

# 含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频研究

骆钊<sup>1</sup>, 田肖<sup>1</sup>, 莫熙<sup>2</sup>, 聂灵峰<sup>1</sup>, 沈鑫<sup>3</sup>, 雷元庆<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650051;  
3. 云南电网有限责任公司计量中心, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 针对新能源在电网中渗透率不断提高导致系统调频容量和频率响应能力不足的问题, 提出一种含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频方法。首先, 建立了电解铝工业负荷、废旧矿井抽蓄电站和超级电容频率响应模型。然后, 基于模型预测控制理论, 以系统状态量和控制量的加权函数最小为目标, 设计区域信息互动的分布式模型预测控制器, 并提出含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频方法。最后, 将分布式模型预测控制器应用在所提源-荷-储协同控制方法中, 并在改进的 IEEE 标准两区域 LFC 模型中进行仿真。结果表明所提方法可以缩短频率恢复时间, 减小最大频差值, 改善系统调频动态性能。

**关键词:** 负荷频率控制; 废旧矿井抽蓄电站; 超级电容; 分布式模型预测控制

## Frequency regulation of source-load-storage collaborative control with waste mine-pumped storage power stations

LUO Zhao<sup>1</sup>, TIAN Xiao<sup>1</sup>, MO Xi<sup>2</sup>, NIE Lingfeng<sup>1</sup>, SHEN Xin<sup>3</sup>, LEI Yuanqing<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Yunnan Power Dispatching and Control Center, Kunming 650051, China; 3. Measurement Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** In response to the problem of insufficient frequency regulation capacity and frequency response ability caused by the increasing penetration rate of new energy in the power grid, this paper proposes a source-load-storage coordinated control frequency regulation method with waste mine-pumped storage power stations. First, the frequency response model is established for the industrial load of electrolytic aluminum, waste mine pumped storage power stations, and super capacitors. Then, based on the theory of model predictive control, a distributed model predictive controller with regional information interaction is designed with the goal of minimizing the weighted functions of system state and control variables, and a source-load-storage coordinated control frequency regulation method with waste mine-pumped storage power stations is proposed. Finally, the distributed model predictive controller is applied to the proposed source-load-storage collaborative control method, and simulated in an improved IEEE standard two-region LFC model. The results show that this method can shorten frequency recovery time, reduce maximum frequency difference, and improve the system's frequency regulation dynamic performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277104).

**Key words:** load frequency control; waste mine pumped and storage power station; super capacitors; distributed model predictive control

## 0 引言

2021年10月, 国务院印发《2030年前碳达峰行

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52277104); 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2703500); 云南省重点研发计划项目资助(202303AC100003)

动方案》, 提出“构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统, 推动清洁电力资源大范围优化配置”<sup>[1-2]</sup>。随着新能源大规模接入, 电网呈现“双侧随机性”<sup>[3]</sup>, 仅依靠传统机组无法满足调频需求, 需充分挖掘源、荷两侧调频资源, 并引入储能<sup>[4-6]</sup>, 通过控制策略实现源-荷-储深度协同, 保障电网稳定运行。

随着电力系统结构日趋复杂, 系统中存在大量

的结构和参数不确定性问题, 这对系统的负荷频率控制方法提出了更高的要求<sup>[7-9]</sup>。为解决源侧传统机组负荷频率控制(load frequency control, LFC)不理想的问题, 国内外学者不断改进负荷频率控制方法, 设计了多种负荷频率控制器来提高系统稳定性, 将改进分数阶 PID、神经网络、滑模控制等<sup>[10-12]</sup>先进控制理论应用于系统负荷频率控制中。这些方法在一定程度上提高了电力系统运行的稳定性, 但算法复杂不利于工程实现。分布式模型预测控制(distributed model predictive control, DMPC)不依赖系统的精确模型, 因建模直观、鲁棒性强、易处理多变量和约束等优点被广泛应用于负荷频率控制中<sup>[13]</sup>。文献[14-16]设计了一种适用于两区域电力系统的分布式模型预测控制器, 提高了系统频率的稳定性。但是, 当电力系统中负荷扰动较大或风能渗透率较高时, 传统机组受发电速率约束, 只通过控制算法作用于传统机组, 不能有效维持电力系统频率稳定。

当传统机组难以维持系统频率稳定时, 可引入负荷侧调频资源参与调频, 如空调、电动汽车、热水器、柔性工业负荷等, 可以适当降低功率运行或短时关闭, 以弥补电力系统有功缺额, 有效提高电网频率稳定性。文献[17]基于空调负荷等效一阶模型建立了空调聚合模型, 使空调负荷群参与电力系统调频。文献[18]考虑电动车当前所需电池电量以及电动汽车调频容量在不同频率事件下的特征, 提出了基于优先队列的调频容量分配方案, 实现电动汽车辅助电网调频。文献[19]根据能量交互原理构建电热水器负荷聚合模型, 提出了一种热水器根据电网频率变化实时改变运行功率的调频策略, 实现了热水器辅助电网调频。上述文献中, 家用负荷经聚合后参与调频, 对电网频率稳定性有一定的提升。然而, 家用负荷空间分布广、用户随机性大、难以聚合, 不利于工程应用。电解铝作为柔性工业负荷, 具有功率大、控制性好的特点, 是优质的调频资源。文献[20]针对风电渗透率较高的孤立电网, 通过控制电解铝负荷的母线电压抑制风电并网时的频率波动。文献[21]基于电解铝负荷的特点, 提出一种考虑饱和电抗器调压深度约束的电解铝参与电网频率调节控制方法。上述文献中未对电解铝参与调频时降负荷进行限制, 可能影响电解铝厂生产质量, 且由于新能源出力波动及负荷扰动, 电解铝参与调频时需要频繁动作, 不利于电解铝厂正常生产。

仅考虑负荷侧参与调频不具有最优性, 亟需引入储能参与调频, 利用抽水蓄能电站参与调频是提高系统频率稳定性的可靠方法<sup>[22]</sup>。传统抽蓄电站的建设通常受限于地理位置和自然水资源的空间分

布, 随着国内能源转型, 云南省内存在大量废旧矿井, 其较大的水头落差及地下水资源为建造废旧矿井抽水蓄能电站创造了便利条件。文献[23]在含高比例新能源的矿区电网中, 提出了一种由废矿抽蓄电站与超级电容构成复合储能提升矿区电网频率稳定性的方法。文献[24]提出了废矿抽蓄电站参与多能源互补综合利用具体方案, 促进了新能源消纳, 更好保障电网稳定运行。文献[25]以降低矿区配电网系统运维成本及弃风弃光和负荷缺电的惩罚成本为目标, 构建了废矿抽蓄电站的优化配置模型, 并对优化配置模型的有效性进行了验证。上述文献提出废矿抽蓄电站的利用方案以及实现多能互补, 然而, 关于废矿抽蓄电站参与区域互联电网调频的相关研究较少。废矿抽蓄电站参与调频时, 需要功率型调频单元为抽蓄机组响应提供缓冲时间, 因此, 可以将抽蓄电站与超级电容器结合参与电网调频。

