

guaranteed power supply, periodicity, continuity and coupling are analyzed. Then, with the goal of maximizing the power consumption of all users, the power consumption optimization model considering the internal constraints of industrial users, such as the minimum guaranteed power supply, the minimum power consumption cycle, the maximum load change rate and the load coupling correlation, as well as the external constraints such as the total power consumption and the load curve is constructed. On this basis, in order to ensure the reliability of model solving and improve the efficiency of model solving, a linearized solution method is proposed. Finally, based on the actual data of an industrial park in an eastern province of our country, the proposed model is verified. The results show that the proposed method can guarantee the production characteristics of industrial users and improve the benefits of enterprises under the premise of meeting the control objectives of total power consumption and load curve.

**Key words:** industrial users; production characteristics; refinement; power management and control; demand response

“双碳”背景下,随着以新能源为主体的新型电力系统逐步建设,发电侧充裕度面临挑战<sup>[1]</sup>。与此同时,近年来全球气候变暖,夏冬季极端高低温天气频发,导致社会用电需求量不断增加,中国出现了电力紧平衡局面,且电力缺口持续扩大<sup>[2-3]</sup>。例如,2021年下半年,由于风电出力骤降以及一次能源价格激增导致出现煤炭供应缺口等原因,中国东北地区大规模实行用电管控措施<sup>[4]</sup>。浙江杭州在2022年夏季的最大用电负荷超过了1 910万kW,电力缺口达到了200万kW以上。浙江省电量缺口预计到2025年将超过260亿kW·h<sup>[5]</sup>。因此,在新能源规模不断扩大以及极端天气频度激增,并且发电侧充裕度已得到较为充分利用的情况下,亟需挖掘需求侧灵活资源调节潜力以缓解电网平衡压力,促进电力系统安全可靠运行。

工业用户作为需求侧管理的重要资源具有巨大的调节潜力。2022年,中国的工业用电量达到了5.70万亿kW·h时,在全社会用电量中占比超过60%<sup>[6]</sup>。相较于居民用户和商业用户,工业用户具有基础设施完备、容量大、参与需求响应意愿强等优势<sup>[7-8]</sup>。加强对工业用户的灵活调控可有效落实“工业企业让电于民”的方针,保障基本民生用电需求,确保电网安全平稳运行。因此,在全国电力供需总体紧平衡背景下,实现对工业用户的精细化用电管理具有相当的必要性。

当前对于工业企业用户的精细化用电管理及需求响应研究工作已经展开。文献[9]在工业园区中运用电池储能和需求响应两类方法进行联合规划,以参与电力市场调峰。文献[10]分析了工业负荷的大气污染物排放特性,构建了环保成本计算模型及基于环境排放特性的经济调度模型。文献[11]在工业园区综合能源系统调度中引入了阶梯式碳交易机

制,构建了计入碳交易成本的经济性数学模型。文献[12-14]对负荷聚合商运行策略进行研究,提出了需求响应潜力评估模型,建立了基于精细化潜力评估的优化调度模型。文献[15]研究了较大规模工业园区的负荷聚合商开展日内自动需求响应的应用场景,日前对响应资源预先聚合优化成聚合体,日内再对各聚合体进行优化调度。文献[16]建立电动汽车和5G基站备用电池可调度容量的实时评估模型,提出一种先评估功率边界、后进行分布式共识调度的两阶段实时调度流程方案。文献[17]考虑了工业园区综合需求响应中用户用能行为不确定性,提出了用户参与意愿评估模型,构建了考虑混合不确定性的优化调度模型。文献[18]设计了工业用户、园区管理系统和电网的集中—分布式交互机制,提出了工业园区集中—分布式的综合需求响应方法。文献[19]提出了工业园区内考虑热电联供机组和热储能装置综合需求响应的工业园区负荷管理方法。但是,现有文献在针对工业负荷的用电管理方面,更多的是针对负荷用户的不确定性展开,对工业负荷的生产特性分析不够深入,较少文献考虑针对工业负荷生产特性开展运行策略研究,得到的用电管理模型难以有效应对电力紧平衡背景下工业用户科学合理调度的情况,具有一定的局限性。

为解决上述问题,本文首先提出了不同工业用户具有的生产特性,并构建了基于工业用户生产特性的精细化用电管理框架,以有效应对传统用电管理方案对工业用户的用电周期、用电量安排不合理的问题。随后,以最大化所有工业用户的总用电量为目标,构建考虑最小保供电量、最小用电周期、最大负荷变化率、负荷耦合关联等内部工业负荷自身约束以及总用电量、负荷曲线等外部系统给定约束的精细化用电管控模型。在此基础上,为了保证模

型求解的可靠性和提高模型求解的计算效率,对模型进行了线性化处理。最后,基于中国东部某省工业园区的实际数据对所提模型进行了验证。算例结果表明,所提方法可在满足用电总量、负荷曲线管控目标的前提下最大限度保障工业用户生产特性,提升企业效益。

## 1 考虑工业用户生产特性的精细化用电管控框架

### 1.1 工业用户生产特性

1) 生产保供性。工业用户生产中,保供性包括了保障不可关停设备生产需要以及安全保障用能需求,即对于工业负荷而言,保供性负荷包括了一级供能负荷以及安全保障负荷。

以企业生产中用电的保供性为例,食品生产企业具有冷藏食品的需要,其最低制冷储存负荷要求为全功率用电负荷的30%左右<sup>[20-21]</sup>。电解铝企业一般为24小时连续工作制,在其生产过程中电解直流系统和紧要辅助生产系统全为一级负荷。一级用电负荷大概占整个企业总用电负荷的95%。因此,当电解铝企业的用电的保供性未得到满足时,会严重冲击电解槽的安全运行,导致电解铝平均槽龄被大幅缩短,给电解铝企业带来严重的安全隐患<sup>[22]</sup>。

