

以发电量最大为目标的母管制热电联产系统 两级优化调度

白天宇¹, 杨宇², 郑莆燕¹, 邹思宇¹

(1. 上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 200090; 2. 上海发电设备成套设计研究院, 上海 200240)

摘要:石化企业为保证企业效益,其自备电厂的负荷优化调度需要以发电最大为目标。针对这一问题,建立了优化调度仿真模型,分别采用功率微增法和遗传算法对总量一定的热负荷进行优化调度,得到了不同供热总量下的负荷分配图;针对实际运行中存在负荷波动问题,将遗传算法与功率微增率法相结合,提出了两级优化调度法,研究表明:与功率微增法相比,采用遗传算法最高可提高4.26%的发电量;采用两级优化调度法在 ± 25 t/h的波动量下分别增加了3.81%和3.09%的最大发电量,比遗传算法平均减少了0.25%的发电量,但两级优化调度法将所需调整的机组台套数由4台降低为1台。进一步地,针对两级优化调度法中阈值对系统所需调整台套数和最大发电量的影响情况进行分析可知,阈值的改变会影响系统所需调整机组的台套数,对系统最大发电量的影响也会有所不同,实际运行需要考虑多种因素的影响,并合理选取阈值。该两级优化调度法对实际运行具有一定参考价值。

关键词:母管制热电联产系统;自备电厂;负荷调度;两级优化;最大发电量

中图分类号:TM621

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.08.005

[引用本文格式]白天宇,杨宇,郑莆燕,等.以发电量最大为目标的母管制热电联产系统两级优化调度[J].热能动力工程,2022,37(8):33-39. BAI Tian-yu, YANG Yu, ZHENG Pu-yan, et al. Two-level optimal scheduling of main-pipeline CHP units with maximum generation capacity as objective[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 33-39.

Two-level Optimal Scheduling of Main-pipeline CHP Units with Maximum Generation Capacity as Objective

BAI Tian-yu¹, YANG Yu², ZHENG Pu-yan¹, ZOU Si-yu¹

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090; 2. Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: In order to ensure the benefits of petrochemical enterprises, the optimal load scheduling of their captive power plants needs to aim at maximizing power generation. To solve this problem, an optimal scheduling simulation model is established. The power micro increase rate method and genetic algorithm are used to optimize the heat load with a certain total amount respectively, and the load distribution diagrams under different total heating amounts are obtained. Due to the problem of load fluctuation in actual operation, a two-level optimal scheduling method is proposed by combining genetic algorithm with power micro increase rate method. The research results show that compared with the power micro increase rate method, genetic algorithm can increase the power generation by 4.26% at most. Using the two-level optimal scheduling method, the maximum power generation is increased by 3.81% and 3.09% respec-

收稿日期:2021-08-10; 修订日期:2021-10-01

基金项目:上海市科委节能减排专项-上海市热交换系统节能工程技术中心项目(17DZ2282800)

Fund-supported Project: STCSM Energy Conservation and Emission Reduction Project-Shanghai Municipal Heat Exchange System Energy-saving Engineering Technology Center Project(17DZ2282800)

作者简介:白天宇(1993-),男,新疆阿图什人,上海电力大学硕士研究生.

通讯作者:杨宇(1971-),男,四川泸州人,上海电力大学教授.

tively under the fluctuation of ± 25 t/h, which is 0.25% less than the genetic algorithm on average. However, the two-level optimal scheduling method reduces the number of units to be adjusted from 4 to 1. Further, according to the analysis of the impact of the threshold on the number of units and maximum power generation required by the system in the two-level optimal scheduling method, it can be known that the change of the threshold will affect the number of units required to be adjusted by the system, and the impact on the maximum power generation of the system will be different. The actual operation needs to consider the impact of various factors and reasonably select the threshold. The two-level optimal scheduling method has a certain reference value for practical operation.