鉴于此, 本文提出一种含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频方法。首先, 建立电解铝工业负荷、废旧矿井抽蓄电站与超级电容频率响应模型。然后, 为提高系统负荷频率控制的精度和速度, 基于模型预测控制理论设计 DMPC 控制器, 并在考虑各类调频资源响应特性基础上提出含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频方法; 最后, 将分布式模型预测控制器应用在所提源-荷-储协同控制方法中, 通过仿真验证所提方法的优越性。

## 1 LFC 模型

### 1.1 电解铝负荷模型

电解铝中电解槽可利用一个等效电阻  $R_d$  和电势  $E_d$  串联表示。在电解铝内部电路模型与整流系统模型中, 采用基于饱和电抗器的调节方法, 保证电解铝精准降负荷。电解铝电气拓扑结构图以及电解铝负荷内部控制电路详见文献[26]。以  $E_b$  为 Buck 电路电压,  $L_b$  为滤波电感,  $C_b$  为滤波电容,  $r_b$  为 MOS 管内阻。

对电解铝负荷的电解槽模型、内部电路模型与整流系统模型进行整理, 占空比  $d$  作为输入量, 以电感电流  $I_b$ 、电容电压  $U_c$ 、控制绕组电流  $I_c$  和电解槽电压  $U_d$ 、电流  $I_d$  作为状态变量,  $\mathbf{x} = [I_b \ U_c \ I_c \ U_d \ I_d]^T$ , 得到完整的电解铝负荷内部控制电路的状态空间方程, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\mathbf{x}}$  表示状态变量的导数;  $\mathbf{y}$  表示输出量;  $\mathbf{u}$  为输入量,  $\mathbf{u} = [d]$ ,  $d$  为占空比;  $\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$ ;  $\mathbf{A}$ 、

B、D 详见附录 A。

则电解槽消耗的有功功率  $P_d$  如式(2)所示。

$$P_d = U_d I_d \quad (2)$$

### 1.2 废旧矿井抽水蓄能电站模型

废矿抽水蓄能电站类似于常规地表抽水蓄能电站，工作状态分为发电工况和抽水工况两种。废弃矿井抽水蓄能电站结构如图 1 所示。

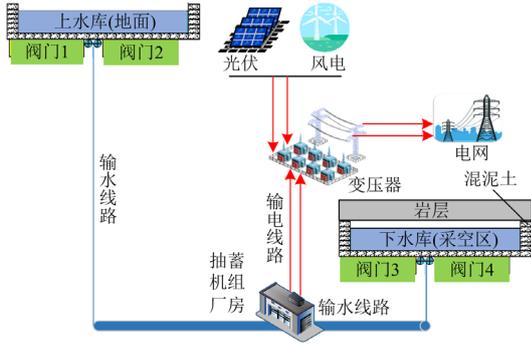


图 1 废旧矿井抽水蓄能电站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of waste mine-pumped storage power station

无损水轮机的经典传递函数  $G_t(s)$ ，如式(3)所示。

$$G_t(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + T_w s / 2} \quad (3)$$

式中： $T_w$  为水启动时间； $s$  为拉普拉斯变换算子。

因水锤效应存在，含暂态斜率补偿的调速器采用式(4)所示的传递函数  $G_g(s)$  表示。

$$G_g(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \cdot \frac{1 + s T_R}{1 + s (R_T / R) T_R} \quad (4)$$

式中： $T_g$  为调速器时间常数； $T_R$  为复位时间； $R_T$  为暂态下降率； $R$  为水轮机组的调差系数。

抽水蓄能机组抽水工况传递函数模型如图 2 所示。



图 2 抽水工况下传递函数模型图

Fig. 2 Transfer function model diagram under pumping conditions

图 2 中： $\Delta P_{pd}$  为抽水工况下一台蓄能机组所消耗的功率； $\alpha$  为工作在抽水工况下的机组台数；其他参数与发电工况下的相同。

抽水蓄能电站运行约束如下所述。

1) 抽水发电水量变化约束(以上水库为例)

$$V_{up}(t) = V_{up}(t - \tau) - \tau q_{ge} P_{ge} \quad (5)$$

$$V_{up}(t) = V_{up}(t - \tau) + \tau q_{pd} P_{pd} \quad (6)$$

式中： $V_{up}(t - \tau)$  为上水库  $t - \tau$  时段的水量； $V_{up}(t)$  为上水库  $t$  时段的水量； $P_{ge}$  为发电功率； $P_{pd}$  为抽水功率； $q_{ge}$  为抽蓄机组发电平均水/电量转换系数； $q_{pd}$  为抽水平均水/电量转换系数。

2) 抽水发电次数约束

$$0 \leq \sum_{t \in T} |\xi_{pd}(t) - \xi_{pd}(t + \tau)| + \sum_{t \in T} |\xi_{ge}(t) - \xi_{ge}(t + \tau)| \leq N_{max} \quad (7)$$

式中： $T$  为抽蓄机组全天运行时长； $\xi_{pd}(t)$  为  $t$  时段抽水状态； $\xi_{ge}(t)$  为  $t$  时段发电状态； $N_{max}$  为最大启停次数。

3) 上水库水量约束

$$V_{up min} \leq V_{up}(t) \leq V_{up max} \quad (8)$$

式中， $V_{up max}$ 、 $V_{up min}$  分别为库容最大、最小值。

综上所述，在废矿抽水蓄能电站满足以上约束条件的情况下，可得抽水蓄能电站模型为

$$G_p(s) = \begin{cases} \alpha \Delta P_{pd} \\ G_g(s) G_t(s) \end{cases} \quad (9)$$

常规可逆式抽水蓄能机组作为主要调频设备，其抽水功率往往为固定值，快速调频通常在发电工况下完成，本文在发电工况下进行仿真。

### 1.3 超级电容模型

超级电容传递函数模型如图 3 所示，其数学描述为

$$\Delta I_d = \frac{1}{T_c s + 1} (K_{CA} \Delta f_i - K_{vd} \Delta U_d) \quad (10)$$

$$\Delta U_d = \frac{R_{eq}}{R_{eq} C s + 1} \Delta I_d \quad (11)$$

$$\Delta P_{sc} = (U_{d0} + \Delta U_d) \Delta I_d \quad (12)$$

式中： $\Delta I_d$  为超级电容器电流变化量； $T_c$  为时间常数； $K_{CA}$  为控制信号  $ACE_i$  增益系数； $K_{vd}$  为电压反馈环增益系数； $\Delta U_d$  和  $\Delta P_{sc}$  分别为超级电容器电压和输出功率变化量； $R_{eq}$  为等效电阻； $C$  为等效电容； $U_{d0}$  为电容初始电压。

