

国内火电厂热力系统优化运行理论的研究

洪波 杨自奋 钱文华

(上海交通大学)

〔摘要〕 本文阐述了国内火电厂热力系统优化的对象、研究方法及其应用效益,根据研究和实践经验,指出了最优化技术在火电厂的发展趋势和应用前景。

关键词 热力系统 优化运行 理化研究

分类号 TM621

1 前言

前人对火电厂的优化运行已作过大量研究,积累了许多宝贵经验。最初,在循环水系统的管理中使用循环水泵台数的经济调度,在汽轮机并列运行时按微增率曲线分配负荷等,提高了火电厂的运行水平和经济性。近年来随着计算机在国内的普及和数学规划理论在技术开发领域的推广应用,火电厂优化运行的研究前景更为广阔。用数学规划理论对回热参数、机组变压运行时的蒸汽初压及各机组的给水分配、循环水分配、电热负荷分配、补水量分配等,进行优化分析,可以在考虑各种具体因素的条件下寻找最优方案,借助计算机可使优化方法的实现既准确又方便。许多优化方法应用于工程实际中,结果表明,带来了显著经济效益。例如,在9台给水泵间进行经济调度,一未按经济调度时期相比,年节约约821万千瓦·时;在北方大型火电厂机组间进行最佳电负荷分配,每年可节约标准煤近万吨;在大中型机组上进行热力参数优化,可使循环热效率提高近0.6%,等

等。

总的来说,火电厂运行优化一般分为两大类:主机优化和辅机优化。它们各自又包括两个方面:一方面是单机优化,即从单机热经济性指标或技术经济性指标达到最优为目标的优化;另一方面是全厂优化,即以包括全厂各机组在内的总的热经济性或技术经济性指标进行优化。

2 单机优化

国内在单机热力系统优化运行方面的研究,迄今为止大致可以分为四类:

2.1 供热方式优化

这方面的优化大多以技术经济性指标最佳为目标进行优化。将一般供热系统的供热方式优化问题概括为有容量约束的多地点、多设备、多产品的工厂布置问题,构造出相应的0-1整数规划模型,用反向跟踪分支界限算法求解,并对优化模型中涉及的热源费用和供热管网费用的计算方法,也已经作出了

一 收稿日期 1995 03 08 收修改稿 1995 06 05

具体深入的研究。实践证明,对供热方式进行优化可使供热机组的煤耗率下降1%左右,如果是中间再热式供热机组,则经济效益更加显著。

2.2 给水回热优化

在这方面,从热经济性的角度和技术经济性的角度都作了比较深入的研究,采用的方法也多种多样,大致可分为:

2.2.1 早期的优化方法

早期得到广泛应用的有等焓升法、等温升法、几何级数法及针对再热机组的“中间点”法。它们都以对多元函数求导、求极值的方法为基础,由于条件限制,不得不对热力系统作各种简化,例如,假设是混合式加热器、不考虑汽机各段的热效率变化等,而且由于受汽机分级的限制,实际上只能在理论最佳点附近选择抽汽点,最后通过方案比较选择最佳方案。显然,对于现代大功率机组复杂的热力系统,上述方法受到一定的限制。

2.2.2 矩阵多面体法

该法以常规热平衡法为基础,考虑了热力系统的具体特点和各种实际因素,将各加热器的热平衡和质平衡方程组成的方程组化为矩阵方程,在计算机中很快求解,从而得出电厂热经济性指标,经一系列推算,建立起目标函数与自变量的关系,根据机组特点建立约束条件,利用正多面体优化方法进行计算,即可确定最佳回热参数。例如,个别研究者^[1]采用该方法,对超临界压力600 MW机组热力系统进行优化分析,计算结果表明,该方法可确定回热系统的最佳参数,机组循环热效率可从原设计值的47.49%提高到48.003%。但是该方法的局限性是无法解决最佳抽汽点受汽机分级的限制而难以实现的问题,最终仍需通过方案比较选择最佳方案。

