

DOI: 10.7652/xjtuxb201308005

高耗能企业关口平衡问题的双目标规划模型

王兆杰^{1,2}, 高峰^{1,2}, 翟桥柱^{1,3}, 管晓宏^{1,3}, 周佃民⁴

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安;
4. 上海宝钢股份有限公司能源环保部, 200941, 上海)

摘要: 针对高耗能企业关口平衡问题的多解性特点,提出了关口平衡双目标规划模型,以研究关口平衡合格率、关口流量和机组出力波动性之间的关系。采用线性规划对关口平衡问题进行建模分析,以整个调度周期内不满足关口平衡条件的关口流量惩罚值总和最小作为模型的第一优化目标,并引入整个调度周期内机组调节量惩罚值总和最小作为第二优化目标,分别采用线性加权法和分层序列优化法对该双目标优化模型进行求解。基于国内某大型钢铁企业数据的实验结果表明,双目标规划模型能够在不增加关口流量惩罚值总和的情况下,有效减少机组出力波动。

关键词: 需求响应;关口平衡;双目标规划;线性加权法;分层序列优化法

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0026-07

A Bi-Objective Programming Model for Gateway Balance Problem in Energy Intensive Enterprises

WANG Zhaojie^{1,2}, GAO Feng^{1,2}, ZHAI Qiaozhu^{1,3}, GUAN Xiaohong^{1,3}, ZHOU Dianmin⁴

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Energy and Environment Department, Baoshan Iron and Steel Co. Ltd., Shanghai 200941, China)

Abstract: The gateway balance problem has the characteristics of multiple solutions. A bi-objective programming model is hence proposed to study the relations among the qualified rate of gateway balance condition, the gateway flow, and the fluctuation of generation schedule curve. Linear programming is used in gateway balance problem modeling. The first optimization objective of the model is to minimize the total penalty for violations of gateway balance conditions across the entire scheduling cycle, and the second one is to minimize the total penalty for fluctuation of generation schedule curve across the entire scheduling cycle. The linear weighting method and delaminating sequence optimization method are respectively used to solve the model. Numerical tests on an iron and steel plant show that the model effectively reduces the fluctuation of the generation schedule curve without increasing the total penalty for violation of gateway balance condition across the entire time horizon.

Keywords: demand response; gateway balance; bi-objective programming; linear weighting method; delaminating sequence optimization method

收稿日期: 2012-10-26。 作者简介: 王兆杰(1985—),男,博士生;高峰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174146,60974101,60736027,60921003)。

网络出版时间: 2013-06-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130606.1650.002.html>

随着电力系统改革,以及智能电网背景下微电网、需求响应等相关研究的进展,需求侧资源在电力系统中的作用显得越发重要。钢铁、电解铝等高耗能企业一般是所在地区的用电大户,具有大量的可调度资源。通过参与需求响应项目或需求侧管理项目^[1-4],高耗能企业能够节省用电成本,并在电力系统中发挥重要作用^[4-10],如平抑峰值负荷^[6-9]、参与动态电价形成机制^[1]、为电力系统提供正负备用等辅助服务^[4]。评估高耗能企业的负荷跟踪能力^[11-15],对促进企业参与需求响应具有重要意义。

针对高耗能企业的负荷跟踪能力,文献[11]针对小型钢铁企业提前一日的调度问题,通过生产负荷调整的方式跟踪预定的一条负荷曲线;文献[13]从发电调度角度出发,在严格的即时产需平衡约束下建立了含积分约束的调度模型,给出了连续形式的机组出力曲线;文献[14]将高耗能企业与地区电网之间输电联络线的计量考核点定义为“关口”,提出关口平衡问题,针对有自备电厂的高耗能企业,通过调度自备电厂发电出力,跟踪企业自身的生产负荷,实现企业的发、用电平衡,若在一个考核期内,企业电量消耗和自备电厂电能生产之差在允许误差范围内,即称该考核时段满足关口平衡条件,目标是使整个调度周期内不满足关口平衡条件的考核时段数目最小;文献[15]针对关口平衡问题,分析了机组功率的输出控制方式,给出了另一种跟踪负荷的算法。

