

基于动态事件触发的电解铝参与负荷频率预测控制策略

周寒英¹, 梁俊宇¹, 杨家全¹, 高境¹, 袁兴宇¹, 靳小龙²

(1. 云南电网有限责任公司 电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 新能源发电具有强波动性、随机性, 其大规模并网严重影响了电网频率稳定运行, 且新一代电力系统依托通信网络进行数据传输, 会消耗大量的网络资源, 增加电力系统的通信负担。针对上述问题, 研究了电解铝负荷参与电网二次调频的事件触发模型预测负荷频率控制问题。首先, 设计了考虑电解铝工业负荷参与电网二次调频的负荷频率控制模型; 其次, 提出了基于动态事件触发的模型预测负荷频率控制, 实现对风电功率或负荷波动的快速平抑和节约通信网络资源; 然后, 通过考虑火电机组和电解铝负荷的调频限制, 提出了基于辅助优化的求解方案, 来求解保证闭环系统渐近稳定性的反馈增益矩阵以及事件触发的加权矩阵; 最后, 通过三区域电力系统的仿真测试, 说明了所提控制方案有效提升了电力系统的调频能力, 并显著降低了调频所需的通信网络资源。

关键词: 电解铝负荷; 动态事件触发机制; 负荷频率控制; 模型预测控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25641

Load Frequency Predictive Control with Electrolytic Aluminum Load Participation Based on Dynamic Event-triggered

ZHOU Hanying¹, LIANG Junyu¹, YANG Jiaquan¹, GAO Jing¹, YUAN Xingyu¹, JIN Xiaolong²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: New energy power generation has strong volatility and randomness, and its large-scale grid connection seriously affects the stable operation of power grid frequency. The new generation of power system also relies on communication network for data transmission, which will consume a lot of network resources and increase the communication burden. In order to solve the above problems, the frequency control was studied which is in the event-triggered model of electrolytic aluminum load participating in the secondary frequency control of the power grid. Firstly, a load frequency control model was designed, considering the participation of electrolytic aluminum load in the secondary frequency control of the power grid. Secondly, a load frequency control strategy based on a dynamic event-triggered model predictive control was proposed to mitigate wind power or load fluctuations and conserve communication network resources. Furthermore, an auxiliary optimization-based load frequency control design scheme was developed by considering the limits of thermal power unit and electrolytic aluminum load, so as to solve feedback gain matrix and weighting matrix parameters to ensure asymptotic stability of the closed-loop system. Finally, simulation tests conducted on a three-area power system demonstrate that the proposed control scheme significantly enhances the frequency regulation capability while saving communication network resource.

Key words: electrolytic aluminum load; dynamic event-triggered mechanism (DETM); load frequency control (LFC); model predictive control (MPC)

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2407300); 云南电网有限责任公司科技项目 (YNKJXM20230080)

作者简介: 周寒英 (1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、云边协同控制、综合能源系统,

Email: 987767369@qq.com

通讯作者: 靳小龙 (1990—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为负荷侧资源灵活性挖掘利用及参与电网供需互动技术,

Email: xljin@tju.edu.cn

频率作为衡量电力系统供电质量的关键性指标之一,维持其在额定允许范围内波动是保持电力系统稳定和安全的关键^[1]。不平衡功耗和多区域互联电力系统会导致频率偏差。为了保证每个区域的频率和相邻区域的功率交换维持在规定的值,二次调频,也称作负荷频率控制(load frequency control, LFC)成为多区域互联电力系统安全稳定运行的一种重要手段^[2-3]。

近年来,随着新能源的大规模并网,对电力系统的频率稳定产生了挑战,传统火电机组由于调频能力受限,难以快速平抑新能源所带来的频率波动^[4]。另外,新一代电力系统依托通信网络进行数据的传输,会消耗大量的网络资源,增加网络化电力系统的通信负担^[5]。因此针对目前工业负荷参与电网调频的研究,面临着如何在充分挖掘工业负荷调频潜力以提升电网调频能力的同时,有效降低通信网络的通信负担的新问题。

目前一系列研究分析了高耗能工业负荷参与电网调频的有效性,其中,高能耗电解铝具有功率密集、热惯量大和控制特性好等特点^[6],具有巨大的调频潜力。文献[7]将电解铝负荷参与一次调频,缓解了风电波动引起的频率偏差。尽管该策略有效提升了频率调节的响应速度,但难以实现频率的无差调节。进一步,学者们研究了电解铝负荷参与LFC(即二次调频),弥补了电解铝负荷参与一次调频的缺陷,能更好地实现频率的无差调节,帮助电网快速恢复频率稳定。如文献[8]提出的电解铝负荷参与电网频率调节的综合控制策略,能够显著提升系统频率恢复速度和二次调频性能。文献[9]则探讨了火电机组和电解铝负荷共同平抑风电功率波动的效果。然而,上述研究未考虑发电约束、爬坡速率及电解铝调频容量等物理硬约束对电网性能的影响,且未考量电解铝负荷调频潜力与通信网络影响。鉴于此,如何设计有效的电解铝参与电网二次调频的控制策略,以快速平抑风电功率波动和恢复频率稳定,提升电网的调频性能,得到学者们广泛关注。

模型预测控制(model predictive control, MPC)具有处理硬约束、动态性能佳等优点^[10]。许多学者研究了电解铝负荷参与的模型预测LFC,如文献[11]针对含有风电和光伏的新能源互联电力系统,提出基于分布式MPC算法的LFC策略。文献[12]研究了基于MPC的电解铝负荷参与电网频率稳定控制策略问题。然而,上述文献将电解

铝负荷视为电网二次调频的扰动,忽略了其调频特性,二次调频效果难以得到有效的改善。此外,上述文献采用点对点专线的通信方式进行数据传输,难以适应具有大量可再生能源并网和工业负荷参与的新一代电力系统。

为克服上述问题,采用开放的通信网络进行信息交换成为一种经济灵活的选择。然而,由于网络的带宽限制,各网络节点间的资源竞争可能导致丢包、时滞等问题^[5,13]。此外,高频率的周期性采样不可避免地会给通信网络带来负担^[14]。