2.2.3 动态规划法

利用动态规划原理来求得给水回热系统的最优法。特别是鉴于最优抽汽点受汽机分

级的限制可能难以实现的问题,还可应用离散化动态规划法一次求得最优解,而不必象以往那样通过方案比较来寻找比较理想的方案。例如,在宣威发电厂热力系统运行优化中^[2],利用该法优化计算得出,将5号机组的原主蒸汽汽源改用二段抽汽,将4号机组改用一段抽汽,煤耗下降值分别是0.5 g/(kW·h)和0.44 g/(kW·h),年节约标准煤174.01 t和269.83 t。

2.3 余热动力回收的优化

这方面也采用正多面体法。以回收余热流体显热的动力系统为对象,取年利润为目标函数,余热流体换热过程的节点温差、凝汽器换热过程的节点温差等为最优设计变量,建立起优化模型,用正多面体法求最优方案。

2.4 热电联产优化

这方面优化可分为两类:

2.4.1 热化系数优化

比较先进的方法大多是从技术指标出发,以单位热负荷的节煤费用、单位热负荷所节约的年计算费用及追加投资费回收期为目标函数,建立多目标优化规划,用直接寻优的黄金分割法进行优化计算。

2.4.2 热电联产系统多目标优化规划

这是建立在现代多目标定量决策技术——多目标规划技术基础上的优化方法,它可以建立热电联产系统多目标规划数学模型,其中包括单位节能量投资、投资回收年限、单位热负荷节能量等目标,对各目标均可进行定量分析计算,并由此求得最优方案,克服了传统单目标规划法应用于热电工程方案规划的各种局限性。一些研究者已对该优化规划建立了通用数学模型,并编制了通用软件^[3],用此模型对北京宋家庄备选热电厂及方庄小区集中供热方案进行了实例计算分析,表明该方法在热电规划中是实用的、有效的。

3 全厂优化

国内全厂热力系统优化运行方面的研究,迄今为止大致可以分为三类:

3.1 主机负荷最佳分配

这方面的研究主要有三类:

3.1.1 等微增率法

该方法建立在古典变分原理基础上,简单易懂,便于使用,是目前电厂实际电负荷经济调度的主要方法。但该方法存在不少缺点:

a. 从数学规划理论角度来看,其寻优方法比较陈旧、落后;

b. 必须对煤耗特性曲线作线性的简化处理,由此会带来较大的误差;

c. 对煤耗特性曲线有较苛刻的要求。按等微增率分配机组间的负荷并不一定能使总能耗最小,这要根据各机组的煤耗微增率曲线而定。只有当各机组的煤耗微增率曲线都为连续可微的单调增凸函数时,按等微增率分配的负荷才最经济;否则,结果很可能是最不经济的。

d. 对于并列运行的供热机组作热、电负荷分配时,若各机组的热、电负荷同时变化,则很难用能耗微增率的形式来较为清晰地表达目标函数,从而使它的应用遇到很大的困难。

因此,等微增率法已不适用于进行较为精确的负荷分配优化计算。

3.1.2 线性规划法和动态规划法

建立在优化理论基础上的这两种方法,在负荷调度过程中对机组煤耗特性曲线无任何使用条件限制,随着计算机技术的发展和现代优化理论的日趋完善,其应用日益广泛。

3.1.3 非线性规划法

该方法通常是用来研究机组间的负荷优化调度问题,它是根据电厂提供的机组热力试

验数据构造一组描述由并列运行机组所组成的系统实际过程的数学模型,并用非线性规划法求得最优方案。求解这种模型的常用非线性规划法是罚函数法(内、外罚函数法或混合罚函数法)。近期个别研究者用 SCDD 法,即综合函数复合下降法^[2],进行求解,取得了较满意的结果,例如,对上海吴泾热电厂老厂进行负荷的优化分配^[2],在全厂负荷为 200 MW 时,年节约标准煤 27412 t。利用 SCDD 法进行优化求解,在求解速度上一般要快于罚函数法,上例中的寻优时间差值为 6.08 分;且它能克服罚函数法的缺陷:最优解在变量边界附近容易使寻优陷入死循环。

