



# 基于事件触发的互联电力系统分布式负荷频率预测控制

马苗苗, 李钰梅, 崔婧, 刘向杰\*

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: liuxj@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2022-08-28; 修回日期: 2022-10-28; 接受日期: 2022-12-06; 网络出版日期: 2023-07-18

中央高校基本科研业务费专项资金资助 (批准号: JB2023120) 和国家自然科学基金 (批准号: 61873091, 62073163) 资助项目

**摘要** 针对具有约束和扰动的多区域互联电力系统负荷频率控制 (load frequency control, LFC) 问题, 本文提出了一种事件触发分布式模型预测控制 (event-triggered distributed model predictive control, ET-DMPC) 策略. 将大规模互联电力系统分解成多个动态耦合的子系统, 考虑发电机变化率约束 (generation rate constraint, GRC) 和调速器阀门位置限制, 建立分布式预测控制优化问题. 为了降低系统计算负担, 减少计算资源的消耗和浪费, 基于预测值和系统实际状态的误差构造事件触发条件. 在事件触发机制下, 只有子系统满足相应的事件触发条件时, 控制器才传输状态信息和求解优化问题, 并与邻域子系统交互最优解作用下的关联信息. 仿真结果表明, 本文提出的控制策略在负荷扰动和系统参数不确定的情况下具有良好的鲁棒性, 同时极大地降低了系统的计算负担.

**关键词** 负荷频率控制, 分布式模型预测控制, 事件触发, 互联电力系统, 发电机变化率约束

## 1 引言

电力系统频率是电能质量的重要指标之一, 系统不可预见的负荷有可能产生联络线功率偏差和频率偏差, 长期的频率偏差不仅会影响用户用电, 损害系统设备, 甚至会导致电网崩溃, 从而引起大面积停电, 对社会造成巨大损失<sup>[1]</sup>. 为了弥补这种偏差, 需要实时调整发电机出力跟踪负荷变化, 从而维持系统频率稳定和区域间联络线交换功率为计划值<sup>[2,3]</sup>. 因此, 负荷频率控制 (load frequency control, LFC) 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一种重要手段<sup>[4]</sup>.

针对多区域互联电力系统 LFC 问题, 近几年学者已经基于不同的理论提出了大量的控制方法, 如滑模控制<sup>[5]</sup>、鲁棒控制<sup>[6]</sup>、LMI 控制<sup>[7]</sup> 等多种先进控制策略. 这些方法有效地克服了传统 PI 控制器中最优参数整定与约束处理等方面的困难. 然而在 LFC 系统约束处理方面, 绝大多数控制算法通过将

**引用格式:** 马苗苗, 李钰梅, 崔婧, 等. 基于事件触发的互联电力系统分布式负荷频率预测控制. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 1392–1403, doi: 10.1360/SSI-2022-0343  
Ma M M, Li Y M, Cui J, et al. Event-triggered distributed model predictive load frequency control of an interconnected power system (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 1392–1403, doi: 10.1360/SSI-2022-0343

系统各类状态约束等效或近似为系统的输入或输出约束进行处理, 导致状态约束存在一定偏差<sup>[8]</sup>. 相反, 模型预测控制 (model predictive control, MPC) 能够在线处理显式状态约束和复杂的目标函数, 因此被广泛应用于多区域互联电力系统 LFC 问题中<sup>[9~11]</sup>. 然而大规模互联电力系统各个控制区域地理位置分散, 信息量庞大, 采用集中式控制存在着在线计算量巨大, 控制器设计复杂的缺陷, 难以发挥 MPC 的巨大潜力<sup>[12]</sup>. 无线网络、现场总线以及智能仪表的发展促进了分布式控制的产生与应用. 分布式模型预测控制 (distributed model predictive control, DMPC) 将一个复杂大规模系统的在线求解分散到各个子系统中去分布实现, 降低了系统的计算负担, 提高了系统的可靠性<sup>[13]</sup>. 同时, 各个子控制器可以借助网络交互信息, 相互协调完成整个系统的任务, 这对于具有非线性、强耦合、存在约束和不确定性的多区域互联电力系统显得尤为适用<sup>[14~16]</sup>.

传统的 MPC 采用时间触发的控制方法, 当系统已经达到期望的控制性能, 控制动作仍然周期性地执行, 将造成计算资源的浪费. 同时, 有限的网络带宽、计算资源和通信资源是目前影响电力系统安全、稳定运行的因素之一, 这使得时间触发的 MPC 在应用中面临着巨大挑战<sup>[17~19]</sup>. 相反, 事件触发控制是一种能有效降低冗余操作的优化策略<sup>[20,21]</sup>, 与传统的时间触发控制相比, 控制任务只在既定事件发生时刻执行, 比如误差超过阈值或达到特定的时刻. 因此, 将事件触发控制引入 MPC 的思想越来越受到国内外专家、学者的重视<sup>[22,23]</sup>. 文献 [24] 针对有界扰动作用下的线性离散大系统, 通过构造 Lyapunov 函数求得子系统的事件触发条件, 给出了具有统计学习的事件触发模型预测控制器设计方法. 文献 [25] 基于系统的实际轨迹与预测状态轨迹的有界误差设定触发条件的触发阈值, 提出了事件触发模型预测控制策略. 文献 [26] 将文献 [25] 的思想应用到无人驾驶汽车的路径跟随问题中, 实现了车辆状态对于参考轨迹的快速跟踪, 并降低了跟随过程中求解优化问题的频率.

考虑上述因素, 本文针对具有约束和干扰的多区域互联电力系统 LFC 问题, 提出一种事件触发分布式模型预测控制 (ET-DMPC) 方法. 通过将大规模互联电力系统分解成多个动态耦合的子系统, 考虑 GRC 约束和调速器阀门位置限制建立分布式优化问题. 基于子系统实际轨迹和预测轨迹的误差设计事件触发条件, 设定的触发阈值是关于系统扰动的函数. 在该事件触发机制下, 控制器减少了求解优化问题的次数, 降低了计算资源的消耗. 最后, 采用具有代表性的三区域互联 LFC 系统进行仿真分析, 验证所提方法在负荷扰动和系统参数不确定的情况下具有良好的鲁棒性, 同时极大地降低了系统的计算负担.

