

# 考虑工业大用户负荷转移的安全约束机组组合

舒 隽<sup>1</sup>, 孙浩男<sup>1</sup>, 韩 冰<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

## Security-constrained Unit Commitment Considering Load Transfer of Large Industrial Consumers

SHU Jun<sup>1</sup>, SUN Haonan<sup>1</sup>, HAN Bing<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**摘 要:** 工业大用户中的一些负荷可以在不影响整体生产流程的情况下在一定时间范围内移动。这些可转移负荷被看作是启动时间可调节的。本文计及工业大用户可转移负荷的运行特性, 建立了考虑工业大用户负荷转移的安全约束机组组合模型。该模型的目标函数为发电成本和负荷转移成本综合最小, 在传统安全约束机组组合的约束条件中增加负荷转移相关约束。所建立的模型是一个混合整数线性规划模型, 可以调用商用求解器求解。算例分析结果表明机组组合和可转移负荷的联合优化, 能够改善系统负荷的峰谷差, 降低系统运行的总成本, 验证了本文所提出模型和方法的有效性。

**关键词:** 工业大用户; 可转移负荷; 安全约束机组组合; 混合整数线性规划; 削峰填谷

**Abstract:** Some loads of large industrial consumers can be transferred within a certain time range without affecting the overall production process. The start-up time of these loads are considered to be adjustable. In this paper, the model of security-constrained unit commitment considering load transfer of large industrial consumers is proposed by taking operation characteristics of transferable loads into account. The objective function of this model is to minimize the total cost of power generation and load transfer, and constraint of load transfer are integrated into the constraints of traditional security-constrained unit commitment model. Therefore, the model is a mixed integer linear programming formulation, and a commercial solver is used to solve it. In the end, the results of case study show that the coordinated optimization of unit commitment and transferable loads can decrease the system load difference between peak and valley and reduce the total cost of system operation, which shows that the proposed model and method are effective.

**Keywords:** large industrial consumer; transferable load; security-constrained unit commitment; mixed integer linear programming formulation; peak load shifting

## 0 引 言

传统的机组组合问题中负荷被认为是固定不变的, 随着需求响应技术的发展, 可调度的对象逐渐从电源侧扩展到负荷侧, 极大地丰富了可调度资源。文献 [1] 对需求响应进行了归类研究, 着重论述了需求响应的实施机制以及对系统的影响; 文献 [2] 系统地阐述了需求响应对日前电力市场中的机组组合及经济调度的影响; 文献 [3-4] 在机组组合问题中考虑了风电以及需求响应的不确定性, 提高了优化过程的可靠性; 文献 [5-7] 将需求响应纳入发电调度, 在用户侧互动下将发电侧和需求侧的资源进行综合规划, 提出了发用电一体化调度计划模型; 文献 [8-9] 将多种需求侧资源以及碳排放权交易的影响纳入安全约束机组组合问题中, 建立了综合考虑碳排放权分配和需求侧资源的安全约束机组组合模型; 文献 [10] 针对基于实时电价的需求响应, 分别建立了考虑不确定性的风电消纳确定性和随机机组组合模型; 文献 [11-13] 针对基于激励的需求响应, 分别对考虑直接负荷控制、可中断负荷以及紧急需求响应的机组组合问题进行了研究; 文献 [14-16] 综合考虑基于激励和基于电价两类需求响应在响应特性上的互补关系, 改变了一味通过协调优化发电侧资源去配合风电并网的传统模式, 建立形成了发电资源和负荷资源共

同协调优化的含风电系统的发用电一体化调度模型。以上研究表明，机组组合的优化对象已经扩展到需求侧，对于接入输电网的大用户，可以直接参与机组组合，而对于接入配电网的中小用户，可以通过负荷聚合商参与机组组合。

工业大用户作为需求侧的可调度资源之一，其可转移负荷可以在不影响整体生产流程的情况下在一定时间范围内移动，被看作是启动时间可调节的。与其他类型用户相比，工业大用户的可转移负荷有两个明显的特点。首先，可转移负荷由多个生产任务构成，单个生产任务是连续不间断的；其次，各个生产任务之间在时间上是相互耦合的，这使得工业大用户可转移负荷的数学模型是离散多时段耦合模型。文献 [17-18] 研究了可转移负荷在微电网日前经济调度中的应用，但所涉及的可转移负荷大多为洗衣机、消毒柜等居民负荷，并没有对可转移负荷启动时间之间存在的耦合关系进行详细建模。