3.2 给水系统优化

在这方面,从热经济性角度作了一定的研究。以热经济性指标出发的优化方法,虽然形式不同,但基本原理大致相同,都可归结为:对应一定系统的内外部条件,或保持发电煤耗不变,以供电煤耗为目标函数;或保持汽机耗汽量不变,以机组发电量和给水系统耗电量差额为目标函数。约束条件则考虑投入运行的给水泵台数、容量对给水量限制及给水泵系统水力特性对给水量的限制而定。另外还应考虑给水泵的结构参数、给水参数、运行方式等该系统的内部因素,当时当地的电价、水价等外部因素,使得这一优化问题较为复杂。由此建立起优化模型之后,采用的优化方法往往还需最后通过比较方案才能得到比较理想的方案,不能一次性求得最优来解决。近期个别研究者用了动态规划法进行求解,则能一次性求得最优,取得了较满意的结果。例如,在上海吴泾热电厂给水系统并列运行给水泵的优化运行中^[2]采用离散化动态规划法,对给水流量的最优分配、给水泵组的最优组合和给水泵的最优启停次序都能进行优化求解,计算结果表明,在以最小净耗电量作为目标函数求解时,各负荷下年总节电量在 15 000~80 000 kW·h 之间。且利用该法,不

仅一次性求得现在运行方案的最优解,而且能预测未来负荷下的最优方案及经济效益。

3.3 循环水系统优化

在这方面,从热经济性角度作了较深入的研究。其基本原理与给水系统优化类似。优化模型可采用转轴直接搜索可行方向法等优化方法求得最优方案。有些研究者还从理论上证明了每台机组间水量的相互影响因素作用很小,在工程允许的误差范围内可不予考虑^[3],从而简化了优化模型的建立。

上述方法在工程中已得到广泛应用,结果表明,经济效益大大提高。例如,应用于保定热电厂单元制循环水系统的优化运行中^[4],对于3号凝汽式机组,循环水量优化结果表明,净发电增量为110.4 kW,经济效益为1200元/小时。值得注意的是,在建立循环水系统优化模型的过程中,要用到放多有关数据、图线资料,如背压与出力、背压与末级余速损失的关系曲线等,而实际运行厂家大多不具备所有可能出现的负荷、参数状态下的这类资料,这就给实现微机的线监测、调度循环水量,以满足现代大机组优化运行的需要造成了困难。因此,如何根据固定的循环水系统数据,计算出随运行情况而变的、相关的数据、图线,实现在线调度循环水量,有待更深入的研究。

而从技术经济指标出发的研究,主要用于电站热力系统的“冷端”的最优化设计。

3.4 补水最佳分配

在按母管制运行的电厂中,这是一个重要课题。一般以全厂煤耗量为目标函数,根据全厂补水系统具体特点建立约束条件,并用单纯形法等优化方法求得最优方案。例如,对于保定热电厂全厂7台机组补水量的优化分配^[5],结果表明,年节约标准煤26950 t(年运行7000小时计算)。

实际应用中,将化学补水打入冷凝器,并在其中增设一套装置,该装置可提供补水在

各机组间的最优分配方案,同时使排汽迅速冷却,提高了真空。该装置经云南、河南、天津等地的中、小型电厂的运行实践证明,经济效益显著,运行可靠,可使煤耗率下降1~4 g/(kW·h)。