## 2 多区域互联电力系统模型

现代互联电力系统是由多个控制区域组成的大规模复杂系统, 由于 LFC 研究多聚焦于电力系统小扰动过程中的机电暂态过程, 因此常采用简化的线性模型来表示系统在运行点附近的动态特征<sup>[15]</sup>. 图 1 为  $N$  区域电力系统第  $i$  个区域的系统结构图, 其中, 火电机组原动机采用非再热式汽轮机.

区域  $i$  的调速器动态模型表达式为<sup>[4]</sup>

$$\Delta \dot{P}_{vi} = \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{ref_i} - \frac{1}{R_i T_{gi}} \Delta f_i - \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{vi}, \quad (1)$$

其中,  $\Delta P_{vi}$  为调速器阀门位置变化量,  $\Delta f_i$  为频率偏差,  $\Delta P_{ref_i}$  为控制输入,  $R_i$  为调差系数,  $T_{gi}$  为调速器时间常数.

区域  $i$  的汽轮机动态模型表示为<sup>[4]</sup>

$$\Delta \dot{P}_{mi} = \frac{1}{T_{chi}} (\Delta P_{vi} - \Delta P_{mi}), \quad (2)$$

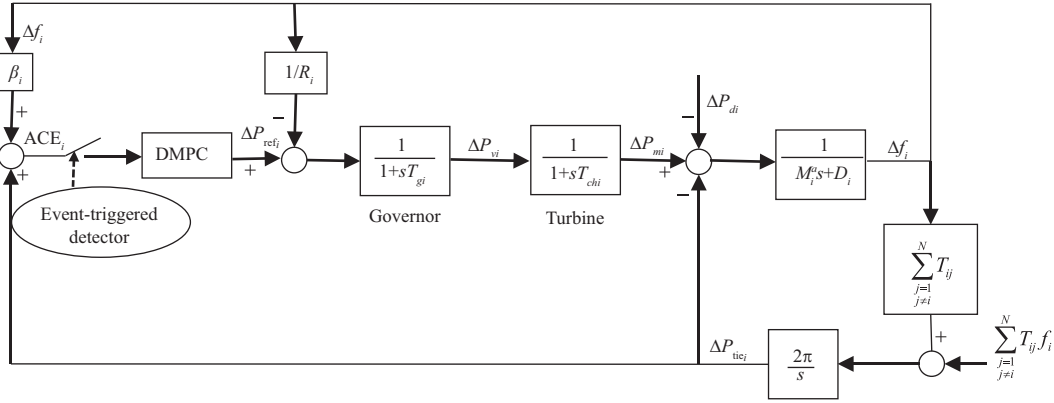


图 1 互联电力系统第  $i$  个区域方框图

Figure 1 The  $i$ -th area of the interconnected power system

其中,  $\Delta P_{mi}$  为同步发电机输出功率增量,  $T_{chi}$  为汽轮机时间常数.

区域  $i$  的频率偏差动态特性表示为<sup>[4]</sup>

$$\Delta \dot{f}_i = \frac{1}{M_i^a} (\Delta P_{mi} - \Delta P_{di} - D_i \Delta f_i - \Delta P_{tie_i}), \quad (3)$$

其中,  $\Delta P_{tie_i}$  为区域  $i$  的联络线功率偏差,  $M_i^a$  为区域  $i$  的转动惯量,  $D_i$  为发电机阻尼系数.

由于 LFC 研究中忽略了系统电压特性, 因此认为控制区域间的联络线功率偏差仅与系统频率相关<sup>[4]</sup>, 其表达式为

$$\Delta \dot{P}_{tie_{ij}} = T_{ij} \Delta f_i - T_{ij} \Delta f_j, \quad (4)$$

其中,  $T_{ij}$  为联络线同步功率系数.

假设整个系统由  $N$  个控制区域组成, 区域  $i$  与互联控制区域之间的总联络线功率偏差表示为<sup>[4]</sup>

$$\Delta \dot{P}_{tie_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} \Delta f_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} \Delta f_j. \quad (5)$$

在多区域电力系统中, 每个区域的频率波动都将影响到与其互联的区域, 为了保证频率偏差和联络线功率偏差同时收敛到设定值内, 定义每个控制系统的综合输出信号为区域控制误差信号 (ACE), 其表达式为<sup>[4]</sup>

$$ACE_i = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tie_i}, \quad (6)$$

其中,  $B_i$  为频率偏差因子.

综上所述, 区域  $i$  的 LFC 状态空间方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{ii} x_i(t) + B_{ii} u_i(t) + F_{ii} d_i(t) + \sum_{j \neq i} A_{ij} x_j(t), \\ y_i(t) = C_{ii} x_i(t), \end{cases} \quad (7)$$

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i^a} & \frac{1}{M_i^a} & 0 & -\frac{1}{M_i^a} \\ 0 & -\frac{1}{T_{chi}} & \frac{1}{T_{chi}} & 0 \\ -\frac{R_i}{T_{gi}} & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M T_{ij} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{gi}} \\ 0 \end{bmatrix}, F_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_i^a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C_{ii} = [B_i \ 0 \ 0 \ 1],$$

其中,  $x_i(t) = [\Delta f_i(t) \ \Delta P_{mi} \ \Delta P_{vi} \ \Delta P_{tie_i}]^T \in \mathbb{R}^4$  为系统状态,  $u_i(t) = \Delta P_{ref_i} \in \mathbb{R}^1$  为控制输入,  $d_i(t) = \Delta P_{di} \in \mathbb{R}^1$  为系统扰动,  $y_i(t) = ACE_i = B_i \Delta f_i + \Delta P_{tie_i} \in \mathbb{R}^1$  为系统输出.