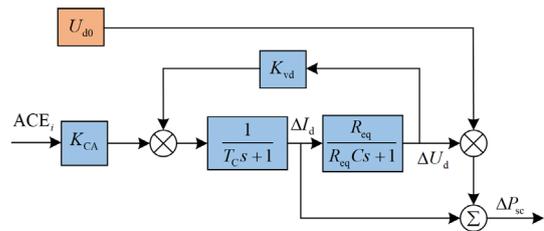


图 3 超级电容器传递函数模型图

Fig. 3 Transfer function model diagram of super capacitors

## 2 调频策略

### 2.1 DMPC 控制器设计

把整个系统划分为  $N$  个子系统, 设计每个子系统  $i(i=1,2,\dots,N)$  的控制器<sup>[27]</sup>。分析子系统  $i$  的火电机组方框图, 建立线性时不变状态空间模型如式 (13) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_{ii}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_{ii}\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{F}_{ii}\mathbf{w}_i(t) + \sum_{i \neq j} \mathbf{A}_{ij}\mathbf{x}_j(t) \\ \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_{ii}\mathbf{x}_i(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{A}_{ii}$  为系统矩阵;  $\mathbf{B}_{ii}$  为输入矩阵;  $\mathbf{F}_{ii}$  为干扰矩阵;  $\mathbf{C}_{ii}$  为输出矩阵;  $\mathbf{A}_{ij}$  为子系统  $i$  与子系统  $j$  的状态关联矩阵, 详见附录 A;  $\mathbf{x}_i(t)$  为状态变量,  $\mathbf{x}_i(t) = [\Delta f_i(t) \ \Delta P_{\text{tie},i}(t) \ \Delta P_{\text{gr}}(t) \ \Delta X_{\text{gr}}(t)]^T$ , 其中  $\Delta f_i(t)$  为频率偏差、 $\Delta P_{\text{tie},i}(t)$  为联络线交换功率、 $\Delta P_{\text{gr}}(t)$  为发电机输出功率偏差、 $\Delta X_{\text{gr}}(t)$  为调节阀位置偏差;  $\mathbf{y}_i(t)$  为输出变量;  $\mathbf{u}_i(t)$  为输入量,  $\mathbf{u}_i(t) = [\Delta P_{\text{ci}}(t)]$ ,  $\Delta P_{\text{ci}}(t)$  为系统控制信号;  $\mathbf{w}_i(t)$  为扰动量,  $\mathbf{w}_i(t) = [\Delta P_{\text{di}}(t)]$ ,  $\Delta P_{\text{di}}(t)$  为负载扰动量;  $\mathbf{x}_j(t)$  为区域  $j$  的状态量。

使用零阶保持器对系统模型进行离散化处理, 得到

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}_{ii}\mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k) + \tilde{\mathbf{F}}_{ii}\mathbf{w}_i(k) + \sum_{i \neq j} \tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k) \\ \mathbf{y}_i(k) = \tilde{\mathbf{C}}_{ii}\mathbf{x}_i(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{A}}_{ii}$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}_{ii}$ 、 $\tilde{\mathbf{F}}_{ii}$ 、 $\tilde{\mathbf{A}}_{ij}$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}_{ii}$  为式 (13) 中各系数矩阵离散化后的矩阵;  $\mathbf{x}_i(k)$ 、 $\mathbf{u}_i(k)$ 、 $\mathbf{w}_i(k)$  分别为子系统  $i$  在  $k$  时刻的状态量、输入量、扰动量;  $\mathbf{x}_j(k)$  为子系统  $j$  在  $k$  时刻的状态量。

设控制时域为  $N_c$ , 预测时域为  $N_p$ , 基于式 (14), 得出系统在预测时域下各个时刻的状态为

$$\mathbf{x}_i(k+1|k) = \tilde{\mathbf{A}}_{ii}\mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k) + \tilde{\mathbf{F}}_{ii}\mathbf{w}_i(k) + \sum_{i \neq j} \tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k) \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{x}_i(k+1|k)$  为子系统  $i$  在  $k$  时刻对  $k+1$  时刻状态量的预测值。

则状态量在  $k$  时刻对  $k+2$  时刻的预测值为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+2|k) = & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^2\mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{A}}_{ii}\tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k) + \tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k+1|k) + \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}\tilde{\mathbf{F}}_{ii}\mathbf{w}_i(k) + \tilde{\mathbf{F}}_{ii}\mathbf{w}_i(k+1|k) + \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}\sum_{i \neq j} \tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k) + \sum_{i \neq j} \tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k+1|k) \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{u}_i(k+1|k)$ 、 $\mathbf{w}_i(k+1|k)$  分别为子系统  $i$  在  $k$  时刻对  $k+1$  时刻输入量、扰动量的预测值;  $\mathbf{x}_j(k+1|k)$  为子系统  $j$  在  $k$  时刻对  $k+1$  时刻状态量的预测值。

则状态量在  $k$  时刻对  $k+N_p$  时刻的预测值为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+N_p|k) = & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p}\mathbf{x}_i(k) + \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p-1}\tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k) + \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p-2}\tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k+1|k) + \dots + \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{ii}^{N_p-N_c}\tilde{\mathbf{B}}_{ii}\mathbf{u}_i(k+N_c-1|k) + \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{ij}^{N_p-1}\tilde{\mathbf{F}}_{ii}\mathbf{w}_i(k) + \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{ij}^{N_p-2}\tilde{\mathbf{F}}_{ii}\mathbf{w}_i(k+1|k) + \dots + \\ & \tilde{\mathbf{F}}_{ij}\mathbf{w}_i(k+N_p-1|k) + \\ & \sum_{i \neq j} \left( \tilde{\mathbf{A}}_{ij}^{N_p-1}\tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k) + \tilde{\mathbf{A}}_{ij}^{N_p-2}\tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k+1|k) + \dots + \right. \\ & \left. \tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{x}_j(k+N_p-1|k) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

经递推变换, 可得出预测时域内的状态空间表达式为

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathbf{E}_i\tilde{\mathbf{u}}_i + \mathbf{f}_i\mathbf{x}_i(k) + \mathbf{G}_i\tilde{\mathbf{w}}_i + \sum_{i \neq j} (\mathbf{E}_{ij}\tilde{\mathbf{u}}_j + \mathbf{f}_{ij}\mathbf{x}_j(k) + \mathbf{G}_{ij}\tilde{\mathbf{w}}_j) \quad (18)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 、 $\tilde{\mathbf{u}}_i$ 、 $\tilde{\mathbf{w}}_i$  分别为子系统  $i$  基于  $k$  时刻对未来  $k+N_p$  各时刻下的预测状态量、预测输入量、预测扰动量;  $\tilde{\mathbf{u}}_j$ 、 $\tilde{\mathbf{w}}_j$  分别为子系统  $j$  基于  $k$  时刻对未来  $k+N_p$  各时刻下的预测输入量、预测扰动量;  $\mathbf{E}_i$ 、 $\mathbf{f}_i$ 、 $\mathbf{G}_i$ 、 $\mathbf{E}_{ij}$ 、 $\mathbf{f}_{ij}$ 、 $\mathbf{G}_{ij}$  为  $k$  时刻至未来  $k+N_p$  时刻所对应的系数矩阵, 具体表达式详见附录 A。