本文在考虑该生产特性时将其归纳为生产保供性,即在工业生产中需要满足用户最小保供容量的需求,满足最小用电负荷约束。

2) 生产周期性。工业用户在生产产品过程中,从原材料采购、投入生产开始,经过产品加工,到产品完成、验收入库为止的全部时间一般是固定的,即工业用户的生产过程存在周期性。

比如,生物发酵企业实行流水线生产,全部生产过程大致可以分为4个阶段,包括生物菌种培养阶段、生物种子扩大培养阶段、生物发酵阶段和最后生物产品提炼阶段,整个生产周期时间一般固定。因此,该企业的用电时间、用电量均具备周期性<sup>[23]</sup>。同时,在整个生产周期内,必须要维持企业的正常用电需要,否则将无法生产出合格的产品。

本文在考虑该生产特性时将其归纳为生产周期性,即在工业生产中对于具备流水线性质的用户,需要满足其生产时序的需要,满足最小用电时间约束。

3) 生产连续性。工业用户在生产产品过程中,工业设备受到工艺流程、设备运行条件等各方面的限制。因此,设备启停状态、爬坡/滑坡率均不可随意改变,即在生产过程中需要考虑工业负荷的连续性。

例如,医疗企业开始生产时,机组设备需要提前预热,机器开机成本高。同时,开机后机器在单位时间内功率变化有限制,超过限制会影响产品质量,容易产生废料。钢铁行业通常是24 h运行制,全天负荷波动不大,没有明显的波峰和波谷,生产设备连续性强,在正常工作状态下满负荷运行,负荷稳定且功率因数比较大,对电能的质量要求高<sup>[24-25]</sup>。

本文在考虑该生产特性时将其归纳为生产连续性,即在工业生产中需要满足用户负荷连续性变化的需要,确保最大负荷变化率在一定范围内。

4) 生产耦合性。上述3个生产特性均指的是单个工业用户在生产过程中自身具备的特征。此外,在实际生产过程中,多个工业用户的生产过程也存在联系,即在同一条生产链里的上下游用户间存在生产耦合性<sup>[26]</sup>。

比如,蓄电池企业根据生产过程中的产品状态可以分成3个阶段:由物料制成电芯、由电芯打包转成电池包半成品、由电池包做成成品<sup>[27]</sup>。在这3个阶段里,上下游企业间存在着生产耦合关系,生产过程中物料与能量传输中有着复杂多样的联系。因此,当蓄电池企业的耦合性未得到满足时,同一条生产链里的上下游各个企业的生产过程被打乱,导致企业的生产效率及收益被严重降低。

因此,本文在考虑工业负荷该生产特性时将其归纳为耦合性,即在工业生产中需要满足上下游工业用户生产中耦合关系的需要,满足耦合关联约束。

### 1.2 精细化用电管控框架

首先,研究工业用户生产流程中必须满足的需求,归纳为保供性、周期性、连续性以及耦合性4大生产特性;接着,以最大化所有工业用户的总用电量为目标,构建了考虑最小保供电量、最小用电周期、最大负荷变化率、负荷耦合关联等内部工业负荷自身约束以及总用电量、负荷曲线等外部系统给定约束的精细化用电管控模型。最后,为了保证模型求解的可靠性和提高模型求解的计算效率,针对性地给出线性化的解算方法,包括对0-1整数变量乘以连续变量的非线性项进行分类线性化解算,以

及对最小用电时间约束进行分段线性化解算。

## 2 考虑工业用户生产特性的精细化用电管控模型

在建立考虑工业用户生产特性的精细化用电管理框架的基础上,本节从目标函数和约束条件两个方面建立其对应的数学模型。该模型针对的用电管控主体为电解铝、食品制造以及医药制造等具有保供性、周期性、连续性以及耦合性的工业负荷。在电力供需总体紧平衡背景下,该模型能够让被用电管控的工业用户在完成外部给定的用电总量、负荷曲线管控目标的同时,尽可能多用电且满足工业负荷生产过程中的差异化用电需求。

### 2.1 目标函数

在电力、电量极度紧缺的情况下,工业用户为了正常生产、作业的需要,对电价在一定范围内上涨而对生产带来的影响考虑相对较少,主要集中在考虑如何能够在用电管控总量一定的情况下,尽可能地多用电来满足生产需要。同时,在极端缺电情况下,对于工业用户来说,真实能够使用的电量越多,则生产的产品也越多,经济效益越好。因此,本节模型的目标函数为最大化所有工业用户的总用电量,表达式为

$$\max F = \sum_{t \in T} \sum_{i \in S} I_i(t) P_i(t) \quad (1)$$

式中, $F$ 为所有负荷用户的总用电量; $S$ 为负荷用户的集合; $T$ 为调度周期内时间段; $I_i(t)$ 为负荷用户 $i$ 在时段 $t$ 的状态,0为用户停电,1为用户用电; $P_i(t)$ 为负荷用户 $i$ 在时段 $t$ 的功率。其中,工业用户在用电管控时段内的开停机状态及用电功率为决策变量。

### 2.2 约束条件

本节所提约束条件包括了外部系统给定约束以及内部工业用户自身约束两类。外部约束条件包括了负荷曲线约束、总用电量约束;内部约束条件包括了工业用户生产过程中的最小保供电量、最小用电周期、最大负荷变化率、负荷耦合关联等用电约束条件,具体如下。