目前需求响应与机组组合的结合研究中，基本上都未将工业大用户与其他类型用户区别对待，这导致所得到的计算结果可能是次优的，甚至可能由于无法满足可转移负荷复杂的约束条件而无法得到有效执行。针对这个问题，本文在传统机组组合问题的基础上，考虑了工业大用户的可转移负荷，描述了负荷转移成本以及生产过程中可转移负荷启动时间之间的耦合关系，以系统发电成本和负荷转移成本综合最小为目标，建立了考虑大用户负荷转移的机组组合模型，对大用户可转移负荷的启动时间进行了优化，并得到了新的机组组合方案。实例证明，考虑大用户负荷转移后，削峰填谷效果明显，进一步降低了系统运行的总成本。

## 1 考虑工业大用户负荷转移的机组组合模型

在机组组合问题中考虑工业大用户负荷转移，需要工业大用户申报可转移负荷的运行特性。在我国普遍实施的有序用电方案中，一般是在没有对负荷转移进行补偿的情况下，采取行政手段强制工业大用户申报相关数据。实际上，工业大用户的负荷转移应该被看作是一种有偿的服务，可以考虑采用市场手段激励工业大用户自愿申报负荷转移的技术经济数据，包括负荷转移的成本和负荷转移的约束

条件，如果工业大用户被要求实施负荷转移，则按照其申报的负荷转移成本支付费用。

### 1.1 目标函数

考虑工业大用户负荷转移的机组组合问题，其目标函数主要包括两个部分：第一部分由常规机组发电成本和启停成本构成；第二部分为负荷转移成本。可表示为

$$\text{Min} \sum_t \sum_i (C_{Gi,t} + C_{sui,t} + C_{sdi,t}) + \sum_m C_{\text{shift},m} \quad (1)$$

式中： $C_{Gi,t}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  的发电成本； $C_{sui,t}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  的启动成本； $C_{sdi,t}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  的关停成本； $C_{\text{shift},m}$  表示可转移负荷任务  $m$  的负荷转移成本。

#### ① 常规机组发电成本和启停成本

常规机组发电成本采用二次函数表示，本文将分段线性化，其具体描述如下：

$$\begin{cases} C_{Gi,t} = \alpha_i n_{\text{oni},t} + \sum_b k_{i,b} P_{i,t,b} \\ P_{i,t} = \sum_b P_{i,t,b} \\ 0 \leq P_{i,t,b} \leq P_{i,b\text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\alpha_i$  表示机组  $i$  的固定空载成本； $n_{\text{oni},t}$  为 0/1 辅助指示变量， $n_{\text{oni},t} = 1$  表示机组  $i$  在时段  $t$  处于运行状态，否则  $n_{\text{oni},t} = 0$ ； $k_{i,b}$  表示机组  $i$  在第  $b$  段的单位出力成本； $P_{i,t,b}$  表示  $t$  时段机组  $i$  在第  $b$  段的出力； $P_{i,t}$  表示  $t$  时段机组  $i$  的实际出力； $P_{i,b\text{max}}$  表示机组  $i$  第  $b$  段的最大允许出力。

发电机组在启停时会产生启停成本，本文中采用固定启动成本和关停成本，可表示为

$$\begin{cases} C_{sui,t} = \beta_i n_{\text{sui},t} \\ C_{sdi,t} = \gamma_i n_{\text{sdi},t} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\beta_i$  和  $\gamma_i$  分别表示机组  $i$  的固定启动成本和固定关停成本； $n_{\text{sui},t}$  和  $n_{\text{sdi},t}$  为 0/1 辅助指示变量， $n_{\text{sui},t} = 1$  表示机组  $i$  在时段  $t$  启动，否则  $n_{\text{sui},t} = 0$ ； $n_{\text{sdi},t} = 1$  表示机组  $i$  在时段  $t$  关停，否则  $n_{\text{sdi},t} = 0$ 。

#### ② 负荷转移成本

工业大用户的某些负荷进行转移需要支付一定的成本，如物料存储成本、保温成本等，并且通常情况下可以认为转移距离越远，所需支付的代价越高<sup>[19]</sup>。