高耗能企业通常建有自备电厂,以降低企业供电成本和增加供电可靠性。由于工业生产过程中(特别是密集生产情况下)用电负荷的可调范围通常较小^[1],对于高耗能企业来说,采用发电调度的方式,通过自备电厂出力调度快速跟踪企业自身的负荷变化,较之进行生产计划的调整相对容易,在本质上这是一个机组出力跟踪企业用电负荷的能量跟踪问题。

由于高耗能企业负荷需求的涌动特征、负荷预测误差的存在和发电机组操作的物理限制,使得高耗能企业难以采用文献[13]中的连续调节出力方式来完全跟踪自身负荷变化,从而达到发电与用电的完全实时平衡。在对关口平衡问题的前期研究中,文献[14-15]所建立的模型存在以下一些问题未能解决:①建模方法和采用的算法框架仅适用于自备电厂只有1台发电机组的情况,不能处理存在多台机组的情况(由于各机组的出力范围和爬升约束不同,难以简化为1台虚拟机组);②由于不同调度时段之间的互相耦合,强制某个调度时段满足关口平衡条件可能导致相邻时段发、用电不平衡量的增加;

③未分析关口平衡问题的多解性。关口平衡问题为一多解性问题,存在多条满足关口平衡条件的机组出力曲线,不同机组出力曲线对应不同的出力波动,而在企业自备电厂的实际调度中,并不希望对机组出力频繁进行大幅度调节。

针对上述问题,本文重新考虑关口平衡问题,在优化目标定义上,通过对企业和电网之间关口电量交换量进行线性惩罚,采用最小化关口流量惩罚值总和和代替文献[14-15]中的最小化不满足平衡条件的考核时段数目,从而建立起基于线性规划的关口平衡模型,能够适应存在多台不同型号发电机组的情况,也具有更好的扩展性。同时,采用机组调节量衡量发电机组的出力波动性,引入机组调节量惩罚值总和和最小作为第二优化目标,将问题归结为一个双目标规划问题,并分别采用线性加权法和分层序列优化法建立起加权双目标规划模型和两步逐级优化模型。最后,采用国内某大型钢铁企业的数据对本文各个模型以及文献[14]中提到的动态规划模型的计算结果进行了比较分析。

1 基于线性规划的关口平衡模型

1.1 关口平衡条件

本文以瞬时值形式给出发电计划中的机组输出功率。对于关口平衡问题,计算机组出力计划时涉及的相关参数关系如图1所示。

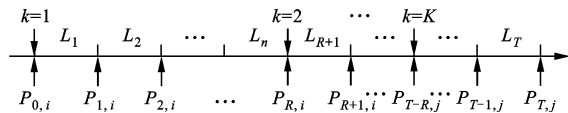


图1 关口平衡问题涉及的参数关系示意图

设每 M (单位为 min) 为一个计量点, t 为计量点编号, 则 $t=0, 1, \dots, T$, 其中 T 为计量时段总数; 每个电费考核时段包括 R 个计量时段; 计算周期 T 内共包括 K 个考核时段, k 为考核时段编号, $k=1, 2, \dots, K$, 其中 $K=T/R$; L_t 表示第 t 个计量时段上的平均负荷(MW); $P_{t,i}$ 表示第 t 个计量点第 i 个机组的瞬时出力值(MW), 其中 $i=1, 2, \dots, N$, N 为机组数。

每个考核时段的时间长度 $\tau/h=RM/60$ 。设 $P_t = \sum_{i=1}^N P_{t,i}$ 表示第 t 个计量点的机组瞬时出力总和, $\bar{P}_k = \frac{1}{2R} \sum_{t=(k-1)R+1}^{kR} (P_{t-1} + P_t)$ 表示第 k 个考核时段内机组总出力的平均值, $\bar{L}_k = \frac{1}{R} \sum_{t=(k-1)R+1}^{kR} L_t$ 表示第 k 个考核时段内企业总负荷的平均值, 第 k 个考核时

段的关口流量为 $\tau |\bar{L}_k - \bar{P}_k|$ 。由于负荷预测误差、设备执行误差等多种因素的影响,在高耗能企业的实际调度中,发、用电完全平衡是难以实现的,通常在制定机组出力计划时,只需保证每个考核周期内企业电量消耗和自备电厂电能生产之差在允许误差范围内即可。设关口流量阈值 δ 表示允许误差上限,若 $|(\bar{L}_k - \bar{P}_k)/\bar{L}_k| \leq \delta$,则认为第 k 个考核时段满足关口平衡条件。

