

基于改进NSGA-II算法的数据中心能量调度优化研究

杨学佳¹, 孙浩², 钱健², 张铁峰^{1,3}

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 内蒙古龙源新能源发展有限公司, 呼和浩特 010000; 3. 河北省电力物联网技术重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 为了满足数据中心低碳和经济的需求, 建立以碳排放最少和综合供能成本最小为目标的数据中心能量调度优化模型, 并利用改进快速和精英机制的多目标遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)对模型进行求解。首先介绍了数据中心综合能源系统优化调度框架, 考虑数据中心的负载响应特性和设备能耗模型, 建立了以经济和低碳为目标的数据中心能量调度优化模型。其次针对传统NSGA-II存在的Pareto解集分布不均匀, 多样性较差的问题, 提出一种改进NSGA-II算法。采用动态距离比较和精英保留方式选择个体, 在保证优秀解的同时提高解的多样性。最后, 基于某数据中心的能量调度算例验证了所提模型和方法在降低数据中心碳排放水平与综合能源系统供能成本方面的有效性。

关键词: 数据中心; 多目标遗传算法; 能量调度; 低碳

Research on energy scheduling optimization for data center based on improved NSGA-II algorithm

YANG Xuejia¹, SUN Hao², QIAN Jian², ZHANG Tiefeng^{1,3}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Inner Mongolia Longyuan New Energy Development Co., Ltd., Hohhot 010000, China; 3. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: To meet the low-carbon and economic demands of data centers, an energy scheduling optimization model for data centers with the objectives of minimizing carbon emissions and comprehensive energy costs is established. An improved non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) with enhanced speed and elite mechanism is proposed to solve the model. Firstly, the optimization scheduling framework for data center comprehensive energy systems is introduced, considering the load response characteristics of data centers and equipment energy consumption models, and an energy scheduling optimization model for data centers with economic and low-carbon objectives is established. Secondly, addressing the issue of uneven distribution of Pareto solution sets and poor diversity in traditional NSGA-II, an enhanced NSGA-II algorithm is proposed. It adopts dynamic distance comparison and elite retention selection of individuals to ensure both excellent solutions and improved diversity. Finally, through a case study of energy scheduling in a particular data center, the effectiveness of the model and method in reducing data center carbon emissions and comprehensive energy system costs is verified.

Key words: data center; NSGA-II; energy scheduling; low-carbon

0 引言

21世纪初,随着互联网的发展,互联网数据中心(Internet data center, IDC)快速兴起,所能提供的服务不断增加。在提供强大算力支持的同时,为基于大数据和人工智能技术的电网运行分析、优化以及风险预测等场景提供重要的支撑,承载着海量的电力运行数据和设备信息的处理和存储任务^[1]。

随着清洁能源的大量接入,IDC综合能源优化调度已成为研究重点,通过协调各能源出力实现IDC更加绿色低碳成为趋势。文献[2]提出一个综合规划方案,最优地确定互联网数据中心和电池储能系统在智能电网中的位置和容量。文献[3]提出一种请求分配策略,以最小化数据中心网络在位置和时变电价下的能源成本。文献[4]提出一种能量管理方案,用于优化调度部署在数据中心中的请求和电池能量存储系统,以最大化数据中心网络的本地能量供应能力。文献[5—6]将数据网与电力网

协同运行,建立电力系统日前经济调度模型最小化系统总成本,主要考虑了发电机组的运行成本和数据中心的负荷控制成本。以上文献虽对IDC综合能源系统进行建模分析调度,目标多为经济性,并未考虑碳排放。文献[7]以IDC经济和碳排放为最佳目标进行联合优化调度,使IDC的能源效率(power usage effectiveness, PUE)得到提升,但并未考虑负载调度。在改进算法方面,文献[8]针对初始种群选择、精英选择策略以及交叉算子方面改进,提高了解的收敛性、空间算法能力和算法计算速度。文献[9]融合了模拟退火算法的搜索机制改进NSGA-II的求解性能,并对园区综合能源系统进行规划研究。

目前大多数研究都是对单一综合能源系统或IDC进行优化调度,优化目标大部分为经济成本。然而,将IDC与综合能源系统结合的优化调度兼顾低碳和经济目标方面鲜有研究。另外,现有优化模型多采用规划模型,其通常利用商业求解器或采用智能优化算法求解。其中,快速和精英机制的NSGA-II通过基于非支配排序的方法保留了种群中的优良个体,并且利用适应度共享函数保持了群体的多样性^[10],NSGA-II作为传统的遗传算法,在多目标约束问题的应用中已历经多次实践检验,具备一定的稳定性。但其仍存在诸如Pareto解集分布不均匀,多样性较差等问题。

针对现有调度优化难以兼顾低碳和经济的问题,本工作以最小化IDC碳排放水平和综合能源系统供能成本为目标,建立IDC优化调度模型并提出一种基于改进NSGA-II算法的优化调度方法。针对传统NSGA-II存在的Pareto解集分布不均匀,多样性较差的问题,提出一种改进的NSGA-II算法。采用动态距离比较和精英保留方式选择个体,在保证优秀解的同时提高解的多样性。最后,基于某数据中心的数据验证了所提策略能有效提高IDC灵活性资源的配置能力,在降低碳排放水平与综合能源系统供能成本方面效果显著。