#### 1) 目标函数设计

为保证在输入量尽可能小的情况下使得各子系统状态尽快恢复至参考状态, 对于每个子系统  $i$  在预测时域  $k+N_p$  内设计目标函数  $J_i$ , 如式 (19) 所示。

$$J_i = \min_{\tilde{\mathbf{u}}_i} (\tilde{\mathbf{x}}_i^T \mathbf{Q}_i \tilde{\mathbf{x}}_i + \tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{R}_i \tilde{\mathbf{u}}_i) \quad (19)$$

式中,  $\mathbf{Q}_i$ 、 $\mathbf{R}_i$  均为子系统  $i$  对应的权重系数矩阵。

#### 2) 系统约束处理

考虑到火电厂存在发电机速率约束 (generation rate constrains, GRC), 其典型取值为  $\pm 0.0017$  p.u.。

GRC 约束表示为

$$|\Delta \dot{P}_{\text{gr}}(k)| \leq 0.0017 \quad (20)$$

式中,  $\Delta \dot{P}_{\text{gr}}(k)$  为发电机输出功率变化率。

综上, 控制器在满足约束的条件下, 对每个区域求解  $\min J_i(k)$ 。

### 2.2 电解铝负荷调频方法

电解铝参与调频过程中会受到实际生产和物理条件的限制, 电解铝负荷的系列电流值最低只能减

少到额定电流的 90%，否则会影响生产质量<sup>[28]</sup>。基于饱和电抗器的电解铝负荷控制框图如图 4 所示。电解铝负荷需要保持电解电流  $I_d$  为恒定值，在整个闭环控制过程中，以电流参考值  $I_d^{\text{ref}}$  与实际值  $I_d$  之差作为控制器输入，生成 PWM 脉冲信号以改变占空比  $d$ ，从而调整  $U_c$  以及  $I_c$ ，进而控制电流  $I_d$  维持在恒定值。

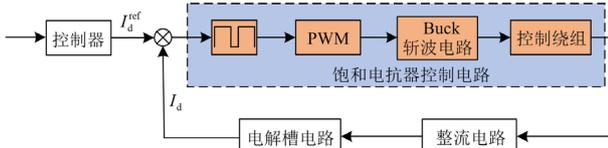


图 4 电解铝负荷控制流程图

Fig. 4 Flow chart of electrolytic aluminum load control

### 2.3 源-荷-储协同调频方法

一般情况下，传统火电机组每分钟输出的功率变化量为其额定容量的 2%~5%，调节速率较慢。考虑增加储能设备来提高系统的频率响应速度，废矿抽蓄电站能够提供长时间稳定功率输出，但是响应速度不够快，而超级电容器响应速度快，但因其能量密度低，无法保持长时间功率输出，因此，将废矿抽蓄电站与超级电容器联合形成混合储能系统参与调频，来充分发挥各自优势。引入电解铝负荷参与调频可以从根本上缓解传统机组调频压力，电解铝负荷可在数秒内实现下调 10% 的额定功率，能够快速降负荷支援电网。但电解铝厂属于工业用户，不适合频繁动作。因此，本文划分 ACE 信号区间，设定相应调频资源响应阈值，当信号进入警戒调频区时，储能参与调频，电解铝只在紧急情况下支援电网。

ACE 信号由本区域的频率偏差和联络线功率构成，电力系统中发出的有功功率在任何时刻都必须要和负荷功率保持平衡，这种平衡关系可以通过频率偏差来反映。根据频率偏差的大小，可将 ACE 信号划分为调频死区、正常调频区、警戒调频区和紧急调频区 4 个区间，如图 5 所示。

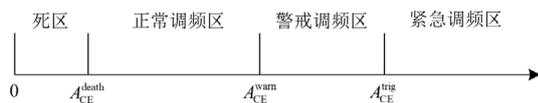


图 5 ACE 信号区间划分图

Fig. 5 ACE signal interval division diagram

图中： $A_{CE}^{\text{death}}$  为正常调频区的阈值； $A_{CE}^{\text{warm}}$  为警戒调频区的阈值； $A_{CE}^{\text{trig}}$  为紧急调频区的阈值。本文取调频死区频率偏差小于 0.033 Hz，正常调频区的频

率偏差为 (0.033, 0.08] Hz，警戒调频区的频率偏差为 (0.08, 0.15] Hz，紧急调频区的频率偏差为 (0.15, 0.2] Hz。

当系统处于正常调频区时，只有传统机组进行调频，此时传统发电机需响应功率为

$$P_G = \begin{cases} \min(|E_{ACE}^N|, P_G^{\text{in-max}}), & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{death}} \\ \min(E_{ACE}^N, P_G^{\text{de-max}}), & A_{CE} > A_{CE}^{\text{death}} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $E_{ACE}^N$  为正常调频区所需总功率； $P_G^{\text{in-max}}$  为传统机组可增发的最大有功功率； $P_G^{\text{de-max}}$  为传统机组可减少的最大有功功率。

当系统处于警戒调频区时，传统机组、废矿抽蓄电站和超级电容器三者联合调频，超级电容器最先做出响应，其次抽蓄机组，然后传统机组，此时三者需响应的功率  $P_{SC}$ 、 $P_{HC}$ 、 $P_G$  分别为

$$P_{SC} = \begin{cases} \min(|E_{ACE}^{\text{warm}}|, P_{SC}^{\text{dis-max}}), & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{warm}} \\ \min(E_{ACE}^{\text{warm}}, P_{SC}^{\text{ch-max}}), & A_{CE} > A_{CE}^{\text{warm}} \end{cases} \quad (22)$$

$$P_{HC} = \begin{cases} \min(|E_{ACE}^{\text{warm}}| - P_{SC}^{\text{warm}}, P_{HC}^{\text{in-max}}), & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{warm}} \\ \min(E_{ACE}^{\text{warm}} - P_{SC}^{\text{warm}}, P_{HC}^{\text{de-max}}), & A_{CE} > A_{CE}^{\text{warm}} \end{cases} \quad (23)$$

$$P_G = \begin{cases} \min(|E_{ACE}^{\text{warm}}| - P_{SC}^{\text{warm}} - P_{HC}^{\text{warm}}, P_G^{\text{in-max}}), & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{warm}} \\ \min(E_{ACE}^{\text{warm}} - P_{SC}^{\text{warm}} - P_{HC}^{\text{warm}}, P_G^{\text{de-max}}), & A_{CE} > A_{CE}^{\text{warm}} \end{cases} \quad (24)$$

式中： $E_{ACE}^{\text{warm}}$  为警戒调频区所需总功率； $P_{SC}^{\text{dis-max}}$  为超级电容最大允许放电功率； $P_{SC}^{\text{ch-max}}$  为超级电容最大允许充电功率； $P_{SC}^{\text{warm}}$  为超级电容在警戒调频区时的出力； $P_{HC}^{\text{in-max}}$  为水轮机可增发的最大有功功率； $P_{HC}^{\text{de-max}}$  为水轮机可减少的最大有功功率； $P_{HC}^{\text{warm}}$  为抽蓄机组在警戒调频区时的出力。

