

多类型热电机群实时负荷动态分配方法

陈 筑¹,周运虎²,徐仁博¹,韩 旭¹,苏子航²,章 艳²,吕 泉²

(1. 华能大连电厂,辽宁 大连 116113;2. 大连理工大学 电气工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:在运行灵活性提升背景下,考虑热电厂内不同类型热电机群的可行运行区间及其相关辅机运行动态安全边界,以实现热电厂整体效益最大为目标,提出一种多类型热电机群实时负荷动态分配方法。该方法计及热电厂的售电收益、运行成本、辅助调峰市场收益、负荷跟踪惩罚,并通过设置机组出力最小调整量降低各机组出力调整频次。基于东北地区某热电厂实际数据的算例结果验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词:热电机群;动态安全边界;可行运行区间;厂级负荷分配;深度调峰

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209013

0 引言

我国对火电机组的传统调度方式主要是直调,即由电网调度中心将负荷指令下发至电厂单台机组。然而,这种调度方式没有考虑厂内各机组的技术经济特性差异,限制了电厂节能减排潜力的发挥^[1]。对热电厂而言,在运行灵活性提升改造背景^[2]下厂内机组和设备类型变得多样化^[3-4],不仅有传统抽凝机组,还可能具有高背压机组、具有低压缸灵活切除能力的抽凝机组和配置吸收式热泵的抽凝机组,此外可能增加旁路供热系统、电锅炉、储热等设备。传统直调方式没有考虑热电厂内各机组和设备因供热而具有的耦合关系,很难实现电厂内各设备的优化协调,不利于热电厂整体节能提效。

相对而言,厂级负荷分配模式更具自主性,热电厂可综合不同机组的运行特点并兼顾电、热负荷进行统一协调,在提升安全稳定性的同时减少运行成本,在未来电力市场环境中获取更多的经济利益^[1],因此,厂级负荷分配模式被认为是市场环境下更合适的调度模式^[5]。

目前,关于厂级负荷分配的研究包括构建更加精细的煤耗函数^[6-7]、考虑煤种的影响^[8]、考虑功率动态变化对锅炉的影响^[9]、考虑磨煤机运行状态对负荷分配的影响^[10-11]以及对模型进行求解^[5,12-16]。上述研究主要针对纯凝机组间的电负荷分配,为热电(combined heat and power, CHP)机组间的厂级电-热负荷分配研究奠定了良好的基础。目前关于热电厂内多类型供热机组间的电-热负荷分配的研究较少^[10,17-18]。文献[6]在利用拉格朗日插值方法获取电、热煤耗率曲面的基础上,以利润最大化为目标构建考虑深度调峰市场的抽凝机组间电、热负荷分配模型,但未考虑高背压、低压缸零出力改造等其他灵活性改造机组。文献[17]面向高背压机组、抽凝机

组、具有低压缸零出力的抽凝机组这3类机组,在机组电负荷率给定的前提下实现机组间供热负荷的分配,但没有实现电-热协同分配,也没有考虑工业抽汽的影响。文献[18]构建热电企业内多样化热-电资源的协同优化运行模型,以满足日发电计划曲线和热负荷需求,然而未考虑锅炉^[19]、磨煤机等设备实时运行状态所构成的动态安全边界约束,难以适用于实时负荷动态分配。

本文针对由内部带有工业抽汽的高背压机组、低压缸可灵活切除零出力的抽凝机组(简称抽切机组)、传统抽凝机组所构成的多类型热电机群,计及电厂售电利润、负荷跟踪惩罚、调峰辅助服务市场的补偿与分摊,并考虑工业抽汽影响、实时运行机组的动态安全边界、频繁调整出力约束以及指令执行的动态调节过程,构建多类型热电机群实时负荷动态分配模型。基于东北地区某热电厂实际数据,对模型的有效性进行验证。

1 热电厂厂级实时负荷动态分配的关键问题

在电网的实时调度过程中,调度机构会根据系统电负荷实时调节需求,给电厂/机组下发负荷调节指令及允许的调节时间,若电厂/机组在规定的时间内未达到指定功率,则需在结算时进行偏差考核。因此,在以电厂为单位的调度方式下,热电厂需同时考虑当前承担的热负荷以及调度机构下发的电负荷指令和时间要求,在兼顾机组实时运行工况的条件下,将电、热负荷在不同机组间进行合理分配,以尽力完成调度下发指令并实现自身效益最大化。

在实时负荷分配时考虑的关键因素如下。

1)以综合效益最大为目标。在现阶段,我国各区域普遍建设有实时深度调峰市场,因而电、热负荷的分配结果不仅影响电厂发电收益,还决定着深度调峰收益以及调度指令执行偏差带来的惩罚和深度调峰费用分摊量,因此,在负荷分配时,应兼顾多方面收益和成本。本文在构建分配优化模型时,以综

合效益最大为目标,力求分配结果下的电厂综合效益最佳。

2)考虑机组设备实时运行状态。热电厂内各机组在实时运行中的工况是动态变化的,一些机组设备(锅炉、脱硫脱硝装置等)在运行时可能会因工况指标超标问题而无法进行双向甚至单向功率调整,若忽略该因素,则将导致负荷分配结果无法实际执行。为此,本文在调用电、热负荷优化分配模型之前,预先根据当前运行状态对各机组的可行运行区间进行修正,以保证优化模型的计算结果能够实际执行。

3)避免机组小幅度频繁调整。机组频繁调整出力(输出电功率)会导致寿命损耗^[20-21]和煤耗的增加^[22]且难以量化,因而在整厂电负荷调整量较小时应尽可能减少调整的机组数量。为此,本文在约束条件中增加各类型机组出力最小调整量约束,以限制机组不必要的频繁调整。

4)考虑机组的调节过程。通常在实际执行调度机构下发的电负荷指令时机组不是以阶跃方式实现,而是在既定爬坡率下平滑过渡。考虑到通常机组的实际爬坡率大于系统需求,可挖掘指令执行时机组调节过程的利润空间,例如,在深度调峰时段,可采用快速减出力、缓慢加出力策略来增加积分调峰电量,从而获取最高的调峰补偿费用。为此,本文将调度机构要求的指令完成周期以1 min为时间颗粒度进行划分,从而构建多时段电、热负荷分配决策模型(由于本文是通过精细化考虑调节过程来实现收益最大化,将该模型称为实时负荷动态分配模型)。

2 厂级负荷动态分配优化模型

根据第1节,本文以全厂整体效益最大为目标,构建考虑机组设备实时运行安全域和机组调节过程的厂级电、热负荷动态分配优化模型。通过模型优化,实现各机组在指令执行周期内调节过程(即每分钟的电、热负荷功率点)的优化确定。