1.2 基本线性规划模型

本文建立基于线性规划的关口平衡模型,设置惩罚系数 λ ,在每个考核时段 k ,对关口流量大于设定关口流量阈值 δ 的部分进行线性惩罚;对关口流量小于阈值的部分,惩罚值定为 0,认为该考核时段满足关口平衡条件。线性惩罚函数如图 2 所示,其中 E_k 为关口流量惩罚值。公式表达如下

$$E_k = \begin{cases} -\lambda \bar{P}_k + \lambda(1-\delta)\bar{L}_k, & \text{if } \bar{P}_k < (1-\delta)\bar{L}_k \\ 0, & \text{if } (1-\delta)\bar{L}_k \leq \bar{P}_k \leq (1+\delta)\bar{L}_k \\ \lambda \bar{P}_k - \lambda(1+\delta)\bar{L}_k, & \text{if } (1+\delta)\bar{L}_k < \bar{P}_k \end{cases} \quad (1)$$

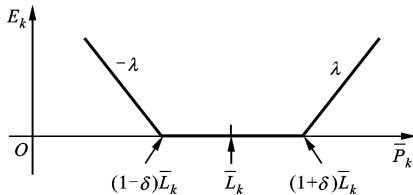


图2 基本线性规划模型惩罚函数示意图

关口平衡模型需考虑发电机组的物理约束,主要有出力上、下限约束和爬升约束^[14],如下式所示

$$b_{i,l} < P_{t,i} < b_{i,u}; \quad |P_{t,i} - P_{t-1,i}| < \Delta p_i \\ t = 1, 2, \dots, T; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: $b_{i,u}$ 和 $b_{i,l}$ 分别为第 i 个机组的出力上限和下限; Δp_i 为第 i 个机组在每个计量时段内有功功率的爬升/爬降上限(MW)。

基于以上分析,建立如下关口平衡的线性规划模型

$$\begin{aligned} & \min_{P_{t,i}, Z_k} \sum_{k=1}^K Z_k \\ \text{s. t. } & \lambda((1-\delta)\bar{L}_k - \bar{P}_k) \leq Z_k \\ & \lambda(\bar{P}_k - (1+\delta)\bar{L}_k) \leq Z_k \\ & Z_k \geq 0; \quad P_t = \sum_{i=1}^N P_{t,i} \\ & \bar{P}_k = \frac{1}{2R} \sum_{t=(k-1)R+1}^{kR} (P_{t-1} + P_t) \\ & b_{i,l} \leq P_{t,i} \leq b_{i,u}; \quad |P_{t,i} - P_{t-1,i}| \leq \Delta p_i \\ & k=1, 2, \dots, K; t=1, 2, \dots, T; i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

模型中的目标函数和前 3 个约束结合起来,使得 Z_k 的最优取值一定等于式(1)中的 E_k ,否则若 Z_k 的取值还可以减小,则不可能是最优。这样,利用线性规划问题本身的特点,使得分段形式的关口流量惩罚函数得以简单表示。模型中的其他约束对应于机组出力的上下限、爬升约束以及平均功率与瞬时功率的关系等。

1.3 关口平衡问题的多解性分析

求解基本线性规划模型可以得到一组使得关口流量惩罚总和最小的机组出力计划。但是,通过对图 2 所示的惩罚函数进行分析可知,关口平衡问题为一多解问题。以第 k 个考核时段为例:

(1)如图 2 所示,当 $(1-\delta)\bar{L}_k \leq \bar{P}_k \leq (1+\delta)\bar{L}_k$ 时, $E_k = 0$,即存在多组 $\bar{P}_k$ 使得基本线性规划模型的优化目标最小;

(2)对 N 台机组进行出力调度时,一组 $\bar{P}_k$ 存在多组 $P_{t,i}$ 与之对应,而不同的 $P_{t,i}$ 将得到不同的出力曲线。

1.4 机组调节量惩罚值总和最小的优化目标

与文献[14]中提到的动态规划模型一样,基本线性规划模型没有考虑发电机组的机组调节量,而在满足关口平衡条件的前提下,有效减少机组的调节量,对于维持发电机组的稳定运行具有十分重要的意义。由关口平衡问题的多解性分析可知,在机组调节量方面,基本线性规划模型存在优化空间。