当系统处于紧急调频区时，传统机组、废矿抽蓄电站、超级电容器和电解铝负荷联合参与调频。超电容器、抽蓄机组、传统机组的响应功率为

$$P_{SC} = \begin{cases} P_{SC}^{\text{dis-max}}, & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{trig}} \\ P_{SC}^{\text{ch-max}}, & A_{CE} > A_{CE}^{\text{trig}} \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{HC} = \begin{cases} P_{HC}^{\text{in-max}}, & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{trig}} \\ P_{HC}^{\text{de-max}}, & A_{CE} > A_{CE}^{\text{trig}} \end{cases} \quad (26)$$

$$P_G = \begin{cases} P_G^{\text{in-max}}, & A_{CE} < -A_{CE}^{\text{trig}} \\ P_G^{\text{de-max}}, & A_{CE} > A_{CE}^{\text{trig}} \end{cases} \quad (27)$$

电解铝厂可降负荷支援电网功率  $P_{AL}$  为

$$P_{AL} = P_d - K P_d, K \in (0.9, 1) \quad (28)$$

式中， $K$  为电解铝负荷参与调频时系数。

### 3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中, 将电解铝、废矿抽蓄电站、超级电容融入 IEEE 标准两区域模型, 得到协同控制模型如图 6 所示。设置系统仿真容量为 500 MW,

电解铝厂的总消耗功率为 307 MW, 区域内其他负荷为 193 MW。在相同模型参数下, 采用 DMPC 控制器作为负荷频率控制器, 仿真分析不同场景下电力系统频率特性, 设置控制器采样时间  $T_s = 0.1\text{ s}$ , 控制时域  $N_c = 5$ , 预测时域  $N_p = 15$ 。

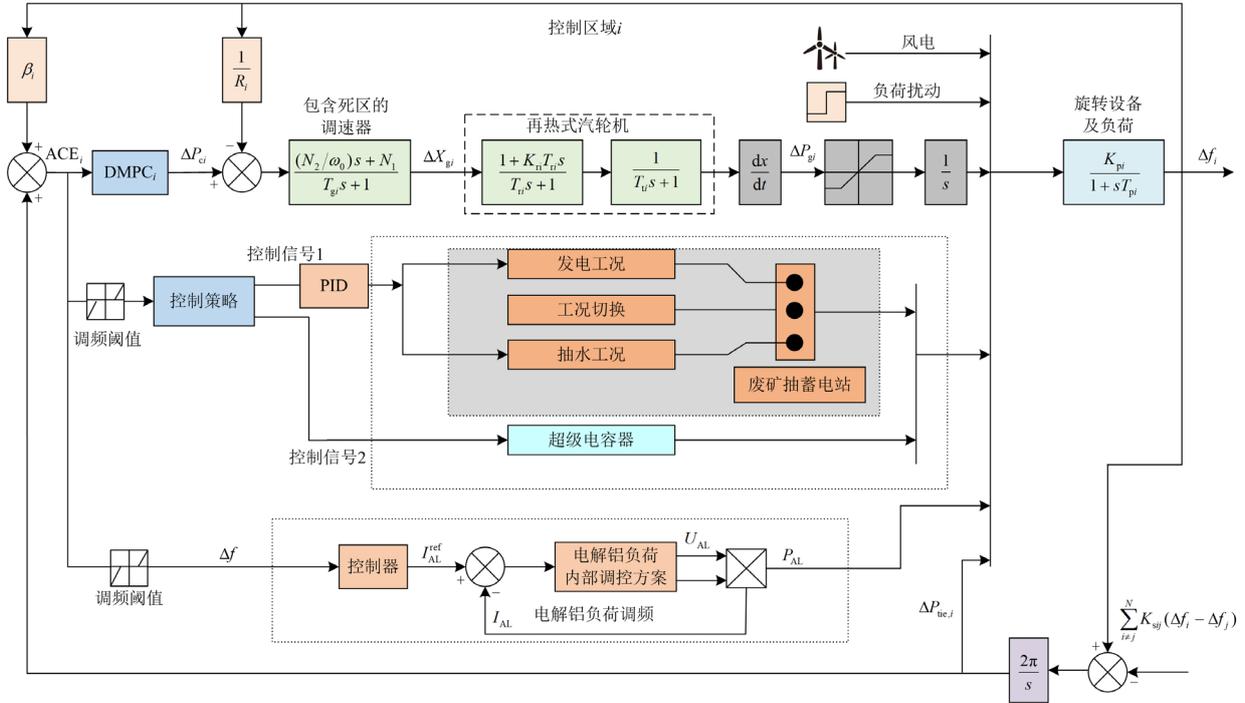


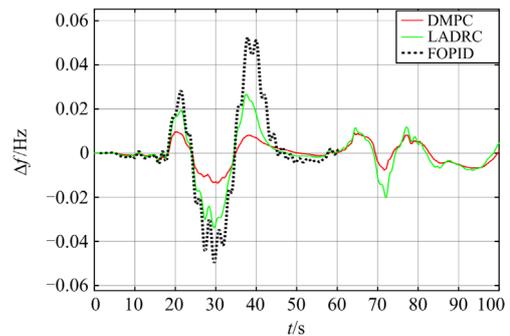
图 6 源-荷-储协同控制频率响应模型图

Fig. 6 Diagram of source-load-storage collaborative control frequency response model

#### 3.1 控制器性能分析

为验证本文所提控制器的有效性, 在相同风电出力波动下, 对比了分数阶 PID(fractional order PID, FOPID)和线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)两种控制器。仿真对比结果如图 7 所示。

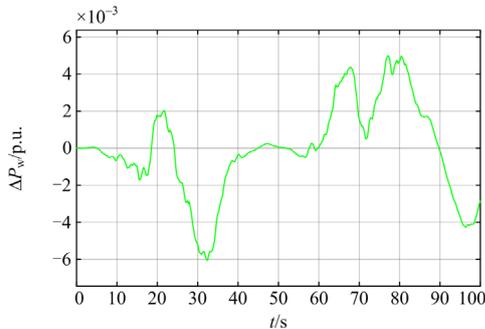
由图 7 可以看出, 在不可预测、不规则的随机扰动下, FOPID 控制下的最大频差为 0.049 Hz, 并且在调频过程中振荡频繁。在 LADRC 控制下的最



(b) 系统频率特性曲线

图 7 不同控制方式下频率偏差图

Fig. 7 Waste mine-pumped storage station diagram under different control methods



(a) 风电随机出力曲线

大频差为 0.033 Hz, 相比 FOPID 缩小了 0.016 Hz 左右, 振荡减小, 但是调节时间没有明显缩短。当系统采用本文设计的 DMPC 控制器时, 系统振荡更小、调节时间也缩短, 最大频差减小至 0.013 Hz, 验证了 DMPC 控制器具有更好的动态性能。

### 3.2 电解铝负荷参与电网调频性能分析

电解铝负荷的具体参数如附录 B 表 B1 所示。仿真在 10 s 时系统加入 0.01 p.u. 扰动, 仿真分析电解铝负荷参与电网调频和不参与电网调频两种工况下的频率波动情况, 结果如图 8 所示。