2.1 目标函数

兼顾热电厂售电收益 R_{inc} 、参与调峰辅助市场收益 R_{DDR} 、运行成本 R_{COST} 和负荷跟踪惩罚 R_{pun} ,以指令完成周期内的综合效益 F 最大为目标函数,如式(1)所示。

$$\max F = R_{\text{inc}} + R_{\text{DDR}} - R_{\text{COST}} - R_{\text{pun}} \quad (1)$$

1)售电收益,即:

$$R_{\text{inc}} = \lambda_{\text{ele}}^t \sum_{i=1}^T \left[(1 - C_{\text{plant}}) P_{\text{plant}}^i - P_{\text{plant}}^0 \right] \tau \quad (2)$$

式中: λ_{ele}^t 为第 t 时段的上网电价; T 为调度机构要求的指令完成时间(单位为min),以 τ 为时间颗粒度(本文取为1 min)将其划分为 T 个时段; C_{plant} 为电厂与发电功率相关的可变耗电率; P_{plant}^i 为第 t 时段热电厂的发电功率; P_{plant}^0 为电厂固定耗电功率。

2)深度调峰服务市场补偿与分摊费用。

为激励火电机组深度调峰给风光上网让出发电空间,减小大规模弃电,近年来各区域电网基本都建设了深度调峰市场。以东北调峰市场^[22]为例,深度调峰分为2档:从基准负荷率降低到40%的负荷率为第1档,申报限价为0.4元/(kW·h);40%的负荷率以下为第2档,申报限价为1元/(kW·h)。市场采用边际价格进行结算。

假设第 t 时段热电厂的负荷率 L_{plant}^t 为:

$$L_{\text{plant}}^t = P_{\text{plant}}^t / P_{\text{plant}}^{\text{cap}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{plant}}^{\text{cap}}$ 为热电厂的装机容量。

在东北深度调峰市场规则下,若热电厂的负荷率处于第1档范围,则调峰补偿费用 $R_{\text{DR},1}$ 为:

$$R_{\text{DR},1} = \sum_{i=1}^T \lambda_1^i (L_{\text{sys}} - L_{\text{plant}}^i) P_{\text{plant}}^{\text{cap}} \tau \quad (4)$$

式中: λ_1^i 为第 t 时段深度调峰市场第1档出清价格; L_{sys} 为补偿基准负荷率。

若热电厂的负荷率处于深度调峰市场的第2档范围(小于第1档的最小负荷率 L_1),则调峰补偿费用 $R_{\text{DR},2}$ 为:

$$R_{\text{DR},2} = \sum_{i=1}^T \left[(L_{\text{sys}} - L_1) \lambda_1^i P_{\text{plant}}^{\text{cap}} + (L_1 - L_{\text{plant}}^i) \lambda_2^i P_{\text{plant}}^{\text{cap}} \right] \tau \quad (5)$$

式中: λ_2^i 为第 t 时段深度调峰市场第2档出清价格。

同时,根据规则,在深度调峰时段,若负荷率高于基准负荷率,则火电厂需要根据修正发电量分摊调峰费用。火电厂的修正发电量 P_{APR}^i 为:

$$P_{\text{APR}}^i = \begin{cases} P_{\text{plant}}^{\text{cap}} p_1 L_{\text{plant}}^i & L_{\text{sys}} \leq L_{\text{plant}}^i \leq L_2 \\ P_{\text{plant}}^{\text{cap}} \left[p_2 (L_{\text{plant}}^i - L_2) + p_1 L_2 \right] & L_2 < L_{\text{plant}}^i \leq L_3 \\ P_{\text{plant}}^{\text{cap}} \left[p_3 (L_{\text{plant}}^i - L_3) + p_2 (L_3 - L_2) + p_1 L_2 \right] & L_{\text{plant}}^i > L_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_1 — p_3 为参与计算分摊费用时修正电量的修正系数; L_2 、 L_3 为相应分档的基准负荷率。

因此,热电厂参与调峰辅助市场收益(分摊费用作为负收益)为:

$$R_{\text{DDR}} = \begin{cases} -T_{\text{DR}} \sum_{i=1}^T \lambda_{\text{APR}}^i P_{\text{APR}}^i \tau & L_{\text{plant}}^i > L_{\text{sys}} \\ T_{\text{DR}} R_{\text{DR},1} & L_1 < L_{\text{plant}}^i \leq L_{\text{sys}} \\ T_{\text{DR}} R_{\text{DR},2} & L_{\text{plant}}^i \leq L_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_{DR} 为调峰时段标志位,其值为1时表示当前处于调峰时段,为0时表示当前处于非调峰时段,此时无需计算调峰辅助服务市场收益或分摊费用; λ_{APR}^i 为第 t 时段单位火电电量的分摊费用。

3)运行成本。

运行成本主要考虑厂内各类型机组的燃煤成本,如式(8)所示。

$$R_{\text{COST}} = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{j=1}^{n_1} F_{\text{Ex},j}^i + \sum_{p=1}^{n_2} F_{\text{Ex-LC},p}^i + \sum_{i=1}^{n_3} F_{\text{B},i}^i \right) \tau \lambda_{\text{coal}} \quad (8)$$

式中: $F_{\text{Ex},j}^t$ 、 $F_{\text{Ex-LC},p}^t$ 、 $F_{\text{B},i}^t$ 分别为第 t 时段传统抽凝机组 j 、抽切机组 p 、高背压机组 i 的煤耗成本; n_1 — n_3 分别为厂内抽凝机组、抽切机组、高背压机组的数量; λ_{coal} 为标煤价格。

根据抽切机组改造原理,抽切机组与抽凝机组的煤耗特性一致,抽凝机组的煤耗特性为:

$$F_{\text{Ex},j}^t = c_{\text{Ex},j} + b_{\text{Ex},j} \left(P_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{v},j} Q_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{g},j} V_{\text{g},j}^t \right) + a_{\text{Ex},j} \left(P_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{v},j} Q_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{g},j} V_{\text{g},j}^t \right)^2 \quad (9)$$

式中: $P_{\text{Ex},j}^t$ 为第 t 时段抽凝机组 j 的发电功率; $Q_{\text{Ex},j}^t$ 为第 t 时段抽凝机组 j 的供热功率; $V_{\text{g},j}^t$ 为第 t 时段抽凝机组 j 的工业抽汽量; $a_{\text{Ex},j}$ 、 $b_{\text{Ex},j}$ 、 $c_{\text{Ex},j}$ 为抽凝机组 j 的煤耗函数系数; $c_{\text{v},j}$ 、 $c_{\text{g},j}$ 分别为抽凝机组 j 供热和工业抽汽对发电功率的损失影响系数; $P_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{v},j} Q_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{g},j} V_{\text{g},j}^t$ 为折算到纯凝工况的等值电出力。

