbf{C}_s \mathbf{x}_s(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{u}_s(t) = \Delta d \quad \mathbf{y}_s = \Delta P_{pv}$$

$$\mathbf{x}_s(t) = [\Delta V_{pv} \quad \Delta i_L]^T \quad \mathbf{w}_s(t) = [\Delta I_{pv} \quad \Delta V_{dc}]^T$$

式中: $\mathbf{u}_s$ 为控制量; $\mathbf{y}_s$ 为输出变量,选取输出功率偏差; $\mathbf{x}_s$ 为状态变量; $\mathbf{w}_s$ 为扰动变量; ΔV_{pv} , ΔI_{pv} 分别为光伏阵列输出电压和电流的偏差; Δi_L 为流入升压电路的电流偏差值; ΔV_{dc} 为输出电压变化量。

2 分布式模型预测控制器

结合式(5)~式(7)可将互联系统分布式模型写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_{ii} \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_{ii} \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{F}_{ii} \mathbf{w}_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij} \mathbf{x}_j(t) \\ \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_{ii} \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}_{ii}$ 为区域*i*的状态矩阵; $\mathbf{B}_{ii}$ 为输入矩阵; $\mathbf{C}_{ii}$, $\mathbf{F}_{ii}$ 分别为输出矩阵和扰动矩阵; $\mathbf{A}_{ij}$ 为区域*i*与区域*j*间的关联矩阵; $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{u}_i$, $\mathbf{y}_i$ 分别为区域*i*的状态向量、控制变量和输出; $\mathbf{w}_i$ 为负荷扰动向量。

将式(8)离散化,得到:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{ii} \mathbf{u}_i(k) + \tilde{\mathbf{F}}_{ii} \mathbf{w}_i(k) + \sum_{j \neq i} \tilde{\mathbf{A}}_{ij} \mathbf{x}_j(k) \\ \mathbf{y}_i(k) = \tilde{\mathbf{C}}_{ii} \mathbf{x}_i(k) \end{cases} \quad (9)$$

设系统的预测时域为 N_p ,控制时域为 N_c ,在预测时域下每一时刻系统的状态为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1(k+1|k) = \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{ii} \mathbf{u}_i(k) + \tilde{\mathbf{F}}_{ii} \mathbf{w}_i(k) + \sum_{j \neq i} \tilde{\mathbf{A}}_{ij} \mathbf{x}_j(k) \\ \mathbf{x}_2(k+2|k) = \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^2 \mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} \mathbf{u}_i(k) + \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \tilde{\mathbf{F}}_{ii} \mathbf{w}_i(k) + \\ \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \sum_{j \neq i} \tilde{\mathbf{A}}_{ij} \mathbf{x}_j(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{ii} \mathbf{u}_i(k+1|k) + \\ \tilde{\mathbf{F}}_{ii} \mathbf{w}_i(k+1|k) + \sum_{j \neq i} \tilde{\mathbf{A}}_{ij} \mathbf{x}_j(k+1|k) \\ \vdots \end{cases}$$

定义:

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = [\mathbf{x}_i(k+1|k)^T \quad \mathbf{x}_i(k+2|k)^T \quad \cdots \quad \mathbf{x}_i(k+N_p|k)^T]^T$$

$$\tilde{\mathbf{u}}_i = [\mathbf{u}_i(k)^T \quad \mathbf{u}_i(k+1|k)^T \quad \cdots \quad \mathbf{u}_i(k+N_c-1)^T]^T$$

$$\tilde{\mathbf{w}}_i = [\mathbf{w}_i(k+1|k)^T \quad \mathbf{w}_i(k+2|k)^T \quad \cdots \quad \mathbf{w}_i(k+N_p|k)^T]^T$$

可得区域*i*基于*k*时刻的状态空间表达式,从而可将预测方程写为

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathbf{u}_{ii} \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_{ii} \tilde{\mathbf{u}}_i(k) + \xi_{ii} \tilde{\mathbf{w}}_i + \sum_{j \neq i} \mathbf{u}_{ij} \mathbf{x}_j(k) \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{u}_{ii} = [\tilde{\mathbf{A}}_{ii} \quad \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^2 \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p}]^T$$

$$\mathbf{v}_{ii} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^2 \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \tilde{\mathbf{A}}_{ii} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} & \cdots & \cdots & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p-N_c} \tilde{\mathbf{B}}_{ii} \end{bmatrix}$$