Key words: main-pipeline combined heat and power(CHP) unit, captive power plant, load scheduling, two-level optimization, maximum power generation

引 言

热电联产机组因其冷源损失小,能量转化效率高,使其相对于其他类型机组具有更高的能源利用效率和环境优势^[1-2]。机组负荷的优化调度可以实现机组收益最大化,对母管制热电联产机组更为明显。自备电厂中的热电联产机组大多都是母管制运行,针对其开展负荷优化调度具有重要的工程应用价值^[3-4]。

热电联产机组负荷优化调度问题的优化目标选取尤为重要,通常发电机组的负荷优化调度问题是在满足一定约束的条件下,以成本(煤、燃气等)消耗最小或产品(电、热)收益最大作为优化目标。但不同类型机组的优化目标不同,所选取的优化调度方案也不同。以往我国大部分热电联产机组在实际运行中的负荷优化调度原则通常是以“好处归电”的分配原则,以热化发电率最大作为优化目标^[5-6]。但这一优化目标却忽略了热负荷的质量(即压力、温度)问题,导致优化结果偏离实际最优值,发电成本增加。为了保证机组的经济性,以系统输入成本最小为优化目标是选择之一,如以热耗率最小^[7]、煤耗量最小^[8-9]为目标等。同时,由于环境因素和电力调峰对机组发电成本的影响,以发电成本最小为优化目标的负荷优化调度会综合考虑各种影响因素,如阀点效应^[10]、环境排放^[11]和旋转备用^[12]等。某些石化企业自备电厂的热电联产机组是以上游工业副产品(如:石油焦)作为燃料,燃料成本基本固定。因此,其负荷优化调度是以发电量最大作为优化目标。

当用户侧存在负荷波动时,机组需要对当前负

荷再次进行调度。然而,对于每一次的波动变化都需要调节多台机组,不但会增加现场调节的难度,而且多次的调节在一定程度上会影响机组寿命。因此,采用相应的优化调度方法减少需要调节的机组台套数是必要的。文献[13]提出以机组组合与等微增率法相结合的优化调度方法,以降低电网负荷波动。文献[14]提出了一种结合等微增率法和内点法的两阶段调度法,旨在减少电网输电损耗。

本文以某化工企业自备电厂的母管制热电联产机组为例,以发电量最大为优化目标建立优化调度模型,采用功率微增法和遗传算法进行负荷优化调度。同时结合遗传算法和功率微增法,提出一种两级优化调度法。该方法能实现当机组负荷波动时,既能保证机组发电量最大,又能减少机组调节的台套数,满足现场实际操作的需求。

1 母管制机组介绍

1.1 机组概况

某石化企业自备电厂母管制热电联产(CHP)系统由4台锅炉5台汽机组成,1~3号机组为一次抽汽热电联产机组,其额定容量为50 MW;4号机组为两级抽汽热电联产机组,其额定容量为50 MW;0号机组为背压机组,其额定容量为25 MW。0号~4号机设计工况下主蒸汽流量为300 t/h,压力为9.0 MPa,温度为535 ℃;0号~4号机的低压供热抽汽温度为296.5 ℃,压力为1.3 MPa;4号机组的中压供热抽汽温度为435 ℃,压力为4.2 MPa;向用户供热的蒸汽管路中,中压供热管路的供热温度为420 ℃,压力为3.8 MPa,低压供热管路的供热温度为273 ℃,压力为1.3 MPa。某石化企业自备电厂

母管制系统简图如图 1 所示。

1.2 母管制机组特性

石化企业自备电厂中以母管制热电联产机组为主,通常热电联产机组都是以热定电,企业所需求的目标是在满足供热总量需求的前提下,通过对各台机组供热负荷优化分配,实现发电量最大。对于

1 台热电联产机组来说,机组的最大发电量与供热蒸汽流量之间呈一定的函数关系。通过 Epsilon 热力系统仿真软件建立母管制热电联产机组的仿真模型,利用仿真模型可分析并拟合出各机组运行特性曲线。图 2 为 1~3 号以及 4 号和 0 号机组的供热特性曲线。

