

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250056

# 基于事件触发自适应 MPC 的电解铝工业园区 孤网多时间尺度优化调度

熊文静<sup>1</sup>, 宋啸宇<sup>1</sup>, 袁亮<sup>1</sup>, 张荐<sup>2</sup>, 刘瑞平<sup>1</sup>, 粟梅<sup>1</sup>

(1. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 新型绿色电解铝工业园区孤立电网具有负荷大、新能源占比高、调节能力有限等特点, 其运行易受转折性天气及阳极效应等不确定因素影响, 导致光伏出力与电解铝负荷剧烈波动, 威胁电网安全。因此, 提出一种日前、日内两阶段多时间尺度优化调度方法。日前阶段以系统经济性最优为目标, 优化火电与储能的出力计划。日内阶段, 兼顾系统经济性最优与调整量最小, 采用模型预测控制(model predictive control, MPC)滚动修正调度计划。同时利用电解铝的虚拟电池特性参与调节, 平抑源荷功率波动和预测误差。针对传统 MPC 固定时间步长难以平衡优化精度与计算效率的问题, 提出基于事件触发的自适应变步长 MPC 策略, 依据功率波动和预测误差动态调整调度步长。算例表明, 所提方法能有效降低弃光、减轻火电调节压力, 提升电解铝工业园区的灵活性、经济性和绿色性。  
**关键词:** 孤立电网; 多时间尺度优化调度; 电解铝虚拟电池; 模型预测控制; 事件触发驱动; 自适应变步长

## Multi-timescale optimal scheduling for isolated electrolytic aluminum industrial parks based on event-triggered adaptive MPC

XIONG Wenjing<sup>1</sup>, SONG Xiaoyu<sup>1</sup>, YUAN Liang<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, LIU Ruiping<sup>1</sup>, SU Mei<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Isolated power grids in new green electrolytic aluminum industrial parks are characterized by large loads, high proportion of renewable energy, and limited regulating capability. Their operation is easily affected by uncertainties such as sudden weather changes and anode effects, resulting in severe fluctuations in photovoltaic output and electrolytic aluminum load that threaten grid security. To address these issues, this paper proposes a two-stage multi-timescale optimal scheduling method consisting of day-ahead and intra-day phases. In the day-ahead phase, the objective is to minimize system operating cost by optimizing thermal power and storage output plans. In the intra-day phase, both economic efficiency and minimal adjustment effort are considered. A rolling optimization strategy based on model predictive control (MPC) is adopted to update the schedule, while leveraging the virtual battery characteristics of electrolytic aluminum load to mitigate source-load power fluctuations and forecasting errors. To overcome the limitation of conventional fixed-step MPC, which struggles to balance optimization accuracy and computational efficiency, an event-triggered adaptive variable-step MPC strategy is proposed. This strategy dynamically adjusts the scheduling step size according to real-time power fluctuations and prediction errors. Case studies show that the proposed method effectively reduces photovoltaic curtailment, alleviates thermal unit regulation pressure, and enhances the flexibility, economy, and sustainability of electrolytic aluminum industrial park operations.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFE0202600).

**Key words:** isolated grid; multi-timescale optimal scheduling; electrolytic aluminum virtual battery; model predictive control; event-triggered mechanism; adaptive variable step size

## 0 引言

“双碳”目标下, 建设可持续发展、清洁高效

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2024YFE0202600);  
国家自然科学基金项目资助(52307156, 52377202)

的能源系统是目前能源转型的方向<sup>[1-3]</sup>。电解铝工业园区作为一类相对独立的高耗能型电力系统, 是节能减排的重要对象, 同时在消纳可再生能源方面具备很大的潜力<sup>[4]</sup>。因此, 在工业园区因地制宜地发展可再生能源发电, 构建源-荷-储一体化系统, 促进可再生能源就地消纳, 提升园区生产的绿色性和

经济性，成为重要的研究方向<sup>[5]</sup>。

新型绿色电解铝工业园区孤立电网具有负荷容量大、可再生能源供电比例高的特点。可再生能源分布式发电出力存在较强的随机性和波动性，电解铝的生产过程中也存在阳极效应等偶发功率波动，这种不确定性会导致基于源荷预测数据的电网调度受到极大影响。而且园区孤立电网外部缺乏大电网支撑，内部的传统煤矸石火电机组深度调峰和爬坡能力有限。因此，园区孤网运行的稳定性极易受到源荷功率波动的冲击，如何通过合理的调度手段实现有功功率平衡是需要解决的首要问题。

为应对电力系统源荷的不确定性，现有研究通常采用多时间尺度策略进行“多级协调、逐级精细”的调度<sup>[6]</sup>。调度过程中还需要发挥多种灵活性资源实现协调优化运行。对于高耗能型工业园区，挖掘利用负荷侧的柔性资源也是重要的手段。部分研究将电解铝负荷调节用于电网的频率稳定控制<sup>[7]</sup>和平抑新能源功率波动<sup>[4]</sup>，验证了其较强的调节能力。在此基础上，电解铝负荷在园区孤网调度过程中调节特性分析与建模可以进行进一步研究。

在多时间尺度调度框架下，随机优化<sup>[8]</sup>、鲁棒优化<sup>[9-10]</sup>、区间优化<sup>[11]</sup>等优化方法虽然能在一定程度上应对系统的不确定性，但是对于运行日内突发的功率波动事件难以进行实时的调整，特别是对于缺乏支撑的园区孤立电网，对功率波动事件的及时响应则更为重要。模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种先进的控制理论方法，可以应用在短时间尺度调度阶段，通过滚动优化和反馈校正的结合，有效减小因预测误差和序列波动产生的调度偏差，具有较强的实时性和鲁棒性。文献[12]基于 MPC 实现主动配电网日前调度、日内滚动调度以及实时反馈校正，减少可再生能源间歇性以及负荷预测误差对配电网运行的影响。文献[13]针对园区型综合能源系统建立了滚动优化、动态调整两阶段多时间尺度 MPC 调度策略，实现了园区系统的可靠经济运行。

传统的 MPC 策略通常采用固定的时域参数，而时间步长的选择会面临优化精度和计算量的权衡，这两者的重要性和优先度在不同运行条件下是不一样的。较短的步长能在源荷功率波动时，基于更精准的预测数据进行更频繁的优化计算和机组调节；较长的步长能在系统源荷功率平稳时，避免计算冗余。因此，相关研究逐渐聚焦于时域参数的自适应调整。例如，在日前调度过程中，基于灵活性供需幅频特征匹配结果<sup>[14]</sup>或预测数据的时频特性分析<sup>[15]</sup>，自适应确定次日各时段的调度步长；在日

内调度中，在常规 MPC 基础上，考虑预测误差<sup>[16-17]</sup>和调度误差<sup>[18]</sup>，动态调整时域参数，协调优化精度与计算时间的平衡。时间步长调整实际上是一种控制过程，而事件触发驱动可以根据系统实际需求选择控制活动是否进行，很适用于需要根据源荷功率波动情况调整调度时间步长的场景。已有研究将自适应策略与事件触发驱动机制结合运用到电网频率控制当中<sup>[19-21]</sup>，实现了更优的控制效果。对于电解铝工业园区孤立电网的优化调度问题，如何设计事件触发机制实现对极端功率波动性事件的辨识，同时建立合理的自适应时间步长调整方法，亟待进一步研究。

基于此，本文提出一种多时间尺度源-荷-储优化调度方法。在日前阶段，以系统经济性最优为目标求解火电、储能机组的出力计划；在日内阶段，以系统经济性最优和调整量最小为目标，采用 MPC 的方法对日前计划进行滚动修正，并利用电解铝的虚拟电池特性参与调节；同时在传统 MPC 的基础上提出基于事件触发的自适应变步长策略，在波动发生和结束时触发步长调整机制，实现对电解铝工业园区源荷储一体化系统更具适应性、精度更高的优化控制。