1 IDC综合能源系统能量调度框架和模型

本文研究的IDC综合能源系统能量调度框架如图1所示,IDC综合能源系统包括电负荷和冷负荷。电负荷由电网、风电、光伏、蓄电池和燃气轮机提供,冷负荷通过水冷空调、吸收式制冷机和电制冷机来满足制冷需求。吸收式制冷机利用设备余热和燃气轮机产生的热量进行制冷,电制冷机以电能为消耗实现制冷效果。同时,蓄电和蓄冷作为储能

单元在IDC综合能源系统中起到优化调控的作用。

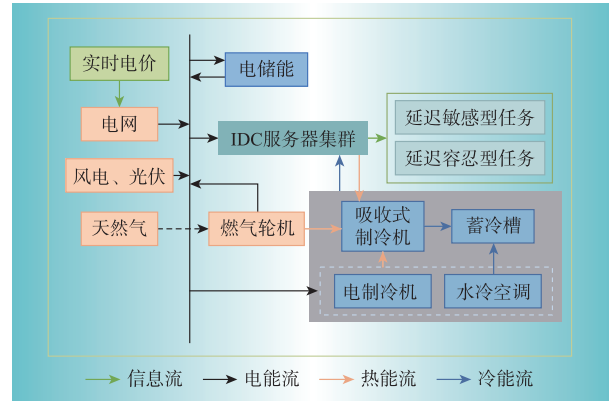


图1 IDC综合能源系统能量调度框架

Fig. 1 IDC integrated energy system energy scheduling framework

1.1 IDC IT能耗及负载调度模型

1.1.1 IT设备能耗模型

IT设备的主要能耗来自服务器,本文采用DVFS建模。如下所示^[11]

$$\begin{cases} P_{\text{CPU},t,i} = Kf^3 \frac{\lambda_{t,i}}{\mu} \\ P_{\text{ser},t,i} = P_{\text{add}} + P_{\text{CPU},t,i} \\ P_{\text{tol},t} = \sum_{i=1}^N P_{\text{ser},t,i} \eta_{\text{PUE}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{CPU},t,i}$ 为 t 时刻第 i 台服务器的CPU能耗, kW; K 为动态能耗系数; f 为CPU工作频率, Hz; $\lambda_{t,i}$ 为 t 时刻分配至第 i 台服务器的负载量; μ 为单台服务器的服务率; $P_{\text{ser},t,i}$ 为 t 时刻第 i 台服务器能耗, kW; P_{add} 为服务器除CPU以外其他组件的能耗, kW; $P_{\text{tol},t}$ 为数据中心 t 时刻IT设备总能耗, kW; η_{PUE} 为电能利用效率。

1.1.2 IT设备能耗模型

在数据中心接收的用户请求中,计算任务按照服务等级协议(service level agreement, SLA)可分为延时敏感型负载和延时容忍型负载。

延时敏感型负载要求负载到达之后立刻处理。保证延时敏感型负载到达后立即执行的约束如下

$$\begin{cases} T_i^{\text{sen,finish}} = T_i^{\text{sen,arr}} + \Delta T_i^{\text{sen,base}} \\ \lambda_{\text{sen},t} = \omega \lambda_{\text{tal},t} \\ \lambda_{\text{sen},t} = \lambda_{\text{sen,allot},t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_i^{\text{sen,finish}}$ 为延时敏感型负载处理完成时刻; $T_i^{\text{sen,arr}}$ 为延时敏感型负载到达时刻; $\Delta T_i^{\text{sen,base}}$ 为处理当前负载所需要的时间; $\lambda_{\text{tal},t}$ 为 t 时刻到达的总负载量; $\lambda_{\text{sen},t}$ 为延时敏感型负载数量; ω 为延时敏感型负载占比; $\lambda_{\text{sen,allot},t}$ 为当前处理敏感型负载数量。

延时容忍型负载要求在最大容忍时间 $T_j^{\text{tol,max}}$ 内

完成处理,式(3)为负载处理时间约束,式(4)为负载迁移前后数量平衡约束。

$$\begin{cases} T_j^{\text{tol,min}} \leq T_j^{\text{tol,finish}} \leq T_j^{\text{tol,max}} \\ T_j^{\text{tol,min}} = T_j^{\text{tol,arr}} + \Delta T_j^{\text{tol,base}} \\ T_j^{\text{tol,max}} = T_j^{\text{tol,arr}} + \Delta T_j^{\text{delay,max}} + \Delta T_j^{\text{tol,base}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \lambda_{\text{tol},t} = (1-\omega)\lambda_{\text{tol},t} \\ \lambda_{\text{finish},t} = \lambda_{\text{tol},t} + \sum_{t'=1}^{t'-1} \lambda_{\text{tol},t'} - \sum_{t''=t+1}^{t''=t+1} \lambda_{\text{tol},t''} \\ 0 \leq \sum_{t''=t+1}^{t''=t+1} \lambda_{\text{tol},t''} \leq \lambda_{\text{tol},t} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T_j^{\text{tol,min}}$ 与 $T_j^{\text{tol,max}}$ 分别为延迟容忍型负载处理完成的最早和最晚时刻; $T_j^{\text{tol,finish}}$ 为延迟容忍型负载处理完成时刻; $T_j^{\text{tol,arr}}$ 为延迟容忍型负载到达时刻; $\Delta T_j^{\text{tol,base}}$ 为处理当前负载所需要的时间; $\Delta T_j^{\text{delay,max}}$ 为延迟容忍型负载的最大可延迟处理时间; $\lambda_{\text{tol},t}$ 为负载调度前 t 时刻延迟容忍型负载数量; $\lambda_{\text{finish},t}$ 为负载调度后 t 时刻延迟容忍型负载数量; $\lambda_{\text{tol},t}$ 为迁移到 t 时刻延迟容忍型负载数量; $\lambda_{\text{tol},t'}$ 为 t' 时刻迁移出的延迟容忍型负载数量。

