

考虑参数不确定性的新型电力系统分布式模型 预测 AGC 方法研究

李忠文¹, 李夏乐¹, 柏宁宁¹, 程志平¹, 刘晓宇²

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 随着新能源渗透率不断提高, 新型电力系统转动惯量降低和参数波动性提高等特征越来越突出, 若仅依靠传统调频资源将会出现调频能力不足的问题。电力电子化调频资源具有更快的响应速度, 这为实现新型电力系统快速调频提供了一种机遇。因此, 提出一种电力电子化分布式调频资源与传统旋转机组协同调频方案。然而, 电力电子化机组分布式特征明显, 并且随着系统中新能源渗透率的波动, 系统惯量及频率响应特性也会随之改变。为此, 考虑参数不确定性, 设计了适应分布式异质多源协同调频的新型电力系统分布式模型预测自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 方法。所提分布式模型预测控制可以充分发挥快速调频资源的快速调频潜力, 迅速抑制系统频率波动。另外, 设计了一种在线事件触发参数辨识方法, 保证系统关键参数发生剧烈变化的情况下, 模型预测控制器能够及时更新系统参数进行精准预测控制。最后, 通过设计不同的场景进行仿真研究, 结果证实了所提方法能够有效提高系统调频性能, 并且达到期望的效果。

关键词: 新型电力系统; 自动发电控制; 快速调频资源; 分布式模型预测控制; 在线事件触发参数辨识

Distributed model prediction AGC method for new power systems considering parameter uncertainty

LI Zhongwen¹, LI Xiaole¹, BAI Ningning¹, CHENG Zhiping¹, LIU Xiaoyu²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With the continuously increasing penetration of renewable energy, new power systems are increasingly characterized by reduced rotational inertia and heightened parameter variability. Relying solely on traditional frequency regulation resources may therefore lead to insufficient frequency control capability. Power-electronic-based frequency regulation resources offer much faster response speeds, providing an opportunity to realize rapid frequency regulation in new power systems. Accordingly, this paper proposes a coordinated frequency regulation strategy combining power-electronic-based distributed frequency regulation resources with conventional synchronous generators. However, power-electronics-based units exhibit pronounced distributed characteristics, and as renewable energy penetration fluctuates, system inertia and frequency response characteristics also change accordingly. To address these issues, a novel distributed model predictive automatic generation control (AGC) strategy for new power systems is developed, which accommodates parameter uncertainty and is suitable for distributed, heterogeneous, multi-source coordinated frequency regulation. The proposed distributed model predictive control strategy can fully exploit the fast frequency regulation potential of rapid-response resources, enabling prompt suppression of system frequency fluctuations. Moreover, an online event-triggered parameter identification method is designed to ensure that, when key system parameters undergo significant changes, the model predictive controller can timely update system parameters to achieve accurate predictive control. Finally, simulation studies under various scenarios demonstrate that the proposed method significantly enhances frequency regulation performance and achieves the expected outcomes.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 62273312).

Key words: new power system; automatic generation control; fast frequency regulation resources; distributed model predictive control; online event-triggered parameter identification

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (62273312); 河南省优秀青年科学基金项目资助 (232300421094); 中原科技创新青年拔尖人才项目资助; 郑州大学博士后科学基金项目资助 (22120016)

0 引言

以新能源为主体的新型电力系统是我国落实“双碳”目标的重要载体,通过接入大规模清洁、高效的分布式发电机组(distributed generator, DG),能有效支撑我国高质量发展的电力需求^[1-4]。然而,随着风力(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic, PV)发电等电力电子化电源的渗透率逐年提高,新型电力系统自动发电控制(automatic generation control, AGC)需应对以下严峻挑战:1)通过电力电子器件并网的新能源机组降低了系统的转动惯量,使得系统频率稳定更易受到外部扰动影响,需要 AGC 机组提供快速频率响应服务以抑制频率波动;2)新能源机组多采用虚拟惯性控制方法参与系统调频,其低惯性、低阻尼特征使得系统综合惯性水平受其发电量占比影响,表现出较强的不确定性^[5-8]。因此,在以大量异质 DG 为主体的新型电力系统中,AGC 面临复杂性和协调性的巨大挑战,对于 AGC 的进一步研究势在必行。

当前,传统 AGC 方法在高渗透率可再生能源背景下面临以下问题和不足:1)随着可再生能源的渗透率逐渐提高,传统发电机组的容量占比逐渐降低,若仅依靠传统发电机组进行调频,无法满足系统稳定需求^[9-10];2)传统发电机组受自身结构影响,存在发电速率限制,无法提供快速频率响应服务^[11];3)WT、PV 和电池储能系统(battery energy storage system, BESS)等新能源机组响应速度快、没有发电速率限制、可快速调节出力以抑制频率波动,但传统的 AGC 方法限制了其快速调频能力。因此,传统的 AGC 方法难以解决大规模新能源并网所带来的问题,无法适应新型电力系统的发展趋势^[12]。为解决上述问题,已有众多学者对具备更优调频性能和更高稳定性的 AGC 方法展开了研究,以提升 AGC 在新型电力系统下的适应性和鲁棒性^[13]。

针对传统调频资源调频能力日益不足,难以满足系统频率稳定性问题,已有学者提出相关解决方法。文献[14]提出了一种基于虚拟同步机控制的可再生能源来参与 AGC 的方法,解决传统发电机组调频能力不足的问题。然而,该方法并未考虑到系统参数变化对于调频性能的影响。文献[15]针对风力发电机组在参与调频过程中需要频繁调节桨距角的问题,设计了一种自适应比例积分微分控制器。但其设计仅限于风电机组的控制,对于传统发电机组仍使用常规的积分控制器。文献[16]提出了一种改进的强化学习算法,但是前期需要进行大量的预学习,导致系统的计算负担较重。文献[17]提出了

一种分层控制方法,可在上层采用优化的线性二次调节器计算出下层 PI 控制器的最佳参考动作值,然而该算法控制结构较为复杂,且未考虑底层 PI 控制器的响应性能与实时性要求。

模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种处理非线性控制问题的有效方法,可分为集中式模型预测控制(centralized MPC, CMPC)和分布式模型预测控制(distributed MPC, DMPC)两大类,其具备控制性能优异、能够实现多目标优化、处理多变量约束等优点。因此, MPC 在近些年来被广泛应用于 AGC 系统,以提升 AGC 的调频性能。

CMPC 基于系统的全部状态信息集中式地计算出所有区域的 AGC 机组控制指令,具有结构简单和计算结果精确的优点。文献[18]提出了一种改进的 CMPC 方法,旨在减少模型的不确定性对于系统稳定性的影响。然而, CMPC 计算复杂度较高,且容易受单点故障的影响,从而降低了系统的可靠性。DMPC 通过在系统每个子控制区域设置独立的控制器进行区域自治控制,并且各控制器之间通过信息交互以实现分布式协调控制,在减轻控制器计算负担的同时提高系统的可靠性,有效弥补了 CMPC 的不足。因此, DMPC 在多区域互联系统 AGC 中展现出一定的应用前景。例如,文献[19]提出了一种基于 DMPC 的多区域互联电网分层 AGC 策略;文献[20]提出了一种混合储能辅助火力发电机组的 MPC 方法,以改善传统 AGC 方法的控制性能;文献[21]提出了一种考虑动态拓扑的分布式重构模型预测控制方法。但是上述方法均没有考虑到模型参数的时变性,在系统处于不同运行状态而引起模型参数变化时,将造成模型预测结果不准确,无法保证每个控制周期内控制决策的最优性。

为解决上述问题,本文提出了一种基于参数辨识的分布式模型预测控制(parameter estimation-based distributed model predictive control, PEDMPC)方法,具体可概括为以下两部分内容:1)为协调各机组出力并充分发挥快速调频机组的响应能力,以迅速抑制频率波动,本文设计了一种 DMPC 控制器,通过不断输出最优控制决策来有效协调异质调频机组参与调频;2)为减轻系统关键参数的时变性对 DMPC 控制器预测精度的影响,本文设计了一种在线事件触发参数辨识方法,对系统关键参数进行实时估计,并在参数波动较大时,将 DMPC 控制器的模型参数动态更新为真实值,保证参数变化时控制决策的最优性。最后,通过设计不同仿真场景进行仿真分析,验证了所提方法的有效性和可靠性。

