

自适应事件触发预测增强型分布式负荷频率预测控制

马苗苗^{1,2*}, 郝若欣², 刘向杰^{1,2}

1. 华北电力大学新能源电力系统全国重点实验室, 北京 102206

2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206

* 通信作者. E-mail: mamm@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-10-03; 接受日期: 2024-12-10; 网络出版日期: 2025-01-20

智能电网重大专项 (2030) (批准号: 2024ZD0802000)、国家电网公司科技项目 (批准号: 52280024000L) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2023JC002) 资助

摘要 针对存在负荷扰动的多区域互联电力系统负荷频率控制问题, 本文提出一种自适应事件触发预测增强型分布式模型预测控制策略. 首先, 将整个互联系统按区域划分为若干个动态耦合的子系统, 构造扰动观测器对外界未知扰动进行估计. 通过在优化问题中考虑调速器阀门限制并引入扰动估计, 构建预测增强型分布式预测控制器, 实现各子系统的负荷频率控制. 此外, 基于当前时刻与最新触发时刻状态间偏差设计自适应事件触发机制以更好协调系统性能和计算负担. 结果表明, 当系统存在负荷扰动时, 所提控制策略在满足控制要求的同时显著降低计算负担, 且所提策略在系统参数存在不确定的情况下具有良好的鲁棒性.

关键词 扰动补偿, 自适应事件触发, 分布式模型预测控制, 互联电力系统, 负荷频率控制

1 引言

随着电力系统的持续发展, 电力系统由传统的单一区域向跨区域的互联互通发展, 互联电力系统 (interconnected power system, IPS) 的出现提高了系统供电可靠性和稳定性, 但也带来更复杂的运行环境和挑战^[1]. 负荷的快速波动对 IPS 的经济和安全运行构成重大威胁, 研究大规模多区域 IPS 的负荷频率控制 (load frequency control, LFC) 变得尤为重要^[2]. IPS 中 LFC 的控制目标是有效地匹配负载需求和发电能力, 最小化频率偏差和区域间联络线交换功率偏差, 保证系统的稳定性^[3].

负荷扰动对 LFC 闭环系统性能产生不利影响^[4]. 学者们已基于不同的控制理论提出大量策略以应对 LFC 问题, 如: PID 控制^[5]、滑模控制^[6]、模糊控制^[7] 等多种控制策略. 然而, 这些控制策略在设计时未能充分考虑系统存在的物理约束, 如调速器阀门限制等. 相比之下, 模型预测控制 (model predictive control, MPC) 具备在线处理约束的能力, 能够预测系统未来动态行为并实现滚动优化, 在应对具有非线性、存在约束和不确定性的 LFC 问题中得到了广泛应用^[8,9]. 尽管 MPC 在 LFC 领域

引用格式: 马苗苗, 郝若欣, 刘向杰. 自适应事件触发预测增强型分布式负荷频率预测控制. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 401-411, doi: 10.1360/SSI-2024-0195

Ma M M, Hao R X, Liu X J. Adaptive event-triggered prediction-enhanced distributed load frequency predictive control. Sci Sin Inform, 2025, 55: 401-411, doi: 10.1360/SSI-2024-0195

取得了显著成果,但与其他先进的反馈控制方法类似,MPC采用缓慢的反馈策略逐步抑制干扰和不确定性.早期的MPC算法尝试通过积分控制^[10,11]来抵消干扰和不确定性的影响,但这往往会牺牲闭环系统的其他控制性能,如瞬态响应、跟踪性能、稳定性和鲁棒性等^[12].基于扰动观测器的控制^[13](disturbance observer based control, DOBC)作为一种备受关注的解决方案,已被证实可以无需牺牲系统标称性能而提高闭环系统的鲁棒性.将MPC与DOBC结合可提高系统的抗扰性能,两种策略相结合的方式可分为以下两类.一类方法侧重于扰动和不确定性影响的前馈补偿,在MPC反馈控制的基础上,设计基于扰动估计的前馈控制策略^[14,15].文献[16,17]分别针对匹配扰动和不匹配扰动设计了一种DOBC和MPC结合的前馈反馈控制策略.另一类则是将扰动估计引入MPC预测模型中提升预测精度,文献[12]利用扰动观测器(disturbance observer, DO)解决了连续时间模型预测控制中的预测精度提高问题.文献[18]采用tube-based MPC和DO相结合的策略,通过聚合器改善电动汽车的响应,将电动汽车纳入了具有可再生能源不确定性的孤岛电网的频率控制中.

多区域IPS是地理位置分散、规模庞大且结构复杂的系统^[19].集中式MPC(centralized MPC, CMPC)虽然能够得到全局最优解,但其计算复杂度较高,难以满足实时控制需求.相比之下,分散式MPC仅关注局部子系统的控制,可实现更低的计算负担和更高的实时性能,但由于忽略了子系统之间的耦合,难以适用于具有动态耦合的复杂互联电力系统中.而分布式MPC(distributed MPC, DMPC)能够克服上述两种方法的缺点.DMPC将全局优化问题分解为多个局部优化问题,并充分考虑子系统之间的耦合关系,通过控制器间的信息交互实现协调控制,可有效降低系统计算负担.DMPC因其灵活的分布式结构以及高效的计算性能,已成为多区域IPS的优选控制方案^[19,20].但传统DMPC在系统达到期望性能后仍周期性求解优化问题导致计算资源的浪费,文献[21,22]将事件触发机制(event-triggered mechanism, ETM)应用于DMPC中,减少优化问题的求解频率和局部信息的交换次数.ETM仅在特定条件下触发,可有效减少控制器的计算负担,降低系统运行成本.

本文针对由负荷扰动引起的互联电力系统频率和联络线功率偏差问题,构造DO对负荷扰动进行估计,并将预测增强方法引入预测模型以提升DMPC预测精度,构建预测增强型DMPC控制器.此外,基于当前时刻与最新触发时刻状态间偏差设计自适应事件触发机制,提出一种自适应事件触发预测增强型分布式模型预测控制(adaptive event-triggered prediction enhanced distributed model predictive control, AET-PEDMPC)策略,兼顾控制性能与计算负担,实现对频率偏差和联络线功率偏差的快速稳定控制.