在实际电力系统中, 为了避免温度、压力等过程变量的过大变化带来的设备损坏, 保障设备的安全稳定运行, 必须将汽轮发电机组发电功率的变化率限制在一定范围内, 即发电机变化率约束 (GRC). 在火电机组中, 大型汽轮机发电机变化率约束一般为 10%/min ( $\cong 0.0017$  p.u.MW/s), 因此 GRC 约束可表示为<sup>[4]</sup>

$$|\Delta \dot{P}_{mi}| = \left| \frac{\Delta P_{vi} - \Delta P_{mi}}{T_{chi}} \right| \leq 0.0017 \text{ p.u.MW/s.} \quad (8)$$

另外, 调速器阀门位置限制的产生是由于机械的限制使得阀门位置在一定范围之外不能再变动. 即超出一定范围之后, 阀门的实际输出不会随输入指令的变化而变化. 因此, 考虑调速器阀门位置限制, 相应的控制输入约束可表示为<sup>[6]</sup>

$$|\Delta P_{ref_i}| \leq 0.3 \text{ p.u.MW.} \quad (9)$$

### 3 事件触发分布式模型预测控制器设计

ET-DMPC 控制策略结构图如图 2 所示. 子系统的传感器至控制器之间存在触发器, 在每个采样时刻检测预定义的触发条件, 决定每个子系统是否求解分布式优化问题, 其中触发条件满足的采样时刻称为触发时刻. 因此在事件触发机制下, 每个子系统的控制器只在触发时刻求解优化问题, 而在相邻的两个触发时刻之间, 系统依次将最近一次触发时刻获得的最优控制序列作用于系统.

本节首先给出每个子系统的分布式优化问题; 其次, 基于预测值和系统实际值的误差设计事件触发条件, 降低每个子系统求解优化问题的频率; 最后, 给出 ET-DMPC 的算法描述.

#### 3.1 分布式优化问题

定义序列  $\{r_k\}$  为采样时刻, 其中  $r_{k+1} - r_k = \delta$ ,  $\delta$  为采样周期. 假设所有状态都是可测量的, 得到的状态值为  $x_i(r_k)$ , 则在  $s \in [r_k, r_k + T]$  时段子系统  $i$  待求解的 DMPC 优化问题可描述为

$$\min_{\bar{u}_i(\cdot)} J_i(\bar{x}_i(s; r_k), \bar{u}_i(\cdot)) \quad (10)$$

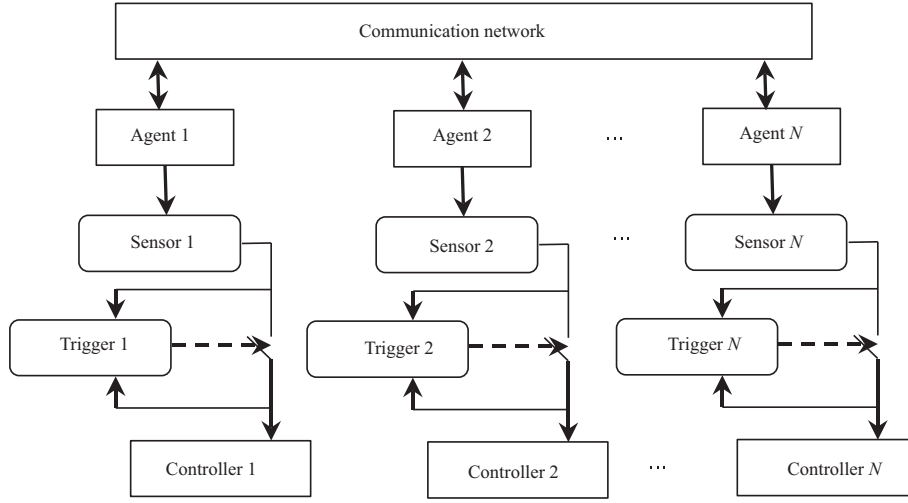


图 2 ET-DMPC 控制策略结构图

Figure 2 The structure of the ET-DMPC strategy

$$\text{s.t. } \dot{\bar{x}}_i(s; r_k) = A_{ii}\bar{x}_i(s; r_k) + B_{ii}\bar{u}_i(s; r_k) + \sum_{j \neq i} A_{ij}\hat{x}_j(s; r_k), \quad (11a)$$

$$\bar{x}_i(r_k; x_i(r_k), r_k) = x_i(r_k), \quad (11b)$$

$$\left| \frac{\bar{x}_{i3}(s; r_k) - \bar{x}_{i2}(s; r_k)}{T_{chi}} \right| \leq 0.0017, \quad (11c)$$

$$|\bar{u}_i(s; r_k)| \leq 0.3, \quad (11d)$$

其中成本函数为

$$J_i \triangleq \int_{r_k}^{r_k+T} (\|\bar{x}_i(s; r_k)\|_{Q_i}^2 + \|\bar{u}_i(s; r_k)\|_{R_i}^2) ds, \quad (12)$$

$\bar{x}_i(s; r_k)$  为预测状态轨迹,  $\bar{u}_i(s; r_k)$  为预测控制输入, 矩阵  $Q_i, R_i$  为正定对称加权矩阵,  $T = n_0\delta$  为预测时域.

式 (12a) 为控制器用于预测系统未来动态的模型, 其中  $\hat{x}_j(s; r_k)$  为子系统  $i$  在  $r_k$  时刻对邻域子系统  $j$  在时域  $s \in [r_k, r_k + T]$  内的状态估计值, 与子系统  $j$  在  $r_{k-1}$  时刻的触发情况有关:

- (1) 若子系统  $j$  在  $r_{k-1}$  时刻满足事件触发条件, 则  $\hat{x}_j(s; r_k) = \bar{x}_j^*(s; r_{k-1})$ , 其中  $\bar{x}_j^*(s; r_{k-1})$  为子系统  $i$  接收到的来自邻域子系统  $j$  在  $r_{k-1}$  时刻最优控制输入  $\bar{u}_j^*(s; r_{k-1})$  作用下的预测状态轨迹;
- (2) 若子系统  $j$  在  $r_{k-1}$  时刻不满足事件触发条件, 则  $\hat{x}_j(s; r_k) = \bar{x}_j(s; r_{k-1})$ , 其中  $\bar{x}_j(s; r_{k-1})$  为子系统  $i$  接收到的来自邻域子系统  $j$  在  $r_{k-1}$  时刻可行控制输入  $\bar{u}_j(s; r_{k-1})$  作用下的预测状态轨迹.

