



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



风电介入下的多区域互联电力系统分布式经济模型预测负荷频率控制

马苗苗, 崔婧, 李钰梅, 刘向杰

引用本文:

马苗苗, 崔婧, 李钰梅, 刘向杰. 风电介入下的多区域互联电力系统分布式经济模型预测负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1557–1565.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1822>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system
控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability
控制与决策. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model
控制与决策. 2021, 36(8): 1849–1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

分布式最小二乘估计中隐匿FDI攻击策略的设计

Hidden FDI attack strategy for distributed least square estimation
控制与决策. 2021, 36(8): 1963–1969 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1688>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

风电介入下的多区域互联电力系统分布式 经济模型预测负荷频率控制

马苗苗^{1†}, 崔婧¹, 李钰梅¹, 刘向杰^{1,2}

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206;
2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对风电介入下的多区域互联电力系统, 提出一种分布式经济模型预测负荷频率控制策略. 通过将大规模互联电力系统分解成若干个动态耦合的子系统, 这些子系统能够利用网络交流并共享信息, 使得各区域的控制器实现各自优化问题的求解. 同时, 在满足状态约束和控制输入约束的前提下, 遵循传统火力发电优先、风力发电配合的原则, 通过在线求解优化问题, 实现风电介入下的多区域互联电力系统的负荷频率控制. 为了提高系统整体运行经济性, 所提出的分布式经济模型预测控制器将负荷调频成本、燃料消耗成本以及风力发电成本等经济性指标考虑在内. 仿真结果表明, 在阶跃负荷扰动下, 所设计的控制器不仅可以满足调频要求, 在降低计算负担和提高经济性能方面也具有一定优势.

关键词: 分布式经济模型预测控制; 风电机组; 互联电力系统; 负荷频率控制; 多区域系统; 经济性能

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1822

引用格式: 马苗苗, 崔婧, 李钰梅, 等. 风电介入下的多区域互联电力系统分布式经济模型预测负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1557-1565.

Distributed economic model predictive load frequency control for the multi-area interconnected power system with wind power integration

MA Miao-miao^{1†}, CUI Jing¹, LI Yu-mei¹, LIU Xiang-jie^{1,2}

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper proposes a distributed economic model predictive control (DEMPC) approach for the load frequency control (LFC) of the multi-area interconnected power system with wind power integration. By decomposing the power system into several dynamically coupled subsystems, these subsystems can communicate and share information through the network, so that the controllers in each region can solve their own optimization problems. By minimizing the cost function, the proposed DEMPC method realizes the LFC while ensuring the state constraints and the control input constraints. The cost function is chosen based on the principle that the traditional thermal power plant has the priority while the wind power plant coordinates with the thermal power plant. In order to improve the overall operation economics, the stage cost function of the DEMPC controller considers the economic performance indices, i.e., load frequency regulation cost, fuel consumption cost, and wind power generation cost. The simulation results and analysis show that the designed DEMPC controller not only meets the frequency modulation requirements under the step load disturbance, but also has certain advantages in terms of computational burden and economic performance.

Keywords: distributed economic model predictive control; wind power plant; interconnected power system; load frequency control; multi-area system; economic performance

0 引言

互联电力系统是实现分布式能源利用的有效途径, 也是智能电网发展的新趋势. 然而, 互联电网使

整个电力系统的动态过程变得更加复杂, 为电力系统的控制带来了困难. 电力系统频率是电能的重要质量指标之一, 系统的负荷变化导致发电功率与负荷

收稿日期: 2022-10-20; 录用日期: 2023-03-03.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023JC002); 国家自然科学基金项目(61873091).

责任编辑: 李少远.

[†]通讯作者. E-mail: mamm@ncepu.edu.cn.

需求之间不平衡,从而引起系统频率和联络线交换功率偏差,这种偏差反映在电网上,会使频率偏离额定值^[1].为了弥补这种偏差,需要实时控制发电机组的输出功率跟踪负荷扰动的随机变化,以保证满意的区域频率和联络线交换功率^[2].因此,负荷频率控制(load frequency control, LFC)已成为多区域互联电力系统保证供电质量及电力系统安全与经济运行的重要手段.

近年来,由于现代化社会进程的不断加快,资源短缺和环境污染等问题的出现,人们逐渐加强可再生能源的开发与利用.作为一种具有发展前景的清洁能源,风能占据了可再生能源装机规模相当大的比重.截止到2021年10月,风电装机容量约占全国发电装机容量23.0亿千瓦的13%,同比增长了30.4%.随着风能入网量不断增加,风电机组在电力系统中的占有率迅速提高,与此同时,风能的开发与利用也存在一些制约因素.由于风能自身的间歇性和不确定性,不可避免会影响电力系统的安全稳定运行^[3],因此,风电并网对互联电力系统的负荷频率控制带来了极大的挑战.

目前,针对风电介入下的互联电力系统的LFC问题,许多学者基于不同理论提出了大量的控制方法,如:PID控制^[4-5]、模糊控制^[6-7]、滑模控制^[8-9]、模型预测控制^[10-14]等.这些控制方法中,模型预测控制(MPC)因其能够在线求解复杂优化问题并处理各种约束的特点,近年来成为一种在电力系统中广泛应用的控制策略.尽管集中式模型预测控制(cent-MPC)^[10]具有良好的全局控制能力,可以达到较好的控制效果,但由于互联电力系统地理位置分布广泛、信息交换量大,导致计算负担过重,使其在互联电力系统中的应用受到限制,且集中式控制方法的容错性

较差,一旦控制器出现故障,将会影响整个系统的控制效果.分散式模型预测控制(decent-MPC)^[11-12]虽然将整个大规模电力系统分解成若干个分散子系统进行控制,却忽略了子系统之间的耦合关系,容易降低系统整体的控制性能.而分布式模型预测控制(DMPC)^[13-14]能够很好地克服上述缺点,它将大规模互联电力系统的优化问题分散到若干个子系统中分布实现,这些子系统通过网络进行信息的交流与共享.其中,各子系统都设置独立的控制器,通过这些控制器求解各自优化问题,提高了系统求解速率.