#### 1) 负荷曲线约束。

为保证所有工业用户在各时段下总负荷出力不超过电网公司给定的每个时段负荷值,本文所提

模型考虑各时段总负荷约束,其具体形式如下:

$$\sum_{i \in S} I_i(t) P_i(t) \leq D(t) \quad (2)$$

式中, $D(t)$ 为各时段 $t$ 的负荷值。

#### 2) 总用电量约束。

为了完成电网公司给定的总用电量管控目标,模型中添加总用电量约束,以满足所有工业用户的总用电量不超过制定的用电管控要求,其具体形式如下:

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in S} I_i(t) P_i(t) \leq D_{\text{all}} \quad (3)$$

式中, $D_{\text{all}}$ 为总用电量上限。

#### 3) 负荷上下限约束。

各用户的各时段负荷都有范围限制,其上限不能大于变压器和设备容量,下限需保证负荷用户最低用电需求。负荷下限约束对应的最低保供负荷值,体现了生产保供性,即满足安全保障需求以及不可中断的生产需求。用户负荷上下限约束具体形式为

$$I_i(t) P_{\min}(t) \leq P_i(t) \leq I_i(t) P_{\max}(t) \quad (4)$$

式中, $P_{\min}(t)$ 、 $P_{\max}(t)$ 分别为负荷用户 $i$ 在时段 $t$ 的功率上、下限。

#### 4) 最小用电时间约束。

最小用电时间约束满足了用户生产周期性的需要,保证不让具备惯性及连续性设备的工业用户频繁启停,至少连续运行一个周期后才关停,其具体形式如下:

$$I_i(t) = 1, X_i^{\text{on}}(t) < T_i^{\text{on}} \quad (5)$$

式中, $X_i^{\text{on}}(t)$ 为负荷用户 $i$ 从开始到时段 $t$ 已经连续运行的时间; $T_i^{\text{on}}$ 为负荷用户 $i$ 的最小用电时间。

#### 5) 负荷变化率约束。

由于具有生产连续性特点的工业用户负荷变化率有限制,骤升和中断等变化对用户影响较大,因此模型中添加用户负荷变化率约束以满足负荷在相邻时段内的变化量界限,其具体形式如下:

$$\begin{cases} U_{Ri} \geq P_i(t) - P_i(t-1) \\ D_{Ri} \geq P_i(t-1) - P_i(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $U_{Ri}$ 、 $D_{Ri}$ 分别为负荷用户 $i$ 负荷功率爬坡、滑坡的限制。

#### 6) 负荷耦合关联约束。

对于工业用户 $i$ 和工业用户 $j$ 来说,如果二者间存在生产耦合关联,那么当工业用户 $i$ 开始或停止用电时,在 $\tau_{i,j}^{\pm}$ 时间间隔后工业用户 $j$ 也必须开始或者停止用电。其生产耦合性可表示为

$$I_i(t) - I_j(t + \tau_{i,j}^{\pm}) = 0, (i, j) \in \psi_p, (t, \tau_{i,j}^{\pm}) \in T \quad (7)$$

式中,  $(i, j) \in \phi_p$  为工业用户  $i$  和工业用户  $j$  之间具有耦合关联关系;  $\phi_p$  为具有耦合关联约束的工业用户集合;  $\tau_{i,j}^+$  为工业用户  $i$  和工业用户  $j$  之间耦合的延时间隔。

### 3 求解过程

本文求解精细化用电管控数学模型属于混合整数规划问题<sup>[28]</sup>, 其中出现了整数变量与连续变量相乘的非线性项以及包含了判断语句的非线性项<sup>[29]</sup>, 导致求解过程比较复杂。同时, 随着调度的工业企业用户数量不断增加, 使得求解规模愈发庞大, 对计算精度与计算速度的要求也越来越高。因此, 为了降低模型的求解难度, 加快计算速度, 需要对模型中目标函数和约束条件的非线性部分进行线性化处理。本节介绍了精细化用电管控模型的线性化过程。

#### 3.1 目标函数的分类线性化过程

以目标函数为例, 因为  $I_i(t)P_i(t)$  是 0-1 整数变量与连续变量相乘的非线性项, 因此, 目标函数需要进行线性化。

当  $I_i(t)$  为 0 或 1 时,  $P_i(t)$  及  $I_i(t)P_i(t)$  的对应关系如表 1 所示, 因此下式恒成立:

$$I_i(t)P_i(t) = P_i(t) \quad (8)$$

则目标函数式(1)可以线性化表示为

$$\max F = \sum_{i \in T} \sum_{i \in S} P_i(t) \quad (9)$$

表 1  $I_i(t)$  和  $P_i(t)$  的对应关系

Table 1 Correspondence between  $I_i(t)$  and  $P_i(t)$

$I_i(t)$ 取值	$P_i(t)$ 值	$I_i(t)P_i(t)$ 值
0	0	0
1	$P_i(t)$	$P_i(t)$

同理, 其余 0-1 整数变量与连续性变量相乘的非线性项还有负荷曲线约束模型与总用电量约束模型, 两者可线性化为

$$\sum_{i \in S} P_i(t) \leq D(t) \quad (10)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{i \in S} P_i(t) \leq D_{\text{all}} \quad (11)$$

#### 3.2 最小用电时间约束的分段线性化过程

最小用电时间约束模型为非线性模型, 其中包含了判断语句。由于无法直接对  $X_i^{\text{on}}(t)$  与  $T_i^{\text{on}}$  的大小关系进行判断, 所以对于该约束模型使用的是分

段线性化方法, 在时间尺度上将其拆分为 3 个阶段来实现线性化。

对于工业负荷  $i$  而言, 因为存在工业负荷  $i$  在用电管控初始时段就处于用电状态的情况, 则定义  $U_i$  为工业负荷  $i$  在该用电管控初始阶段必须用电的时间。