### 3.2 事件触发机制

为减少大量求解优化问题带来的计算负担, 更好地在计算资源使用和闭环控制性能之间取得平衡, 将事件触发机制引入 DMPC 控制器中, 即每个子系统只在满足事件触发的时刻计算优化问题. 为了便于说明, 引入时间序列  $\{t_k^i\}$  表示事件触发的时刻, 该时间序列与采样时刻序列  $\{r_k\}$  的关系示意图如图 3 所示. 我们可以看出在相邻的两个触发时刻之间可能会存在多个采样时刻没有求解优化问题, 因此需要构造与触发时刻相关的可行控制输入作用于系统. 假设在  $t_k^i$  时刻, 子系统  $i$  求解优化问题 (10)

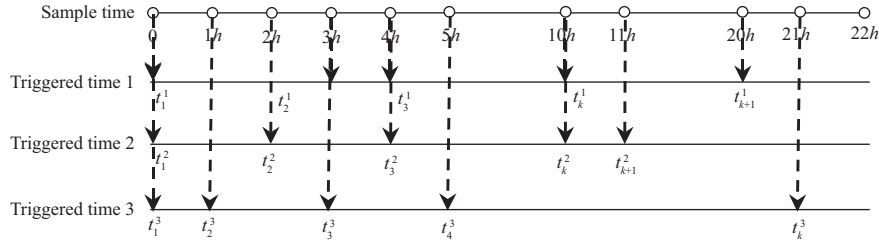


图 3 采样时刻与触发时刻关系示意图

Figure 3 The relation of sampling time instants and event-triggered time instants

得到最优控制输入  $\bar{u}_i^*(s; t_k^i)$ . 记下一触发时刻为  $t_{k+1}^i$ , 当  $r_k \in (t_k^i, t_{k+1}^i]$  时, 可行控制输入的结构如下所示:

$$\bar{u}_i(s; r_k) = \begin{cases} \bar{u}_i^*(s; r_{k-1}), & s \in [r_k, r_{k-1} + T], \\ \bar{u}_i^*(r_{k-1} + T; r_{k-1}), & s \in [r_{k-1} + T, r_k + T]. \end{cases} \quad (13)$$

与此同时, 最优预测状态轨迹  $\bar{x}_i^*(s; t_k^i)$  满足如下方程:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_i^*(s; t_k^i) &= A_{ii}\bar{x}_i^*(s; t_k^i) + B_{ii}\bar{u}_i^*(s; t_k^i) + \sum_{j \neq i} A_{ij}\hat{x}_j(s; t_k^i), \\ \bar{x}_i^*(t_k^i; t_k^i) &= x_i(t_k^i), \quad s \in [t_k^i, t_k^i + T]. \end{aligned} \quad (14)$$

而实际的状态轨迹  $x_i(t_k^i)$  表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(s; t_k^i) &= A_{ii}x_i(s; t_k^i) + B_{ii}\bar{u}_i^*(s; t_k^i) + F_{ii}d_i(s; t_k^i) + \sum_{j \neq i} A_{ij}x_j(s; t_k^i), \\ x_i(s; t_k^i) &= x_i(s), \quad s \in [t_k^i, t_{k+1}^i]. \end{aligned} \quad (15)$$

从式 (14) 和 (15) 可以看出, 在系统存在扰动的情况下, 控制器获得的最优预测状态轨迹和系统的实际轨迹存在不可避免的误差, 因此设计一个事件触发机制来限制此偏差的变化, 则对于子系统  $i$  设计的触发条件如下:

$$\|x_i(s) - \bar{x}_i^*(s; t_k^i)\| \geq \sigma_i, \quad s \in [t_k^i, t_k^i + T], \quad (16)$$

其中  $\sigma_i = \Delta d_i e^{a(s-t_k^i)}$  为触发阈值,  $a$  为常数. 不失一般性, 我们假设优化问题求解器在初始时刻  $t_0^i = r_0$  自动触发. 当然, 在  $t_{k+1}^i = t_k^i + T$  时刻, 求解器也需要被激活, 因为这表明在  $t_k^i$  时刻计算的优化序列已经被全部执行, 因此, 下一个触发时刻  $t_{k+1}^i + T$  可表示为

$$t_{k+1}^i = \min \{\hat{t}_{k+1}^i, t_k^i + T\}, \quad (17)$$

其中,  $\hat{t}_{k+1}^i$  表示满足触发条件 (16) 的时刻. 最后, 给出事件触发分布式模型预测控制策略的算法, 如算法 1 所示.

## 4 仿真与分析

为验证本文设计的 ET-DMPC 控制策略在处理多区域互联电力系统负荷频率控制问题的有效性, 本文以三区域互联电力系统为研究对象进行仿真. 三区域电力系统模型参数见表 1 [16].