在基本线性规划模型的基础上,可以引入机组调节量惩罚总和最小作为第二优化目标。各机组调节量的线性惩罚函数如图 3 所示,其中 γ 为惩罚系数, $W_{t,i}$ 为惩罚项。公式表达如下

$$W_{t,i} = \begin{cases} \gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}), & \text{if } P_{t,i} - P_{t-1,i} > 0 \\ 0, & \text{if } P_{t,i} - P_{t-1,i} = 0 \\ -\gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}), & \text{if } P_{t,i} - P_{t-1,i} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

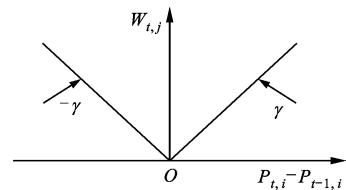


图3 机组调节量惩罚函数示意图

与式(3)所示基本线性规划模型对线性惩罚函数的表示方法一致,可以将机组调节量惩罚值总和最小的优化问题表达为

$$\left. \begin{aligned} & \min_{P_{t,i}, Y_{t,i}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Y_{t,i} \\ \text{s. t. } & \gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}) \leq Y_{t,i} \\ & -\gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}) \leq Y_{t,i} \\ & Y_{t,i} \geq 0; \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

模型中的目标函数和前3个约束结合起来,使得 $Y_{t,i}$ 的最优取值一定等于式(4)中的 $W_{t,i}$,否则 $Y_{t,i}$ 的取值还可以减小,因而不可能是最优。

机组调节量惩罚函数的引入,使得对多台机组进行出力调度时,可根据各台机组的初始出力值和机组的物理约束,计算使总机组调节量惩罚值总和最小的出力计划。

2 双目标规划问题

基于关口平衡问题的分析,本文分别提出不满足关口平衡条件的关口流量惩罚值总和最小和机组调节量惩罚值总和最小2个优化目标,把问题进一步表达为双目标规划问题,即

$$\left. \begin{aligned} & \min_{P_{t,i}, Z_k, Y_{t,i}} \left\{ Z = \sum_{k=1}^K Z_k, \quad Y = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Y_{t,i} \right\} \\ \text{s. t. } & \lambda((1-\delta)\bar{L}_k - \bar{P}_k) \leq Z_k \\ & \lambda(\bar{P}_k - (1+\delta)\bar{L}_k) \leq Z_k \\ & \bar{P}_k = \frac{1}{2R} \sum_{t=(k-1)R+1}^{kR} (P_{t-1} + P_t); \quad P_t = \sum_{i=1}^N P_{t,i} \\ & b_{i,l} \leq P_{t,i} \leq b_{i,u}; \quad |P_{t,i} - P_{t-1,i}| \leq \Delta p_i \\ & \gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}) \leq Y_{t,i} \\ & -\gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}) \leq Y_{t,i} \\ & Z_k \geq 0; \quad Y_{t,i} \geq 0 \\ & k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

该双目标规划问题可分别采用线性加权求和法和分层序列优化法求解。

2.1 加权双目标优化模型

采用线性加权求和法,将式(6)所示双目标优化问题转化为单目标优化问题,建立加权双目标优化模型,模型的约束与式(6)相同,模型的优化目标如下

$$\min_{P_{t,i}, Z_k, Y_{t,i}} \alpha \sum_{k=1}^K Z_k + (1-\alpha) \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Y_{t,i} \quad (7)$$

式中: $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 为加权系数。

2.2 两步逐级优化模型

采用分层序列优化方法求解式(6)所示双目标规划问题,建立两步逐级优化模型。

第一步,以关口流量惩罚总和最小为优化目标

的基本线性规划模型作为第一级优化模型,根据式(3)所述的线性规划模型求得每个考核时段内的关口流量惩罚值 Z'_k 。

第二步,以机组调节量惩罚值总和最小为优化目标,根据第一步优化的结果,将每个考核时段内的关口流量惩罚值 Z'_k 作为惩罚上界,引入相应考核时段内机组总出力的上、下界约束,建立第二级优化模型