为缓解电力系统的通信负担,只有满足预先设定触发条件才进行数据传输的事件触发机制(event-triggered mechanism, ETM)是一种有效策略^[15-16]。目前,有学者已经提出了动态事件触发机制^[17-18](dynamic event-triggered mechanism, DETM),相比于静态ETM, DETM能够灵活管理数据包的释放,进一步节约网络资源。文献[19]提出了一种基于静态ETM的分布式模型预测控制策略,文献[20]提出了一种DETM的弹性MPC策略,能够进一步节约网络资源。但上述方法在节约网络资源上仍有局限。并且,上述方法未考虑电解铝负荷参与调频,且未使用MPC方法。

综上所述,本文针对如何在充分挖掘工业负荷调频潜力以提升电网调频能力的同时,有效降低通信网络的通信负担的新问题,提出了基于DETM的电解铝负荷参与电网二次调频的模型预测LFC策略。并且,通过三区域互联LFC系统进行仿真分析,验证了所提控制策略的有效性与优越性。主要贡献如下:

1)提出了面向电解铝负荷参与电网二次调频的负荷频率控制新模型。相比于文献[12]将电解铝负荷看作扰动建模,本文所提模型充分考虑电解铝负荷的特性,将电解铝负荷作为系统的状态参与电网调频,更加符合实际电解铝负荷参与电网调频的运行特性。

2)提出了基于DETM的模型预测LFC新方法。相比于文献[19-20]所提ETM方法,该方法增设了自适应调节变量,能够灵活地根据系统的参数与变量信息来动态调节事件触发阈值;并且,该方法通过MPC,充分考虑了实际电力系统中的发电、爬坡速率和工业负荷调频容量等约束,有效降低了通信网络负担的同时,提升了电网的调频能力。

1 考虑电解铝负荷参与电网二次调频的负荷频率控制模型

1.1 电解铝负荷特性及其有功功率控制模型

现代电解铝工业的生产普遍采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法,主要的设备是铝电解槽^[21]。文献[22]对电解铝电解槽等效电路进行了详细建模,电解铝负荷电解槽可以等效为一个电阻 R 和一个反电动势 E ,电解槽直流母线电压 V_d 表达式如下式所示:

$$V_d = I_d R + E \quad (1)$$

式中: I_d 为电解槽的直流电流; R 为电解槽串联的等效电阻。

其中, R 和 E 与电解质成分、电解槽温度和电极极距有关。

电解铝负荷的有功功率 P_{AL} 表达式如下:

$$P_{AL} = \frac{V_d(V_d - E)}{R} \quad (2)$$

从式(2)可知,电解铝负荷的有功功率 P_{AL} 与电解槽直流母线电压 V_d 紧密相关,可以通过改变负荷母线的高压侧电压、有载调压变压器的变比以及饱和电抗器电压来调节。为保证电解铝负荷调频的效率和调节精度,本文采取基于调节饱和电抗器的方法来改变电解铝负荷有功功率。

图1揭示了基于饱和电抗器的调节电解铝负荷有功功率的方法。首先,通过电解槽将电解铝的有功功率调节量参考值 ΔP_{ALref} 转化为电解槽直流电流与直流电流参考值之间的偏差量 ΔI_d ,经过PI控制器后得到控制电流偏差量 ΔI_{dcon} ,达到输出电流稳定的目的;其次,将控制电流偏差量输入饱和电抗器的控制电路中,通过控制直流励磁来改变铁心的饱和程度以改变饱和电抗器的电感值,从而调节饱和电抗器的压降增量 ΔV_{SR} 以实现电解铝负荷有功功率控制的快速响应;随后,基于饱和电抗器的调节方法建立如下电解铝负荷有功功率控制模型:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_d = -\frac{1}{T_{ES}} \Delta I_d + \frac{1}{T_{ES} K_{P-1}} \Delta P_{ALref} \\ \Delta \dot{I}_{dcon} = (K_I - \frac{K_P}{T_{ES}}) \Delta I_d + \frac{K_P}{T_{ES} K_{P-1}} \Delta P_{ALref} \\ \Delta \dot{P}_{AL} = \frac{K_{P-V} K_{SR}}{T_{SR}} \Delta I_{dcon} - \frac{1}{T_{SR}} \Delta P_{AL} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔI_d 、 ΔV_{SR} 分别为电解槽直流电流增量和饱和电抗器压降增量; ΔI_{dcon} 为经过PI控制后的电流

增量; ΔP_{AL} 、 ΔP_{ALref} 分别为电解铝的有功功率调节量和调节量的参考值; K_{P-1} 、 K_{P-V} 分别为 ΔP_{AL} 与 ΔI_d 、 ΔV_{SR} 的比例系数; T_{ES} 为电解铝负荷电解槽动态过程时间常数; K_{SR} 、 T_{SR} 为电解铝负荷饱和电抗器内部控制系统比例系数和时间常数; K_P 、 K_I 为电解铝负荷饱和电抗器稳流系统PI控制器参数。

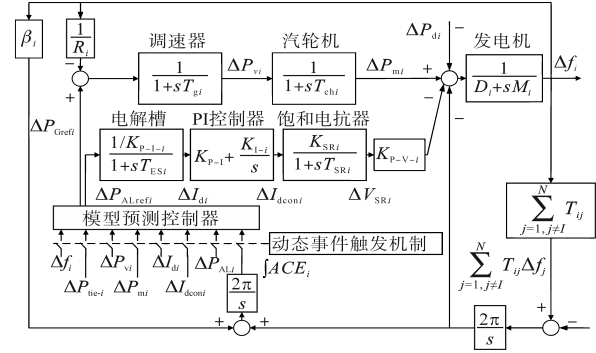


图1 第*i*个控制区域结构

Fig.1 Structure of the *i*th control area

1.2 电解铝负荷参与的多区域负荷频率控制模型

对于多区域LFC方案,每个控制区域的所有发电单元都简化为一个等效发电单元。图1给出了第*i*个控制区域的结构图。结合式(3)的模型,可以得到电解铝负荷参与调频的多区域LFC模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) + \mathbf{F}_c \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_c \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{x}(t) = \text{Vec}[\mathbf{x}_i(t)]_{i=1}^N \quad \mathbf{y}(t) = \text{Vec}[\mathbf{y}_i(t)]_{i=1}^N$$

$$\mathbf{u}(t) = \text{Vec}[\mathbf{u}_i(t)]_{i=1}^N \quad \mathbf{w}(t) = \text{Vec}[\mathbf{w}_i(t)]_{i=1}^N$$

$$\mathbf{x}_i(t) = [\Delta f_i \Delta P_{tie-i} \Delta P_{mi} \Delta P_{vi} \Delta P_{di} \Delta I_{dcon} \Delta P_{ALi}]^T$$

$$\mathbf{u}_i(t) = [\Delta P_{Grefi} \Delta P_{ALrefi}]^T$$

$$y_i(t) = ACE_i = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tie-i} \quad w_i(t) = \Delta P_{di}$$

$$\text{Vec}[\mathbf{x}_i(t)]_{i=1}^N = [\mathbf{x}_1^T(t) \mathbf{x}_2^T(t) \cdots \mathbf{x}_N^T(t)]^T$$

式中: N 为控制区域的数量; $\mathbf{A}_c$ 、 $\mathbf{B}_c$ 、 $\mathbf{C}_c$ 、 $\mathbf{F}_c$ 为系数矩阵; $\mathbf{x}(t)$ 为系统的状态变量; $\mathbf{u}(t)$ 为系统的控制变量,它包括火电机组的二次调频参考值 ΔP_{Grefi} 以及电解铝负荷参与的有功功率调节参考值 ΔP_{ALrefi} ; $\mathbf{y}(t)$ 为区域控制误差,作为系统的输出变量。

对于第*i*个控制区域, Δf_i 、 ΔP_{mi} 、 ΔP_{vi} 、 ΔP_{di} 和 ΔP_{tie-i} 分别为频率、发电机机械输出、阀门位置、负荷扰动和联络线有功功率的偏差; ACE_i 、 M_i 、 R_i 、 T_{gi} 、 T_{chi} 、 D_i 、 β_i 和 T_{ij} 分别为区域控制误差、发电机惯性系数、一次调频下垂特性系数、调速器时间常数、汽轮机时间常数、发电机阻尼系数、频率偏

置因子和第*i*个与第*j*个电力区域之间的联络线同步系数。

为了便于MPC的处理,本文以 T_p 为离散周期,采用欧拉法将式(4)离散化;同时,考虑到多区域LFC方案,各控制区域之间的联络线有功功率交换满足 $\sum_{i=1}^N \Delta P_{tie-i} = 0$ 的等式条件,LFC系统需要进行降阶处理。降阶离散时间LFC模型为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}\mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{e}^{A \cdot T_p} & \mathbf{B} &= \int_0^{T_p} \mathbf{e}^{A \cdot T_p} \mathbf{B}_c \, dt \\ \mathbf{F} &= \int_0^{T_p} \mathbf{e}^{A \cdot T_p} \mathbf{F}_c \, dt & \mathbf{C} &= \mathbf{C}_c \end{aligned}$$

假设负荷扰动满足以下条件:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{w}^T(k) \mathbf{w}(k) \leq \varpi \|\mathbf{w}(k)\|^2 \leq p \quad (6)$$

其中, $\varpi \geq 0, p \geq 0$ 为给定的常数。

本文通过充分挖掘电解铝负荷的特性,将电解铝负荷作为系统的状态参与电网调频,建立了如式(5)所示的电解铝负荷参与调频的多区域LFC模型。其状态可以直接反映系统整体的运行情况。通过监控和调节火电机组以及电解铝负荷,可以更快更准确地实现调频控制,提高系统的稳定性和可靠性。

2 基于动态事件触发的模型预测负荷频率控制

2.1 动态事件触发机制

为了减轻通信负担,本文采用如下的DETM^[18]:

$$\begin{cases} s_{m+1} = \min_{k \in \mathbb{N}^+} \{ k > s_m | \lambda_1 \sigma(k) + \rho_1 r(k) \mathbf{x}^T(k) \times \\ \quad \Phi(k) \mathbf{x}(k) - \rho_2 \mathbf{e}^T(k) \Phi(k) \mathbf{e}(k) \leq 0 \} \\ \sigma(k+1) = \lambda_2 \sigma(k) + \rho_3 r(k) \mathbf{x}^T(k) \Phi(k) \mathbf{x}(k) - \\ \quad \rho_4 \mathbf{e}^T(k) \Phi(k) \mathbf{e}(k) \\ r(k) = \frac{\mathbf{x}^T(k) \mathbf{x}(k) + \beta}{\delta \mathbf{e}^T(k) \mathbf{e}(k) + (1-\delta) [\mathbf{x}^T(k) \mathbf{x}(k) + \beta]} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(s_m)$$

式中: s_m 为第*m*个数据包释放时刻; $\sigma(k)$ 为动态变量且满足 $\sigma(0) \geq 0$; $r(k)$ 为一个自适应调节变量; $\Phi(k)$ 为权重矩阵; $\lambda_1 \geq 0, 0 \leq \lambda_2 \leq 1, \rho_1 \geq 0,$

$\rho_2 > 0, \rho_3 \geq 0, \rho_4 > 0, 0 \leq \delta < 1, \beta > 0$ 是给定的常数; $\mathbf{e}(k)$ 为当前系统状态与上一触发时刻系统状态的误差。

由式(7)的DETM可以得到:

$$0 < r(k) \leq \frac{1}{1-\delta} \triangleq r_{\max} \quad (8)$$

设

$$\tilde{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}(s_m) \quad \forall k \in [s_m, s_{m+1}) \quad (9)$$

可以得到:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{x}(k) - \tilde{\mathbf{x}}(k) \quad (10)$$

本文所采用的如式(7)所示的DETM触发条件不仅与动态变量 $\sigma(k)$ 有关,还与自适应调节变量 $r(k)$ 以及一些调节系数相关。随着动态变量 $\sigma(k)$ 、自适应调节变量 $r(k)$ 、调节系数的改变,DETM触发条件也随之改变,即DETM管理数据包的能力也随之改变。因此,通过设置合适的动态变量 $\sigma(k)$ 、自适应调节变量 $r(k)$ 以及调节系数,可以减少数据包的释放,从而缓解网络化电力系统的通信负担。

2.2 基于模型预测的负荷频率控制

在DETM的基础上,构造了如下的状态反馈控制器:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{H}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{H}(k)$ 为待设计的控制器参数。