同理,高背压机组的煤耗特性为:

$$F_{\text{B},i}^t = c_{\text{B},i} + b_{\text{B},i} \left(P_{\text{B},i}^t + c_{\text{g},i} V_{\text{g},i}^t \right) + a_{\text{B},i} \left(P_{\text{B},i}^t + c_{\text{g},i} V_{\text{g},i}^t \right)^2 \quad (10)$$

式中: $P_{\text{B},i}^t$ 为第 t 时段高背压机组 i 的发电功率; $V_{\text{g},i}^t$ 为第 t 时段背压机组 i 的工业抽汽量; $a_{\text{B},i}$ 、 $b_{\text{B},i}$ 、 $c_{\text{B},i}$ 为背压机组 i 的煤耗函数系数。

4) 负荷跟踪惩罚,即:

$$R_{\text{pun}} = \left(\alpha \Delta P_{\text{W}+}^T + \beta \Delta P_{\text{W}-}^T + \chi \sum_{t=1}^T \Delta Q_+^t + \delta \sum_{t=1}^T \Delta Q_-^t \right) \tau \quad (11)$$

式中: α 、 β 分别为正、负电量偏差惩罚系数; $\Delta P_{\text{W}+}^T$ 、 $\Delta P_{\text{W}-}^T$ 分别为第 T 时段(末时段)热电厂上网电功率与负荷指令之间的正、负电功率偏差; ΔQ_+^t 、 ΔQ_-^t 分别为第 t 时段正、负热功率偏差; χ 、 δ 分别为正、负热量惩罚偏差系数。

2.2 约束条件

2.2.1 实时安全边界

负荷分配前,需根据当前锅炉、风机、选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)温度等运行状态确定机组能否升降负荷,进而对机组的静态可行域范围进行修正,以保证分配结果的可执行性。

机组设备运行状态参数及负荷升降约束(以布尔变量表征)见表1。设布尔变量 K_u 、 K_d 分别表示机组升、降负荷指征项,表1中对应布尔变量的乘积可确定机组的调整方向约束:当 $K_u = k_1 k_2 k_3 k_5 k_7 k_8 k_9 k_{10}$ 为0时机组不允许升负荷,当 $K_d = k_4 k_6$ 为0时机组不允许降负荷。

2.2.2 机组约束

1) 可行运行区间。

a) 抽凝机组。

受机组实时运行状态安全边界的影响,抽凝机组折算到纯凝工况下的出力上边界 $P_{\text{Con},j}^{\text{max}'}$ 和下边界 $P_{\text{Con},j}^{\text{min}'}$ 分别为:

$$P_{\text{Con},j}^{\text{max}'} = K_{u,j} P_{\text{Con},j}^{\text{max}} + (1 - K_{u,j}) \left(P_{\text{Ex},j}^0 + c_{\text{g},j} V_{\text{g},j}^0 + c_{\text{v},j} Q_{\text{Ex},j}^0 \right) \quad (12)$$

表1 影响负荷升降的因素

Table 1 Factors affecting load rising and falling

参数符号	参数描述	可升	可降	依据
k_1	受热面超温	0	1	超温期间不升负荷
k_2	主蒸汽超压	0	1	主汽压力过高,不具备升负荷能力(或升负荷能力小)
k_3	环保参数超限	0	1	超限尤其是净烟气SO ₂ 超限时必须限制负荷
k_4	火检不稳	1	0	火检不稳定时禁止降负荷
k_5	氧量过低	0	1	低于最小限值时禁止升负荷
k_6	SCR入口温度过低	1	0	低于290℃时禁止降负荷
k_7	SCR入口温度过高	0	1	高于400℃时禁止升负荷
k_8	引风机出力超限	0	1	引风机电流超限/变频指令为100%时禁止升负荷
k_9	一次风机出力超限	0	1	一次风机电流超限/变频指令为100%时禁止升负荷
k_{10}	给水泵出力超限	0	1	给水泵指令/转速超限时禁止升负荷

注:“可升”取值0、1分别表示不可升、可升,“可降”含义类似。

$$P_{\text{Con},j}^{\text{min}'} = K_{d,j} P_{\text{Con},j}^{\text{min}} + (1 - K_{d,j}) \left(P_{\text{Ex},j}^0 + c_{\text{g},j} V_{\text{g},j}^0 + c_{\text{v},j} Q_{\text{Ex},j}^0 \right) \quad (13)$$

式中: $K_{u,j}$ 、 $K_{d,j}$ 分别为抽凝机组 j 的升、降负荷指征项; $P_{\text{Con},j}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{Con},j}^{\text{min}}$ 分别为抽凝机组 j 折算到纯凝工况下的最大、最小发电功率; $P_{\text{Ex},j}^0$ 、 $V_{\text{g},j}^0$ 、 $Q_{\text{Ex},j}^0$ 分别为当前时刻抽凝机组 j 的发电功率、工业抽汽流量和供热功率。

考虑动态安全边界、供暖抽汽、工业抽汽对机组发电功率的影响,抽凝机组的可行运行区间为:

$$\begin{cases} P_{\text{Con},j}^{\text{min}'} \leq P_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{v},j} Q_{\text{Ex},j}^t + c_{\text{g},j} V_{\text{g},j}^t \leq P_{\text{Con},j}^{\text{max}'} \\ P_{\text{Ex},j}^t \geq c_{\text{m},j} Q_{\text{Ex},j}^t + P_{\text{Ex},0} + c_{\text{x},j} V_{\text{g},j}^t \\ Q_j^{\text{min}} \leq Q_{\text{Ex},j}^t \leq Q_j^{\text{max}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $c_{\text{m},j}$ 、 $c_{\text{x},j}$ 分别为抽凝机组 j 供热抽汽、工业抽汽所对应的电、热比影响系数; $P_{\text{Ex},0}$ 为纯凝工况下在机组低压缸为最小通流量时的发电功率; Q_j^{max} 、 Q_j^{min} 分别为综合考虑加热器极限换热功率和机组最大供热能力后抽凝机组 j 的最大、最小供热功率。

b) 抽切机组。

受机组实时运行状态安全边界的影响,抽切机组折算到纯凝工况下的出力上边界 $P_{\text{Con},p}^{\text{max}'}$ 和下边界 $P_{\text{Con},p}^{\text{min}'}$ 分别为:

$$P_{\text{Con},p}^{\text{max}'} = (1 - K_{u,p}) \left(P_{\text{Ex-LC},p}^0 + c_{\text{g},p} V_{\text{g},p}^0 + c_{\text{v},p} Q_{\text{Ex-LC},p}^0 \right) + K_{u,p} P_{\text{Con},p}^{\text{max}} \quad (15)$$

$$P_{\text{Con},p}^{\text{min}'} = K_{d,p} P_{\text{Con},p}^{\text{min}} + (1 - K_{d,p}) \left(P_{\text{Ex-LC},p}^0 + c_{\text{g},p} V_{\text{g},p}^0 + c_{\text{v},p} Q_{\text{Ex-LC},p}^0 \right) \quad (16)$$