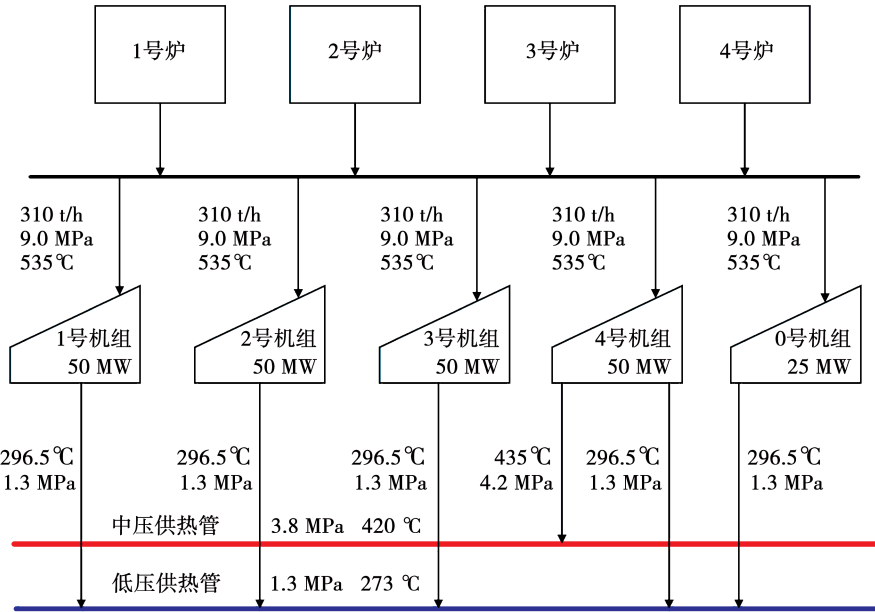


图 1 自备电厂母管制系统简图

Fig.1 Simplified diagram of main-pipeline unit of captive power plant

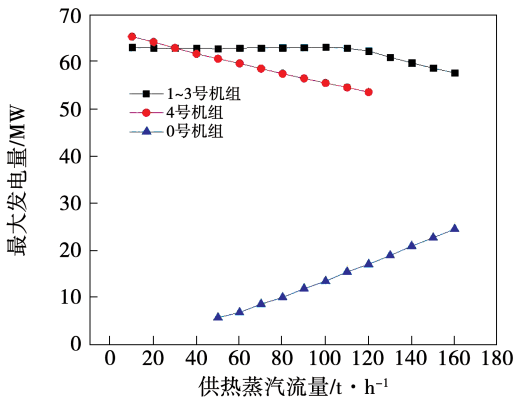


图 2 机组供热特性曲线

Fig.2 Heating characteristic curve of unit

2 模型建立及优化方法

2.1 优化模型

根据石化企业自备电厂生产的工艺流程,母管制热电联产机组的目的是在保证企业所需供热负荷

的同时,使总发电量达到最大,针对该系统建立负荷调度优化模型,并利用优化算法对机组的负荷调度进行优化分配,其优化模型为:

优化目标:

$$\max N = \sum_{i=1}^5 N_i \quad (1)$$

约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^5 D_{gi} = D_g \\ P_i \geq 0.98 \\ \min D_{gi} \leq D_{gi} \leq \max D_{gi} \\ \min D_{0i} \leq D_{0i} \leq \max D_{0i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N —总发电量, MW; N_i — i 号机发电量, MW; p_i — i 号机供热蒸汽压力, MPa; D_g —总供热蒸汽量, t/h; D_{0i} — i 号机组的主蒸汽流量, t/h; D_{gi} — i 号机组的供热抽汽量, t/h; $\max D_{gi}$ — i 号机最大供热蒸汽量, t/h; $\min D_{gi}$ — i 号机最小供热蒸汽量, t/h;

$\max D_{0i}$ — i 号机最大主蒸汽流量, t/h ; $\min D_{0i}$ — i 号机最小主蒸汽流量, t/h 。

2.2 优化方法

2.2.1 功率微增法

常见的火电机组的负荷优化调度方法有动态规划法、线性规划法和等微增率法等。这些优化方法所针对的优化目标是在保证一定热负荷或电负荷的前提下使机组燃料消耗量最小,是输入能量(燃料)与输出能量(电负荷、热负荷)之间函数关系的优化问题^[10]。

机组的优化目标是在保证机组满足一定热负荷的前提下使发电量最大,因此借鉴等微增率法提出了功率微增法,即让功率微增率最大的机组先带负荷,直至该机组供热量达到最大后,剩余负荷由功率微增率次大的机组带,以此类推,直到带满热用户所需的全部供热负荷量。

2.2.2 遗传算法

热电联产机组的负荷调度问题是关于两种输出能量(热负荷、电负荷)之间函数关系的优化问题,两者之间既相互耦合,也相互独立,其优化调度较为复杂。传统的优化方法在面对复杂优化调度问题时,难以实现系统整体最优。相较于传统优化方法,仿生优化算法因其能很好地解决最优解的收敛性问题而备受关注^[15]。常见的仿生优化算法有粒子群算法、蚁群算法和遗传算法等,其中遗传算法因其在搜索过程中只使用目标函数而不使用导数,具有很好的鲁棒性^[16]。同时,遗传算法的候选解集非常大,搜索空间不均匀,使得寻优范围扩大,在求解过程中不太可能陷入局部最优^[16]。因此,针对复杂的负荷优化调度问题,可优先选择遗传算法。