为了描述可转移负荷任务  $m$  的负荷转移成本，定义  $T_{\text{st},m}$  表示可转移负荷任务  $m$  的启动时段，

则有:

$$T_{st,m} = \sum_{t=1}^{NT} tx_{su,m,t} \quad (4)$$

式中:  $x_{su,m,t}$  为 0/1 辅助指示变量,  $x_{su,m,t} = 1$  表示可转移负荷任务  $m$  在时段  $t$  启动, 否则  $x_{su,m,t} = 0$ ;  $NT$  为所研究的总时段数。

因此, 将可转移负荷任务  $m$  的负荷转移成本定义如下:

$$C_{\text{shift},m} = \begin{cases} \lambda_{f,m}(T_{st0,m} - T_{st,m}), & T_{st,m} \leq T_{st0,m} \\ \lambda_{b,m}(T_{st,m} - T_{st0,m}), & T_{st,m} > T_{st0,m} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_{f,m}$  和  $\lambda_{b,m}$  分别为可转移负荷任务  $m$  向前和向后转移一个时段所需支付的成本;  $T_{st0,m}$  为可转移负荷任务  $m$  原计划的启动时段。

负荷转移成本可按式(6)线性化。

$$\begin{cases} C_{\text{shift},m} \geq \lambda_{f,m}(T_{st0,m} - T_{st,m}) \\ C_{\text{shift},m} \geq \lambda_{b,m}(T_{st,m} - T_{st0,m}) \end{cases} \quad (6)$$

上述两条约束使得优化后的负荷转移成本  $C_{\text{shift},m}$  一定等于式(5)中的定义。

## 1.2 约束条件

考虑工业大用户负荷转移的机组组合问题的约束条件主要包括: ①功率平衡和旋转备用约束; ②常规机组出力、爬坡和开停机约束; ③线路潮流和节点电压相角约束; ④负荷转移相关约束。

### 1.2.1 功率平衡和旋转备用约束

#### ① 功率平衡。

考虑大用户负荷转移后, 大用户节点各时段的总负荷随着该节点大用户可转移负荷启动时间的改变而改变, 为了描述节点  $s$  在时段  $t$  的总负荷, 定义一个 0/1 辅助指示变量  $x_{on,m,t}$ ,  $x_{on,m,t} = 1$  表示可转移负荷任务  $m$  在时段  $t$  处于运行状态, 否则  $x_{on,m,t} = 0$ 。同时引入一个 0/1 辅助指示参数  $y_{on,m,t}$ ,  $y_{on,m,t} = 1$  表示可转移负荷任务  $m$  原计划在时段  $t$  处于运行状态, 否则  $y_{on,m,t} = 0$ , 即

$$y_{on,m,t} = \begin{cases} 1, & T_{st0,m} \leq t \leq T_{st0,m} + T_{\text{sus},m} - 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

则节点  $s$  在时段  $t$  的总负荷  $D_{s,t}$  可表示为

$$D_{s,t} = D_{\text{base},s,t} + \sum_{j \in s} \sum_{m \in j} D_{\text{shift},m}(x_{on,m,t} - y_{on,m,t}) \quad (8)$$

式中:  $T_{\text{sus},m}$  表示可转移负荷任务  $m$  的持续时间;  $D_{\text{base},s,t}$  表示所有可转移负荷按原计划启动时间启动

时节点  $s$  在时段  $t$  的总负荷;  $D_{\text{shift},m}$  表示可转移负荷任务  $m$  的负荷大小;  $j \in s$  表示节点  $s$  上的大用户  $j$ ;  $m \in j$  表示大用户  $j$  中的可转移负荷任务  $m$ 。

因此, 节点功率平衡约束可表示为

$$\sum_{i \in s} P_{i,t} - \sum_l P_{f,l,t} A_{l,s} = D_{s,t} \quad (9)$$

式中:  $P_{f,l,t}$  表示线路  $l$  在时段  $t$  的功率;  $i \in s$  表示节点  $s$  上的机组  $i$ ;  $A_{l,s} = 1$  表示节点  $s$  在线路  $l$  的首端,  $A_{l,s} = -1$  表示节点  $s$  在线路  $l$  的末端,  $A_{l,s} = 0$  表示线路  $l$  不与节点  $s$  相连。

