

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.007

楼宇型综合能源服务系统智能优化运行研究

Research on optimized operation of building-type integrated energy service systems

张爱平,赵利兴,刘静
ZHANG Aiping,ZHAO Lixing,LIU Jing

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070)
(China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China)

摘要:随着“双碳”目标的推进落实,综合能源项目加速推广。针对楼宇型综合能源服务系统耦合性强、边界约束条件多、用户负荷变化大、运行方式复杂等特点,提出了一种智能优化运行控制算法模型。通过采集源、网、负荷侧数据,考虑天气的影响,建立负荷预测模型;根据运行边界条件,确立多目标优化函数,在各种能源需求、能源价格的约束下,基于混合粒子群算法实现综合能源服务系统智能优化运行。以某科技园区楼宇型综合能源服务系统为例,采用智能优化运行方案后,能源综合效率提升了 6.51 百分点,自耗电减少了 2.24%,有效提高了系统运行的经济性。

关键词:综合能源服务;智能优化运行;混合粒子群算法;负荷预测;能源综合效率;碳中和

中图分类号:TK 01*8 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0042-07

Abstract: With the implementation of the goals of carbon peak and carbon neutrality, the integrated energy projects are booming. To deal with the strong coupling, numerous boundary constraints, volatile user load and complex operation modes of integrated energy service systems, an intelligent optimized operation and control algorithm is proposed for the systems. A load forecasting model is established by taking the collected data from source, network and load side as well as weather conditions into consideration. According to the boundary conditions, a multi-objective optimization function is established. It realizes the optimized operation of building-type integrated energy service systems under the constraints of demand and price by taking mixed particle swarm optimization algorithm. Taking a demonstrative building-type integrated energy service system in an industrial park as an example, the economy of the system has been effectively improved by the optimized operation strategy with a 6.51 per cent increase of the comprehensive energy efficiency and a 2.24% decrease of the auxiliary power ratio.

Keywords: integrated energy service; intelligent optimized operation; mixed particle swarm optimization algorithm; load forecasting; comprehensive energy efficiency; carbon neutrality

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,综合能源服务项目的建设由小范围试点向全国范围推广。综合能源系统是与能源服务升级、多种能源互补发展、可再生能源大规模应用和综合能效提升等相伴而生的。综合能源服务面向能源系统终端,以用户需求为导向,通过集成多种能源系统,提高能源的互补利用,使用户用能满意度得到提升。综合能源服务旨在提供符合能源发展方向、契合用户实际需求、提升综合能源利用率的能源系统解决方案,是

推动能源革命的重要举措^[1-4]。

欧洲最早提出综合能源系统概念并付诸实施,早在欧盟第五框架(FP5)中就提及^[5],如分布式发电、运输和能源(Distributed Generation Transport and Energy, DGTREN)项目、Energie 项目及 Microgrid 项目对综合能源系统进行研究,侧重能源协调、协同优化及靠近用户侧开发。美国注重综合能源智能管理相关理论技术的研发,美国能源部 2001 年即提出了综合能源系统、智能管理系统的建设,注重各类能源系统间的协调配合。日本的综合能源管理系统则致力于引导能源结构优化,促进可再生能源规模化开发,这与日本能源严重依赖进口的现状密不可分。

我国综合能源服务尚处于起步阶段,冷、热、

电、气各自独立供应,缺乏整体协调管理,存在能效低、运营成本高问题。综合能源服务系统贴近用户侧,供能负荷需要实时与用户需求相匹配,而用户负荷变化大,导致运行方式复杂^[6-10];同时,综合能源系统机组耦合性强,边际效益条件影响因素多^[11-16]。因此,需采用一套智能化控制系统,用高度集成的智能化控制设备取代人工操作,快速响应用户负荷需求变化,保障系统安全、经济运行。

楼宇型综合能源服务系统服务于园区内建筑楼宇智慧用能需求,楼宇用能具有季度性、时段性等特点。优化运行系统要实现供能与楼宇侧用能一体化数据通信,协调优化控制以及源、网、荷友好互动等功能。本文以某楼宇型综合能源服务示范项目为例,对综合能源服务系统优化运行控制策略进行研究,为类似项目提供参考。

1 系统概述

示范项目位于北京市某科技园区,为AB座、CD座、EFG座、HI座4栋独立楼座供冷、热、电、生活热水,建筑规模为:地上约17万m²,地下约8万m²。综合能源供能系统包括天然气冷热电三联供系统、太阳能生活热水系统、光储系统及低温烟气余热回收系统。