4 趋势与前景

国内在火电厂优化运行方面的研究已越来越广泛和深入,尤其是近十多年来,在研究电厂热力系统及设备最优化设计、最优控制管理的理论方法取得了很大成就,在推广应用创实际效益方面也有一定成绩。但是要想使最优化技术在实际应用中取得更大的效益,还须解决一个不容忽视的问题,即如何处理实际中存在的不确定因素,以使实际中采用最优化方法得到的系统决策方案或各决策参数达到真正最优。

当前的最优化技术多数情况下只适用于确定性最优化问题,即建立最优化模型的所有原始信息数据为已知,都在研究期内不随时间而变。然而实际中存在许多不确定因素,主要有燃料及能耗价格,设备制造、安装和运行费用,金属材料强度和单价,设备的性能指标等等。由于从对电厂热力系统及设备进行最优化设计、制造、安装,一直到整个系统运行需要很长周期,这期间很多因素都在发生变化,而且在以后更长的时间内还会不断地变化,即使在当前,也有一些原始信息数据不能准确掌握。因此,采用确定性最优化技术得到的优化方案(优化参数)与实际状况将产生一定的偏差。

为了解决这类问题,先后有专家判断法、敏感性分析法和风险决策法等。而最为有效的是应用灰色系统理论的灰色线性规划方法,它可以处理因素随时间变化、因素为灰色量等问题,在对火电厂规划、设计、安装和运

行各过程中的部分未知信息作出较准确的预测判断的基础上,得到最优化设计、控制、管理方案。可以预见,在火电厂热力系统优化运行中应用灰色系统理论,将有广阔的前景。

总之,最优化技术应用于火电厂优化运行,正在给电厂带来日益增长的经济效益。继续深入研究,完善并发展最优化技术在现有领域的应用,并推广应用到更广的领域,将是一个很有意义的重要课题。

参 考 文 献

- 1 高等学校热能动力类专业教学委员会,《高等学校热能发电厂论文选集》,1991
- 2 洪波,《火力发电厂运行优化理论及软件研究》,上海交

通大学硕士学位论文,1995

- 3 魏文华,《火力发电机组运行优化理论及软件研究》,西安交通大学硕士学位论文,1994
- 4 郭丙然,《最优化技术在电厂热力系统中的应用》,水利电力出版社,1986
- 5 林万超等,《火电厂热力系统节能研究成果选编》,西安交通大学能源系动力系统工程研究室,1993
- 6 沈幼庭等,《热力系统及设备最优化》,机械工业出版社,1985
- 7 张可村,《工程优化的算法与分析》,西安交通大学出版社,1988
- 8 西安交通大学热能教研室动力系统工程研究室,保定热电厂,《保定热电厂运行方式优化研究报告》,1993
- 9 上海交通大学热力发电厂教研室,吴泾热电厂,《吴泾热电厂运行方式优化研究报告》,1994

(李乡复 编辑)

作者简介:洪波,男,26岁。主要从事电厂优化运行,燃气轮机轴、动态性能及仿真技术,气动噪声等方面的研究应用工作。现在上海交通大学动力机械工程系攻读博士学位。(200030,上海交通大学 95BA1信箱)

供“Seajet 250”渡船用的燃气轮机动力装置

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》1995年4月号报道,挪威奥斯陆 Kvaerner Energy 公司船舶动力装置分部最近宣布收到了 LM1600 燃气轮机动力装置箱装体的订单,用来驱动丹麦 Mols-Linien 订购并由丹麦造船厂 Danyard 建造的两艘“Seajet 250”渡船。每艘旅客/汽车渡船将由总输出功率为 24.8MW 的两台 LM1600 燃机驱动。

伴随着最新的订单,在过去约 12 个月时间内 Kvaerner Energy (KE) 已经到手了 20 台船舶燃机动力装置箱装体的订单。其中一些箱装体用于瑞典 Stena AB 航运公司从 Finnyards 订购的 3 艘 124m 长高速旅客/货物渡船。每艘船的 GE/KE 推进系统包括两台 LM1600 和两台 LM2500 燃机,提供 60MW 总功率和 42 节的最大航速。被订购的一些箱装体用于 Kvaerner and Fjelstr 船厂为香港远东水翼艇公司建造的两艘 Foilcat。每艘 Foilcat 由总功率为 8.8MW 的两台 LM500 燃机驱动。

