

文章编号:1008-1534(2020)01-0023-04

换热站二次系统热平衡算法研究

刘 想,赵英宝,刘慧贤,陈新兴

(河北科技大学电气工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:供热系统完成初调节后,某支路热用户会因热量需求改变而发生流量改变,从而影响供热效果。为了满足此热用户的供热需求,又不影响其他热用户的供热需求,根据实际运行数据建立换热站二次管网循环泵电动机的功耗模型,模型的主要约束条件为各支路电动调节阀的开度、各支路水力平衡态,利用遗传算法的寻优能力,通过引入惩罚函数,将约束问题转化为无约束问题,以供热系统上所有支路热用户的供热平衡为最终目标进行寻优仿真。仿真结果表明,在满足所有支路热用户的供热平衡时,确保了循环泵电动机的运行功耗最小,得到了各电动调节阀的开度设置,节约热负荷约 7.6%。所用方法有效地改善了热用户的供热需求,可为进一步深入研究二次网支路热用户的供热平衡提供参考。

关键词:供热工程;热负荷平衡;流量调配;系统建模;遗传算法;绿色供暖

中图分类号:TU833+.1 文献标识码:A doi: 10.7535/hbgykj.2020yx01005

Research on thermal balance algorithm of secondary system in heat exchange station

LIU Xiang, ZHAO Yingbao, LIU Huixian, CHEN Xinxing

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: After the initial adjustment of the heating system, the heat flow of a branch is changed due to the change in heat demand. In order to meet the heating requirement of the hot user, while the heating requirements of other hot users are not affected, according to the actual operation data, the power consumption model of the secondary pipe network circulating pump motor of the heat exchange station is established. The main constraint conditions of the model are the opening degree of each branch electric control valve and the hydraulic balance state of each branch. By introducing a penalty function, the powerful optimization capability by genetic algorithm transforms the constraint problem into an unconstrained problem, and optimizes the heating balance of all the branch heat users on the heating system as the final goal. The simulation results show that the operating power consumption of the circulating pump motor is minimized when the heating balance of all the branch heat users is satisfied, and the opening setting of each electric regulating valve is obtained. The method adopted effectively improves the heating demand of the heat user and saves the heat load by about 7.6%, which can provide a reference for further research on the heat balance of the secondary network branch heat users.

收稿日期:2019-10-10;修回日期:2019-10-30;责任编辑:陈书欣

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2016142)

第一作者简介:刘 想(1991—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事集中供热系统应用方面的研究。

通讯作者:赵英宝副教授。E-mail:1031550622@qq.com

刘想,赵英宝,刘慧贤,等.换热站二次系统热平衡算法研究[J].河北工业科技,2020,37(1):23-26.

LIU Xiang, ZHAO Yingbao, LIU Huixian, et al. Research on thermal balance algorithm of secondary system in heat exchange station[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2020, 37(1): 23-26.

Keywords: heating engineering; heat load balancing; flow deployment; system modeling; genetic algorithm; green heating

集中供热在中国已经发展多年,小区换热站二次管网各支路热用户之间的热负荷调配不平衡问题依旧很突出^[1],当某一支路热用户需求的热量发生变化时,就需要对其所在支路流量进行调配,这势必会引起整个二次管网的流量、压力重新分布^[2],如果不对二次管网流量进行整体调配,各热用户端会出现冷热不均现象,严重影响供暖舒适度和热量的浪费,所以研究换热站二次管网流量的合理调配对于供热平衡及绿色供暖至关重要^[3]。

1 换热站供热过程建模

1.1 循环泵电动机功耗模型建立

二次主管网的压力、流量由循环泵提供,依据循环泵的轴功率^[4]计算公式:

$$N = \frac{\rho g G_p H_p}{3.6 \times 10^6 \times \eta} \quad (1)$$

为了降低计算难度,将电动机的输出功率等同于循环泵的轴功率,即为

$$N \approx P, \quad (2)$$

式中: N 为循环泵的轴功率, kW; P 为电动机输出功率, kW; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; G_p 为循环泵实际流量, m^3/h ; H_p 为循环泵扬程, m; η 为循环泵电动机运行效率。