式中: $K_{u,p}$ 、 $K_{d,p}$ 分别为抽切机组 p 的升、降负荷指征项; $P_{\text{Ex-LC},p}^0$ 、 $V_{\text{g},p}^0$ 、 $Q_{\text{Ex-LC},p}^0$ 分别为当前时刻抽切机组 p 的发电功率、工业抽汽流量和供热功率; $c_{\text{v},p}$ 、 $c_{\text{g},p}$ 分别为抽切机组 p 供热和工业抽汽对发电功率的损失影响

系数; $P_{\text{Con},p}^{\max}$ 、 $P_{\text{Con},p}^{\min}$ 分别为抽切机组 p 折算到纯凝工况下的最大、最小发电功率。

考虑动态安全边界、供暖抽汽、工业抽汽对机组发电的影响,抽切机组的可行运行区间见附录A。

c)高背压机组。

对于高背压机组,本文仅考虑动态安全边界、工业抽汽对机组发电功率的影响,其可行运行区间为:

$$\begin{cases} P_{B,i}^t + c_{g,i} V_{g,i}^t \leq K_{u,i} P_{B,i}^{\max} + (1 - K_{u,i}) (P_{B,i}^0 + c_{g,i} V_{g,i}^0) \\ P_{B,i}^t + c_{g,i} V_{g,i}^t \geq K_{d,i} P_{B,i}^{\min} + (1 - K_{d,i}) (P_{B,i}^0 + c_{g,i} V_{g,i}^0) \\ P_{B,i}^t = c_{m,i} Q_{B,i}^t + c_{x,i} V_{g,i}^t \end{cases} \quad (17)$$

式中: $c_{g,i}$ 为高背压机组 i 工业抽汽对发电功率的损失影响系数; $K_{u,i}$ 、 $K_{d,i}$ 分别为高背压机组 i 的升、降负荷指征项; $P_{B,i}^{\max}$ 、 $P_{B,i}^{\min}$ 分别为高背压机组 i 的最大、最小发电功率; $P_{B,i}^0$ 、 $V_{g,i}^0$ 分别为当前时刻高背压机组 i 的发电功率和工业抽汽流量; $c_{m,i}$ 、 $c_{x,i}$ 分别为高背压机组 i 供热抽汽、工业抽汽所对应的电、热比影响系数; $Q_{B,i}^t$ 为第 t 时段高背压机组 i 的供热抽汽功率。

2)爬坡率约束。

为了保证机组的安全稳定运行,考虑到机组的上、下坡能力,设置爬坡率上限,即:

$$P_{\text{Ex},j}^t + c_{v,j} Q_{\text{Ex},j}^t + c_{g,j} V_{g,j}^t - (P_{\text{Ex},j}^{t-1} + c_{v,j} Q_{\text{Ex},j}^{t-1} + c_{g,j} V_{g,j}^{t-1}) \leq P_j^{\text{e,up}} \quad (18)$$

$$P_{\text{Ex},j}^{t-1} + c_{v,j} Q_{\text{Ex},j}^{t-1} + c_{g,j} V_{g,j}^{t-1} - (P_{\text{Ex},j}^t + c_{v,j} Q_{\text{Ex},j}^t + c_{g,j} V_{g,j}^t) \leq P_j^{\text{e,dn}} \quad (19)$$

$$P_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{v,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{g,p} V_{g,p}^t - (P_{\text{Ex-LC},p}^{t-1} + c_{v,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^{t-1} + c_{g,p} V_{g,p}^{t-1}) \leq P_p^{\text{e,up}} \quad (20)$$

$$P_{\text{Ex-LC},p}^{t-1} + c_{v,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^{t-1} + c_{g,p} V_{g,p}^{t-1} - (P_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{v,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{g,p} V_{g,p}^t) \leq P_p^{\text{e,dn}} \quad (21)$$

$$P_{B,i}^t + c_{g,i} V_{g,i}^t - (P_{B,i}^{t-1} + c_{g,i} V_{g,i}^{t-1}) \leq P_i^{\text{e,up}} \quad (22)$$

$$P_{B,i}^{t-1} + c_{g,i} V_{g,i}^{t-1} - (P_{B,i}^t + c_{g,i} V_{g,i}^t) \leq P_i^{\text{e,dn}} \quad (23)$$

式中: $P_j^{\text{e,up}}$ 、 $P_j^{\text{e,dn}}$ 、 $P_p^{\text{e,up}}$ 、 $P_p^{\text{e,dn}}$ 、 $P_i^{\text{e,up}}$ 、 $P_i^{\text{e,dn}}$ 分别为相应机组的最大上、下坡率。

3)机组出力最小调整量约束。

为减少机组调整出力的频次,设置各机组(以抽凝机组为例)出力的最小调整量,即:

$$P_{\text{Ex},j}^T - P_{\text{Ex},j}^0 \geq \Delta P_{D,j}^{\text{e}} \quad (24)$$

$$P_{\text{Ex},j}^0 - P_{\text{Ex},j}^T \geq \Delta P_{D,j}^{\text{e}} \quad (25)$$

式中: $\Delta P_{D,j}^{\text{e}}$ 为抽凝机组 j 出力的最小调整量。

2.2.3 全厂整体输出约束

1)热电厂供热约束,即:

$$Q_{\text{plant}}^t = \sum_{j=1}^{n_1} Q_{\text{Ex},j}^t + \sum_{p=1}^{n_2} Q_{\text{Ex-LC},p}^t + \sum_{i=1}^{n_3} Q_{\text{Ex-B},i}^t \quad (26)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_{+}^t = Q_{\text{plant}}^t - Q_{\text{LD}}^t \geq 0 \\ \Delta Q_{-}^t = Q_{\text{LD}}^t - Q_{\text{plant}}^t \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: Q_{plant}^t 为第 t 时段热电厂整体的供热功率; Q_{LD}^t 为第 t 时段热电厂的热负荷,通常是在一个短时间尺度内不随时间变化的常数。

2)热电厂发电约束,即:

$$P_{\text{plant}}^t = \sum_{j=1}^{n_1} P_{\text{Ex},j}^t + \sum_{p=1}^{n_2} P_{\text{Ex-LC},p}^t + \sum_{i=1}^{n_3} P_{\text{Ex-B},i}^t \quad (28)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{W+}^T = P_{\text{plant}}^T - P_{\text{LD}} \geq 0 \\ \Delta P_{W-}^T = P_{\text{LD}} - P_{\text{plant}}^T \geq 0 \end{cases} \quad (29)$$