$$\left. \begin{aligned} & \min_{P_{t,i}, Y_{t,i}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Y_{t,i} \\ \text{s. t. } & \gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}) \leq Y_{t,i} \\ & -\gamma(P_{t,i} - P_{t-1,i}) \leq Y_{t,i} \\ & |P_{t,i} - P_{t-1,i}| < \Delta p_i; \quad b_{i,l} < P_{t,i} < b_{i,u} \\ & \bar{P}_k = \frac{1}{2R} \sum_{t=(k-1)R+1}^{kR} (P_{t-1} + P_t) \\ & Y_{t,i} \geq 0; \quad P_t = \sum_{i=1}^N P_{t,i}; \quad \bar{P}_{k,\text{low}} \leq \bar{P}_k \leq \bar{P}_{k,\text{up}} \\ & k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对于第二级优化模型,当 $Z_k \leq Z'_k$ 时,有 $\bar{P}_{k,\text{low}} \leq \bar{P}_k \leq \bar{P}_{k,\text{up}}$,其中

$$\bar{P}_{k,\text{low}} = -\frac{Z'_k}{\lambda} + (1-\delta)\bar{L}_k; \quad \bar{P}_{k,\text{up}} = \frac{Z'_k}{\lambda} + (1+\delta)\bar{L}_k \quad (9)$$

关口流量惩罚值上界约束可转化为考核时段内机组出力的上、下界约束,如图4所示。

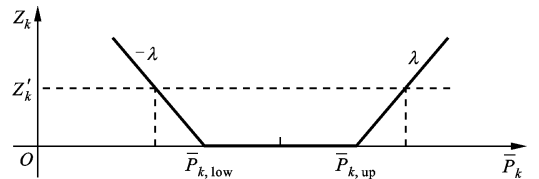


图4 关口流量惩罚值上界转化为机组总出力的上下界约束

2.3 双目标规划问题的帕累托有效性分析

在双目标规划中,一般不存在使得问题的2个目标同时达到最好的解。根据帕累托有效性分析,对本文的双目标规划问题可以得出如下结论。

(1)对加权双目标规划模型,通过遍历不同的加权系数 $\alpha(0 < \alpha < 1)$,求解线性加权后的单目标规划的最优解,其解与式(5)所示双目标规划问题的全部帕累托有效解一一对应。由基本线性规划模型在 $Z_k = 0$ 时的多解性分析,加权双目标规划模型能在满足关口平衡条件的前提下,通过调整加权系数 α 来改善机组调节量。

(2)对两步逐级优化模型,其解均为式(6)所示双目标规划问题的帕累托有效解。由基本线性规划模型多解性分析可知,式(3)所示的第一级优化问题具备多解性,式(8)所示的第二级优化问题得到的解相对第一级优化得到的可行解具有明显非劣性,属于帕累托改进,即两步逐级优化模型也能够满足关口平衡条件的前提下改善机组调节量。

3 实验仿真及讨论

3.1 算例数据及评价指标选择

算法仿真中使用国内某大型钢铁企业的实际数据。该厂共有 4 台型号相同的发电机组(出力上、下限分别为 350 MW 和 210 MW),负荷数据为每 5 min 的平均负荷值。仿真中取 $M=5\text{ min}$, $T=288$, $R=3$, $K=96$, $N=4$,即以 5 min 为一个计量周期,一天共 288 个计量点。15 min 为一个考核时段,一天共 96 个考核时段,设置 $\lambda=1$, $\gamma=0.1$ 。

为对比基本线性规划模型、加权双目标优化模型、两步逐级优化模型以及文献[14]中的动态规划模型的计算结果,本文使用以下评价指标:

(1)关口平衡率

$$Q = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k \times 100\%, y_k = \begin{cases} 0, & \text{if } E_k > 0 \\ 1, & \text{if } E_k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

(2)平均相对关口流量(每 15 min 平均相对关口流量平均值)

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| \frac{\bar{L}_k - \bar{P}_k}{\bar{L}_k} \right| \times 100\% \quad (11)$$

(3)平均相对调节率(每 5 min 发电机组调节率)

$$A = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \left| \frac{P_{t,i} - P_{t-1,i}}{P_{t-1,i}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

