

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-147-10

考虑光伏发电情况下 某低碳商业园区夏季蓄冰调度优化策略研究

周惠文 谢宇杰 李峥嵘 李 翠 朱 晗

(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

【摘 要】 提出一种考虑光伏发电比例的低碳商业园区冰蓄冷空调多目标优化调度模型, 首先建立冰蓄冷空调系统的园区能源系统数学模型和园区建筑群负荷仿真计算模型, 考虑低碳园区屋顶光伏覆盖面积比例, 以运行成本最低和运行阶段碳排放量最低为目标, 以动态电价、电力碳排放因子、建筑负荷需求和设备条件作为目标与约束, 建立低碳商业园区冰蓄冷空调系统的优化调度模型。然后, 采用非支配排序遗传算法 (NSGA-II), 求解该多目标优化问题, 实现能源系统多目标优化调度。分别在 4 种光伏比例下对冰蓄冷空调设备运行优化计算, 结果表明, 园区能源系统采用优化后的运行策略可降低运行阶段日碳排放量 22.89%至 43.61%, 节省日运行费用 20.42%至 45.54%, 有效减少冰蓄冷空调系统运行阶段的碳排放量和降低系统运行阶段的经济成本。

【关键词】 低碳商业园区; 冰蓄冷; 光伏; 需求响应; 调度优化策略

中图分类号 TK01+8 文献标志码 A

Research on Summer Ice Storage Scheduling Strategy Based on Carbon and Energy Dual-control Low-carbon Business Parks

Zhou Huiwen Xie Yujie Li Zhengrong Li Cui Zhu Han

(School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804)

【Abstract】 A multi-objective scheduling model for ice storage and cooling air conditioning in low-carbon business parks is proposed, which firstly establishes a mathematical model of the ice storage and cooling air conditioning system and a building model of the park, and then establishes an optimal scheduling model of the ice storage and cooling air conditioning system in low-carbon business parks, considering the proportion of the rooftop photovoltaic (PV) area in low-carbon business parks, and aiming at the lowest operating cost and the lowest carbon emission during the operation phase, and taking the dynamic tariffs, the carbon emission factor of electricity, the demand of building loads, and the conditions of the equipment as constraints. optimisation scheduling model for ice storage and cooling air conditioning system in business parks. Then, a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is used to solve this multi-objective optimisation problem to achieve the economic, energy-saving and emission reduction optimal scheduling of the ice storage air-conditioning system during summer working days. The case results show that the optimisation of the operation of the ice storage air-conditioning equipment under four PV ratios respectively can reduce the daily carbon emissions in the operation phase by 22.89% to 43.61% and save the daily operation costs by 20.42% to 45.54%, and the multi-objective optimisation effect is excellent, and it can effectively achieve energy saving, emission reduction and cost reduction of the ice storage air-conditioning system.

【Keywords】 Low Carbon Business Park; Ice Storage and Cooling; Photovoltaic; Demand Response; Scheduling Optimization Strategy

基金项目: 典型碳减排及柔性能源系统关键技术研究 (22dz12080051)

作者简介: 周惠文 (1999.04-), 女, 硕士, E-mail: 2232744@tongji.edu.cn

通讯作者: 李峥嵘 (1969.10-), 女, 博士, 教授, E-mail: lizhengrong@tongji.edu.cn

收稿日期: 2024-12-13

0 引言

双碳战略背景下,可再生能源生产与消费在我国能源供需体系中的占比不断增加^[1],然而由于时空差异以及可再生能源的波动性与随机性,储能技术的应用成为推进可再生能源有效应用的关键^[2-4]。根据能源生产端、消费端和输配端的不用功能定位,储能可以与此三个节点充分配合,形成高效的源网荷储一体化系统技术。

建筑暖通空调能耗约占建筑能耗的三分之二^[5-7],是降低民用建筑碳排放和提高可再生能源应用的关键,通过建筑以及暖通空调系统的有效设计与运维,提高其储能能力,从而增加电网的可调节性,是当前实现低碳能源系统的关键问题之一^[8]。