1.2 IDC 空调能耗模型

典型的数据中心水冷空调系统主要由冷冻水循环系统、冷却水循环系统、主机系统和末端风机等部分组成^[12]。空调系统能耗由式(5)~式(9)表示。其中,式(5)表示水冷空调系统总能耗,式(6)、式(7)表示冷水机组能耗,式(8)表示冷冻水泵和冷却水泵能耗,式(9)表示冷却塔风机能耗。

$$P_{\text{total,kt},t} = \sum_{t=0}^T P_{\text{chiller},t} + \sum_{t=0}^T P_{\text{pumcw},t} + \sum_{t=0}^T P_{\text{pumch},t} + \sum_{t=0}^T P_{\text{towfan},t} \quad (5)$$

$$P_{\text{chiller},t} = \frac{Q_{c,t}}{C_{\text{OP,kt}}} \quad (6)$$

$$Q_{c,t} = cm_c(T_{\text{ci}} - T_{\text{co}}) \quad (7)$$

$$P_{\text{pum},t} = \frac{\rho g V H}{3\,600 \times 1\,000} \quad (8)$$

$$P_{\text{fan},t} = P_{\text{fan,nom}} \left(\frac{f_t}{f_0} \right)^3 \quad (9)$$

式中: $P_{\text{chiller},t}$ 、 $P_{\text{pumcw},t}$ 、 $P_{\text{pumch},t}$ 、 $P_{\text{towfan},t}$ 分别为 t 时刻冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔功率, kW; $Q_{c,t}$ 为 t 时刻制冷量, kW; $C_{\text{OP,kt}}$ 为空调系统性能系数; c 为水的比热容, kJ/(kg·K); m_c 为冷冻水质量流量, m³/h; T_{ci} 为冷冻水回水温度, °C; T_{co} 为冷冻水出水温度, °C; ρ 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度; V 为流体的体积流量, m³/h; H 为水泵的扬程, m; $P_{\text{fan,nom}}$ 为风机的额定功率, kW; f_t 为风机实际运行频率, Hz; f_0 为风机额定频率, Hz。

1.3 其他器件模型

对于电制冷机、吸收式制冷机和储能设备的标准化公式建模详见文献[13]。

2 IDC 能量优化调度模型

2.1 目标函数

本文建立的IDC综合能源系统低碳优化调度模型以最小化IDC碳排放水平和综合能源系统供能成本为目标,表示如下

$$F_1 = \min(C_{\text{opr}} + C_{\text{enc}}) \quad (10)$$

$$C_{\text{opr}} = \sum_{t=1}^{24} \left[c_{\text{wt}} P_{\text{wt},t} + c_{\text{pv}} P_{\text{pv},t} + c_{\text{AC}} C_{\text{AC},t}^{\text{out}} + c_{\text{EC}} C_{\text{EC},t}^{\text{out}} + c_{\text{ES}} (p_{\text{ES},t}^{\text{ch}} + p_{\text{ES},t}^{\text{dis}}) + c_{\text{CS}} (h_{\text{CS},t}^{\text{ch}} + h_{\text{CS},t}^{\text{dis}}) \right] \quad (11)$$

$$C_{\text{enc}} = \sum_{t=1}^{24} (c_{\text{grid,buy}} P_{\text{grid},t} + c_{\text{gas,buy}} V_{\text{gas},t}) \quad (12)$$

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^{24} (\varphi_{\text{grid}} P_{\text{grid},t} + \varphi_{\text{wt}} P_{\text{wt},t} + \varphi_{\text{pv}} P_{\text{pv},t} + \varphi_{\text{gas}} V_{\text{gas},t}) \quad (13)$$

式中: C_{opr} 为系统运维成本,元; C_{enc} 为系统购能成本,元; $P_{\text{wt},t}$ 、 $P_{\text{pv},t}$ 、 $P_{\text{grid},t}$ 分别为风机、光伏、电网 t 时刻功率, kW; $V_{\text{gas},t}$ 为燃气轮机 t 时刻消耗天然气体积, m³; c_{wt} 、 c_{pv} 、 c_{AC} 、 c_{EC} 、 c_{ES} 、 c_{CS} 分别为风机、光伏、吸收式制冷机、制冷机、电储能、蓄冷设备的单位功率运维成本,元; $c_{\text{grid,buy}}$ 、 $c_{\text{gas,buy}}$ 为购电、购气单位成本,元; φ_{grid} 、 φ_{wt} 、 φ_{pv} 分别为电网、风机、光伏碳排放因子, kgCO₂/kWh; φ_{gas} 为天然气碳排放因子, kgCO₂/m³。