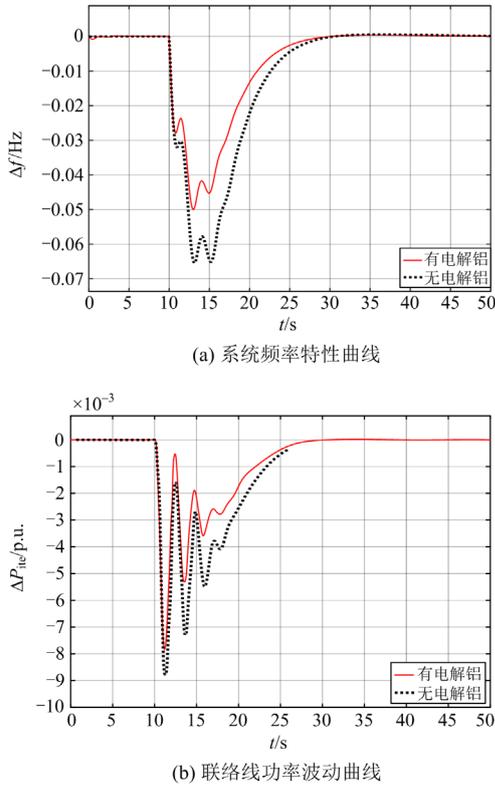


图 8 电解铝负荷参与电网调频

Fig. 8 Electrolytic aluminum load participating in power grid frequency regulation

由图 8 可以看出, 电解铝参与调频时, 最大频差从 0.065 Hz 减少至 0.049 Hz 左右, 相较于没有电解铝参与时最大频差提高了 24.6%, 同时联络线交换功率也减小, 说明电解铝负荷参与电网调频时分担了部分调频压力。因此, 电解铝参与电网调频能有效地减小系统的最大频差。

### 3.3 废矿抽蓄电站参与电网调频性能分析

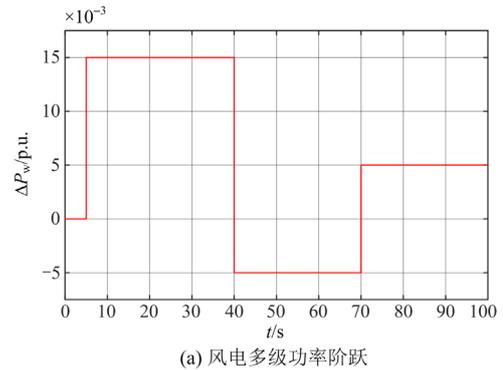
考虑实际情况风电功率波动, 假设在相应的时间尺度内只有风电出力波动, 设定风电功率波动如图 9(a)所示, 在 5 s、40 s 以及 70 s 发生阶跃变化, 风电功率波动较大时系统处于警戒调频区。超级电容器配置容量为 0.5 MWh, 储能模型参数如表 1 所示, 风电波动时废矿抽蓄电站参与电网调频仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 在 40 s 时风电功率突减 0.02 p.u., 导致系统频率突降, 仅依靠传统机组调频

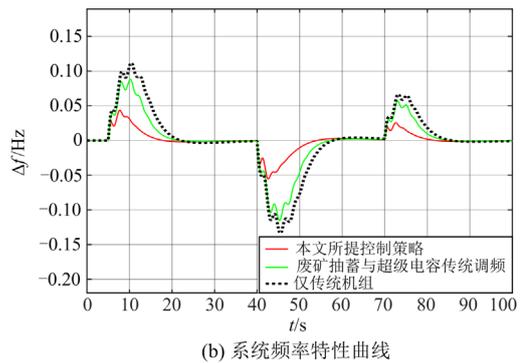
时系统的频率波动偏差较大, 最大频差达到 0.134 Hz。当废矿抽蓄电站与超级电容器采用传统方式参与调频时, 系统最大频差减小至 0.112 Hz, 而采用本文所提方法时, 系统频率偏差限制在 0.055 Hz 以内。风电功率在 5 s 和 70 s 出现波动时, 从系统频率特性曲线来看, 本文所提控制策略依然能够取得较好的控制效果。

表 1 储能模型参数

储能类型	参数	数值	参数	数值
废矿抽蓄电站	$T_w$	1	$K_p$	1
	$T_R$	5	$K_d$	4
	$T_g$	0.2	$K_i$	5
	$R$	0.05	$R_T$	0.38
	$U_{a0}/V$	3	$K_{vd}$	0.1
超级电容器	$K_{CA}$	1	$C/F$	1
	$T_c/s$	0.05	$R/\Omega$	0.01



(a) 风电多级功率阶跃



(b) 系统频率特性曲线

图 9 风电波动时废矿抽蓄电站参与电网调频

Fig. 9 Waste mine-pumped storage station participates in grid frequency regulation during wind power fluctuations

### 3.4 源-荷-储协同参与电网调频性能分析

假设电网初始处于正常运行状态下, 在 10 s 时负荷突增 0.04 p.u., 此时系统因负荷增量过大而处

于紧急调频区, 需要传统机组、废矿抽蓄电站、超级电容和电解铝负荷联合参与调频。仿真结果如图 10 所示。

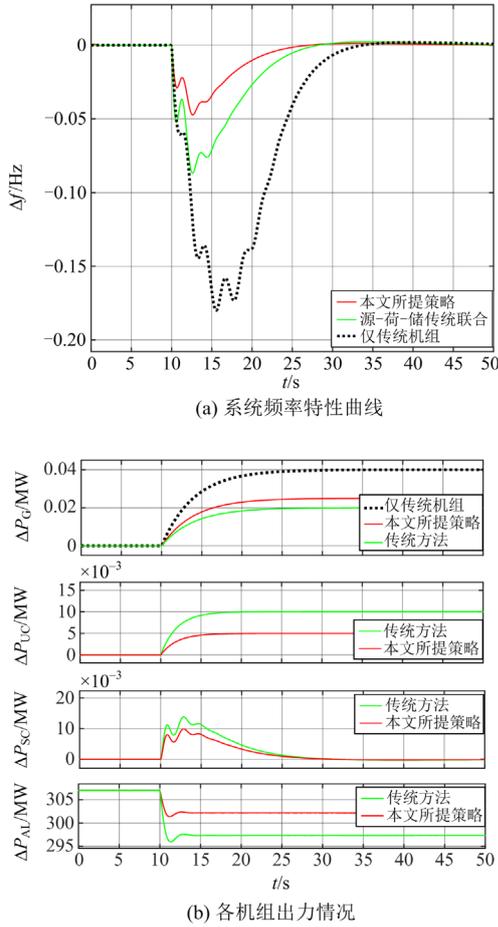


图 10 源-荷-储协同参与调频

Fig. 10 Collaborative participation of source-load storage in frequency modulation