由于全球能源危机、资源短缺、环境污染等问题接踵而至,能源的有效利用变得尤为重要.近年来,经济模型预测控制(EMPC)^[15-17]因其在MPC基础上进一步考虑经济性的特点受到了广泛关注.与传统MPC的二次型目标函数不同,EMPC的阶段成本函数可以是与经济性指标相关的任意函数形式.

本文针对风电介入下的多区域互联电力系统的LFC问题,提出一种分布式经济模型预测控制方法.通过将大规模互联电力系统分解成若干个子系统,各个区域的控制器求解各自的优化问题,从而大大降低计算负担.与此同时,该方法在满足状态约束和控制输入约束的前提下,基于传统火力发电优先、风力发电配合的原则在线求解优化问题.为降低系统运行成本,本文将负荷调频成本、燃料消耗成本以及风力发电成本3种经济性指标纳入目标函数.通过最小化目标函数,所提出的DEMPC方法不仅能将负荷频率偏差和联络线功率偏差调节至零,还能有效提高系统的经济性能.

1 多区域互联电力系统模型

风电介入下的负荷频率控制模型如图1所示,各个控制区域之间均通过联络线相连.

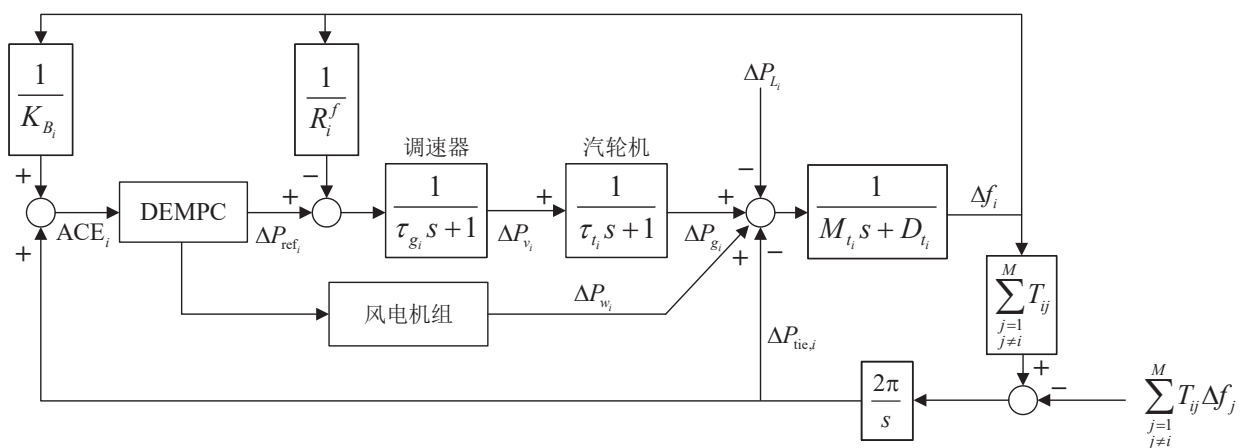


图1 风电介入下的负荷频率控制模型

1.1 火电机组模型

火电作为一种传统发电模式,可以提供稳定且可靠的功率. 本文采用的火电机组包含汽轮机和调速器两部分. 区域*i*的汽轮机模型^[18]可表示为

$$\Delta \dot{P}_{g_i} = -\frac{1}{\tau_{t_i}} \Delta P_{g_i} + \frac{1}{\tau_{t_i}} \Delta P_{v_i}. \quad (1)$$

其中: ΔP_{g_i} 为发电机输出功率偏差, ΔP_{v_i} 为调速器阀门位置偏差, τ_{t_i} 为汽轮机时间常数.

区域*i*的调速器模型可以表示为

$$\Delta \dot{P}_{v_i} = -\frac{1}{\tau_{g_i} R_i^f} \Delta f_i - \frac{1}{\tau_{g_i}} \Delta P_{v_i} + \frac{1}{\tau_{g_i}} \Delta P_{ref_i}, \quad (2)$$

其中: R_i^f 为反馈系数, Δf_i 为频率偏差, τ_{g_i} 为调速器时间常数, ΔP_{ref_i} 为火电机组的参考设定值变化增量.

1.2 风机模型

本文选择的风机模型为双馈异步风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG),其简化模型如图2所示.

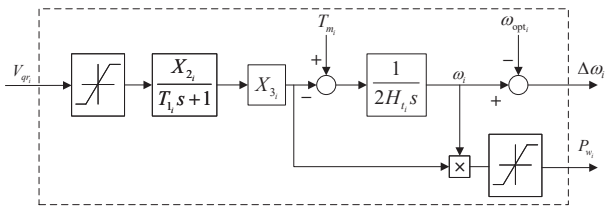


图2 DFIG简化模型

图2中相关参数^[19]表达式为

$$X_{2_i} = \frac{1}{R_{r_i}}, X_{3_i} = \frac{L_{m_i}}{L_{ss_i}}, T_{1_i} = \frac{L_{0_i}}{\omega_{opt_i} R_{s_i}}. \quad (3)$$

其中: $L_{ss_i} = L_{s_i} + L_{m_i}$, $L_{rr_i} = L_{rs_i} + L_{m_i}$, $L_{0_i} = L_{rr_i} + \frac{L_{m_i}^2}{L_{ss_i}}$, R_{r_i} 和 R_{s_i} 分别为转子和定子等效电阻, L_{m_i} 为磁化电感, L_{rr_i} 和 L_{ss_i} 分别为转子和定子等效自感, L_{rs_i} 和 L_{s_i} 分别为转子和定子等效漏感, ω_{opt_i} 为风机在运行点处的转子速率.