**算法 1** Event-triggered model predictive control method for each area  $i$ 

**Input:**  $Q_i, R_i, T, \delta, \sigma_i, x_i(r_0) = 0, \bar{u}_i(s; r_0) = 0, \hat{x}_j(s; r_0) = 0, s \in [r_0, r_0 + T]$ ;  
 1: **if**  $k = 0$  **then**  
 2:     Solve the problem (10), yielding the optimal control and state trajectory  $\bar{u}_i^*(s; r_0), \bar{x}_i^*(s; r_0), s \in [r_0, r_0 + T]$ ;  
 3:     Apply the first control input  $\bar{u}_i^*(s; r_0), s \in [r_0, r_1]$ ;  
 4:      $k = k + 1$ ;  
 5: **end if**  
 6: **while**  $k \leq k_{\max}$  **do**  
 7:     Measure the current state  $x_i(r_k)$ ;  
 8:     Receive  $\bar{x}_j^*(s; r_{k-1})$  or  $\bar{x}_j(s; r_{k-1}), s \in [r_k, r_{k-1} + T]$  from its neighbors;  
 9:     **if** the event-triggered condition (17) is satisfied **then**  
 10:          $t_k^i = r_k$ ;  
 11:         Solve the problem (10), yielding  $\bar{u}_i^*(s; r_k), \bar{x}_i^*(s; r_k), s \in [r_k, r_k + T]$ ;  
 12:         Transmit the optimal predicted state trajectory  $\bar{x}_i^*(s; r_k), s \in [r_{k+1}, r_k + T]$  to its neighbors;  
 13:     **else**  
 14:         Obtain the feasible control input  $\bar{u}_i(s; r_k)$ , yielding the feasible state trajectory  $\bar{x}_i(s; r_k), s \in [r_{k+1}, r_k + T]$ ;  
 15:         Transmit the feasible predicted state trajectory  $\bar{x}_i(s; r_k), s \in [r_{k+1}, r_k + T]$  to its neighbors;  
 16:     **end if**  
 17:     Apply the first control input  $\bar{u}_i^*(s; r_k), s \in [r_k, r_{k+1}]$ ;  
 18:      $k = k + 1$ ;  
 19: **end while**  
**Output:** The optimal control input  $\bar{u}_i^*(r_k)$  and the actual state  $\bar{x}_i(r_k)$ .

表 1 三区域互联电力系统模型参数

Table 1 Model parameters for the three-area interconnected power system

Area	Parameters
1	$D_1 = 2, M_1^a = 3.5, T_{ch1} = 50, T_{g1} = 40, R_1 = 1, \beta_1 = 1, T_{12} = T_{13} = 7.54$
2	$D_2 = 2.75, M_2^a = 4, T_{ch2} = 10, T_{g2} = 25, R_2 = 1, \beta_2 = 1, T_{21} = T_{23} = 7.54$
3	$D_3 = 2.4, M_3^g = 3.75, T_{ch3} = 30, T_{g3} = 32, R_3 = 1, \beta_3 = 1, T_{31} = T_{32} = 7.54$

#### 4.1 阶跃扰动响应

本小节对 ET-DMPC 控制器在阶跃负荷扰动下的抗扰性能进行评估, 假设区域 2 受到 10% 的阶跃负荷扰动, 则相应的事件触发条件为  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.1e^{2.5(t-t_k^i)}, \sigma_3 = 0.1e^{(t-t_k^i)}$ . 选取采样时间为  $\delta = 0.4$  s, 预测时域为  $T = 2.4$  s, 权重系数为  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = \text{diag}(1000, 0, 0, 1000), R_1 = R_2 = R_3 = 1$ .

为验证此控制器的有效性和优越性, 将其与时间触发的 DMPC 控制器<sup>[11]</sup>相比较, 其中 DMPC 控制器在仿真中用到的参数与 ET-DMPC 控制器相同. 图 4 为上述两种控制器仿真比较结果, 其显示 ET-DMPC 控制器在控制性能上与 DMPC 控制器相差无几. 由图 4(a) 和 (b) 可知, 当系统负荷突增时, 频率出现跌落, 这是汽轮机快速释放机械能补偿负荷变化产生的结果. 结合图 4(c)~(e), 两种控制器不仅保证了 GRC 和控制输入  $P_{\text{ref}_i}$  满足约束条件, 而且将系统频率偏差  $\Delta f_i$  和联络线交换功率  $\Delta P_{\text{tie}_i}$  调节至零. 另外, 在事件触发机制下, ET-DMPC 可以充分利用每一个触发时刻计算得到的最优控制输入序列, 即在两个触发时刻之间, 系统依次将最后一次触发时刻计算的最优控制序列作用于系统. 相反, DMPC 在每一个时刻只将最优控制输入序列的第一个元素作用于系统, 如图 4(d) 和 (f) 所示.