采用半经验公式^[5]建模法,建立循环泵扬程模型和电动机效率模型为

$$H_p = C_1 + C_2 G_p + C_3 G_p^2, \quad (3)$$

$$\eta = D_1 K_f^2 + D_2 K_G K_f + D_3 K_G^2, \quad (4)$$

式中: C_1, C_2, C_3 分别为循环泵扬程模型参数; D_1, D_2, D_3 为循环泵电动机效率模型参数; K_f 为循环泵电动机实际频率与额定频率的比值; K_G 为循环泵实际流量与额定流量的比值。

上述模型中有 2 组参数需要辨识,利用实际测量运行数据,经最小二乘法^[6]辨识后的循环泵扬程模型参数 $C_1=0.0016, C_2=0.1732, C_3=0.0018$,同理可以求出循环泵电动机效率模型参数为 $D_1=-0.1362, D_2=0.3275, D_3=0.6687$ 。

1.2 电动调节阀开度建模

电动调节阀的阻力系数只与其物理结构和开度有关^[7],通过改变阀门开度,测量支路流量和压差,拟合出阻力特性系数 R_i 与开度关系式:

$$R_i = B_1 + B_2 e^{B_3/\alpha_i}, \quad (5)$$

式中: B_1, B_2, B_3 分别为电动调节阀模型参数,需要

辨识; α_i 为电动调节阀的开度, %, $i=1,2,3$ 。

利用实际测量运行数据,经最小二乘法辨识后的电动调节阀模型参数 $B_1=1.78, B_2=6.23, B_3=123.25$ 。

1.3 水力工况平衡下节能优化模型

以石家庄高新区某小区换热站及 3 栋建筑物为模型基础,建立水力工况平衡下节能优化模型。其中每栋建筑物前安装了电动调节阀,考虑到实际供热系统的复杂性,为了降低理论模型的难度,把每栋建筑物内的所有热用户等同于一个大“热用户”,并忽略一些干扰因素,如管道漏水、管道内壁生锈等,如图 1 所示,优化模型的目标是在管网水力平衡的基础上,保障各支路热用户供热温度,使二次主管网的输出流量最小,也就是循环泵电动机的运行能耗最小。因此,目标函数为

$$\min W(f, G_p) = \min \left[\frac{\rho g G_p (C_1 + C_2 G_p + C_3 G_p^2)}{3.6 \times 10^6 \times (D_1 K_f^2 + D_2 K_G K_f + D_3 K_G^2)} \right] \quad (6)$$

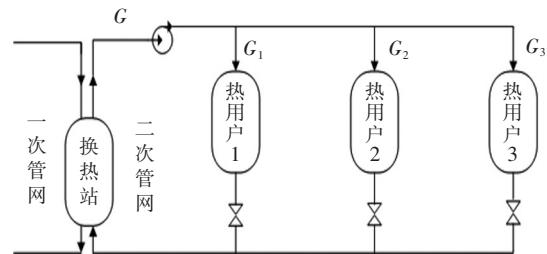


图 1 换热站及 3 个热用户模型简示图

Fig.1 Brief description of heat exchange station and 3 thermal user models

依据二次管网中串联管段和并联管段的阻力特性关系^[8],将图 1 简化成阻力特性系数如图 2 所示。其中 S_{ri} ($i=1,2,3$) 为支路阻抗总和,即热用户阻抗、电动调节阀阻抗、管网阻抗三者之和。