该DFIG模型的动态模型^[20]表达式为

$$\Delta \dot{i}_{qr_i} = -\frac{1}{T_{1_i}} \Delta i_{qr_i} + \frac{X_{2_i}}{T_{1_i}} \Delta V_{qr_i}, \quad (4)$$

其中 V_{qr_i} 和 i_{qr_i} 分别表示定子电压和电流在*q*轴上的分量. 另外,风电机组的输出功率偏差 ΔP_{w_i} ^[20] 为

$$\Delta P_{w_i} = X_{3_i} \omega_{opt_i} \Delta i_{qr_i}. \quad (5)$$

1.3 频率偏差与联络线功率偏差

大规模互联电力系统中的各个区域均通过联络线相连,当某一区域的发电机功率与负荷需求不平衡时,各区域可利用联络线协调发电功率,更好地调节负荷频率. 区域*i*的频率偏差 Δf_i 可表示为

$$\Delta \dot{f}_i = -\frac{D_{t_i}}{M_{t_i}} \Delta f_i + \frac{1}{M_{t_i}} \Delta P_{g_i} + \frac{1}{M_{t_i}} \Delta P_{w_i} -$$

$$\frac{1}{M_{t_i}} \Delta P_{tie,i} - \frac{1}{M_{t_i}} \Delta P_{L_i}. \quad (6)$$

其中: M_{t_i} 为发电机转动惯量, D_{t_i} 为负载阻尼系数, $\Delta P_{tie,i}$ 为联络线交换功率偏差, ΔP_{L_i} 为扰动偏差.

假设整个互联电力系统是由*M*个控制区域组成的,则区域间的联络线功率偏差 $\Delta P_{tie,ij}$ 为

$$\Delta \dot{P}_{tie,ij} = 2\pi T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j),$$

其中 T_{ij} 为区域*i*与区域*j*之间的同步系数. 区域*i*与其他区域之间的总联络线功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 可表示为

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \Delta \dot{P}_{tie,ij} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M 2\pi T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j). \quad (7)$$

区域控制偏差(area control error, ACE)作为一种调节准则,代表实际发电量与计划发电量的差值,可同时反映频率和联络线功率的偏差^[21],其表达式为

$$ACE_i = K_{B_i} \Delta f_i + \Delta P_{tie,i}, \quad (8)$$

其中 K_{B_i} 为区域频率偏差系数.

综上,第*i*个控制区域的状态空间模型为

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii} x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i d_i(t) + \sum_{j \neq i} A_{ij} x_j(t),$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t). \quad (9)$$

其中

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_{t_i}}{M_{t_i}} & \frac{1}{M_{t_i}} & 0 & -\frac{X_{3_i} \omega_{opt_i}}{M_{t_i}} & -\frac{1}{M_{t_i}} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_{t_i}} & \frac{1}{\tau_{t_i}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\tau_{g_i} R_i^f} & 0 & -\frac{1}{\tau_{g_i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{1_i}} & 0 \\ 2\pi \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_{g_i}} & 0 \\ 0 & \frac{X_{2_i}}{T_{1_i}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_{t_i}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C_i = \begin{bmatrix} K_{B_i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$x_i = [\Delta f_i \quad \Delta P_{g_i} \quad \Delta P_{v_i} \quad \Delta i_{qr_i} \quad \Delta P_{tie,i}]^T,$$

$u_i = [\Delta P_{ref_i} \ \Delta V_{qr_i}]^T$, $y_i = [ACE_i]$, $d_i = [\Delta P_{L_i}]$,
 $x_i \in \mathbb{R}^5$ 为状态变量, $u_i \in \mathbb{R}^2$ 为控制输入, $d_i \in \mathbb{R}$ 为
 系统干扰, $y_i \in \mathbb{R}$ 为系统输出.

另外,为了保证电力系统的安全运行,负荷频率
 偏差应满足如下约束条件^[13]:

$$-0.02 \leq \Delta f_i \leq 0.02. \quad (10)$$

在实际电力系统中,火电以及风电机组的控制输
 入也存在约束^[13],表示如下:

$$\begin{aligned} -0.2 &\leq \Delta P_{ref_i} \leq 0.2, \\ -0.25 &\leq \Delta V_{qr_i} \leq 0.25. \end{aligned} \quad (11)$$

2 分布式经济模型预测控制器设计

本节首先列出3种经济性指标;然后,针对具有
 状态和控制输入约束的多区域互联电力系统负荷频
 率控制问题,设计DEMPC控制器;最后,利用所提出
 的DEMPC算法对优化问题进行求解.

2.1 经济性指标

在负荷频率控制过程中,为了尽可能提高运行过
 程中的经济性能,应考虑负荷频率调节成本、燃料消
 耗成本以及风力发电成本这3组经济性指标.

2.1.1 负荷频率调节成本

对于互联电力系统而言,负荷的随机波动会造成
 频率 Δf_i 和联络线交换功率 $\Delta P_{tie,i}$ 变化. 当发生负荷
 扰动时,当务之急是将频率和联络线交换功率偏差调
 节至零. 负荷频率调节的成本函数^[22]可表示为

$$\begin{aligned} J_{r_i}(x_i(t), u_i(t)) = \\ \Delta f_i(t) \alpha_i \Delta f_i(t) + \Delta P_{tie,i}(t) \beta_i \Delta P_{tie,i}(t), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 α_i 和 β_i 为权重系数.

2.1.2 燃料消耗成本

对于传统机组而言,其经济运行的目标就是用更
 低的燃料消耗来满足各区域的负荷需求. 传统机组
 的燃料消耗成本通常采用发电机功率偏移的二次函
 数形式^[22-23],其具体表达式为

$$J_{g_i}(x_i(t), u_i(t)) = a_i \Delta P_{g_i}^2(t) + b_i |\Delta P_{g_i}(t)| + c_i, \quad (13)$$

其中 a_i 、 b_i 和 c_i ($a_i > 0, b_i \leq a_i, c_i \geq 0$) 为传统机组功
 率偏移的成本系数.