#### ② 旋转备用约束。

$$\begin{cases} P_{i,t} + SR_{i,t} \leq P_{i,\text{max}} \\ \sum_i SR_{i,t} \geq SSR_t \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $SR_{i,t}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  的旋转备用容量;  $SSR_t$  表示系统在时段  $t$  的旋转备用需求;  $P_{i,\text{max}}$  为机组  $i$  的最大出力。

### 1.2.2 常规机组出力、爬坡和开停机约束

#### ① 常规机组出力约束。

$$P_{i,\text{min}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\text{max}}, \forall i,t \quad (11)$$

式中:  $P_{i,\text{min}}$  表示机组  $i$  的最小出力。

#### ② 常规机组爬坡约束。

$$-P_{i,\text{RD}} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,\text{RU}}, \forall i,t \quad (12)$$

式中:  $P_{i,\text{RD}}$  表示机组  $i$  的最大下调有功量;  $P_{i,\text{RU}}$  表示机组  $i$  的最大上调有功量。

#### ③ 机组启停辅助变量约束。

$$n_{\text{su},i,t} - n_{\text{sd},i,t} = n_{\text{on},i,t} - n_{\text{on},i,t-1}, \forall i,t \quad (13)$$

$$n_{\text{su},i,t} + n_{\text{sd},i,t} \leq 1, \forall i,t \quad (14)$$

#### ④ 机组最小开停机时间约束。

定义两个辅助参数如下:

$$UT_i = \min\{NT, (T_{\text{on},i} - I_{\text{on},i})n_{\text{on},i,0}\} \quad (15)$$

$$DT_i = \min\{NT, (T_{\text{off},i} - I_{\text{off},i})(1 - n_{\text{on},i,0})\} \quad (16)$$

式中:  $T_{\text{on},i}$  和  $T_{\text{off},i}$  分别表示机组  $i$  的最小开机时间和最小停机时间;  $I_{\text{on},i}$  和  $I_{\text{off},i}$  分别表示机组  $i$  的初始开机时间和初始停机时间;  $n_{\text{on},i,0}$  表示机组  $i$  在  $t=0$  时刻的运行状态。

机组最小开、停机时间约束可表示为

$$n_{\text{on},i,t} = n_{\text{on},i,0}, t \leq UT_i + DT_i, \forall i \quad (17)$$

$$\sum_{\tau=t-T_{\text{on},i}+1}^t n_{\text{su},i,\tau} \leq n_{\text{on},i,t}, \forall i,t \quad (18)$$

$$\sum_{\tau=t-T_{\text{off},i}+1}^t n_{\text{sd},i,\tau} \leq 1 - n_{\text{on},i,t}, \forall i,t \quad (19)$$

1.2.3 线路潮流和节点电压相角约束

$$Pf_{l,t} = \frac{\theta_{lh,t} - \theta_{lt,t}}{X_l} \quad (20)$$

$$-Pf_{l,\max} \leq Pf_{l,t} \leq Pf_{l,\max} \quad (21)$$

$$-\pi \leq \theta_{s,t} \leq \pi \quad (22)$$

式中： $\theta_{s,t}$ 表示节点  $s$  在时段  $t$  的相角； $lh$  和  $lt$  分别表示线路  $l$  的首端节点和末端节点； $X_l$  表示线路  $l$  的电抗； $Pf_{l,\max}$  表示允许流过线路  $l$  的最大功率。

1.2.4 负荷转移相关约束

受制于生产过程，大用户中的一些可转移负荷任务之间通常存在时间耦合关系。例如，根据用户的生产要求，一些生产任务需要在给定的时间范围内启动；上游设备的任务完成后可能需要一定的物料传递或者等待时间才能启动下游设备的任务；同一设备上的任务需要一个任务完成之后才能启动下一个任务以保证设备的独占性；两个或多个生产任务可能同时启动或运行以提高用户的生产效率等等。

为了描述这种时间耦合关系，本文前面定义了两个 0/1 辅助指示变量  $x_{su,m,t}$ ， $x_{on,m,t}$ 。其中， $x_{su,m,t}$  为可转移负荷启动指示变量， $x_{on,m,t}$  为可转移负荷运行指示变量。在此基础上，考虑可能出现的以下 6 种负荷转移约束。