第 1 个线性化阶段的约束条件为

$$I_i(t) = 1, i \in S, t = 1, 2, \dots, U_i \quad (12)$$

其中, 时间  $t$  为从 1 至  $U_i$  时段。式(12)表示工业用户  $i$  在该用电管控的前  $U_i$  时段必须用电。

第 2 个线性化阶段的约束条件为

$$\sum_{n=t}^{t+T_i^{\text{on}}-1} I_i(n) \geq T_i^{\text{on}} [I_i(t) - I_i(t-1)], \quad i \in S, t = U_i + 1, \dots, T - T_i^{\text{on}} + 1 \quad (13)$$

其中, 时间  $t$  为  $U_i + 1$  时段至  $T - T_i^{\text{on}} + 1$  时段。式(13)保证了工业负荷  $i$  在所有可能连续用电的时间段里均满足最小用电时间约束。[ $I_i(t) - I_i(t-1)$ ] 只有 0 (2 个时段均用电或均停电), -1 (前一时段用电, 后一时段停电), 1 (前一时段停电, 后一时段用电) 3 种取值。

若取值为 0 或者 -1, 式(13)成立。因此, 式(13)主要约束前一时段停电且后一时段用电时的情况。

该情况下,  $\sum_{n=t}^{t+T_i^{\text{on}}-1} I_i(n)$  为从时段  $t$  起之后  $T_i^{\text{on}}$  个时段的用户用电状态的和, 只有  $\sum_{n=t}^{t+T_i^{\text{on}}-1} I_i(n)$  大于等于  $T_i^{\text{on}}$ , 才能保证满足最小用电时间的要求。

令  $M = \sum_{n=t}^{t+T_i^{\text{on}}-1} I_i(n)$ , 则第 2 个阶段约束条件线性化过程如表 2 所示。

第 3 个阶段用来保证负荷用户在  $T - T_i^{\text{on}} + 2$  至调度周期结束这个时段, 若出现用电, 则一直保持用电到调度周期结束。其约束条件为

$$\sum_{n=t}^T \{I_i(n) - [I_i(t) - I_i(t-1)]\} \geq 0, \quad i \in S, t = T - T_i^{\text{on}} + 2, \dots, T \quad (14)$$

同样地, 若 [ $I_i(t) - I_i(t-1)$ ] 取值为 0 或者 -1, 式(14)成立; [ $I_i(t) - I_i(t-1)$ ] 取值为 1 时, 该  $t$  时段之后的状态都必须为用电, 才能使式(14)成立。

令  $N = \sum_{n=t}^T \{I_i(n) - [I_i(t) - I_i(t-1)]\}$ , 则第 3 个阶段约束条件线性化过程如表 2 所示。

表 2 最小用电时间约束线性化过程

Table 2 Linearization process of the constraint of minimum power consumption time

用电状态	$I_i(t)$ 与 $I_i(t-1)$ 取值	$M$ 取值	式(13)	$N$ 取值	式(14)
连续两时段用电	$I_i(t)=1, I_i(t-1)=1$	$\geq 1$	成立	$\geq 1$	成立
连续两时段停电	$I_i(t)=0, I_i(t-1)=0$	$\geq 0$	成立	$\geq 0$	成立
前一时段用电 后一时段停电	$I_i(t)=0, I_i(t-1)=1$	$\geq 0$	成立	$\geq 1$	成立
前一时段停电 后一时段用电	$I_i(t)=1, I_i(t-1)=0$	式(13)右边为 $T_i^{on}$ ,则式(13)左边从时段 $t$ 起 $I_i(t)-I_i(t-1)$ 恒等于1,则从时段 $t$ 起 $T_i^{on}$ 个时段内的用户用电状态均需为1 $T_i^{on}$ 个时段内的用户用电状态均需为1			

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

本节以中国东部某省的 29 个企业聚集的工业园区为例,验证本文所提的精细化用电管控模型,分析在给定总用电量与负荷曲线情况下工业用户的负荷用电计划以及工业用户 4 个生产特性对应的结果。

该算例中参与用电管理的工业用户主要涉及了精密加工、化工材料、生物医药、食品制造等多个行业。将某天的 09:00—16:00 定为管控时段,以小时为颗粒度进行用电管控研究。一方面,外部约束参数中,给定所有被管控工业用户的总用电量为 496.11 MW·h,各时段的负荷值要求如表 3 所示。另一方面,内部约束参数中,工业用户最小用电时间及起始时段必须用电情况如表 4 所示。此外,29 个工业用户在用电管控初始时刻负荷值、负荷功率上下限约束以及最大负荷变化率约束如表 5 所示,其中工业用户 8、9 和 23 有特殊保供比例约束,分别为 60%、50%、25%,其余用户均设置为 10%。工业

用户 16、17 之间存在延时耦合关联,工业用户 18、23 之间存在着瞬时耦合关联。

表 3 各时段负荷要求

Table 3 Requirements for total load value in

each period				kW
时段	负荷	时段	负荷	
1	78 383.69	5	87 796.38	
2	51 066.11	6	78 849.53	
3	87 510.59	7	76 993.05	
4	90 628.26			

表 4 最小用电时间及起始时段必须用电情况

Table 4 Minimum power consumption time and the required power consumption in the starting period

用户	用电时间		用户	用电时间	
	最小	起始		最小	起始
1	5	3	17	2	1
2	2	0	19	2	0
3	2	0	20	2	0
6	3	1	22	2	0
7	3	2	24	2	1
8	3	1	27	2	1
14	3	2			