2.2.3 两级优化调度法

无论是功率微增法还是遗传算法,都是对某一个固定负荷的静态优化调度。但在实际生产过程中,热负荷需求量有时会产生小幅度的波动,此时利用遗传算法进行调整分配时,需要对多台机组进行小范围的调整。对于现场实际操作,由于需要调整的负荷量较小,显然调整单台机组更为简便。虽然遗传算法能很好地解决复杂优化调度问题,但单一的采用遗传算法进行负荷优化调度需要在任何负荷

变化条件下调节所有机组的负荷,不利于现场实际操作。虽然功率微增法针对复杂优化调度问题难以找到全局最优解,但其负荷调度是依次对单台机组进行调整,现场实际操作更为简便。因此,综合以上两种分配方法,提出一种既能实现目标函数最优,又能对实际运行中的负荷波动情况快速响应的两级优化调度法。图3为两级优化调度法流程图。

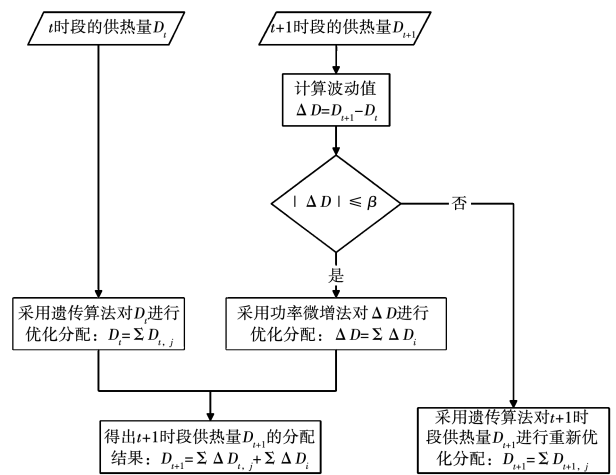


图3 两级优化调度法流程图

Fig. 3 Flowchart of two-level optimal scheduling strategy

该方法首先利用遗传算法对 t 时段的用户供热需求量 D_t 进行优化分配,得到 t 时段的分配结果为 $D_t = \sum D_{t,j}$ 。当 $t+1$ 时段即下一时段的用户供热需求量变化为 D_{t+1} 时,利用功率微增法对两时段间的波动量 ΔD 进行再分配,从而得到 ΔD 分配结果为 $\Delta D = \sum \Delta D_i$ 。综合后可得到 $t+1$ 时段的分配结果为 $D_{t+1} = \sum D_{t,j} + \sum \Delta D_i$ 。上述分配结果中, $D_{t,j}$ 表示 t 时刻 j 号机组的热负荷, ΔD_i 表示 i 号机组的热负荷波动量。

值得注意的是,采用两级优化调度法进行负荷优化分配时,存在波动量阈值 β 。不同的阈值选择对优化调度结果会产生一定影响。当波动量超过阈值 β 时,若仍然采用两级优化调度法进行优化分配,则无法同时兼顾目标最优与可操作性。为保证目标最优,选择利用遗传算法对当前时段的供热量重新优化分配。因此,合理的选择阈值 β 在一定程度上会影响到两级优化调度法的可行性。

3 优化结果及分析

为了在不同供热需求下对各机组进行快速且合理的最优分配,可将不同供热需求下各机组的最优分配解绘制成图,并将优化结果进行对比。当负荷产生变动时,通过对比最优分配量及优化结果进行分配,以实现机组的最优运行。

3.1 功率微增法与遗传算法

通过对机组的供热曲线进行拟合,并对拟合曲线进行微分,可得到各机组的功率微增率函数 $\varphi = (D_{gi})$ 。机组的供热拟合函数和功率微增函数为:

$$N_i = f(D_{gi}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial D_{gi}} = \frac{\partial [f(D_{gi})]}{\partial D_{gi}} = \varphi(D_{gi}) \quad (4)$$