① 可转移负荷任务运行状态约束。

$$x_{on,m,t} = \sum_{\tau=t-T_{sus,m}+1}^t x_{su,m,\tau} \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} x_{su,m,t} = 1 \quad (24)$$

② 可转移负荷任务启动时间范围约束。

可转移负荷任务  $m$  需要在给定时间范围内启动，可表示如下：

$$\sum_{\tau=T_{\min,m}}^{T_{\max,m}} x_{su,m,\tau} = 1 \quad (25)$$

式中： $T_{\max,m}$  和  $T_{\min,m}$  分别为可转移负荷任务  $m$  启动时间的最大值和最小值。

③ 可转移负荷任务时序约束。

a. 可转移负荷任务  $m_2$  需在可转移负荷任务  $m_1$  启动之后启动，可表示如下：

$$\sum_{\tau=1}^t x_{su,m_1,\tau} - x_{su,m_2,t} \geq 0 \quad (26)$$

b. 可转移负荷任务  $m_2$  需在可转移负荷任务  $m_1$  完成之后  $T_D$  个时段启动，可表示如下：

$$\sum_{\tau=t-T_{sus,m_1}-T_D+1}^t x_{su,m_1,\tau} + x_{su,m_2,t} \leq 1 \quad (27)$$

$$\sum_{\tau=1}^t x_{su,m_1,\tau} - x_{su,m_2,t} \geq 0 \quad (28)$$

④ 可转移负荷任务同时启动约束。

可转移负荷任务  $m_1$  与可转移负荷任务  $m_2$  同时启动，可表示如下：

$$x_{su,m_1,t} - x_{su,m_2,t} = 0 \quad (29)$$

⑤ 可转移负荷任务同时运行约束。

可转移负荷任务  $m_1$  与可转移负荷任务  $m_2$  同时运行，可表示如下：

$$\begin{cases} x_{on,m_1,t} - x_{on,m_2,t} \geq 0, T_{sus,m_1} \geq T_{sus,m_2} \\ x_{on,m_2,t} - x_{on,m_1,t} \geq 0, T_{sus,m_2} \geq T_{sus,m_1} \end{cases} \quad (30)$$

⑥ 可转移负荷任务互斥运行约束。

可转移负荷任务  $m_1$  与可转移负荷任务  $m_2$  互斥运行，即不同时运行，可表示如下：

$$x_{on,m_1,t} + x_{on,m_2,t} \leq 1 \quad (31)$$

2 算例分析

2.1 算例参数及描述

本文原始数据来自文献 [20] 中修改的 IEEE 30 母线系统，包括 9 台发电机组以及所有机组的发电成本、启动成本、机组容量、最小出力、初始开停机时间、最小开停机时间和爬坡速率限制等。本文适当修改了机组成本数据，具体见附录 A。系统日负荷曲线如图 1 所示。

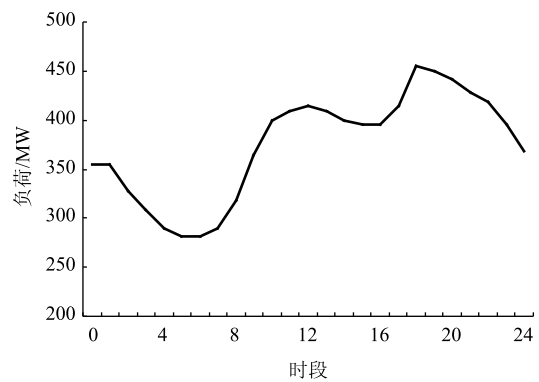


图 1 系统日负荷曲线

本文中设定有 5 个工业大用户，分别位于节点 2, 5, 7, 8, 21，可转移负荷总数为 18，具体任务参数如表 1 所示。表 1 中给出了可转移负荷任务的负荷大小、持续时间、原计划启动时间以及向前和向后转移一个时段所需支付的成本。另外，为了

验证模型中对所有负荷转移约束描述的有效性,考虑可能出现以下6种情况:

- ① 所有任务需在时段1至21范围内启动;
- ② M3在M2启动之后启动;
- ③ M5和M6同时启动;
- ④ M12在M11完成之后1h启动;
- ⑤ M13和M16不同时运行;
- ⑥ M17和M18同时运行。

