

基于免疫粒子群的调峰炉热力站优化调度

邓盛川, 于德亮, 齐维贵

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 为了实现供热节能,对调峰炉热力站进行优化调度.首先结合供热能耗最小和运行费用最小两种调度模型,建立一种综合节能最优的调度模型,该模型可适应不同调峰模式下的供热需要.然后将免疫粒子群算法(Immune particle swarm optimization,IPSO)应用于优化调度的寻优计算,采用免疫算法,对粒子群算法(PSO)进行改进,避免了粒子群算法中存在的算法早熟、容易陷入局部极值等问题,能更准确快速地求解出优化调度结果.通过实例验证了该算法的优越性,计算结果表明调峰炉热力站的优化调度达到了节能的目的.

关键词: 优化调度;免疫粒子群;调峰炉热力站;供热节能

中图分类号: TP921.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0089-04

Optimal dispatching research of heating station with peak-shaving boiler based on immune particle swarm

DENG Sheng-chuan, YU De-liang, QI Wei-gui

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: To achieve energy-saving, optimal dispatching of heat load in heating station with peak-shaving boiler is necessary. First, a dispatch model of integrated optimal energy-saving was built on the combination with the minimum heat energy consumption model and minimum operation cost model, this model can applicable to different heating mode. Then, a immune particle swarm algorithm(IPSO) was used to solve optimal dispatching problems, compared with PSO, this algorithm is not easy to fall into Premature and local extremum, the convergence speed is faster than PSO. An experiment results show the advantages of IPSO, optimal dispatching of heating station with peak-shaving boiler can achieve energy-saving.

Key words: optimal dispatching; immune particle swarm; heating station with peak-shaving boiler; heat energy saving.

目前的供热系统热能利用效率低,浪费严重,如何有效降低热能耗,是供热领域最为重要的一个问题^[1].在众多的节能方法中,优化调度不需要对现有的热力系统作大的改造,就可以达到降低能耗的目的.优化调度需要对供热系统的负荷和工况进行分析,采取不同的优化理论,以获取最佳的负荷和资源分配策略,使整个供热系统运行

在最优工况下.

在热力系统中,优化调度研究已有较大的发展,多种方法应用于优化调度中.如 Sonntag 等^[2]结合非线性规划方法和进化算法解决了化工厂蒸汽系统调度的最佳启停控制和优化问题.吕泽华等^[3]采用了两级优化原则,分别以锅炉总供汽量最小和锅炉总燃料消耗量最低为目标对热电厂的热力系统进行优化调度.许红胜等^[4]建立了以供热管网投资、运行费用为目标函数的优化数学模型.而基于智能算法的优化调度也有较多的研究,如文献[5]对3个电力系统中的火力发电机组采用混沌蚁群算法进行经济优化调度.文献[6]在

收稿日期: 2012-04-16.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAJ01A04);

黑龙江省自然科学基金项目(E201116).

作者简介: 邓盛川(1982—),男,博士研究生;

齐维贵(1944—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 齐维贵, Qwg1944@sina.com.

热电厂中采用改进的粒子群算法处理经济负荷调度和环境因素问题. 但热力站供热节能的研究多集中分户调节和按需供热方面, 目前还缺乏针对热力站优化调度的相关研究.

本文针对调峰炉热力站进行优化调度, 将综合能耗性和经济性这两个方面, 给出优化调度模型, 在优化调度计算中采用免疫粒子群算法, 通过调度给出调峰炉热力站节能监控信号, 即最后通过实例验证优化调度方法的节能效果.

1 调峰炉热力站优化调度模型

在调峰炉热力站中, 结合能耗最小和运行费用最少, 使建立的优化调度模型达到综合能耗最小.