## 1 含电解铝的工业园区孤立电网优化调度

### 1.1 含电解铝的工业园区孤立电网系统

含电解铝的工业园区孤立电网源-荷-储一体化系统结构如图 1 所示。在源端由光伏发电单元和煤矸石火电机组协同供电，负荷端主要为电解铝负荷、其他动力负荷以及生活负荷，具备一定的调节潜力，同时配置一定容量的储能，通过合理充放电维持系统电量平衡、促进光伏消纳。

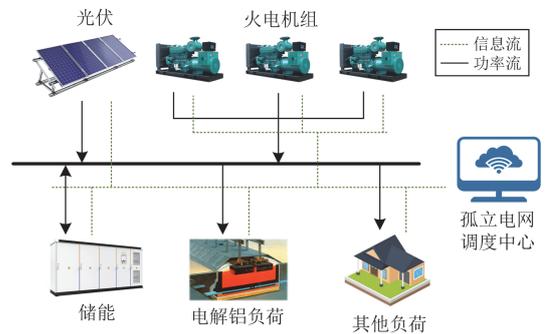


图 1 含电解铝的工业园区孤立电网系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of isolated industrial power system containing electrolytic aluminum

### 1.2 源荷不确定性分析

电解铝负荷是本文所研究的园区负荷侧的主

体, 约占系统总负荷的 95% 以上, 其生产一般要求载荷尽可能稳定, 波动幅度在 1% 以内。但由于电解铝的反应机理, 电解槽在生产过程中会不可避免地发生阳极效应, 平均每天发生 0.5~1 次, 这是电解铝负荷正常生产时形成功率冲击的主要原因。

电解系列由多台电解槽相互串联组成, 可以将电解系列等效为如图 2 所示的串联回路的模型, 则电解系列的伏安关系为<sup>[22]</sup>

$$U_{dc} + \Delta U_{cx} = I_{dc} R_{eq} + E_{eq} \quad (1)$$

式中:  $R_{eq}$  为电解系列总电阻;  $E_{eq}$  为电解系列电化学反应电压总和;  $U_{dc}$  和  $I_{dc}$  分别为电解系列的直流电压、电流;  $\Delta U_{cx}$  为阳极效应电压之和。

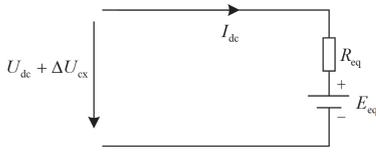


图 2 电解系列电路等效模型

Fig. 2 Equivalent model of electrolytic-aluminum circuit

基于上述模型, 可计算电解铝负荷有功功率为

$$P_{Al} = \frac{(U_{dc} + \Delta U_{cx} - E_{eq})}{R_{eq}} (U_{dc} + \Delta U_{cx}) \quad (2)$$

电解铝生产往往采用直流大电流低电压冶炼, 并采用恒电流控制。当阳极效应发生时, 槽电压将在短时间内急剧上升, 由于电解槽电流较高, 因此即使是小幅的电压变化, 也会在短时间内发生 5%~8% 的功率波动, 并可持续 5~10 min, 影响园区电力系统的稳定运行。而且铝电解槽的槽况参数繁多, 阳极效应的超前、准确预测极为困难<sup>[23]</sup>。

此外, 为实现绿色化生产, 本文所研究的园区采用大比例光伏接入与火电联合供电, 而光伏发电受天气影响较大, 具有较强的波动性和不确定性。在寒潮、系统性降水、冷锋过境等转折性天气过程发生时, 光伏预测与实际出力可能产生较大偏差<sup>[24]</sup>。光伏和电解铝的不确定波动和功率预测误差使得基于预测数据的电网调度受到极大影响, 因此, 系统调度需要及时更新并聚焦源荷波动信息, 利用调节资源快速响应波动。

### 1.3 电解铝负荷的虚拟电池调节特性

电解铝负荷具有容量大、可主动调节、响应迅速的运行特点, 在生产过程中短时间内提高或降低一定容量的负荷功率, 不会对产量和设备安全造成影响<sup>[4]</sup>。因此可以发挥类似于电化学储能的“虚拟电池”的作用<sup>[25]</sup>, 根据源荷功率实时平衡需求, 灵活快速地上和向下调节。特别是转折性天气等极

端情景下, 电解铝“虚拟电池”参与运行日内的快速调节响应可以减轻电源侧功率波动和预测误差对园区孤立电网的影响。构建的电解铝负荷调节模型为

$$P_{Al,t} = P_{Al,t-1} + z_t \cdot \Delta P_{Al,t} \quad (3)$$

式中:  $P_{Al,t}$  为  $t$  时段电解铝负荷功率;  $z_t$  为 0-1 变量, 表示电解铝负荷的调节状态, 0 表示不调节, 1 表示参与调节;  $\Delta P_{Al,t}$  为  $t$  时段电解铝负荷调节功率。

同时, 为保证电解铝在参与调节的同时能够安全可靠运行, 需构建以下约束。

#### 1) 考虑温度的运行功率约束

一定幅度的功率变化不会对电解槽的热平衡造成严重损害, 热平衡可由式(4)描述<sup>[26]</sup>。

$$\int P_{Al,t} dt = \Delta H_0 + Q_{out} \quad (4)$$

式中:  $\Delta H_0$  为生产过程消耗的热量;  $Q_{out}$  为生产过程散失的热量。

当电解铝功率负荷功率变化  $\Delta P_{Al,t}$  时, 热平衡公式变化为

$$c_{Al} m_{Al} \Delta T_{Al} = (P_{Al,t} + \Delta P_{Al,t}) \Delta t - \Delta H_0 - Q_{out} \quad (5)$$

式中:  $c_{Al}$ 、 $m_{Al}$  分别为电解质的比热容系数和质量;  $\Delta t$  为系统调度时间间隔。

则电解槽温度的变化量为

$$\Delta T_{Al} = \frac{\Delta P_{Al,t} \Delta t}{c_{Al} m_{Al}} \quad (6)$$

则对于相邻时刻的功率-温度耦合约束为

$$(P_{Al,t} - P_{Al,t-1}) \Delta t = c_{Al} m_{Al} (T_{Al,t} - T_{Al,t-1}) \quad (7)$$

$$T_{Al}^{\min} \leq T_{Al,t} \leq T_{Al}^{\max} \quad (8)$$

式中:  $T_{Al,t}$  为电解铝负荷的生产温度;  $T_{Al}^{\max}$ 、 $T_{Al}^{\min}$  分别为电解铝负荷的温度上、下限, 一般分别取 970 °C、950 °C。

则任意时刻, 由功率-温度耦合关系决定的电解铝功率调节上、下限  $P_{Al,t}^{\max}$ 、 $P_{Al,t}^{\min}$  分别为

$$P_{Al,t}^{\max} = P_{Al,t} + c_{Al} m_{Al} (T_{Al}^{\max} - T_{Al,t-1}) / \Delta t \quad (9)$$

$$P_{Al,t}^{\min} = P_{Al,t} + c_{Al} m_{Al} (T_{Al}^{\min} - T_{Al,t-1}) / \Delta t \quad (10)$$

#### 2) 调度周期内产量约束

$$\sum_{t=1}^T P_{Al,t} \geq K E_{Al}^N \quad (11)$$

式中:  $T$  为调度周期;  $K$  为电解铝生产的能耗系数;  $E_{Al}^N$  为调度周期内电解铝产量要求。

#### 3) 单时段调节功率上限约束

$$-\Delta P_{Al,t}^{\downarrow} \leq \Delta P_{Al,t} \leq \Delta P_{Al,t}^{\uparrow} \quad (12)$$

式中:  $\Delta P_{Al,t}^{\uparrow}$ 、 $\Delta P_{Al,t}^{\downarrow}$  分别为电解铝负荷上、下调节的最大功率。

#### 4) 调节时间约束

电解铝负荷频繁调节会降低设备寿命和产品质量, 因此在一次调节后的一定时间内需要维持运行状态, 约束如下。

$$\sum_t^{t+T_{\text{on}}-1} (1-z_t) \geq T_{\text{on}} - 1 \quad t \in [1, T - T_{\text{on}} + 1] \quad (13)$$