2 多区域互联电力系统模型

考虑一个由多区域火力发电机组组成的互联电力系统,火力发电机组由调速器、汽轮机和发电机组成,图1为子区域*i*的LFC结构框图.由于LFC主要用于应对较小的系统扰动,故其模型常被简化和线性化.该多区域IPS中子区域*i*的LFC动力学微分方程^[20]可描述为

$$\Delta \dot{f}_i = -\frac{D_i}{M_i} \Delta f_i + \frac{1}{M_i} (\Delta P_{\text{mech},i} - \Delta P_{\text{tie},i} - \Delta P_{L,i}), \quad (1a)$$

$$\Delta \dot{P}_{\text{mech},i} = -\frac{1}{T_{t,i}} \Delta P_{\text{mech},i} + \frac{1}{T_{t,i}} \Delta X_{g,i}, \quad (1b)$$

$$\Delta \dot{X}_{g,i} = -\frac{R_i}{T_{g,i}} \Delta f_i - \frac{1}{T_{g,i}} \Delta X_{g,i} + \frac{1}{T_{g,i}} \Delta P_{\text{ref},i}, \quad (1c)$$

$$\Delta \dot{P}_{\text{tie},i} = \sum_{j=1}^N 2\pi T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j), \quad (1d)$$

$$\text{ACE}_i = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{\text{tie},i}, \quad (1e)$$

其中, Δf_i 为频率偏差, D_i 为发电机阻尼系数, M_i 为转动惯量, $\Delta P_{\text{mech},i}$ 为发电机输出功率增量,

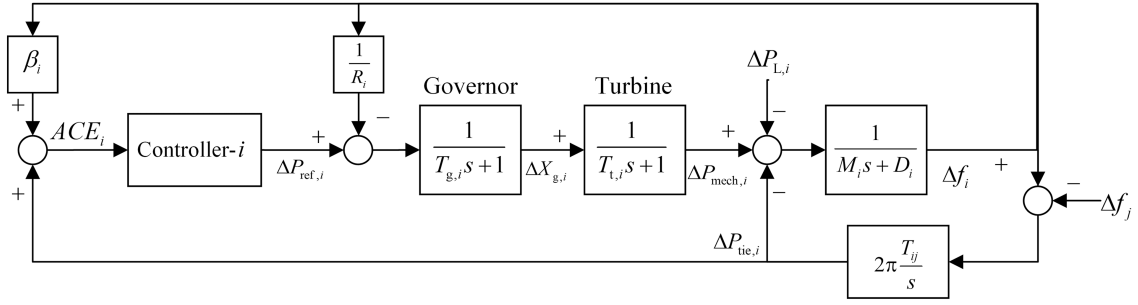

 图 1 互联电力系统中子区域 i 的负荷频率控制模型.

 Figure 1 Load frequency control model for subsystem i in IPS.

$\Delta P_{tie,i}$ 为联络线功率偏差, $\Delta P_{L,i}$ 为外部负荷扰动, $T_{t,i}$ 为汽轮机时间常数, $\Delta X_{g,i}$ 为调速器阀门位置偏差, R_i 为调差系数, $T_{g,i}$ 为调速器时间常数, $\Delta P_{ref,i}$ 为系统输入, T_{ij} 为联络线同步功率系数, Δf_j 为互联子区域 j 的频率偏差, ACE_i 为区域控制误差, β_i 为频率偏差因子.

上述子区域 i 的 LFC 状态空间方程描述为

$$\dot{x}_i(t) = \mathbf{A}_{ii}x_i(t) + \mathbf{B}_{ii}u_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij}x_j(t) + \mathbf{F}_{ii}d_i(t), \quad (2a)$$

$$y_i(t) = \mathbf{C}_{ii}x_i(t), \quad (2b)$$

其中, $x_i = [\Delta f_i \ \Delta P_{mech,i} \ \Delta X_{g,i} \ \Delta P_{tie,i}]^T \in \mathbb{R}^4$ 为区域 i 的状态变量, $u_i = \Delta P_{ref,i} \in \mathbb{R}^1$ 为控制量, $d_i = \Delta P_{L,i} \in \mathbb{R}^1$ 为外部负荷扰动, $ACE_i \in \mathbb{R}^1$ 为输出. 系统矩阵^[20] 维数为 $\mathbf{A}_{ii} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $\mathbf{B}_{ii} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $\mathbf{A}_{ij} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $\mathbf{F}_{ii} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $\mathbf{C}_{ii} \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$. 此外, 考虑调速器阀门位置约束

$$|\Delta P_{ref,i}| \leq 0.3. \quad (3)$$

本文中具有负荷扰动和约束限制的多区域互联电力系统负荷频率控制问题可描述为: 通过设计扰动观测器以准确估计负荷扰动, 将其引入预测模型中, 为各子系统设计预测增强型 DMPC 控制器, 并结合自适应事件触发机制动态调整控制器的更新频率. 各控制器之间通过信息交互实现协调控制, 在满足调速器阀门位置约束的前提下, 将区域间联络线功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 和频率偏差 Δf_i 稳定至零, 同时有效降低系统计算负担.

3 自适应事件触发预测增强型分布式模型预测控制策略

通过有效估计未知负荷扰动并将其引入预测模型中, 以主动应对负荷扰动对系统的不利影响, 提高 DMPC 预测精度, 构建预测增强型 DMPC (predictive enhanced DMPC, PEDMPC). 此外, 在传感器和控制器之间以及通信通道设置触发器, 并设计自适应事件触发机制 (adaptive ETM, AETM) 以更好地协调系统控制性能和计算负担. 所提 AET-PEDMPC 策略结构框图如图 2 所示.

3.1 扰动观测器设计

考虑一个由 M 个子系统组成的大规模互联系统, 子系统 i 的标称模型可描述为

$$\dot{x}_i(t) = \mathbf{A}_{ii}x_i(t) + \mathbf{B}_{ii}u_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij}x_j(t). \quad (4)$$

真实环境中的电力系统易受外界负荷影响, 子系统 i 的实际模型描述为 (2a).

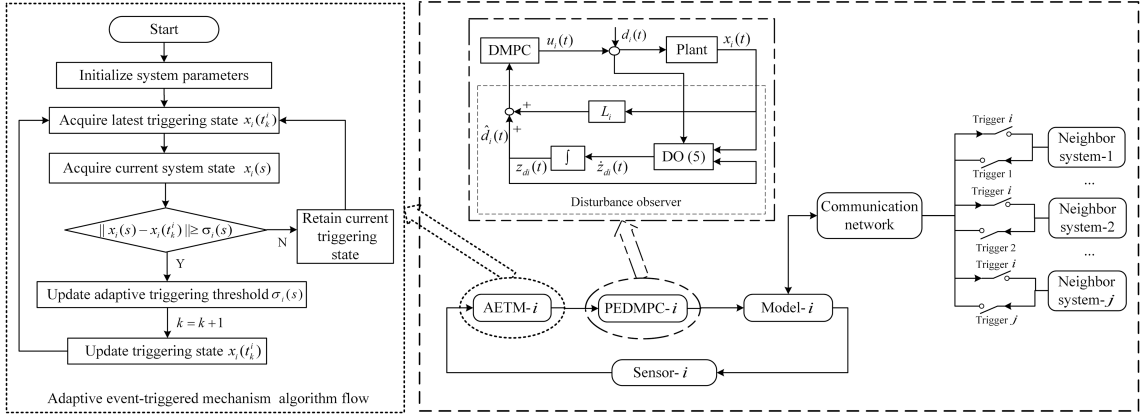


图 2 AET-PEDMPC 策略结构图.

Figure 2 Structure diagram of the AET-PEDMPC strategy.

采用 DO 估计系统 (2a) 中的 $d_i(t)$, DO 模型可表示为

$$\dot{z}_{di}(t) = -\mathbf{L}_i \left[\mathbf{F}_{ii}(z_{di}(t) + \mathbf{L}_i x_i(t)) + \mathbf{A}_{ii} x_i(t) + \mathbf{B}_{ii} u_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij} x_j(t) \right], \quad (5a)$$

$$\hat{d}_i(t) = z_{di}(t) + \mathbf{L}_i x_i(t). \quad (5b)$$

式 (5) 中, $z_{di}(t)$ 为观测器的内部状态变量, \mathbf{L}_i 为观测器增益, $\hat{d}_i(t)$ 为扰动估计. 扰动估计误差可表示为 $e_{di}(t) = \hat{d}_i(t) - d_i(t)$. 将 DO 模型的扰动估计引入系统 (2a) 中, 则扰动估计误差系统为

$$\begin{aligned} \dot{e}_{di}(t) &= \dot{\hat{d}}_i(t) - \dot{d}_i(t) \\ &= -\mathbf{L}_i \mathbf{F}_{ii} z_{di}(t) - \mathbf{L}_i \left[\mathbf{F}_{ii} \mathbf{L}_i x_i(t) + \mathbf{A}_{ii} x_i(t) + \mathbf{B}_{ii} u_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij} x_j(t) \right] \\ &\quad + \mathbf{L}_i \left[\mathbf{A}_{ii} x_i(t) + \mathbf{B}_{ii} u_i(t) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij} x_j(t) + \mathbf{F}_{ii} d_i(t) \right] - \dot{d}_i(t) \\ &= -\mathbf{L}_i \mathbf{F}_{ii} (\hat{d}_i(t) - d_i(t)) - \dot{d}_i(t) \\ &= -\mathbf{L}_i \mathbf{F}_{ii} e_{di}(t) - \dot{d}_i(t). \end{aligned} \quad (6)$$

假设1 扰动的维数不高于系统状态的维数.

假设2 系统 (2a) 中扰动的导数是有界的, 即 $\|\dot{d}_i(t)\| < \infty$.

引理1 ([17]) 在假设 1 和 2 下, 存在观测器增益 \mathbf{L}_i (例如取 $\mathbf{L}_i = \gamma \mathbf{F}_{ii}^T$, 其中 γ 是正常数), 使得 $\dot{e}_{di}(t) + \mathbf{L}_i \mathbf{F}_{ii} e_{di}(t) = 0$ 是渐近稳定的. 则扰动估计误差系统 (6) 是输入到状态稳定.

假设3 系统 (2a) 中的扰动是缓慢时变的, 有界的, 并且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{d}_i(t) = 0$.

引理2 ([17]) 在假设 1 和 3 下, 如果选择观测器增益 \mathbf{L}_i , 使得式 (6) 是渐近稳定的, 则式 (5) 的扰动估计 \hat{d}_i 可以渐近估计系统中的扰动 d_i .

3.2 分布式优化问题

对子系统 i 定义优化问题, 通过求解开环优化问题 P_i , 可得到 DMPC 的控制律 $\bar{u}_i^*(s; q_k^i)$:

$$P_i: \min_{\bar{u}_i(s; q_k^i)} J_i(\bar{x}_i(s; q_k^i), \bar{u}_i(s; q_k^i)) \quad (7)$$

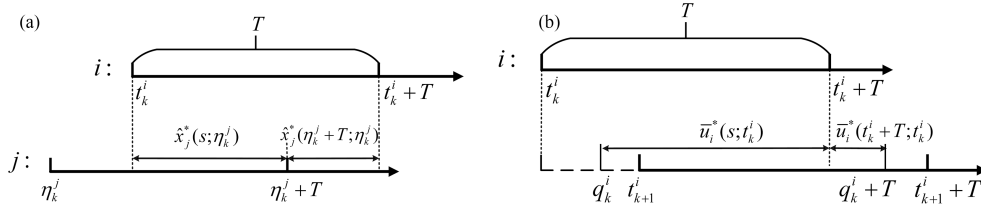


图 3 构造 (a) 假设状态和 (b) 可行输入的图解.

Figure 3 Illustration of constructing (a) the assumed state and (b) the feasible input.

$$\text{s.t. } \dot{\bar{x}}_i(s; q_k^i) = \mathbf{A}_{ii}\bar{x}_i(s; q_k^i) + \mathbf{B}_{ii}\bar{u}_i(s; q_k^i) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij}\hat{x}_j(s; q_k^i) + \mathbf{F}_{ii}\hat{d}_i(s; q_k^i), \quad (8a)$$

$$\bar{x}_i(q_k^i; q_k^i) = x_i(q_k^i), \quad (8b)$$

$$|\bar{u}_i(s; q_k^i)| \leq 0.3, \quad s \in [q_k^i, q_k^i + T]. \quad (8c)$$

目标函数设计为

$$J_i(\bar{x}_i(s; q_k^i), \bar{u}_i(s; q_k^i)) \triangleq \int_{q_k^i}^{q_k^i + T} (\|\bar{x}_i(s; q_k^i)\|_{\mathbf{Q}_i}^2 + \|\bar{u}_i(s; q_k^i)\|_{\mathbf{R}_i}^2) ds, \quad (9)$$

其中, $\{q_k^i\}$ 为采样时刻序列, 矩阵 $\mathbf{Q}_i, \mathbf{R}_i$ 为正定对称加权矩阵, T 为预测时域. 式 (8a) 为含扰动估计的子区域 LFC 模型, 式 (8b) 为时刻 q_k^i 系统真实状态, 式 (8c) 为控制量约束. 由图 3 可知各子系统为异步触发, 即每个子系统的触发时刻序列不同, 因此需构建邻居系统的假设状态引入式 (8a) 中. 邻居子系统的假设状态 $\hat{x}_j(s; q_k^i)$ 由式 (10) 生成, 其中 η_k^j 为邻居系统 j 的最新触发时刻且 $\eta_k^j < t_k^i$. 此外, 将预测时域 $s \in [q_k^i, q_k^i + T]$ 内扰动估计序列 $\hat{d}_i(s; q_k^i)$ 设定为预测时刻 q_k^i 的 DO 扰动估计值 $\hat{d}_i(q_k^i)$.

$$\hat{x}_j(s; q_k^i) = \begin{cases} \hat{x}_j^*(s; \eta_k^j), & s \in [t_k^i, \eta_k^j + T], \\ \hat{x}_j^*(\eta_k^j + T; \eta_k^j), & s \in [\eta_k^j + T, t_k^i + T]. \end{cases} \quad (10)$$

3.3 自适应事件触发机制

为合理降低子系统控制器周期性求解 P_i 的计算负担, 引入事件触发机制使得 DMPC 优化问题按需求解更新. 利用子系统当前时刻和最新触发时刻状态轨迹间偏差设计触发条件, 仅当该差值超过阈值时, 才求解优化问题更新控制序列, 否则将使用最近触发时刻的控制输入序列所构造的可行控制输入序列进行控制, 如图 3 所示. 引入 $\{t_k^i\}$ 为触发时刻序列, 假设在 t_k^i 时刻, 子系统 i 求解优化问题 P_i 得到最优控制输入序列 $\bar{u}_i^*(s; t_k^i)$. 则在时间区间 $q_k^i \in (t_k^i, t_{k+1}^i]$ 内, 构造可行控制输入如下:

$$\tilde{u}_i(s; q_k^i) = \begin{cases} \bar{u}_i^*(s; t_k^i), & s \in [q_k^i, t_k^i + T], \\ \bar{u}_i^*(t_k^i + T; t_k^i), & s \in [t_k^i + T, q_k^i + T]. \end{cases} \quad (11)$$

为了有效减少优化问题求解次数, 触发机制基于当前时刻 $x_i(s)$ 与最新触发时刻状态 $x_i(t_k^i)$ 间偏差进行自适应设计. $x_i(t_k^i)$ 是最新的触发时刻 t_k^i 的系统状态, 则下一触发时刻 t_{k+1}^i 由以下自适应事件触发机制判断:

$$\|x_i(s) - x_i(t_k^i)\| \geq \sigma_i(s), \quad s \in [t_k^i, t_{k+1}^i], \quad (12)$$

其中, $\sigma_i(s) > 0$ 为自适应触发阈值, 与系统状态偏差有关. 触发阈值 $\sigma_i(s)$ 的自适应律设计为

$$\dot{\sigma}_i(s) = \theta_i \sigma_i(s), \quad (13)$$

算法 1 Adaptive event-triggered prediction enhanced distributed model predictive control strategy for area i .

Input: $\mathbf{Q}_i, \mathbf{R}_i, \delta, T, \mathbf{L}_i, \delta_1, \delta_2, \sigma_i, \Xi, x_i(q_0^i) = 0, \tilde{u}_i(s; q_0^i) = 0, \hat{x}_j(s; q_0^i) = 0, s \in [q_0^i, q_0^i + T]$.

```

1: while  $q_k^i \leq q_{\max}$  do
2:   if  $k = 0$  or the AETM (12) is satisfied then
3:     Observe the aggregated disturbances  $\hat{d}_i$  and introduce it into the nominal model of the subsystem;
4:     Solve the problem (7), obtain  $\bar{u}_i^*(s; q_k^i), \bar{x}_i^*(s; q_k^i), s \in [q_k^i, q_k^i + T]$ ;
5:     Transmit the optimal predicted state trajectory  $\bar{x}_i^*(s; q_k^i), s \in [q_{k+1}^i, q_k^i + T]$  to its neighbors;
6:   else
7:     Obtain the feasible control input  $\tilde{u}_i(s; q_k^i)$ , and generate the feasible state trajectory  $\tilde{x}_i(s; q_k^i), s \in [q_{k+1}^i, q_k^i + T]$ ;
8:   end if
9:   Calculate the value of  $\Lambda_i$ , and update the adaptive control law (13) according to (14);
10: end while
11:  $k = k + 1$ .
    
```

且有

$$\theta_i = \begin{cases} \delta_1 e^{-\Lambda_i}, & \text{if } \Lambda_i < 1 \quad \text{and} \quad \sigma_i(s) < \sigma_{\max}, \\ -\delta_2 e^{\Lambda_i}, & \text{if } \Lambda_i > 1 \quad \text{and} \quad \sigma_i(s) > \sigma_{\min}, \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\Lambda_i = \frac{\|x_i(s) - x_i(t_k^i)\|}{\Xi}$, $\Xi > 0$ 为可由用户设计的允许系统状态偏差. δ_1, δ_2 为常数. 在时刻 $s \in (t_k^i, t_{k+1}^i]$, $\sigma(s) \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$ 恒满足. σ_{\min} 为触发阈值下界, σ_{\max} 为触发阈值上界. 该机制在初始时刻 t_0^i 自动触发, 并求解优化问题. 在时刻 $t_k^i + T$, 最新触发时刻的最优控制序列已用尽, 事件触发机制也应被激活. 在这种情况下, 给定时刻 t_k^i , 则下一触发时刻 t_{k+1}^i 定义为

$$t_{k+1}^i = \min \{ \hat{t}_{k+1}^i, t_k^i + T \}, \quad (15)$$

其中, $\hat{t}_{k+1}^i = \inf \{ s : \|x_i(s) - x_i(t_k^i)\| \geq \sigma_i(s) \}$.

当系统状态变化缓慢时 ($\|x_i(s) - x_i(t_k^i)\| < \Xi$) 且满足 $\sigma_i(s)$ 小于 σ_{\max} , 设置 $\theta_i = \delta_1 e^{-\Lambda_i} > 0$, 在自适应律 (13) 的作用下, $\sigma_i(s)$ 增大, 降低求解优化问题的频率, 减少资源浪费; 而当系统状态发生显著变化时 ($\|x_i(s) - x_i(t_k^i)\| > \Xi$), 且 $\sigma_i(s)$ 大于 σ_{\min} , 则设置 $\theta_i = -\delta_2 e^{\Lambda_i} < 0$, 减小 $\sigma_i(s)$, 增加求解优化问题的频率, 从而获得更好的系统性能; 否则, 保持 $\sigma_i(s) = 0$. 在自适应律的作用下, $\sigma_i(s)$ 在 $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$ 内不断变化, 可以更好地协调系统控制性能和计算负担. 算法 1 给出了 AET-PEDMPC 策略的控制流程.

注1 在事件触发机制的设计中, 为避免 Zeno 现象, 设定触发器的检测方式为周期性触发检测, 并设定 $\delta > 0$ 为触发检测间隔. 触发器按此间隔周期性检测触发条件 (12) 是否满足, 则相邻两次触发时刻的时间间隔为 $t_{k+1}^i - t_k^i = k\delta > 0, k = 1, 2, \dots, N$, 可有效避免 Zeno 现象.

注2 算法 1 复杂度主要取决于优化问题的求解过程, 通常与决策变量个数、约束个数、预测步长和选取的优化求解算法有关. 以内点法求解为例, 求解优化问题 P_i 的复杂度取决于其迭代次数和每次迭代的复杂度, 内点法求解优化问题的复杂度一般可表示为 $O(\sqrt{n} \log(1/\epsilon) \cdot (mn^3 + m^2n^2 + m^3 + n^3))$, 其中 $n = Nn_u$ 为优化变量个数, n_u 为优化问题输入变量的维度; $m = N(m_u + m_x)$ 为总约束个数, m_u, m_x 分别为优化问题状态约束和输入约束个数, N 为预测步长, ϵ 为优化精度的容忍度.

4 仿真与分析

在本节中, 以三区域 IPS 为应用实例来验证所提策略的有效性, 该电力系统模型参数参见文献 [6]. 控制参数设置采用试凑法, 并依据系统动态特性进行多次试验调整. 其中, 权重矩阵 $\mathbf{Q}_i, \mathbf{R}_i$ 用于平衡

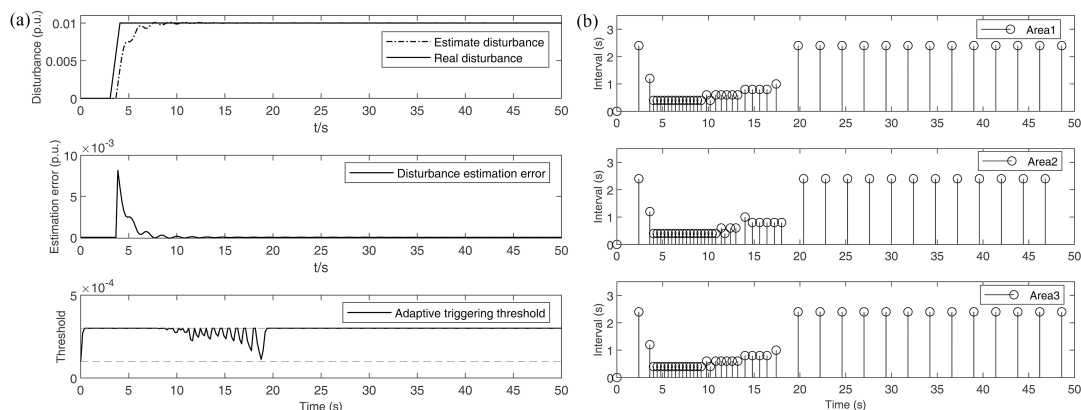


图 4 (a) 扰动估计和 (b) 三区触发状态结果.

Figure 4 Results of (a) disturbance estimation and (b) three-area triggering state.

控制系统的各项性能指标, 当性能指标 (如频率偏差和联络线功率偏差) 的权重设置较大时, 系统会更侧重于该指标的优化; 预测时域 T 代表对未来状态和输入的预测范围, 但较大的 T 会增加系统的计算负担; 适当增大扰动观测器增益 L_i 可提升观测器的响应速度, 但可能导致超调现象; 触发阈值 σ_{\min} , σ_{\max} 调节系统计算负担, 阈值过高会降低控制精度, 过低虽可提升控制精度但大幅增加计算负担. 经过反复试验调整, 确定各子区域控制参数为: 权重矩阵 $Q_i = \text{diag}(5, 0, 0, 5)$, $R_i = 1$, 采样时间 $\delta = 0.2$ s, 预测时域 $T = 2.4$ s, 扰动观测器增益 $L_i = [-8, 0, 0, 0]$, 自适应事件触发阈值 $\sigma_{\min} = 0.0001$, $\sigma_{\max} = 0.0003$, $\Xi = 0.0001$, $\delta_1 = 5$, $\delta_2 = 5$.

4.1 阶跃扰动响应

本小节评估所提控制策略在阶跃负荷扰动下的抗扰性能, 并与 CMPC 策略和 DMPC 策略的控制性能进行比较. 假设在 $t = 3.5$ s 时, 区域 2 受到 0.01 p.u. 的阶跃负荷扰动. 在所提控制策略下, DO 扰动估计与三区域事件触发状态如图 4 所示.

由图 4 可知, 该策略下 DO 快速跟踪负荷扰动, 验证了 DO 对扰动估计的有效性. 且在该策略下触发阈值跟随系统状态灵活变化, 使得子系统在受到突发扰动时触发次数增加, 触发间隔缩短, 有助于系统达到更好的控制性能; 随着系统趋于稳定, 无需频繁求解优化问题, 则减少触发次数, 有效降低系统计算和通信负担. 3 种策略控制下系统的响应结果如图 5 所示. 当区域 2 负荷变化时, 由于各子系统相互耦合, 区域 1 和 3 的系统状态也发生改变. 在 3 种策略控制下, 均能将各子区域的频率偏差 Δf_i 和联络线功率偏差 $\Delta P_{\text{tie},i}$ 驱动至零, 同时满足输入 $\Delta P_{\text{ref},i}$ 约束. 相较于其他策略, 在所提 AET-PEDMPC 策略控制下系统具有更小的超调量和更快的响应速度, 可在短时间内达到稳态, 且引起的互联区域频率偏差更小, 展现出更优异的控制性能.

为验证 AET-PEDMPC 策略在降低计算负担方面的有效性, 对区域 2 施加不同程度的负荷扰动, 将 AET-PEDMPC 策略、DMPC 策略和 CMPC 策略在相同仿真时间下的 CPU 运行时间与子区域触发次数总结于表 1. 数据表明, 负荷扰动增大会增加系统的计算负担, 但在不同程度负荷扰动下, 所提 AET-PEDMPC 策略相比于 DMPC 和 CMPC 策略均能显著降低系统计算负担. 在 0.01 p.u. 负荷扰动下, CPU 运行时间分别减少 74.65% 和 87.19%, 触发次数减少 82.59% 以上; 在 0.015 p.u. 负荷扰动下, CPU 运行时间分别减少 72.31% 和 85.69%, 触发次数减少 79.75% 以上. 这表明引入自适应事件触发机制可以灵活有效地减少控制器更新频率, 降低系统计算负担.

4.2 鲁棒性分析

本小节对所提策略进行鲁棒性能分析. 电力系统运行条件的动态变化以及设备的维护和老化会使

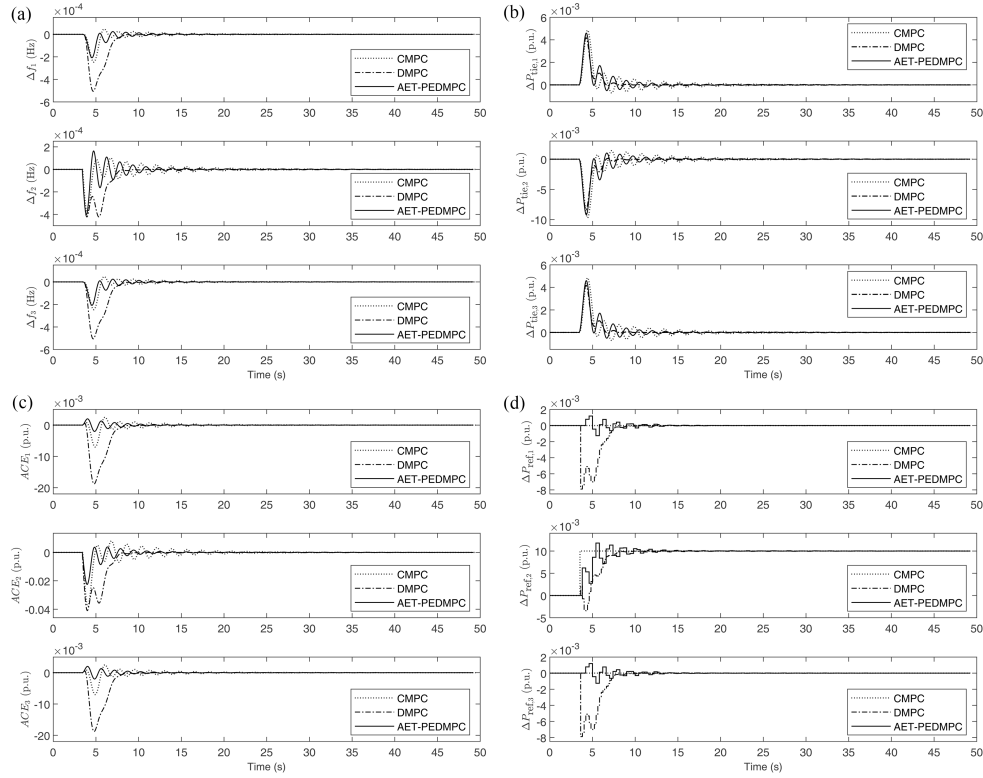


图 5 阶跃负荷扰动下的系统响应结果. (a) 频率偏差; (b) 联络线功率偏差; (c) 区域控制误差; (d) 控制输入.

Figure 5 System response results under the step load disturbance. (a) Frequency deviation; (b) tie-line power deviation; (c) area control error; (d) control input.

表 1 3 种策略下的 CPU 运行时间和触发次数.

Table 1 Elapsed CPU time and the number of triggers under the three strategies.

Load (p.u.)	CPU (s)			Number of triggers in the three areas		
	AET-PEDMPC	DMPC	CMPC	AET-PEDMPC	DMPC	CMPC
0.01	62.1698	245.2459	485.5538	42/43/42	247/247/247	247/247/247
0.015	77.6640	280.5531	542.9277	47/50/47	247/247/247	247/247/247

得调速器和涡轮机的时间常数存在不确定性, 下面给出调速器和涡轮机时间常数存在不确定性的两种情况: 情况 1 ($\cong +15\%$): $T_{t,1} = 0.345$, $T_{g,1} = 0.115$, $T_{t,2} = 0.1955$, $T_{g,2} = 0.46$, $T_{t,3} = 0.345$, $T_{g,3} = 0.115$; 情况 2 ($\cong -15\%$): $T_{t,1} = 0.255$, $T_{g,1} = 0.085$, $T_{t,2} = 0.1445$, $T_{g,2} = 0.34$, $T_{t,3} = 0.255$, $T_{g,3} = 0.085$. 假设区域 2 在 $t = 3.5$ s 时受到 0.01 p.u. 的阶跃负荷扰动, 图 6 给出了在参数不确定性下系统的响应结果. 由图 6 可知, 在所提策略控制下, 无论是标称参数还是上述两种参数不确定性的情况, 系统各子区域的频率偏差 Δf_i 和联络线交换功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 均可稳定至零, 且满足控制输入约束. 结果表明在 $T_{t,i}$, $T_{g,i}$ 偏离其各自标称值 $\pm 15\%$ 时, 所提控制策略仍具有鲁棒性.

为进一步分析所提策略在系统存在参数不确定性时的控制性能, 采用性能指标积分平方误差 (integral square error, ISE), CPU 运行时间和各子区域事件触发次数 (ET number) 来分析系统在不同控制策略下的响应性能. 计算互联系统三区域的 Δf_i , $\Delta P_{tie,i}$ 和 $\Delta P_{ref,i}$ 的性能指标 ISE 总和, 并统计 CPU 运行时间和子区域触发次数于表 2.

对比 DMPC 和 ETD MPC 策略下各指标可知, 引入 ETM 可以显著降低 CPU 运行时间和触发次数, 但会导致 $\Delta P_{tie,i}$ 的 ISE 增加. 而 AET-PEDMPC 策略相对于周期性 DMPC 策略和 ETD MPC

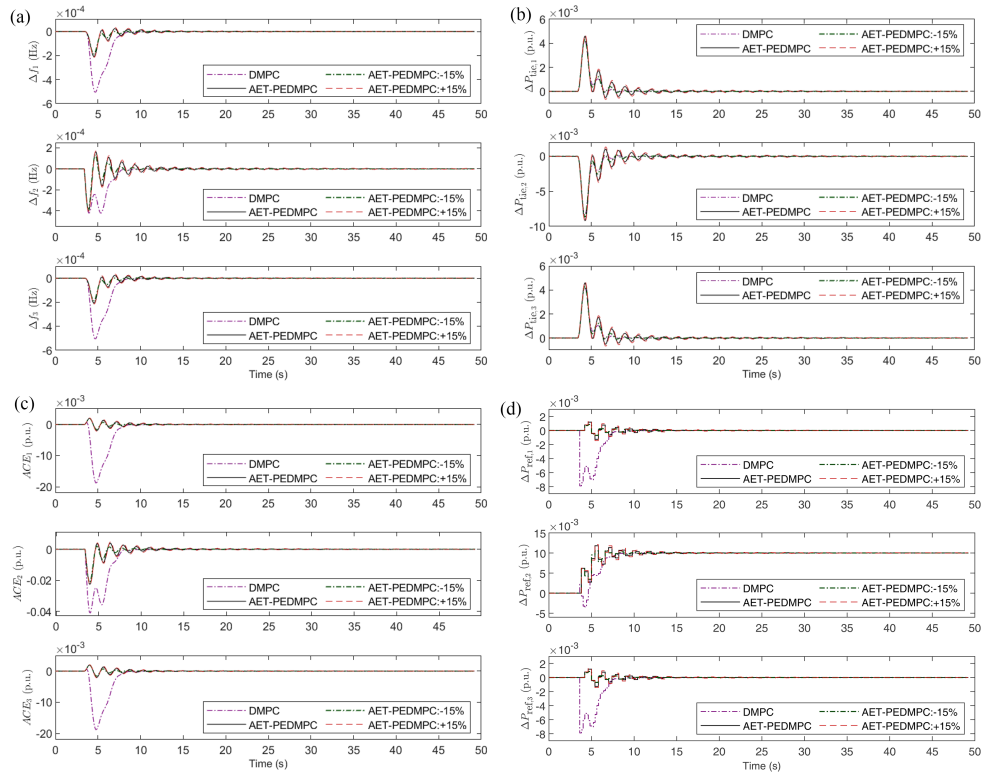


图 6 (网络版彩图) 参数不确定性下系统响应结果. (a) 频率偏差; (b) 联络线功率偏差; (c) 区域控制误差; (d) 控制输入.

Figure 6 (Color online) System response results under parameter uncertainty. (a) Frequency deviation; (b) tie-line power deviation; (c) area control error; (d) control input.

表 2 鲁棒性分析性能指标.

Table 2 Robustness analysis performance index.

Uncertainty	Strategy	$\sum_{i \in M} (ISE)$			CPU (s)	ET number
		Δf_i	$\Delta P_{tie,i}$	$\Delta P_{ref,i}$		
Nominal	DMPC	1.0194e-06	7.7424e-05	1.7661e-05	245.2459	247/247/247
	ETDMPC	3.6246e-07	2.6392e-04	1.6482e-05	81.9323	51/69/51
	AET-PEDMPC	1.788e-07	9.5484e-05	1.0162e-05	62.1698	42/43/42
+15%	DMPC	1.0937e-06	8.0191e-05	1.8218e-05	246.9566	247/247/247
	ETDMPC	3.7709e-07	2.7419e-04	1.6585e-05	103.4825	70/74/70
	AET-PEDMPC	1.9867e-07	1.0260e-04	1.0268e-05	85.2339	56/57/56
-15%	DMPC	8.4674e-07	7.0561e-05	1.6312e-05	244.6354	247/247/247
	ETDMPC	3.222e-07	2.4585e-04	1.6218e-05	94.1207	51/78/51
	AET-PEDMPC	1.3825e-07	8.1084e-05	9.9819e-06	41.7396	32/34/32

策略可显著降低 LFC 系统中 Δf_i 和 $\Delta P_{ref,i}$ 的 ISE, 同时使得 $\Delta P_{tie,i}$ 的 ISE 与 DMPC 策略相近, 且其 CPU 运行时间最短, 各子区域事件触发次数最少, 该结果在系统存在参数不确定性时仍然成立. 比较 ETDMPC 和 AET-PEDMPC 策略各性能指标可知, 在预测模型中引入扰动估计, 可以提高控制器的预测精度, 有利于减少两次触发间状态偏差, 可有效减少触发次数, 降低系统计算负担. 以参数存在 -15% 不确定性为例, 所提 AET-PEDMPC 策略与 DMPC 和 ETDMPC 策略相比, Δf_i 的 ISE 分别降低 83.67% 与 57.09%, $\Delta P_{ref,i}$ 的 ISE 分别降低 38.80% 与 38.45%, CPU 运行时间分别降低 82.93% 与

55.65%, 三区域事件触发次数分别减少了 87.04%, 86.23%, 87.04% 与 37.25%, 56.41%, 37.25%. 以上结果验证了所提策略在提高控制性能和降低计算负担方面的有效性.

5 结论

本文针对存在负荷扰动的多区域互联电力系统, 在考虑调速器阀门限制的条件下提出一种自适应事件触发预测增强型分布式负荷频率控制策略, 实现对频率和联络线功率偏差的快速稳定控制. 首先, 将整个互联系统按区域划分为多个动态耦合的子系统, 并构造扰动观测器对负荷扰动进行估计. 引入扰动补偿建立分布式优化问题, 并设计自适应事件触发机制以更好协调系统性能和计算负担. 仿真结果表明所提策略可以满足控制要求且具有良好的鲁棒性, 系统可以灵活有效地应对负荷扰动和参数不确定性带来的影响, 验证了所提策略在提高控制性能和降低计算负担方面的有效性. 未来的研究将深入分析所提策略的可行性与稳定性, 通过严谨的理论分析确保其在复杂系统中的可靠性. 同时, 将进一步研究所提策略与先进优化算法的结合, 以提升优化问题的求解效率.

参考文献

- 1 Peddakapu K, Mohamed M R, Srinivasarao P, et al. A state-of-the-art review on modern and future developments of AGC/LFC of conventional and renewable energy-based power systems. *Renew Energy Focus*, 2022, 43: 146–171
- 2 Zhang Y, Liu X J. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems. *Control Theory Appl*, 2016, 33: 621–630 [张怡, 刘向杰. 互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制. *控制理论与应用*, 2016, 33: 621–630]
- 3 Babu N R, Bhagat S K, Saikia L C, et al. A comprehensive review of recent strategies on automatic generation control/load frequency control in power systems. *Arch Comput Methods Eng*, 2023, 30: 543–572
- 4 Li M F, Zhang Z W, Hu S J, et al. Sampling PI load frequency control of power system with new energy generation. *Proc CSEE*, 2023, 43: 939–950 [李谟发, 张志文, 胡斯佳, 等. 含新能源电力系统的采样 PI 负荷频率控制. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 939–950]
- 5 Kumar A, Pan S. Design of fractional order PID controller for load frequency control system with communication delay. *ISA Trans*, 2022, 129: 138–149
- 6 Patel A, Purwar S. Design of event trigger based multirate sliding mode load frequency controller for interconnected power system. *ISA Trans*, 2023, 137: 457–470
- 7 Shanguan X C, He Y, Zhang C K, et al. Adjustable event-triggered load frequency control of power systems using control-performance-standard-based fuzzy logic. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2021, 30: 3297–3311
- 8 Liu X J, Kong X B. Present situation and prospect of model predictive control application in complex power industrial process. *Proc CSEE*, 2013, 33: 79–85 [刘向杰, 孔小兵. 电力工业复杂系统模型预测控制 —— 现状与发展. *中国电机工程学报*, 2013, 33: 79–85]
- 9 Liu J, Yao Q, Hu Y. Model predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power. *Energy*, 2019, 172: 555–565
- 10 Løvaas C, Seron M M, Goodwin G C. Robust output-feedback MPC with integral action. *IEEE Trans Automat Contr*, 2010, 55: 1531–1543
- 11 Favato A, Carlet P G, Toso F, et al. Integral model predictive current control for synchronous motor drives. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, 36: 13293–13303
- 12 Yang J, Zheng W X, Li S, et al. Design of a prediction-accuracy-enhanced continuous-time MPC for disturbed systems via a disturbance observer. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, 62: 5807–5816
- 13 Chen W H, Yang J, Guo L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods — an overview. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, 63: 1083–1095
- 14 Yang J, Li S, Chen X, et al. Disturbance rejection of dead-time processes using disturbance observer and model predictive control. *Chem Eng Res Des*, 2011, 89: 125–135
- 15 Dong Z P, Zhang Z Q, Qi S J, et al. Autonomous cooperative formation control of underactuated USVs based on improved MPC in complex ocean environment. *Ocean Eng*, 2023, 270: 113633
- 16 Gonçalves P F C, Cruz S M A, Mendes A M S. Disturbance observer based predictive current control of six-phase permanent magnet synchronous machines for the mitigation of steady-state errors and current harmonics. *IEEE Trans*

- Ind Electron, 2021, 69: 130–140
- 17 Yang J, Chen W H, Li S. Non-linear disturbance observer-based robust control for systems with mismatched disturbances/uncertainties. IET Control Theor Appl, 2011, 5: 2053–2062
 - 18 Oshnoei A, Kheradmandi M, Muyeen S M, et al. Disturbance observer and tube-based model predictive controlled electric vehicles for frequency regulation of an isolated power grid. IEEE Trans Smart Grid, 2021, 12: 4351–4362
 - 19 Liu X, Zhang Y, Lee K Y. Coordinated distributed MPC for load frequency control of power system with wind farms. IEEE Trans Ind Electron, 2016, 64: 5140–5150
 - 20 Ma M, Chen H, Liu X, et al. Distributed model predictive load frequency control of multi-area interconnected power system. Int J Electrical Power Energy Syst, 2014, 62: 289–298
 - 21 Kang Y, Wang T, Li P, et al. Compound event-triggered distributed MPC for coupled nonlinear systems. IEEE Trans Cybern, 2022, 53: 5572–5584
 - 22 Qin D, Jin Z, Liu A, et al. Event-triggered distributed predictive cooperation control for multi-agent systems subject to bounded disturbances. Automatica, 2023, 157: 111230

Adaptive event-triggered prediction-enhanced distributed load frequency predictive control

Miaomiao MA^{1,2*}, Ruoxin HAO² & Xiangjie LIU^{1,2}

1. State Key Laboratory of Alternate Electric Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

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

Abstract This paper proposes an adaptive event-triggered prediction-enhanced distributed control strategy to address the load frequency control (LFC) problem in multi-area interconnected power systems with load disturbances. Firstly, the interconnected system is decomposed into several dynamically coupled subsystems. The disturbance observer is constructed to estimate external unknown disturbance. Considering the governor valve limitation and introducing the disturbance estimation into the optimization problem, a prediction-enhanced distributed model predictive controller is constructed to achieve LFC for each subsystem. Additionally, in order to better coordinate system performance and computational burden, an adaptive event-triggered mechanism is designed based on the state error between the current and the most recent triggering instant. The results indicate that the proposed control strategy significantly reduces the computational burden while meeting control requirements in the presence of load disturbances. Additionally, the proposed strategy exhibits good robustness against system parameter uncertainties.

Keywords disturbance compensation, adaptive event-triggered, distributed model predictive control, interconnected power system, load frequency control