1.1 优化调度模型

调峰炉热力站的优化调度模型的目标函数和约束条件分别为

$$\begin{aligned} E_w &= J_1 \times (T_{g1} - T_{h1}) \times G_1 + \\ &J_2 \times (T_{h2} - T_{h2}) \times G_b / \eta_b + J_3 n G_p. \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} G_1 \leq G_{1\max}, \\ G_H \leq G_{z2} \leq G_{p\max}, \\ G_{z2} = n G_p = G_2 + G_b, \\ K_{\min} \leq K_b, \\ Q_{ex} = K_b A \Delta t_m = (T_{g1} - T_{h1}) \times c \times G_1 = \\ \quad (T_{ex} - T_{h2}) \times c \times G_2, \\ Q_{out} = Q_{ex} + Q_b. \end{cases} \quad (2)$$

式中: J_1, J_2, J_3 分别为各项常系数; E_w 为优化调度综合能耗; T_{g1}, T_{h1} 分别为热力站一级网供水温度和回水温度; T_{ex}, T_{h2} 分别为热力站板式换热器出水温度和二级网回水温度; G_1 为热力站一级网流量; G_b 为热力站二级网燃油锅炉供水流量; η_b 为燃油锅炉总的燃烧热效率; n 为循环水泵运行台数; G_p 为循环水泵流量, c 为水的比热容. 一级网流量 G_1 受最大值 $G_{1\max}$ 的限制; 二级网流量 G_{z2} 受到循环泵最大流量 $G_{p\max}$ 的限制, 受水力可及性的影响, 则要求二级网循环泵最小输出流量为 G_H ; 二级网流量也就是二级网所有循环泵总的流量 $n G_p$, 它将按照一定的比例分配到板式换热器通道 G_2 和锅炉供热通道 G_b ; 为了防止板式换热器冷热侧流量变化导致换热系数过小, 影响换热器的换热效果, 换热器换热系数不能小于 $K_{\min}$; 板式换热器热平衡约束忽略了板式换热器散热损失, 其中 Q_{ex} 为换热器供出热量; 调峰炉热力站二级网能量平衡, 其中 Q_{out} 为二级网总供热量, Q_b 为锅炉供热量.

1.2 调度模型分析

由于供热高峰期和非高峰期时, 对能耗支出和运行费用的侧重有所不同, 因此有

$$E_w = \min(\lambda_1 E_E + \lambda_2 E_C). \quad (3)$$

其中: λ_1, λ_2 分别为能耗支出权重系数和运行费用权重系数, 该系数由工程经验和工艺条件确定, $\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_1 + \lambda_2 = 1$; E_E 为供热能耗; E_C 为运行费用消耗.

$$E_E = \min(E_1 + E_2 + E_3). \quad (4)$$

其中: E_1 为热网供热负荷燃料能耗, E_2 为热力站锅炉供热负荷燃料能耗, E_3 为热力站二级网循环水泵电耗.

$$E_1 = (T_{g1} - T_{h1}) \times G_1 \times c \times k_1. \quad (5)$$

$$E_2 = (T_{h2} - T_{h2}) \times G_b \times c \times \frac{1.43}{k_{oil} \eta_b}. \quad (6)$$

其中: k_1 为热电厂标准煤耗率, k_{oil} 为取燃油的低位发热值, η_b 为燃油锅炉总的燃烧热效率.

E_3 的计算为热力站循环水泵电耗和锅炉运行电耗, 单台循环水泵电耗为

$$E_{pi} = 2.78 \times 10^{-4} \frac{G_p H}{\rho \eta_p} n_0. \quad (7)$$

其中: E_{pi} 为水泵耗电量, G_p 为循环水泵流量, H 为循环水泵扬程, n_0 为循环水泵运行时间, η_p 为水泵运行效率, ρ 为水的密度.

热力站总的电耗折算为标煤计算式为

$$E_3 = \sum_{i=1}^n E_{pi} \times k_e. \quad (8)$$

其中: n 为水泵台数, k_e 为折算系数.

$$E_C = \min\left(E_1 + \frac{E_2 k_b k_c}{1.43} + \frac{E_3 k_E k_c}{k_e}\right). \quad (9)$$

式中: k_C 为标煤价格, k_b 为燃油的价格, k_E 为电的价格.