将式(10)和式(11)代入式(5)所示系统中可以得到如下的闭环系统:

$$\mathbf{x}(k+1) = [\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{H}(k)] \mathbf{x}(k) - \mathbf{B}\mathbf{H}(k) \mathbf{e}(k) + \mathbf{F}\mathbf{w}(k) \quad (12)$$

接着, (n,k) 表示向量在*k*时刻对未来*k+n*时刻的预测值。可以得到如下的预测模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(n+1,k) = [\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{H}(k)] \mathbf{x}(n,k) - \\ \quad \mathbf{B}\mathbf{H}(k) \mathbf{e}(n,k) + \mathbf{F}\mathbf{w}(n,k) \\ \sigma(n+1,k) = \lambda_2 \sigma(n,k) + \rho_3 r(n,k) \mathbf{x}^T(n,k) \times \\ \quad \Phi(k) \mathbf{x}(n,k) - \rho_4 \mathbf{e}^T(n,k) \Phi(k) \mathbf{e}(n,k) \end{cases} \quad (13)$$

以系统状态、火电机组和电解铝负荷控制输入为控制目标,构造如下的目标函数:

$$J^{\infty}(k) = \sum_{n=0}^{\infty} [\|\mathbf{x}(n,k)\|_{\mathbf{M}}^2 + \|\mathbf{u}(n,k)\|_{\mathbf{W}}^2] \quad (14)$$

式中: $\mathbf{M}, \mathbf{W}$ 为代价函数的权重系数矩阵。

系统状态约束如下:

$$|[\mathbf{x}(n,k)]_v| \leq [\bar{\mathbf{x}}]_v \quad v \in \{1, 2, \dots, n_x\} \quad (15)$$

火电机组和电解铝负荷调频的上、下限以及调频爬坡速率限制如下:

$$|[\mathbf{u}(n,k)]_q| \leq [\bar{\mathbf{u}}]_q \quad q \in \mathbb{Q} \triangleq \{1, 2, \dots, n_u\} \quad (16)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{\min} \leq \Delta \mathbf{u}(n,k) \leq \Delta \mathbf{u}_{\max} \quad (17)$$

基于上述约束条件,给出如下优化问题 OP_1 :

$$\begin{cases} \min_{u(k)} \max_{u(k)} J^\infty(k) \\ \text{s.t. 式 (13), 式 (15)~式 (17)} \end{cases} \quad (18)$$

$$[\mathbf{x}^\top(n,k), \sigma^{\frac{1}{2}}(n,k)]^\top \in \Lambda \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta V(n,k) &\leq -(\|\mathbf{x}(n,k)\|_M^2 + \|\mathbf{u}(n,k)\|_W^2) + \\ &\quad \alpha \mathbf{w}^\top(n,k) \mathbf{w}(n,k) \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\Lambda \triangleq \{[\mathbf{x}^\top(n,k), \sigma^{\frac{1}{2}}(n,k)]^\top | \mathbf{x}^\top(n,k) \tilde{R} \mathbf{x}(n,k) + \sigma(n,k) \leq \gamma\} \quad (21)$$

这里的 $\tilde{R}$ 为待设计的权重系数, $\gamma > 0$ 为待优化的性能指标; $\Delta V(n,k) = V(n+1,k) - V(n,k)$ 中的 $V(n,k)$ 为待设计的李雅普诺夫函数。

在 OP_1 中,本文采用的 MPC 算法在约束条件中除了考虑了对系统状态硬约束外,还考虑了火电机组和电解铝负荷调频的上、下限以及它们的调频爬坡速率限制。在这些物理硬约束的条件下,通过求解优化问题,设计出的控制器作用于系统,有效解决了电力系统中的物理硬约束对系统的影响,提高了系统的动态性能。

定义 1: 对于式 (12) 所示系统而言,当 $[\mathbf{x}^\top(n,k), \sigma^{\frac{1}{2}}(n,k)]^\top \in \Lambda$ 且允许干扰 $\mathbf{w}(n,k)$, 如果 $[\mathbf{x}^\top(n+1,k), \sigma^{\frac{1}{2}}(n+1,k)]^\top \in \Lambda$, 则集合 Λ 称为正不变集。由于直接求解优化问题比较困难,所以需要设计辅助优化问题来求解 OP_1 。

3 基于辅助优化的事件触发模型预测负荷频率控制策略设计

为了设计一个基于 DETM 的负荷频率控制系统(式(12))的 MPC 策略,首先建立了一个基于线性矩阵不等式的辅助 OP 来求解 OP_1 。

3.1 辅助 OP 设计

首先构造如下的包含系统状态以及动态变量的李雅普诺夫函数:

$$V[\sigma(k), \mathbf{x}(k)] = \mathbf{x}^\top(k) \tilde{R} \mathbf{x}(k) + \sigma(k) \quad (22)$$

在每个 k 时刻,假设如下条件成立:

$$\begin{aligned} V[\sigma(n+1,k), \mathbf{x}(n+1,k)] - V[\sigma(n,k), \mathbf{x}(n,k)] \\ \leq -[\|\mathbf{x}(n,k)\|_M^2 + \|\mathbf{u}(n,k)\|_W^2] + \alpha \mathbf{w}^\top(n,k) \mathbf{w}(n,k) \end{aligned} \quad (23)$$

将式(22)两边从 $n=0$ 加到 $n=\infty$, 可得:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} [\|\mathbf{x}(n,k)\|_M^2 + \|\mathbf{u}(n,k)\|_W^2] &\leq \\ V[\sigma(k), \mathbf{x}(k)] + \alpha \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{w}^\top(n,k) \mathbf{w}(n,k) \end{aligned} \quad (24)$$

将式(6)代入式(24)中,有:

$$\sum_{n=0}^{\infty} [\|\mathbf{x}(n,k)\|_M^2 + \|\mathbf{u}(n,k)\|_W^2] \leq V[\sigma(k), \mathbf{x}(k)] + \alpha \varpi \quad (25)$$

将式(21)应用到式(24)中,有

$$J^\infty(k) \leq V[\sigma(k), \mathbf{x}(k)] + \alpha \varpi \leq \gamma + \alpha \varpi \quad (26)$$

基于上述的条件,给出如下的辅助 OP_2 :

$$\begin{cases} \min_{H, \Phi} \gamma \\ \text{s.t. 式(13)、式(15)~式(17)、式(19)、式(20)} \end{cases} \quad (27)$$

注意到 OP_2 不能直接求解,接下来将约束转换为线性矩阵不等式,得到下述定理 1。

定理 1: 令 $\lambda_1 \geq 0, 0 \leq \lambda_2 \leq 1, \rho_1 \geq 0, \rho_2 > 0, \rho_3 \geq 0, \rho_4 > 0, 0 \leq \delta < 1, \beta > 0$ 和 $\alpha > 0$, 以及矩阵 $\mathbf{M} > 0$ 和 $\mathbf{W} > 0$, 如果存在 $\gamma > 0$ 和矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}(k) > 0, \mathbf{U} > 0, \mathbf{X} > 0, \mathbf{T}(k) > 0, \mathbf{Y}(k) > 0$ 和 $\mathbf{G}(k)$ 使得对于所有的 $q \in \mathbb{Q}, v \in \mathbb{N}$ 以下线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{(1,1)} & * \\ \mathbf{B}_1^{(2,1)} & \mathbf{B}_1^{(2,2)} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{B}}_1^{(1,1)} & * \\ \mathbf{Y}(k) & \mathbf{U} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (29)$$

$$[\mathbf{U}]_{qq} \leq [\bar{\mathbf{u}}]_q \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{B}}_1^{(1,1)} & * \\ \mathbf{G}(k) & \mathbf{X} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (31)$$

$$[\mathbf{X}]_{vv} \leq [\bar{\mathbf{x}}]_v \quad (32)$$

其中

$$\mathbf{B}_1^{(1,1)} = \text{diag}\{\tilde{\mathbf{B}}_1^{(1,1)}, \tilde{\mathbf{B}}_1^{(2,2)}, -\alpha \gamma \mathbf{I}\}$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_1^{(1,1)} = \tilde{\mathbf{Q}}(k) - \mathbf{G}^\top(k) - \mathbf{G}(k)$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_1^{(2,2)} = \rho_4 [\mathbf{T}(k) - \mathbf{G}^\top(k) - \mathbf{G}(k)]$$

$$\mathbf{B}_1^{(2,1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{G}(k) + \mathbf{B}\mathbf{Y}(k) & -\mathbf{B}\mathbf{Y}(k) & \gamma \mathbf{F} \\ \mathbf{W}^{\frac{1}{2}} \mathbf{Y}(k) & -\mathbf{W}^{\frac{1}{2}} \mathbf{Y}(k) & 0 \\ \mathbf{M}^{\frac{1}{2}} \mathbf{G}(k) & 0 & 0 \\ \sqrt{\rho_3 r_{\max}} \mathbf{G}(k) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1^{(2,2)} = \text{diag}\{-\tilde{\mathbf{Q}}(k), -\gamma \mathbf{I}, -\gamma \mathbf{I}, -\mathbf{T}(k)\}$$

因此,条件式(15)~式(21)就得到了保证,反馈增益矩阵 $\mathbf{H}(k)$ 和加权矩阵 $\Phi(k)$ 设计如下:

$$\begin{cases} \mathbf{H}(k) = \mathbf{Y}(k)\mathbf{G}^{-1}(k) \\ \Phi(k) = \gamma\mathbf{T}^{-1}(k) \end{cases} \quad (33)$$

3.2 正不变集的充分条件

为了保证集合 Λ 是正不变集,给出了定理2。

定理2:给出满足 $0 \leq \theta \leq 1$ 的标量 θ ,如果存在标量 $\gamma > 0$ 和正定矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}(k)$ 使得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & * & * \\ \mathbf{x}(k) & \tilde{\mathbf{Q}}(k) & * \\ \sqrt{\sigma(k)} & 0 & \gamma \end{bmatrix} \geq 0 \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1^{(1,1)} & * \\ \mathbf{C}_1^{(2,1)} & \mathbf{C}_1^{(2,2)} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (35)$$

其中

$$\mathbf{C}_1^{(1,1)} = \text{diag} \left\{ \tilde{\mathbf{C}}_1^{(1,1)}, \tilde{\mathbf{C}}_1^{(2,2)}, -\frac{\theta}{p} \mathbf{I} \right\}$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_1^{(1,1)} = (1 - \theta) [\tilde{\mathbf{Q}}(k) - \mathbf{G}^T(k) - \mathbf{G}(k)]$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_1^{(2,2)} = \rho_4 [\mathbf{T}(k) - \mathbf{G}^T(k) - \mathbf{G}(k)]$$

$$\mathbf{C}_1^{(2,1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{G}(k) + \mathbf{B}\mathbf{Y}(k) & -\mathbf{B}\mathbf{Y}(k) & \mathbf{F} \\ \sqrt{\rho_3 r_{\max}} \mathbf{G}(k) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_1^{(2,2)} = \text{diag} \{ -\tilde{\mathbf{Q}}(k), -\mathbf{T}(k) \}$$

那么, Λ 是正不变集。可将 $\mathbf{OP}_2$ 转化为以下辅助 $\mathbf{OP}_3$:

$$\begin{cases} \min \gamma \\ \text{s.t. 式 (17), 式 (28)~式 (32), 式 (34), 式 (35)} \end{cases} \quad (36)$$

3.3 事件触发模型预测负荷频率控制设计步骤

基于3.2节的 $\mathbf{OP}_3$,本节给出负荷频率控制系统式(12)的基于DETM的MPC策略设计步骤。

步骤1:在 $k=0$ 时刻,设置初始状态 $\mathbf{x}(0)$,权重系数矩阵 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{W}$,参数 $\lambda_1, \lambda_2, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \beta, \delta, \alpha, \theta, p$ 以及动态变量 $\sigma(0)$;

步骤2:如果误差 $e(k)$ 满足DETM(式(7))中的事件触发条件,那么更新 $\mathbf{x}(s_m)$ 为 $\mathbf{x}(k)$;否则直接在控制器上执行 $\mathbf{x}(s_m)$;

步骤3:通过求解优化问题 $\mathbf{OP}_3$ 得到控制器增益 $\mathbf{H}(k)$ 和权重矩阵 $\Phi(k)$,通过式(11)计算 $\mathbf{u}(k)$;