$$\xi_{ii} = \begin{bmatrix} \tilde{F}_{ii} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}\tilde{F}_{ii} & \tilde{F}_{ii} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}^2\tilde{F}_{ii} & \tilde{A}_{ii}\tilde{F}_{ii} & \tilde{F}_{ii} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{F}_{ii} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-2}\tilde{F}_{ii} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-3}\tilde{F}_{ii} & \cdots & \tilde{F}_{ii} \end{bmatrix}$$

$$u_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{ij} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}\tilde{A}_{ij} & \tilde{A}_{ij} & \cdots & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}^2\tilde{A}_{ij} & \tilde{A}_{ii}\tilde{A}_{ij} & \tilde{A}_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{A}_{ij} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-2}\tilde{A}_{ij} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-3}\tilde{A}_{ij} & \cdots & \tilde{A}_{ij} \end{bmatrix}$$

LFC目的是调节各发电机组的输出功率,保持负荷与发电侧有功功率的动态平衡。当某区域负荷发生变化,该区域DMPC控制器利用当前时刻该区域的状态信息,结合与其相邻区域的状态和上一时刻预测得到的控制量序列,预测出 $(k+N_p)$ 时刻所有的状态,通过协调各发电单元之间的出力,计算得到该区域的控制信号,将此控制信号作用于该区域发电机,使得该区域的频率偏差为0,与其相连区域间联络线交换功率在计划值,即使得该区域的区域控制偏差(area control error, ACE)信号为0,从而保证电网供需平衡。

设计DMPC控制器时,系统所有状态可通过传感器测量得到,电力系统运行过程中,平均风速在一段时间内可预测得到,太阳光照强度和温度在短时间内是保持不变的。考虑在日间高风速和低风速两种情况,对各区域设计相应自然工况下的目标函数。针对图1中的系统,当区域2中风速大于额定风速,DMPC控制目标设为输出额定功率;当风速小于额定风速,DMPC控制目标设为输出当前风速下的平均功率。对于光伏系统,控制目标为跟踪输出当前辐射强度和温度下的最大功率。对于两个火电机组,在跟踪本区域负荷变化的同时,还要与其相邻的区域控制器进行协调优化,补充风电和光伏区域的缺额功率。

从而,在日间不同风速条件下各区域目标函数可表示如下:

1) 日间,光伏机组的目标函数写为

$$J_4 = \sum_{n=0}^{N_c} (\|\tilde{x}_4(k+n|k)\|_{Q_4}^2 + \|u_4(k+n|k) - u_{p_N}\|_{R_4}^2 + \sum_{j \neq i} \|u_j^*(k+n|k)\|_{R_j}^2) \quad (11)$$

2) 当风速 $v_w > v_N$ 时,风电场控制量直接定义为

$$u_2 = u_{p_{ref}} = u_{p_N} \quad (12)$$

式中: u_{p_N} 为机组处于额定功率下的控制量; $u_{p_{ref}}$ 为机组参考功率下的控制量; u_j^* 为 $k-1$ 时刻相邻区域的控制量。

火电机组的目标函数定义为

$$J_i = \sum_{n=0}^{N_c} (\|\tilde{x}_i(k+n|k)\|_{Q_i}^2 + \|u_i(k+n|k)\|_{R_i}^2 + \|(u_p - u_N) - u_{p_{ref}}\|_{S_i}^2 + \sum_{j \neq i} \|u_j^*(k+n|k)\|_{R_j}^2) \quad (13)$$

$$i = 1, 3$$

式中: Q, R, S 为系统权重矩阵。

以上两个目标函数表示:在日间高风速的工况下,风电场输出额定功率,光伏机组跟踪输出当前辐射强度和温度下的最大功率,两个火电机组对光伏区域的负荷缺额进行补充,在当前 k 时刻和控制时域上对各区域目标函数 J 进行优化:

$$\min_{u(k+n|k)} J \quad (14)$$

式(14)满足式(10),同时满足系统约束,系统约束包括发电速率约束、负荷扰动约束、桨距角约束、占空比约束以及风速约束,具体如下:

$$\begin{cases} |\mathbf{x}_{i3}(k+n|k)| \leq 0.0017 \\ |\mathbf{w}_i(k+n|k)| \leq 0.3 \\ 0 \leq \mathbf{x}_{w4}(k+n|k) \leq 90^\circ \\ 0 \leq d(k) \leq 1 \\ 3 \leq \mathbf{w}_w(k+n|k) \leq 25 \end{cases} \quad (15)$$