其中天然气冷热电三联供系统建设2台3.300 MW级内燃机+2台烟气热水型余热溴化锂机组(制冷2×2.908 MW,供热2×1.257 MW(不含缸套水热量))+2台离心式电制冷机(供冷2×1.800 MW)+1台直燃机(供冷3.490 MW,供热2.800 MW)+1台直燃机(供冷3.490 MW,供热2.800 MW,供生活热水1.100 MW),为园区供冷、热、电及生活热水。太阳能生活热水集热器位于H座屋顶,共44组,作为酒店生活热水的补充供应源。光伏装机容量为187.22 kWp,储能装机为100 kW/240 kW·h,光伏发电直接接入大楼低压配电系统。低温烟气余热回收系统为2套内燃机组+1台热泵机组及其辅助设备,每套内燃机组烟道设置1套烟气板式换热器。

园区综合能源服务示范项目自2020年开始策划实施,计划2021年年底完成建设。通过示范项目的建设,实现综合能源服务系统的优化运行。

2 研究目标

楼宇型综合能源服务系统通过采集园区楼宇侧、管网侧数据建立负荷预测模型,利用大数据分析历史用能数据,找出负荷随季节和时间的变化规律;同时,结合天气预报信息,通过已建立的负荷预测模型,给出冷、热、电、生活热水24 h负荷预测曲

线并根据实时负荷不断进行修正。

在园区能源需求、供能设备运行、外购市电及天然气价格等边界条件的约束下,通过建立多目标函数,实现负荷分配寻优,给出设备组合运行策略。

3 优化运行技术方案设计原则

优化运行技术方案决定了示范项目的运行模式以及各种运行模式下的优化运行策略,设置以下设计原则:(1)天然气供应不受限制,满足机组不同负荷工况下天然气的需求;(2)园区电采用并网上网模式,即园区多余电可以上网,不足电力可以从电网购买市电;(3)在满足园区负荷需求的条件下,尽可能提高可再生能源利用率;(4)提高综合能源利用,余热要尽可能利用;(5)提高园区供能系统运行的经济性;(6)结合项目设备特点,限制部分设备的最低负荷。

4 联供系统介绍

联供设备主要由动力设备、余热利用设备、调峰设备、多能互补系统及相关辅助设备构成。本项目动力设备采用2套燃气内燃发电机组,1台内燃机对应1台烟气热水型溴化锂机组(余热机)。内燃机的缸套水和烟气余热经三通阀连接至余热机,通过调节缸套水、烟气三通阀的开度,可分别调节余热机缸套水及烟气的送入量,即可调节余热机的负荷。2台余热机冬季可供空调热水,夏季可供空调冷水;同时,余热机集成了生活热水板式换热器,充分吸收烟气的余热,冬季设置低温烟气深度利用系统,利用低温烟气驱动热泵,制取空调热水。H座屋顶太阳能生活热水系统充分利用可再生能源,供给酒店生活热水系统。AB座屋顶布置的分布式光伏系统为示范光储系统,配置储能系统。调峰设备配置2台电制冷机组、2台直燃机组,2台直燃机组可供空调冷热水,其中一台机组还可供生活热水。系统配置了集成化板式换热器,当室外温度低于5℃时,获得空调冷水,对数据机房供冷。

示范项目联供系统结构如图1所示。

5 负荷预测模型设计

针对不同的负荷,结合具体负荷特点进行负荷预测;同时,根据不同负荷的运行时间进行分段和分类预测。

负荷预测模型主要计算步骤如下:(1)获取冷、热、电、生活热水负荷历史记录;(2)分析冷、热、电、生活热水负荷历史记录;(3)确定趋势因子(根据历史记录做出趋势曲线);(4)确定日内(工作时间段)