1 AGC 模型及控制目标

1.1 异质 AGC 机组模型

为准确反映异质 AGC 机组的动态响应性能, 可以使用相应的等效动态响应模型来模拟出实际机组功率响应。由于异质 AGC 机组内部构造及发电技术等存在差异, 因此不同类型的发电机组适配不同的动态响应模型。如图 1 所示, 对于传统的火电机组, 其动态响应模型包括调速器汽轮机、发电斜坡约束(generation ramp constraint, GRC)、功率限制器。与传统发电机组不同, WT、PV 和 BESS 机组可通过电力电子设备快速改变发电功率, 因此不考虑 GRC 模块^[22]。此外, 不同类型的发电机组具有不同类型的传递函数 $G(s)$ 模型。

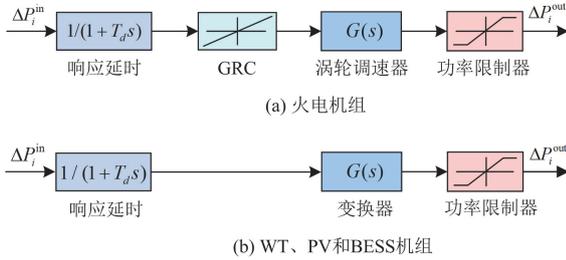


图 1 不同发电机组动态响应模型

Fig. 1 Dynamic response models of different generator units

传统的火电机组由调速器和汽轮机组成, 其传递函数可表示为^[19]

$$G_{CF}(s) = G_g(s)G_t(s) = \frac{1}{1+sT_g} \cdot \frac{1}{1+sT_t} \quad (1)$$

式中: $G_g(s)$ 和 $G_t(s)$ 分别为调速器和汽轮机的传递函数; T_g 和 T_t 分别为调速器和汽轮机的时间常数。

在电力系统 AGC 范畴内, 可采用一阶传递函数表示 WT、PV 和 BESS 机组频率响应模型^[23-24]。

$$G_{WT}(s) = \frac{1}{1+sT_w} \quad (2)$$

$$G_{PV}(s) = \frac{1}{1+sT_p} \quad (3)$$

$$G_{BESS}(s) = \frac{1}{1+sT_b} \quad (4)$$

式中: T_w 为风力发电机时间常数; T_p 为光伏发电机组时间常数; T_b 为电池储能系统时间常数。

1.2 传统 AGC 控制结构

图 2 为传统 AGC 的结构框图, 其供电侧主要由频率控制和机组响应两部分构成。其中频率控制包括基于频率-有功下垂的一次控制和基于 PI 控制

的二次控制。

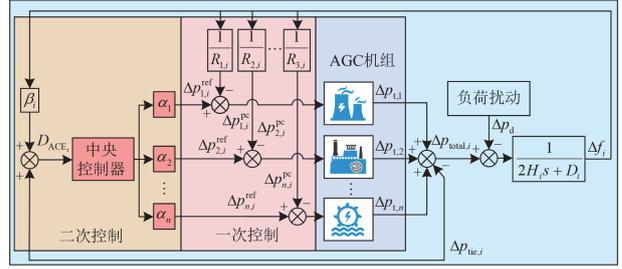


图 2 传统 AGC 结构框图

Fig. 2 Block diagram of conventional AGC structure

由图 2 可知, 区域 i 的第 n 个发电单元的一次控制可以表示为

$$\Delta p_{n,i}^{pc}(t) = \frac{1}{R_n} \Delta f_i(t) \quad (5)$$

式中: $\Delta p_{n,i}^{pc}(t)$ 和 R_n 分别为发电单元 n 的一次控制输出指令和下垂系数; $\Delta f_i(t)$ 为区域 i 在 t 时刻的频率偏差。

在 AGC 中, 区域控制偏差(area control error, ACE)作为控制器输入以调控各机组出力, 可以被定义为^[25]

$$D_{ACE_i}(t) = \beta_i \Delta f_i(t) + \Delta p_{tie,i}(t) \quad (6)$$

式中: β_i 、 $\Delta p_{tie,i}(t)$ 分别为区域 i 的频率偏差因子和联络线功率偏差。

由图 2 可知, 传统 AGC 将 ACE 作为集中式 PI 控制器的输入信号, 得到二次控制总的输出指令。

$$\Delta p_i^{sc}(t) = K_{P,i} D_{ACE_i}(t) + K_{I,i} \int_0^t D_{ACE_i}(\tau) d\tau \quad (7)$$

式中: $\Delta p_i^{sc}(t)$ 为区域 i 二次控制的总控制指令; $K_{P,i}$ 和 $K_{I,i}$ 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数。

区域 i 的第 n 个发电单元收到的控制指令为

$$\Delta p_{n,i}^{ref}(t) = \alpha_n \Delta p_i^{sc}(t) \quad (8)$$

式中: α_n 为第 n 个发电单元的功率分配系数, 由其容量和系统总容量的比值来确定。

传统的集中式 PI 控制结构虽然简单, 但存在以下缺点: 1) 中央控制器负责处理所有的通信和控制任务, 存在通信和计算负担过重的问题; 2) 中央控制器一旦发生故障, 将导致整个系统无法正常工作; 3) 所有发电机组都由一个 PI 控制器来调节出力, 限制了快速调频机组的响应能力, 难以应对新型电力系统的动态变化和外部扰动问题; 4) 随着用户侧对电力系统容量要求的不断提高, 发电机组的权重因子需要进行频繁调整, 存在扩展性较差的问题。

1.3 基于 PEDMPC 的 AGC 控制目标

为了解决传统 AGC 所存在的问题, 提高系统的

动态性能和稳定性, 本文提出了一种基于 PEDMPC 的 AGC 策略, 其结构框图如图 3 所示。该方法旨在实现以下目标。

- 1) 含有多种调频资源共同调频, 即使负荷侧发生大幅度扰动, 仍然具有足够的调频能力使系统恢复稳定, 解决传统调频资源调频能力日益不足的问题。
- 2) DMPC 控制器可根据输入状态变量计算出当前最优输出控制信号, 充分发挥快速调频机组的

快速调频潜力, 迅速调整机组出力, 实现对系统频率波动的快速抑制, 将有效减小系统最大频率偏差, 并且使系统更快地恢复稳定。

- 3) 当系统在不同运行状态下引起模型参数变化时, 在线参数辨识系统能够快速识别到模型参数真实值, 并在系统参数变化相对较大的情况下动态更新 DMPC 控制器模型参数。

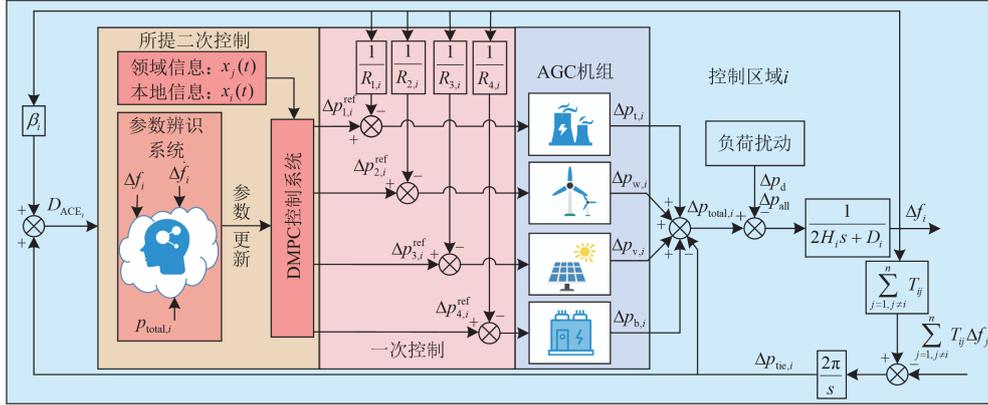


图 3 本文所提 AGC 结构框图

Fig. 3 Block diagram of the AGC structure proposed in this paper

2 分布式模型预测控制

为充分发挥异质调频机组的调频能力, 以进一步提高系统调频性能, 本节设计了一种基于 DMPC 的 AGC 方法。

2.1 区域互联系统频率控制模型

本文火电机组选用燃煤(coal-fired, CF)机组。在实际应用中, 由于响应延时环节的输出状态信息难以直接获取, 同时为了优化 DMPC 控制器的计算效率, 需对模型进行适当简化。考虑到响应延时环节的惯性时间常数显著大于调速器的惯性时间常数, 因此可将上述两个环节的模型等效为一个单阶惯性模型, 且其等效惯性时间常数与响应延时环节的时间常数近似相等。同理, 对 WT、PV 和 BESS 机组模型做出类似等效简化处理, 将其响应延时环节模型与调速器模型等效为一个单阶惯性模型。此时, 结合机组模型和图 3 可以推导出区域 i 的状态方程, 分别如式(9)一式(12)所示。