关口平衡率用来评价算法能否使得尽量多的考核时段满足关口平衡条件,平均相对关口流量用来评价算法的关口电能交换量,平均相对调节率用于评价发电机组的调节量。

由于文献[14]中的动态规划模型仅适用于自备电厂只有 1 台发电机组的情况,在调用动态规划模型进行算例测试时,需要将 4 台机组聚合成 1 台机组考虑,该聚合机组的总出力上、下限近似设置为 1 400 MW 和 820 MW,而该聚合机组在每个计量时段内有功功率爬升/爬降上限则近似设置为总出力上限和 5 min 爬坡量与机组功率上限之比的乘积。

3.2 机组爬升能力变化时模型性能指标计算结果

采用基本线性规划模型、加权双目标优化模型、两步逐级优化模型以及动态规划模型,计算关口平衡率、考核期平均相对关口流量和发电机组平均相对调节率,结果如表 1 所示。

表 1 机组爬升约束取不同值时 4 种模型的性能对比 %

B	Z	基本线性规划模型			加权双目标优化模型 ($\alpha=0.02$)			两步逐级优化模型			动态规划模型 ^[14]		
		Q	F	A	Q	F	A	Q	F	A	Q	F	A
5	7.5	100	0.078	0.91	100	1.05	0.11	100	1.88	0.058	100	0.41	1.48
5	3.5	100	0.078	0.88	100	1.05	0.11	100	1.88	0.058	100	0.41	1.48
5	1.5	100	0.074	1.02	100	1.08	0.11	100	1.87	0.058	100	0.41	1.48
5	0.6	100	0.610	0.56	100	1.20	0.10	100	2.06	0.037	100	1.20	0.58

B:平衡容量; Z:5 min 爬坡量与机组功率上限之比。

当平衡容量 B 设置为 5% 时,在表 1 中给出的 4 种机组爬升速率参数 Z 下,4 种模型在调度周期内的关口平衡率均能达到 100%,即达到关口平衡的要求。基本线性规划模型在平均相对关口流量和平均相对调节率指标上均优于动态规划模型,这是由于动态规划模型的优化目标是最大化满足关口平衡条件的考核周期数目,即使得关口平衡率最大,而并不是最小化关口流量惩罚值总和,因此在关口平衡率均能够达到 100% 的情况下,基本线性规划模型能更好地减少关口流量。通过在优化模型中引入机组调节量作为第二优化目标,双目标加权优化模型

和两步逐级优化模型均在机组波动性这一目标上有所改善。与动态规划模型和线性规划模型相比,加权双目标优化模型和两步逐级优化模型在平均相对关口流量指标上更优,而且在平均相对调节率指标上有明显改善。

3.3 模型机组出力曲线特性对比分析

在满足关口平衡要求的条件下,4 种模型的机组出力具备不同的特性。分别绘制出基本线性规划模型、加权双目标优化模型、两步逐级优化模型的负荷跟踪曲线,如图 5~图 7 所示。出力曲线全部落入 2 条虚线限定的区域内即表示达到 100% 的关口

平衡率。

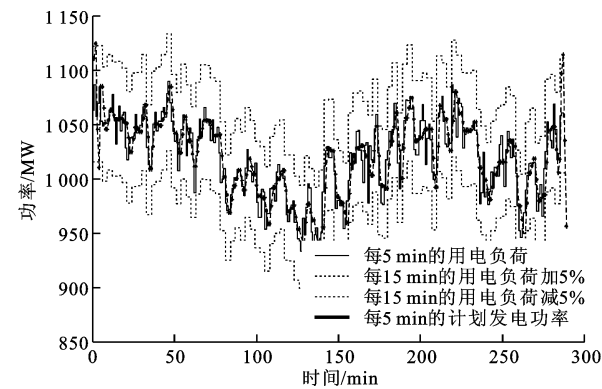


图 5 基本线性规划模型出力曲线

从图 5 可以看出,基本线性规划模型的出力曲线紧跟负荷变化,但机组需要频繁调节,与文献[14]中的动态规划模型出力曲线相似。

如图 6 所示,当 α 设置为 0.02 时,加权双目标优化模型的出力曲线平稳,具备阶梯状特性。前文提到加权双目标优化模型的最优解不唯一,因此一个考核时段内可以在满足 $E_k=0$ 的情况下求解得到使得机组调节量最小的机组出力计划。这是加权双目标优化模型的机组调节量指标相比基本线性规划模型有改善的主要原因,也是加权双目标优化模型阶梯状出力特性的原因。