式中:  $T_{\text{on}}$  为电解铝负荷调节的最小维持时长。

#### 1.4 多时间尺度协同优化调度框架

根据系统特性, 本文的优化调度可以划分为日前和日内两个时间尺度。在日前阶段, 根据光伏、负荷的次日短期预测数据, 基于日前优化模型制定经济性最优的小时级出力计划。在日内阶段, 根据超短期预测数据, 考虑源荷不确定性和电解铝调节, 在日前的基础上通过自适应变步长滚动优化形成日内计划。整体框架如图3所示。

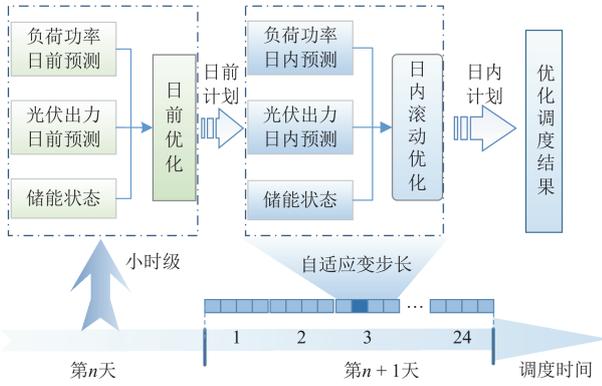


图3 多时间尺度优化调度

Fig. 3 Multi-timescale optimal scheduling

## 2 日前优化调度

日前优化调度阶段的时间步长为1h, 优化控制变量为光伏发电出力、火电机组出力、储能运行状态和充放电功率。

### 2.1 目标函数

在日前调度阶段, 以系统综合运行成本最小为优化目标, 如式(14)所示。

$$\min F^1 = \sum_{t=1}^T C_t^1 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_G} C_{G,j,t} + C_{S,t} + C_{\text{loss},t} \quad (14)$$

式中:  $C_t^1$  为  $t$  时段系统运行成本;  $N_G$  为火电机组数量;  $C_{G,j,t}$  为  $t$  时段火电机组  $j$  的发电成本;  $C_{S,t}$  为  $t$  时段的储能运行成本;  $C_{\text{loss},t}$  为  $t$  时段的系统弃光惩罚成本。以上各项成本的数学模型如下。

#### 1) 火电机组发电成本

火电机组发电成本包括机组煤耗成本和机组出力上下调节过程中的调节成本。

$$C_{G,j,t} = C_{G,j,t}^{\text{coal}} + C_{G,j,t}^{\text{adj}} \quad (15)$$

$$C_{G,j,t}^{\text{coal}} = a_j \cdot P_{G,j,t}^2 + b_j \cdot P_{G,j,t} + c_j \quad (16)$$

$$C_{G,j,t}^{\text{adj}} = c_{\text{adj}} \cdot |P_{G,j,t} - P_{G,j,t-1}| \quad (17)$$

式中:  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$  为火电机组  $j$  的成本系数;  $P_{G,j,t}$  为  $t$  时段火电机组  $j$  的输出功率;  $c_{\text{adj}}$  为火电机组  $j$  的单位功率调节成本系数。

#### 2) 储能运行成本

$$C_{S,t} = c_s \cdot |P_{S,t}| \quad (18)$$

式中:  $c_s$  为储能运行成本系数;  $P_{S,t}$  为储能在  $t$  时段的充放电功率, 其中在充电模式有  $P_{S,t} = P_{S,t}^{\text{ch}}$ , 在放电模式有  $P_{S,t} = -P_{S,t}^{\text{dis}}$ 。

#### 3) 日前弃光惩罚成本

$$C_{\text{loss},t} = c_{\text{loss}} \cdot (\tilde{P}_{\text{PV},t}^{\text{MPPT}} - P_{\text{PV},t}) \quad (19)$$

式中:  $c_{\text{loss}}$  为弃光惩罚成本系数;  $P_{\text{PV},t}$  为  $t$  时段光伏出力功率;  $\tilde{P}_{\text{PV},t}^{\text{MPPT}}$  为  $t$  时段光伏预测最大出力功率。

## 2.2 约束条件

### 1) 火电机组约束

对于火电机组, 主要考虑其输出功率约束和爬坡约束。

$$P_{G,j}^{\min} \leq P_{G,j,t} \leq P_{G,j}^{\max} \quad (20)$$

$$|P_{G,j,t} - P_{G,j,t-1}| \leq \Delta P_{G,j}^{\max} \quad (21)$$

式中:  $P_{G,j}^{\max}$ 、 $P_{G,j}^{\min}$  分别为火电机组  $j$  的出力上、下限;  $\Delta P_{G,j}^{\max}$  为火电机组  $j$  的爬坡功率上限。

### 2) 储能运行约束

储能单元的充放电功率以及容量存在上下限, 且在一个调度周期始末时刻容量状态保持一致, 具体约束条件如下。

$$0 \leq P_{S,t}^{\text{dis}} \leq u_t P_S^{\max} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{S,t}^{\text{ch}} \leq (1 - u_t) P_S^{\max} \quad (23)$$

$$S_{\text{SOC},t} = S_{\text{SOC},t-1} + \frac{\eta_s \Delta t}{E} (P_{S,t-1}^{\text{ch}} - P_{S,t-1}^{\text{dis}}) \quad (24)$$

$$\eta_s = \begin{cases} \eta^{\text{ch}} & \text{if } P_{S,t} \geq 0 \text{ (充电)} \\ 1/\eta^{\text{dis}} & \text{if } P_{S,t} < 0 \text{ (放电)} \end{cases} \quad (25)$$

$$S_{\text{SOC},\min} \leq S_{\text{SOC},t} \leq S_{\text{SOC},\max} \quad (26)$$

$$\eta^{\text{ch}} \sum_{t=1}^T (P_{S,t}^{\text{ch}} \Delta t) - \frac{1}{\eta^{\text{dis}}} \sum_{t=1}^T (P_{S,t}^{\text{dis}} \Delta t) = 0 \quad (27)$$

式中:  $P_S^{\max}$  为储能充放电功率上限;  $u_t$  为二进制储能放电标志, 取值为1时表示储能放电, 取值为0时表示储能充电;  $\eta_s$  为储能运行过程中的等效效率系数;  $\eta^{\text{ch}}$ 、 $\eta^{\text{dis}}$  分别为充、放电效率;  $E$  为储能单

元额定容量;  $S_{SOC,t}$  为  $t$  时刻储能荷电状态;  $S_{SOC,max}$ 、 $S_{SOC,min}$  分别为储能荷电状态的上、下限。

### 3) 光伏发电出力约束

$$0 \leq P_{PV,t} \leq \tilde{P}_{PV,t}^{MPPT} \quad (28)$$

### 4) 系统功率平衡约束

考虑光伏和负荷的不确定性及储能、火电的协调控制, 需满足系统有功功率平衡约束如下。

$$\sum_{j=1}^{N_G} P_{G,j,t} + P_{PV,t} + P_{S,t} = (1 - \beta_t) P_{Al,t} + P_{L,t} \quad (29)$$

式中:  $P_{L,t}$  为其他负荷功率;  $\beta_t$  为电解铝负荷调节系数, 在日前阶段  $\beta_t = 0$ 。

## 3 基于事件触发的自适应日内滚动优化

在运行日内的实时调度阶段, 针对源荷的不确定性波动, 采用基于 MPC 的有限时域滚动优化策略

制定出力计划。但是, 阳极效应、转折性天气等功率波动性事件难以精准预测, 若使用较长的控制步长, 会导致基于预测数据的优化调度的精准性大幅降低, 影响系统的稳定运行; 同时, 如果为了偶发的波动性事件而长期采用短时间步长的优化调度, 则会造成大量的信息和计算冗余。为了应对电解铝园区的偶发波动性事件, 提高系统运行效率和优化精度, 本文对传统 MPC 策略进行改进, 提出了基于事件触发的自适应变步长 MPC 策略。