对比以下3种情况的机组组合,并基于GAMS平台调用CPLEX求解器对算例进行求解。

① 传统机组组合,所有工业大用户的可转移负荷按原计划启动时间启动;

② 考虑工业大用户负荷转移的机组组合(考虑所有负荷转移约束);

③ 考虑工业大用户负荷转移的机组组合(不考虑负荷转移约束)。

表1 可转移负荷任务参数

用户	任务	$D_{\text{shift},m}/$ MW	$T_{\text{sus},m}/$ h	$T_{\text{st0},m}/$ h	$\lambda_{f,m}/$ (\$/h)	$\lambda_{b,m}/$ (\$/h)
1	M1	3	3	11	8	16
	M2	4	3	17	8	16
	M3	5	4	18	8	16
2	M4	6	3	10	10	20
	M5	7	3	11	10	20
	M6	8	4	11	10	20
	M7	10	4	18	10	20
	M8	11	3	18	10	20
	M9	12	4	17	10	20
3	M10	4	2	12	10	20
	M11	4	1	17	10	20
	M12	4	3	19	10	20
4	M13	5	3	11	9	18
	M14	3	4	12	9	18
	M15	3	4	18	7	15
	M16	4	4	15	7	15
5	M17	5	2	20	7	15
	M18	5	3	19	7	15

## 2.2 算例结果及分析

本文主要从负荷曲线、机组组合方案及系统运行成本3个方面分析大用户负荷转移嵌入机组组合的优化效果。

图2为3种情况下系统日负荷曲线的对比。其中,第一种情况为原始负荷曲线,后两种情况为考虑工业大用户负荷转移后的负荷曲线。

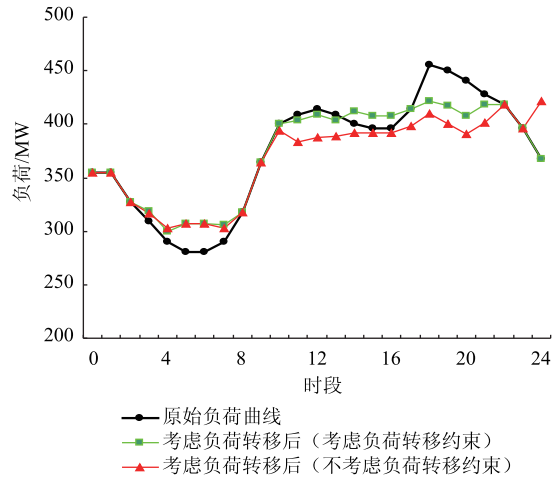


图2 3种情况下系统日负荷曲线的对比

由图2可以看出,考虑工业大用户负荷转移后的系统日负荷曲线与原始负荷曲线相比,系统晚高峰中的部分负荷转移到了早上负荷低谷时段,整体上平缓了负荷曲线。根据计算结果,第二种情况下系统负荷峰谷差为122MW,与第一种情况相比降低了52MW,负荷峰谷差得到改善,削峰填谷效果明显。

虽然模型的目标函数并未直接考虑负荷峰谷差的改善,但由于发电成本函数是二次函数,发电成本的最小化会使负荷曲线更加平滑。

另外,第三种情况与第二种情况相比,由于没有考虑负荷转移相关约束,工业大用户可以更加灵活地进行负荷转移,因此负荷曲线会更加平滑。

图3为3种情况下机组组合方案的对比(各机组在各时段具体的出力情况见附录表A3)。传统的机组组合中,系统负荷高峰时段需短时间开启成本较高的2号机组参与调峰以保持负荷平衡,而考虑工业大用户负荷转移后,系统晚高峰时段的部分负荷转移到早上负荷低谷时段,成本较高的2号机组可以不必在晚高峰时段启动,有效减少了高成本机组的启动运行,在节约启动燃料的同时降低了系统的运行成本。

表2为3种情况下系统运行成本的对比。可以看出,与传统机组组合相比,考虑工业大用户负荷转移后系统运行的总成本显著降低。若考虑所有负荷转移约束,系统运行总成本减少1980.3\$,降