基于峰谷电价优势,冰(水)蓄冷空调系统在平抑电网峰谷负荷差异、提高电网效率方面的贡献已为大家所共识。从电网柔性调度和虚拟电厂运维角度讨论,冰(水)蓄冷空调系统平抑电网峰谷差异的能力,从用户端为电网柔性调度提供重要储能方案。本文主要以冰蓄冷系统为例进行探讨,因此后文统一为冰蓄冷系统。

关于冰蓄冷系统的既有讨论中,多结合分时电价,从系统自身运行效率提升角度展开,如田子豪^[9]等提出分时电价优化设计,引导用户投资与运行,实现商户双赢。Henze^[10]等基于特征识别,为不同效率冷水机组建模,使性能参数误差小于10%。曹建伟^[11]等构建微网经济调度框架,随机策略提升经济性,以应对不确定性风险。孙可^[12]等提出多能协同优化模型,最小化日运行费用。张勇军^[13]等提出趋优控制方法,优化制冰融冰时段,提升运行效率。Sha^[14]等数学建模优化日运行成本,

规划融冰制冰时间。Singh^[15]等研究 cws 运行方式优化调度,减峰负荷 16.4%,年整体能源损失和冷水机组节能分别达到 2.2%和 0.8%。

由于光伏系统在建筑中的推广,光电的可利用潜力以及电网柔性调度背景下提出的动态电价机制等因素必然对冰蓄冷系统的设计与运维产生新的影响,而相关研究比较少,因此,本文以此为研究对象,将系统运行费用最低与碳排放量最低为优化目标,分析不同光电容量下,系统的蓄冰容量、碳排放规模与经济性等问题。

1 冰蓄冷空调系统结构及数学模型建立

本文所研究的综合能源系统主要由光伏、冷水机组、双工况冰蓄冷空调以及用户负荷构成。其中,冰蓄冷装置配备于园区集中站,以冰蓄冷空调为主要形式。冰蓄冷空调有蓄冷模式和释冷模式,当室内温度达到临界点时,可以进行蓄冷或释冷,在维持室内温度宜人的同时继续保持响应功率,使调节深度增加,用户满意度也不会有所损失。因此,冰蓄冷空调相比于传统的空调负荷具有调节更灵活且可深度调节的优势。

1.1 基本假设

为了分析计算简单,在调研基础上,本文做如下假设:

1.1.1 系统物理模型

根据调研结果,假设本文建立的冰蓄冷系统包括双工况冷水机组、离心式冷水机组、螺杆式冷水机组、冷冻水水泵、冷却水水泵、蓄冰槽、换热器等,如图 1 所示。系统运行时,多台冷水机组并联至供冷系统,利用冷热交换在夜间蓄冰蓄冷,白天融冰供冷,保证能源系统向建筑群稳定供冷。

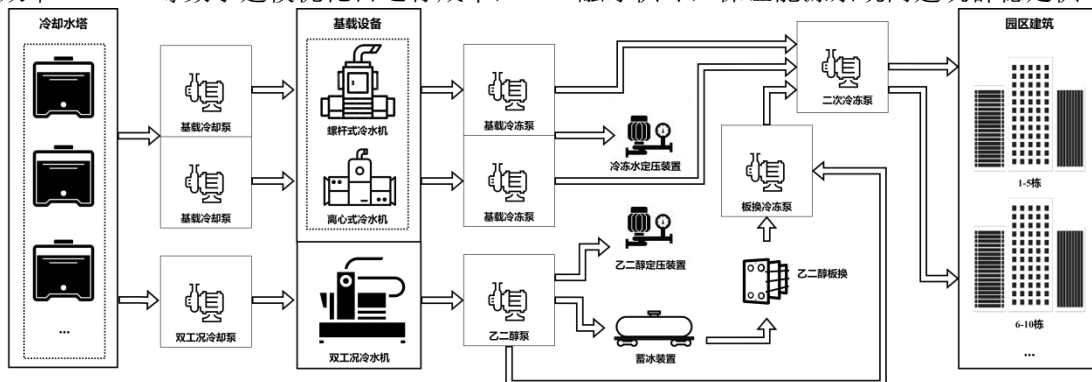


图 1 冰蓄冷系统

Fig.1 Ice storage and cooling system

1.1.2 系统数学模型假设

为简化计算,本文假设各基载冷水机组与双工况冷水机组蓄冰系统均以理想工况运行,不考虑多台设备并联运行曲线效率问题,将同类型若干台设备均视为一台机组进行计算和建模。蓄冰系统仅在夜间蓄冰储冷,白天融冰释冷,充放能过程不能同时存在,且不能连续交替进行。由此形成的系统数学模型如1.2所述。