2.1.3 风电机组成本

风机的机械磨损是影响风电机组经济成本的主
 要因素. 面对外界的负荷扰动,风机需要通过改变桨
 距角来调节功率,这一操作导致其偏离初始机械扭
 矩而产生额外的扭矩,进而增加风电机组的机械磨

损. 因此,风力发电成本函数^[24]可表示为

$$\begin{aligned} J_{w_i}(x_i(t), u_i(t)) = w_i |\Delta P_{w_i}(t)| = \\ w_i |X_{3,i} \omega_{opt_i} \Delta i_{qr_i}(t)|, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 w_i 为风电机组功率偏移的成本系数.

由于火力发电具有灵活性强、可靠性高等特点,
 可以灵活地应对电力系统中出现的负荷波动,同时保
 持系统频率的稳定. 考虑到风电的波动性和随机性,
 风电机组不能像传统机组一样稳定,只能在短时间
 内为系统提供有功支持,从而减少火电机组参与负
 荷调频的压力. 因此,风电场只能提供短期的功率
 支持,长时间的功率支持需要由火电机组完成^[13].

由于式(12)~(14)这3个成本函数并非同一量
 纲,这里对这3个成本函数进行标么化处理,弱化了
 成本函数间量纲差异. 结合式(12)~(14),通过选
 取不同大小的权重系数 R_{g_i} 和 R_{w_i} ,定义总成本
 函数为

$$\begin{aligned} J_i(x_i(t), u_i(t)) = \\ J_{r_i}(x_i(t), u_i(t)) + R_{g_i} J_{g_i}(x_i(t), u_i(t)) + \\ R_{w_i} J_{w_i}(x_i(t), u_i(t)). \end{aligned} \quad (15)$$

R_{g_i} 和 R_{w_i} 的大小取决于目标函数中对应项的
 重要性,与 R_{g_i} 相比,应选取较大的权重系数 R_{w_i} ,
 这样即可保证在负荷扰动出现时,遵循传统火力发
 电优先、风力发电配合的原则^[13].

2.2 DEMPC控制器设计

多区域互联电力系统的DEMPC结构示意图如图
 3所示,其中,每个子系统均能独立地求解本地优
 化问题.



图3 多区域电力系统分布式经济预测控制结构

假设电力系统中的负荷扰动可测. 这里定义
 $(x_s, u_s) \triangleq (\text{col}_{i \in M}(x_{i,s}), \text{col}_{i \in M}(u_{i,s}))$ 为整个互联电
 力系统的最优经济平衡点,该点满足

$$\begin{aligned} \min_{\bar{x}, \bar{u}} \sum_{i=1}^M J_i(x_i, \bar{u}_i); \\ \text{s.t. } \dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t) + Fd(t), \\ \bar{x}(t) \in X, \bar{u}(t) \in U. \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $X \in \mathbb{R}^{5M}$ 和 $U \in \mathbb{R}^{2M}$ 表示整个系统的约束集, 且 (x_s, u_s) 为其内点.

在 $\tau \in [t_k, t_k + T_p]$ 时段, 子系统 $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ ($j \neq i$) 的状态估计值 $\hat{x}_j(\tau; t_k)$ 可以表示为

$$\hat{x}_j(\tau; t_k) = \begin{cases} \bar{x}_j^*(\tau; t_{k-1}), & \tau \in [t_k, t_{k-1} + T_p]; \\ x_{j,s}, & \tau \in [t_{k-1} + T_p, t_k + T_p]. \end{cases}$$

其中: t_k 为采样时刻, 满足 $t_k = k\delta$ ($k = 0, 1, \dots$); δ 为采样时间; $\bar{x}_j^*(\tau; t_{k-1})$ 为状态预测值.

为了计算DEMPC控制律, 在每个时刻求解如下开环优化问题:

$$\min_{\bar{u}_i(\cdot; t_k)} \int_{t_k}^{t_k + T_p} J_i(x_i(t_k), \bar{u}_i(\tau; t_k)) d\tau; \quad (17)$$

$$\text{s.t. } \dot{\bar{x}}_i(\tau; t_k) =$$

$$A_{ii}\bar{x}_i(\tau; t_k) + B_i\bar{u}_i(\tau; t_k) + F_id_i(\tau; t_k) + \sum_{j \neq i} A_{ij}\hat{x}_j(\tau; t_k), \quad (18a)$$

$$\bar{x}_i(t_k; t_k) = x_i(t_k), \quad (18b)$$

$$|\bar{x}_{i1}(\tau; t_k)| \leq 0.02, \quad (18c)$$

$$|\bar{u}_{i1}(\tau; t_k)| \leq 0.2, \quad (18d)$$

$$|\bar{u}_{i2}(\tau; t_k)| \leq 0.25, \tau \in [t_k, t_k + T_p]. \quad (18e)$$

其中: T_p 为预测时段; $\bar{u}_i(\cdot; t_k)$ 为预选的控制序列; 式(18a)和(18b)表示在控制器中用来预测未来动态的模型是以实际状态值 $x_i(t_k)$ 为初始条件的; 式(18c)~(18e)表示系统状态约束和控制约束. 这里, $\bar{u}_i(\cdot; t_k)$ 可预选为 $[\bar{u}_i^*(t_k; t_{k-1}), \dots, \bar{u}_i^*(t_{k-2} + T_p; t_{k-1}), \bar{u}_i^*(t_{k-2} + T_p; t_{k-1})]$, $\bar{u}_i^*(\cdot; t_{k-1})$ 为优化问题(17)在 t_{k-1} 时刻求得的最优解.