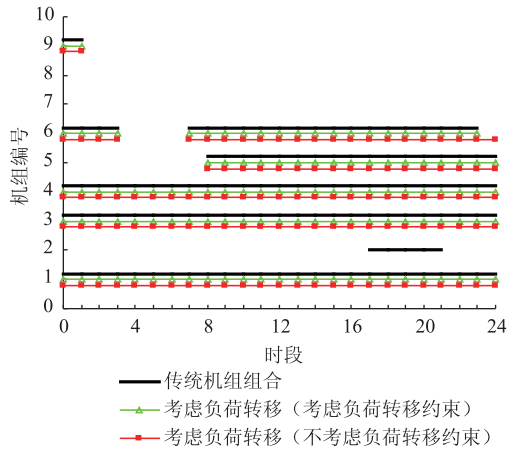


图 3 3 种情况下机组组合方案的对比

低了约 1.41%。其中发电成本和启停成本显著降低。另外，由于实施负荷转移，工业大用户会按照其申报的负荷转移成本得到一部分补偿。

表 2 3 种情况下系统运行成本的对比 \$

模式	总运行成本	发电成本	启动成本	补偿费用
传统机组组合	140 920.8	140 280.8	640	0
考虑负荷转移 (考虑负荷转移约束)	138 940.5	138 166.5	410	364
考虑负荷转移 (不考虑负荷转移约束)	136 877.7	135 418.7	330	1 129

理想状态下若不考虑任何负荷转移约束，工业大用户可以更加灵活地实施负荷转移，系统运行总成本会进一步降低，而用户的补偿会进一步提高。

综上，前两种情况的对比可以看出，机组组合和工业大用户可转移负荷的联合优化，能够改善系统负荷的峰谷差，降低系统运行的总成本。后两种情况的对比可以看出，大用户申报的负荷转移约束条件越少，负荷曲线会越平滑，系统运行的总成本会越低，用户得到的补偿也会越高。

### 3 结束语

本文在传统机组组合问题的基础上，针对负荷侧工业大用户的可转移负荷，建立了考虑工业大用户负荷转移的机组组合模型。通过算例仿真，得到以下结论：

① 系统地描述了负荷转移成本以及生产过程

中可转移负荷启动时间之间的时间耦合关系，将大用户负荷转移模型嵌入到传统的安全约束机组组合模型中。实例证明该模型有效、可靠。

② 通过对大用户可转移负荷启动时间的优化，在满足负荷转移相关约束的前提下，改善了系统负荷的峰谷差，削峰填谷效果明显。

③ 考虑负荷侧工业大用户的可调度资源后，减少了高成本机组的启停，降低了系统运行的总成本。

### 参 考 文 献

- [1] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
- [2] Magnago F H, Alemany J, Lin J. Impact of demand response resources on unit commitment and dispatch in a day-ahead electricity market [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68(68): 142-149.
- [3] Zhao C, Wang J, Watson J P, et al. Multi-stage robust unit commitment considering wind and demand response uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(3): 2708-2717.
- [4] Wang Q, Wang J, Guan Y. Stochastic unit commitment with uncertain demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 562-563.
- [5] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-38.
- [6] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013(22): 35-44.
- [7] 夏叶, 康重庆, 宁波, 等. 用户侧互动模式下发用电一体化调度计划 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 17-23.
- [8] 王澹, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑碳排放权分配及需求侧资源的安全约束机组组合问题研究 [J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3355-3361.
- [9] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 213-218.
- [10] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 基于实时电价的大规模风电消纳机组组合和经济调度模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2955-2963.
- [11] 乐小江. 考虑直接负荷控制的机组组合问题研究

- [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [12] 方杰. 考虑可中断负荷的机组组合优化建模及其应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [13] Rahmani-Andebili M, Abdollahi A, Moghaddam M P. An investigation of implementing emergency demand response program (EDRP) in unit commitment problem [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2011: 1-7.
- [14] 王卿然, 谢国辉, 张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 15-18.
- [15] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3714-3723.
- [16] Zhao L, Zeng B. Robust unit commitment problem with demand response and wind energy [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2012: 1-8.
- [17] 符杨, 蒋一鑫, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的电网经济优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612-2620.
- [18] 孙川, 汪隆君, 许海林. 用户互动负荷模型及其微电网日前经济调度的应用 [J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2009-2015.
- [19] 刘晓琳, 王兆杰, 高峰, 等. 分时电价下的高耗能企业发用电响应 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 41-49.
- [20] Ma Haili, Shahidehpour S M. Transmission constrained unit commitment based on Benders decomposition [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(14): 287-294.