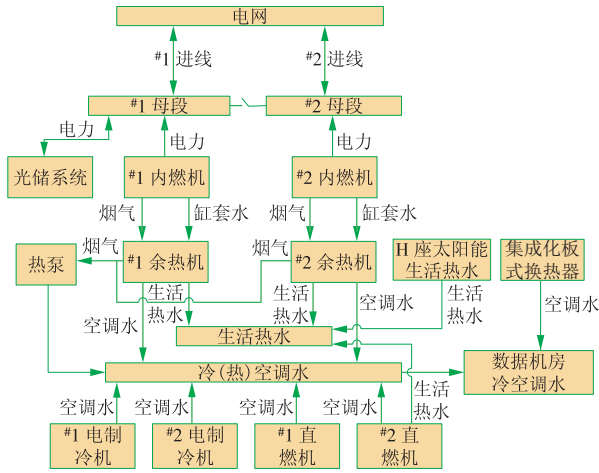


图 1 联供系统结构

Fig. 1 Structure of the cogeneration system

和季节性方案;(5)预测负荷需求;(6)计算负荷预测误差以及负荷与季节的相关性;(7)将负荷预测转换至计划期段;(8)模型不断修正验算,直至满足预期结果。

负荷预测主要用于预测各类负荷在未来一段时间的变化情况,以便合理安排机组运行方式和机组的负荷调整方式,优化、控制负荷。负荷预测子系统的预测对象有冷、热、电、生活热水负荷,预测内容包括各类负荷的峰谷时刻和持续时间、典型日 24 h 负荷、短时内的精确负荷预测等,具体负荷预测流程如图 2 所示。

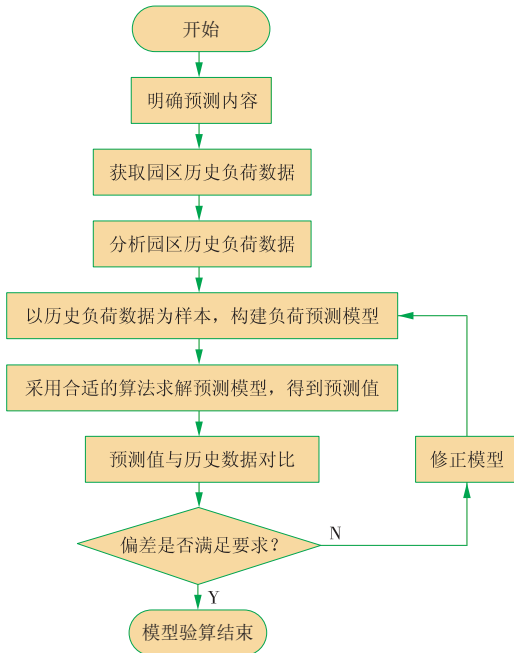


图 2 负荷预测流程

Fig. 2 Process of load forecasting

5.1 电负荷预测

电负荷预测采用基于线性外推法的短期负荷预测方法,该方法的数学模型为

$$P_{t_n} = P_{t_{n-1}} + \Delta P = P_{t_{n-1}} + v\Delta t, \quad (1)$$

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t, \quad (2)$$

式中: $P_{t_{n-1}}$ 为 t_{n-1} 时刻的负荷值; P_{t_n} 为 t_n 时刻的负荷值; ΔP 为待求时刻的负荷变化值; v 为待求时刻的负荷变化速率。

5.2 冷热负荷预测

冷热负荷要结合楼宇型综合能源的特性来考虑。影响冷热负荷的参数可以分为 2 类: 第 1 类是自由属性参数, 包括建筑的朝向、墙体和窗户的热阻、窗墙比等, 建筑建造好后这类参数几乎不变; 第 2 类是运行属性参数, 包括建筑的工作时间段、人员安排、人体舒适度要求、内部热源(如照明等用电设备)等。

建立夏冬季单位面积平均冷热负荷数学模型

$$Q_c = Q_{c,ba} T_c \left[1 + G_c(\theta) S_c(\theta) k_1 + k_2 S_c(t) (G_c(r) + G_c(R_{wa}) + G_c(R_{wi})) \right], \quad (3)$$

$$Q_h = Q_{h,ba} T_h \left[1 + G_h(\theta) S_h(\theta) k_1 + k_3 S_h(t) (G_h(r) + G_h(R_{wa}) + G_h(R_{wi})) \right], \quad (4)$$

式中: Q_c 、 Q_h 为夏季和冬季单位面积平均冷、热负荷, W/m^2 ; $Q_{c,ba}$ 为冷负荷基准值, 按 6—8 月制冷需求计算, 实际基准值可按具体时段进行调整; T_c 为工作时段制冷量比例系数之和; θ 为建筑正南方向与地理正南方向的夹角; $G_c(\theta)$ 为制冷季建筑的朝向对制冷的影响; $S_c(\theta)$ 为制冷时间段辐射系数之和; $S_c(t)$ 为制冷时间段温差系数之和; $G_c(r)$ 为窗墙比对冷负荷的影响系数; $G_c(R_{wa})$ 为外墙热阻对冷负荷的影响系数; $G_c(R_{wi})$ 为窗户热阻对冷负荷的影响系数; $Q_{h,ba}$ 为热负荷基准值, 按 12—2 月热需求计算, 实际基准值可按具体时段进行调整; T_h 为工作时段制热量比例系数之和; $G_h(\theta)$ 为制冷季建筑朝向对制热的影响; $S_h(\theta)$ 为制热时段辐射系数之和; $S_h(t)$ 为制热时段温差系数之和; $G_h(r)$ 为窗墙比对热负荷的影响系数; $G_h(R_{wa})$ 为外墙热阻对热负荷的影响系数; $G_h(R_{wi})$ 为窗户热阻对热负荷的影响系数; k_1 为辐射转换系数; k_2 、 k_3 为墙体冷、热传导系数。