### 3.1 基于事件触发的自适应变步长 MPC

首先, 基于系统日内预测功率的偏差设计事件辨识指标, 以此配合系统光伏发电单元、电解槽前端的功率波动检测装置信号设置事件触发条件; 然后, 根据指标值的大小自适应调整调度步长。该变步长机制原理如图 4 所示。

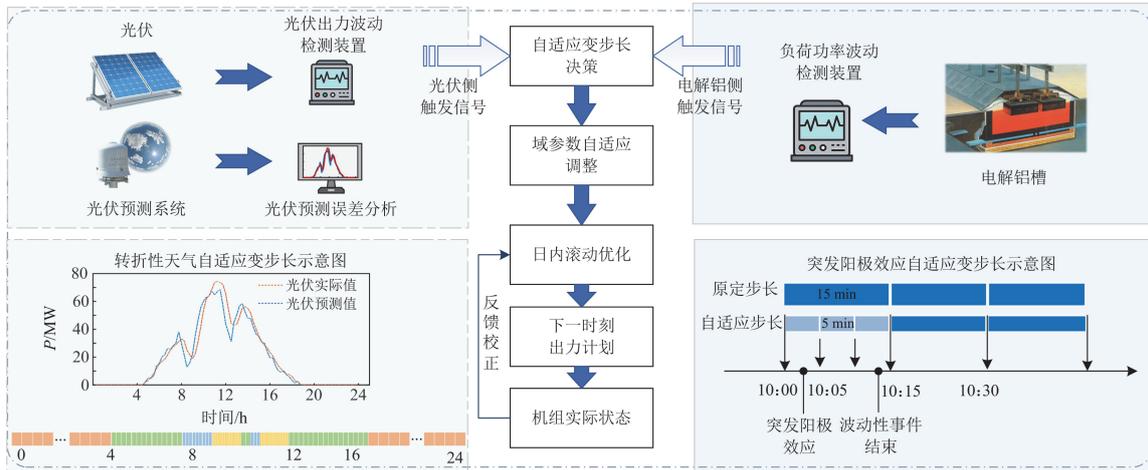


图 4 基于事件触发的自适应变步长 MPC

Fig. 4 Adaptive variable-step MPC based on event-triggered

#### 1) 事件辨识指标

当运行日内发生天气突变时, 日内光伏功率预测会与日前预测值产生较大偏离, 同时与实际值之间的预测误差也会增大, 因此以日内光伏功率预测偏差  $\xi_k$  为事件辨识指标, 如式(30)所示。

$$\xi_k = \frac{|\tilde{P}^{\text{II}}(k|k-1) - \tilde{P}^{\text{I}}(k)|}{\tilde{P}^{\text{I}}(k)} + \frac{|\tilde{P}^{\text{II}}(k|k-1) - P(k)|}{P(k)} \quad (30)$$

式中:  $\tilde{P}^{\text{II}}(k|k-1)$  为在运行日内  $k-1$  时刻对  $k$  时刻的光伏预测值;  $\tilde{P}^{\text{I}}(k)$  为  $k$  时刻的日前光伏预测值;  $P(k)$  为  $k$  时刻的光伏实测值。

#### 2) 事件触发条件

设置基于预测偏差的事件触发驱动的条件为

$$\xi_k \geq \varepsilon \text{ 或 } \lambda_{1,k} + \lambda_{2,k} = 1 \quad (31)$$

$$\xi_k \leq \varepsilon \text{ 且 } \lambda_{1,k} + \lambda_{2,k} = 0 \quad (32)$$

式中:  $\varepsilon$  为自适应触发阈值常数;  $\lambda_{1,k}$ 、 $\lambda_{2,k}$  分别为  $k$  时刻光伏发电单元和电解槽端的功率波动检测装置发出的二进制信号, 取值为 1 表示检测到突发功率波动, 取值为 0 表示无波动信号。

当系统的预测偏差超过设置的阈值, 或者系统前端的功率波动检测装置产生波动信号, 即满足条件式(31), 则触发自适应步长缩短机制; 当系统偏差指标低于阈值, 即满足条件式(32)时, 可认为对系统调度的影响较小, 则触发自适应步长恢复机制。在本系统中, 为较好地平衡优化精度与计算负荷, 参考文献[16-17], 可设置自适应触发阈值为  $\varepsilon = 0.1$ 。

#### 3) 自适应变步长

系统偏差满足触发条件, 开始进行自适应时间

步长的计算, 根据变步长决策指标  $\xi_k$  对  $k$  时刻时间步长  $\Delta t_k$  进行自适应调整, 如表 1 所示。步长调整后, 预测时域  $N_k^P$  为

$$N_k^P = M \cdot \Delta t_k \quad (33)$$

式中:  $M$  为预测时域所包含步长的数量。

表 1 调度步长取值

Table 1 Value interval of scheduling time step			
辨识指标取值	[0,0.1)	[0.1,0.2)	[0.2,0.5)
调度步长取值/min	15	10	5

### 3.2 日内滚动优化

日内调度的核心问题是应对源荷的不确定性, 采用基于 MPC 的滚动优化策略, 结合日内预测在日前计划的基础上进行修正, 控制变量包括火电出力、光伏出力、储能充放电功率、电解铝负荷调节状态及调节量。

#### 1) 预测模型

由系统有功平衡式(29), 以火电出力和电解铝负荷调节量为控制变量  $\mathbf{u}_t = [P_{G,t} \ \beta_t]^T$ , 以光伏出力、电解铝负荷和其他负荷的功率为扰动输入变量  $\mathbf{w}_t = [P_{PV,t} \ P_{Al,t} \ P_{L,t}]^T$ , 可整理得到

$$P_{S,t} = \mathbf{F}\mathbf{u}_t + \mathbf{f}\mathbf{w}_t \quad (34)$$

式中:  $\mathbf{F} = [-1 \ -P_{Al,t}]$ ;  $\mathbf{f} = [-1 \ 1 \ 1]$ 。

以储能单元荷电状态为系统状态变量, 有  $x_t = S_{SOC,t}$ , 结合储能运行特性式(24), 可得到系统状态预测模型为

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \frac{\eta_s \Delta t}{E} [\mathbf{F}\mathbf{u}_t + \mathbf{f}\mathbf{w}_t] \quad (35)$$

#### 2) 优化模型

日内阶段采用优化时域内综合运行成本最低和相对日前计划偏差最小的优化目标, 如式(36)所示。

$$\min F_i^{\text{II}} = \sum_{t=k}^{k+N_i^P} C_{i,t}^{\text{II}} + q \left\| \mathbf{U}_{i,k} - \mathbf{U}_{i,k}^{\text{ref}} \right\| = \sum_{t=k}^{k+N_i^P} \left[ \sum_{j=1}^{N_G} C_{G,j,t} + C_{S,t} + C_{Al,t} + C_{PV,t}^{\text{loss}} \right] + q \left\| \mathbf{U}_{i,k} - \mathbf{U}_{i,k}^{\text{ref}} \right\| \quad (36)$$

式中:  $N_i^P$  为第  $i$  次滚动优化的时域长度;  $C_{i,t}^{\text{II}}$  为第  $i$  次滚动优化时域内  $t$  时段的系统运行成本;  $C_{Al,t}$  为电解铝调节成本;  $C_{PV,t}^{\text{loss}}$  为光伏出力低于日前计划的考核成本;  $\mathbf{U}_{i,k}$  为第  $i$  次滚动优化得到的控制序列, 起始时刻为  $k$ ;  $\mathbf{U}_{i,k}^{\text{ref}}$  为对应时域内的日前控制序列;  $q$  为权重系数。相关成本计算方法如下。

$$C_{Al,t} = c_{Al} |\beta_t P_{Al,t}| \quad (37)$$

$$C_{PV,t}^{\text{loss}} = \mu_{\text{loss}} \cdot (P_{PV,t}^{\text{I}} - P_{PV,t}^{\text{II}}), P_{PV,t}^{\text{II}} \leq P_{PV,t}^{\text{I}} \quad (38)$$