3) 当风速 $v_w < v_N$ 时,风电区域DMPC优化目标是跟踪输出当前工况下的参考平均功率 P_{ref} (该功率可通过当前一段时间内的平均风速预测获得),目标函数设计为

$$J_2 = \sum_{n=0}^{N_c} (\|\tilde{x}_2(k+n|k)\|_{Q_2}^2 + \|u_2(k+n|k) - u_{p_{ref}}\|_{R_2}^2 + \sum_{j \neq i} \|u_j^*(k+n|k)\|_{R_j}^2) \quad (16)$$

火电机组目标函数设计为

$$J_i = \sum_{n=0}^{N_c} (\|\tilde{x}_i(k+n|k)\|_{Q_i}^2 + \|u_i(k+n|k)\|_{R_i}^2 + \sum_{j \neq i} \|u_j^*(k+n|k)\|_{R_j}^2 + (u_p - u_{p_N}) - (u_w - u_{p_N}) - u_{p_{ref}}\|_{S_i}^2) \quad (17)$$

此组目标函数表示为:在日间低风速工况下,风电场输出参考平均功率,光伏机组跟踪输出当前辐射强度和温度下的最大功率,两个火电机组对光伏区域和风电区域的功率缺额进行补充。将各区域目标函数代入式(14),在当前 k 时

刻和控制时域上对 J 进行优化求解。

选用以上不同工况下式(14)解得的该工况下各区域最优控制序列的第一个元素,得 k 时刻区域 i 的控制量为

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \Delta u_i(k) \quad (18)$$

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中搭建图 1 所示四区域新能源互联电力系统 LFC 模型,基于第 2 节所述设计 DMPC 控制器。采样时间设置为 $T = 0.1 \text{ s}$,预测时域 $N_p = 15$,控制时域 $N_c = 15$,权重矩阵 $Q = 10I$, $R = S = I$ 。日间有光伏出力时,分别在高风速和低风速条件下,阶跃负荷扰动时采用 DMPC 算法进行仿真,并与传统 PI 控制进行对比。

3.1 日间高风速条件下仿真

设置仿真时间 600 s,风速均值 17 m/s,温度 25 °C,太阳辐射强度在仿真时间内不变。 $t=0 \text{ s}$ 时区域 1 负荷减少 20%, $t=300 \text{ s}$ 时区域 3 负荷增加 10%。各区域频率偏差波形(高风速)如图 5 所示。

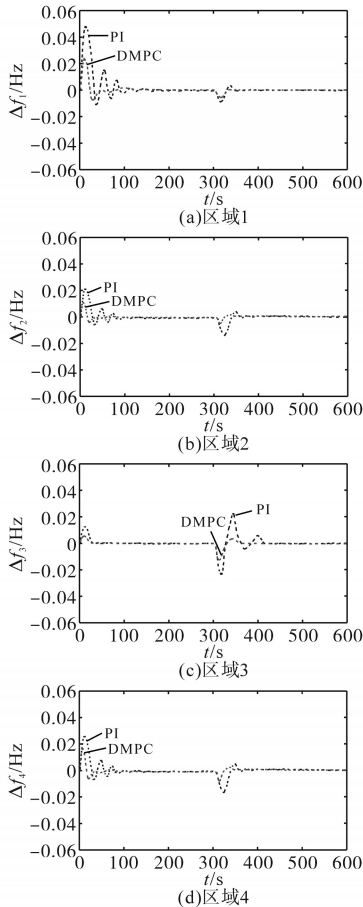


图5 负荷扰动下各区域频率偏差(高风速)
Fig.5 Frequency deviation of each area under load disturbance(high wind speed)

区域 1 在 $t=0 \text{ s}$ 时负荷减少 20%, 该区域频率偏差较大, 区域 2、区域 3、区域 4 由于区域 1 的负荷变化导致频率有了略微的上升。 $t=300 \text{ s}$ 时区域 3 负荷增大, 频率有较大下降, 区域 1、区域 2、区域 4 的频率有略微的下降。

3.2 日间低风速条件下仿真

设置风速均值 12 m/s, $t=100 \text{ s}$ 时区域 1 负荷增加 10%。各区域频率偏差波形(低风速)如图 6 所示。区域 1 负荷增加导致频率下降较大, 与其相邻区域的频率也有了略微的下降。