表 5 用电管控初始时刻负荷值、负荷功率上下限以及负荷变化率上限

Table 3 load value at the initial time, upper and lower limit of load power and upper limit of load change rate

用户	用电管控 初始时刻 负荷/kW	功率/kW		负荷变化 率上限/ (kW/h)	用户	用电管控 初始时刻 负荷/kW	功率/kW		负荷变化 率上限/ (kW/h)	用户	用电管控 初始时刻 负荷/kW	功率/kW		负荷变化 率上限/ (kW/h)
		上限	下限				上限	下限				上限	下限	
1	187.50	200	20.0	1 000	11	269.72	1 130	113	1 000	21	2 142.30	3 200	320	2 000
2	32.04	315	31.5	1 000	12	558.60	1 800	180	2 000	22	788.54	6 000	600	4 000
3	31.48	250	25.0	1 000	13	167.30	1 600	160	1 000	23	3 872.30	4 000	1 000	3 000
4	259.34	630	63.0	1 000	14	1 291.10	1 600	160	1 000	24	3 346.50	4 500	450	3 000
5	124.70	630	63.0	1 000	15	1 472.90	2 000	200	2 000	25	980.60	4 500	450	3 000
6	956.34	1 000	100.0	1 000	16	431.63	2 000	200	2 000	26	4 458.40	6 000	600	4 000
7	172.80	1 000	100.0	1 000	17	529.79	4 000	400	3 000	27	1 106.70	12 000	1 200	6 000
8	674.80	1 000	600.0	1 000	18	953.33	2 500	250	2 000	28	8 954.60	9 450	945	6 000
9	687.49	1 250	625.0	1 000	19	1 207.30	2 500	250	2 000	29	1 562.30	11 700	1 170	8 000
10	109.80	1 000	100.0	1 000	20	354.24	3 250	325	2 000					

## 4.2 计算结果

在各时段下所有工业用户的用电负荷进行叠加,并与给定外部的负荷曲线要求进行对比,结果如图1所示。可以看出,工业用户的总用电负荷只有在第2时段下达到了负荷曲线要求的上限,在其他时段下均小于给定负荷曲线要求。因此,在各个时段下工业用户的总计划负荷出力值均满足给定负荷曲线要求的限制。同时,由计算可得,所有用户在管控时段内计划用电量总计为496.11 MW·h,未超过给定总用电量约束要求。因此,本文提出的精细化用电管控模型能够满足电网公司的总用电量要求与负荷曲线要求。

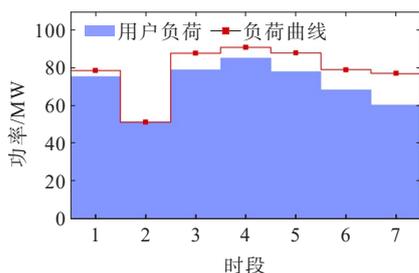


图1 工业用户负荷用电与给定负荷曲线对比图

Figure 1 Comparison of the load power consumption of industrial users with the given load curve

工业用户精细化用电管理的结果如图2所示。从图中可以看出,使用了考虑工业负荷生产特性的精细化用电管控模型后,29个工业用户在7个时段内总关停次数为18次。同时,由图2可知,部分工业用户,如用户1、11、28等在7个时段下均以最大功率保持用电。用户2、6、7、8等在7个时段内均至少出现了一次停机状态,如用户2在第2个时段停电,其余时段保持恒定功率用电。用户17、22、27等在7个时段内,功率波动较大,这是因为比如用户27受到负荷变化率的限制,在第1时段内无法立刻达到满功率用电。

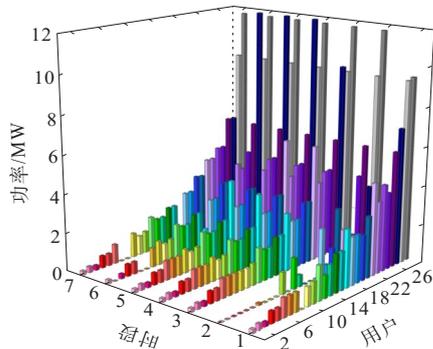


图2 精细化用电管理结果

Figure 2 Refined power consumption management results of industrial users

综上所述,本文所提模型是针对电力供需总体平衡背景提出的,此时,政府、电网公司对需要被限电的工业负荷用电情况进行管控。然而,传统的用电管理方案不够精细,在给定的用电管控电量目标下,对工业用户统一进行关停机,对工业用户的生产上的差异性、自身的用电特性考虑不足。例如,当电网公司给29个工业用户下达500 MW·h的总用电量约束时,由于未考虑工业用户的生产特性,忽略了如工业用户之间的生产耦合性等特性,会导致对上游用户执行停机管控时,下游工业用户也被迫停机,使得最终对29个工业用户总的负荷削减量超出500 MW·h。因此,在传统的用电管理方案下,所有工业负荷实际被管控电量大于给定目标值,同时停电次数也较多。而本文所建立的考虑工业负荷生产特性的精细化用电管控模型是在满足电网公司给定的总用电量约束、负荷曲线约束的前提下,考虑了各工业负荷生产过程中的生产特性,因此能够有效降低工业负荷启停次数,减小对工业用户的正常生产的影响,最大程度保障工业用户的生产效益。此外,本文建立的精细化管理模型的用电管控时段不局限于一天内用电高峰的7 h,可以延长至1周、1个月或缩短至1 h等;用电管控的颗粒度也不局限于1 h,可以调整至15、30 min等。

## 4.3 生产保供性分析

算例中保供性用户8、9和23在各时段的负荷用电计划结果如表6所示。工业用户8、9和23的保供比例分别为60%、50%、25%,则其负荷用电下限分别为600 kW、625 kW、1 000 kW。与表6对比可知,在工业负荷开机状态下,生产保供性均得到了满足。