2.2 约束条件

2.2.1 燃气轮机约束

燃气轮机所产生的热量与其输出电功率之间的关系为

$$Q_{\text{mt},t} = \frac{P_{\text{me},t}(1-\eta_e-\eta_s)}{\eta_e} \quad (14)$$

式中: $Q_{\text{mt},t}$ 为燃气轮机 t 时刻输出热功率, kW; $P_{\text{me},t}$ 为 t 时刻燃气轮机的输出电功率, kW; η_e 为燃气轮机的发电效率; η_s 为燃气轮机的热损失系数。

燃气轮机消耗的天然气与其输出电功率之间的关系为

$$V_{\text{gas},t} = \frac{P_{\text{me},t} \Delta t}{\eta_e L_{\text{ng}}} \quad (15)$$

式中: L_{ng} 为天然气的低位热值, kWh/m³; Δt 为时间步长, 取 1 h。

燃气轮机输出热功率与电功率约束为

$$Q_{\text{mt,min}} \leq Q_{\text{mt},t} \leq Q_{\text{mt,max}} \quad (16)$$

$$P_{\text{me,min}} \leq P_{\text{me},t} \leq P_{\text{me,max}} \quad (17)$$

式中: $Q_{\text{mt,max}}$ 、 $Q_{\text{mt,min}}$ 分别为输出热功率上、下限; $P_{\text{me,max}}$ 、 $P_{\text{me,min}}$ 分别为电功率上、下限。

2.2.2 储能系统约束

储能系统需满足储能状态约束如式(18),以及储放能功率约束如式(19)一式(21)。

$$S^{\min}C \leq W_t \leq S^{\max}C \quad (18)$$

$$0 \leq w_t^{\text{ch}} \leq \varepsilon_t^{\text{ch}} \kappa^{\text{ch}} C \quad (19)$$

$$0 \leq w_t^{\text{dis}} \leq \varepsilon_t^{\text{dis}} \kappa^{\text{dis}} C \quad (20)$$

$$0 \leq \varepsilon_t^{\text{ch}} + \varepsilon_t^{\text{dis}} \leq 1 \quad (21)$$

式中: W_t 为储能设备在 t 时刻具有的储能量; S^{\max} 和 S^{\min} 分别为储能设备的最大、最小储能容量; C 为设备安装容量; w_t^{ch} 和 w_t^{dis} 分别为储能设备在 t 时刻的充放能功率; $\varepsilon_t^{\text{ch}}$ 和 $\varepsilon_t^{\text{dis}}$ 分别为储能设备在 t 时刻处于充放能的0-1状态变量, $\varepsilon_t^{\text{ch}}=1$ 为充能, $\varepsilon_t^{\text{dis}}=1$ 为放能; κ^{ch} 和 κ^{dis} 分别为储能设备的充、放能倍率。

2.2.3 制冷系统约束

电制冷机运行功率约束如下

$$0 \leq C_{AC,t}^{\text{out}} \leq C_{AC,t}^{\text{out,max}} \quad (22)$$

吸气式制冷机运行功率约束如下

$$0 \leq C_{EC,t}^{\text{out}} \leq C_{EC,t}^{\text{out,max}} \quad (23)$$

式中: $C_{AC,t}^{\text{out,max}}$ 和 $C_{EC,t}^{\text{out,max}}$ 分别为电制冷机、吸收式制冷机的最大功率。

2.2.4 能量平衡约束

电能平衡约束如下

$$P_{\text{tot},t} + P_{\text{total,kt},t} + P_{AC,t}^{\text{in}} + P_{ES,t}^{\text{ch}} = P_{\text{wt},t} + P_{\text{pv},t} + P_{\text{grid},t} + P_{\text{me},t} + P_{ES,t}^{\text{dis}} \quad (24)$$

冷平衡约束如下

$$C_{AC,t}^{\text{out}} + C_{EC,t}^{\text{out}} + h_{CS,t}^{\text{dis}} = C_{\text{total},t} + h_{CS,t}^{\text{ch}} \quad (25)$$

3 改进的NSGA-II多目标寻优算法

3.1 改进的NSGA-II算法

在NSGA-II算法产生子代种群的精英保留策略中,采用拥挤度比较算子将种群进行排序,选择拥挤度距离大的点形成新的父代种群。但这种方法可能导致种群的多样性受到影响,若按照固定拥挤度排序,可能会出现聚集部分的个体被全部淘汰的情况,从而影响种群的多样性。为保证种群的多样性,对固定拥挤度排序机制进行改进,引入动态平均距离选择策略。