利用各机组的功率微增曲线和供热曲线,采用功率微增法和遗传算法分别对机组进行负荷优化调度。功率微增法和遗传算法的负荷分配如图 4 ~ 图 5 所示。

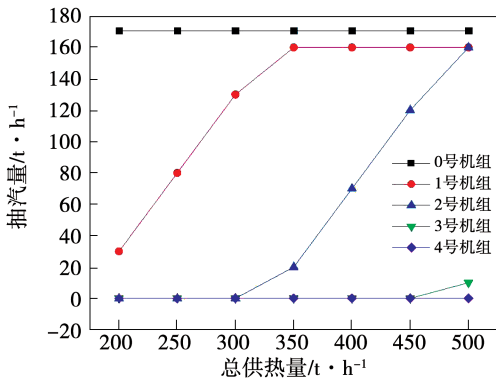


图 4 采用功率微增法后机组的负荷最优分配图

Fig. 4 Optimal load dispatch diagram of power micro increase rate method

对比图 4 和图 5 的可知,两种优化分配方案中,抽汽供热机组的分配结果不尽相同,而背压机组的供热蒸汽量始终保持不变。这是由于背压机组的供热和发电存在强烈的耦合特性,发电量随供热量的变化基本上按线性比例增减。不同于抽汽供热机组,当背压机组的供热蒸汽量增加时,机组的发电量也随之增加。因此,在进行负荷分配时,为实现发电量最大,背压机组优先带满负荷。

为了比较两种优化方法的优化效果,将两种优化方法在不同热负荷下的优化结果进行对比。不同

供热量下两种优化方法最大发电功率对比情况如图 6 所示。

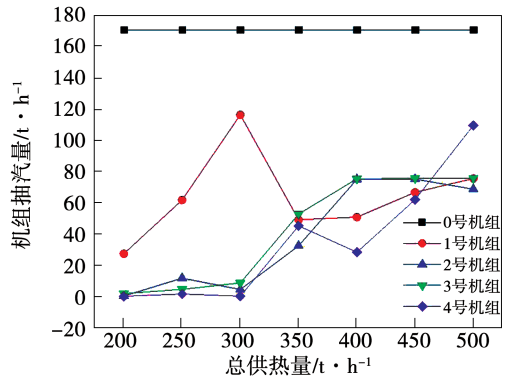


图 5 采用遗传算法后机组的负荷最优分配图

Fig. 5 Optimal load dispatch diagram of genetic algorithm

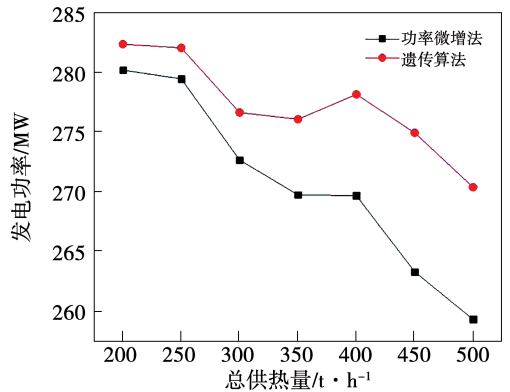


图 6 在不同供热量下两种优化方法最大发电功率对比
Fig. 6 Comparison of maximum generated power between two optimization methods at different heating loads

由图 6 可知,在不同总供热需求下,遗传算法会优于功率微增法,随着供热总量的增大,遗传算法的优势越发明。当供热负荷达到 500 t/h 时,遗传算法较功率微增法提高了 4.26% 的发电量,提升量达到最大。

3.2 两级优化调度法

3.2.1 优化结果分析

为分析两级优化调度法的有效性,以某时段供热量为 475 t/h,下一时段波动量为 ± 25 t/h 为例,分别采用 3 种不同优化分配方案(即单独采用功率微增法、单独采用遗传算法、两级优化调度法)进行优化分配,并将 3 种不同的优化方案的优化结果进行对比分析。其中,两级优化调度法的阈值取为 25 t/h,其优化结果如表 1 所示。

表 1 供热量 475 t/h, 波动量 ± 25 t/h 时负荷分配对比Tab. 1 Comparison of load distribution when heating load is 475 t/h and fluctuation is ± 25 t/h

参数	机组	-25 t/h				+25 t/h			
		功率微增法	遗传算法	两级优化		功率微增法	遗传算法	两级优化	
				供热量	波动量			供热量	波动量
供热抽汽量/ $t \cdot h^{-1}$	0 号	170.7	170.7	170.7	0	170.7	170.7	170.7	0
	1 号	160	66.6	75.4	0	160	75.5	75.4	25
	2 号	119.3	75.1	75.5	0	160	68.6	75.5	0
	3 号	0	75.6	75.4	0	9.3	75.6	75.4	0
	4 号	0	61.9	77.9	-25	0	109.5	77.9	0