表6 保供性用户各时段下负荷用电计划

Table 6 Guaranteed users under load power consumption plan for each period

时段	功率/kW		
	用户8	用户9	用户23
1	1 000	1 250	3 000
2	0	1 250	0
3	1 000	1 250	3 000
4	1 000	1 250	4 000
5	1 000	1 250	4 000
6	0	1 250	1 000
7	0	1 250	1 000

为了进一步研究工业用户生产保供性特点,本节将29个工业用户的保供比例以10%为间隔统一

从 10% 调至 50%，得到工业负荷的停电次数、总用电量和保供比例之间的变化关系如图 3 所示。可以看出，随着保供比例的逐渐增加，停电次数先从 18 次逐渐增加至 23 次，之后在保供比例为 30% 至 50% 的时候，停电次数基本保持稳定，维持在 22 至 23 次。而总用电量随着保供比例的变化一直保持不变。

从该结果可以分析得到，保供比例的变化只会影响工业用户的停用电状态，而所有工业用户的总用电量会保持恒定。当保供比例越小时，各个工业用户留出的电力调节范围就越大，因此工业用户的停电次数也较少。当保供比例超过一定范围时，工业用户的调节潜力小，对工业用户停电次数的改变也受到了限制。

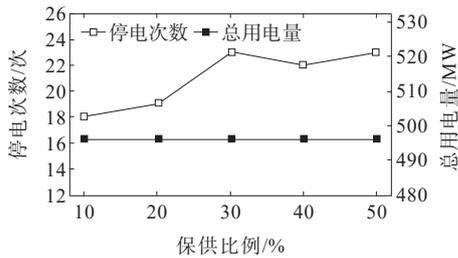


图 3 停电次数、总用电量与保供比例的关系

Figure 3 The relationship between outage frequency, total power consumption and guaranteed supply proportion

#### 4.4 生产周期性分析

为了进一步研究工业用户生产周期性的特点，本节将工业用户最小用电时间以 1 h 为间隔统一从 1 h 调至 5 h，并且设置工业用户的起始时段必须用电情况均为 0，得到工业用户的停电次数、总用电量与最小用电时间的变化关系如图 4 所示。可以看出，随着最小用电时间的增加，停电次数先从 31 次逐渐减小至 13 次；接着，在最小用电时间为 3 h 至 4 h 的时候，停电次数逐渐增加；最后，当最小用电时间为 5 h 时，停电次数显著增加至 64 次。

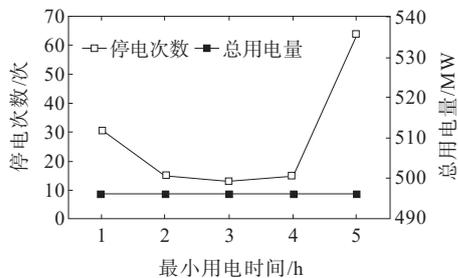


图 4 停电次数、总用电量与最小用电时间的关系

Figure 4 The relationship between outage times, total power consumption and minimum power consumption time

从该结果可以分析得到，最小用电时间的变化只会影响工业用户的停用电状态，而所有工业用户的总用电量会保持恒定。随着最小用电时间在一定范围内增大，停电次数明显减小，满足了用户生产流程中周期性用电的要求。然而，在最小用电时间的增加超出了一定的范围之后，为了满足工业用户生产过程中的用电周期性特点且满足给定总用电量、负荷曲线的外部边界条件，则大量周期性工业用户只能被安排停电，因此停电次数显著增加。

#### 4.5 生产连续性分析

为比较工业用户的生产连续性对精细化用电管控结果的影响，本节建立了改变工业用户负荷变化率的两个场景。其中，场景 1 为考虑工业用户负荷变化率均为 2 000 kW/h，场景 2 将工业用户负荷变化率设置为 5 000 kW/h。在 2 个场景下，其余给定的条件均保持不变。

场景 1 下的负荷用电计划与负荷曲线要求对比结果如图 5 所示，场景 2 下负荷用电计划与负荷曲线要求对比结果如图 6 所示。从对比结果来看，场景 1 在第 1、3、4、5 时段的用户总负荷都小于给定负荷曲线值；而场景 2 中则是在第 3、4、5、6、7 时段的用户总负荷小于给定负荷曲线值。

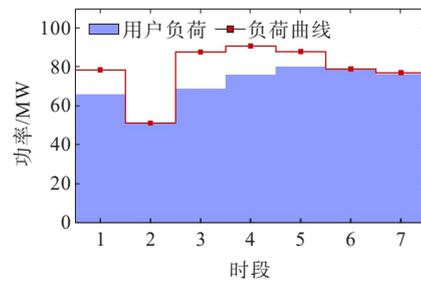


图 5 场景 1 下负荷用电计划与给定负荷曲线对比

Figure 5 The comparison of user's load output and the given load curve under Scenario 1

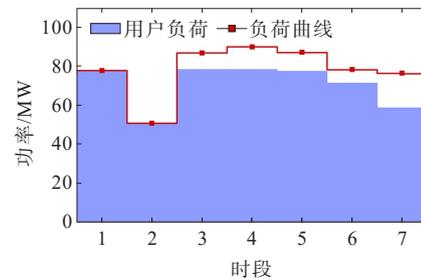


图 6 场景 2 下负荷用电计划与给定负荷曲线对比

Figure 6 The comparison of user's load output and the given load curve under Scenario 2