式中: P_{LD} 为调度机构下发给热电厂的电负荷指令。

3 厂级实时负荷优化分配决策过程

热电厂厂级实时负荷动态分配模型的应用流程如附录B所示,具体过程如下。

1)热电厂接收调度机构下发的电负荷指令 P_{LD} 和指令完成时间 T 。

2)从热负荷管理系统中读取热电厂整体的供热负荷功率需求 Q_{LD} 。

3)根据表1中设备参数实时运行状态判断各机组能否升、降负荷,确定布尔变量 K_u 和 K_d 。

4)调用第2节建立的电、热负荷优化分配模型,计算各机组在第1— T 时段内每分钟的电、热负荷分配结果。考虑到所构建的模型为含线性约束条件、二次目标函数的混合整数规划问题,利用现有的 CPLEX、GUROBI 等求解器进行求解。

5)在上述策略经热电厂厂内调度人员校核后,将其发送到机组控制系统执行。

4 算例分析

以东北某实际热电厂为例,验证本文模型的有效性。采用 IBM ILOG CPLEX 求解器来求解模型。

4.1 基础数据

该厂1号机组为高背压机组,2号机组为抽切机组,3号和4号机组为抽凝机组。当前机组的电、热负荷分配情况以及各机组在纯凝工况下煤耗系数、工业抽汽流量为0时的可行运行区间和相关参数如附录C所示。当前热电厂的厂供电功率为668 MW。

根据历史数据,选取供热中期的730 MW热负荷作为供热负荷。设标杆电价为375元/(MW·h),调峰辅助服务市场的第1档、第2档电价分别为300、800元/(MW·h),分摊电价为20元/(MW·h)。正、负热量惩罚系数均取为10000元/(MW·h)。根据负荷跟踪考核要求^[23-24],正、负电量惩罚系数均取为10000元/(MW·h)。机组上、下坡率均取为额定容量的1.5%,即5.25 MW/min。设指令完成时间为15 min。

4.2 厂级实时负荷动态分配模型的有效性分析

4.2.1 分配结果的合理性分析

为验证本文方法对负荷分配的合理性,选取负

荷与煤价2个维度的4种场景进行分析,设高煤价为1 700元/t,低煤价为760元/t。场景A、B分别为高、低煤价时将负荷向上调整60 MW;场景C、D分别为高、低煤价时将负荷向下调整30 MW。假设当前处于系统的调峰时段。4种场景下的热电厂负荷分配结果如图1所示。

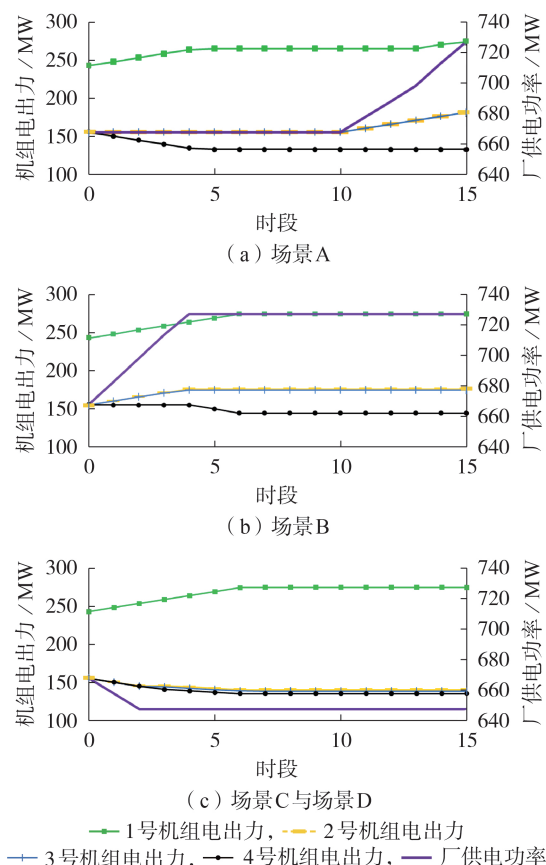


图1 4种场景下的热电厂负荷分配结果
Fig.1 Load allocation results of CHP plant under four scenarios

图1(a)给出了场景A的负荷分配结果。由图可知,厂供电功率在指令完成时间的最后时段(第10—15时段)才响应升负荷需求,直至第15时段才满足负荷指令要求,这是因为高煤价场景下热电厂的运行费用较高,热电厂售电为亏损状态,而维持当前的厂供电功率能够获得更多的调峰补偿费用,所以在最后时段才向上调整厂供电功率直至满足负荷指令要求。同时,由图可知,厂内机组间电-热负荷协同分配,在第1—7时段,1号机组逐步将出力调整至满发状态(在10 t/h工业抽汽时的最大电出力274.8 MW),4号机组逐步降低电出力,而厂供电功率却没有爬坡,这是因为1号机组因具有节煤优势而增加出力,而4号机组当前具有最大的工业抽汽流量且机组整体的煤耗较高,因而降低电出力。对于热负荷的分配,由于电、热耦合特性,1号机组的

供热功率在第1—7时段向上调整,而2—4号机组的热出力向下调整,以达到供热平衡,见附录D图D1。

图1(b)给出了场景B的负荷分配结果。由图可知,厂供电功率在第1—4时段就响应了升负荷指令要求,在指令完成时间内发电量达到了最大化,这是因为在场景B下多发电带来的售电利润(3 750元)要高于调峰补偿费用(1 600元)。

图1(c)给出了场景C与场景D的负荷分配结果。由图可知:在场景C下,厂供电功率在爬坡率约束内(第1、2时段)迅速向下调整电出力,这是因为热电厂在高煤价下售电不盈利,为了减少亏损以及获得更高的调峰补偿费用,热电厂选择快速降低厂供电功率;场景D下热电厂的电出力与场景C下的相同,尽管场景D下热电厂的售电收益为盈利状态,但有相对更丰厚的调峰补偿费用,因此,热电厂选择在初始时段响应负荷指令。

4.2.2 机组最小调整量约束条件的有效性分析

设各机组的最小调整量一致,均为3.5 MW/次。假设1号机组已经处于满发状态,下一个负荷指令要求全厂供电功率向下调整10 MW,小于3台机组最小调整量总和。图2为最小调整量对热电厂电出力安排的影响,由图可知,1号和2号机组始终保持电出力不变,3号和4号机组逐步向下调整电出力,在第15时段满足了厂供电功率向下调整10 MW的要求。可见,通过设置机组出力最小调整量可实现减小调整出力机组数量的目的。