表 1 数据表示当供热量为 475 t/h, 波动量为 ± 25 t/h 时, 分别采用功率微增法、遗传算法和两级优化调度法后的各台机组负荷分配情况。在供热量为 475 t/h, 波动量为 25 t/h 时, 系统采用功率微增法的总发电量为 265.82 MW, 采用遗传算法的总发电量为 276.54 MW, 采用两级优化调度法的总发电量为 275.95 MW; 在供热量为 475 t/h, 波动量为 -25 t/h 时, 系统采用功率微增法的总发电量为 261.65 MW, 采用遗传算法的总发电量为 270.53 MW, 采用两级优化调度法的总发电量为 269.73 MW。

波动量为 25 t/h 时, 遗传算法比功率微增法增加了 4.03% 的发电量, 两级优化调度法比功率微增法增加了 3.81% 的发电量。波动量为 -25 t/h 时, 遗传算法比功率微增法增加了 3.39% 的发电量, 两级优化调度法比功率微增法增加了 3.09% 的发电量。对比可知, 在波动量为 ± 25 t/h 时, 采用两级优化调度法虽然相较于遗传算法的发电量平均减少 0.25% 的发电量, 但仅需调整单台机组。当波动量为 -25 时减少 4 号机供热量, 当波动量为 +25 时增加 1 号机供热量。因此, 从实际可行性而言, 综合采用两级优化调度法的分配方案可保证在最大程度上接近最优值的同时, 操作更为简单, 具有实际可行性。

3.2.2 阈值分析

在两级优化调度法中, 阈值 β 约束是为了保证目标最优的同时, 减少所需调整的机组台套数。阈值 β 决定了系统最高允许调整的机组数量, 即可调整台套数的上限。对不同阈值下机组可调整台套数的上限以及相对于遗传算法优化结果的发电量下降比的分析结果如表 2 所示。

表 2 的结果表明, 阈值越大, 可调整的机组台套数上限就越大。阈值为 75 t/h 时, 波动小于阈值最多需要调整 3 台机组, 而大于阈值后则需要按遗传

算法的优化结果调整所有机组; 而当阈值为 25 t/h 时, 波动小于阈值则仅能调整 1 台机组, 大于阈值后则需要按遗传算法的优化结果调整所有机组。

表 2 不同阈值下系统调整机组台套数上限及发电量下降比

Tab. 2 Upper limit of number needed to be adjusted and power generation reduction ratio by system under different thresholds

阈值 $\beta/t \cdot h^{-1}$	可调整台套数上限	发电量下降比/%
25	1	0.255
50	2	0.154
75	3	0.251

无论阈值如何取, 对于阈值范围内的负荷波动, 采用两级优化调度法均略低于遗传算法的优化结果, 但发电量下降比都不超过 0.3%。由此可知, 当需要在优化过程中保证系统快速调整能力时, 可以通过适当的减小阈值, 降低可调整台套数的上限, 从而减少所需调整机组的台套数。

对于阈值 β 的取值, 不同的系统都不一样, 这取决于系统的类型、优化算法的敏感度、企业对优化目标的精度要求以及现场运行人员能快速调节机组的台数上限等多方面因素。因此, 针对系统采用两级优化法的阈值设置需要综合考虑。

4 结论

针对石化企业以发电量最大为优化目标的母管制热电联产机组进行热负荷优化分配, 以某厂母管制热电联产机组为例, 建立仿真计算模型, 对热负荷分配的优化进行研究, 比较了功率微增法和遗传算法的分配结果, 并针对实际机组中的负荷波动问题, 提出了两级优化调度法, 分析比较得出结论:

(1) 通过对比分析功率微增法和遗传算法的优

化结果可知,相较于功率微增法,遗传算法最大可提升 4.26% 的发电量;

(2) 提出了将遗传算法与功率等微增率相结合的两级优化调度法。该方法与功率微增法相比,在波动量为 25 t/h 时,最大发电量增加了 3.81%;在波动量为 -25 t/h 时,最大发电量增加了 3.09%,虽然与遗传算法相比最大发电量平均减少了 0.25%,但该方法将机组所需调整的台套数由 4 台降为 1 台,对实际运行具有一定价值;