两艘 71m 长的 Seajet 计划于 1996 年春天交货。它们将在丹麦的 Jutland 和 Sjælland 之间航行,将使航行时间从 1 小时 45 分钟缩短为 45 分钟。

来自两台 GE/KE LM1600 燃机箱装体的 24.8MW 功率预期提供 43.6 节的全负荷航行速度,燃料消耗为 5.5t/h。该渡船的运载能力为 450 名旅客和 120 辆汽车。

(学牛 供稿)

国内外燃煤增压流化床联合循环发电技术的现状与前景 = The Present Status and Development Prospects of Coal-Fired Pressurized Fluidized Bed-Based Combined Cycle Power Generation Technology Both at Home and Abroad [刊, 中]/ Xu Hongsheng, Zhong Shiming (Thermal Power Engineering Design Institute of Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -343~348

There exist many kinds of coal-fired combined cycle power generation plants with their respective outstanding features and development prospects. Among them the integrated coal gasification combined cycle (IGCC) and pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) have been considered as the most likely candidates to take the place of the traditional coal-fired power generation plants from the end of this century up to the next century. This paper gives a brief description of the present status and development prospects of the PFBC-CC technology which has at the moment seen relatively intensive development. Also presented is a review of the current research conducted in this field by Chinese engineers and the practical significance to China of developing the said technology. Key words: pressurized fluidized bed, gas/steam combined cycle, power station under intermediate test

国内火电厂热力系统优化运行理论的研究 = A Study of Thermal System Optimum Operation in Domestic Thermal Power Plant [刊, 中]/ Hong Bo, Yang Zifen, Qian Wenhuan (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -349~353

This paper summarizes optimum objects and methods of thermal system of domestic thermal power plant. According to the research and practice experience, it indicates developmental trends and application prospects of optimization technology in thermal power plant. Key words: Thermal System, Optimum Operation, Definite Optimization

稳燃腔煤粉燃烧器对煤粉燃烧稳定和强化的研究 = A Study of the Pulverized Coal Combustion Stabilization and Intensification Role Played by a Combustion Stabilization Cavity Pulverized Coal Burner [刊, 中]/ Qiu Jihua, Chen Gang, Zhang Zhiguo, Li Fujin (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -354~358

From both the theoretical and experimental viewpoints of pulverized coal combustion stabilization and intensification an analysis has been conducted of the role of the said stabilization and intensification played by a combustion cavity pulverized coal burner. In addition, the results of a laboratory study and practical engineering applications are also presented. Key words: combustion, pulverized coal, burner

某船用锅炉联箱在复杂换热条件下的瞬态温度场有限元分析 = The Finite Element Analysis of Transient Temperature Field of a Marine Boiler Header Under Complicated Heat Transfer Conditions [刊, 中]/ Yang Zichun, Huang Yuying (Central China University of Science & Technology), Hu Deming (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -359~365

By the use of the basic theory of transient temperature fields and non-linear finite element method a reverse calculation has been successfully conducted of the convection heat transfer coefficient of a marine main boiler header under complicated heat transfer conditions. On this basis a nonlinear finite element analysis of the boiler header three-dimensional temperature distribution has been performed with a colored three-dimensional temperature profile being plotted. Key words: Water/steam header, convection heat transfer coefficient, non-linear finite element method

气液两相流流经突缩再突扩管道的压力降研究 = Investigation of Pressure Drop of a Gas/Liquid Dual-Phase Flow During its Passage through an Abrupt Convergent and an Abrupt Divergent Piping [刊, 中]/ Wu Dongyin (Thermal Engineering Academy of the Ministry of Electric Power), Lin Zonghu (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -366~370