由图 10 可以看出, 在紧急情况下, 仅依靠传统机组调频时, 最大频差为 0.179 Hz。在废矿抽蓄电站、超级电容器和电解铝等调频资源采用传统方法联合参与调频时, 最大频差减小至 0.078 Hz, 相比仅传统机组调频时, 调频性能大幅提升, 而采用本文所提方法之后, 最大频差值进一步减小至 0.046 Hz。同时, 与传统方法将几种调频资源简单联合相比, 本文所提方法能够降低电解铝负荷和储能的动作深度。传统方法中电解铝负荷功率从 307 MW 下降至 297 MW, 释放 10 MW 有功功率, 而采用本文所提方法时, 电解铝仅释放 5 MW 有功功率, 动作深度更小, 对电解铝负荷正常生产造成的影响更小, 废矿抽蓄电站与超级电容的响应情况亦然, 动作深度减小, 降低抽蓄机组机械磨损, 避免超级电容的过充或过放, 延长了它们的寿命。

## 4 结论

本文针对新能源在电网中渗透率不断提高导致系统调频容量和频率响应能力不足的问题, 提出一种含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制方法, 得出如下结论。

1) 针对新能源的间歇性、随机性, 引入分布式模型预测控制。相对于传统 FOPID 与 LADRC, DMPC 在优化系统性能方面速率高且效果好, 能够使系统具有较强的鲁棒性。

2) 电解铝负荷在保证生产质量的前提下, 适当降低有功功率消耗, 辅助电网调频, 能有效地减小系统的最大频差, 提高系统恢复速度, 进一步保障电网稳定运行。

3) 废矿抽蓄电站与超级电容器联合参与电网调频, 能够精确跟踪负荷, 快速响应系统频率变化, 有效提高系统频率恢复速度。

4) 在考虑电解铝负荷及储能响应特性基础上设计协同控制方法, 与传统方法相比, 能够更快平抑系统频率波动, 增强系统的抗干扰能力, 避免电解铝及储能频繁动作的同时降低动作的深度。

随着新能源并网规模不断扩大, 电网频率稳定性问题日益突出, 本文仅从理论层面考虑电解铝负荷、废矿抽蓄电站等可调频资源参与电网调频, 为保证电解铝负荷、废矿抽蓄电站参与调频辅助服务市场, 政府配套政策、激励机制与运营机制方面仍有待进一步研究。

## 附录 A

### 1) 电解铝负荷状态空间矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r_b}{L_b} & -\frac{1}{L_b} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_b} & -\frac{1}{C_b R_c} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_c C_b} & 0 & -\frac{1}{R_c C_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-k_{sr}}{L_d} & 0 & -\frac{R_d}{L_d} \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{E_b}{L_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (\text{A2})$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & U_{do} & \frac{U_{do} - E_d}{L_d} \end{bmatrix}^T \quad (\text{A3})$$

## 2) 火电机组状态空间矩阵

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{Pi}} & \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & \frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & 0 \\ \sum_{i \neq j} K_{Sij} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Ti}} & \frac{1}{T_{Ti}} \\ -\frac{1}{T_{gi}R_i} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} \end{bmatrix} \quad (A4)$$

$$B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{gi}} \end{bmatrix}^T \quad (A5)$$

$$C_{ii} = [\beta_i \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad (A6)$$

$$F_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{Pi}}{T_{Pi}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (A7)$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{Sij} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (i \neq j) \quad (A8)$$

## 3) 系统预测方程系数矩阵

$$E_i = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{ii} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}\tilde{B}_{ii} & \tilde{B}_{ii} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}^2\tilde{B}_{ii} & \tilde{A}_{ii}\tilde{B}_{ii} & \tilde{B}_{ii} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{B}_{ii} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-2}\tilde{B}_{ii} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-3}\tilde{B}_{ii} & \cdots & \tilde{A}_{ii}^{N_p-N_c}\tilde{B}_{ii} \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$f_i = [\tilde{A}_{ii} \quad \tilde{A}_{ii}^2 \quad \tilde{A}_{ii}^3 \cdots \tilde{A}_{ii}^{N_p}]^T \quad (A10)$$

$$G_i = \begin{bmatrix} \tilde{F}_{ii} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}\tilde{F}_{ii} & \tilde{F}_{ii} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}^2\tilde{F}_{ii} & \tilde{A}_{ii}\tilde{F}_{ii} & \tilde{F}_{ii} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{F}_{ii} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-2}\tilde{F}_{ii} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-3}\tilde{F}_{ii} & \cdots & \tilde{F}_{ii} \end{bmatrix} \quad (A11)$$

$$E_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{ij} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}\tilde{B}_{ij} & \tilde{B}_{ij} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}^2\tilde{B}_{ij} & \tilde{A}_{ii}\tilde{B}_{ij} & \tilde{B}_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{B}_{ij} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-2}\tilde{B}_{ij} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-3}\tilde{B}_{ij} & \cdots & \tilde{A}_{ii}^{N_p-N_c}\tilde{B}_{ij} \end{bmatrix} \quad (A12)$$

$$f_{ij} = [\tilde{A}_{ij} \quad \tilde{A}_{ii}\tilde{A}_{ij} \quad \tilde{A}_{ii}^2\tilde{A}_{ij} \quad \cdots \quad \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{A}_{ij}]^T \quad (A13)$$

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{F}_{ij} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}\tilde{F}_{ij} & \tilde{F}_{ij} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}_{ii}^2\tilde{F}_{ij} & \tilde{A}_{ii}\tilde{F}_{ij} & \tilde{F}_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{ii}^{N_p-1}\tilde{F}_{ij} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-2}\tilde{F}_{ij} & \tilde{A}_{ii}^{N_p-3}\tilde{F}_{ij} & \cdots & \tilde{F}_{ij} \end{bmatrix} \quad (A14)$$

## 附录 B

表 B1 电解铝负荷参数

Table B1 Electrolytic aluminum load parameter

参数	数值	参数	数值
Buck 电路电压 $E_b/V$	48	二极管缓冲电阻 $R_s/\Omega$	500
滤波电感 $L_b/mH$	80	二极管缓冲电容 $C_s/F$	$2.5 \times 10^{-7}$
滤波电容 $C_b/\mu F$	100	电解槽等效电阻 $R_d/m\Omega$	2.048
MOS 管内电阻 $R_{on1}/\Omega$	3	等效电感 $L_d/mH$	1
MOS 管内部二极管电阻 $R_{d1}/\Omega$	0.001	反电动势 $E_d/V$	409.6
MOS 管内部二极管压降 $V_{n1}/V$	10	系列电流 $I_d/kA$	300
二极管内电阻 $R_{on2}/\Omega$	0.01	系列电压 $U_d/V$	1024
二极管内部压降 $V_{n2}/V$	0.25	控制绕组电阻 $R_c/\Omega$	1.5

## 参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819. ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14. SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [3] 李谟发, 张志文, 练红海, 等. 含双馈风电电力系统的采样负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 77-88. LI Mofa, ZHANG Zhiwen, LIAN Honghai, et al. Sampling load frequency control of power systems with doubly-fed wind power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 77-88.
- [4] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179. WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the