(3) 在两级优化调度法中,阈值的设定直接影响机组最大所需调整的台套数,合理的设定阈值 β 可以有效降低所需调整机组的台套数。对不同类型的系统,其阈值 β 的设定值不尽相同,需综合考虑多方面因素。

参考文献:

- [1] 唐家裕,付林,狄洪发. 不同类型供热机组负荷优化的研究[J]. 东北电力技术,2007(8):10-13.
TANG Jia-yu, FU Lin, DI Hong-fa. Research on load optimization of different types of heating units [J]. Northeast Electric Power Technology, 2007(8):10-13.
- [2] SASHIREKHA A, PASUPULETI J, MOIN N H, et al. Combined heat and power(CHP) economic dispatch solved using Lagrangian relaxation with surrogate subgradient multiplier updates[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1):421-430.
- [3] 吴涛,胡洪华,黄廷辉,等. 炼化企业热电厂热电负荷优化分配研究及应用[J]. 中国电力,2017,50(12):93-97.
WU Tao, HU Hong-hua, HUANG Ting-hui, et al. Research and application of optimal distribution of thermal power load in thermal power plant of refining and chemical enterprises[J]. Electric Power, 2017, 50(12):93-97.
- [4] 许可. 母管制热电机组热力系统建模与负荷优化分配[D]. 杭州:浙江大学,2020.
XU Ke. Thermal system modeling of main-pipeline cogeneration unit and combine heat and power optimized distribution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [5] 黄廷辉,柴胜凯,庞顺,等. 热电联产机组热、电负荷优化分配[J]. 热力发电,2010,39(12):1-4.
HUANG Ting-hui, CHAI Sheng-kai, PANG Shun, et al. Optimization of thermal and electrical load distribution for the co-generation unit[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(12):1-4.
- [6] 王学栋,魏东,孙书耀,等. 不同类型供热机组的电热负荷优化分配和调峰性能[J]. 汽轮机技术,2010,52(5):387-390,328.
WANG Xue-dong, WEI Dong, SUN Shu-yao, et al. Optimizing distribution of heat power load and peak regulation ability of heat supply units with different types [J]. Turbine Technology, 2010, 52(5):387-390,328.
- [7] 王惠杰,范志愿,李鑫鑫. 基于线性规划法和等微增率法的电厂负荷优化分配[J]. 电力科学与工程,2016,32(1):1-5,30.
WANG Hui-jie, FAN Zhi-yuan, LI Xin-xin. Optimal load distribution of power plant based on linear programming and equal micro increase rate method [J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(1):1-5,30.
- [8] 王珊,刘明,严俊杰. 采用粒子群算法的热电厂热电负荷分配优化[J]. 西安交通大学学报,2019,53(9):159-166.
WANG Shan, LIU Ming, YAN Jun-jie. Optimizing heat-power load distribution of thermal power plants base on particle swarm algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9):159-166.
- [9] 郭民臣,樊雪,彭新飞,等. 改进粒子群算法应用于热电联产负荷优化分配[J]. 汽轮机技术,2013,55(3):229-231.
GUO Min-chen, FAN Xue, PENG Xin-fei, et al. Application of improve particle swarm optimization to combine heat and power optimal load dispatch [J]. Turbine Technology, 2013, 55(3):229-231.
- [10] AFZALAN E, JOORABIAN M. Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using epsilon-multi-objective genetic algorithm variable[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 52:55-67.
- [11] NAZARI-HERIS M, MOHAMMADI-IVATLOO B, ASADI S, et al. Large-scale combined heat and power economic dispatch using a novel multi-player harmony search method [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 154:493-504.
- [12] HAGH M T, TEIMOURZADEH S, ALIPOUR M, et al. Improved group search optimization method for solving CHPED in large scale power systems [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80:446-456.
- [13] 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 Chun-tian, 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.
- [14] 赵维兴,林成,孙斌,等. 安全约束条件下综合煤耗最优的节能调度算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9):18-22.
ZHAO Wei-xing, LIN Cheng, SUN Bin, et al. Study on economic dispatch method of the optimal composite coal loss under security constrains [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9):18-22.
- [15] MAHOR A, PRASAD V, RANGNEKAR S. Economic dispatch using particle swarm optimization: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8):2134-2141.
- [16] JAIN N K, NANGIA U, SINGH I. Multiobjective economic load dispatch in 3-D space by genetic algorithm [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 2017, 98(5):495-501.