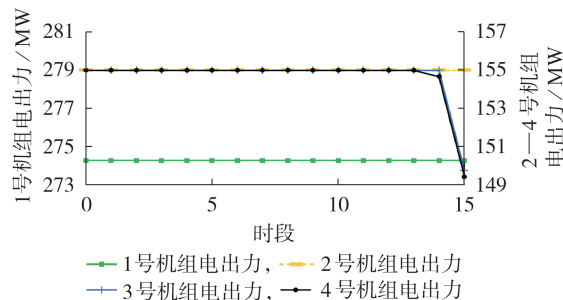


图2 最小调整量对热电厂电出力安排的影响
Fig.2 Influence of minimum adjustment on power output arrangement of CHP plant

4.2.3 动态安全边界的有效性分析

假设下一个负荷指令为向上调整20 MW,动态安全边界影响如图3所示。由图可知:1号机组因当前SCR温度过高而被禁止升负荷,尽管其具有节煤优势且尚未达到满发状态,但是受到了动态安全边界的约束;2—4号机组共同向上调整电出力,以满足负荷指令的要求,在此过程中各机组热出力不变。

4.3 与基于启发式的实时负荷分配方法的对比分析

当前该热电厂采用的是一种基于启发式的实时负荷分配方法(简称启发式方法),即在电负荷和热

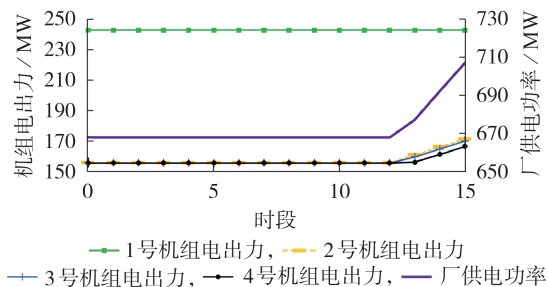


图3 动态安全边界影响

Fig.3 Impact of dynamic security boundary

负荷分配时优先安排给1号机组,剩余的电负荷和热负荷由2—4号机组进行平均分配。

不同负荷指令下启发式方法和本文方法的综合效益对比如图4所示(为与启发式方法进行对比,不考虑机组调整过程,综合效益为假设分配结果执行15 min的结果)。由图可见,本文方法的综合效益均高于启发式方法,尤其是在负荷较低(430 MW以下)时,15 min下本文方法的综合效益最多高出3700元,究其原因,结合图5中2种负荷分配方法的厂供电功率可知,启发式方法仅考虑成本最低,这使1号机组持续保持满发状态,而本文方法还兼顾了深度调峰市场的补偿,在低负荷时通过使1号机组降低出力来减少供热以及使其他机组增加供热的方式降低整个电厂的最小供电功率(抽凝机组联产汽流比背压机组的热电比更大,同样的供热负荷带来的以热定

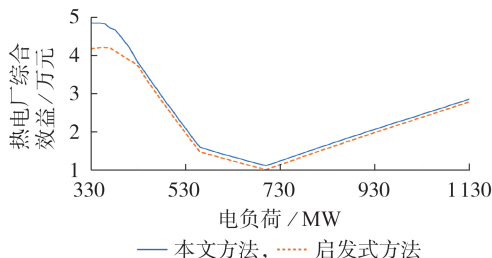


图4 2种负荷分配方法的综合效益对比

Fig.4 Comparison of comprehensive results between two load allocation methods

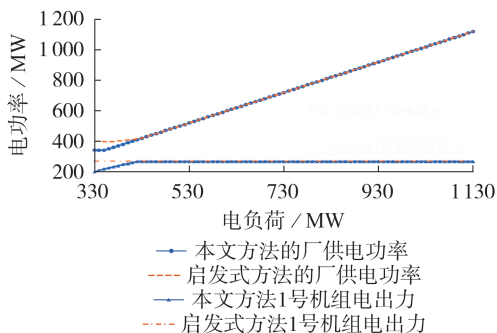


图5 2种负荷分配方法的厂供电功率对比

Fig.5 Comparison of plant power supply between two load allocation methods

电功率更小,因此,将热负荷从背压机组转移到抽汽机组可以降低整个电厂的最小供电功率),从而获得更高的调峰补偿费用,因此,虽然本文方法的煤耗略高于启发式方法,但可获得更高的综合效益。

此外,在电负荷较高时,2种负荷分配方法虽然都可以同时满足电、热负荷需求,但本文方法的综合效益还是略优于启发式方法,这是由于2种分配方法的成本不同,启发式方法的负荷分配方式满足等微增率原则(本文算例中3台抽汽机组的参数相同),所得结果已接近最优解,但没有考虑工业抽汽的影响,而本文方法分配时考虑了工业抽汽的影响,虽然工业抽汽不大,2种负荷分配方法的成本差异也不大,但本文方法的分配结果成本仍更低一些。附录D图D2给出了全厂电负荷在1000~1100 MW范围内2种负荷分配方法的煤耗量差异,由图可知,2种负荷分配方法的煤耗量仅相差4 t/h。

综上,与启发式方法相比,本文方法在低负荷时段或工业抽汽量较大时具有明显优势,而在高负荷时段且工业抽汽量较小时,优势不明显。

5 结论

本文构建多类型热电机群实时负荷动态分配模型,将发电利润、调峰补偿费用与分摊、负荷跟踪惩罚纳入目标函数,并考虑不同类型机组的电-热可行运行区间、各设备实时状态确定的动态安全边界、机组出力最小调整量等约束及机组指令执行过程。

基于东北实际热电厂数据的算例分析结果表明:对机组指令执行过程的精细化建模,有效提高了机组综合效益;对机组实时状态的考虑,使得分配结果切实可行;对最小调整量的设置,有效避免了机组出力频繁小幅调整。此外,与现有启发式方法相比,本文方法通过高背压机组和抽凝机组间的协调可充分挖掘电厂整体下调峰能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈晓东,荆朝霞,郑杰辉,等. 基于动态煤耗模型的电厂厂级发电负荷调度[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2464-2470.
CHEN Xiaodong, JING Zhaoxia, ZHENG Jiehui, et al. Plant-level generation load dispatch based on dynamic coal consumption model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2464-2470.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 关于开展全国煤电机组改造升级的通知[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-03-05]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/content_5648562.htm
- [3] Danish Energy Agency. Thermal power plant flexibility, a publication under the clean energy ministerial campaign[R]. Copenhagen, Denmark: Danish Energy Agency, 2018.
- [4] LIU M, WANG S, ZHAO Y L, et al. Heat-power decoupling