$$\Delta \dot{p}_{w,i} = -\frac{1}{T_{w,i}} \Delta p_{w,i} - \frac{1}{R_{2,i} T_{w,i}} \Delta f_i + \frac{1}{T_{w,i}} \Delta p_{2,i}^{ref} \quad (9)$$

$$\Delta \dot{p}_{v,i} = -\frac{1}{T_{v,i}} \Delta p_{v,i} - \frac{1}{R_{3,i} T_{v,i}} \Delta f_i + \frac{1}{T_{v,i}} \Delta p_{3,i}^{ref} \quad (10)$$

$$\Delta \dot{p}_{b,i} = -\frac{1}{T_{b,i}} \Delta p_{b,i} - \frac{1}{R_{4,i} T_{b,i}} \Delta f_i + \frac{1}{T_{b,i}} \Delta p_{4,i}^{ref} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{p}_{g,i} = -\frac{1}{T_{g,i}} \Delta p_{g,i} - \frac{1}{R_{1,i} T_{g,i}} \Delta f_i + \frac{1}{T_{g,i}} \Delta p_{1,i}^{ref} \\ \Delta \dot{p}_{t,i} = \frac{1}{T_{t,i}} \Delta p_{g,i} - \frac{1}{T_{t,i}} \Delta p_{t,i} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta p_{1,i}^{ref}$ 、 $\Delta p_{2,i}^{ref}$ 、 $\Delta p_{3,i}^{ref}$ 和 $\Delta p_{4,i}^{ref}$ 分别为 CF、WT、PV 和 BESS 机组的输出控制指令; $\Delta p_{g,i}$ 为 CF 机组的调速器出力偏差; $\Delta p_{t,i}$ 、 $\Delta p_{w,i}$ 、 $\Delta p_{v,i}$ 和 $\Delta p_{b,i}$ 分别为 CF、WT、PV 和 BESS 机组的输出功率偏差。

系统频率偏差变化率为

$$\Delta \dot{f}_i = \frac{1}{2H_i} (\Delta p_{t,i} + \Delta p_{w,i} + \Delta p_{v,i} + \Delta p_{b,i} - \Delta p_{d,i} - \Delta p_{tie,i}) - \frac{D_i}{2H_i} \Delta f_i \quad (13)$$

式中: $\Delta p_{d,i}$ 为区域 i 的负荷扰动; H_i 和 D_i 分别为区域 i 的等效惯性时间常数和等效阻尼系数。

系统间联络线功率变化率为

$$\Delta \dot{p}_{tie,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^n 2\pi T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (14)$$

式中: T_{ij} 为区域 i 和 j 之间的联络线同步系数。

为消除 D_{ACE_i} 的稳态误差, 引入一个附加变量, 即 D_{ACE_i} 的积分项 $\eta_i = \int D_{ACE_i} dt$, 此时可得状态方程如式(15)所示。

$$\dot{\eta}_i = D_{ACE_i} = \beta \Delta f_i + \Delta p_{tie,i} \quad (15)$$

2.2 区域互联系统状态空间模型

综合上述状态方程, 取区域 i 的状态向量为 $\mathbf{x}_i(t) = [\Delta p_{g,i}, \Delta p_{w,i}, \Delta p_{v,i}, \Delta p_{b,i}, \Delta p_{t,i}, \Delta f_i, \Delta p_{tie,i}, \eta_i]^T$ 、控制向量为 $\mathbf{u}_i(t) = [\Delta p_{1,i}^{ref}, \Delta p_{2,i}^{ref}, \Delta p_{3,i}^{ref}, \Delta p_{4,i}^{ref}]^T$ 、扰动向量为 $\mathbf{w}_i(t) = [\Delta p_{d,i}]^T$ 、输出向量为 $\mathbf{y}_i(t) = [D_{ACE_i}, \eta_i]^T$, 可建立多区域互联电力系统中区域 i 的状态空间模型如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{F}_i \mathbf{w}_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij} \mathbf{x}_j(t) \\ \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i(t) \end{cases} \quad (16)$$

其中:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{g,i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{1,i} T_{g,i}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{w,i}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{2,i} T_{w,i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{v,i}} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{3,i} T_{v,i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{b,i}} & 0 & -\frac{1}{R_{4,i} T_{b,i}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{t,i}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{t,i}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H_i} & \frac{1}{2H_i} & \frac{1}{2H_i} & \frac{1}{2H_i} & -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{1}{2H_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sum_{j=1, j \neq i}^n 2\pi T_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{g,i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{w,i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{v,i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{b,i}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2H_i} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{A}_i 、 \mathbf{B}_i 、 \mathbf{F}_i 和 \mathbf{C}_i 分别为区域 i 的状态矩阵、控制矩阵、扰动矩阵、输出矩阵; \mathbf{A}_{ij} 与 \mathbf{A}_i 的维数相同, 为相应的状态交互矩阵, 其第 7 行第 6 列的元素 $A_{ij}(7,6)$ 为 $-2\pi T_{ij}$, 其余元素全为 0。区域 i 通过与区域 j 进行信息交互, 获取其状态信息, 进而

实现区域间的协同控制。

通过欧拉法将式(16)所示的连续状态空间模型进行离散化, 可得

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{A}_{d,i} \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{B}_{d,i} \mathbf{u}_i(k) + \mathbf{F}_{d,i} \mathbf{w}_i(k) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{d,ij} \mathbf{x}_j(k) \\ \mathbf{y}_i(k) = \mathbf{C}_{d,i} \mathbf{x}_i(k) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{x}_i(k)$ 、 $\mathbf{u}_i(k)$ 、 $\mathbf{w}_i(k)$ 和 $\mathbf{y}_i(k)$ 分别为经过离散化处理后的状态向量、控制向量、扰动向量和输出向量; $\mathbf{A}_{d,i}$ 、 $\mathbf{B}_{d,i}$ 、 $\mathbf{F}_{d,i}$ 、 $\mathbf{C}_{d,i}$ 和 $\mathbf{A}_{d,ij}$ 分别为离散化处理后的相应矩阵。定义预测时域为 N_p , 控制时域为 N_c ($N_c \leq N_p$), 可建立如式(18)所示的扩展向量。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_i = [\mathbf{x}_i(k|k)^T, \mathbf{x}_i(k+1|k)^T, \dots, \mathbf{x}_i(k+N_p|k)^T]^T \\ \mathbf{U}_i = [\mathbf{u}_i(k|k)^T, \mathbf{u}_i(k+1|k)^T, \dots, \mathbf{u}_i(k+N_c-1|k)^T]^T \\ \mathbf{W}_i = [\mathbf{w}_i(k|k)^T, \mathbf{w}_i(k+1|k)^T, \dots, \mathbf{w}_i(k+N_p-1|k)^T]^T \\ \mathbf{X}_j = [\mathbf{x}_j(k|k)^T, \mathbf{x}_j(k+1|k)^T, \dots, \mathbf{x}_j(k+N_p-1|k)^T]^T \end{cases} \quad (18)$$