6 智能优化运行方案设计

6.1 智能优化系统功能

智能优化系统负责信息的采集、通信及优化策略的寻优与显示。系统采集综合能源、空调管网、用户侧的数据, 设有负荷预测、机组性能计算、负荷

优化指令分配、机组状态监测、机组特性曲线在线学习等功能模块。智能优化系统基本策略是通过采集源、网、荷侧信息,预测未来24 h负荷需求,完成机组特性曲线的学习、机组性能计算,进一步实现机组负荷的最优分配并下达各负荷指令和设定参数到相关设备。

具体运行优化策略如下:智能优化系统采集综合能源源侧分散控制系统(DCS)和设备信息数据,网络服务器采集空调管网数据、用户用能数据、天气数据等负荷相关数据,智能优化系统通过智能学习算法,完成整个综合能源系统主要设备运行特性的学习;采用智能寻优算法完成机组最优运行模式分析;通过优化控制器向DCS发送优化控制指令(包括负荷优化分配指令、供热/供冷方式优化与调控指令),调整机组的运行模式,通过网络服务系统发布综合能源系统及空调管网的最佳运行优化策略给运行值班人员,从而实现综合能源系统的整体优化控制,达到高效低耗、经济匹配、可靠安全的运行目的。

6.2 优化技术路线

在考虑能源市场、能源资源供需平衡和设备可利用性等因素的基础上确定技术路线,建立混合整数线性规划(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)模型,如图3所示。优化内容包括最优设备组合、最优设备负荷、最优运行策略,以经济成本最小为第1优化目标,节能和环境指数为第2优化目标。

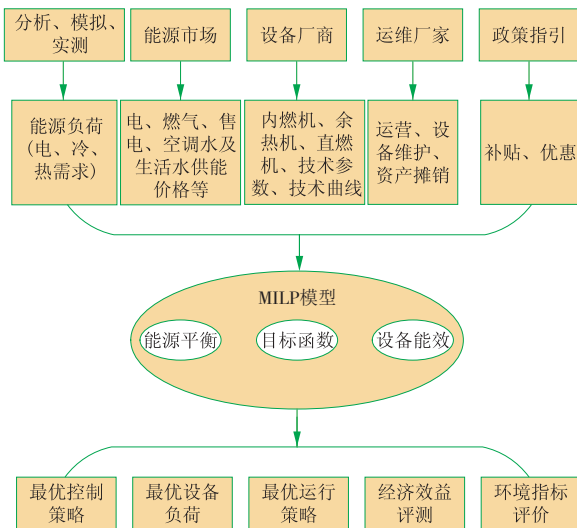


图3 综合能源系统智能优化技术路线

Fig. 3 Roadmap of the intelligent optimization technology for the integrated energy system

6.3 确立优化目标函数

优化可分为单目标优化和多目标优化,综合能源系统中能源的协同优化多为多目标优化,求解多

目标优化问题的解法较多,基于分解的多目标进化算法就是一种常用解法。相比于一般的数学优化方法,基于分解的多目标进化算法在解决非线性整数规划问题以及多维目标优化问题上具备很大的优势。一般情况下,多目标优化问题可描述为

$$F(X) = \text{Optimal}(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)), \quad (5)$$

式中: $X \in \Omega$, $f \in \Theta$, 实现从 n 维向量到 m 维向量的转换,如图4所示; Ω , Θ 为 n 及 m 维向量域。