第 i 个粒子的位置为 x_i , 其拥挤度距离 d_i 计算如式(26)所示,端点粒子拥挤度距离为无穷大。

$$d_i = \sum_{m=1}^M |f_m(x_{i+1}) - f_m(x_{i-1})| \quad (26)$$

粒子种群的平均距离 $D(f_m)$ 定义如下

$$D(f_m) = \frac{f_m^{\max} - f_m^{\min}}{N} \quad (27)$$

式中: f_m^{\max} 和 f_m^{\min} 分别为第 m 个目标上的最大值和最小值; N 为种群大小。

在进行距离比较时,若平均距离较小,保留下的个体将会出现冗余现象;若平均距离较大,将会出现重叠距离较大而淘汰优秀的个体。因此引入动态缩放因子 M_u , 则缩放后的动态平均距离为 $M_u \times D(f_m)$ 。以缩放后的平均距离为边长构成一个矩形,计算相邻两个点的矩形边重复度,表示如下

$$Z_m = \frac{2D(f_m) - |d_{m,i-1}^b - d_{m,i}^s|}{D(f_m)} \quad (28)$$

当 $d_{m,i-1}^b$ 与 $d_{m,i}^s$ 为横坐标对应目标时,其取值如式(29)所示,当其为纵坐标对应目标时,其取值如式(30)所示。

$$\begin{cases} d_{1,i-1}^b = f_1(i-1) - \frac{1}{2}D(f_1) \\ d_{1,i}^s = f_1(i) + \frac{1}{2}D(f_1) \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} d_{2,i-1}^b = f_2(i-1) + \frac{1}{2}D(f_2) \\ d_{2,i}^s = f_2(i) - \frac{1}{2}D(f_2) \end{cases} \quad (30)$$

式中: $d_{m,i-1}^b$ 与 $d_{m,i}^s$ 为第 m 个目标上的第 $i-1$ 个与第 i 个点周围矩形的端点坐标。

距离重复度计算如图2所示。动态平均距离选择策略选择个体的流程如图3所示。

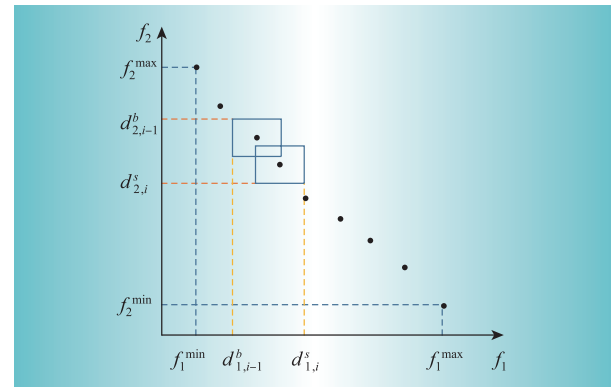


图2 距离重复度计算示意

Fig. 2 Schematic of distance repeatability calculation

3.2 改进的NSGA-II算法流程

为有效解决数据中心能量调度优化问题,提高种群多样性,改进的NSGA-II算法步骤为:

(1) 随机产生规模为 N 的初始种群 P_t , 经过非支配排序、选择、交叉和自适应变异,产生子代种群 Q_t , 并将两个种群联合在一起形成大小为 $2N$ 的种群 R_t ;

(2) 进行快速非支配排序,同时对每个非支配层中的个体首先计算平均距离、重复距离和重复度,根据其重复距离与重复度的关系进行进一步的选择。达到种群规模后,使用拥挤度排序选取合适

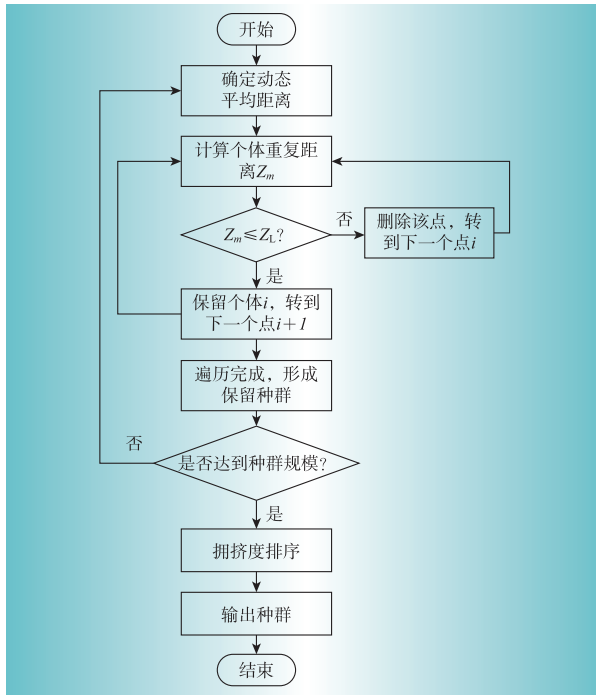


图3 动态平均距离选择流程

Fig. 3 Dynamic average distance selection process

的个体组成新的父代种群 P_{i+1} ;

(3) 通过遗传算法基本操作产生新的子代种群 Q_{i+1} , 将 P_{i+1} 与 Q_{i+1} 合并形成新的种群 R_i , 重复以上操作, 直到满足结束条件为止。