收稿日期: 2017-04-24

作者简介:

舒 隽(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力市场、电力系统运行优化、电力系统规划, E-mail: junshu2000@sohu.com;

孙浩男(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力系统运行优化、电力系统规划, E-mail: 2862435890@qq.com;

韩 冰(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力市场、电价机制、水电优化调度, E-mail: hdhanbing@163.com.

(责任编辑: 林海文)

## 附录 A

表 A1 机组的发电成本数据

机组 编号 $i$	固定空载 成本 $a_i/\$$	出力 分段 $b$	机组每段的 最大允许出力 $P_{i,bmax}/\$$	机组每段的 单位出力成本 $k_{i,b}(\$/MW)$
1	142.734 8	1	51.666 67	10.933 2
		2	51.666 67	11.411 6
		3	51.666 67	11.890 1
2	230.000 0	1	33.333 33	26.502 0
		2	33.333 33	26.725 0
		3	33.333 33	26.936 0
3	81.136 4	1	25.333 33	13.549 1
		2	25.333 33	13.993 0
		3	25.333 33	14.436 9
4	81.298 0	1	25.333 33	13.580 5
		2	25.333 33	14.034 0
		3	25.333 33	14.487 5
5	218.335 0	1	33.333 33	18.304 0
		2	33.333 33	18.712 0
		3	33.333 33	19.120 1
6	87.136 4	1	16.666 67	19.499 9
		2	16.666 67	19.845 1
		3	16.666 67	20.190 5
7	118.820 6	1	6.666 67	37.985 1
		2	6.666 67	38.175 6
		3	6.666 67	38.367 3
8	128.820 6	1	6.666 67	39.998 5
		2	6.666 67	40.215 6
		3	6.666 67	40.433 9
9	187.364 0	1	16.666 67	49.733 2
		2	16.666 67	50.544 9
		3	16.666 67	51.357 2

表 A2 各节点负荷所占系统总负荷的比例 %

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
比例	0	7.7	0.8	2.7	33.2	0	8.0	10.6	0	2.1
节点编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
比例	0	4.0	0	2.2	2.9	1.2	3.2	1.1	3.4	0.8
节点编号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
比例	6.2	0	1.1	3.1	0	1.2	0	0	0.8	3.7

表 A3 各机组在各时段的出力情况

MW

t	i=1			i=2			i=3			i=4			i=5			i=6			i=9		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
0	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	0	0	0	50	50	50	50	50	50
1	155	155	155	0	0	0	76	76	76	74	74	74	0	0	0	25	25	25	25	25	25
2	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	0	0	0	20	20	20	0	0	0
3	155	155	155	0	0	0	76	76	76	68	74.7	74.8	0	0	0	10	13.3	11.2	0	0	0
4	155	155	155	0	0	0	76	76	76	59	69	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	155	155	155	0	0	0	76	76	76	50.7	76	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	155	155	155	0	0	0	76	76	76	50.7	76	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	155	155	155	0	0	0	76	76	76	59	76	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	155	155	155	0	0	0	76	76	76	75.9	76	75.9	0	0	0	11.1	11	11.1	0	0	0
9	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	47	47	47	10	10	10	0	0	0
10	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	28	28	22	0	0	0
11	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	63	37	32	13	0	0	0
12	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	63.8	42	37	17.2	0	0	0
13	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	37	32	17	0	0	0
14	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	28	40	20	0	0	0
15	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	24	36	20	0	0	0
16	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	24	36	20	0	0	0
17	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	42	42	26	0	0	0
18	155	155	155	33	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	64.4	50	50	38.6	0	0	0
19	155	155	155	28	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	50	45	28	0	0	0
20	155	155	155	25	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	63.3	44	36	20.7	0	0	0
21	155	155	155	25	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	31	46	29	0	0	0
22	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	65	46	46	46	0	0	0
23	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	65	65	64	24	24	25	0	0	0
24	155	155	155	0	0	0	76	76	76	76	76	76	61	61	65	0	0	50	0	0	0

注：本表忽略了 3 个算例中各个时段出力均为 0 的机组  $i=7$  和  $i=8$ 。