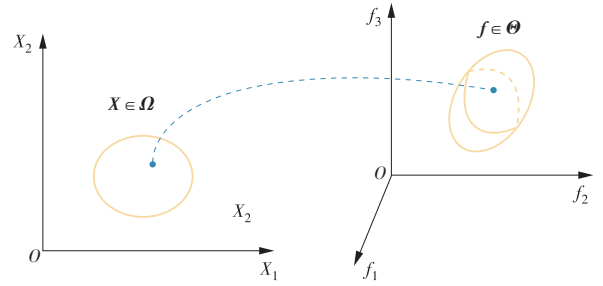


图4 决策向量转换

Fig. 4 Transformation of the decision vector

6.4 智能优化运行计算模型

6.4.1 寻优目标函数

(1)全年总运行成本 $C_{\text{sys_year}}$,目标是 $C_{\text{sys_year}}$ 最小。

$$C_{\text{sys_year}} = \sum_{n=1}^4 \left(\sum_{t=1}^{24} (C_{\text{e_net}}(t) + \sum_{l=1}^m C_{\text{convert}}^l(t) + \sum_{j=1}^k C_{\text{storage}}^j(t)) T_{a_n} \right), \quad (6)$$

式中: $C_{\text{sys_year}}$ 为综合能源系统的全年总运行成本; $C_{\text{e_net}}(t)$, $C_{\text{convert}}^l(t)$, $C_{\text{storage}}^j(t)$ 分别为外部能源供应成本、能源转换设备成本、储能总运行成本; T_{a_n} 为该典型日在每季度所占的天数; n 表示第 n 个季度; l 为能源转换设备; j 为储能设备。

(2)一天24 h时序优化目标函数,目标是使供能成本最小,尽可能利用可再生能源循环制取生活热水、光伏发电。

$$C_{\text{sys_day}} = \sum_{t=1}^{24} (C_{\text{e_net}}(t) + \sum_{l=1}^m C_{\text{convert}}^l(t) + \sum_{j=1}^k C_{\text{storage}}^j(t)), \quad (7)$$

式中: $C_{\text{sys_day}}$ 为一天24 h供能成本。

6.4.2 优化约束条件

(1)能量平衡约束条件。

1)电力平衡。园区上下网电功率、光伏发电功率、内燃机组发电功率、储能放电功率之和,满足厂用电负荷、园区用电负荷及充电负荷之和。

$$P_{\text{e_net}}(t, a) + P_{\text{pv}}(t, a) + P_{\text{mt}}(t, a) + P_{\text{dis}}(t, a) = P_{\text{e}}(t, a) + P_{\text{char}}(t, a) + P_{\text{auxi}}(t, a), \quad (8)$$

式中: $P_{\text{e_net}}(t, a)$ 为电网上下网电功率,下网为正,上网为负; $P_{\text{pv}}(t, a)$ 为园区光伏发电功率; $P_{\text{mt}}(t, a)$ 为园区内燃机发电功率; $P_{\text{dis}}(t, a)$ 为园区储能充电功率; $P_{\text{e}}(t, a)$ 为园区用电负荷; $P_{\text{char}}(t, a)$ 为园区充电负

荷,包含储能电池和充电桩; $P_{auxi}(t,a)$ 为厂用电负荷; a 表示某天; t 表示某时刻。

2) 空调热水平衡。

$$Q_{h,yr}(t,a) + Q_{h,bh}(t,a) + Q_{h,zr}(t,a) = Q_h(t,a), \quad (9)$$

式中: $Q_{h,yr}(t,a)$ 为余热机组热负荷; $Q_{h,bh}(t,a)$ 为板换热热负荷; $Q_{h,zr}(t,a)$ 为直燃机组热负荷; $Q_h(t,a)$ 为园区热负荷需求。

3) 空调冷冻水平衡。

$$Q_{c,yr}(t,a) + Q_{c,dz}(t,a) + Q_{c,zr}(t,a) = Q_c(t,a), \quad (10)$$

式中: $Q_{c,yr}(t,a)$ 为余热机组冷负荷; $Q_{c,dz}(t,a)$ 为电制冷机组冷负荷; $Q_{c,zr}(t,a)$ 为直燃机组冷负荷; $Q_c(t,a)$ 为园区冷负荷需求。

4) 生活热水平衡。

$$Q_{s,sun}(t,a) + Q_{s,sh}(t,a) + Q_{s,ybh}(t,a) = Q_{s,h}(t,a), \quad (11)$$

式中: $Q_{s,sun}(t,a)$ 为太阳能生活热水负荷; $Q_{s,sh}(t,a)$ 为生活热水水板式换热器负荷; $Q_{s,ybh}(t,a)$ 为生活热水烟气板式换热器负荷; $Q_{s,h}(t,a)$ 为园区生活热水负荷需求。

(2) 能源转换设备运行约束条件:每台设备在最低负荷和满负荷之间运行。

(3) 能源价格约束:在优化决策过程中,考虑电力峰谷电价和燃气价格进行能源平衡。

6.4.3 优化寻优方法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是求解优化问题的常用方法,它具有收敛速度快、计算量小、易于实现等优点,但也有早熟收敛、维数灾难、易陷入局部极值等缺点^[17-20]。为避免 PSO 的缺点,采用如下解决办法。