算法流程如图4所示。

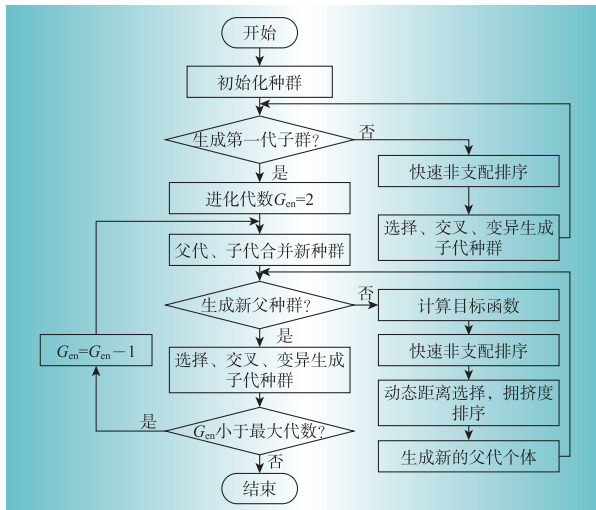


图4 改进的NSGA-II算法流程

Fig. 4 Improved NSGA-II flowchart

4 算例分析

4.1 算例数据设置

算例采用图1所示的IDC综合能源系统低碳优化调度框架进行仿真验证, 选取某地区一个25 MW的数

据中心作为研究对象, 该数据中心含2000个机柜, 每个机柜功率不超过5 kW。以24 h为一个调度周期, 相邻调度时段为1 h。假设单个负载大小为0.4 GB, 数据负载最大可容忍延迟时间 T_{\max} 为0.6 s, 固定气价为3元/m³, NSGA-II算法种群规模 N 为100个, 迭代次数为500次。算例仿真基于Matlab R2022b实现。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 算法策略验证

改进前、后NSGA-II算法的pareto前沿解对比如图5所示, 总成本与碳排放量之间相互制衡。改进前NSGA-II算法存在种群堆积以及部分区域内无解的情况, 改进后的NSGA-II算法在维护解的多样性和种群分布方面表现良好, 使解的质量显著提高。

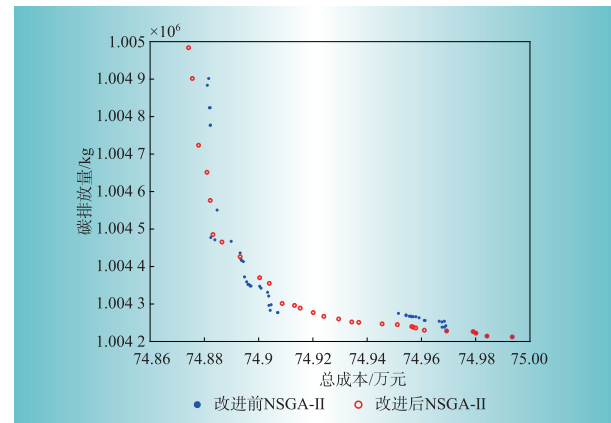


图5 改进前、后NSGA-II算法的pareto前沿解对比

Fig. 5 Comparison of pareto frontier solutions for NSGA-II before and after improvement

在所有解中, 系统中的碳排放量在1 004 200~1 005 000 kg之间变化, 系统总成本在74.86~75.00万元之间变化。图5所示的pareto前沿为实现这2个目标之间的权衡提供了决策支持。通过CRITIC熵权法^[14]对pareto前沿解各点进行遍历计算后确定权重, 选取最优解。

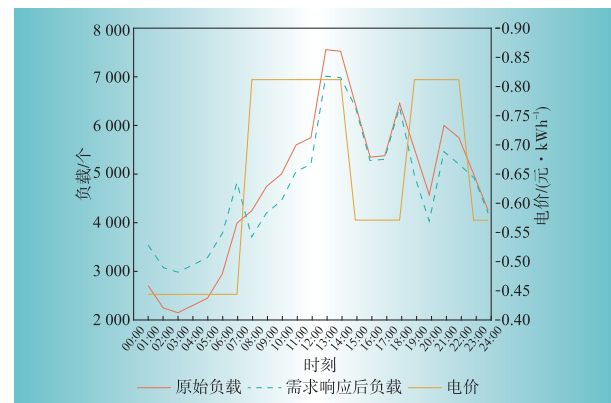


图6 负载调度前后对比

Fig. 6 Comparison of load scheduling with and without adjustment

图6为负荷分配策略处理后的延迟容忍型负荷与原始负荷的对比图。在保证数据处理质量的同时,将延迟容忍型负荷请求根据电价进行重新分布,降低08:00—14:00、19:00—22:00电价峰值时的负荷处理量,提升23:00—07:00、15:00—18:00电价低谷时处理量,从而降低数据处理的整体成本。

本文所提规划方法单日各设备的出力情况如图7、图8所示。其中图7为系统内电力能源供给平衡组成示意图,在24 h调度周期内发电组合随电价变化而变化。07:00—14:00电价峰值时,可再生能源、蓄电池与燃气轮机同时出力,但仍不能满足峰值时电力需求,此时从电网购电比例明显增加。在电价处于谷值时,燃气轮机出力减少,从电网购电比例增大并对储能充电。图8为系统内冷功率平衡,吸收