图 4(f) 进一步描述了 100 s 内 DMPC 和 ET-DMPC 对应的事件触发时刻. 从图中可以看出, 在

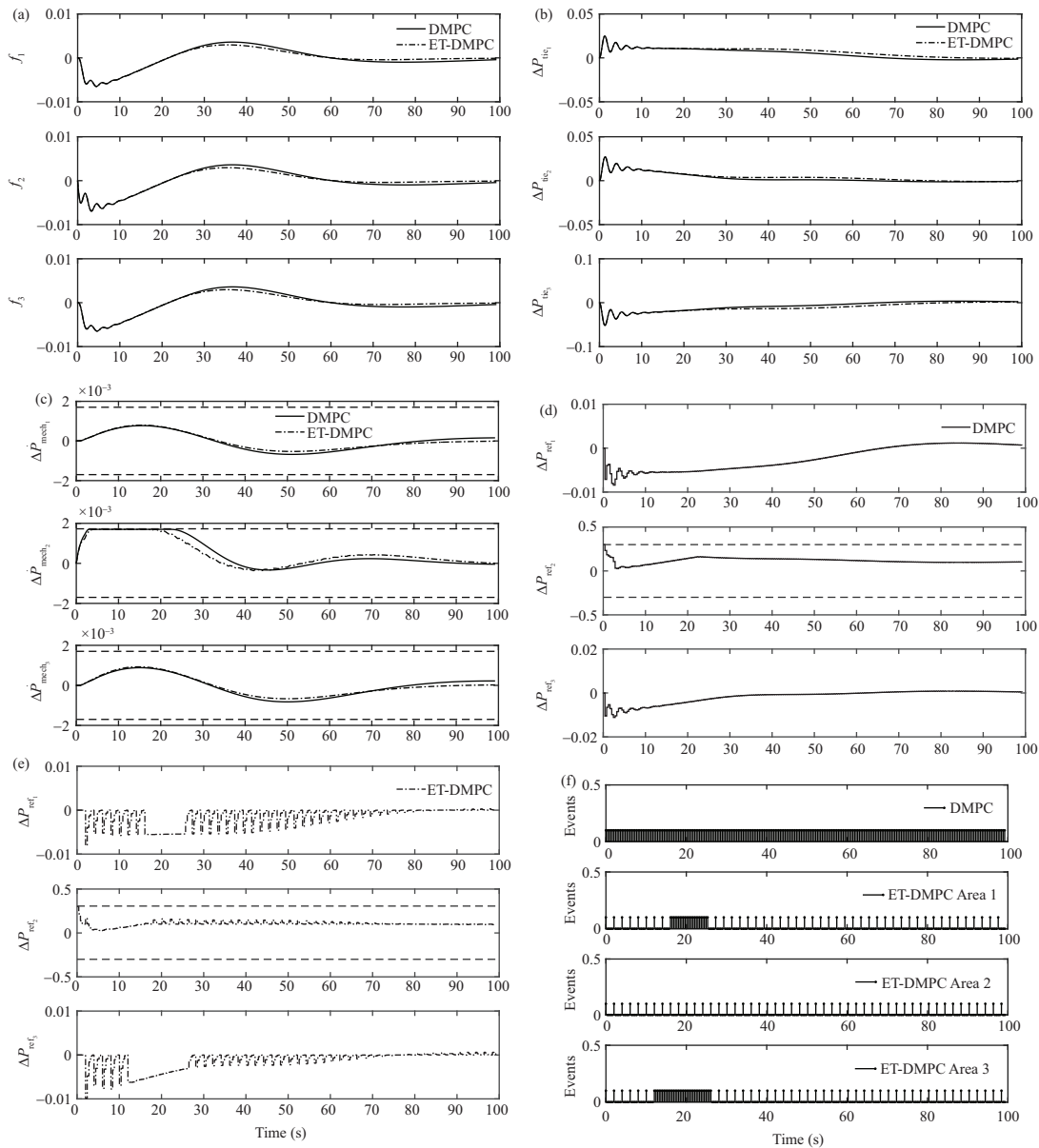


图 4 阶跃负荷扰动下的系统响应结果

**Figure 4** Response results of the system under the step load changing disturbance. (a) Local frequency deviations of each area; (b) tie-line power deviations of each area; (c) output power change rates of the generator of each area; (d) control inputs of each area under the DMPC controller; (e) control inputs of each area under the ET-DMPC controller; (f) event-triggered instants under the DMPC and ET-DMPC controllers

DMPC 控制器作用下每个子系统周期性求解优化问题, 而 ET-DMPC 控制器求解优化问题是非周期性的. 表 2 统计了两个控制器产生的事件触发次数和 CPU 运行时间, 其中 DMPC 控制器的每个区域分别触发了 250 次, CPU 运行时间为 432 s, 而在 ET-DMPC 控制器作用下的三区域触发次数分别为 68, 50, 78. CPU 运行时间仅为 203 s, 降低了一半. 由此可见, ET-DMPC 控制器的触发次数大幅度减少, 且 CPU 耗时降低一半. 因此, 所设控制器不仅能够很好地处理负荷扰动带来的频率波动问题, 而且可以大幅度降低系统计算负担.



**表 2 DMPC 和 ET-DMPC 对应的事件触发次数和 CPU 运行时间**  
**Table 2** The number of triggers and elapsed CPU time under the DMPC and ET-DMPC controllers

Controller	Elapsed CPU time (s)	Number of triggers		
		Area 1	Area 2	Area 3
DMPC	432	250	250	250
ET-DMPC	203	68	50	78

#### 4.2 鲁棒性分析

本文设计 ET-DMPC 控制器时, 未考虑参数的不确定性. 然而, 在多区域互联电力系统中调速器和汽轮机的时间常数具有不确定性, 因此本小节考虑以下两种情况验证所设控制器的鲁棒性能. 假设在区域 2 施加 10% 的负荷扰动, 相应的事件触发条件为  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.1e^{2.5(t-t_k^i)}$ ,  $\sigma_3 = 0.1e^{(t-t_k^i)}$ , 其余仿真参数不变.

情况 1:  $T_{ch1} = 57.5 (\cong 15\%)$ ,  $T_{ch2} = 11.5 (\cong 15\%)$ ,  $T_{ch3} = 34.5 (\cong 15\%)$ ,  $T_{g1} = 46 (\cong 15\%)$ ,  $T_{g2} = 28.75 (\cong 15\%)$ ,  $T_{g3} = 36.8 (\cong 15\%)$ .

情况 2:  $T_{ch1} = 42.5 (\cong -15\%)$ ,  $T_{ch2} = 8.5 (\cong -15\%)$ ,  $T_{ch3} = 25.5 (\cong -15\%)$ ,  $T_{g1} = 34 (\cong -15\%)$ ,  $T_{g2} = 21.25 (\cong -15\%)$ ,  $T_{g3} = 27.2 (\cong -15\%)$ .

图 5 给出了参数不确定情况下的仿真结果. 从图 5(a) 和 (b) 可以看出, ET-DMPC 控制器将系统频率偏差  $\Delta f_i$  和联络线交换功率偏差  $\Delta P_{tie_i}$  调节至零. 与此同时, 图 5(c) 和 (d) 显示 GRC 和控制输入  $P_{ref_i}$  满足约束条件, 这表明在汽轮机和调速器时间常数偏离标称值  $\pm 15\%$  的情况下, ET-DMPC 控制器不仅可以实现互联电力系统的负荷频率控制而且保证了系统约束. 图 5(e) 和 (f) 分别统计了参数偏离 15% 和  $-15\%$  的事件触发时刻, 从图中可以看出控制器求解优化问题的频率大幅度降低, 这反映了 ET-DMPC 控制器降低了系统计算的负担.

#### 4.3 触发参数对数据传输的影响

事件触发阈值参数决定控制器求解优化问题的频率, 本文设计的事件触发条件 (16) 与参数  $\delta$  和  $\Delta d_i(r_k)$  有关. 为定量分析触发阈值参数对控制器求解优化问题频率的影响, 可以用数据传输率  $\rho$  衡量事件触发的效率 [24], 其定义为

$$\rho = \frac{N_e}{N_s}, \quad (18)$$

其中,  $N_e$  为事件触发次数,  $N_s$  为采样次数.