(1) 调整 PSO 的参数来平衡算法的全局探测和局部开采能力。

(2) 设计不同类型的拓扑结构,改变粒子学习模式,从而提高种群的多样性。

(3) 将 PSO 和其他优化算法结合,形成混合 PSO 算法。

根据园区能源系统的特点,采用混合 PSO 算法策略来寻优。算法的基本思想是,采取一种机制,当陷入局部最优或发生早熟时,能够跳出此局部区域并进入解空间的其他区域继续进行搜索,直到找到全局最优解。算法具体流程如图 5 所示。

引入种群的适应度方差 σ^2 反映粒子的聚集程度: σ^2 越小,空间中的粒子越收缩于局部; σ^2 越大,空间中粒子的多样性越好。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (f_i - f_{avg})^2 / n, \quad (12)$$

式中: n 为粒子个数; f_i 为第 i 个粒子的适应度; f_{avg} 为

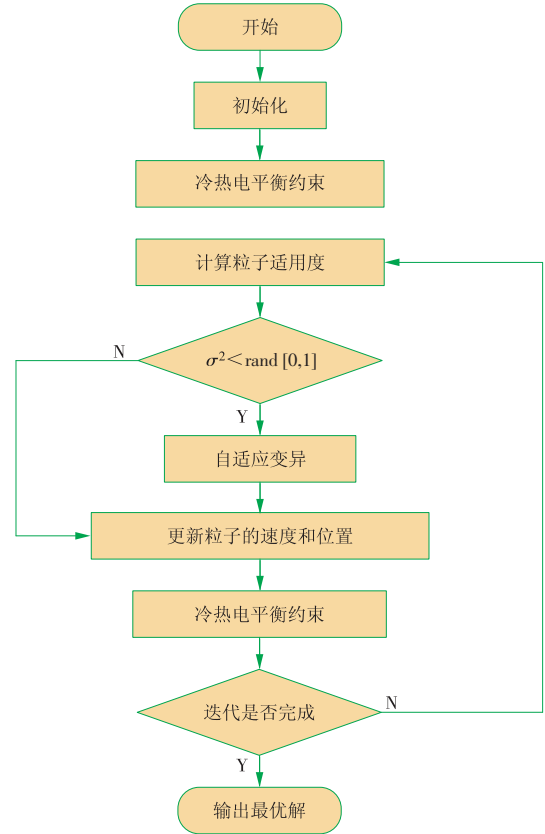


图 5 混合 PSO 算法流程

Fig. 5 Flow chart of the mixed PSO algorithm

前 i 个粒子适应度的平均值。

变异机制

$$g_{best}(i+1) = g_{best}(i)(1 + \mu), \quad (13)$$

式中: $g_{best}(i)$ 为局部最优值; μ 为随机变量。

在算法运行过程中,找到最优值后,进行一个是否是局部最优的判断,如果是局部最优就随机改变这个粒子的位置,从而让粒子进入其他区域进行搜索。在搜索过程中,算法可能发现新的个体极值以及全局极值,然后再进行一次是否满足平衡约束的判断,最终找到全局最优解。

实时优化调度模型中,采集实时负荷值并通过优化计算得到各机组出力指令值,每次求解变量相对较少,此时采用混合 PSO 算法能够较好地解决非线性少变量的优化问题。混合 PSO 优化算法主要包括产生初始解、计算目标函数值、计算约束条件下的函数值、计算适应度值、筛选最优粒子、粒子向最优粒子移动等步骤。能源站空调水温度和发电机出力可调节,使用混合 PSO 算法求解,以空调水温度和发电机功率作为决策变量,以经济性为核心目标函数,同时考虑环境温度、机组效率、水泵功耗与供回水温差,得到最优解决方案,即最优控制策略。

7 负荷预测及优化运行

基于园区冷、热、电、生活热水特点建立负荷预测模型,同时结合外界环境温度,绘制全天 24 h 负荷预测曲线,如图 6—8 所示。由图 6—8 可以看出,负荷预测值与实际值的偏差控制在 10% 以内。