式中:  $c_{Al}$  为电解铝负荷调节成本系数;  $\mu_{\text{loss}}$  为光伏考核成本系数;  $P_{PV,t}^{\text{I}}$ 、 $P_{PV,t}^{\text{II}}$  分别为日前、日内的光伏出力计划。

除了满足日前调度模型中的约束式(20)一式(29)之外, 还需补充以下约束。

电解铝的调节约束如式(3)一式(13)所示。日内阶段储能运行状态需要跟随日前计划, 即

$$u_t^{\text{II}} = u_t^{\text{I}} \quad (39)$$

式中:  $u_t^{\text{I}}$ 、 $u_t^{\text{II}}$  分别为日前、日内阶段  $t$  时段的储能放电标志。

在现有预测精度下, 机组发出的控制指令值与实测值存在一定误差, 需要在控制指令发出后进行反馈校正。在下次滚动优化之前, 将当前测量值作为优化计算的初始值, 即

$$P_{t+\Delta t}^0 = P_{t+\Delta t}^{\text{real}} \quad (40)$$

式中:  $P_{t+\Delta t}^0$ 、 $P_{t+\Delta t}^{\text{real}}$  分别为各机组在  $t + \Delta t$  时刻的初始值和测量值。

#### 3) 滚动优化的实现

在当前时刻  $k$ , 基于系统状态预测模型, 可计算得到预测时域内的系统状态序列  $\mathbf{x}_{i,k}$ ; 通过求解优化模型, 得到时域内的控制序列  $\mathbf{U}_{i,k}$ , 即

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{i,k} = \{x_{k+\Delta t|k}, x_{k+2\Delta t|k}, \dots, x_{k+M\Delta t|k}\} \\ \mathbf{U}_{i,k} = \{u_{k|k}, u_{k+1|k}, \dots, u_{k+(M-1)\Delta t|k}\} \end{cases} \quad (41)$$

将控制序列的第一个值  $u_{k|k}$  应用于控制系统后, 在下一优化时刻  $k + \Delta t_k$ , 根据实时量测值将扰动输入和系统状态更新为  $w_{k+\Delta t_k|k+\Delta t_k}$ 、 $x_{k+\Delta t_k|k+\Delta t_k}$ , 重复以上滚动优化流程。

综上所述, 本文所提的基于事件触发驱动的自适应步长滚动优化的流程如图 5 所示。该模型本质上是一个 MILP 问题, 可以直接调用 CPLEX 求解器进行求解。为提升求解效率, 对于优化模型中的非线性部分, 采用分段线性化的方法进行处理。

#### 4) 源荷有功功率平衡评价指标

由于负荷和光伏实际出力与预测数据存在偏差, 导致日内调度计划在实际运行过程中可能出现电量无法满足负荷需求的情况。因此, 可根据系统实测数据计算缺额补偿成本  $C_t^{\text{punish}}$ , 如式(42)所示。

$$C_t^{\text{punish}} = \mu_{\text{punish}} \left| P_{L,t}^{\text{real}} + (1 - \beta_t) P_{AL,t}^{\text{real}} - P_{PV,t}^{\text{real}} - P_{S,t} - \sum_{j=1}^{N_G} P_{G,j,t} \right| \quad (42)$$

式中:  $\mu_{\text{punish}}$  为光伏缺额补偿成本系数;  $P_{AL,t}^{\text{real}}$ 、 $P_{L,t}^{\text{real}}$  分别为电解铝负荷和其他负荷的实际功率;  $P_{PV,t}^{\text{real}}$  为光伏实际出力, 若日内光伏计划出力低于实时最大可用出力则进行弃光,  $P_{PV,t}^{\text{real}}$  取计划值  $P_{PV,t}^{\text{pl}}$ , 若实时可用出力不足以提供计划出力则取实际值  $P_{PV,t}^{\text{real}}$ , 缺额部分只能通过系统的备用容量补偿。  $C_t^{\text{punish}}$  指标越小, 说明调度计划越能保证系统源荷有功功率平衡, 系统运行的安全性越高。

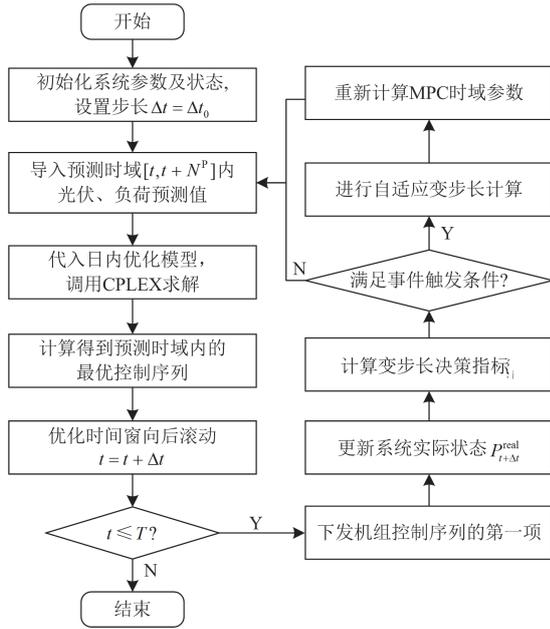


图 5 自适应变步长滚动优化流程示意图

Fig. 5 Diagram of adaptive variable-step rolling optimization

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

为验证所提策略的有效性, 对基于图 1 所示的某电解铝园区孤网系统进行仿真分析。该系统包含 3 台煤矸石火电机组, 一个容量为 100 MW 的光伏发电单元, 一台 30 MW 储能系统; 园区负荷容量约为 150 MW, 其中包括 145 MW 的电解铝负荷以及 5 MW 的其他负荷; 系统参数如附录 A 表 A1、表 A2 所示。日前调度采用时间尺度为 1 h 的单一断面优化, 日内调度采用时间尺度为 15 min、预测时域为 4 h 的滚动优化。

假定负荷侧在无阳极效应发生、不主动参与调节时功率基本稳定, 如附录 A 图 A1 所示。对于光伏出力, 根据园区的历史运行数据设置了图 6 所示的由天气变化引起的波动场景, 光伏出力 09:00—11:00 时段的日内预测与日前预测存在较大偏差,

在 14:00 左右由于转折性天气发生较大波动。

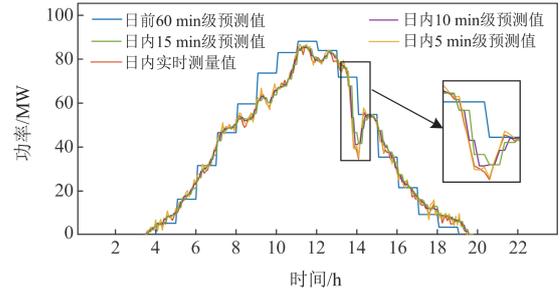
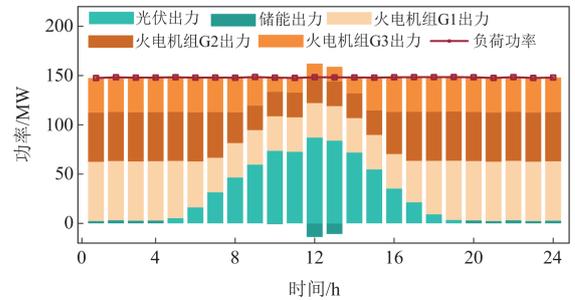