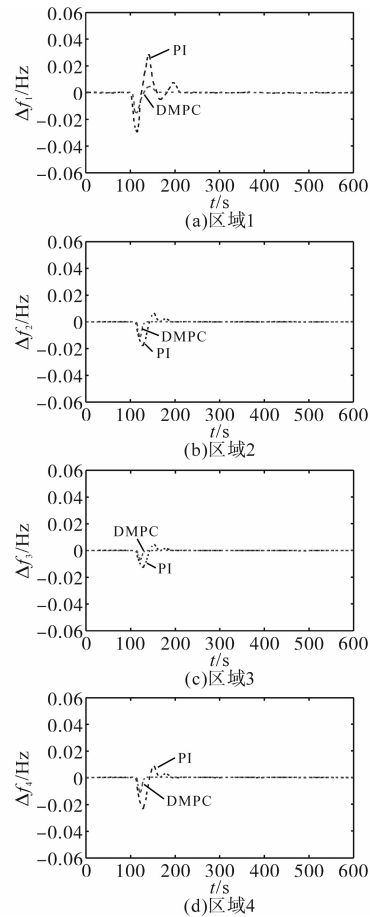


图6 负荷扰动下各区域频率偏差(低风速)
Fig.6 Frequency deviation of each area under load disturbance(low wind speed)

由图 5 和图 6 可以看出, 发生负荷变化的区域频率偏差较大, 在 DMPC 控制下, 相较于传统的 PI 控制算法, 该区域频率偏差超调量更小, 且能更快地逼近至 0, 即该区域频率能够更快地恢复到 50 Hz; 无负荷变化的区域, 由于联络线功率偏差的变化, 频率也有较小的波动, 但 DMPC 控制下该区域的频率偏差更小, 频率恢复速度更快。由此, 风电、光伏介入下的新能源电力系统, 在不同工况下有负荷波动时, 相较于 PI 控制算法, DMPC

控制算法可以更好地协调各发电机组出力,使得系统的频率超调量更小,频率的恢复速度更快,从而使系统拥有更好的动态性能。

4 结论

针对含有风电和光伏的新能源互联电力系统,提出了一种基于DMPC算法的负荷频率控制策略。由于风、光的随机性和间歇性,对风电场在不同风速条件下设计了不同的目标函数进行切换控制,日间光伏发电系统有出力时,光伏机组始终跟踪当前辐射强度和温度下的最大功率。系统中存在负荷波动导致的频率不稳定,由火电机组控制器与风电场、光伏机组控制器协调进行频率调节。以四区域互联系统为例,在系统中有阶跃负荷扰动时进行仿真,验证了DMPC算法的有效性和更佳的控制效果。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
Chen Guoping, Dong Yu, Liang Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 慈松,李宏佳,陈鑫,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[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(6): 762-773.
Ci Song, Li Hongjia, Chen Xin, *et al.* Important basic support for the energy internet: exploration and practice of distributed energy storage technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(6): 762-773.
- [3] Bevrani H, Ghosh A, Ledwich G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 438-457.
- [4] Pati S, Sahu B K, Panda S. Hybrid differential evolution particle swarm optimization optimised fuzzy proportional-integral derivative controller for automatic generation control of interconnected power system[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2014, 8(11): 1789-1800.
- [5] 姜艳姝, 遇言, 赵怀明. 基于模型预测控制的PWM整流器直接功率控制[J]. 电气传动, 2015, 45(7): 21-25.
Jiang Yanshu, Yu Yan, Zhao Huaiming. Direct power control of three phase PWM rectifier using model predictive control[J]. Electric Drive, 2015, 45(7): 21-25.
- [6] 叶林, 陈超宇, 张慈杭. 基于分布式模型预测控制的风电场参与AGC控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3261-3270.
Ye Lin, Chen Chaoyu, Zhang Cihang, *et al.* Wind farm participation in AGC based on distributed model predictive control[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3261-3270.
- [7] 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[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 6-14.
Zhang Boming, Chen Jianhua, Wu Wenchuan. A hierarchical model predictive control method of active power for accommodating large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 6-14.
- [8] Zhao H, Wu Q, Guo Q, *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, 2015, 6(3): 840-849.

收稿日期:2020-09-15

修改稿日期:2020-10-17