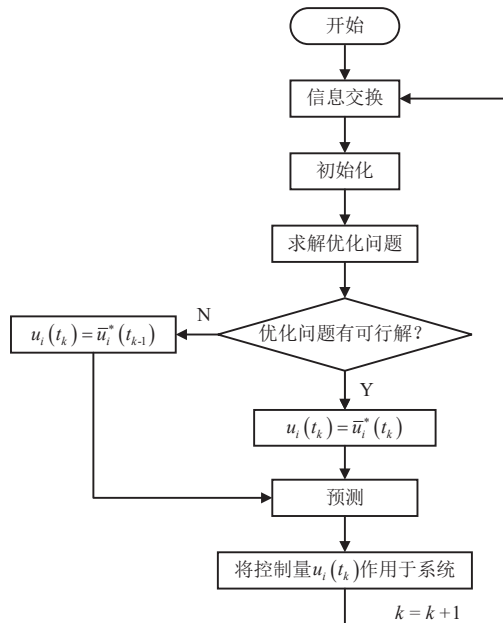


图4 DEMPC算法流程

DEMPC算法流程如图4所示, 具体步骤如下.

step 1: 信息交换. 各个子系统发送并接受来自其他区域的状态预测值 $\bar{x}_i^*(\tau; t_{k-1}), \tau \in [t_k, t_{k-1} + T_p]$.

step 2: 初始化. 在时刻 t_k , 令 $\bar{x}_i^*(t_k; t_k) = x_i(t_k)$.

step 3: 求解优化问题. 若优化问题(17)可行, 则 $u_i(t_k) = \bar{u}_i^*(t_k)$; 否则, 令 $u_i(t_k) = \bar{u}_i^*(t_{k-1})$.

step 4: 预测. 更新 $[t_{k+1}, t_k + T_p]$ 时段的状态预测值 $\bar{x}_i^*(\tau; t_k)$.

step 5: 执行. 将控制量 $u_i(t_k)$ 作用于系统, 同时令 $k = k + 1$, 进入下一轮循环.

3 仿真与分析

为验证所设计的DEMPC控制器的有效性, 本文以三区域互联电力系统为对象进行仿真, 具体结构如图5所示. 各区域所采用的火电机组和风电机组的额定容量分别为500 MW和400 MW(由200台额定功率为2 MW的DFIG组成). 选取采样时间为 $\delta = 1$ s, 控制时段为 $T_c = T_p = 12$ s, 权重系数分别为 $\alpha_i = 10^7$, $\beta_i = 10^5$, $R_{g_i} = 1$ 以及 $R_{w_i} = 5$. 另外, 三区域电力系统的模型参数如表1所示.

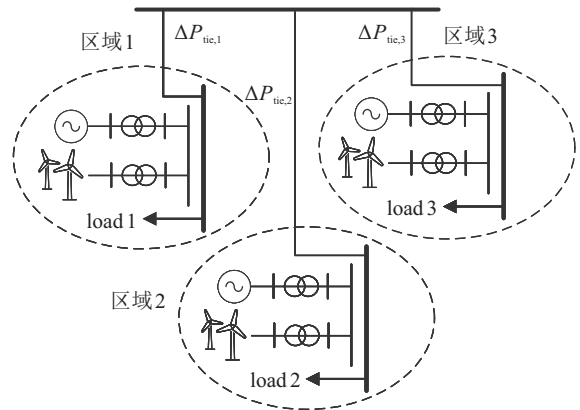


图5 含风电的三区域电力系统结构

表1 含风电的电力系统模型参数

系统	参数
火电机组	$\tau_{g_i} = 0.2$ s, $\tau_{t_i} = 0.3$ s, $R_i^f = 0.02$ Hz/p.u.
风电机组	$R_{r_i} = 0.005$ 52 p.u., $R_{s_i} = 0.004$ 9 p.u.
	$L_{s_i} = 0.092$ 73 p.u., $L_{m_i} = 3.965$ 4 p.u.
	$L_{r_{s_i}} = 0.1$ p.u., $\omega_{opt_i} = 1.17$ p.u.
LFC 系统	$M_{t_i} = 25$ p.u.s, $D_{t_i} = 0.5$ p.u./Hz
	$T_{12} = T_{21} = 0.2$ p.u.
	$T_{23} = T_{32} = 0.15$ p.u.
	$T_{13} = T_{31} = 0.25$ p.u.
	$a_i = 1, b_i = 0.03, c_i = 0, w_i = 0.1$.

3.1 阶跃扰动响应

本节对DEMPC控制器在阶跃负荷扰动下的扰动抑制性能进行评估, 并将该方法与decent-EMPC和cent-EMPC两个策略进行比较. 不同于DEMPC, cent-

EMPC将优化问题集中到一个控制器中控制。

假设在 $t = 5\text{ s}$ 时,对区域2施加 0.05 p.u. 的负荷扰动,上述3种控制器作用下的系统响应结果如图6所示。其中,图6(f)第2幅图中的点线表示风电机组的控制输入约束。从图6(d)和图6(c)可以看出,风电机组的输出功率偏差收敛至零,区域2的发电机输出功率偏差 ΔP_{g_2} 最终趋于 0.05 p.u. ,这表明由负荷扰动引起的供需不平衡最终是由火电机组的输出功率来弥补的。从图6(a)、图6(e)以及图6(f)可以看出,无论是

DEMPC控制器还是其他两种控制方法都能够保证状态约束和输入约束,且能将系统频率偏差 Δf_i 以及联络线交换功率 ΔP_{ie_i} 调节至零,如图6(a)和图6(b)所示。但是,每个 decent-EMPC 控制器仅考虑各自子系统的变量,忽略了相邻子系统间的耦合关系。如图6所示: decent-EMPC 控制作用下的系统频率偏差 Δf_i 的超调量明显大于另外两种控制方法;而 DEMPC 方法在负荷阶跃扰动下的调频能力与 cent-EMPC 较为相近,这两种控制策略都能够在考虑相邻子系统间耦