步骤4:在系统式(5)中执行 $\mathbf{u}(k)$,设置 $k = k + 1$ 并返回到步骤2。

4 仿真分析

本文搭建了基于MPC的电解铝负荷参与调频的三区域LFC模型,三区域火电机组和电解铝

负荷参数来自文献[9]和文献[23],分别如表1、表2所示。给出状态初始值 $\mathbf{x}_1(0) = [0.009, 0, \dots, 0]^T$, $\mathbf{x}_2(0) = [0.007, 0, \dots, 0]^T$, $\mathbf{x}_3(0) = [0.005, 0, \dots, 0]^T$, 令 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0.5, \rho_1 = 0.3, \rho_2 = 12, \rho_3 = 5.5, \rho_4 = 2, \delta = 0.4, \theta = 0.6, p = 0.017, \beta = 0.5$ 和 $\alpha = 2$,加权矩阵为 $\mathbf{M} = 10\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{W} = \mathbf{I}$ 。

整个系统的总装机容量为3 000 MW,其中,火电机组总装机容量为1 500 MW,电解铝负荷总装机容量为1 000 MW。

表1 三区域火电机组的参数

参数	T_{ch}	T_g	R	D	β
区域1	0.30	0.10	0.05	1.0	21.0
区域2	0.40	0.17	0.05	1.5	21.5
区域3	0.35	0.20	0.05	1.8	21.8
$T_{12} = 0.1986, T_{23} = 0.1830, T_{31} = 0.2148$					

表2 三区域电解铝负荷的参数

参数	T_{ES}	T_{SR}	K_P	K_I	K_{SR}
区域1	0.2	0.1	10.5	1.5	7.5
区域2	0.19	0.097	10.45	1.45	7.32
区域3	0.22	0.12	10.6	1.53	7.73

4.1 动态事件触发机制的优越性分析

为说明所采用的动态事件触发机制的优越性,在系统存在风电功率波动的情况下,对基于DETM(式(7))的电解铝负荷参与调频的MPC算法控制效果进行仿真。

在系统存在风电功率波动的情况下,图2给出了风电功率波动下的DETM演化轨迹。图3中,以区域1为例,给出了电解铝负荷参与调频的风电功率波动平抑效果。

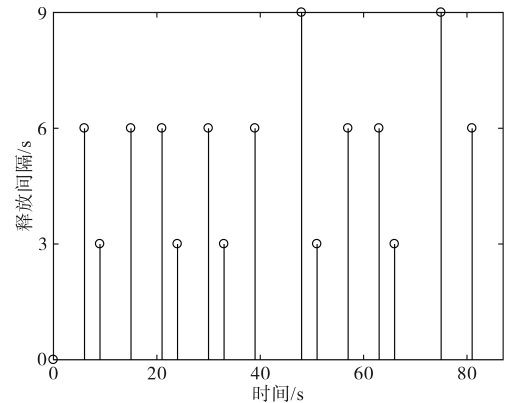


图2 风电功率波动下的DETM演化

Fig.2 Evolution of DETM under wind power fluctuations

从图3可以看出,在系统存在风电功率波动的情况下,通过火电机组和电解铝负荷共同作

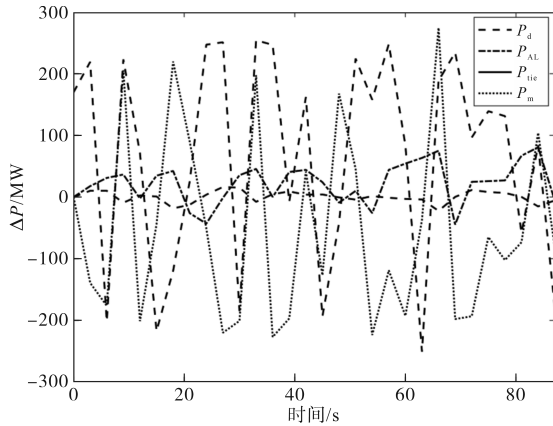


图3 电解铝负荷参与调频的风电功率波动平抑效果

Fig.3 Wind power fluctuations smoothing effect of electrolytic aluminum loads participating in frequency modulation

用,能够将系统的联络线功率偏差稳定在一定范围内。同时,图2描述了 DETM 的数据包释放时刻和释放间隔(即当前时刻和最后一个释放数据包时刻之间的间隔),从中可以看到,利用 DETM 可以显著降低数据包释放的频率,从而有效节约网络资源。

为了进一步说明本文所采用的 DETM 的优越性,通过设置合适的参数,如令 $\delta = 0$, $\lambda_1 = 1$, $\rho_1 = \rho_2 \rho_3$ 以及 $\rho_4 = 1$, 可以将 DETM 退化为一般的 DETM(文献[18])。在表3中,列出了基于 DETM 的模型预测 LFC 算法和基于 DETM(文献[18])的 MPC 算法的误差统计学指标,包括误差绝对值之和(SAE)、误差平方值之和(SSE)、时间乘以误差绝对值之和(STAE)、时间乘以误差平方值之和(STSE)定义为

$$\begin{cases} SAE = \sum_{k=0}^{T_s/T_p} T_p (|ACE_1| + |ACE_2| + |ACE_3|) \\ SSE = \sum_{k=0}^{T_s/T_p} T_p (|ACE_1|^2 + |ACE_2|^2 + |ACE_3|^2) \\ STAE = \sum_{k=0}^{T_s/T_p} k T_p^2 (|ACE_1| + |ACE_2| + |ACE_3|) \end{cases} \quad (37)$$

其中, $T_s = 90 \text{ s}$, $T_p = 3 \text{ s}$ 。DETM(式(7))和 DETM(文献[18])的触发率分别为 56.67% 和 86.67%。

表3 不同算法在风电功率波动下的性能指标

Tab.3 Performance indicators of different algorithms under wind power fluctuations

性能指标	SAE	SSE	STAE	STSE
基于 DETM(式(7))的模型预测 LFC 算法	4.692 5	0.481 6	41.001 6	3.504 5
基于 DETM(文献[18])的模型预测 LFC 算法	4.560 4	0.465 1	38.238 6	3.131 3

从表3和触发率的结果对比来看,相比于基

于 DETM(文献[18])的模型预测 LFC 算法,本文所提出的基于 DETM(式(7))的模型预测 LFC 算法,能够在略微牺牲控制性能的情况下,显著降低触发率,进一步节约了 30% 的网络资源。此外,该算法通过事件触发机制减少调频次数,可以降低电解铝负荷参与调频的调频成本和维护成本,能够带来一定的经济效益。