从该结果可以分析得到,针对场景1来说,其设置的负荷变化率小,第1小时的工业用户用电上限为用电管控初始时刻的负荷值加上负荷变化率对应的数值,因此场景1第1小时的用电无法达到负荷曲线上限,明显小于场景2。接着,由于第2小时给定的负荷曲线值很小,因此在第3小时中,场景1又由于负荷变化率的限制,导致工业负荷用电无法达到功率上限,第3小时总用电负荷又显著小于给定负荷曲线值。

而针对场景2来说,其设置的负荷变化率大,因此在第1小时能够达到负荷值上限,但是又由于总用电量的约束,使得后面几个小时内工业负荷的用电受到了限制。这说明场景2下,负荷变化率约束对工业用户用电功率的限制不大,工业用户负荷用电计划主要受到的是总用电量与负荷曲线的共同限制。

#### 4.6 生产耦合性分析

从图2工业用户精细化用电管理结果中可以看出,工业用户16和17、18和23在7h内均处于用电状态,用电管理结果符合延时耦合关联特点以及瞬时耦合关联特点。

为了进一步验证工业用户生产耦合性特点,并且研究其余特性改变对耦合性产生的变化关系,本节设置以下3个场景:①29个工业用户的保供比例均为20%,其余条件不变;②29个工业用户的最小用电时间均为1h,其余条件不变;③29个工业用户的负荷变化率均为2000kW/h,其余条件不变。

场景1、2下4个工业用户的停用电状态结果如表7所示,场景3下4个用户的各时段停用电状态结果均为1,即用户在各时段均保持用电状态。

表7 场景1、2下4个用户的停用电状态结果

Table 7 Result of power outage status of four users in scenario 1 and 2

时段	场景1停用电状态				场景2停用电状态			
	用户16	用户17	用户18	用户23	用户16	用户17	用户18	用户23
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	0	1	0	0
3	1	1	1	1	1	0	1	1
4	1	1	1	1	1	1	0	0
5	1	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	0	1	1	1
7	1	1	1	1	1	0	0	0

在以上3个场景下,从表7中可以看出,在7个时段下用户16、17、18和23的停用电状态中均至少出现了1次停电状态。当用户16出现停电时,用户17则在下一个时段也出现停电状态;当用户16恢复用电时,用户17也在下一个时段恢复用电状态,这验证了用户16、17之间存在的延时耦合关联特性,满足式(7)关系。同理可得,当用户18出现停电时,用户23在同一时段也出现停电状态;当用户18恢复用电时,用户23也在该时段恢复用电状态,这验证了用户18、23之间存在的瞬时耦合关联特性,同样满足式(7)关系。而场景3下4个用户各时段均保持用电状态,也符合工业用户生产耦合特性。

## 5 结语

“双碳”背景下,工业用户的用电管控与企业生产连续性形成矛盾,本文提出一种考虑用户生产特性的精细化用电管理方法。首先,基于对工业用户生产特性的分析,构建了考虑工业用户生产特性的精细化用电管控框架。其次,以最大化所有工业用户的总用电量为目标,构建了考虑最小保供电量、最小用电周期、最大负荷变化率、负荷耦合关联等内部负荷约束以及总用电量、负荷曲线等外部系统给定约束的精细化用电管控模型。接着,为了保证模型求解的可靠性和提高模型求解的计算效率,针对性地给出线性化的解算方法,包括对0-1整数变量乘以连续变量的非线性项进行分类线性化解算,以及对最小用电时间约束进行分段线性化解算。最后,基于中国东部某省工业园区的实际数据对所提模型进行了验证。算例结果表明,所提用电管控方案能够使得园区在各个时段均满足给定负荷曲线限制,实现所有用户在不超出总用电量约束的情况下尽可能多用电,减少启停次数,最大程度避免了产值损失。

随着以新能源为主体的新型电力系统建设,发电侧充裕度面临挑战。同时,寒潮、高温等极端天气频发,电力系统极易发生较严重的供需失衡,陷入紧平衡。在优先保障“民生”用电的背景下,作为用电侧占比最大的主体,工业企业用电管控的常态化机制有待建立。本文的研究以期实现企业效益和社会效益的平衡,具有广阔应用前景。未来,将在此基础上进一步开展考虑产业链耦合以及多能

源替代等问题的精细化用电决策方法研究。

### 参考文献:

- [1] 李政麒,蔡晔,曹一家,等.美国得州“2·15”停电事故分析及对中国新型电力系统供电充裕度的启示[J].电力科学与技术学报,2022,37(5):17-24.  
LI Zhengqi, CAI Ye, CAO Yijia, et al. Analysis of "2·15" blackout in Texas and its enlightenment to China's new power system supply adequacy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 17-24.
- [2] 鲁宗相,林弋莎,乔颖,等.极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J].电力系统自动化,2022,46(16):3-16.  
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] 高红均,郭明浩,刘俊勇,等.从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J].中国电机工程学报,2023,43(12):4517-4538.  
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new generation power system from sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4538.
- [5] 沈澜,夏滢铃,陈连杰.浙江省中长期电力供需预测及对策分析[J].中国能源,2022,44(7):66-73.  
SHEN Lan, XIA Yingling, CHEN Lianjie. Medium-and long-term power supply and demand forecast and countermeasure in zhejiang province[J]. Energy of China, 2022, 44(7): 66-73.
- [6] 中国电力企业联合会.中电联发布2023年度全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL].<https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-317477>, 2023-01-19.  
China Electricity Council. China Electricity Union released 2023 national electricity supply and demand situation analysis forecast report[EB/OL]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-317477>, 2023-01-19.
- [7] 陈光宇,杨锡勇,江海洋,等.高比例新能源接入下计及工业负荷特性的电网需求响应调控策略[J].电力自动化设备,2023,43(4):177-184.  
CHEN Guangyu, YANG Xiyong, JIANG Haiyang, et al. Demand response regulation strategy for power grid accessed with high proportion of renewable energy considering industrial load characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 177-184.
- [8] 代心芸,陈皓勇,肖东亮,等.电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J].电网技术,2022,46(11):4169-4186.  
DAI Xinyun, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. Review of applications and researches of industrial demand response technology under electricity market environment [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4169-4186.
- [9] 胡泉,徐国栋,尚策,等.工业园区参与调峰的电池储能—需求响应联合规划[J].电力系统自动化,2019,43(15):116-123.  
HU Xiao, XU Guodong, SHANG Ce, et al. Joint planning of battery energy storage and demand response for industrial park participating in peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 116-123.
- [10] 韩刚,黎雄,徐箭,等.计及需求响应下典型工业负荷排放特性的环境经济调度[J].电力系统自动化,2023,47(8):109-119.  
HAN Gang, LI Xiong, XU Jian, et al. Environmental economic dispatch considering emission of typical industrial loads under demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 109-119.
- [11] 肖秋瑶,杨骥,宋政湘.考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J].高压技术,2023,49(4):1392-1401.  
XIAO Qiuyao, YANG Kun, SONG Zhengxiang. Scheduling strategy of industrial parks integrated energy system considering carbon trading and electric vehicle charging load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1392-1401.
- [12] 冉博路,张姝,黄河,等.基于二次聚类的工业用户负荷可调节潜力特征提取与综合评估方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(18):157-168.  
RAN Bolu, ZHANG Shu, HUANG He, et al. Feature extraction and comprehensive evaluation method of load adjustable potential for industrial users based on secondary clustering[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 157-168.
- [13] MORTEZA Z, SEVDA Z, BEHNAM M, et al. Optimal scheduling of demand response aggregators in industrial parks based on load disaggregation algorithm[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(01), 945-953.
- [14] 张新,岳园园,曾好,等.面向电网规划的重点需求侧资源响应潜力评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(16):

- 162-170.  
ZHANG Xin, YUE Yuanyuan, ZENG Hao, et al. Response potential evaluation method of key demand-side resources for power grid planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 162-170.
- [15] 李明轩, 齐步洋, 贺大玮. 工业园区需求响应资源聚合优化配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3543-3549.  
LI Mingxuan, QI Buyang, HE Dawei. Optimization method of the aggregation of the demand response resources in an industrial park[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3543-3549.
- [16] 潘建辉, 张宁, 雍培, 等. 面向海量灵活性资源的两阶段分布式协同调度方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 67-79.  
PAN Jianhui, ZHANG Ning, YONG Pei, et al. Two-stage distributed collaborative dispatching method for massive flexible resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 67-79.
- [17] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.  
YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [18] 徐成司, 董树锋, 张舒鹏, 等. 面向工业园区的集中-分布式综合需求响应方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 489-500.  
XU Chengsi, DONG Shufeng, ZHANG Shupeng, et al. Centralized-distributed integrated demand response method for industrial park[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 489-500.
- [19] 魏景东, 张耀, 王建学, 等. 考虑综合需求响应的工业园区负荷管理方法[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 25-29.  
WEI Jingdong, ZHANG Yao, WANG Jianxue, et al. Industrial park load management method considering integrated demand response[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 25-29.
- [20] 赵静, 周景宏. 我国食品行业终端能源消费及用电分析[J]. 能源研究与管理, 2010, 102(1): 5-8.  
ZHAO Jing, ZHOU Jinghong. Analysis of final energy and electricity consumption on China's food industry[J]. Energy Research and Management, 2010, 102(1): 5-8.
- [21] 潘超, 范宫博, 王锦鹏, 等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1633-1647.  
PAN Chao, FAN Gongbo, WANG Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633-1647.
- [22] 高文义, 黄峰. 有序用电条件下 500 kA 电解槽的工艺控制及应用[J]. 云南冶金, 2022, 51(5): 201-205.  
GAO Wenyi, HUANG Feng. Process control and application on 500 kA electrolytic cell under orderly power utilization condition[J]. Yunnan Metallurgy, 2022, 51(5): 201-205.
- [23] 何璇, 高银涛, 余博文, 等. 酱香型白酒发酵过程全周期跟踪分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 199-205.  
HE Xuan, GAO Yintao, YU Bowen, et al. Tracking and analysis of the whole fermentation process of Maotai-flavor Baijiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 199-205.
- [24] GAN L, YANG T, CHEN X, et al. Purchased power dispatching potential evaluation of steel plant with joint multienergy system and production process optimization[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 1581-1591.
- [25] 徐青山, 吕亚娟, 孙虹, 等. 大用户多维度可中断特性精细化分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 284-293.  
XU Qingshan, LÜ Yajuan, SUN Hong, et al. Refined analysis of large-consumers' interruptible features from multi-dimension[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 284-293.
- [26] 马昕, 裴玮, 肖浩, 等. 考虑复杂生产约束的电池生产工业园区能源网络与生产管理综合优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3566-3575.  
MA Xin, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Integrated energy network and production management optimization operation of battery production industrial estate considering complex production constraints[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3566-3575.
- [27] XIAO Y, REN G, DENG S, et al. A production scheduling method for resolving multiple equipment operation conflicts in lithium battery mills[J]. IEEE Access, 2022, 10: 84078-84093.
- [28] 卢艺, 卢苑, 梁俊文, 等. 含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 39-47.  
LU Yi, LU Yuan, LIANG Junwen, et al. Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 39-47.
- [29] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和 Big-M 法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611.  
LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and Big-M method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.