图 6 光伏功率曲线

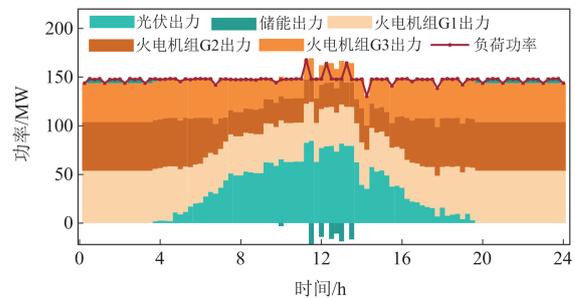
Fig. 6 PV power curves

### 4.2 多时间尺度调度有效性分析

将优化模型和案例数据求解可得日前和日内出力计划如图 7 所示。火电机组的日前、日内计划在出力范围和变化趋势上基本一致, 在日内阶段针对功率波动进行了一些调整。在光伏出力为 0 的时段, 3 台火电机组的出力均保持在较高水平; 在 06:00—18:00 时段由于增加了光伏供电, 火电机组均跟随光伏发电曲线降低了出力; 火电机组 G2 和 G3 由于发电成本相对较高、容量较小, 降低出力的程度相比 G1 更高; 在 10:00—14:00 时段光伏出力高峰期, 火电机组基本达到出力下限, 以消纳光伏的发电量, 但是由于火电机组下调能力有限, 在该时段也进行了一定程度的弃光。



(a) 日前调度



(b) 日内调度

图 7 多时间尺度调度结果

Fig. 7 Multi-timescale scheduling results

由图 8 可知，为保证储能调度的周期性和连续性，储能单元在运行日内按照日前制定的充放电状态运行，在光伏出力较高的 10:00—14:00 时段进行充电，并在 00:00—04:00 时段和 18:00—24:00 时段无光伏出力的时段进行放电，实现了将光伏发电量在时间上的转移。同时，日内阶段增加了电解铝参与调节，电解铝负荷在光伏出力丰富的 11:00—13:00 时段上调生产功率，以消纳光伏发电量，在无光伏出力时段间歇性地小幅下调生产功率，协助储能平衡源荷功率，平滑火电调节。这两种调节手段极大地促进了园区的光伏消纳，提升了园区孤立电网运行的灵活性与经济性。

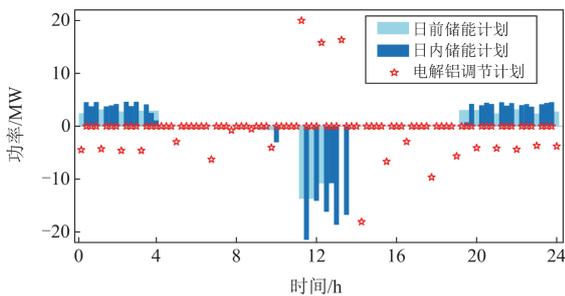


图 8 储能和电解铝调节情况

Fig. 8 Regulation of storage and electrolytic aluminum

总的来说，日前调度在运行日之前形成大致的出力计划，为运行日内各机组的工作状态提供了参考；日内调度在此基础上，根据颗粒度更小、结果更准确的超短期预测值作出适应性调整，及时发现和应对功率波动和预测误差，形成更为精细的出力计划。两个时间尺度的调度之间具有较好的协调作用，保证了园区调度工作的可靠高效进行。

### 4.3 电解铝负荷参与调节有效性分析

为验证电解铝虚拟电池的调节效果，本节设置电解铝负荷不参与调节的仿真情景，与图 7(b)所示的日内调度结果进行对比分析，仿真结果如图 9、图 10 所示。

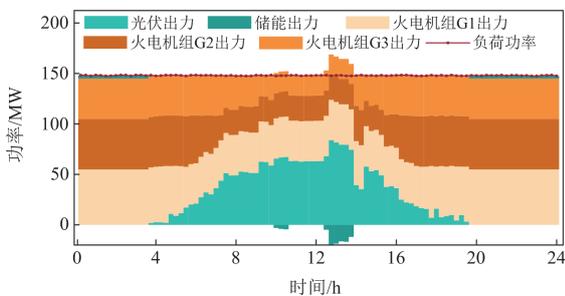


图 9 电解铝不参与调节的日内调度结果

Fig. 9 Intraday optimization results without the regulation of electrolytic aluminum

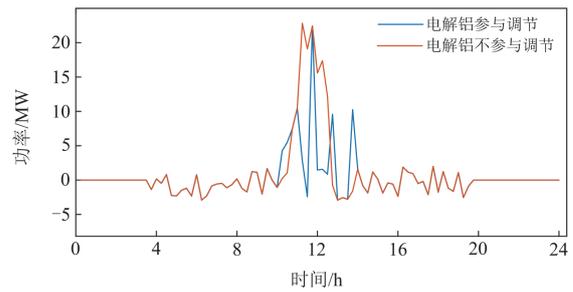


图 10 光伏出力计划相对实时值偏差

Fig. 10 Deviation between PV plan and real-time output

由图 9、图 10 可知，基于本文采取的电解铝负荷柔性调节策略，电解铝负荷在光伏出力丰富的 11:00—13:00 时段多次上调了 15~20 MW 的生产功率，在无光伏出力的时段间歇性地小幅下调生产功率，同时在 14:00 时左右光伏剧烈波动时及时将生产功率下调了约 18 MW。整个过程中，电解铝负荷在保证自身生产安全和产量要求的同时，根据孤立电网源荷功率平衡的需求进行了有计划且有效的灵活调节。

可见，电解铝负荷在运行日内发挥了“虚拟电池”的作用。一方面，在火电机组下调受限、储能容量不足的情况下，协助电化学储能消纳光伏发电，相比电解铝不参与调节的情况减少了约 55.3% 的系统弃光。另一方面，作为一种快速调节资源，电解铝负荷能够快速平衡预测误差、响应功率波动，在调节时间和调节范围上弥补了火电机组的局限性，实现了在强不确定性运行情景下的系统源荷功率平衡，使火电调节成本降低了 23.9%，系统功率缺额降低了 10.5%，提升了系统运行安全性的同时降低了运行成本。因此，电解铝负荷作为“虚拟电池”式的柔性资源参与调节，提高了园区孤立电网运行的安全性、灵活性和经济性。

### 4.4 基于事件触发的自适应变步长有效性分析

#### 1) 针对转折性天气的仿真分析

为验证本文所提基于事件触发的自适应变步长 MPC 的可行性与有效性，对系统在转折性天气条件下采用自适应变步长 MPC 策略进行仿真分析。

首先计算日内光伏超短期预测功率的误差及误差指标如图 11 所示，按所提方法计算得到的自适应滚动优化步长如图 12 所示。可见，在 09:00—11:00 时段，光伏预测误差已达到了 10 MW 以上，基于这样的预测数据进行优化调度会严重影响园区孤立电网的稳定运行，因此将调度步长缩短至 10 min，提高预测数据的精度；在 13:30—14:30 时段，转折性天气导致光伏功率短时间内大幅下跌，

同时存在较大的预测误差, 因此将步长缩短至 5 min, 以通过更高精度的预测数据和更高频的优化计算和出力调节应对波动。

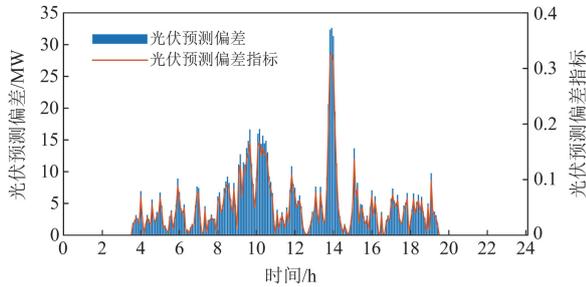


图 11 日内光伏功率预测误差

Fig. 11 Intraday photovoltaic forecast error

经过自适应变步长滚动优化得到的各机组日内出力计划如图 13 所示。作为对比, 基于传统固定步长 MPC 优化算法求解得到的日内出力计划如图 7(b)