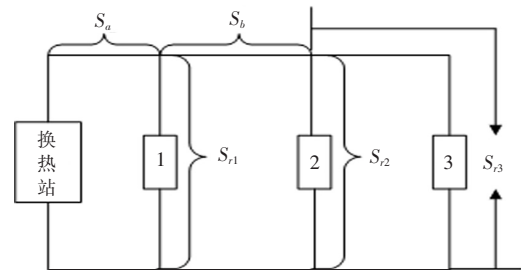


图 2 管网模型阻力特性系数简示图

Fig.2 Pipe network model resistance characteristic coefficient diagram

设二次管网总流量为 G , 总阻抗为 S , 循环泵扬程为 H , 各支路热用户流量为 $G_i, i=1, 2, 3$, 可得热用户的流量和阻力特性系数之间的关系, 则有:

$$G = \sqrt{H/S}。 \quad (7)$$

设 S_1 为包括热用户 1 之后的总阻抗, 则有:

$$G_1 = G \sqrt{S_1/S_{r1}}。 \quad (8)$$

设 S_2 为包括热用户 2 之后的总阻抗, 则有:

$$G_2 = (G - G_1) \sqrt{S_2/S_{r2}}。 \quad (9)$$

热用户 3 的流量为

$$G_3 = (G - G_1 - G_2)。 \quad (10)$$

将电动调节阀开度模型和各管段阻力系数值代入式(8)一式(10), 即可求出各个支路热用户的流量与电动调节阀开度的关系。

依据最优流量调节公式^[9]

$$G_{ih} = G_{iq} \left(\frac{t_n - t_w}{t'_n - t'_w} \right)^{1/3}, \quad (11)$$

式中: G_{iq} 为支路热用户调节前的稳态流量; G_{ih} 为调节后的稳态流量; t_n, t_w 分别为实际室内、室外温度; t'_n, t'_w 分别为设计室内、室外温度。可得支路水力工况平衡约束条件为 $(G_{ih} - G_i)_{\min}, i=1, 2, 3$ 。

2 基于遗传算法流量调配仿真分析

遗传算法^[10]是模拟生物系统的遗传特性所进行的计算机模拟研究。遗传算法是一种效率高、并行兼全局搜索的方法^[11], 其在搜索过程中能根据需要自动获取和积累相关的搜索空间知识, 进而求出最优解, 对于优化求解复杂的非线性和多维空间问题^[12]非常适合。

调节前, 二次主管网的供、回水温度分别为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$, 室内、室外温度分别为 $+18\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-6\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于热用户 2 自身通过调节户内阀门开度, 而使户内流量增加, 导致供热量需求增加 8% 。采用传统调节, 只增加二次主管网的流量, 可以实现热用户 2 的供热量, 但其他 2 个热用户就会出现热量浪费的现象, 如表 1 所示。所以需要进行整体的调配, 找到最佳的各热用户楼前电动调节阀的开度及二次主管网流量。

表 1 热用户流量和热负荷等值

Tab.1 Heat user flow and thermal load equivalents

| 热用户 | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|-------|
| 调节前流量 $G/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | 24 | 16.2 | 20.4 |
| 调节前阀门开度 $\alpha/\%$ | 77.4 | 52.3 | 65.8 |
| 调节前热负荷/kW | 279.2 | 188.5 | 237.3 |
| 传统调节后热负荷/kW | 312.8 | 203.6 | 261.1 |
| 优化调节后热负荷/kW | 281.5 | 203.6 | 237.3 |

二次管网节能优化的目标是以二次管网水力工况平衡为前提, 满足各热用户的供热需求, 使循环泵电动机的运行功耗最小, 则目标函数为

$$\min W_p(f, G) = \min \left[\frac{0.28 \times 10^{-6} \times \rho g G (0.0016 + 0.1732G + 0.0018G^2)}{-0.1875 \left(\frac{f}{50}\right)^2 + 0.2372 \left(\frac{f}{50}\right) \left(\frac{G}{80}\right) + 0.2687 \left(\frac{G}{80}\right)^2} \right]。 \quad (12)$$

约束条件为电动调节阀开度: 上、下限分别为 $30\%, 100\%$; 水力工况平衡态: $(G_{ih} - G_i)_{\min}$, 其中: $G = G_1 + G_2 + G_3$; 循环泵电动机频率上、下限分别为 $28\text{ Hz}, 50\text{ Hz}$ 。