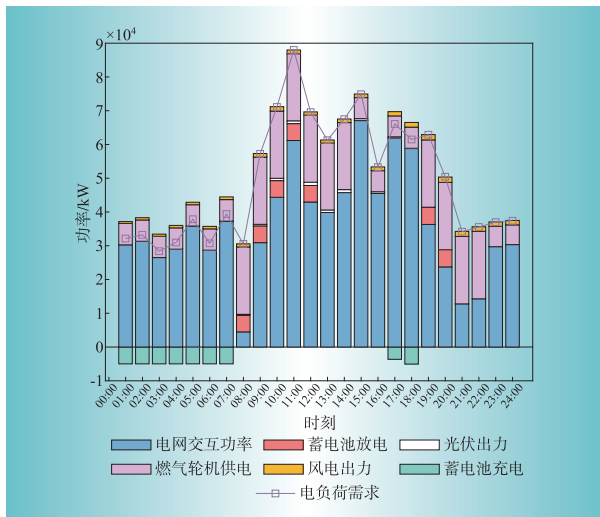


图7 IDC综合能源系统电平衡组成

Fig. 7 IDC comprehensive energy system power balance composition

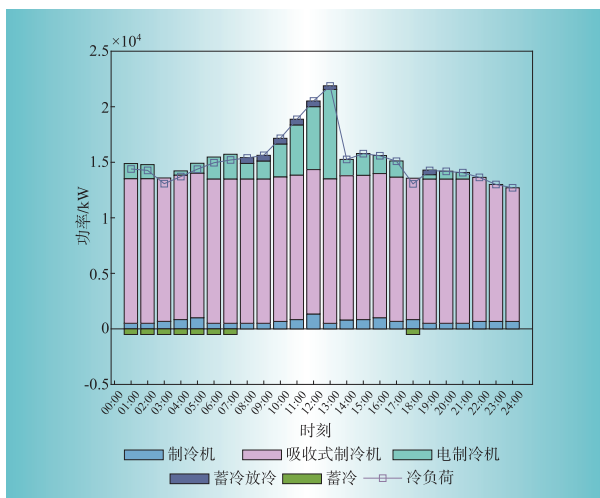


图8 IDC综合能源系统冷平衡组成

Fig. 8 IDC integrated energy system cooling load balance composition

式制冷机为主要供冷设备,冷负荷较低时,为蓄冷设备蓄冷。随着负荷增大购电价格升高,在电价峰值时,燃气轮机发电并为吸收式制冷机提供热能,电制冷机辅助制冷,同时蓄冷设备放冷,在降低峰值供能成本的同时实现经济效益最优化。

4.2.2 对比分析

通过采用改进前后的NSGA-II算法求解所提出的模型,对比证明本文所提改进算法的有效性。同时为更加全面的分析模型求解效果,分别以碳排放量最少和总成本最低为目标,对此线性规划问题采用cplex求解器求解。不同求解方法的费用比较如表1所示。

表1 不同方法下的费用比较

Table 1 Cost comparison under different methods

求解方法	购电费用/元	碳排放量/kg	总成本/元
线性规划 (成本最低)	595 940	1 035 800	773 560
线性规划 (碳排放最小)	659 700	1 034 100	808 630
NSGA-II	619 296	1 076 845	792 219
改进的NSGA-II	562 331	1 004 221	749 954

由表1可知,采用改进后NSGA-II算法求解模型时,系统运行总成本明显减少,相比改进前NSGA-II、线性规划(成本最低)分别减少了5%和3%,购电费用相比其他3种求解方法也明显减少。这符合模型的目标要求,体现了模型的经济性。且改进后其碳排放量相比改进前NSGA-II、线性规划(碳排放量最低)分别减少了7%和3%,这符合调度模型的低碳环保要求。

4.2.3 不同方案对比分析

设计不同场景,分别对比本文所提能量调度模型的有效性。方案1:本文所提能量调度模型;方案2:不考虑负载调度模型;方案3:不考虑风机、光伏供电模型;方案4:仅采用电网供电。不同场景碳排放量对比和总成本对比见图9。

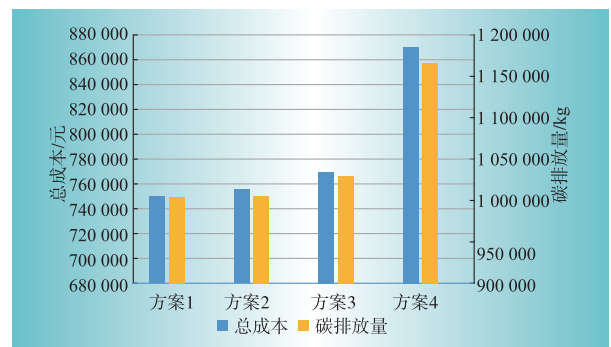


图9 不同方案总成本与碳排放量对比

Fig. 9 Comparison of total cost and carbon emissions of different schemes

方案2不考虑负载调度,负载在到达IDC之后

马上被处理,导致在峰值电价下处理的信息量相对较高,耗电量较大,从而导致更大的用电成本以及碳排放量。可见可以通过合理的负载调度降低系统的能耗,节约成本,降低碳排放。

方案3考虑清洁能源的接入,系统内电能由电网和燃气轮机提供,在电价低估时,向电网购电增加,当电价处于峰值时,燃气轮机结合储能系统进行调节。总成本与碳排放分别增加了2.6%和2.5%。