- technologies for coal-fired CHP plants: operation flexibility and thermodynamic performance[J]. *Energy*, 2019, 188: 116074.
- [5] 吴涛, 赖菲, 刘震, 等. 热电联产机组在深度调峰模式下的负荷智能分配[J]. *热力发电*, 2021, 50(9): 119-127.
- WU Tao, LAI Fei, LIU Zhen, et al. Intelligent load distribution of cogeneration units in deep peak regulation mode[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 119-127.
- [6] 曾德良, 简一帆. 火电厂负荷分配的多目标优化算法[J]. *热力发电*, 2017, 46(5): 98-104.
- ZENG Deliang, JIAN Yifan. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(5): 98-104.
- [7] 周永刚, 王欢, 韩吉亮, 等. 基于制粉系统运行方式的厂级AGC煤耗曲线优化[J]. *热力发电*, 2017, 46(4): 99-104, 110.
- ZHOU Yonggang, WANG Huan, HAN Jiliang, et al. Optimization on plant-level AGC coal consumption curve based on operation mode of pulverizing systems[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(4): 99-104, 110.
- [8] ZHAO Y L, LIU M, WANG C Y, et al. Increasing operational flexibility of supercritical coal-fired power plants by regulating thermal system configuration during transient processes[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 2375-2386.
- [9] 苏凯, 刘吉臻, 牛玉广. 考虑直吹式钢球磨电耗的厂级负荷优化分配[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(2): 24-30.
- SU Kai, LIU Jizhen, NIU Yuguang. Load distribution of thermal power plants considering electricity consumption of direct feeding steel ball Mills[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(2): 24-30.
- [10] 刘吉臻, 苏凯, 牛玉广, 等. 考虑脱硫补偿电价的厂内负荷优化分配[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(8): 104-111, 156.
- LIU Jizhen, SU Kai, NIU Yuguang, et al. Plant load optimal distribution considering electricity price compensation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(8): 104-111, 156.
- [11] 王治国, 刘吉臻, 谭文, 等. 基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(19): 86-92.
- WANG Zhiguo, LIU Jizhen, TAN Wen, et al. Multi-objective optimal load distribution based on speediness and economy in power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(19): 86-92.
- [12] 刘吉, 刘炳含, 张月, 等. 基于大数据技术的火电厂节能环保多目标负荷优化分配[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(1): 29-38.
- LIU Ji, LIU Binghan, ZHANG Yue, et al. Energy-saving and environmental protection multi-target load dispatching of thermal power plants based on big data technology[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(1): 29-38.
- [13] 王伟, 常浩, 石永锋, 等. 面向综合经济效益最大化的全厂负荷分配[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(9): 54-60.
- WANG Wei, CHANG Hao, SHI Yongfeng, et al. Power plant load distribution for optimal comprehensive economic benefit[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(9): 54-60.
- [14] 翟伟翔, 刘友宽, 苏适, 等. 火电厂厂级负荷优化分配系统研制[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(3): 126-130.
- ZHAI Weixiang, LIU Youkuan, SU Shi, et al. Development of optimal load dispatch system for power plant[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(3): 126-130.
- [15] 李勇, 王建君, 曹丽华. 基于繁殖粒子群算法的火电厂负荷优化分配[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(4): 80-83, 87.
- LI Yong, WANG Jianjun, CAO Lihua. Optimal load dispatching based on breeding particle swarm optimization algorithm for thermoelectric power plant[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(4): 80-83, 87.
- [16] 张勇, 李晨, 贾楠, 等. 基于改进二阶锥松弛的多区域电-气综合能源系统优化调度快速求解方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(7): 39-45, 52.
- ZHANG Yong, LI Chen, JIA Nan, et al. Fast solution method for optimal dispatching of multi-area integrated electricity-gas systems based on improved second-order cone relaxation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 39-45, 52.
- [17] 石慧, 王洋, 马汀山, 等. 多机组、多模式的热电联产厂级供热优化[J]. *热力发电*, 2022, 51(1): 123-129.
- SHI Hui, WANG Yang, MA Tingshan, et al. Plant-level heating optimization for multi-unit and multi-mode cogeneration[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(1): 123-129.
- [18] 章艳. 灵活性热电企业优化运行与竞价策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- ZHANG Yan. Research on optimal operation and bidding strategies of the flexible combined heat and power enterprise[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [19] 沈倩, 肖杰, 杨红权, 等. 一种确定锅炉沿炉膛宽度方向热负荷分布的方法[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(3): 1-6.
- SHEN Qian, XIAO Jie, YANG Hongquan, et al. A method for determining the distribution of heat load in the direction of the width in the furnace of boiler[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(3): 1-6.
- [20] 慕韵翰. 基于燃煤机组深度调峰安全性条件下负荷优化分配[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- MU Yunhan. Based on deep peak shaving safety load distribution optimization of coal fired units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [21] 李莹, 董峰, 刘巍, 等. 水布垭电厂AGC负荷分配策略分析与优化[J]. *水电与新能源*, 2017(5): 64-67.
- LI Meng, DONG Feng, LIU Wei, et al. Analysis and optimization of the load allocation strategy in automatic generation control of shuibuya hydropower station[J]. *Hydropower and New Energy*, 2017(5): 64-67.
- [22] 李刚, 程春田, 曾筠, 等. 改进等微增率算法求解火电负荷分配问题的实用化研究与应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(2): 72-76.
- LI Gang, CHENG Chuntian, ZENG Yun, et al. Practical study and application of thermal load distribution solved by improved equal incremental principle[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(2): 72-76.
- [23] 国家能源局东北监管局. 东北电力辅助服务市场运营规则[S]. (2020-09-22)[2020-12-23]. http://dbj.nea.gov.cn/zfw/zcfg/202012/t20201223_4055300.html
- [24] 国家能源局东北监管局. 关于印发《东北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》的通知[EB/OL]. (2020-12-23)[2022-03-05]. http://dbj.nea.gov.cn/zfw/zcfg/202012/t20201223_4055299.html

作者简介:



陈 筑

陈 筑(1987—),男,工程师,硕士,主要研究方向为电厂智能化(E-mail: 196534887@qq.com);

徐仁博(1992—),男,工程师,硕士,主要研究方向为火电厂智能化(E-mail: artheriar@163.com);

韩 旭(1987—),男,工程师,硕士,主要研究方向为汽轮机灵活性供热(E-mail: hxnhd2012@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Dynamic allocation method of real-time load for multi-type CHP unit group

CHEN Zhu¹, ZHOU Yunhu², XU Renbo¹, HAN Xu¹, SU Zihang², ZHANG Yan², LÜ Quan²

(1. Huaneng Dalian Power Plant, Dalian 116113, China;

2. College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Under the background of improving operation flexibility, a real-time load dynamic allocation method for multi-type combined heat and power unit group is proposed with the objective of maximizing the overall benefit of combined heat and power plant, which considers the feasible operation region of different types of combined heat and power units in the combined heat and power plant and the dynamic safety boundary of related auxiliary machinery operation. The method considers the power sale income, operation cost, auxiliary market income of peak regulation, load deviation punishment of combined heat and power plant, and reduces the output adjustment frequency of each unit through setting the minimum adjustment amount of unit output. The case results based on the actual data of a combined heat and power plant in Northeast China verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: CHP unit; dynamic safety boundary; available operation region; plant-level load allocation; deep peak regulation