则可将式(17)变为式(19)所示扩展形式的离散状态空间模型。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_i = \bar{\mathbf{A}}_{d,i} \mathbf{x}_i(k|k) + \bar{\mathbf{B}}_{d,i} \mathbf{U}_i + \bar{\mathbf{F}}_{d,i} \mathbf{W}_i + \sum_{j \neq i} \bar{\mathbf{A}}_{d,ij} \mathbf{X}_j \\ \mathbf{Y}_i = \bar{\mathbf{C}}_{d,i} \mathbf{X}_i \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\bar{\mathbf{A}}_{d,i}$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_{d,i}$ 、 $\bar{\mathbf{F}}_{d,i}$ 、 $\bar{\mathbf{A}}_{d,ij}$ 和 $\bar{\mathbf{C}}_{d,i}$ 分别为扩展后的相应矩阵; \mathbf{Y}_i 为 $N_p \times 2$ 维列向量; \mathbf{U}_i 为 $N_c \times 4$ 维列向量。在任意 k 时刻, 需要求取从该时刻起的 N_c 个控制向量, 使得在其控制下被控模型的将来 N_p 个时刻的输出预测值趋于期望值, 因此 \mathbf{U}_i 为 DMPC 进行滚动优化过程的待求最优控制序列, 可通过优化目标函数求取, 并将其第一个元素作为控制器输出信号对当前时刻的系统进行控制。

2.3 滚动优化

为了使得输出变量达到期望值, 系统快速恢复稳定, 设计了阶段成本函数 \mathbf{L}_1 和终端惩罚函数 \mathbf{L}_2 , 如式(20)和式(21)所示。

$$\mathbf{L}_1 = \sum_{i=0}^{N_p-1} (\mathbf{y}(k+i|k)^T \mathbf{Q}_i \mathbf{y}(k+i|k) + \mathbf{u}(k+i|k)^T \mathbf{R}_i \mathbf{u}(k+i|k)) \quad (20)$$

$$\mathbf{L}_2 = \mathbf{y}(k+N_p|k)^T \mathbf{K}_i \mathbf{y}(k+N_p|k) \quad (21)$$

式中: $\mathbf{Q}_i = \text{diag}(q_{ACE}, q_\eta)$ 、 $\mathbf{R}_i = \text{diag}(r_c, r_w, r_v, r_b)$ 和 $\mathbf{K}_i = \text{diag}(k_{ACE}, k_\eta)$ 分别为相应对角加权系数矩阵。

由式(20)和式(21)可得目标函数为

$$\min J_u(k) = L_1 + L_2 = X_i^T \bar{C}_d^T \bar{Q} \bar{C}_d X_i + U_i^T \bar{R} U_i \quad (22)$$

在 k 时刻, DMPC 控制器通过求解目标函数式(22)来获得 AGC 机组的最优控制序列。同时, 为考虑各机组调频能力限额, 需满足式(23)所示的约束条件。

$$\begin{cases} \Delta p_{rate,i}^{\min} \leq \Delta \dot{p}_{g,i} \leq \Delta p_{rate,i}^{\max} \\ \Delta p_{t,i}^{\min} \leq \Delta p_{t,i} \leq \Delta p_{t,i}^{\max} \\ \Delta p_{w,i}^{\min} \leq \Delta p_{w,i} \leq \Delta p_{w,i}^{\max} \\ \Delta p_{v,i}^{\min} \leq \Delta p_{v,i} \leq \Delta p_{v,i}^{\max} \\ \Delta p_{b,i}^{\min} \leq \Delta p_{b,i} \leq \Delta p_{b,i}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\Delta p_{rate,i}^{\max}$ 和 $\Delta p_{rate,i}^{\min}$ 分别为 CF 机组爬坡速率允许的最大值和最小值; $\Delta p_{t,i}^{\min}$ 、 $\Delta p_{w,i}^{\min}$ 、 $\Delta p_{v,i}^{\min}$ 和 $\Delta p_{b,i}^{\min}$ 分别为 CF、WT、PV 和 BESS 机组有功出力所允许的下限; $\Delta p_{t,i}^{\max}$ 、 $\Delta p_{w,i}^{\max}$ 、 $\Delta p_{v,i}^{\max}$ 和 $\Delta p_{b,i}^{\max}$ 分别为 CF、WT、PV 和 BESS 机组有功出力所允许的上限。

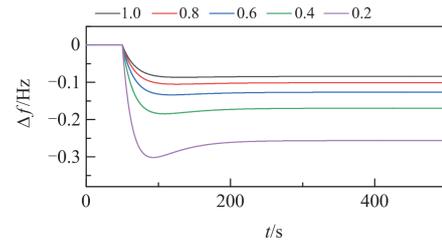
3 参数辨识

由于电力系统中的负荷类型复杂多变, 特别是在大规模集成换流设备之后, 系统的等效惯性时间常数 H 和等效阻尼系数 D 会随系统运行状态变化而变化, 因此, 本文将其定义为系统频率调节的关键参数^[26-27]。DMPC 依赖于系统状态空间模型进行预测控制, 当系统参数发生较大变化而 DMPC 未能及时调整时, 其控制性能将会受到显著影响。为确保关键参数变化较大时 DMPC 的有效性和系统的稳定性, 需要引入参数辨识系统对系统关键参数进行在线参数辨识, 并动态更新控制系统当中的关键参数值。

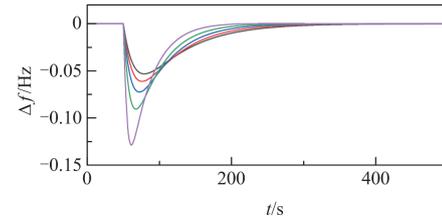
3.1 系统关键参数对调频的影响分析

假定一个单区域控制系统的参数 H 和 D 的基准值分别为 1000 和 100, 其负荷侧在 $t = 50$ s 时突增 10 MW 功率需求, 在不同频率调节关键参数标幺值下的频率偏差响应曲线如图 4 所示。

其中, 最大频率偏差与系统的惯性水平、一次调频能力和扰动大小相关。由图 4 可知, 在一次调频能力和扰动大小相同时, 随着系统等效惯性时间常数和等效阻尼系数减小, 在仅考虑一次调频的情况下, 系统的最大频率偏差和稳态频率偏差将会增大, 在同时考虑一次调频和二次调频的情况下, 系统的最大频率偏差会相应增大, 其恢复稳定所需时间减小。因此, 系统的等效惯性时间常数 H 和等效阻尼系数 D 作为系统频率调节关键参数, 直接影响着系统调频性能。



(a) 仅考虑一次调频



(b) 同时考虑一次调频和二次调频

图 4 不同关键参数标幺值下的频率偏差曲线

Fig. 4 Frequency deviation curves at different key parameter standardized values

3.2 参数辨识模型设计

根据上述分析, 为保证系统调频性能, 需要对系统的关键参数进行参数辨识。首先需要构建系统的参数辨识系统模型。其中, 系统传递函数的输入为 Δp_{all} , 输出为 Δf , 则可得系统参数辨识模型为

$$\Delta \dot{f} = \frac{1}{2H} \Delta p_{all} - \frac{D}{2H} \Delta f \quad (24)$$

其中:

$$\Delta p_{all} = \Delta p_{total} - \Delta p_d \quad (25)$$

式中: Δp_{total} 为各机组出力与区域间联络线出力之和的变化量。

由于在实际应用当中, 负荷扰动信息难以直接观测, 因此状态信息也难以直接获取, 为此, 将式(25)代入式(24)对系统参数辨识模型进行重构, 可得重构后的系统参数辨识模型如式(26)所示。

$$\Delta \dot{f} = \frac{1}{2H} \Delta p_{total} - \frac{D}{2H} \Delta f - \frac{1}{2H} \Delta p_d \quad (26)$$

状态信息 $\Delta \dot{f}$ 、 Δf 和 Δp_{total} 在实际应用当中可以观测获取。同时, 负荷扰动信息在短时间内基本保持不变, 可将其视为常量, 因此对式(26)化简可得

$$\Delta \dot{f} = a_1 \Delta p_{total} + a_2 \Delta f + b \quad (27)$$

式(27)可化简为

$$Y = XA \quad (28)$$

式中: $X = [\Delta p_{total}, \Delta f, 1]$ 为输入变量; $Y = [\Delta \dot{f}]$ 为输出变量; $A = [a_1, a_2, b]^T$ 为待辨识参数。