表 3 统计了系统在不同触发参数下数据传输率的具体情况. 当负荷扰动不变, 采样周期依次设为 0.3, 0.4 和 0.5 s 时, 数据传输率越来越小; 然而当采样周期不变, 将扰动设为 0.01, 0.05 和 0.1 时, 数据传输率没有明显变化, 如表 3 的 1, 4, 7 列, 2, 5, 8 列和 3, 6, 9 列所示. 这说明了本文设计的触发条件的事件触发效率主要取决于采样周期, 而负荷扰动参数可以使设计的触发条件在随机扰动变化下更具灵活性.

## 5 结论

本文针对具有约束和扰动的多区域互联电力系统, 提出了一种基于 ET-DMPC 的负荷频率控制方法. 该方法将大规模互联电力系统分解成多个动态耦合的子系统, 考虑发电机变化率约束 (GRC) 和调速器阀门位置限制建立分布式优化问题. 基于子系统预测值与实际值的误差设计事件触发条件, 只

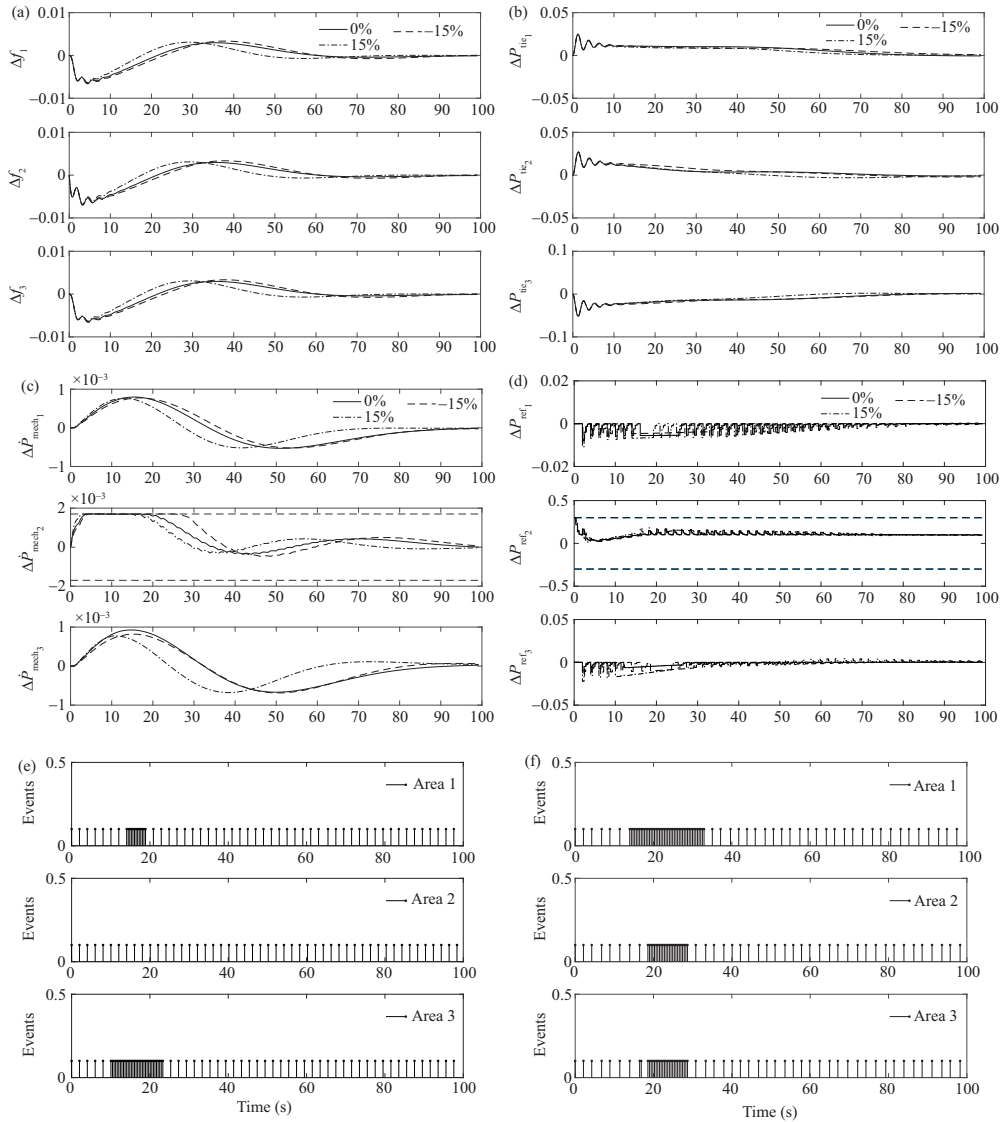


图 5 参数不确定情况下的系统响应结果

Figure 5 Response results of the system with parameter uncertainty. (a) Local frequency deviations of each area; (b) tie-line power deviations of each area; (c) output power change rates of the generator of each area; (d) control inputs of each area; (e) event-triggered instants in Case 1; (f) event-triggered instants in Case 2

表 3 不同参数对应的数据传输率

Table 3 Data transfer rates corresponding to different parameters

	Parameter								
	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1
$d_2(t)$	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1
$\delta$ (s)	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5
Area 1 (%)	32.5	23.2	13.8	30	27.2	16	31	22.2	14
Area 2 (%)	35.4	20.3	14	34.6	20	16	36	20.4	13.8
Area 3 (%)	36	30.1	15.2	35	31.2	16	35.9	28.2	14

有子系统满足相应的事件触发条件时, 控制器才交互信息和求解优化问题. 仿真结果表明提出的 ET-DMPC 控制器不仅能够很好地处理负荷扰动带来的频率波动问题, 而且在电力系统存在参数不确定时, 具有较好的鲁棒性, 同时降低了求解优化问题的频率, 节约了大量的计算资源.