- construction of a new type of power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 172-179.
- [5] 黄远明, 张玉欣, 夏赞阳, 等. 考虑需求响应资源和储能容量价值的新型电力系统电源规划方法[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(4): 432-441.  
HUANG Yuanming, ZHANG Yuxin, XIA Zanyang, et al. Power system planning considering demand response resources and capacity value of energy storage[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2023, 57(4): 432-441.
- [6] 徐晶, 赵亮, 张梁, 等. 考虑移动储能接入的柔性配电网运行优化策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 112-119.  
XU Jing, ZHAO Liang, ZHANG Liang, et al. Operation optimization method for flexible distribution network considering the integration of mobile energy storage[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 112-119.
- [7] 郭小龙, 张江飞, 亢朋朋, 等. 含基于PI控制受端二次调频的特高压直流虚拟同步控制策略[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 66-72.  
GUO Xiaolong, ZHANG Jiangfei, KANG Pengpeng, et al. Virtual synchronization control strategy for UHVDC with secondary frequency modulation based on PI control[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 66-72.
- [8] 刘辉, 吴晓鸣, 苏懿. 基于动态下垂控制的温控负荷一次调频控制策略[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(2): 48-57.  
LIU Hui, WU Xiaoming, SU Yi. Thermostatically controlled loads control for primary frequency regulation based on dynamic droop control[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2): 48-57.
- [9] 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.
- [10] BARAKAT M. Novel chaos game optimization tuned-fractional-order PID fractional-order PI controller for load-frequency control of interconnected power systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(2): 213-232.
- [11] KULJACA O, GADEWADIKAR J, SELMIC R R. Adaptive neural network frequency control for thermo power generators power system[J]. *International Journal of Robotics and Automatic*, 2011, 26(1): 86-92.
- [12] 米阳, 郝学智, 刘红业, 等. 基于滑模控制的含风储多域电力系统负荷频率控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 437-444.
- MI Yang, HAO Xuezhi, LIU Hongye, et al. Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 437-444.
- [13] 付阳, 宋运忠. 考虑可控负荷的多区域电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 101-109.  
FU Yang, SONG Yunzhong. Load frequency control of power systems based on MPC algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 101-109.
- [14] 魏家柱, 潘庭龙. 计及分配因子的互联电网频率模型预测控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(6): 1-6.  
WEI Jiazhu, PAN Tinglong. Predictive control strategy for interconnected grid frequency model considering distribution factors[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(6): 1-6.
- [15] 杨超, 姚伟, 文劲宇. 基于事件驱动的含风电互联电网负荷频率鲁棒控制[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(16): 57-64.  
YANG Chao, YAO Wei, WEN Jinyu. Event triggering based robust control of load frequency for interconnected power grid with wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(16): 57-64.
- [16] 杨罡, 刘明光, 屈志坚. 基于MPC算法的电力系统负荷频率控制[J]. *北京交通大学学报*, 2012, 36(2): 105-110.  
YANG Gang, LIU Mingguang, QU Zhijian. Load frequency control of power systems based on MPC algorithm[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2012, 36(2): 105-110.
- [17] 葛罗, 冯焯, 胡凯, 等. 新型电力系统下空调负荷聚合建模及可控潜力评估[J]. *浙江电力*, 2023, 42(4): 45-53.  
GE Luo, FENG Xuan, HU Kai, et al. Air conditioning load aggregation modeling and the schedulable potential evaluation in the context of new-type power system[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(4): 45-53.
- [18] 马晓磊, 段鹏飞, 李中伟, 等. 基于分层分组的电动汽车负荷二次调频控制策略研究[J]. *自动化仪表*, 2023, 44(7): 30-35, 40.  
MA Xiaolei, DUAN Pengfei, LI Zhongwei, et al. Research on load secondary frequency modulation control strategy for electric vehicles based layered grouping[J]. *Automation Instrumentation*, 2023, 44(7): 30-35, 40.
- [19] 李中伟, 白子扬, 周伟健, 等. 电热水器负荷参与电力系统调频响应过程分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(3): 183-189.  
LI Zhongwei, BAI Ziyang, ZHOU Weijian, et al. Analysis process of electric water heater load involved in power system frequency modulation response[J]. *Journal of*

Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 183-189.

[20] 廖思阳, 张明强, 徐箭, 等. 考虑静态电压稳定约束的电解铝参与电网频率稳定控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6727-6740.

LIAO Siyang, ZHANG Mingqiang, XU Jian, et al. Frequency stability control method for electrolytic aluminum participation in power grid considering the static voltage stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6727-6740.

[21] 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.

[22] 武鑫, 尚文举, 马志勇, 等. 抽水蓄能-飞轮混合储能系统协调控制方法[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 468-476.

WU Xin, SHANG Wenju, MA Zhiyong, et al. Coordinated control method for pumped and flywheel hybrid energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 468-476.

[23] 钟睿, 滕松, 梁睿, 等. 基于复合储能系统的矿区电网频率弹性提升方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2291-2298.

ZHONG Rui, TENG Song, LIANG Rui, et al. Research on frequency elasticity enhancement method of mining area power grid based on hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2291-2298.

[24] 刘钦节, 杨卿干, 杨科, 等. 废弃矿井抽水蓄能电站多能互补利用模式及案例分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 578-586.

LIU Qinjie, YANG Qinggan, YANG Ke, et al. Case study of Pumped storage hydropower based on multi-energy complementary utilization mode in abandoned coal mines[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(3): 578-586.

[25] 滕松, 刘毅, 钟睿, 等. 基于高比例可再生能源的废矿抽蓄电站优化配置研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 87-95, 103.

TENG Song, LIU Yi, ZHONG Rui, et al. Optimal configuration of abandoned mine pumped storage power station based on high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 87-95, 103.

[26] BAO P, WEN Z, CHENG DY, et al. Hierarchical control of aluminum smelter loads for primary frequency support considering control cost[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 106202.

[27] 杨冬锋, 朱军豪, 姜超, 等. 基于分布式模型预测的高比例风电系统多源协同负荷频率控制策略[J/OL]. 电网技术: 1-14[2023-08-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0889>.

YANG Dongfeng, ZHU Junhao, JIANG Chao, et al. High proportion wind power system multi-source collaborate load frequency control strategy based on distributed model prediction[J/OL]. Power System Technology: 1-14 [2023-08-28]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0889>.

[28] 陈元峰, 徐箭, 范传光, 等. 基于电解铝负荷调节的含高渗透率风电孤立电网频率控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 92-100.

CHEN Yuanfeng, XU Jian, FAN Chuanguang, et al. Frequency control strategy based on electrolytic aluminum load regulation for isolated grids with high wind power penetration[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 92-100.

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-10-28

作者简介:

骆钊(1986—), 男, 通信作者, 副教授, 博导, 研究方向为区块链、电力市场与电力监管、电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中应用等; E-mail: waiting.198611@live.com

田肖(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、主动配电网的应用等; E-mail: 3130158063@qq.com

莫熙(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行与控制等. E-mail: 3459212840@qq.com

(编辑 张颖)