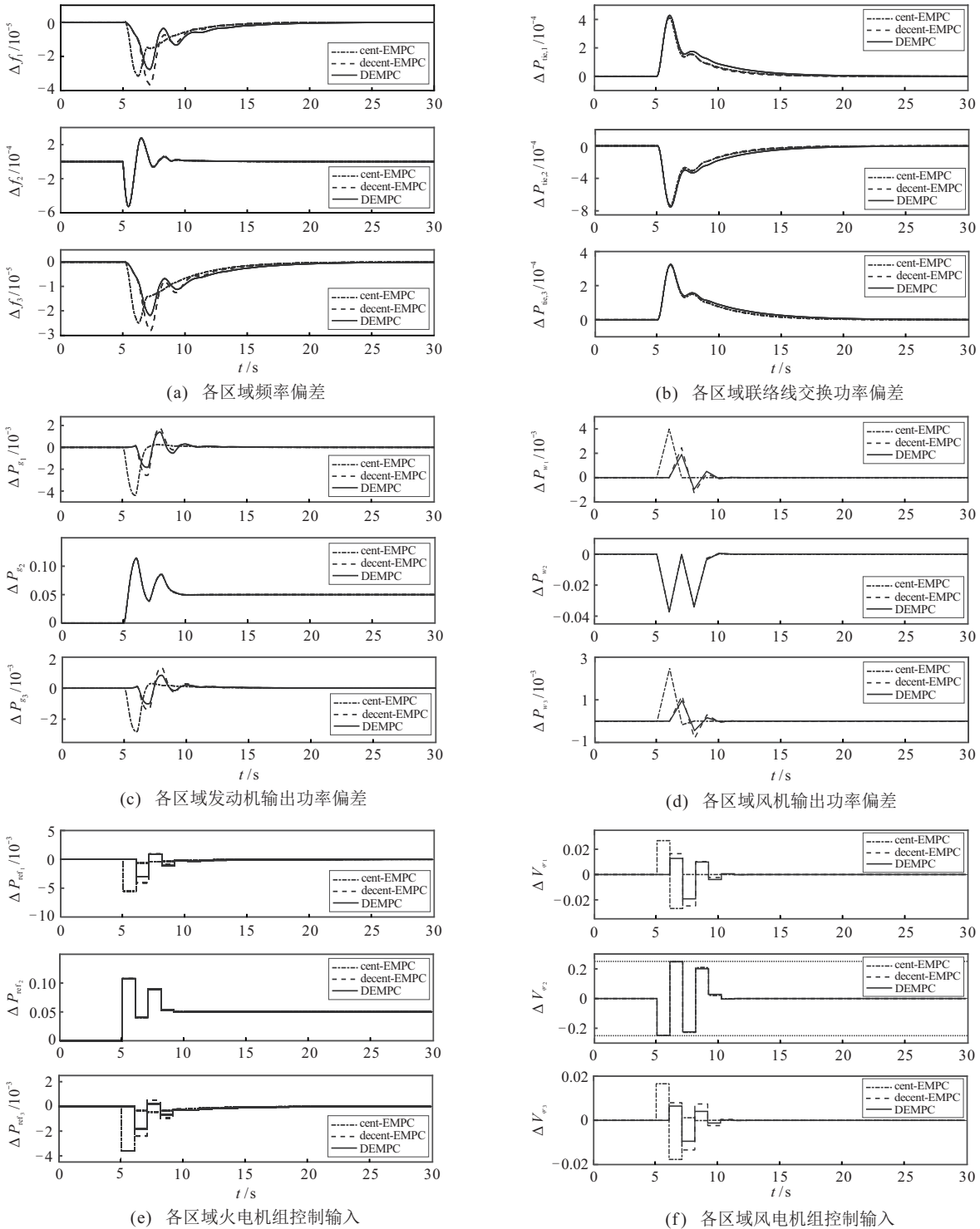


图6 阶跃负荷扰动下的系统响应结果

合作用的同时,使系统频率偏差 Δf_i 以较小的波动幅度被驱动到零.

3.2 计算性能分析

本节分别计算DEMPC、decent-EMPC以及cent-EMPC这3种控制器的在线求解时间.通过对不同区域施加不同的阶跃负荷扰动,将3种控制策略的在线计算时间总结于表2.除负荷扰动外,其余的仿

真参数均相同.由表2分析可知:cent-EMPC策略的在线计算时间远长于另外两个,在相同场景下,cent-EMPC控制器的求解时间基本上是DEMPC的5倍多;而DEMPC和decent-EMPC这两个控制器的在线计算时间几乎相同.这是因为后两者策略为每个子系统都设计了控制器,通过这些控制器求解各自优化问题,大大缩短了在线计算时间.

表2 在线计算时间与经济性性能指标的比较

负载阶跃扰动 /p.u.			在线计算时间 /s			经济性性能指标 E_{eco}			
区域1	区域2	区域3	DEMPC	decent-EMPC	cent-EMPC	DEMPC	decent-EMPC	cent-EMPC	DMPC
0.05	0.05	—	3 714	3 938	21 102	0.305 2	0.305 7	0.305 1	0.322 6
0.05	—	0.05	3 985	4 184	23 590	0.304 3	0.304 6	0.301 0	0.320 9
—	0.05	0.05	4 094	3 796	21 401	0.306 2	0.306 7	0.306 2	0.328 2
0.1	0.1	—	4 036	3 976	21 967	0.796 1	0.802 9	0.795 3	0.840 3
0.1	—	0.1	3 876	4 231	22 485	0.797 0	0.803 6	0.794 7	0.845 4
—	0.1	0.1	4 187	3 995	22 810	0.794 2	0.802 4	0.796 8	0.834 6

3.3 经济性性能分析

为验证本文所设计的DEMPC方法在经济性能方面的优势,将DEMPC、decent-EMPC以及cent-EMPC三种EMPC控制方法与DMPC策略进行对比.

这里的DMPC开环优化问题可描述如下:

$$\begin{aligned} \min_{\bar{u}_i(\cdot; t_k)} \int_{t_k}^{t_k+T_p} (\|\bar{x}_i(\tau; t_k)\|_{Q_i}^2 + \|\bar{u}_i(\tau; t_k)\|_{R_i}^2) d\tau; \\ \text{s.t. 式(18)}. \end{aligned} \tag{19}$$

其中 Q_i 和 R_i 为相应的正定对称加权矩阵.