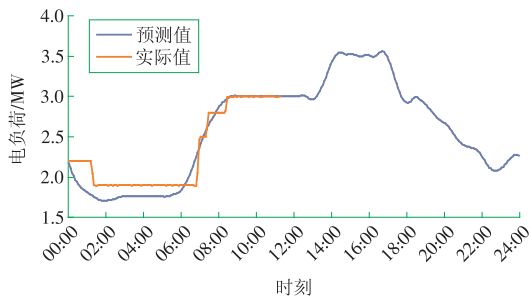


图 6 电负荷预测曲线

Fig. 6 Electricity load forecasting curve

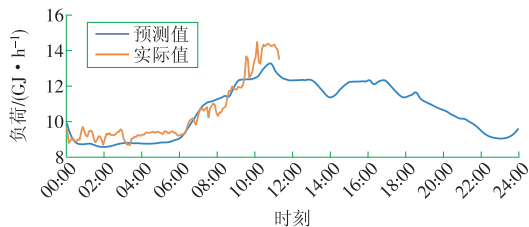


图 7 空调水负荷预测曲线

Fig. 7 Forecasting curve of the load for air conditioning water load

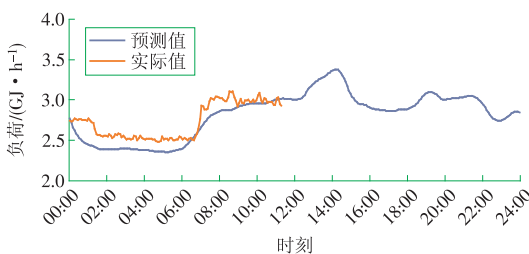


图 8 生活热水负荷预测曲线

Fig. 8 Hot water load forecasting curve

根据冷、热负荷的需求,参考负荷预测值,在满足所考核的能源利用效率的前提下,以实现能源站经济效益最优为目标,对各供能设备及冷热网进行动态负荷优化分配,给出动态优化分配策略,调整设备运行组合方式及负荷参数。初步优化结果显示:通过烟气余热深度利用,可节约直燃机供空调热水的能耗,高峰时段每小时可节约 50 m³ 天然气;通过减少余电上网,可提高能源经济效益;供能初期,通过调整供能参数,实现大温差小流量供能,可节约天然气耗量及厂用电量。2021 年该园区采用优化运行方案后,与 2019 年相比,年能源综合效率提升了 6.51 百分点,自耗电减少了 2.24%,见表 1。

智能优化前期先开环运行,后期逐步闭环运行,直接自动调整、控制设备运行,减少人为干预。

表 1 优化运行前、后数据对比

Table 1 Comparison of the data before and after optimized operation

年份	发电总量/ (GW·h)	供能总 量/GJ	总耗气量/m ³	自耗电/ (GW·h)	能源综合 效率/%
2019	21.584 3	107 141	6.578 6×10 ⁶	4.081 9	76.59
2021	22.013 5	118 657	6.581 2×10 ⁶	3.670 7	83.10

注:2021 年 1—10 月为实际数据,11,12 月为 2020 年同期数据。

后期会进一步结合外界天气情况,优化冷塔运行,节约冷塔耗电量。

8 结论

本文结合楼宇综合能源服务系统的建筑用能特性,考虑季节及时段等特点,同时结合外界天气状况,建立了冷、热、电、生活热水负荷预测模型。源侧根据多能互补系统特点,考虑设备运行特性曲线、能源价格等边界条件,建立优化目标函数,优化寻优算法,实现运行优化方案的寻优。

目前,该优化系统还在不断自学习过程中,后期通过现场实际运行积累的数据,进一步优化调整负荷预测及优化运行算法,逐步细化每个设备的运行参数,为提高项目运行的经济性创造更大空间,以期能为类似项目的优化运行提供借鉴。

参考文献:

[1]张运洲,代红才,吴潇雨,等.中国综合能源服务发展趋势与关键问题[J].中国电力,2021,54(2):1-9.
ZHANG Yunzhou, DAI Hongcai, WU Xiaoyu, et al. Development trends and key issues of China's integrated energy services[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 1-9.
[2]张宁,薛美美,吴潇雨,等.国内外能源转型比较与启示[J].中国电力,2021,54(2):113-115.
ZHANG Ning, XUE Meimei, WU Xiaoyu, et al. Comparison and enlightenment of energy transition between domestic and international[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 113-115.
[3]韩峰,张衍国,严矫平,等.综合能源服务业务和合作模式[J].华电技术,2019,41(11):1-4.
HAN Feng, ZHANG Yanguo, YAN Jiaoping, et al. Integrated energy service and cooperation modes [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 1-4.
[4]张运洲.我国综合能源服务一体化发展模式研究[J].中国电力企业管理,2019(13):37-41.
[5]何鑫,尹璐,涂彬,等.我国综合能源服务的现状与发展趋势[J].中国电力企业管理,2020(11):51-53.
[6]FU Y, LIN H Y, MA C P, et al. Effects of uncertainties on the capacity and operation of an integrated energy system [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,