4.2 模型预测负荷频率控制性能分析

假设系统在前 90 s,三个区域分别存在 0.09(标么值)、0.06(标么值)、0.03(标么值)的阶跃扰动情况下,比较 MPC 和最优控制这两种控制方法的效果。以区域 1 为例,不同控制方法的控制效果如图4所示。同时,在表4中,列出了 MPC 和最优控制的误差统计学指标。

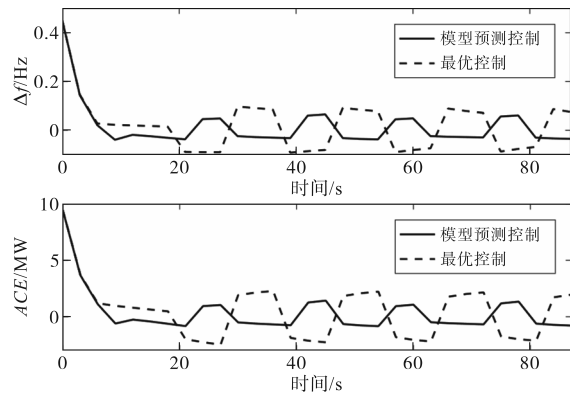


图4 不同控制方法的控制效果

Fig.4 The control effect of optimal controller

从图4可以清晰看出, MPC 控制器通过滚动优化和反馈校正,有效抑制频率偏差和区域控制误差波动,优于固定的控制输入最优控制器。此外,从表4可以看出, MPC 相对于最优控制表现出更好的控制性能,尤其在 STAE 和 STSE 的误差统计学指标上分别减少了 42.75% 和 59.58%。

表4 MPC 和最优控制的性能指标

Tab.4 Performance indicators for MPC and optimal control

性能指标	SAE	SSE	STAE	STSE
MPC	2.297 7	0.240 1	8.582 2	0.155 2
最优控制	2.744 2	0.254 8	14.990 6	0.384 0

4.3 电解铝负荷参与调频的优越性分析

采用一段图3所示的 90 s 的风电功率波动。以区域2为例,图5给出了在风电功率波动下,将电解铝负荷作为系统状态参与调频、将电解铝负荷作为扰动参与调频以及无电解铝负荷参与调频的 Δf 和 ACE 轨迹。图6为不同电解铝负荷参与调频建模方法的联络线功率波动曲线。表5列出了几种不同电解铝负荷参与调频建模方法的

性能指标。

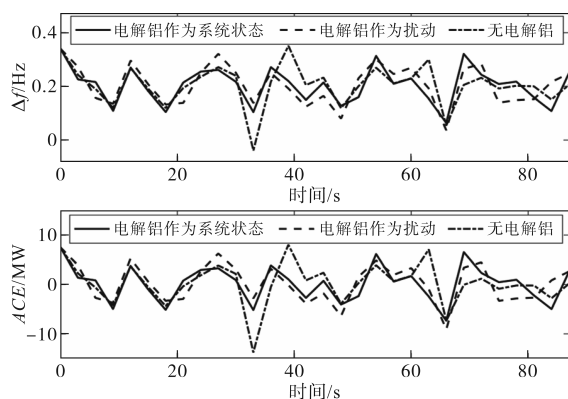


图5 不同电解铝负荷参与调频建模方法的 Δf 和 ACE 轨迹

Fig.5 Δf and ACE trajectories of different electrolytic aluminum loads participation in frequency modulation modeling approach

从图5可以看出,当电解铝负荷参与调频时,系统的频率偏差都能够稳定在 ± 0.4 Hz之间,但将电解铝负荷作为扰动参与调频频率偏差波动较大;而电解铝负荷不参与调频时,系统的频率偏差最大波动超过了 ± 0.5 Hz,会给电网带来巨大损害。并且,从图6可以看出,对于快速变化的风电功率波动,将电解铝负荷作为系统状态参与调频,联络线功率稳定在 ± 20 MW以内;而将电解铝负荷作为扰动参与调频或仅依靠火电机组调频,联络线功率波动较大,最大波动约为80 MW。这是由于电解铝负荷作为系统状态参与调频,能充分发挥其特性,实现对系统状态的实时监测,及时抑制功率波动。反之,若将其作为扰动,未考虑电解铝负荷特性,可能导致联络线功率调节的不可控性,增加了调节难度,且仅依靠火电机组调节速度较慢,平抑联络线功率波动效果也较差。此外,表5数据表明,将电解铝负荷作为系统状态设计调频策略,显著降低了误差统计学指标。特别地,相较于视其为扰动参与调频的 SAE 和 $STAE$ 分别减少了12.19%和13.04%,对比无电

表5 不同电解铝负荷参与调频方法在风电功率波动下的性能比较

Tab.5 Comparison of the performance of different electrolytic aluminum loads participation in frequency modulation modeling approach under wind power fluctuations

性能指标	SAE	SSE	$STAE$	$STSE$
电解铝负荷作为系统状态参与调频	4.692 5	0.481 6	41.001 6	3.504 5
电解铝负荷作为扰动参与调频	5.344 0	0.528 7	47.150 1	3.711 3
电解铝不参与调频	5.078 3	0.561 7	41.039 6	3.944 8

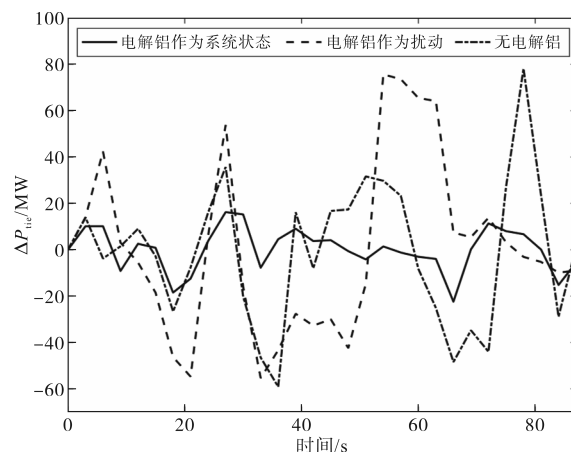


图6 不同电解铝负荷参与调频建模方法的联络线功率波动曲线

Fig.6 The tie-line power fluctuation curves of different electrolytic aluminum loads participation in frequency modulation modeling approach