将式(4)、(9)代入式(3), 采用 n 台同型号、同工况的水泵, 有

$$\begin{aligned} E &= \lambda_1 E_E + \lambda_2 E_C = (T_{g1} - T_{h1}) \times \\ &G_1 \times c \times k_1 (\lambda_1 + \lambda_2) + [(T_{h2} - T_{h2}) \times \\ &G_b \times \frac{c}{k_{oil} \eta_b} (1.43 \lambda_1 + \lambda_2 k_b k_C) + n \times \\ &2.78 \times 10^{-4} \frac{G_p H}{\rho \eta_p} n_0 (\lambda_1 k_e + \lambda_2 k_E k_C)]. \end{aligned}$$

$$\text{令 } J_1 = c \times k_1 \times (\lambda_1 + \lambda_2),$$

$$J_2 = c \times (1.43 \lambda_1 + \lambda_2 k_b k_C) / k_{oil},$$

$$J_3 = 2.78 \times 10^{-4} \frac{H}{\rho \eta_p} n_0 \times (\lambda_1 k_e + \lambda_2 k_E k_C).$$

则可获得式(1)所示目标函数, 该式需求解1个二维解(Q_b, G_b), 即分别为锅炉供热量和二级网锅炉供热通道流量. 该优化调度模型, 兼顾了供

热能耗和运行费用。

2 免疫粒子群算法

本文采用免疫的原理,对基本粒子群法进行改进,并将其用于调峰炉热力站优化调度的寻优计算。

2.1 粒子群算法

若 D 维空间中有 m 个粒子,第 i 个粒子的位置为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,速度为 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$,该粒子飞行过的最佳位置为 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$,整个粒子群飞行过的最佳位置为全局极值 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$. 粒子在飞行中根据这两个极值,在位置变换时来调整自己的飞行速度,获得新的位置^[7]. 粒子 i 的位移长度和方向变化分别表示为

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1); \quad (10)$$

$$v_{id}(k+1) = v_{id}(k) + C_1 R_1 (p_{id} - x_{id}) + C_2 R_2 (p_{gd} - x_{id}). \quad (11)$$

式中: C_1 、 C_2 为正常数学习因子, R_1 、 R_2 为 $[0, 1]$ 的随机数, k 为迭代次数, d 为维度空间, $d = 1, 2, \dots, D$.

2.2 免疫粒子群算法

PSO 算法在运行一段时间后,种群的多样性变差,算法常常早熟收敛而陷入局部极值. 为了保持粒子群的多样性,将免疫思想加进粒子群算法. 用 IPSO 算法的抗原代表需求解的问题,抗体代表问题的解,每个抗体也等同粒子群中的 1 个粒子. 用适应度来衡量抗原与抗体的亲和度 $\text{aff}(X_i)$,即目标函数和约束条件的满足程度;抗体之间的亲和度则反映粒子群的多样性,即粒子之间的差异^[8-10]. 与同标准 PSO 算法相比,IPSO 算法不同点主要表现为两点:一是保证种群的多样性,主要是利用免疫记忆与自我调节机制,抑制浓度过高的抗体;二是具有很强的全局搜索能力,主要通过变异和种群刷新,不断地产生新的个体,探索尽可能多的可行解区域.

以 $\text{div}(k)$ 来衡量群体的多样性,有

$$\text{div}(k) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M [X_i(k) - P_b(k)]^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M [X_i(0) - P_b(0)]^2}}. \quad (12)$$

如果 $\text{div}(k)$ 小于预先给定的值 ξ ,则表明此时种群的多样性较差,需要进行免疫调节来增强种群的多样性,操作如下:新生代 M 个粒子,在此基础上,随机生成 N 个满足约束条件的新粒子,通过各粒子的适应度值计算其粒子浓度,并获取这

$M + N$ 个粒子在该粒子浓度时的选择概率. 粒子的浓度及低浓度粒子的概率分别为

$$H(X_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{M+N} |f(X_i) - f(X_j)|}; \quad (13)$$

$$P_1(X_i) = \frac{H(X_i)}{\sum_{j=1}^{M+N} H(X_j)} = \frac{\sum_{j=1}^{M+N} |f(X_i) - f(X_j)|}{\sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} |f(X_i) - f(X_j)|}. \quad (14)$$

其中: X_i 为第 i 个粒子(抗体), $i = 1, 2, \dots, (M + N)$, $f(X_i)$ 为其适应度函数值(亲和度 $\text{aff}(X_i)$). 通过概率选择公式可知,相似抗体 i 的抗体越多,则抗体 i 的选中概率越小;相似抗体越少选中概率越大.