为了定量比较互联电力系统在负荷频率控制过程的经济性能,定义总经济性性能指标 E_{eco} 为

$$E_{eco} = \sum_{i=1}^M \left(\int_0^{T_{sim}} (R_{g_i} J_{g_i}(\tau) + R_{w_i} J_{w_i}(\tau)) d\tau \right), \tag{20}$$

其中 T_{sim} 为仿真时间. E_{eco} 值越小则经济性性能越好.

这4种控制策略在不同负荷扰动下的经济性性能指标 E_{eco} 如表2所示.在相同场景下,前3种经济模型预测控制方法表现出明显的优势,而DMPC的经济性能则逊色很多.这是由于在阶跃负荷扰动的作用下,DMPC策略仅负责将系统频率偏差 Δf_i 以及联络线交换功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 调节至零;而包括DEMPC在内的前3种EMPC策略在此基础上还将经济性性能考虑在内,有效提高了能源利用率,降低了经济成本.

3.4 鲁棒性分析

为了分析所提出方法在参数不确定性情况下的鲁棒性,假设以下两种情况:

情况1 $\tau_{t_1} = \tau_{t_2} = \tau_{t_3} = 0.345 \text{ s} (\cong +15\%)$,

$\tau_{g_1} = \tau_{g_2} = \tau_{g_3} = 0.23 \text{ s} (\cong +15\%)$.

情况2 $\tau_{t_1} = \tau_{t_2} = \tau_{t_3} = 0.255 \text{ s} (\cong -15\%)$,

$\tau_{g_1} = \tau_{g_2} = \tau_{g_3} = 0.17 \text{ s} (\cong -15\%)$.

假设在 $t = 5 \text{ s}$ 时向区域1施加0.1 p.u.的阶跃负荷扰动,图7给出了参数不确定性情况下的系统响应结果.图7(f)第2幅图中的点线表示风电机组的控制输入约束.从图7(d)和图7(c)不难看出,风电机组的输出功率偏差收敛至零,区域1的发电机输出功率偏差 ΔP_{g_1} 最终趋于0.1 p.u.如图7(a)和图7(b)以及图7(e)和图7(f)所示,即使在汽轮机和调速器时间常数偏离标称值 $\pm 15\%$ 的情况下,DEMPC控制器在保证约束的同时,也实现了互联电力系统的负荷频率控制,并将系统频率偏差 Δf_i 和联络线交换功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 调节至零.

4 结论

本文针对风电介入下的多区域互联电力系统,提出了一种基于DEMPC的负荷频率控制方法.该方法将燃料消耗成本、风力发电成本以及频率调节成本等经济性性能指标纳入目标成本函数中,通过最小化目标函数,实现了多区域电力系统的负荷频率控制.仿真结果表明,当负荷阶跃扰动发生时,DEMPC控制器可以基于火力发电优先、风力发电配合的原则,在保证状态约束和控制输入约束的同时,将系统频率偏差 Δf_i 以及联络线交换功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 稳定至零,且在应对电力系统中存在参数不确定性时具备较好的鲁棒性.此外,本文所设计的DEMPC方法还可以有效地降低计算负担,提高经济性性能.