为了将约束非线性规划问题转化为求解一系列无约束非线性规划问题, 构造惩罚函数^[13], 引入惩罚因子, 将约束条件引入目标函数, 使有约束的问题转化为无约束的问题, 建立的惩罚函数为

$$F_p(f, G) = [G_{ih} - G_i]^2 + \{\max[0, (28 - f)]\}^2 + \{\max[0, (f - 50)]\}^2 + \{\max[0, (30 - \alpha_1)]\}^2 + \{\max[0, (\alpha_1 - 100)]\}^2 + \{\max[0, (30 - \alpha_2)]\}^2 + \{\max[0, (\alpha_2 - 100)]\}^2 + \{\max[0, (30 - \alpha_3)]\}^2 + \{\max[0, (\alpha_3 - 100)]\}^2。 \quad (13)$$

无约束的循环泵电动机能耗优化目标函数为

$$\min F(f, G) = \min[W_p(f, G) + F_p(f, G)]。 \quad (14)$$

遗传算法通常用以解决最大值优化问题, 然而本文的目标函数是求最小值, 所以, 引入一个合适大的正数 C_{\max} , 通过与目标函数做差值, 将最小值优化问题转化为最大值优化问题^[14], 适应度函数可以表示为

$$F_{\text{fit}} = \begin{cases} C_{\max} - F(f, G), & \text{if } F(f, G) < C_{\max}, \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (15)$$

遗传算法中的控制参数对遗传算法计算过程的影响十分复杂, 主要包括种群规模的确定、交叉率、变异率等^[15], 为了获得良好的计算结果, 并加快计算速度, 本文设定种群规模为 60, 允许最大进化代数为 240, 变异率和交叉率分别取 0.01 和 0.60, 仿真结果如图 3—图 6 所示。

仿真结果表明, 当种群进化到 220 代时, 得到的最优适应度值为 5.6, 各支路阀门开度分别为 $76.6\%, 56.8\%, 66.3\%$, 其流量分别为 $24.2, 17.5, 20.4\text{ m}^3/\text{h}$, 优化后热负荷如表 1 所示。对比传统调节, 供热系统整体减少了 7.6% 的热量损失, 节约了热量, 实现了供热平衡的合理控制。