解铝负荷参与调频的 SSE 和 $STSE$ 分别减少了14.26%和11.16%。因此,将电解铝负荷作为系统状态参与调频具有更好的控制性能。

5 结论

针对电解铝负荷参与二次调频的电力系统,提出了基于DETM的模型预测负荷频率控制策略。通过对三区域互联LFC系统仿真结果分析,可以得到以下结论:

- 1)采用所提控制方法相比已有方法能够在保证系统控制性能的同时节约30%的网络资源,能够有效降低系统调频成本和维护成本。
- 2)采用基于MPC的控制方法相比于传统的最优控制方法,频率误差指标 $STAE$ 和 $STSE$ 分别减少42.75%和59.58%,具有更好的动态性能。
- 3)所提控制方法将电解铝负荷作为系统状态,相较于将电解铝视为扰动和无电解铝参与的控制方法,频率误差指标 SAE 和 $STAE$ 均减少达11%,且能将频率偏差和联络线功率分别稳定在 ± 0.4 Hz和 ± 20 MW以内,显著提升了LFC的控制性能。

参考文献

- [1] ZHANG Y, SHI X, ZHANG H, et al. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 136: 107744.
- [2] MA M, ZHANG C, LIU X, et al. Distributed model predictive load frequency control of the multi-area power system after deregulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70: 107744.

- 2017, 64: 5129–5139.
- [3] SHANGGUAN X C, HE Y, ZHANG C K, et al. Resilient load frequency control of power systems to compensate random time delays and time-delay attacks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(5): 5115–5128.
 - [4] 骆钊, 高培淇, 聂灵峰, 等. 风-铝联合系统协同频率控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 49–57.
LUO Zhao, GAO Peiqi, NIE Lingfeng, et al. Research on cooperative frequency control strategy with wind-aluminum combination system[J]. Electric Machines and Control Application, 2023, 50(4): 49–57.
 - [5] LIU S, LIU P X. Distributed model-based control and scheduling for load frequency regulation of smart grids over limited bandwidth networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 1814–1823.
 - [6] YU Q, XU J, LIAO S, et al. Adaptive load control of electrolytic aluminum for power system frequency regulation based on the aluminum production operation state[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1259–1269.
 - [7] JIANG H, LIN J, SONG Y, et al. Demand side frequency control scheme in an isolated wind power system for industrial aluminum smelting production[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 844–853.
 - [8] SHEN X, SHU H, FAN Z, et al. Integrated control strategy for electrolytic aluminum load participation in frequency modulation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56955–56964.
 - [9] 丁鑫, 徐箭, 孙元章, 等. 联网型高耗能电解铝工业电网源荷协调平抑风电功率波动控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 47–55.
DING Xin, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Source-load coordinated control strategy for smoothing wind power fluctuation in grid-connected high energy consuming electrolytic aluminum industrial power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 47–55.
 - [10] 姜艳姝, 遇言, 赵怀明. 基于模型预测控制的PWM整流器直接功率控制[J]. 电气传动, 2015, 45(7): 21–25.
JIANG Yanshu, YU Yan, ZHAO Huaiming. Direct power control of three phase PWM rectifier using model predictive control[J]. Electric Drive, 2015, 45(7): 21–25.
 - [11] 张怡, 常鹏飞. 新能源电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电气传动, 2022, 52(20): 70–75.
ZHANG Yi, CHANG Pengfei. Distributed model predictive load frequency control for power system with renewable energy[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 70–75.
 - [12] 骆钊, 聂灵峰, 田肖, 等. 基于模型预测控制的电解铝负荷参与电网频率稳定控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 1–11.
LUO Zhao, NIE Lingfeng, TIAN Xiao, et al. Control strategy of electrolytic aluminum load participating in power network frequency stability based on model predictive control[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 1–11.
 - [13] 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[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 129–134.
 - [14] WANG Zhenghao, LIU Yonghui, HAN Meijie. Load frequency control of multi-area time delay power system based on adaptive sliding mode[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2021, 47(3): 129–134.
 - [15] 杨飞生, 汪璟, 潘泉. 基于事件触发机制的网络控制研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(6): 969–977.
YANG Feisheng, WANG Jing, PAN Quan. A survey of networked event-triggered control[J]. Control and Decision, 2018, 33(6): 969–977.
 - [16] 苏博, 王洪斌, 高静. 事件触发策略下多AUV抗干扰固定时间编队控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1113–1123.
SU Bo, WANG Hongbin, GAO Jing. Anti-disturbance fixed-time formation control of multi-AUVs via event-triggered strategy[J]. Control Theory and Applications, 2021, 38(7): 1113–1123.
 - [17] WAN X, WEI F, ZHANG C K, et al. Hybrid variables-dependent event-triggered model predictive control subject to polytopic uncertainties[J]. International Journal of Systems Science, 2022, 53(14): 3042–3055.
 - [18] SHI T, SHI P, WU Z G. Dynamic event-triggered asynchronous MPC of Markovian jump systems with disturbances[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(11): 11639–11648.
 - [19] 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[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(7): 1392–1403.
MA Miaomiao, LI Yumei, CUI Jing, et al. Event-triggered distributed model predictive load frequency control of an interconnected power system[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2023, 53(7): 1392–1403.
 - [20] LIU Y, CHEN Y, LI M. Dynamic event-based model predictive load frequency control for power systems under cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 715–725.
 - [21] 王醒钟, 成庚, 崔新芳. 全系列工业电解槽长时间停电的对策及状态特征[J]. 有色冶金节能, 1998, 3: 16–19.
WANG Xingzhong, CHENG Geng, CUI Xinfang. Countermeasures and state characteristics of long time power cut on whole series industrial cells[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 1998, 3: 16–19.
 - [22] XU J, LIAO S, SUN Y, et al. An isolated industrial power system driven by wind-coal power for aluminum productions: a case study of frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 471–483.
 - [23] PENG C, ZHANG J, YAN H. Adaptive event-triggering H_∞ load frequency control for network-based power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1685–1694.

收稿日期: 2024-02-05

修改稿日期: 2024-08-02