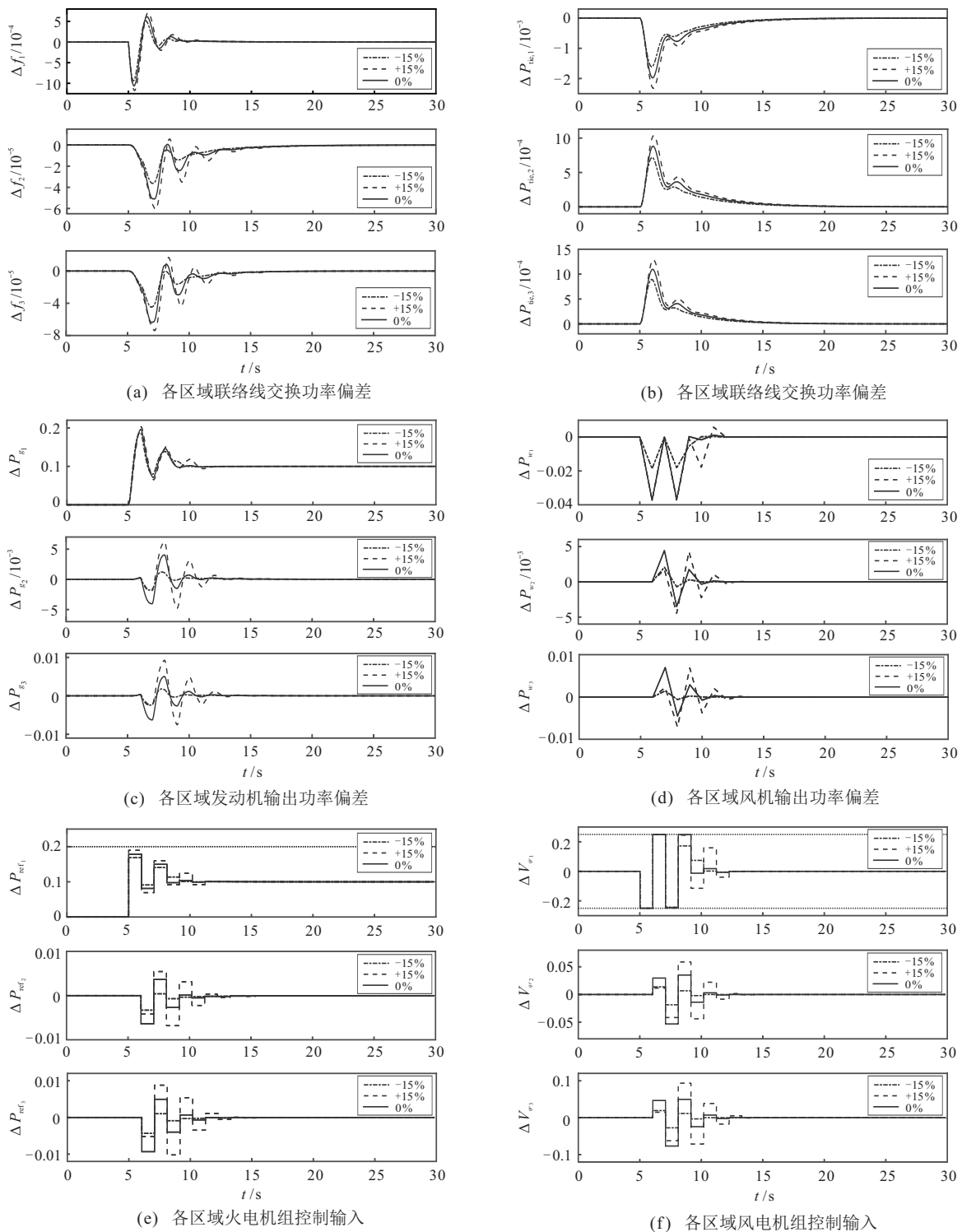


图7 参数不确定性情况下的系统响应结果

参考文献(References)

[1] Chen X, Zhao C H, Li N. Distributed automatic load frequency control with optimality in power systems[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8(1): 307-318.

[2] 米阳, 吴晓, 楚瀛, 等. 基于滑模控制的单域电力系统负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1881-1884.

(Mi Y, Wu X, Chu Y, et al. Load frequency control for

one area power systems based on sliding mode control[J]. Control and Decision, 2012, 27(12): 1881-1884.)

[3] 王锐, 张彦, 王冬, 等. 基于随机模型预测控制的含大规模风电接入的电力系统优化调度[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1616-1625.

(Wang R, Zhang Y, Wang D, et al. Optimization and scheduling of power system stochastic model predictive control based optimization and scheduling for power system with large scale wind integrated[J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1616-1625.)

- [4] Magdy G, Mohamed E A, Shabib G, et al. SMES based a new PID controller for frequency stability of a real hybrid power system considering high wind power penetration[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(11): 1304-1313.
- [5] Hasanien H M, El-Fergany A A. Symbiotic organisms search algorithm for automatic generation control of interconnected power systems including wind farms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(7): 1692-1700.
- [6] Bevrani H, Daneshmand P R. Fuzzy logic-based load-frequency control concerning high penetration of wind turbines[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 173-180.
- [7] Kazemi Golkhandan R, Torkaman H, Aghaebrahimi M R, et al. Load frequency control of smart isolated power grids with high wind farm penetrations[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(7): 1228-1238.
- [8] Wang C S, Mi Y, Fu Y, et al. Frequency control of an isolated micro-grid using double sliding mode controllers and disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 923-930.
- [9] Mi Y, Hao X Z, Liu H Y, et al. Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 437-444.
- [10] Shiroei M, Ranjbar A M, Amraee T. A functional model predictive control approach for power system load frequency control considering generation rate constraint[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23(2): 214-229.
- [11] 杨德友, 蔡国伟. 含规模化风电场/群的互联电网负荷频率广域分散预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 583-591.
(Yang D Y, Cai G W. Decentralized model predictive control based load frequency control for high wind power penetrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 583-591.)
- [12] Mohamed T H, Morel J, Bevrani H, et al. Decentralized model predictive-based load-frequency control in an interconnected power system concerning wind turbines[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2012, 7(5): 487-494.
- [13] Yao Q. Research on optimal control of active power dispatching and frequency support in wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 87-88.
- [14] Ma M M, Liu X J, Zhang C Y. LFC for multi-area interconnected power system concerning wind turbines based on DMPC[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2689-2696.
- [15] 王青松, 何德峰, 韩平. 约束非线性系统输入到状态稳定经济型模型预测控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1137-1144.
(Wang Q S, He D F, Han P. Input-to-state stabilizing economic model predictive control of constrained nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1137-1144.)
- [16] Zanon M, Gros S, Diehl M. A Lyapunov function for periodic economic optimizing model predictive control[C]. The 52nd IEEE Conference on Decision and Control. Firenze, 2014: 5107-5112.
- [17] Liu J Z, Yao Q, Hu Y. Model predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power[J]. Energy, 2019, 172: 555-565.
- [18] Morel J, Bevrani H, Ishii T, et al. A robust control approach for primary frequency regulation through variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2010, 130(11): 1002-1009.
- [19] Mohamed T H, Morel J, Bevrani H, et al. Model predictive based load frequency control design concerning wind turbines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 859-867.
- [20] 姚伟, 文劲宇, 孙海顺, 等. 考虑通信延迟的分散网络化预测负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 84-92.
(Yao W, Wen J Y, Sun H S, et al. Decentralized networked predictive load frequency control considering communication delays[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 84-92.)
- [21] Jia Y B, Meng K, Wu K, et al. Optimal load frequency control for networked power systems based on distributed economic MPC[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(4): 2123-2133.
- [22] Hu Z J, Liu S C, Luo W S, et al. Intrusion-detector-dependent distributed economic model predictive control for load frequency regulation with PEVs under cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(9): 3857-3868.
- [23] Shi X L, Wen G H, Cao J D, et al. Model predictive power dispatch and control with price-elastic load in energy Internet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1775-1787.
- [24] Le J, Liao X B, Zhang Y T, et al. Review and prospect on distributed model predictive control method for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 179-191.

作者简介

马苗苗(1982—), 女, 教授, 博士生导师, 从事先进控制理论及应用、新能源电力系统建模及优化控制等研究, E-mail: mamm@ncepu.edu.cn;

崔婧(1998—), 女, 硕士生, 从事经济模型预测控制的研究, E-mail: cuijing0224@163.com;

李钰梅(1998—), 女, 硕士生, 从事模型预测控制、事件触发控制等研究, E-mail: 15910981196@163.com;

刘向杰(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性模型预测控制、新能源电力系统数据建模与优化控制等研究, E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn.