

引用格式:姚若钰,王馨杉.电动汽车充电站参与电网辅助调频的控制方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):19-28.

Citation: YAO Ruoyu, WANG Xinshan. Control method of electric vehicle charging station participating in auxiliary frequency regulation for power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 19-28.

电动汽车充电站参与电网辅助调频的控制方法

姚若钰, 王馨杉

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 100096)

摘要: 电动汽车 (electric vehicle, EV) 参与电网辅助调频, 即利用电动汽车的“源-荷”特性来快速消除系统频率波动。然而, 在保持系统性能条件下, 如何保障大规模电动汽车辅助调频的经济性仍然是个挑战。为此, 针对大规模 EV 聚合充电站辅助参与电网的负荷频率控制 (load frequency control, LFC) 问题, 提出分布式经济模型预测控制 (distributed economic model predictive control, DEMPC) 方法, 在经济模型预测控制的基础上, 以单层结构控制双层分层, 实现多个区域电网的分布式协同控制。通过经济成本函数的凸松弛实现控制器的优化, 利用每个子系统控制器与相邻子系统的协同工作确保整个系统的控制性能, 以合适的终端成本函数保证系统的渐进稳定性。仿真结果可以表明该方法的有效性和优越性。

关键词: 分布式经济模型预测控制; 负荷频率控制; 电动汽车; 多区域互联电网; 系统稳定性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.002 **中图分类号:** TM73 **文章编号:** 1673-9140(2025)01-0019-10

Control method of electric vehicle charging station participating in auxiliary frequency regulation for power grid

YAO Ruoyu, WANG Xinshan

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 100096, China)

Abstract: Electric vehicle (EV) participating in grid ancillary frequency regulation involves leveraging the "source-load" characteristics of EVs to quickly eliminate system frequency fluctuations. However, ensuring the economic feasibility of large-scale EV-assisted frequency regulation while maintaining system performance remains a challenge. To address this, a distributed economic model predictive control (DEMP) method is proposed for large-scale EV aggregated charging stations assisting in grid load frequency control (LFC). Based on economic model predictive control, the DEMPC method employs a single-layer control structure to oversee a two-tiered hierarchical system, enabling distributed collaborative control across multiple regional power grids. The optimization of controllers is achieved through convex relaxation of the economic cost function. The collaborative work of each subsystem controller with adjacent subsystems ensures the control performance of the entire system, and an appropriate terminal cost function guarantees the asymptotic stability of the system. Simulation results demonstrate the effectiveness and superiority of this method.

Key words: distributed economic model predictive control; load frequency control; electric vehicle; multi-area interconnected power grid; system stability

随着化石燃料逐渐枯竭, 环境问题不断加剧, 传统能源的生产和消费方式难以为继, 因此, 大规模开发和利用可再生能源已成为很多国家可持续

能源发展的战略。中国致力于2060年前实现碳中和, 高比例并网的可再生能源将是未来电力系统的一个重要特征。在电动汽车 (electric vehicle, EV)

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2023JC002)

通信作者: 姚若钰 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事模型预测控制及其在电力系统的应用研究; E-mail: yry@ncepu.edu.cn

快速发展和应用的同时,其逐渐成为解决能源和环境问题的重要途径之一,也已成为电网中不可忽视的柔性负荷。连接到电网时电动汽车与电网双向交换电力,充电时视为电网中的消费侧^[1],而放电时则视作为电网中的发电侧。在国家政策支持下电动汽车得到快速发展,相关设施也得到大力修建和完善,各地积极发布了新能源汽车购买补贴等多项政策,以鼓励消费者对电动汽车的选择。

有关电动汽车和电网之间的相互作用已被广泛研究,其中一些研究聚焦于基于 V2G (vehicle-to-grid) 的电动汽车参与频率调节的问题^[2-4]。文献[5-6]表明电动汽车具有快速响应频率波动的独特优势,因此可以通过合理的充放电策略来实现电网调频。其中的一个主要挑战是,由于将具有间歇性的可再生能源整合到孤立的电网中而造成的大频率波动^[7],这是因为负荷频率控制(load frequency control, LFC)的容量不够高,无法应对发电和需求之间的不匹配^[8-9]。

电网中 LFC 的职责是在系统中创建功率平衡,以便系统频率仅在一定范围内变化,并保持系统的合理动态性能^[10-11]。适当的 LFC 将会提高效率和节约燃料,也可能减少对进一步保护设备的需求,从而避免维护成本。LFC 用于多区域电力系统,以保持发电和负载需求的平衡^[12]。文献[13]将 EV 和风力发电一并加入 2 个区域互联电力系统,并使用基于观测器的积分滑模控制器来进行负荷频率控制的研究,通过使用线性矩阵不等式对控制器参数进行优化,但未考虑经济效益。传统互联电力系统的经济负荷分配和 LFC 通常通过 2 层分级控制来实现^[14],但是忽略了瞬时经济优化^[15];经济模型预测控制(economic model predictive control, EMPC)方法可以在单层中实现经济负载调度和负载频率控制,从而实现系统中的瞬态优化和时变控制。然而,由于 EMPC 方法中阶段成本函数的任意性,因此,无法通过跟踪模型预测控制(model predictive control, MPC)的方式直接证明 EMPC 的渐进稳定性。

文献[15]使用基于 Lyapunov 的方法证明了算法的渐进稳定性;文献[16]给出了具有终端惩罚的经济成本函数用于证明系统的稳定性;文献[17]提出单区域 LFC 的 EMPC 方法,考虑了发电成本和频率调节,但是基于单个区域的控制器难以处理具有复杂拓扑的电力系统。随着电网的不断扩展以及网络更复杂的结构,使得计算负担重、可扩展性差,

为网络运行实施集中式控制器是不切实际的^[18]。文献[19]提出的算法适用于连续系统模型,其基于 2 种模式算法的稳定性分析不同于本文基于离散系统模型算法的渐进稳定性分析。本文由交流联络线连接的多区域电网使用二次频率控制来处理经济优化和负荷频率控制问题。

基于以上分析,本文针对电动汽车聚合充电站并网后系统负荷频率控制问题,提出分布式经济模型预测控制(distributed economic model predictive control, DEMPC)方法。首先建立电动汽车充电站辅助参与电网的负荷频率控制模型,然后提出使用经济型 MPC 策略对系统的跟踪优化和经济分配配合为一层的方法;其次考虑多区域互联情况,在 EMPC 基础上选择分布式控制方法,实现各子区域之间通过协作进行信息互通;最后利用适当的终端成本函数保证算法的渐进稳定性。仿真结果表明该方法的有效性和优越性。

1 多区域电网的等效控制模型

1.1 单区域等效出力模型

由于地理因素,一些电网系统在实现与大电网连接时要消耗极大的成本,得不偿失,因此,可选择将其与邻近的电网互联,实现时空资源的优化互补,这样可以大大降低运行成本。本文采用四区互联电网,系统结构如图 1 所示, $P_{tie,ij}$ 表示 i, j 区域的电力交换功率,这些区域之间的电力共享通过交流联络线实现。

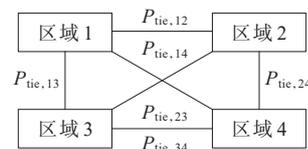


图 1 四区域互联电网结构

Figure 1 Structure of four-area interconnected power grid

每个区域均包含火力发电单元,由调速器、汽轮机和电力系统组成。调速器是火力发电机组的基本组成部分,火力发电机组的 LFC 框图如图 2 所示,其中, u_i 为 EMPC 控制器给定的控制输入, s 为复域算子, T_{gi} 为调速器时间常数, X_{gi} 为调速器输出, T_{ti} 为汽轮机时间常数, P_{gi} 为汽轮机输出功率, P_{di} 为负荷需求, M_i^a, D_i 分别为发电机组等效转动惯量和负荷阻尼系数, Δf_i 为区域频率偏差, R_i 为调差系数。

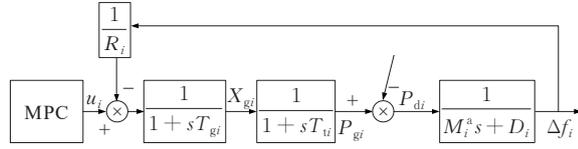


图2 火力发电机组的负荷频率控制LFC框图

Figure 2 Load frequency control of thermal power plant

针对随机负荷扰动,调速器迅速动作实现一次调频,其动态表达式为

$$\Delta \dot{X}_{gi} = -\frac{1}{T_{gi} R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_{gi}} \Delta X_{gi} + \frac{1}{T_{gi}} \Delta u_i \quad (1)$$

汽轮机进汽量会随着汽阀位置 ΔX_{gi} 变化而变化,导致汽轮机输入功率改变,发电机功率 ΔP_{gi} 也随之改变。通常采用一个一阶惯性环节来模拟汽轮机汽容现象造成的后果,其动态表达式为

$$\Delta \dot{P}_{gi} = -\frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} + \frac{1}{T_{ti}} \Delta X_{gi} \quad (2)$$

发电机动态表达式为

$$\begin{cases} \Delta P_{gi} - \Delta P_{di} - \Delta P_{tie,i} = (M_i^a s + D_i) \Delta f_i \\ \Delta f_i = -\frac{D_i}{M_i^a} \Delta f_i + \frac{1}{M_i^a} \Delta P_{gi} - \\ \frac{1}{M_i^a} \Delta P_{di} - \frac{1}{M_i^a} \Delta P_{tie,i} \end{cases} \quad (3)$$

注入每个区域的交流联络线功率偏差可表示为

$$\Delta P_{tie,ij} = \frac{2\pi}{s} \sum_{j=1, j \neq i}^M T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (4)$$

式中, T_{ij} 为输电线路的同步系数; M 为子区域数。

1.2 电动汽车聚合充电站模型

本文电网由火力发电机组、多台电动汽车和负载(含风力扰动)组成。由于在每个EV充电站中有不同数量的电动汽车,故可以考虑一个等效的EV模型,用不同的逆变器容量对每个EV进行参数化。用于LFC的等效电动汽车模型如图3所示,该模型模拟一个电动汽车电池的行为,可用于计算可控状态下的总充/放电功率。

图3中 T_e 为EV的时间常数, Δu_e 为发送到EV的LFC信号, $\pm \lambda_e$ 为功率斜坡率约束, $\pm \Delta \mu_e$ 为电动汽车的充电和放电界限, $\pm \Delta \delta_e$ 充放电速率界限, E_{max} 、 E_{min} 分别为电池的最大和最小可控能量; ΔP_e 为充/放电功率, $\Delta P_e = 0$ 时电动汽车处于怠速模式, $\Delta P_e > 0$ 时电动汽车正在放电, $\Delta P_e < 0$ 时电动汽车正在充电。应注意的是,当电动汽车的储能超过 E_{max} 时,电动汽车可能不再充电,其放电范围为 $0 \sim \mu_e$; 同样,若电动汽车的储能低于 E_{min} , 则电动汽车充电范围为 $-\mu_e \sim 0$, 其动态模型表达式为

$$\Delta \dot{P}_{Ek} = \frac{1}{T_e} \Delta u_{Ek} - \frac{1}{T_e} \Delta P_{Ek} \quad (5)$$

电动汽车在系统中的约束条件为

$$\begin{cases} -\mu_{ek} \leq \Delta P_{Ek}(t) \leq \mu_{ek}, k=1, 2 \\ -\delta_{ek} \leq \Delta \dot{P}_{Ek}(t) \leq \delta_{ek}, k=1, 2 \end{cases} \quad (6)$$

EV的充电状态(state of charge, SOC)反映电池的当前运行状态和调节能力,可以表示为

$$\begin{cases} S_{OC,k} = S_{OC,0} - \left(\eta \int P_{ei} dt \right) / C_n \\ \Delta S_{OC,i} = S_{OC,0} - S_{OC,k} \end{cases} \quad (7)$$

式中, η 为功率损耗系数; C_n 为额定容量; $S_{OC,0}$ 为初始充电状态; $S_{OC,k}$ 为时刻 k 处 SOC 的变化值。

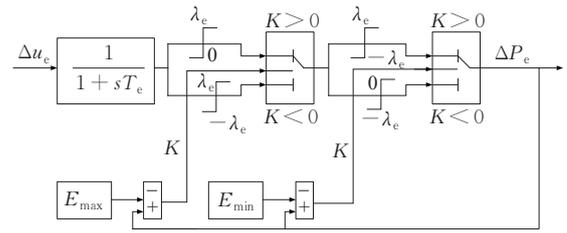


图3 电网负荷频率控制中的电动汽车模型

Figure 3 Electric vehicle model in load frequency control of power grid

对于某100 MW电网,假设需要5%的调频容量,每一辆电动汽车额定容量为50 kW,可调电量区间为70%~90%,功率损耗系数为90%,若全部由电动汽车进行调频,则需要约560辆电动汽车连接到电网,但有火力发电机组时只需要根据传统调频机组的容量配置,利用更少量的电动汽车调频容量对传统机组进行辅助频率调节。

1.3 基于LFC控制器的电网模型

本文所提LFC控制器以及电网框架如图4所示,电网由火力发电机组、2座等效电动汽车聚合充电站(EV_1 、 EV_2)和负荷干扰组成(图3仅为 EV_1 的详细模型, EV_1 、 EV_2 基本结构完全相同)。模型中负荷干扰包括负荷和风力发电波动2部分。

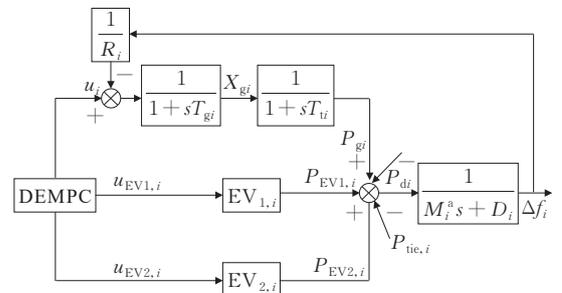


图4 包含EV的电网LFC框图

Figure 4 Block diagram of load frequency control including EV

本文所述模型的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_{ii}u_i(t) + F_{ii} \cdot \\ \quad d_i(t) + \sum_{i \neq j} A_{ij}x_j(t) \\ y_i = C_{ii}x_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i^a} & \frac{1}{M_i^a} & 0 & \frac{1}{M_i^a} & \frac{1}{M_i^a} & 0 & -\frac{1}{M_i^a} \\ 0 & -\frac{1}{T_{ti}} & \frac{1}{T_{ti}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_i T_{gi}} & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{e_u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{e_v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\eta}{C_n} & -\frac{\eta}{C_n} & 0 & 0 \\ \sum_{j=1}^M T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_g} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{e1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{e2}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_i^a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, u_i = \begin{bmatrix} u_{gi} \\ u_{E1i} \\ u_{E2i} \end{bmatrix}$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sum_{j=1}^M T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x_i = [\Delta f_i \quad \Delta P_{gi} \quad \Delta X_{Ggi} \quad \Delta P_{E1i} \quad \Delta P_{E2i} \quad \Delta S_{OC,i} \quad \Delta P_{tie,i}]^T$$

$$C_{ii} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$d_i = [\Delta P_{di}], y_i = [\Delta f_i]$$

将式(8)离散化可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(k) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + F_{ii} \cdot \\ \quad d_i(k) + \sum_{i \neq j} A_{ij}x_j(k) \\ y_i = C_{ii}x_i(k) \end{cases} \quad (9)$$

2 算法描述

2.1 经济模型预测控制

为了更好地阐明 EMPC 算法,本文对标准 MPC 和 EMPC 算法进行比较。每种算法都采用离散时间模型,可以表示为 $x^+ = f(x, u)$ 。系统状态为 $x \in X$ 、控制输入 $u \in U$ 、状态转换函数 $f(\cdot): X \times U \rightarrow X$ 、分层控制上层给出的最佳设定点表示为 (x_s, u_s) 。

2.1.1 标准 MPC

标准 MPC 也称为跟踪 MPC,其被视为分层控制下层的控制策略。控制器的目标是,在有限时域 N 内最小化设定点 (x_s, u_s) 和当前系统状态之间的跟踪误差,即

$$\begin{cases} \min_u \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{2} (|x(i) - x_s|_Q^2 + |u(i) - u_s|_R^2) + V_f(x(N)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} x^+ = f(x, u) \\ x(i) \in X, u(i) \in U^2, i \in I_{0:(N-1)} \\ x(0) = x, x(N) \in X_f \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中, N 为优化时域; Q, R 为常数系数; x 为初始状态; X_f 表示终端区域包含 x_s ; $V_f(\cdot)$ 为终端惩罚。

$$\begin{cases} \min_{x, u} l(x, u) \\ \text{s.t.} \begin{cases} x = f(x, u) \\ x \in X, u \in U \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

在分层控制的上、下层实现不同的时间尺度。经济优化通常具有较长的时间尺度,较低层的设定点跟踪具有较短的时间尺度。

2.1.2 EMPC

在 EMPC 中, $l(x, u)$ 由 EMPC 控制器直接优化。经 EMPC 的优化问题可以表示为

$$\begin{cases} \min_{x, u} \sum_{i=0}^{N-1} l(x(i), u(i)) + V_f(x(N)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} x^+ = f(x, u) \\ x(i) \in X, u(i) \in U_1, i \in I_{0:(N-1)} \\ x(0) = x, x(N) \in X_f \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,除了成本函数外,标准 MPC 的优化问题几乎与 EMPC 相同。由于经济阶段成本函数 $l(x, u)$ 由 EMPC 控制器直接优化,因此所提 EMPC 方法将提高经济效益。EMPC 的控制性能与系统处于稳定状态时的性能相同,甚至更好。

2.2 互联电网的 DEMPC

考虑多区域互联,本文提出 DEMPC 方法,先制

定电网的控制和优化目标,再使用 DEMPC 方法解决优化问题。

2.2.1 问题描述

互联电网的 LFC 是非线性约束问题,EMPC 是优化而不是跟踪经济成本函数。经济成本函数由以下指标组成。

1) 发电成本。

发电成本表达式为

$$F_{pi}(k) = \frac{1}{2} a_i \Delta P_{gi}^2(k) + b_i \Delta P_{gi}(k) + c_i \quad (13)$$

式中, a_i, b_i, c_i 均为第 i 区域的火电厂发电成本系数, $a_i \geq 0$ 。

2) 负载频率控制。

频率偏差是由负载需求与各子系统电源不平衡造成的。当电源满足负载需求时,频率偏差接近零,即

$$\begin{aligned} \Delta f_i &\equiv 0 \\ \Downarrow \\ P_{gi} &\equiv P_{di} + P_{tie,i} - P_{EV1,i} - P_{EV2,i} \end{aligned} \quad (14)$$

利用控制器惩罚由于各子系统间源荷不平衡造成的频率偏差,以实现系统整体频率稳定。因此,定义成本函数为

$$F_{ci}(k) = \Delta f_i(k) Q_{ci} \Delta f_i(k) \quad (15)$$

式中, Q_{ci} 为加权系数, $Q_{ci} \geq 0$ 。

成本函数用于引导 Δf_i 趋于零,随着 Q_{ci} 的增加, Δf_i 会减小且将更快地接近零。具有大系数 Q_{ci} 的副作用是系统将花费更多时间才能达到最佳稳态。

3) 联络线功率控制。

联络线功率的成本函数为

$$F_{di}(k) = \Delta P_{tie,i}(k) Q_{di} \Delta P_{tie,i}(k) \quad (16)$$

式中, Q_{di} 为加权系数, $Q_{di} \geq 0$ 。

4) 电动汽车调节成本^[20]。

电动汽车调节成本表达式为

$$F_{ei}(k) = a_{ei} \Delta P_{EVi}^2(k) + b_{ei} \Delta P_{EVi}(k) \quad (17)$$

式中, a_{ei}, b_{ei} 分别为电池损耗、电价成本系数。

电力系统约束条件为

$$\begin{cases} P_{gi, \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi, \max} \\ \dot{P}_{gi} \leq \dot{P}_{gi, \max} \\ S_{OC, i, \min} \leq S_{OC, i} \leq S_{OC, i, \max} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中第1式为发电机或涡轮机产生功率的约束,第2式为发电机速率约束,第3式为电动汽车充电状态约束。

2.2.2 DEMPC 方法

结合式(13)~(15),阶段成本函数可以写成凸形式:

$$\begin{aligned} l_i(x_i(k), u_i(k)) &= F_{pi}(k) + F_{ci}(k) = \\ & x_i(k)' Q_i x_i(k) + x_i(k)' q_i + c_i \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $Q_i \geq 0$ 。根据系统模型式(8)和(13)~(15),系数 $Q_i = \text{diag}(Q_{ci}, 0.5a_i, 0, a_{ei}, a_{ei}, Q_{di})$, $q_i = (0, b_i, 0, b_{ei}, b_{ei}, 0)$ 。与标准 MPC 中使用的跟踪成本函数 $x^+ = f(x, u)$ 不同,EMPC 中阶段成本函数式(19)可以采用更一般的形式编写。

第 i 区域的局部成本函数考虑自身子区域的经济优化目标,忽略了控制轨迹对其他子区域的影响。因此,预测范围内的区域局部成本函数可以表示为

$$\phi_i(x, u_i) = \sum_{t=0}^{N-1} l_i(x_i(t|k), u_i(t|k)) + V_{fi}(x_i(N|k)) \quad (20)$$

式中, $u_i(t|k) = [u(0|k)', \dots, u((N-1)|k)']'$; $x_i(N|k) = [x(0|k)', \dots, x((N-1)|k)']'$; $V_{fi}(x_i(N|k))$ 为终端成本。

为了使区域相互协作,将 $\phi_i(x, u_i)$ 替换为基于协作的成本函数,该函数不仅考虑了局部的控制目标,而且协调了其他区域的控制目标。子区域的基于分布式协作的 EMPC 成本函数,由每个子区域的局部成本函数式(19)的严格凸组合定义为

$$\begin{aligned} V(x, u_i^p) &= \min_{u_i} \Phi(x, u_1^{p-1}, \dots, u_{i-1}^{p-1}, u_i, u_{i+1}^{p-1}, \dots, \\ & u_M^{p-1}) = \min_{u_i} \alpha_i \phi_i(x, u_i) + \sum_{j \neq i} \alpha_j \phi_j(x, u_j^{p-1}) \end{aligned} \quad (21)$$

式中, u_i^p 为最佳解决方案; $\alpha_i > 0$, $\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1$; p 为 k 时刻的迭代次数,对于子第 i 个系统,迭代 p (初始化时 $p=0$) 时仅计算和更新控制序列 u_i ; N 为子区域数量,每个 DEMPC 仅优化其子区域的控制顺序。

离散时刻 k 对第 i 个子区域中控制序列定义为

$$u_i^p(k) = [u_i^p(0|k)', u_i^p(1|k)', \dots, u_i^p((N-1)|k)']' \quad (22)$$

候选初始控制序列定义为

$$\begin{aligned} u_i^0(k+1) &= \\ & [u_i^0(1|k)', \dots, u_i^0((N-1)|k)']', K_{N, x_{N_i}}(N|k) \end{aligned} \quad (23)$$

式中, $K_{N, x_{N_i}}$ 为终端反馈控制器。

子区域经历 p 次迭代后处理的最佳解表示为

$$u_i^p(k) = [u_i^p(0|k)', \dots, u_i^p((N-1)|k)']' \quad (24)$$

第 i 个子区域的优化问题表示为

$$\begin{cases} V(x, u_i^p) = \\ \min_{u_i} \Phi(x, u_1^{p-1}, \dots, u_{i-1}^{p-1}, u_i, u_{i+1}^{p-1}, \dots, u_M^{p-1}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} x_i(k+1) = \sum_{j \in N_i} A_{ij} x_j(k) + B_{ii} u_i(k) + F_{ii} d_i(k) \\ x(0|k) = x, x(N|k) \in X_i \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

其中, X_i 为终端区域, 最优稳态 x_s 包含在 X_i , $x(N|k) \in X_i$ 中, 要求 $x(N|k)$ 必须属于 $X_i^{[21]}$, 互联电网中必须在稳态下满足电力平衡。因此, 在终端区域约束中考考虑功率平衡。每个区域的终端区域条件为

$$\|P_{gi}(N|k) - P_{di}(N|k) - P_{tie,i}(N|k) + P_{EV1,i}(N|k) + P_{EV2,i}(N|k)\| \leq \epsilon \quad (26)$$

其中, ϵ 是一个常数。若 ϵ 选择得足够小, 则可以假设每个区域都可以实现功率平衡。

根据式(26)选择终端成本函数 $V_f(\cdot)$, 表示为

$$V_f(x(N|k)) = x(N|k)P_f x(N|k) + x(N|k)p_f \quad (27)$$

其中, $x(N|k) \in X_f$, 是一个子级别集 $\{x | V_f(x) \leq \epsilon_f\}$, 根据式(26)选择 X_f 。

3 算法稳定性分析

3.1 EMPC 稳定性证明

提出以下假设来建立 EMPC 稳定性分析^[15]。

假设 1 当供应率为 $s_i(x_i(tk), u_i(tk)) = l_i(x_i(tk), u_i(tk)) - l_i(x_{si}, u_{si})$ 时, 系统式(5)是严格耗散的, 并且存在一个函数 λ 满足:

$$\lambda[x_i((t+1)|k)] - \lambda_i(x_i(tk)) \leq -\rho_i(x_i(tk)) + s_i(x_i(tk), u_i(tk)) \quad (28)$$

其中, $\rho_i(\cdot)$ 为正。

假设 1 等同于以下不等式:

$$\min l_i(x_i(tk), u_i(tk)) + \lambda_i(x_i(tk)) - \lambda_i[x_i((t+1)|k)] \geq l_i(x_{si}, u_{si}) \quad (29)$$

为了建立 EMPC 的稳定性, 旋转阶段成本定义为

$$\tilde{l}_i(x_i(tk), u_i(tk)) = l_i(x_i(tk), u_i(tk)) - l_i(x_{si}, u_{si}) + \lambda_i(x_i(tk)) - \lambda_i[x_i((t+1)|k)] \quad (30)$$

其中, $\tilde{l}_i(x_i, u_i) > 0, \forall x_i, u_i, \tilde{l}_i(x_{si}, u_{si}) = 0$ 。

旋转阶段成本可以从式(21)中得到:

$$\begin{cases} \tilde{l}(x(tk), u(tk)) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \tilde{l}_i(x_i(tk), u_i(tk)) \\ V_f(x(tk)) = \sum_{i=1}^M \alpha_i (x'_i(tk)P_{fi}x_i(tk) + x'_i(tk)p_{fi}) \end{cases} \quad (31)$$

假设 2 存在终端区域控制定律 $K_N, u_i = K_N$ 满足不等式:

$$V_{fi}[x_i((t+1)|k)] - V_{fi}(x_i(tk)) \leq -l_i(x_i(tk), u_i(tk)) + l_i(x_{si}, u_{si}) \quad (32)$$

引理 1 若式(29)成立, 则以下不等式成立:

$$\tilde{V}_{fi}[x_i((t+1)|k)] - \tilde{V}_{fi}(x_i(tk)) \leq -\tilde{l}_i(x_i(tk), u_i(tk)) + \tilde{l}_i(x_{si}, u_{si}) \quad (33)$$

其中,

$$\tilde{V}_{fi}(x_i(tk)) = V_{fi}(x_i(tk)) + \lambda_i(x_i(tk)) - V_{fi}(x_{si}) - \lambda_i(x_{si})$$

引理 1 证明:

$$\begin{aligned} & \tilde{V}_{fi}[x_i((t+1)|k)] - \tilde{V}_{fi}(x_i(tk)) = \\ & V_{fi}[x_i((t+1)|k)] + \lambda_i[x_i((t+1)|k)] - \\ & \lambda_i[x_{si}((t+1)|k)] - V_{fi}[x_{si}((t+1)|k)] - \\ & [V_{fi}(x_i(tk)) + \lambda_i(x_i(tk)) - \lambda_i(x_{si}(tk)) - \\ & V_{fi}(x_{si}(tk))] \leq -l_i(x_i(tk), u_i(tk)) + \\ & l_i(x_{si}, u_{si}) + \lambda_i[x_i((t+1)|k)] - \lambda_i(x_{si}) - \\ & \lambda_i(x_i(tk)) + \lambda_i(x_{si}) = -\tilde{l}_i \cdot \\ & (x_i(tk), u_i(tk)) + \tilde{l}_i(x_{si}, u_{si}) = \\ & \tilde{l}_i(x_i(tk), u_i(tk)) \end{aligned} \quad (34)$$

故引理 1 成立。

通过式(30)、(33), 新的辅助成本函数为

$$\tilde{\Phi}(x, u) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \sum_{t=0}^{N-1} \tilde{l}_i(x_i(tk), u_i(tk)) + \sum_{i=1}^M \alpha_i \tilde{V}_{fi}(x_i(N|k)) \quad (35)$$

引理 2 原始成本 $\Phi(x, u)$ (式(20))和旋转成本 $\tilde{\Phi}(x, u)$ (式(35))具有相同的最佳解决方案。

引理 2 证明:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}(x, u) &= \sum_{i=1}^M \alpha_i \sum_{t=0}^{N-1} \tilde{l}_i(x_i(tk), u_i(tk)) + \\ & \sum_{i=1}^M \alpha_i \tilde{V}_{fi}(x_i(N|k)) = \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{l}(x(tk), u(tk)) + \\ \tilde{V}_{fi}(x(N|k)) &= \sum_{t=0}^{N-1} [l(x(tk), u(tk)) - l(x_s, u_s) - \\ & \lambda[x_i((t+1)|k)] + \lambda(x(tk))] + V_{fi}(x(N|k)) + \\ & \lambda(x(N|k)) - V_{fi}(x_s) - \lambda(x_s) = \\ & \sum_{t=0}^{N-1} l(x(tk), u(tk)) - \sum_{t=0}^{N-1} l(x_s, u_s) + \lambda(x(0|k)) - \\ & \lambda(x(N|k)) + V_{fi}(x(N|k)) + \lambda(x(N|k)) - V_{fi}(x_s) - \\ & \lambda(x_s) = \left[\sum_{t=0}^{N-1} l(x(tk), u(tk)) + V_{fi}(x(N|k)) \right] - \\ & \sum_{t=0}^{N-1} l(x_s, u_s) + \lambda(x(0|k)) - V_{fi}(x_s) - \lambda(x_s) = \\ & \Phi(x, u) - \underbrace{Nl(x_s, u_s) + \lambda(x(0|k)) - V_{fi}(x_s) - \lambda(x_s)}_{\text{常数}} \end{aligned} \quad (36)$$

可以得到 MPC 的最优解与 EMPC 相同。因此,式(35)的最优解可以通过求解式(23)来实现。

定理1 若式(32)成立,且分别在式(19)、(22)中定义成本函数和可行的初始控制序列,则系统是渐近稳定且收敛于 x_s 的。

3.2 终端成本/集的计算

1) 使用离散线性二次调节器(discrete linear quadratic regulator, DLQR)计算终端成本。具有终端成本和终端集的MPC可以通过使用终端集约束并添加终端成本来放松该终端约束。这里需要选择终端集和终端成本,使得终端成本是终端集内的控制 Lyapunov 函数具有相应的终端控制器。

满足式(10)的终端集 X_f 、终端成本 $V_f(x)$ 和终端控制器 K 的计算,可以通过计算DLQR或通过求解半定程序(semi-definite programming, SDP)来完成^[22]。由于经济成本为线性二次阶段成本,故对终端成本 $V_f(x)=x^T P_f x + x^T p_f$ 使用线性二次方法。

终端成本和控制需要满足:

$$x^T (A + BK)^T P_f (A + BK)x + p_f^T (A + BK)x - x^T P_f x - p_f^T x \leq -x^T Qx - q^T x \quad (37)$$

由于式(37)应适用于所有 $x \in X_f$,因此线性部分需要为零。这可以用矛盾的证明来证明:假设线性向量的第 i 个分量有一个非零分量,选取一个,令 $x_i = \epsilon, x_j = 0, j \neq i$,使 $\epsilon \rightarrow 0$,则线性部分超过任何二次项,并且不等式不成立。通过消除线性部分,得到二次项的跟踪MPC条件,并对线性项附加等式约束:

$$\begin{cases} (A + BK)^T P_f (A + BK) - P_f \leq -Q \\ p_f^T (A + BK - I) = -q^T \end{cases} \quad (38)$$

DLQR的解 K, P_f 满足式(38)第1个不等式,计算线性部分 p_f ,即

$$p_f^T = -q^T (A + BK - I)^{-1} \quad (39)$$

由于 $(A + BK)$ 是Hurwitz矩阵,并且具有幅值较小的特征值,则 $(A + BK - I)$ 是可逆的。

2) 使用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)计算终端成本。将式(38)第1个不等式设为LMI,这样可以优化附加标准,例如最大化终端集的体积。

对于二次部分,有不等式如下:

$$(A + BK)^T P (A + BK) - P \leq -Q \quad (40)$$

定义 $E = P^{-1}$,然后左右同乘以 E ,得到

$$E(A + BK)^T E^{-1}(A + BK)E - E \leq -EQE \quad (41)$$

定义 $r = KE$ 并将所有项移到一边,得到:

$$E - (AE + Br)^T E^{-1}(AE + Br) - EQE \geq 0 \quad (42)$$

为了在优化变量 (E, r) 中获得LMI条件,将式(42)重写为

$$E - \begin{bmatrix} AE + BY \\ Q^{1/2}E \\ R^{1/2}Y \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} AE + BY \\ Q^{1/2}E \\ R^{1/2}Y \end{bmatrix} \geq 0 \quad (43)$$

使用Schur补码得到:

$$\begin{pmatrix} E & EA^T + Y^T B^T & EQ^{1/2} & Y^T R^{1/2} \\ AE + BY & E & 0 & 0 \\ Q^{1/2}E & 0 & I & 0 \\ R^{1/2}Y & 0 & 0 & I \end{pmatrix} \geq 0 \quad (44)$$

通过这种方法,可以最小化 $-\log \det E$,并根据LMI计算较小的终端成本。

3) 计算终端集。计算时采用 $X_f = \{x | x^T P_f x \leq \alpha\}$,而不是采用终端成本 $V_f(x)$ 的水平集,因为水平集不一定以原点为中心。注意,由于二次不等式满足式(40)且 $Q \geq 0$,此集合满足不变性条件 $(A + BK)x \in X_f$,一旦计算出 P_f, K ,则需要计算标量参数 α ,以确定终端集大小,使其满足输入和状态约束:

$$Kx \in U, \forall x \in X_f, X_f \subseteq X \quad (45)$$

考虑多元状态和输入约束:

$$X = \{x | Hx \leq h\}, U = \{u | Lu \leq l\} \quad (46)$$

满足这些约束的终端集的最大化可以作为一个线性规划(linear programming, LP)被提出。

引理3 输入和状态约束的终端集 $X_f = \{x | x^T P_f x \leq \alpha_{\max}\}$,求解 α_{\max} ,即 $X_f \subseteq X, KX_f \in U$,可以用以下线性程序计算:

$$\begin{cases} \alpha_{\max} = \max_{\alpha} \alpha \\ \text{s.t.} \begin{cases} |P_f^{-1/2} H_i^T|^2 \alpha \leq h_i^2, i = 1, 2, \dots, n_x \\ |P_f^{-1/2} K^T L_i^T|^2 \alpha \leq l_i^2, i = 1, 2, \dots, n_u \end{cases} \end{cases} \quad (47)$$

由此,可以将终端成本、终端控制器和终端集的计算作为优化问题。

4 仿真分析

本文仿真模拟所提方法并进行评估。图1描述了4个电源容量为100 MW的多区域互联电网,子区域的数量 $N=15$,采样时间为 $T_s=0.1$ s。 $K_{s12}=3.7, K_{s13}=4.0, K_{s24}=4.6, K_{s34}=4.2, K_{s14}=3.5, K_{s23}=3.2$ p.u.。每个区域的电源参数如表1所示;各区域中参与辅助调频的电动汽车参数如表2所示。 η 设

定为 90%, C_n 为 50 kW·h, $Q_{ci}=0.4$, $Q_{di}=0.1$, $t=3$ s 时负载需求发生变化。

表 1 每个区域的电源参数

Table 1 Parameters of thermal power plant in each area

区域	T_{gi}	T_{vi}	M_i^a	D_i	R_i	V_i
1	0.081	0.28	3.50	2.75	2.6	1.02
2	0.072	0.30	3.70	3.20	2.8	1.01
3	0.083	0.32	4.00	2.80	2.7	0.98
4	0.075	0.35	3.75	2.50	2.4	1.03

区域	a_i	b_i	c_i	P_{di}	ΔP_{di}
1	3.31	0.13	1.32	0.012	0.005
2	2.75	0.11	1.05	0.013	0.005
3	3.15	0.14	1.50	0.015	0.005
4	3.78	0.12	1.74	0.011	0.005

表 2 各区域中参与辅助调频的电动汽车参数

Table 2 Parameters of electric vehicles participating in auxiliary frequency regulation in each region

EV ₁					EV ₂				
T_{ei}	δ_{ei}	μ_{ei}	E_{maxi}	E_{mini}	T_{ei}	δ_{ei}	μ_{ei}	E_{maxi}	E_{mini}
1	0.02	0.01	0.95	0.80	1	0.02	0.015	0.90	0.75

$t=3$ s 时系统产生负荷需求变化,各区域的负荷需求变化见表 2,负荷需求变化下各区域的频率偏差如图 5 所示,由于 $t=3$ s 时的负荷需求变动,各区域的频率偏差偏离零,发电量不能满足负载需求,因此系统的频率偏差小于零,而随着每个区域发电量的增加,采用该方法时可快速收敛到零。

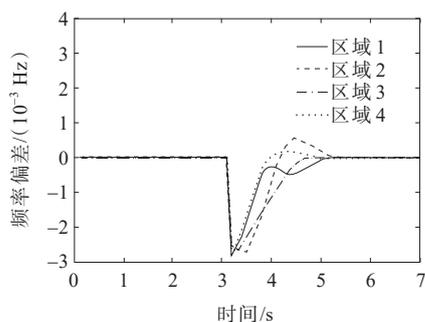


图 5 负荷需求变化下各区域的频率偏差

Figure 5 Frequency deviation of each region under change of load demand

负载需求变化下各区域的输出功率如图 6 所示,每个区域的 $P_{i,j}$ 生成增加到最佳设置点,而由于终端区域的约束,故要求系统状态尽快达到稳态。从图 4 可以看出,对于相同的输入 u_i ,输出量 Δf 比 P_{gi} 函数关系中更多一个一阶惯性环节,因此,控制

输入 P_{gi} 比 Δf 具有更快的响应。当 P_{gi} 达到稳态时, Δf 仍处于平衡点 0 以下,为了尽快地转到稳态,将 P_{gi} 调节为大于稳态,则图 6 中 3~4 s 时存在超调,过冲后 Δf 将逐渐达到稳态 0。图 6 中黑实线是双层控制中经济负荷分配下每个区域的最佳发电功率,可以看出,其与本文所提控制方法下的系统稳态相同。负载需求变化时各区域注入联络线功率如图 7 所示,其中, $P_{tie,i} \geq 0$ 表示第 i 个区域从联络线获得功率 $P_{tie,i}$, $P_{tie,i} < 0$ 表示第 i 个区域向联络线传输功率 $P_{tie,i}$ 。

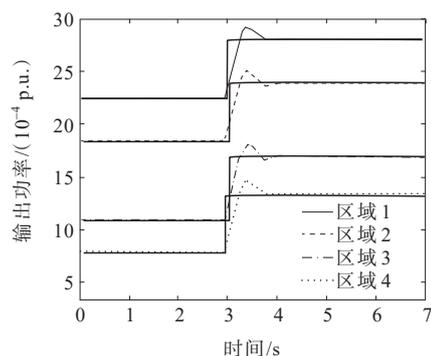


图 6 负载需求变化下各区域的输出功率

Figure 6 Output power of each region under change of load demand

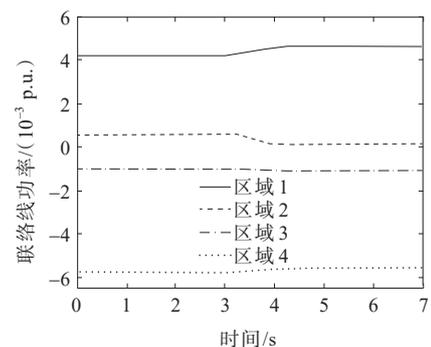


图 7 负载需求变化时各区域注入联络线功率

Figure 7 Power of contact lines into each area under change of load demand

在传统电网控制中,当系统遭受负荷突变而出现频率偏差时,只能选择调整火力发电机组出力来弥补系统频率偏差,这就难免出现机组出力有限以及调节效率慢、灵敏度低的问题。EV 输出功率偏差曲线和火力发电系统的功率曲线分别如图 8、9 所示,以区域 1 为例,由图 6、8、9 可知,当系统偏离发生偏差时,火力发电机组依然是弥补频率波动的主要设备,但与没有电动汽车参与调频的系统相比,系统频率波动时处于闲置状态的电动汽车能快速对频率波动做出响应,配合火力发电机组出力,直至系统频率稳定在基准值。

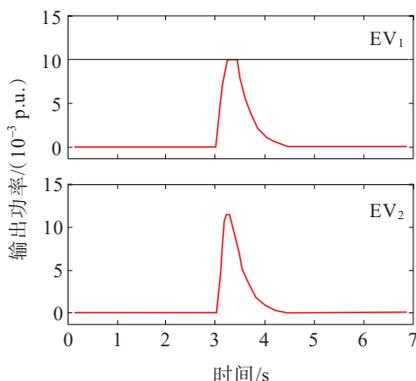
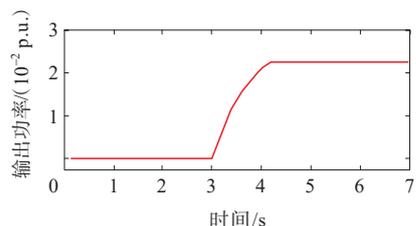
图8 EV₁、EV₂输出功率偏差曲线Figure 8 Output power deviation curves of EV₁ and EV₂

图9 火力发电系统的功率曲线

Figure 9 Power curve of thermal power generation system

使用3种不同的策略对系统进行控制,3种方法的优化范围和经济目标函数相同,每个系统的负荷需求均于1 s时产生0.005 p.u.的变化。不同控制方法下区域1的频率偏差如图10所示,可以看出,在3种控制策略下,负载需求变化后频率偏差均逐渐收敛到零。由于集中式模型的高维度,模拟过程中的计算时间明显慢于分布式和分散式,不适用于工业应用。分散式的模型和算法中由于忽略了每个区域之间的互联,最晚达到频率稳定。与分散式EMPC相比,分布式EMPC算法的性能提高了很多。

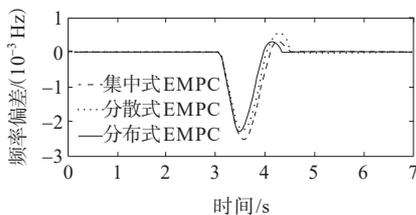


图10 不同控制策略下区域1的频率偏差

Figure 10 Frequency deviations in region 1 under different control strategies

5 结语

本文提出了使用电动汽车聚合充电站参与辅助火电的DEMPC方法来处理多区域联网的经济负荷分配和LFC;经济阶段成本函数由EMPC控制器直接制定和优化。基于子系统之间的通信和协

作,DEMPC控制器优化整个系统的目标函数,以获得全局最优;该方法可以实现经济负荷分配、LFC控制性能和瞬态优化。利用Lyapunov稳定性分析理论,证明了DEMPC优化算法的收敛性;仿真结果也证明了该优化算法的有效性;与集中式和分散式EMPC方法相比,该方法具有优势,在工业应用中具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 邵嗣杨,马翔,袁伟,等.含电动汽车的不确定性微电网鲁棒优化调度方法[J].电气工程学报,2023,18(2):201-209.
SHAO Siyang, MA Xiang, YUAN Wei, et al. Robust optimal dispatching method for uncertain microgrid including electric vehicles[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023:1-9.
- [2] 蔡文亮,赵正晖,汪洋,等.面向新型能源结构的系统调频技术回顾与展望[J].电测与仪表,2023,60(10):1-9.
CAI Wenliang, ZHAO Zhenghui, WANG Yang, et al. Review and prospect of frequency modulation technology for new energy structure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023,60(10):1-9.
- [3] 吴赋章,杨军,林洋佳,等.考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J].电工技术学报,2020,35(7):1563-1574.
WU Fuzhang, YANG Jun, LIN Yangjia, et al. Research on spatiotemporal behavior of electric vehicles considering the users' bounded rationality[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,35(7):1563-1574.
- [4] 裴振坤,王学梅,康龙云.考虑用户充电计划的电动汽车辅助调频控制策略[J].电力工程技术,2023,42(1):88-97.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Auxiliary frequency regulation control strategy for electric vehicles considering users' charging plans[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 88-97.
- [5] 刘辉,魏岩岩,汪旒,等.电动汽车入网一次调频控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015,43 (23): 90-95.
- [6] 程杉,李洋洋,刘炜炜,等.电动汽车协助火电机组参与调频辅助服务优化控制策略[J].电力系统保护与控制, 2024,52(6):142-151.
CHENG Shan, LI Fengyang, LIU Weiwei, et al. Optimal control strategy of thermal power units with electric vehicles participating in frequency regulation auxiliary services[J]. Power System Protection and Control, 2024,

- 52(6):142-151.
- [7] 钱国明,孟杰,朱海东,等.基于调频服务的新型光-储电站容量规划及运行策略[J].中国电力,2023,56(6):132-138+147.
QIAN Guoming, MENG Jie, ZHU Haidong, et al. Capacity planning and operation strategy of new PV-storage power station based on frequency modulation service[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 132-138+147.
- [8] 杨丽,孙元章,徐箭,等.基于在线强化学习的风电系统自适应负荷频率控制[J].电力系统自动化,2020,44(12):74-83.
YANG Li, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Adaptive load frequency control of wind power system based on online reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 74-83.
- [9] 方仍存, 桑子夏, 刘知行, 等. 基于改进协同量子粒子群算法的多微网负荷频率控制[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 87-97.
FANG Rengcun, SANG Zixia, LIU Zhixing, et al. Load-frequency control of multi-microgrid systems based on improved cooperative quantum-behaved particle swarm optimization[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 87-97.
- [10] ZHANG H, LIU J, XU S. H-infinity load frequency control of networked power systems via an event-triggered scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 7104-7113.
- [11] 孙冉, 王建波, 郭泓佐, 等. 基于改进事件触发机制的电力系统负荷频率控制[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(11): 75-85.
SUN Ran, WANG Jianbo, GUO Hongzuo, et al. Load frequency control of power systems based on improved event-triggering scheme [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(11): 75-85.
- [12] 周一辰, 杨洋, 李永刚, 等. 区域一致趋同的分布式负荷频率控制方法研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 80-86+124.
ZHOU Yichen, YANG Yang, LI Yonggang, et al. Distributed load frequency control method in a regionally consistent manner[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 80-86+124.
- [13] 王政豪, 刘永慧, 苏庆堂. 基于滑模控制的多区域V2G系统的负荷频率控制[J]. 控制工程, 2022, 29(11): 1981-1988.
WANG Zhenghao, LIU Yonghui, SU Qingtang. Load frequency control for a multi-area V2G system based on sliding mode control[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(11): 1981-1988.
- [14] LIU S, LUO W, WU L. Co-design of distributed model-based control and event-triggering scheme for load frequency regulation in smart grids[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(9): 3311-3319.
- [15] 贾玉斌. 经济模型预测控制的研究及其在电力系统中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2020.
JIA Yubin. Economic model predictive control and its application in power system[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [16] AMRIT R, RAWLINGS J B, ANGELI D. Economic optimization using model predictive control with a terminal cost[J]. Annual Reviews in Control, 2011, 35(2): 178-186.
- [17] SOKOLER L E, EDLUND K, JORGENSEN J B. Application of economic MPC to frequency control in a single-area power system[C]// 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 5-3-51 Nakanoshima, Kita-Ku, Osaka, Japan, 2015.
- [18] 左强, 李波, 杨世海. 大规模空调负荷参与新能源电力系统调频的无模型自适应控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 224-231.
ZUO Qiang, LI Bo, YANG Shihai. Model-free adaptive frequency control of renewable energy power systems with participation of large-scale air conditioner loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 224-231.
- [19] ALBALAWI F, DURAND H, CHRISTOFIDES P D. Distributed economic model predictive control for operational safety of nonlinear processes[J]. Aiche Journal, 2017, 63(8): 3404-3418.
- [20] 余洋, 张瑞丰, 陆文韬, 等. 基于稳定经济模型预测控制的集群电动汽车辅助电网调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 6025-6040.
YU Yang, ZHANG Ruifeng, LU Wentao, et al. Auxiliary frequency regulation control strategy of aggregated electric vehicles based on lyapunov-based economic model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6025-6040.
- [21] OSHNOEI A, KHERADMANDI M, MUYEEN S M. Robust control scheme for distributed battery energy storage systems in load frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4781-4791.
- [22] KÖHLER J. Distributed economic model predictive control under inexact minimization with application to power systems[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2017.