可采用最小二乘法计算求得参数向量 \hat{A} , 使得 $Y \approx X\hat{A}$, 结合式(28)和最小二乘法可列写如式(29)

所示的代价函数。

$$S(\hat{A}) = \left\| Y - X\hat{A} \right\|_2^2 = (Y - X\hat{A})^T (Y - X\hat{A}) = \hat{A}^T X^T X \hat{A} - \hat{A}^T X^T Y - Y^T X \hat{A} + Y^T Y \quad (29)$$

令式(29)代价函数值最小可求得系统待求参数。

$$\hat{A} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (30)$$

3.3 事件触发机制设计

通过系统状态的实时采样与通信, 可以获取进行参数辨识的必要数据。当参数辨识结果收敛后, 如果连续参数辨识周期内辨识结果变化较小, 则可以考虑终止进一步的辨识过程, 以降低系统状态采样、通信及计算成本。基于此设计了如式(31)所示的参数辨识终止条件。

$$S_{\text{late}} = \begin{cases} 1 & \frac{|\phi(m) - \phi(m-1)|}{\phi(m-1)} \leq \rho_1 \\ 0 & \frac{|\phi(m) - \phi(m-1)|}{\phi(m-1)} > \rho_1 \end{cases} \quad (31)$$

式中: $\phi(m)$ 为 m 时刻的参数辨识结果; ρ_1 为参数辨识终止条件的触发阈值。 S_{late} 为参数辨识状态变量, 当 $S_{\text{late}} = 1$, 表示参数辨识系统正在执行状态信息采样与参数辨识操作; 当 $S_{\text{late}} = 0$, 表示终止采样和参数辨识, 并且清空数据存储矩阵, 为下一次参数辨识做准备。

当系统关键参数变化相对较小时, 对 DMPC 控制器的计算结果基本不会产生显著影响。若此时仍进行模型参数的动态更新, 不仅会增加数据更新的负担, 还可能导致 DMPC 控制器在参数更新初期的迭代计算出现不必要的损失。为减少控制系统中不必要的参数更新, 本文设计了如式(32)所示的参数更新条件。

$$\frac{|\phi_{\text{pre}} - \phi_n|}{\phi_{\text{pre}}} \geq \rho_2 \quad (32)$$

式中: ϕ_{pre} 为参数辨识开始前控制系统当中设置的参数值; ϕ_n 为参数辨识结束时最终的参数辨识结果; ρ_2 为参数更新条件的触发阈值。若在线参数辨识触发参数辨识终止条件后, 各参数的辨识结果均满足式(32), 可对控制系统 DMPC 控制器的模型关键参数进行动态更新。

4 仿真分析

本节根据图 3 在 MATLAB/Simulink 搭建了两区域 AGC 系统, 并且设计了相应的仿真案例对所提 PEDMPC 方法进行了性能验证, 具体内容如下。首先, 在 4.1 节介绍了所搭建的两区域 AGC 系统并

进行了参数设计。然后, 在 4.2 节验证了所提参数辨识方法的可靠性。在 4.3 节验证了所设计参数更新条件的有效性。在 4.4 节对所提 PEDMPC 方法和集中式 PI 方法、分布式 PI 方法进行性能对比。在 4.5 节进一步验证了所提 PEDMPC 方法在长时间随机负荷扰动下的调频性能。最后, 在 4.6 节将本文所提 PEDMPC 方法和 DMPC 方法在参数变化情况下进行性能对比。

4.1 两区域 AGC 系统设计

结合图 3 在 MATLAB/Simulink 搭建两区域 AGC 系统进行仿真以对所提 AGC 方法进行性能验证。在该系统当中, 一共包含两个控制区域, 其中每个区域包含 4 种不同类型的 DG 调节出力参与 AGC, 分别为 CF、WT、PV 和 BESS 机组。为了方便进行对比分析, 两个区域的参数配置一致, 其中区域 1 各个 DG 的参数值如表 1 所示。其他系统参数分别设置为 $T_{12} = 0.86 \text{ MW/Hz}$, $\beta_1 = \beta_2 = 120 \text{ MW}$, $H_1 = H_2 = 1000 \text{ MW} \cdot \text{s/Hz}$, $D_1 = D_2 = 100 \text{ MW/Hz}$, AGC 的控制周期为 4 s。对于 DMPC 控制器, 其参数可设计为 $q_{\text{ACE}} = k_{\text{ACE}} = 0.012$, $q_\eta = k_\eta = 0.000063$, $r_c = 0.00021$, $r_w = 0.0044$, $r_v = 0.0062$, $r_b = 0.0032$, $N_p = N_c = 120$, 离散时间为 0.1 s, 基于配备 Intel Core i5-8400 处理器(2.8 GHz)和 16 GB 内存的硬件平台, 在 MATLAB R2023b 软件平台进行仿真测试, 测试结果表明: 单次控制决策的计算耗时为 0.146 s, 显著低于本文设置的 4 s 控制周期, 这一实测数据充分验证了所设计的 DMPC 控制器能够满足控制系统的实时性要求。对于参数辨识系统, 其采样周期为 0.05 s, 辨识周期为 0.5 s, 事件触发控制 1 的阈值 $\rho_1 = 0.002$, 事件触发控制 2 的阈值 $\rho_2 = 0.1$ 。

表 1 各 DG 参数值

Table 1 Parameter values for various DGs

机组	参数值
CF	$T_g = 60, T_i = 0.3, \Delta p_{c,\min} = -50 \text{ MW}, \Delta p_{c,\max} = 50 \text{ MW}$
WT	$T_w = 1, \Delta p_{w,\min} = -5 \text{ MW}, \Delta p_{w,\max} = 15 \text{ MW}$
PV	$T_p = 1, \Delta p_{p,\min} = -10 \text{ MW}, \Delta p_{p,\max} = 10 \text{ MW}$
BESS	$T_b = 1, \Delta p_{b,\min} = -20 \text{ MW}, \Delta p_{b,\max} = 20 \text{ MW}$

其中, 本文当中参数辨识系统和控制系统之间协同工作的流程框图如图 5 所示。

4.2 参数辨识终止条件有效性验证

为证实本文所设计的在线参数辨识算法及参数辨识终止条件的有效性, 通过设计仿真场景对其进行仿真验证。参数辨识前各参数初始值设置为 $H_1 = 1000 \text{ MW} \cdot \text{s/Hz}$, $D_1 = 100 \text{ MW/Hz}$, 假设区域

1 负荷侧发生图 6(c)所示的负荷扰动, 与此同时系统关键参数真实值分别发生如图 6(a)和图 6(b)所示的参数变化, 并设计以下两种场景进行仿真对比验证, 仿真结果如表 2 所示。