图 12 日内滚动优化步长示意图

Fig. 12 Adaptive time step of intraday rolling optimization

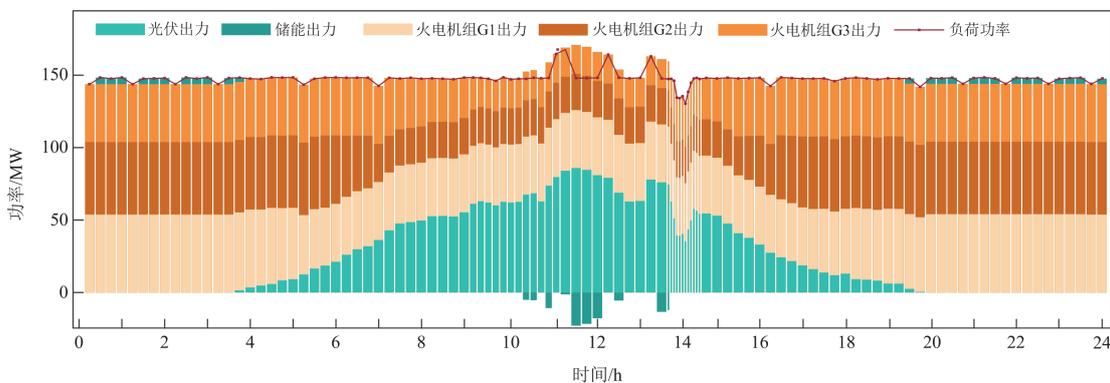


图 13 日内自适应变步长 MPC 优化调度结果

Fig. 13 Intraday optimization results based on adaptive time step MPC

在日内调度阶段计算得到两种策略下系统运行成本指标如表 2 所示。相比于传统 MPC 固定步长的滚动优化, 自适应变步长策略在发电安全性、经济性和绿色性上都有一定程度的提升, 日运行成本减少了 0.235 万元, 火电调节成本降低了 30.8%, 弃光量降低了 14.3%, 系统功率缺额降低了 24.5%。在更为复杂运行情况下, 这种优化效果将更加明显。

## 2) 针对突发阳极效应的仿真分析

为进一步探究所提自适应变步长调度策略对系统波动性事件的响应能力, 现对电解铝负荷侧突发阳极效应的场景进行优化调度分析。假设该时段内

所示。由图可知, 两种优化策略所得的机组出力和负荷调节计划在趋势和变化幅度上基本一致。但是相比固定步长的优化控制, 经过基于事件触发驱动的自适应步长变化后, 在 13:30—14:30 时段光伏出力发生大幅跌落时, 采用了 5 min 的调度步长, 使用的 5 min 级日内光伏预测信息与实时值的误差更小, 优化计算的次数从原来的每小时 4 次提升至每小时 12 次, 即系统调度基于更精确的光伏波动信息进行了更频繁的优化计算, 极大地发挥了电解铝快速调节的优势, 使其调节量更好地贴合光伏曲线, 在更小的时间尺度上平抑了系统净负荷的波动, 提高了滚动优化的实时性和控制精度。此外, 在波动结束、预测误差较小时, 通过恢复原定的 15 min 步长, 降低了优化计算的频率, 得到较长时间内更优的结果, 防止机组进行频繁调节, 拥有更优的经济性能。

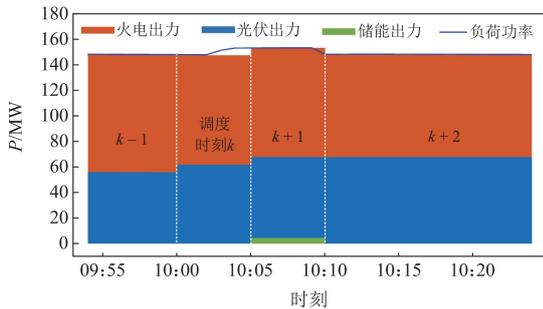
光伏出力波动较小, 电解槽在 10:03 突发阳极效应, 功率产生约 5 MW 的突升, 波动持续到约 10:10 结束, 如附录 A 图 A2 所示。原定调度步长为 15 min, 上一调度时刻为 10:00, 在传统 MPC 策略下各机组出力示意图如图 14(a)所示, 在本文所提事件触发自适应变步长滚动优化策略下各机组出力示意图如图 14(b)所示。

由图 14(a)可知, 由于阳极效应产生的功率波动发生在两个调度时刻之间, 各机组仍遵循 10:00 下发的出力计划, 导致在阳极效应发生时系统经历了约 10 min 的有功功率缺额, 使系统频率发生跌落。

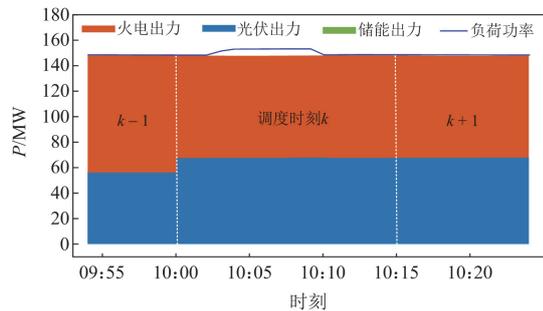
表 2 日内优化调度成本

Table 2 Cost of intra-day optimal scheduling

成本/万元	固定步长		自适应步长
	电解铝不调节	电解铝调节	
火电煤耗成本	57.166	56.825	56.833
火电调节成本	0.580	0.441	0.305
日内调整成本	0.277	0.278	0.278
储能成本	0.606	0.606	0.605
需求响应成本	0	0.461	0.465
弃光考核成本	0.468	0.272	0.233
缺额补偿成本	0.324	0.290	0.219
系统总成本	59.421	59.173	58.938



(a) 基于传统MPC控制的出力计划曲线



(b) 基于事件触发自适应步长滚动优化的出力计划曲线

图 14 负荷侧突发阳极效应出力计划曲线

Fig. 14 Generation schedule of anode effect on load side

而由图 14(b)可知,由于采用了事件触发自适应步长滚动优化策略,在 10:03 左右电解铝负荷发生阳极效应之后,调度系统检测到发生功率波动性事件,满足自适应步长事件触发条件,源侧协同优化的步长缩短至 5 min,即在上一时刻 10:00 下发一次指令后,在 10:05 再次根据新的功率预测和系统状态信息进行优化计算下发新的指令,火电机组和储能单元及时进行一定的上调,缩短了系统发生有功功率偏差的时间;同时,在阳极效应结束后也能及时下调机组出力,使系统逐渐恢复到正常运行状态。这个过程通过自适应缩短调度步长,使优化调度能及时响应功率波动,减轻了更小时间尺度下系统调频的压力,也表明了所提策略能提升系统运行的安全性。

## 5 结论

本文针对电解铝工业园区孤立电网源荷不确定性调度问题,提出了一种多时间尺度源-荷-储优化调度策略。在日前阶段,构建了以系统综合运行成本最低为目标的优化模型;在日内阶段,构建计及电解铝参与调节的优化模型,提出基于事件触发的自适应步长 MPC 策略。算例仿真结果表明:

1) 日前调度为各机组出力计划提供参考,日内调度则基于精度更高的超短期预测数据做出适应性调整,有利于及时发现和应对源荷波动,两个时间尺度互相协调,实现了逐步精细的优化调度。

2) 电解铝负荷具备“虚拟电池”特性,能协助电化学储能消纳光伏发电,同时快速响应功率波动,仿真结果表明电解铝参与调节减少了弃光,减轻了火电机组调节压力,降低了系统综合运行成本。

3) 基于事件触发的自适应步长滚动优化策略可在转折性天气与阳极效应等波动事件发生时动态调整调度步长,相较传统固定时域 MPC,能在源荷波动期间获得更优的调度效果,进一步提升系统安全性与经济性。

综上所述,所提自适应步长多时间尺度源-荷-储优化调度方法可实现光伏、火电、储能和电解铝负荷的协同优化运行,增强园区孤立电网应对源荷不确定性的能力,有助于提升电解铝工业园区的安全性、经济性和绿色性。