附录 A

考虑动态安全边界、供暖抽汽、工业抽汽对机组发电功率的影响后，抽切机组的可行运行区间为：

$$\begin{cases} P_{\text{Con},p}^{\min'} \leq (P_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{v,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{g,p} V_{g,p}^t) \leq P_{\text{Con},p}^{\max'} \\ P_{\text{Ex-LC},p}^t \geq c_{m,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{x,p} V_{g,j}^t + (1-I_p^t) P_{\text{Ex-LC},0} \\ P_{\text{Ex-LC},p}^t \leq I_p^t (c_{m,p} Q_{\text{Ex-LC},p}^t + c_{x,p} V_{g,j}^t) + (1-I_p^t) P_{\text{Con},p}^{\max} \\ Q_{\text{Ex-LC},p}^t \geq (1-I_p^t) Q_p^{\min} + I_p^t (Q_{1,p}^{\min} - c_{x,p} V_{g,p}^t / c_{v,p}) \\ Q_{\text{Ex-LC},p}^t \leq (1-I_p^t) Q_p^{\max} + I_p^t (Q_{1,p}^{\max} - c_{x,p} V_{g,p}^t / c_{v,p}) \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中： I_p^t 为布尔量， $I_p^t=1$ 代表机组切缸运行； $P_{\text{Ex-LC},0}$ 为纯凝工况下在机组低压缸为最小通流量时的发电功率； $Q_{1,p}^{\max}$ 、 $Q_{1,p}^{\min}$ 分别为切缸后综合考虑机组的最大、最小供热能力和加热器最大、最小换热功率情况后机组的最大、最小供热功率。

附录 B



图 B1 多类型热电机组群实时负荷动态分配

Fig.B1 Real-time load dynamic allocation of multi-type CHP unit

附录 C

表 C1 煤耗系数

Table C1 Coal consumption coefficients

机组	机组类型	$a/[\text{t} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h}^2)^{-1}]$	$b/[\text{t} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$C(t)$
1 号	高背压机组	2.778×10^{-5}	0.317 8	17.79
2 号	抽切机组	2.723×10^{-5}	0.276 1	8.504
3 号	抽凝机组	2.723×10^{-5}	0.276 1	8.504
4 号	抽凝机组	2.723×10^{-5}	0.276 1	8.504

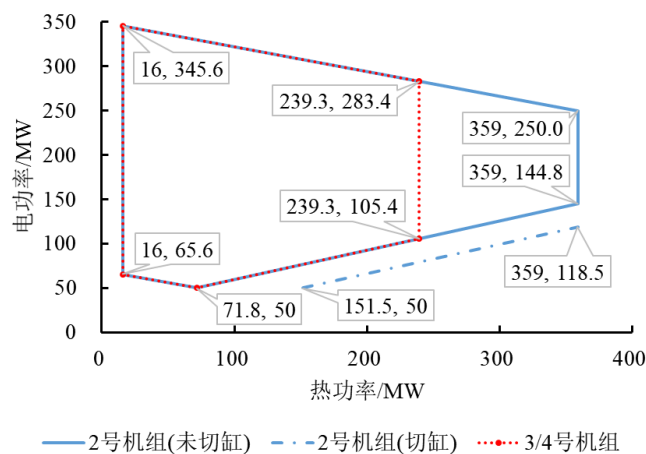


图 C1 2—4 号机组可行运行区间

Fig.C1 Available operation interval of No.2 to No.4 units

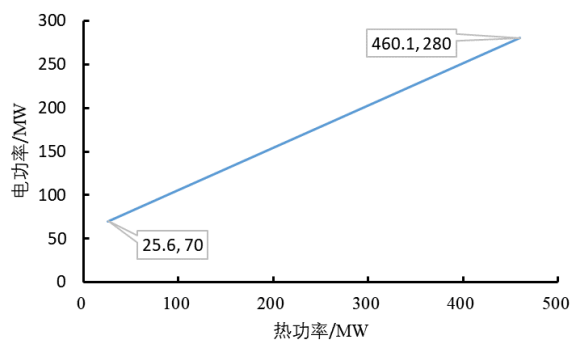


图 C2 1 号机组可行运行区间

Fig.C2 Available operation interval of No.1 unit

表 C2 各机组信息
Table C2 Information of each unit

机组	c_v/b_B	C_m	C_g	最小供热功率 $Q_p^{\min}/\text{MW}$	最大供热功率 $Q_p^{\min}/\text{MW}$	最小发电功率 $P_{\text{Conj}}^{\min}$	最大发电功率 $P_{\text{Conj}}^{\max}$
1 号	-16.4	0.68	0.35			70	280
2 号	0.278	0.66	0.35	16	359	70	350
3 号	0.278	0.66	0.35	16	239	70	350
4 号	0.278	0.66	0.35	16	239	70	350

表 C3 厂内机组当前运行情况
Table C3 Current operation condition of units in plant

机组	当前电出力/MW	当前热出力/MW	工业抽汽/(t·h ⁻¹)
1 号	243	404	10
2 号	155	106	21
3 号	155	108	26
4 号	155	110	36

附录 D

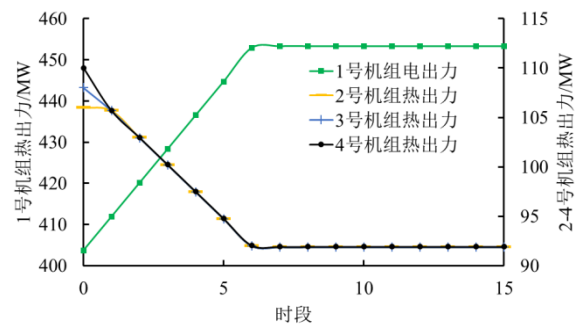


图 D1 各机组热出力调整过程

Fig.D1 Adjustment process of heat output

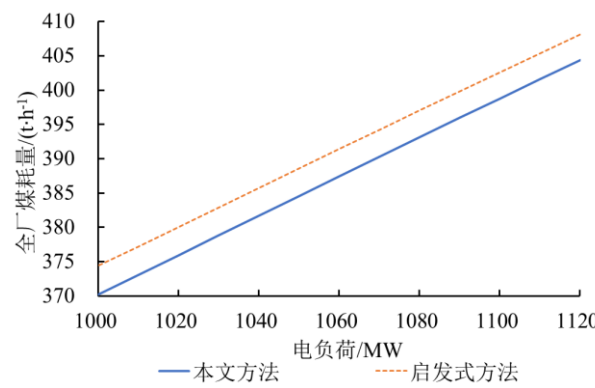


图 D2 2 种负荷分配方法在高负荷时的运行成本差异

Fig.D2 Difference of operation cost between two load allocation methods with high load