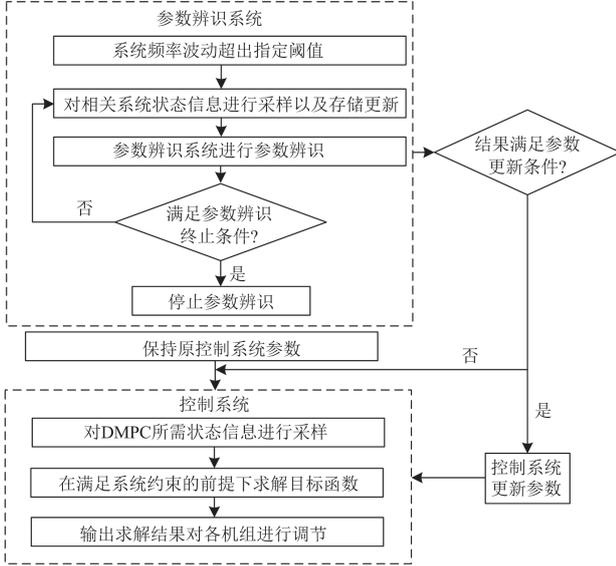


图 5 所提方法工作流程框图

Fig. 5 Block diagram of the workflow of the proposed method

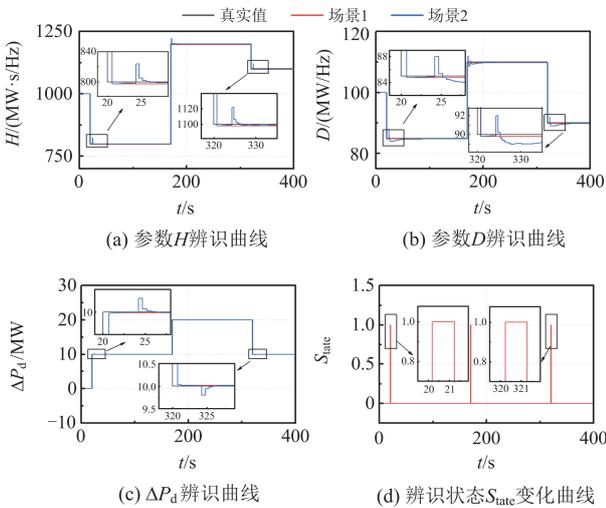


图 6 参数辨识终止条件仿真验证

Fig. 6 Simulation verification of the termination condition for parameter identification

表 2 参数辨识仿真验证结果

Table 2 Simulation verification results of the parameter identification

	$H_1/(MW \cdot s/Hz)$			$D_1/(MW/Hz)$		
真实值	800	1200	1100	85	110	90
预测值	798.0	1197.1	1097.9	84.75	109.69	89.79
偏差/%	0.25	0.24	0.19	0.29	0.28	0.23

场景 1: 在线参数辨识系统考虑了参数辨识终止条件。

场景 2: 在线参数辨识系统没有考虑参数辨识终止条件。

由图 6 可知, 系统响应负荷侧变化时参数辨识系统能够进行在线参数辨识, 并且场景 1 下的参数辨识系统可在参数辨识结果接近真实值后停止采样和参数辨识, 而场景 2 下的参数辨识系统此后仍然在进行参数辨识。此外, 由于系统后期稳定过程当中某些时刻的状态信息不能更加精确地逼近真实模型, 因此随着状态信息不断存储到数据矩阵当中, 场景 2 的参数辨识结果在后期出现了波动。由图 6(d)可知参数辨识系统用时小于 2 s 便可完成参数辨识, 并且为下一次参数辨识做好准备, 同时由表 2 可知, 最终的参数辨识结果与参数真实值基本一致, 其参数辨识误差可忽略不计。由此可知参数辨识系统能够在保证辨识结果准确性的前提下快速实现在线参数辨识, 同时也证实了参数辨识终止条件的有效性。

4.3 参数更新条件有效性验证

为验证本文所提参数更新事件触发控制的有效性, 假设区域 1 负荷侧发生图 7(c)所示的负荷扰动, 与此同时系统关键参数分别发生如图 7(a)和图 7(b)所示的参数变化, 并设计以下两种场景进行仿真对比验证, 仿真结果如图 7 所示。

场景 1: 在线参数辨识系统同时考虑参数辨识终止条件和参数更新条件。

场景 2: 在线参数辨识系统仅仅考虑参数辨识终止条件。

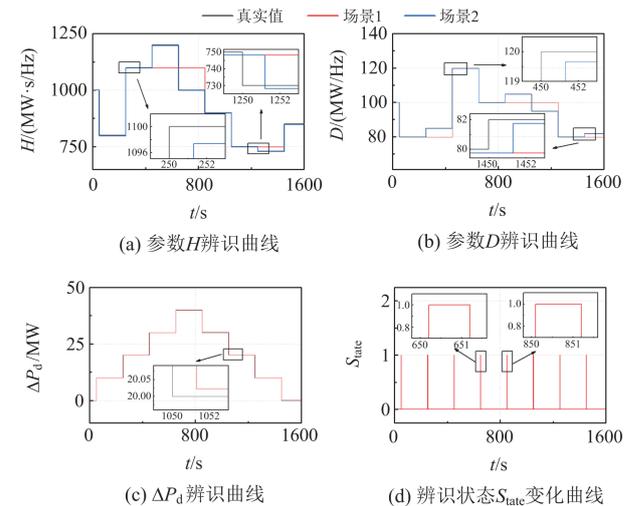


图 7 参数更新条件仿真验证

Fig. 7 Simulation verification of the parameter update condition

由图 7(d)的 S_{tate} 变化曲线可知, 系统每次均可迅速完成在线参数辨识。由图 7(c)可知, 在线参数

辨识系统能够快速且准确地追踪负荷变化。根据图 7(a)和图 7(b)可知, 每当参数系统辨识终止辨识时, 场景 2 下的控制系统都会将参数更新为其辨识结果。而在场景 1 下, 控制系统仅在当前关键参数值与辨识结果之间存在显著差异时, 才会进行参数更新, 从而有效避免了控制系统在参数变化较小的情况下进行频繁的参数更新, 减轻了控制系统参数更新负担。因此, 上述仿真结果证实了所设计的参数更新条件在应用中的有效性。

4.4 所提 PEDMPC 方法与其他方法的对比

为证实所提 PEDMPC 方法可显著提高系统控制性能, 将其与集中式 PI、分布式 PI 在相同条件下进行对比。假设两区域系统的负荷侧出现图 8(c)所示的连续阶跃负荷扰动, 区域 1 中不同控制方法下的仿真结果如图 8 所示, 区域 2 中不同控制方法下的仿真结果如图 9 所示, 其统计结果分别如表 3 和表 4 所示。其中, $|D_{ACE_1}|$ 和 $|D_{ACE_2}|$ 分别表示区域 1 和区域 2 的 ACE 信号绝对值, $|\Delta f_1|$ 和 $|\Delta f_2|$ 分别表示区域 1 和区域 2 的频率偏差绝对值, CPS1 为电网控制性能指标, 常用于评价系统的频率调控性能。

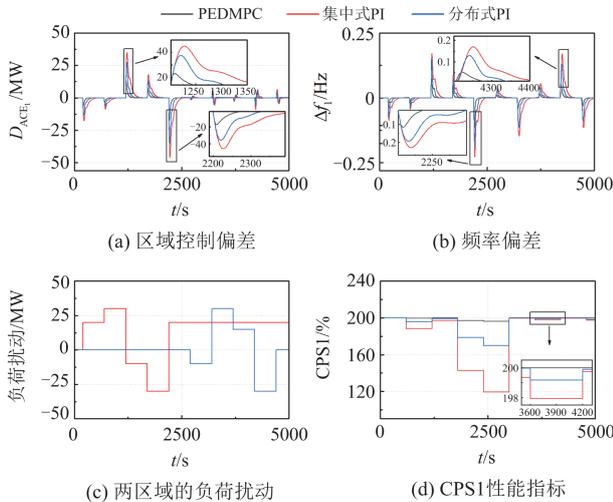


图 8 区域 1 所提方法与其他方法性能比较

Fig. 8 Performance comparison of the proposed method with other methods in area 1

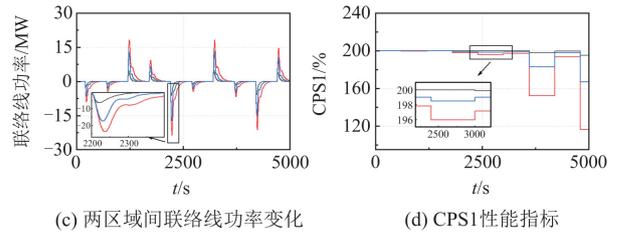
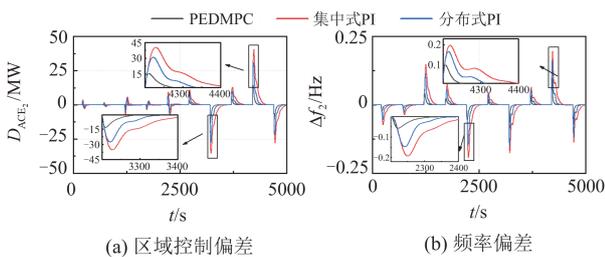