为了同时保证保留高亲和度抗体和确保低亲和度抗体的进化可能,使种群具有较强的局部搜索能力同时也使得抗体具有多样性,对 $M + N$ 抗体进行抗体选择,其概率计算公式为

$$P_2(X_i) = \text{aff}(X_i) \cdot e^{-a \cdot P_1(X_i)}. \quad (15)$$

其中: a 为计算参数, $i = 1, 2, \dots, (M + N)$.

选择 $P_2(X_i)$ 值最大的 M 个抗体进行克隆,每个抗体克隆数为 Q ,为了加强局部搜索能力,对这些抗体进行变异操作,即

$$X'_{i,j,q} = X_{i,j,q} + (C_3 - 0.5) \cdot \beta. \quad (16)$$

其中: $X_{i,j,q}$ 为抗体 X_i 的第 q 个克隆体的第 j 维, C_3 为在 $(0, 1)$ 中的随机参数, β 为给定的领域范围.

选取 Q 个克隆体中亲和度最高的作为最终抗体. 这样就同时兼顾了粒子群的多样性和搜索能力.

2.3 免疫粒子群算法的收敛性

令 L 为待求解的 1 个解的函数,能可保证 L 产生的新解可由于当前解.

令 $\mathbf{F}_{i,t}$ 为粒子 i 代后的支撑集,对于一般进化的粒子,令其支撑集为 α ,免疫后获得的粒子,令其支撑集为 β ,则由于免疫方法的多样性,存在 $t > t_1$ 时, $\beta \supseteq S$, S 为样本空间,因此,对于免疫粒子群,存在着 t_2 ,使得 $t > t_2$ 时, $\alpha \cup \beta \supseteq S$. 因此对于 S 的 borel 子集 C ,令 $C = \mathbf{F}_{i,t}$,则可得到其测度 $v(A) > 0$,对于测度概率 $\rho_i[A]$,有 $\prod_{i=0}^{\infty} (1 - \rho_i[A]) = 0$.

由关于全局收敛的充要条件的定理,令 $\{P_{g,t}\}_{t=0}^{\infty}$ 为免疫粒子群生成的解序列,满足前述条件时,可得 $\lim P[P_{g,t} \in \mathbf{R}_e] = 1$,其中 $P[P_{g,t} \in \mathbf{R}_e]$ 为第 t 时生成解 $P_{g,t} \in \mathbf{R}_e$ 的概率,因此免疫粒子全算法以概率 1 收敛.

3 调峰炉热力站优化调度实例与分析

3.1 计算实例

根据大庆市某调峰热力站的实际运行情况,进行热力站的优化调度.该调度周期为1 h,热力站调节后达到稳态后的时间为40 min左右,因此每小时调度1次可以满足实时性的要求.供热运行参数如下:时刻为19:00,室外温度为-22℃,经计算需要的总供热负荷为 $Q_{out}=88.74\text{ GJ}$,初始状态时,一级网供水温度 $T_{g1}=97.30\text{ }^{\circ}\text{C}$,回水温度 $T_{h1}=62.90\text{ }^{\circ}\text{C}$,一级网流量 $G_1=398.7\text{ m}^3/\text{h}$,二级网板换供水温度 $T_{g2}=65.60\text{ }^{\circ}\text{C}$,锅炉供水温度 $T_{h2}=70.10\text{ }^{\circ}\text{C}$,回水温度 $T_{h2}=50.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,锅炉供水流量 $416.5\text{ m}^3/\text{h}$,二级网总的流量 $G_{22}=1\,452.5\text{ m}^3/\text{h}$,一级网设计流量 $G_1'=596.6\text{ m}^3/\text{h}$,二级网板式换热器出口设计流量 $G_2'=1\,500\text{ m}^3/\text{h}$.最小扬程所需的供水流量 $G_{22}\geq 1\,200\text{ m}^3/\text{h}$,二级网循环水泵的最大供水流量 $G_{22}\leq 1\,600\text{ m}^3/\text{h}$.燃油每元2.10 kg,标准煤每元0.80 kg.