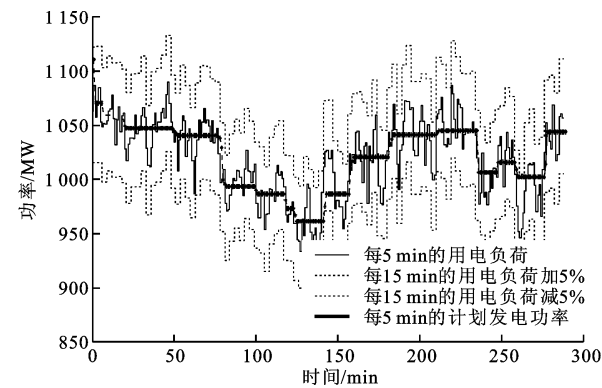


图 6 加权双目标优化模型出力曲线

两步逐级优化模型在第二级优化中专门对机组调节量进行优化,从图 7 可以看出,该模型的出力曲线变化平稳。

3.4 加权双目标优化模型性能分析

加权双目标优化模型的加权系数 α 的取值会影响 2 个优化目标。 α 取不同权重值时,优化问题的 2 个优化目标值对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出:随着 α 逐渐变小,加权双目标优化模型对机组调节量惩罚值总和的权重逐渐变大;机组调节量惩罚值总和随着关口流量惩罚值总

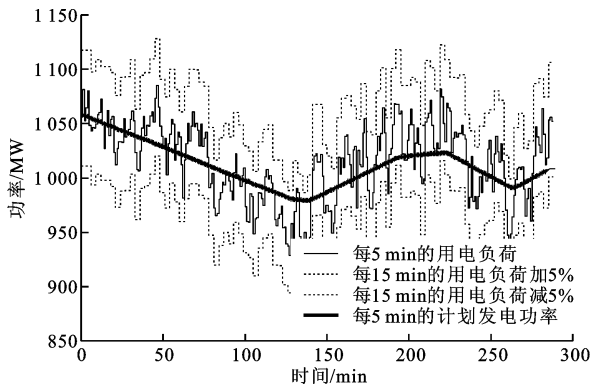


图 7 两步逐级优化模型出力曲线

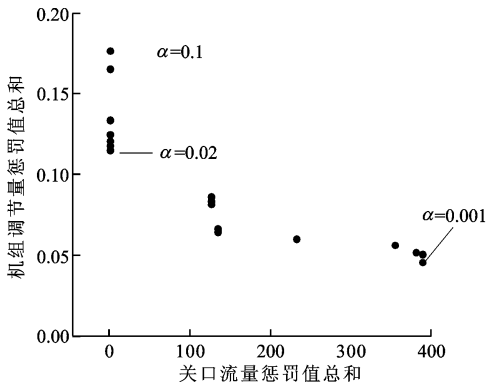


图 8 加权双目标优化模型在不同 α 取值时的优化目标值对比

和的增加呈阶梯式减小。这验证了关口平衡问题在 $E_k=0$ 时的多解性分析:存在多组机组出力计划,其关口流量惩罚值总和相等。图 8 同时也验证了加权双目标规划模型可以在不增加关口流量惩罚值总和的情况下,通过调整加权系数 α 实现对机组调节量惩罚值总和的改善。由图 8 还可以看出:存在一个 α 的取值区间,使得加权双目标优化模型的关口流量惩罚值总和为 0,即考核合格率为 100%。在该取值区间(算例中取 $0.02 \leq \alpha \leq 0.9$),可得到平均相对关口流量和平均相对调节率 2 个算法性能指标随着遍历 α 的变化曲线,如图 9 所示,可以看到随着平均相对关口流量指标的减小,平均相对调节率指标呈

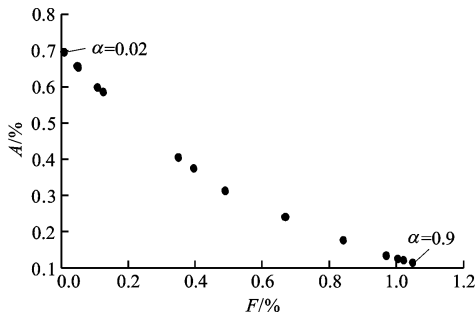


图 9 加权双目标优化模型在不同 α 取值时的模型性能评价指标

现单调增大的趋势。这条曲线即为当关口流量惩罚值总和为0时加权双目标优化模型评价指标的帕累托前沿,即在满足关口平衡考核合格率为100%的前提下,改善平均相对调节率指标需要以平均相对关口流量指标变差为代价。