图 9 区域 2 所提方法与其他方法性能比较

Fig. 9 Performance comparison of the proposed method with other methods in area 2

表 3 区域 1 不同 AGC 方法的仿真结果

Table 3 Simulation results of different AGC methods in area 1

AGC 方法	$ D_{ACE_1} $ /MW		$ \Delta f_1 $ /Hz		CPS1/%	
	Max	Avg	Max	Avg	Min	Avg
PEDMPC	17.39	0.366	0.1149	0.0029	196.0	199.12
分布式 PI	35.77	1.259	0.1915	0.0089	169.7	193.22
集中式 PI	45.82	2.411	0.2269	0.0174	119.1	181.81

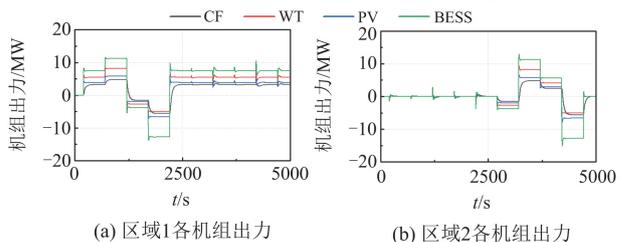
表 4 区域 2 不同 AGC 方法的仿真结果

Table 4 Simulation results of different AGC methods in area 2

AGC 方法	$ D_{ACE_2} $ /MW		$ \Delta f_2 $ /Hz		CPS1/%	
	Max	Avg	Max	Avg	Min	Avg
PEDMPC	15.26	0.366	0.1000	0.0029	195.2	199.32
分布式 PI	31.05	1.258	0.1665	0.0089	167.0	194.77
集中式 PI	40.45	2.407	0.1965	0.0174	116.3	186.18

由图 8 和图 9 可知, 本文所提方法可以有效抑制频率波动, 并使系统频率迅速恢复稳定。根据表 3 和表 4 的统计结果可知, 采用本文所提方法的区域控制系统的 $|D_{ACE}|$ 和 $|\Delta f|$ 的最大值以及均值在 3 种方法当中均为最小, 性能指标 CPS1 的最小值和均值均为最大。此外, 如图 10 所示, 在受到负荷扰动后, 快速调频机组能够迅速调节出力, 平抑负荷波动, 进一步验证了所提方法在频率调节中的有效性。

因此, 本文所提方法相较于集中式 PI 控制和分布式 PI 控制, 在调频性能方面具有显著优势。这是因为集中式 PI 控制当中的各机组功率分配系数是固定的, 且更多地依靠传统 CF 机组, 由于 CF 机组的机械结构限制了其调速器阀门变化, 无法快速的调节出力, 因此无法进行快速频率调节。对于分布式 PI 控制, 尽管能够根据 ACE 信号动态调整机组



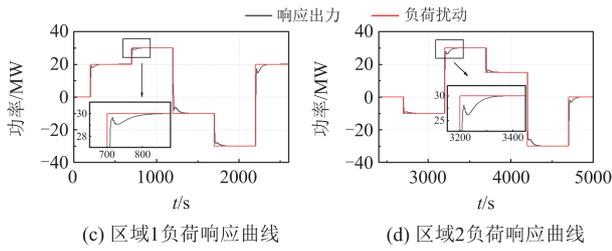


图 10 机组响应出力曲线

Fig. 10 Response output curve of the units

调频指令, 但是各机组 PI 控制器的控制律是固定的, 无法保证每一控制周期的输出控制信号是最优的。而本文所提方法可根据系统的实时状态信息进行动态调节, 计算出每一个控制周期的最优控制信号, 进而具有更高效的调频性能。

4.5 随机负荷扰动下控制性能验证

为验证本文所提 PEDMPC 方法在应对随机负荷波动时具有更为优异的调频性能, 本节整理了 CoSSMic 公司公布的德国南部某工厂分辨率为 1min 的长时间负荷数据, 并选取其中 4 h 数据生成如图 11(a)和图 11(b)所示的随机负荷波动曲线, 并将其分别施加到区域 1 和区域 2 的负荷侧进行仿真分析, 结果如图 11(c)和图 11(d)所示。

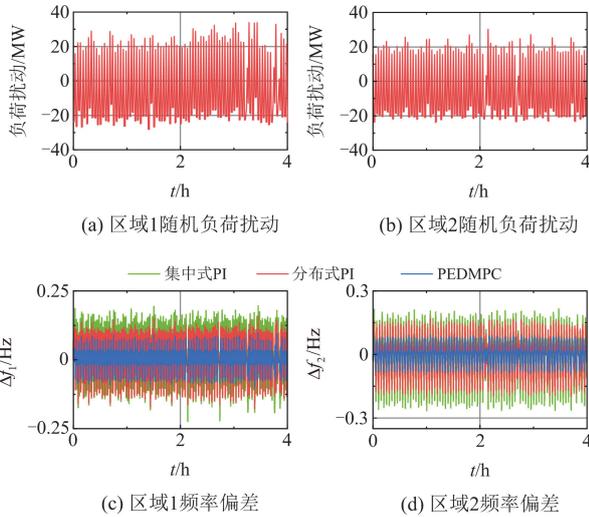


图 11 随机负荷扰动下控制性能验证

Fig. 11 Performance verification under random load disturbance

由图 11(a)和图 11(b)可知区域 1 和区域 2 的负荷扰动曲线具有显著的长时间随机性, 因此在其影响下两个区域的频率偏差变化曲线具有一定的随机性特征。如图 11(c)和图 11(d)所示, 尽管受到随机负荷波动影响, 系统采用 PEDMPC 方法时, 两区域的最大频率偏差仍在系统频率安全范围内, 有效地

保证了系统受到随机负荷扰动影响时的稳定性。同时, PEDMPC 方法的随机频率偏差分布相较于集中式 PI 控制方法和分布式 PI 控制方法更集中于 0 附近, 因此其具有更加优越的调频性能。综上所述, 本文所提 PEDMPC 方法能够更加有效地应对长时间随机负荷波动, 可显著提高系统控制性能。

4.6 所提 PEDMPC 方法与 DMPC 的对比

为充分验证本文所提 PEDMPC 方法在系统关键参数剧烈变化情况下可相对提高系统性能, 基于本文及文献[19]相关控制思想设计了未加入参数辨识的 DMPC 控制器进行仿真对比验证。假设两种方法相关控制器参数相同, 区域 1 负荷侧发生图 12(c)所示的连续阶跃扰动, 与此同时系统关键参数标幺值减小至 0.5。仿真结果如图 12 所示。

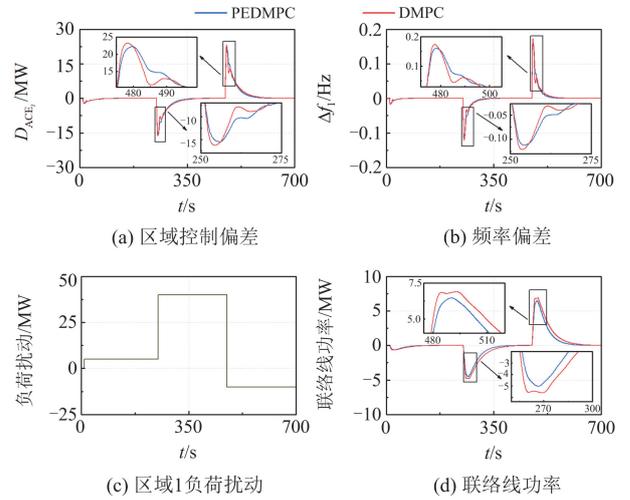


图 12 所提方法与 DMPC 性能比较

Fig. 12 Performance comparison of the proposed method with DMPC

由图 12 可知, 系统采用 PEDMPC 方法时, 其 ACE、频率偏差和联络线功率的波动幅值相对更小, 且可迅速恢复稳定, 具有更好的控制性能。同时, 在系统恢复稳定过程中, PEDMPC 的频率偏差曲线相较于未加入参数辨识的 DMPC 波动更小, 这是因为 DMPC 控制器在每一个控制周期的计算中采用参数变化之前的关键参数值, 而 PEDMPC 控制器计算时采用真实参数值, 其计算结果更加精确, 输出控制信号更优。综上所述, 与引言所述 DMPC 方法相比, 本文所提 PEDMPC 方法在系统关键参数不确定性较大的情况下具有更为优越的控制性能。

5 总结

本文提出了一种考虑参数不确定性的分布式模型预测 AGC 方法, 旨在解决传统 AGC 方法在新

型电力系统当中调频能力不足、无法充分发挥快速调频机组调频优势,以及在参数变化的情况下 DMPC 控制器无法输出最优控制决策的问题。为验证所提方法的有效性,本文设计了多种仿真场景对所提方法进行验证。结果表明本文所提 PEDMPC 方法能够充分发挥机组的快速调频能力,迅速响应负荷扰动,减小系统的频率波动。同时,本文所提在线事件触发参数辨识方法能够快速辨识出系统的关键参数,并且在系统参数变化较大时,及时更新控制系统中 DMPC 模型关键参数值,保证了系统的最优控制决策能力。

然而,在实际的调频市场中,不同调频机组的调频成本存在差异,而上述方法的研究重点聚焦于如何提高系统调频性能,并未对调频市场中异质调频机组成本函数的差异性予以考虑。因此,在后续的研究中,将对本文方法做出进一步优化改进,确保系统调频性能的同时尽可能降低调频成本,提高系统调频经济性。

参考文献

- [1] UDDIN M, MO H, DONG D, et al. Microgrids: a review, outstanding issues and future trends[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 49.
- [2] 李谟发, 张志文, 练红海, 等. 含双馈风电电力系统的采样负荷频率控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(2): 77-88.
LI Mofa, ZHANG Zhiwen, LIAN Honghai, et al. Sampling load frequency control of power systems with doubly-fed wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 77-88.
- [3] 陶劲宇, 秦川, 金宇清, 等. 面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(5): 168-187.
TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(5): 168-187.
- [4] 刘懿诗, 迟永宁, 刘超, 等. 计及送端风电调频能力的交直流混合电网频率紧急控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(8): 97-109.
LIU Yishi, CHI Yongning, LIU Chao, et al. Frequency emergency control strategy for AC/DC hybrid power grids considering frequency regulation capability of wind power at sending end[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(8): 97-109.
- [5] 关燕鹏, 李晓宁, 贾新春. 含可再生能源的多区域电力系统负荷频率控制[J]. *电力系统及其自动化*, 2022, 34(7): 64-71.
GUAN Yanpeng, LI Xiaoning, JIA Xinchun. Load frequency control of multi-area power system with renewable energy sources[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(7): 64-71.
- [6] 张磊, 马晓伟, 王满亮, 等. 互联新能源电力系统区内 AGC 机组分布式协同控制策略[J]. *中国电力*, 2025, 58(3): 8-19.
ZHANG Lei, MA Xiaowei, WANG Manliang, et al. Distributed collaborative control strategy for intra-regional AGC units in interconnected power system with renewable energy[J]. *Electric Power*, 2025, 58(3): 8-19.
- [7] 苏寅生, 刘蔚, 张野, 等. 面向高比例新能源并网的多智能体协同自动发电控制算法[J]. *高压电器*, 2025, 61(5): 80-92.
SU Yinsheng, LIU Wei, ZHANG Ye, et al. Multi-agent-cooperative automatic power generation control algorithm for high proportion of new energy grid connection[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(5): 80-92.
- [8] 杨桂兴, 郭小龙, 孙谊嫻, 等. 虚拟同步发电机频率偏差前馈阻尼控制策略的参数整定方法[J]. *高压电器*, 2024, 60(10): 46-53.
YANG Guixing, GUO Xiaolong, SUN Yiqian, et al. Parameter tuning method of frequency deviation feedforward based damping control strategy for virtual synchronous generator[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(10): 46-53.
- [9] LIU J, 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.
- [10] 叶林, 陈超宇, 张慈杭, 等. 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 participating in AGC based on distributed model predictive control[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3261-3270.
- [11] GBADEGA P A, SAHA A K. Load frequency control of a two-area power system with a stand-alone microgrid based on adaptive model predictive control[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(6): 7253-7263.
- [12] 席磊, 张乐, 黄悦华, 等. 基于贪婪策略的多层自动发电控制[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(16): 5204-5216.
XI Lei, ZHANG Le, HUANG Yuehua, et al. Multiple level automatic generation control based on the greedy strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(16): 5204-5216.

- [13] 邹屹东, 钱晶, 张文英, 等. 基于 CPSOGSA 算法的风-光-小水电微电网负荷频率最优 H_2/H_∞ 鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 42-51.
ZOU Yidong, QIAN Jing, ZHANG Wenyong, et al. Optimal H_2/H_∞ robust control for the load frequency of a microgrid including wind power-photovoltaic-small hydropower based on CPSOGSA[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 42-51.
- [14] ZHANG W, SHENG W, DUAN Q, et al. Automatic generation control with virtual synchronous renewables[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 267-279.
- [15] WANG X, WANG Y, LIU Y. Dynamic load frequency control for high-penetration wind power considering wind turbine fatigue load[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117.
- [16] XI L, LI H, ZHU J, et al. A novel automatic generation control method based on the large-scale electric vehicles and wind power integration into the grid[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024, 35(5): 5824-5834.
- [17] KUNYA A B. Hierarchical bi-level load frequency control for multi-area interconnected power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155.
- [18] GORBACHEV S, GUO J, MANI A, et al. MPC-based LFC for interconnected power systems with PVA and ESS under model uncertainty and communication delay[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-17.
- [19] 廖小兵, 刘开培, 乐健, 等. 基于双层模型预测结构的跨区域 AGC 机组协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4674-4685.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Coordinated control strategy for AGC units across areas based on bi-level model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4674-4685.
- [20] HE J, SHI C, WEI T, et al. Stochastic model predictive control of hybrid energy storage for improving AGC performance of thermal generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 393-405.
- [21] YANG F, YU S, ZHAO J, et al. Distributed reconfigurable model predictive control based load frequency control of microgrid clusters with dynamic topology[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 221.
- [22] ZHANG X, LI C, XU B, et al. Dropout deep neural network assisted transfer learning for bi-objective Pareto AGC dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1432-1444.
- [23] 杨冬锋, 朱军豪, 姜超, 等. 基于分布式模型预测的高比例风电系统多源协同负荷频率控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2804-2814.
YANG Dongfeng, ZHU Junhao, JIANG Chao, et al. High proportion wind power system multi-source collaborate load frequency control strategy based on distributed model prediction[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2804-2814.
- [24] 郭强, 薛志伟, 芦晓辉, 等. 含风光水火储的多区域互联电力系统协同优化负荷频率控制[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 136-143.
GUO Qiang, XUE Zhiwei, LU Xiaohui, et al. Optimal control of load frequency of multi-region interconnected power system based on mutual benefit of wind, solar, water, thermal and storage power[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 136-143.
- [25] 李谟发, 张志文, 胡斯佳, 等. 基于 MVO 算法与改进目标函数的电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 1-14.
LI Mofa, ZHANG Zhiwen, HU Sijia, et al. Load frequency control of power systems based on an MVO algorithm and improved objective function[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 1-14.
- [26] RAFIEE A, BATMANI Y, AHMADI F, et al. Robust load-frequency control in islanded microgrids: virtual synchronous generator concept and quantitative feedback theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5408-5416.
- [27] CAI G, JIANG C, YANG D, et al. Data-driven predictive based load frequency robust control of power system with renewables[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 154.
-
- 收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-08-25
作者简介:
李忠文(1989—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中原科技创新青年拔尖人才、河南省优青, 研究方向为新型电力系统、微电网、电力电子、新能源并网发电、分布式控制; E-mail: lzw@zzu.edu.cn
李夏乐(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统、自动发电控制、分布式控制; E-mail: 2073612261@qq.com
程志平(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网协调控制、电机系统驱动与控制。E-mail: zpcheng@zzu.edu.cn

(编辑 石晋美)