锅炉的供热热效率受到其燃油化油炉的影响,其效率 η_b 的计算式为

$$\eta_b = \begin{cases} 0.6, & Q_b \leq 50\text{ GJ}; \\ 0.6 - \frac{1}{16\,000}Q_b^2, & Q_b > 50\text{ GJ}. \end{cases} \quad (17)$$

采用免疫粒子群算法用于调峰炉热力站的优化调度计算,粒子的适应值即最小的综合能耗 E_w ,需求解的粒子包括有锅炉供热量 Q_b 和二级网锅炉供热通道流量 G_b .用粒子的适应值评价粒子飞行位置的优劣,将式(1)作为粒子群的适应度函数.当粒子每到达一个新的位置,依据粒子在多维解空间上的坐标 (x_{i1},x_{i2}) ,可计算粒子在该位置上的最小综合能耗 E_w ,再以此适应值、个体极值 P_i 点,以及全局极值 P_b 之间的差距,动态地调整粒子的飞行速度,使之趋向全局最佳点.

3.2 优化计算结果

采用粒子群和免疫粒子群进行优化调度计

算,其中粒子群的群体规模为 $m=20$,粒子群的惯性因子 $\omega=0.73$,学习因子 $c_1=c_2=1.5$,最大进化代数数为 $k_{max}=200$.

表1和表2中分别给出了采用PSO算法和IPSO算法进行优化调度计算的10次结果.

从表中可以看出,IPSO算法平均经过44次迭代达到全局最优值,而PSO算法平均经过63次的迭代,才能达到全局最优值.调峰炉热力站的调度结果如表3所示.

表 1 基于 PSO 算法的优化调度计算结果

计算次数	锅炉供热量/ GJ	锅炉供热流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	综合能耗/ (kg 标煤)	迭代次数
1	63.42	344.28	2 632.39	63
2	63.35	344.17	2 632.39	65
3	63.36	344.22	2 632.39	62
4	63.39	344.26	2 632.39	67
5	63.31	344.01	2 632.39	66
6	63.27	344.18	2 632.39	62
7	63.28	344.11	2 632.39	61
8	63.34	344.02	2 632.39	65
9	63.26	344.25	2 632.39	63
10	63.20	344.04	2 632.39	64

表 2 基于 IPSO 算法的调度计算结果

计算次数	锅炉供热量/ GJ	锅炉供热流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	综合能耗 (kg 标煤)	迭代次数
1	63.31	344.10	2 632.39	44
2	63.44	344.06	2 632.39	42
3	63.32	344.03	2 632.39	45
4	63.30	344.07	2 632.39	43
5	63.23	344.12	2 632.39	46
6	63.34	344.02	2 632.39	41
7	63.29	344.01	2 632.39	42
8	63.26	344.20	2 632.39	47
9	63.22	344.05	2 632.39	43
10	63.32	344.01	2 632.39	42

表 3 调峰炉热力站的调度

二级网供热 输出负荷/GJ	一级网 供热负荷/GJ	一级网 供热温差/ $^{\circ}\text{C}$	一级网供热流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	锅炉供热 负荷/GJ	锅炉供热流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	二级网 供热温度/ $^{\circ}\text{C}$	二级网水泵输出 流量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
88.74	25.44	43.75	138.45	63.30	344.10	68.34	1 201

经调度后,可确定一级网的供热负荷和锅炉的供热负荷,同时也可确定一级网需调节的流量大小和二级网供热温度及流量,为热力站控制提供了节能监控信号.原热力站运行时每小时标准煤耗为

2 968.17 kg,经过供热负荷预报和优化调度后,每小时标准煤耗为2 632.39 kg,每小时的综合能耗 E_w 相对未进行优化调度前,节约标煤335.78 kg,综合能耗降低了11.31%. (下转第148页)