4 结论与展望

本文采用线性规划对关口平衡问题进行建模分析,分析了该问题的多解性特点,并提出了双目标规划模型以讨论关口平衡合格率、关口流量和机组波动性之间的关系。结果表明,本文提出的双目标规划模型能够在使得全部考核周期满足关口平衡条件的前提下,以一定的代价(关口流量的增加)有效减少机组出力波动,给出更加平稳和符合实际运营需要的机组出力曲线。加权双目标规划模型可以在不增加关口流量惩罚值的情况下,通过调整加权系数实现对机组调节量的改善。

在实际调度中,可以综合考虑负荷预测时长、负荷预测精度、模型运行方式等因素来设定关口平衡优化时长。企业生产过程中的能耗一般具有随机性,对确定性模型的研究是对随机调度模型研究的基础。在负荷预测精度较高的情况下(如超短期负荷预测),可以采用滚动调度方式运行本文模型,最终求得的调度策略也仅使用第一阶段的行为,用这种方式不断融入实时信息,保证可以较为精确地用确定性模型近似随机模型。下一步的研究重点是在模型中考虑企业生产过程中能耗的随机性。

本文对关口平衡问题的探讨及对自备电厂跟踪能力的分析,契合了需求响应框架下对具备发用电一体化特性的工业用户需求响应能力的研究,以期能为耗能企业参与需求响应提供参考。

参考文献:

- [1] IPAKCHI A, ALBUYEH F. Grid of the future [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009,7(2):52-62.
- [2] KIRSCHEN D S. Demand-side view of electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003,18(2):520-527.
- [3] I M H, EL-SAADANY E F. A summary of demand response in electricity markets [J]. Electric Power Systems Research, 2008,78(11):1986-1996.
- [4] PAULUS M, BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy intensive industries for electricity markets in Germany [J]. Applied Energy, 2011,88(2):432-441.
- [5] ROOSE J G, LANE I E. Industrial power demand response analysis for one-part real-time pricing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998,13(1):159-164.
- [6] ASHOK S. Peak-load management in steel plants [J]. Applied Energy, 2005,83(5):413-424.
- [7] ASHOK S, BANERJEE R. An optimization mode for industrial load management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001,16(4):879-884.
- [8] BABU C A, ASHOK S. Peak load management in electrolytic process industries [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008,23(2):399-405.
- [9] ASHOK S, BANERJEE R. Optimal operation of industrial cogeneration for load management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003,18(2):931-937.
- [10] OSTADIA B, MOAZZAMIB D, REZAIEC K. A non-linear programming model for optimization of the electrical energy consumption in typical factory [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007,187(2):944-950.
- [11] NOLDEL K, MORARI M. Electrical load tracking scheduling of a steel plant [J]. Computers and Chemical Engineering, 2010,34(11):1899-1903.
- [12] HAIT A, ARTIGUES C. On electrical load tracking scheduling for a steel plant [J]. Computers and Chemical Engineering, 2011,35(12):3044-3047.
- [13] 管晓宏,翟桥柱,冯泳翰,等. 一类含积分约束的生产制造系统优化调度 [J]. 中国科学:E, 2010,40(1):41-51.
- GUAN Xiaohong, ZHAI Qiaozhu, FENG Yonghan, et al. Optimization based scheduling for a class of production systems with integral constraints [J]. Science in China:Series E, 2010,40(1):41-51.
- [14] 高云龙,高峰,翟桥柱,等. 大型用电企业关口平衡问题研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009,28(19):71-77.
- GAO Yunlong, GAO Feng, ZHAI Qiaozhu, et al. Balance analysis of large-scale power consuming corporation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(19):70-77.
- [15] 高云龙,高峰,潘金艳,等. 高耗能企业关口平衡优化调度及其输出功率控制方式 [J]. 中国电机工程学报, 2010,30(19):76-83.
- GAO Yunlong, GAO Feng, PAN Jinyan, et al. Self-scheduling for electrical energy balance and output power control of energy-intensive enterprises [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(19):76-83.

(编辑 葛赵青 武红江)