## 附录 A

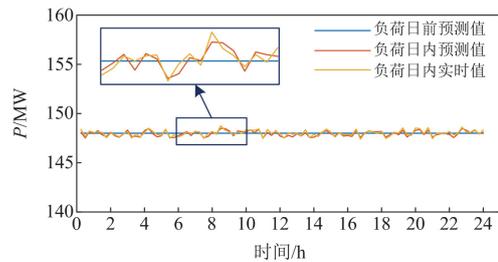


图 A1 负荷功率曲线

Fig. A1 Curves of load power

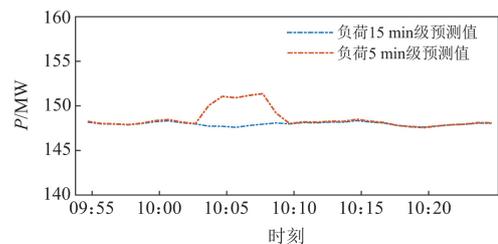


图 A2 负荷侧突发阳极效应功率波动示意图

Fig. A2 Power fluctuation of anode effect on load side

表 A1 火电机组参数

Table A1 Parameters of thermal generators

出力上限/MW	出力下限/MW	爬坡速率/(MW/min)	燃料成本系数		
			$a_j/(\text{元}/\text{MW})^2$	$b_j/(\text{元}/\text{MW})$	$c_j/\text{元}$
80	40	2.5	1.72	69.58	2650
50	25	1.5	1.81	72.54	2769
40	20	1	1.93	77.87	2773

表 A2 系统运行参数

Table A2 System operating parameters

参数	数值
储能容量/MWh	30
储能充放电功率上限/MW	30
储能 SOC 范围/%	10~90
储能充放电效率	0.95
储能成本系数/(元/MWh)	120
弃电惩罚系数/(元/MWh)	150
火电调节成本系数/(元/MWh)	100
电解铝负荷运行功率范围/%	$\pm 20$
电解铝负荷单时段调节范围/%	$\pm 15$
电解铝负荷最小维持时间/min	15
电解铝负荷调节成本系数/(元/MWh)	135
电解铝日产量要求/t	260
吨铝耗电量/(MWh/t)	13.5
缺额调节惩罚系数/(元/MWh)	150

## 参考文献

- [1] 苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001-1009.  
SU Jian, LIANG Yingbo, DING Lin, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001-1009.
- [2] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69-81.  
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81.
- [3] 贺代文, 张新, 姜金朋, 等. 计及源-荷灵活响应和新型降碳机制的孤岛综合能源系统优化调度[J]. 高压电器, 2025, 61(5): 20-30.  
HE Daiwen, ZHANG Xin, JIANG Jinpeng, et al. Optimal scheduling of island integrated energy system considering flexible response from source side to load side and new carbon reduction mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 20-30.
- [4] 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.
- [5] 陈艳波, 王德帅, 田昊欣, 等. 基于源荷储协调运行的电网可用输电能力优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 119-134.  
CHEN Yanbo, WANG Deshuai, TIAN Haoxin, et al. An optimal method for the available transfer capability of a power grid based on coordinated operation of source-load-storage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 119-134.
- [6] XU Haiyan, CHANG Yuqing, ZHAO Yong, et al. A new multi-timescale optimal scheduling model considering wind power uncertainty and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 147.
- [7] 骆钊, 田肖, 莫熙, 等. 含废旧矿井抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 134-144.  
LUO Zhao, TIAN Xiao, MO Xi, et al. Frequency regulation of source-load-storage collaborative control with waste mine-pumped storage power stations[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 134-144.
- [8] XU Shuwei, WU Wenchuan, YANG Yue, et al. Chance-constrained joint dispatch of generation and wind curtailment-load shedding schemes with large-scale wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(4): 2220-2233.
- [9] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.  
LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- [10] 秦子恺, 黄婧杰, 周任军, 等. 计及源-荷不确定性的虚拟电厂多目标鲁棒优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(6): 13-21.  
QIN Zikai, HUANG Jingjie, ZHOU Renjun, et al. Multi-objective robust optimal scheduling of virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(6): 13-21.
- [11] WANG Bo, ZHANG Cuo, LI Chaojie, et al. Hybrid interval-robust adaptive battery energy storage system dispatch with SoC interval management for unbalanced microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 44-55.
- [12] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程

- 学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
- REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [13] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6803, 7093.
- WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6803, 7093.
- [14] 李宏仲, 叶翔宇. 考虑灵活性供需匹配的电力系统自适应时间尺度调度策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 122-132.
- LI Hongzhong, YE Xiangyu. Adaptive time-scale dispatching strategy for power system considering flexibility supply-demand matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 122-132.
- [15] ZHENG Lingwei, ZHOU Xingqiu, QIU Qi, et al. Day-ahead optimal dispatch of an integrated energy system considering time-frequency characteristics of renewable energy source output[J]. Energy, 2020, 209.
- [16] YANG Yi, YANG Ping, ZHAO Zhuoli, et al. A multi-timescale coordinated optimization framework for economic dispatch of micro-energy grid considering prediction error[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3211-3226.
- [17] LI Canbing, LIU Xubin, CAO Yijia, et al. A time-scale adaptive dispatch method for renewable energy power supply systems on islands[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1069-1078.
- [18] YANG Jingyu, YANG Tongguang, LUO Longfu, et al. Tracking-dispatch of a combined wind-storage system based on model predictive control and two-layer fuzzy control strategy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-16.
- [19] 于永进, 孙国强, 樊英杰. 基于动态事件触发机制的孤岛微电网频率控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 60-71.
- YU Yongjin, SUN Guoqiang, FAN Yingjie. A frequency control method for an islanded microgrid based on a dynamic event-triggered mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 60-71.
- [20] 刘亚闯, 杨挺, 李浩. 计及储备惯量和通信时延的交流微网事件触发频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 79-87.
- LIU Yachuang, YANG Ting, LI Hao. Event-triggered frequency control strategy for AC microgrids considering reserved inertia and communication delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 79-87.
- [21] TANG Xiaoming, LI Yu, YANG Mingchuan, et al. Adaptive event-triggered model predictive load frequency control for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4003-4014.
- [22] 司大军, 孙震龙, 徐衍会. 考虑分布阻抗及恒电流控制的电解铝负荷建模[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(2): 35-43.
- SI Dajun, SUN Zhenlong, XU Yanhui. Load modeling of electrolytic aluminum considering distributed impedance and constant current control[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Sciences), 2023, 50(2): 35-43.
- [23] 尹刚, 陈根, 何文, 等. 基于深度学习的 300 kA 铝电解槽阳极效应预测[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 161-170.
- YIN Gang, CHEN Gen, HE Wen, et al. Anode effect prediction of 300 kA aluminium electrolysis cell based on deep learning[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 161-170.
- [24] 吉铭格, 李慧, 叶林, 等. 基于波动特性挖掘的短期光伏功率预测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 146-155.
- JI Xingge, LI Hui, YE Lin, et al. Short-term photovoltaic power forecasting based on fluctuation characteristic mining[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(5): 146-155.
- [25] DEPREE N, DÜSSEL R, PATEL P, et al. The virtual battery-operating an aluminium smelter with flexible energy input[J]. Light Metals, 2016: 571-576.
- [26] 岳晓宇, 廖思阳, 付立军, 等. 计及电解铝高耗能负荷调控和火电深调的高比例风电系统分层优化策略[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3186-3196.
- YUE Xiaoyu, LIAO Siyang, FU Lijun, et al. Hierarchical optimization strategy of high-penetration wind power system considering electrolytic aluminum energy-intensive load regulation and deep peak shaving of thermal power[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3186-3196.

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-05-22

作者简介:

熊文静(1991—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变换器的调制与控制、综合能源系统优化调度等; E-mail: csu.xiong@163.com

宋啸宇(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化调度; E-mail: 234611002@csu.edu.cn

袁亮(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统稳定性、电力系统调度等. E-mail: liang.yuan@csu.edu.cn

(编辑 石晋美)