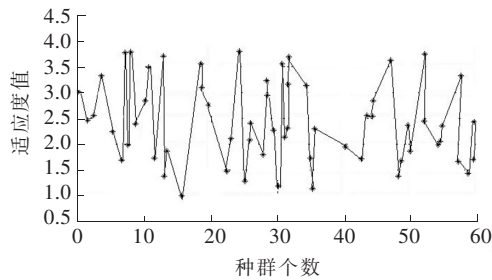


图 3 初始种群的适应度函数值

Fig.3 Fitness function value of the initial population

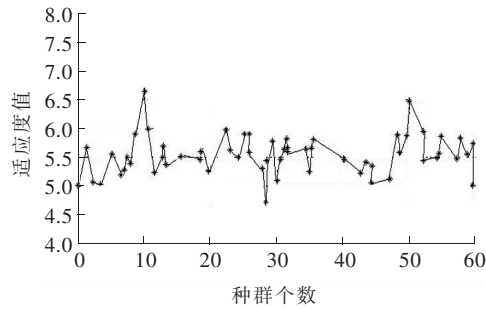


图 4 第 90 代种群的适应度函数值

Fig.4 Fitness function value of the 90th generation population

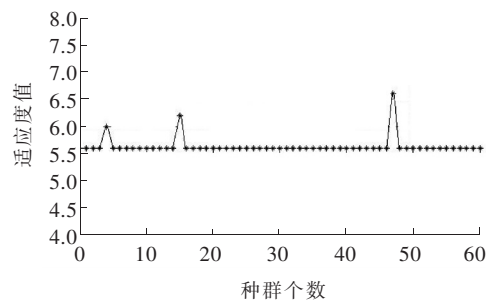


图 5 第 220 代种群的适应度函数值

Fig.5 Fitness function value of the 220th generation population

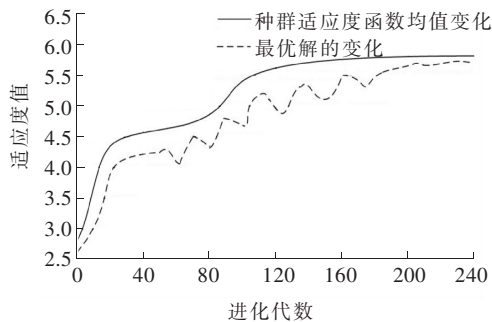


图 6 种群适应度函数均值和最优解的变化

Fig.6 Changes in mean and optimal solutions of population fitness function

3 结 语

本文所建模型和采用的算法实现了换热站二次管网支路热用户所需热量的供需平衡,同时确保了

循环泵电动机输出功率最小,节约了热量。但是随着支路热用户的增加,管网复杂程度也会相应增加,需要引入图论等算法去进行更深入的研究。

参考文献/References:

- [1] 颜丽娟, 马坤茹, 姜晓东. 一种清洁能源与市政热网互补的供热系统设计与模拟研究[J]. 河北工业科技, 2019, 36(3): 183-188.
YAN Lijuan, MA Kunru, XIAN Xiaodong. Design and simulation of a complementary heating system with clean energy and municipal heating network[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2019, 36(3): 183-188.
- [2] 陈知富. 中小城市集中供热的现状问题及规划发展探讨[J]. 区域供热, 2016(2): 86-91.
- [3] 方豪, 夏建军, 林波荣, 等. 北方城市清洁供暖现状和技术路线研究[J]. 区域供热, 2018(1): 11-18.
- [4] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [5] ULANICKI B, KAHLER J, COULBECK B. Modeling the efficiency and power characteristics of a pump group[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(1): 88-93.
- [6] 宋超, 王文明, 谢勇波, 等. 基于最小二乘法的电机特性曲线绘制与效率仿真[J]. 大功率变流技术, 2016(1): 49-52.
SONG Chao, WANG Wenming, XIE Yongbo, et al. Characteristic-curve drawing and efficiency simulation of motor based on the least square method[J]. High Power Converter Technology, 2016(1): 49-52.
- [7] 杨纪伟, 张丽荣. 调节阀阻力特性分析[J]. 阀门, 2001(2): 22-24.
YANG Jiwei, ZHANG Lirong. Analysis on characteristics of flowing resistance of reguator[J]. Valve, 2001(2): 22-24.
- [8] 贺平, 孙刚. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 石兆玉, 杨球同. 供热系统运行调节与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] YE Yang, GAO Mingyi, MA Yuanyuan, et al. Multi-population genetic algorithm for peak-to-average power ratio suppression in an optical OFDM transmission system[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10191-10197.
- [11] 毛尚春. 军事运输投送中的路径优化算法探讨[J]. 交通世界, 2018(36): 8-9.
- [12] 赵宇兰. 基于退火遗传算法的多连接查询优化应用研究[J]. 山西电子技术, 2018(6): 93-96.
ZHAO Yulan. Research on multi-join query optimization based on annealing-genetic algorithm[J]. Shanxi Electronic Technology, 2018(6): 93-96.
- [13] 袁明珠. Matlab 遗传算法工具箱在约束非线性惩罚函数中的应用[J]. 软件工程, 2017, 20(1): 37-39.
YUAN Mingzhu. Application of the Matlab genetic algorithm toolbox in constrained nonlinear penalty functions[J]. Software Engineering, 2017, 20(1): 37-39.
- [14] 蔡海鸾. 惩罚函数法在约束最优化问题中的研究与应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
CAI Hailuan. Research and Application of Penalty Function Method in Constrained Optimization [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [15] REYNOLDS J, REZGUI Y, KWAN A, et al. A zone-level, building energy optimisation combining an artificial neural network, a genetic algorithm, and model predictive control[J]. Energy, 2018, 151: 729-739.