## 参考文献

- 1 Abouheaf M, Gueaieb W, Sharaf A. Load frequency regulation for multi-area power system using integral reinforcement learning. *IET Generation Transm Distrib*, 2019, 13: 4311–4323
- 2 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, 14 [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, 14]
- 3 Chen H Y, Ye R G, Wang X, et al. Cooperative control of power system load and frequency by using differential games. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2015, 23: 882–897
- 4 Ma M M, Zhang C Y, Liu X J, et al. Distributed model predictive load frequency control of the multi-area power system after deregulation. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 5129–5139
- 5 Wang Z H, Liu Y H, Han M J. Load frequency control of multi-area time delay power system based on adaptive sliding mode. *J Donghua Univ (Nat Sci)*, 2021, 47: 129–134 [王政豪, 刘永慧, 韩美杰. 基于自适应滑模的多区域时滞电力系统负荷频率控制. *东华大学学报 (自然科学版)*, 2021, 47: 129–134]
- 6 Tan W, Xu Z. Robust analysis and design of load frequency controller for power systems. *Electric Power Syst Res*, 2009, 79: 846–853
- 7 Lakshmi R, Davidson R A. LMI based load frequency controller design for a deregulated power system with time delay. In: *Proceedings of International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, 2021. 1–7
- 8 Shiroei M, Ranjbar A M, Amraee T. A functional model predictive control approach for power system load frequency control considering generation rate constraint. *Int Trans Electr Energy Syst*, 2013, 23: 214–229
- 9 Pandey S K, Mohanty S R, Kishor N. A literature survey on load-frequency control for conventional and distribution generation power systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013, 25: 318–334
- 10 Zhang Y, Liu X J. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems. *IET 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]
- 11 Kong L F, Luo T X, Wu J. State contractive constraint-based model predictive load frequency control. *Proc CSEE*, 2007, 27: 18–22 [孔莲芳, 罗天祥, 吴捷. 基于状态收缩约束的模型预测负荷频率控制. *中国电机工程学报*, 2007, 27: 18–22]
- 12 Mohamed T H, Bevrani H, Hassan A A, et al. Decentralized model predictive based load frequency control in an interconnected power system. *Energy Convers Manage*, 2011, 52: 1208–1214
- 13 Ma M M, Chen H, Liu X J, et al. Distributed model predictive load frequency control of multi-area interconnected power system. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2014, 62: 289–298
- 14 Zheng Y, Zhou J Z, Xu Y H, et al. A distributed model predictive control based load frequency control scheme for multi-area interconnected power system using discrete-time Laguerre functions. *ISA Trans*, 2017, 68: 127–140
- 15 Yang J W, Sun X F, Liao K, et al. Model predictive control-based load frequency control for power systems with wind-turbine generators. *IET Renew Power Generation*, 2019, 13: 2871–2879
- 16 Venkat A N, Hiskens I A, Rawlings J B, et al. Distributed MPC strategies with application to power system automatic generation control. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2008, 16: 1192–1206
- 17 Li L Y, Shi P, Agarwal R K, et al. Event-triggered model predictive control for multiagent systems with communication constraints. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2021, 51: 3304–3316
- 18 Eqtami A, Dimarogonas D V, Kyriakopoulos K J. Novel event-triggered strategies for model predictive controllers. In: *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 2011. 3392–3397
- 19 Heemels W P M H, Donkers M C F, Teel A R. Periodic event-triggered control for linear systems. *IEEE Trans Automat Contr*, 2013, 58: 847–861

- 20 Wang B F, Huang J J, Wen C Y, et al. Event-triggered model predictive control for power converters. *IEEE Trans Ind Electron*, 2021, 68: 715–720
- 21 Su X, Zou Y Y, Niu Y G, et al. Event-triggered dual-mode distributed model predictive control. *IET control theory appl*, 2016, 33: 1139–1146 [苏旭, 邹媛媛, 牛玉刚, 等. 事件触发双模分布式预测控制. *控制理论与应用*, 2016, 33: 1139–1146]
- 22 He N, Shi D W. Event-based robust sampled-data model predictive control: a non-monotonic Lyapunov function approach. *IEEE Trans Circuits Syst I*, 2015, 62: 2555–2564
- 23 Zhou Y Q, Li D W, Xi Y G, et al. Event-triggered distributed robust model predictive control for a class of nonlinear interconnected systems. *Automatica*, 2022, 136: 110039
- 24 Yoo J, Johansson K H. Event-triggered model predictive control with a statistical learning. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2021, 51: 2571–2581
- 25 Sun Z Q, Dai L, Xia Y Q, et al. Event-based model predictive tracking control of nonholonomic systems with coupled input constraint and bounded disturbances. *IEEE Trans Automat Contr*, 2018, 63: 608–615
- 26 Zhang H, Zhang H M, Wang Z P. Event-triggered predictive path following control for unmanned autonomous vehicle. *J control decis*, 2019, 34: 2421–2427 [张皓, 张洪铭, 王祝萍. 基于事件触发的无人驾驶汽车路径跟随预测控制. *控制与决策*, 2019, 34: 2421–2427]

## Event-triggered distributed model predictive load frequency control of an interconnected power system

Miaomiao MA, Yumei LI, Jing CUI & Xiangjie LIU\*

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

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

**Abstract** This paper proposes an event-triggered distributed model predictive control (ET-DMPC) approach for the load frequency control (LFC) of a multi-area interconnected power system with constraints and disturbances. The large-scale interconnected power system is decomposed into several dynamically coupled subsystems. Considering generation rate constraint (GRC) and governor valve position restrictions, the distributed predictive control optimization problem is established. To reduce the computational burden and computing resource consumption, the event-triggered condition is constructed based on the error for predicted values and the actual system state. Under the event-triggered mechanism, the state measurement is only sent when the event-triggered condition is satisfied, and the distributed model predictive control optimization problem is solved. Meanwhile, the subsystem exchanges its optimal state trajectories with its neighboring subsystems. The simulation results indicate that the proposed control strategy has good performance and robustness in the presence of power system dynamic uncertainties and load changes and can significantly reduce the computational burden.

**Keywords** load frequency control, distributed model predictive control, event-triggered, interconnected power system, GRC