- 2021, 48.
- [7] LU Q, GUO Q S, ZENG W. Optimization scheduling of an integrated energy service system in community under the carbon trading mechanism: A model with reward-penalty and user satisfaction [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 323: 129171.
- [8] 尹硕, 郭兴五, 燕景, 等. 考虑高渗透率和碳排放约束的园区综合能源系统优化运行研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 1-7.
- YIN Shuo, GUO Xingwu, YAN Jing, et al. Study on optimized operation on integrated energy system in parks with high permeability and carbon emission constraints [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 1-7.
- [9] YOU M, WANG Q, SUN H, et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties [J]. Applied Energy, 2022, 305: 117899.
- [10] LI Peng, ZHANG Fan, MA Xiyuan, et al. Multi-Time scale economic optimization dispatch of the park integrated energy system [J/OL]. Frontiers in Energy Research, 2021 (9): 743619 [2021-09-28] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.743619/full>.
- [11] 隋军, 金红光, 汝林谋, 等. 分布式供能及其系统集成 [J]. 科技导报, 2007, 25(24): 58-62.
- SUI Jun, JIN Hongguang, LIN Rumou, et al. Distributed energy system and its integration [J]. Science & Technology Review, 2007, 25(24): 58-62.
- [12] 朱晓红, 解蕾, 张延迟, 等. 天然气分布式供能系统的配置与优化 [J]. 节能技术, 2008, 26(1): 87-91.
- ZHU Xiaohong, XIE Lei, ZHANG Yanchi, et al. Configuration and optimization of the distributed power system using natural gas as the fuel in advanced training center of CPIP [J]. Energy Conservation Technology, 2008, 26(1): 87-91.
- [13] 俞新详, 翁一武, 杨锦成. 分布式供能系统控制的设计和应用 [J]. 热力发电, 2006, 10(10): 11-16.
- YU Xinxiang, WENG Yiwu, YANG Jincheng. Design and application of control system for distributed energy supply [J]. Thermal Power Generation, 2006, 10(10): 11-16.
- [14] 丁明, 包敏, 吴红斌. 分布式供能系统的经济调度 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(1): 13-17.
- DING Ming, BAO Min, WU Hongbin. Economic dispatching on distributed energy supply system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(1): 13-17.
- [15] 陈卉, 刘颖, 赵龙生. 楼宇型分布式能源系统在数据中心的应用 [J]. 华电技术, 2021, 43(3): 76-81.
- CHEN Hui, LIU Ying, ZHAO Longsheng. Application of building-type distributed energy systems for data centers [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 76-81.
- [16] 乔克, 吴培, 田传波, 等. 面向能源互联网的综合能源仪控平台一体化设计与研究 [J]. 仪器仪表用户, 2021, 28(7): 101-106.
- QIAO Ke, WU Pei, TIAN Chuanbo, et al. Integrated design and research of integrated energy instrument and control platform for energy internet [J]. Instrumentation Customer, 2021, 28(7): 101-106.
- [17] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究 [J]. 华电技术, 2021, 43(4): 14-20.
- ZHAO Xin, ZHENG Wenyu, HOU Zhihua, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on particle swarm optimization [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 14-20.
- [18] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.
- HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xingen, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems [J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.
- [19] 王哲, 王喆, 曾伟. 基于改进粒子群算法的主动配电网有功无功协调优化控制 [J]. 制造业自动化, 2021, 43(7): 105-108.
- WANG Zhe, WANG Zhe, ZENG Wei. Optimal control active power and reactive power coordination in active distribution network based on improved particle swarm optimization [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(7): 105-108.
- [20] 徐岩, 靳伟佳, 朱晓荣. 基于遗传粒子群算法的光伏并网逆变器参数辨识 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 103-109.
- XU Yan, JIN Weijia, ZHU Xiaorong. Parameter identification of photovoltaic grid-connected inverter based on GAPS0 [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(7): 103-109.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

张爱平(1977), 女, 高级工程师, 工学硕士, 从事综合能源项目研发工作, zhangap@chec.com.cn;

赵利兴(1970), 男, 高级工程师, 从事电力工程管理及研发工作, zhaolx@chec.com.cn;

刘静(1979), 女, 高级工程师, 从事综合智慧能源系统的设计与研究工作, liu-jing@chec.com。