方案4采用电网供电,同时保留储能系统。电负荷与冷负荷几乎全部由电网直接供电驱动,主要依靠燃气轮机热量驱动的吸收式制冷机无法工作,在制冷方面的费用显著增加,结果表明,总成本增加了16%,碳排放量增加了17%。

5 结束语

(1) 针对降低IDC碳排放水平和综合能源系统供能成本目标,构建了IDC综合能源系统低碳优化调度模型,可兼顾经济性和低碳。

(2) 为了求解所建优化调度模型,通过解决传统NSGA-II存在的Pareto解集分布不均匀、多样性较差的问题,提出了一种改进的NSGA-II算法。引入动态平均距离选择策略,解决了按照固定拥挤度排序可能会出现聚集部分的个体被全部淘汰的问题,在保证优秀解的同时提高解的多样性。算例表明了方法的有效性。

(3) 通过不同方案下的总成本与碳排放计算比较,验证了所提综合能源能量调度框架和调度优化方法在优化成本和碳排放方面有较好的效果。D

参考文献:

- [1] 周伏秋,谷立静,孟辉. 数据中心节能和优化布局研究[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(3): 1-3.
ZHOU Fuqiu, GU Lijing, MENG Hui. Research of data center energy saving and optimal layout[J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(3): 1-3.
- [2] GHAMKHARI M, WIERMAN A, MOHSENIAN-RAD H. Energy portfolio optimization of data centers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1 898-1 910.
- [3] VAFAMEHR A, KHODAYAR ME, MANSHADI SD, et al. A framework for expansion planning of data centers in electricity and data networks under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 305-316.
- [4] WANG Y, LIN X, PEDRAM M. A stackelberg game-based optimization framework of the smart grid with distributed pv power generations and data centers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 978-987.
- [5] 曹晓峻,高赐威,李德智,等. 数据网络与电力网络混合运行建模及其参与系统经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1 448-1 456.
CAO Xiaojun, GAO Ciwei, LI Dezhi, et al. Mixed operation model of data network and power network and its participation in the economic operation of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1 448-1 456.
- [6] 陈敏,高赐威,陈宋宋,等. 考虑数据中心用电负荷调节潜力的双层经济调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1 301-1 314.
CHEN Min, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. Bi-level economic dispatch modeling considering the load regulation potential of internet data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1 301-1 314.
- [7] 刘成运,孟超,景锐,等. A级数据中心综合能源系统多目标优化设计和调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 136-142.
LIU Chengyun, MENG Chao, JING Rui, et al. Multi-objective optimization design and scheduling of integrated energy systems in A-level data center[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 136-142.
- [8] 徐川. 基于改进NSGA-II的含储能电站的配电网经济性和可靠性综合评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
XU Chuan. Comprehensive evaluation of economics and reliability of distribution network with energy storage power station based on improved NSGA-II[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [9] 朱俊铭,柏晶晶. 基于改进遗传算法的园区综合能源系统规划研究[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(3): 76-81.
ZHU Junming, BAI Jingjing. Research on multi-objective optimal allocation of park integrated energy system based on improved genetic algorithm[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(3): 76-81.
- [10] 毕文豪,周久力,段晓波,等. 基于多要素改进NSGA-II的小直径制导炸弹空面打击最优火力分配方法[J]. 航空学报, 2023, 44(17): 202-217.
BI Wenhao, ZHOU Jiuli, DUAN Xiaobo, et al. Optimal fire distribution method of small diameter guided bomb in air-to-surface strike based on multi-factor modified NSGA-II[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(17): 202-217.
- [11] 高赐威,吴刚,陈宋宋. 考虑地理分散的数据中心服务器频率调节的电网降损模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1 673-1 681.
GAO Ciwei, WU Gang, CHEN Songsong. A model aimed at reducing power net loss considering frequency scaling of servers in geo-distributed data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1 673-1 681.
- [12] 丁瑞华,崔承刚,王逸轩,等. 基于深度强化学习的数据中心空调系统优化控制[J]. 低温与超导, 2022, 50(9): 79-85.
DING Ruihua, CUI Chenggang, WANG Yixuan, et al. Air conditioning system optimization in data center based on deep reinforcement learning[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2022, 50(9): 79-85.
- [13] 崔鹏程. 计及综合需求响应的能量枢纽优化配置和综合效益评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
CUI Pengcheng. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response and evaluation of comprehensive benefit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [14] 张硕,李薇,李英姿,等. 面向新型电力系统的可再生能源绿色电力证书差异化配置模型[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1 561-1 571.
ZHANG Shuo, LI Wei, LI Yingzi, et al. Differentiated allocation model of renewable energy green certificates for new-type power system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12): 1 561-1 571.

作者简介:

杨学佳(1999),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为数据中心能量优化调度;

孙浩(1972),男,新疆乌鲁木齐人,学士,高级工程师,主要从事为新能源企业生产管理方面工作;

钱健(1982),男,内蒙古呼和浩特人,工程硕士,高级工程师,主要从事新能源自动化及信息化方面工作;

张铁峰(1974),男,内蒙古乌兰察布人,副教授,研究方向为能源互联网及信息通信。

(责任编辑 水 鹤)