1.2 冰蓄冷空调系统数学模型建立

(1) 双工况冷水机组在夜间蓄冰,白天供冷不足时作为补充供冷手段选择性开启。机组制冷量计算如式(1)~(3)所示:

$$C_{DC}(t) = COP_{dual_condition_c} Q_{DC}(t) \quad (1)$$

其中: $C_{DC}(t)$ 为双工况冷水机组实时制冷量, kW; $COP_{dual_condition_c}$ 为双工况冷水机组能效比(制冷); $Q_{DC}(t)$ 为双工况冷水机组实时功率, kW。

$$C_{DC}(t) = COP_{dual_condition_i} Q_{DC}(t) \quad (2)$$

其中: $COP_{dual_condition_i}$ 为双工况冷水机组能效比(制冰)^[16]。

$$q_c = Q / (C_f n_1 + n_2) \quad (3)$$

其中: q_c 为双工况冷水机组标定制冷量, kW; Q 为建筑设计日总负荷, kW; C_f 为实际制冷量与标定制冷量比值,一般取 0.60~0.75^[17]; n_1 为夜间制冷工况运行小时数(即低谷电价时数), h; n_2 为双工况冷水机日间运行小时数, h。

(2) 冰蓄冷设备数学模型,如式(4)所示:

$$\begin{cases} C_{CESS}(start) = C_{CESS}(end) = 0 \\ \sum_{t=1}^{24} C_{CESS,in}(t) * \eta_{CESS,abs} \leq C_{capacity_total} \\ C_{CESS,in}(t) \leq C_{capacity} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $C_{CESS}(start)$ 为系统工作循环周期中蓄冰池初始时刻蓄冰量; $C_{CESS}(end)$ 为系统工作循环周期中蓄冰池结束时刻蓄冰量; $C_{CESS,in}(t)$ 为蓄冰实时储冷量; $\eta_{CESS,abs}$ 为蓄冰充能效率; $C_{capacity_total}$ 为蓄冰池容量; $C_{capacity}$ 为蓄冰池小时额定蓄冰量。

其中,蓄冰设备盘管最大小时融冰供冷量约束限制,如式(5)所示:

$$C_{CESS,out}(t) / \eta_{CESS,rela} \leq \sum_{t=1}^{24} C_{CESS,in}(t) * \mu_{efficiency} \quad (5)$$

其中: $C_{CESS,out}(t)$ 为蓄冰槽实时融冰放冷量; $\eta_{CESS,rela}$ 为储冷放能效率; $\mu_{efficiency}$ 为蓄冰冷量损失,取 0.15。

双工况机组的运行的最小开启时间与最小关闭时间的约束如式(6)所示:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{24} n_{CESS,in}(t) \leq T_{CESS,on} \\ \sum_{t=1}^{24} n_{CESS,on}(t) \leq T_{CESS,off} \end{cases}, n = 0, 1 \quad (6)$$

其中: $n_{CESS,in}(t)$ 为蓄冰系统实时蓄冰情况; $n_{CESS,on}(t)$ 为蓄冰系统实时融冰情况; $T_{CESS,on}$ 为双工况机组最小开启时间; $T_{CESS,off}$ 为双工况机组最小关闭时间。

①离心式冷水机

离心式冷水机作为白天空调系统供能的基载机组,与蓄冰系统一起为建筑提供主要冷量,冷负荷量计算如式(7)所示:

$$C_{CC}(t) = COP_{centrifugal} Q_{CC}(t) \quad (7)$$

其中: $C_{CC}(t)$ 为离心式冷水机组实时制冷量, kW; $COP_{centrifugal}$ 为离心式冷水机组能效比; $Q_{CC}(t)$ 为离心式冷水机组实时功率, kW。

②变频螺杆式冷水机组

变频螺杆式冷水机组作为白天空调系统供冷的补充手段与早晚空调机组启停阶段的过渡供冷设备,冷负荷量计算如式(8)所示:

$$C_{SC}(t) = COP_{screw} Q_{SC}(t) \quad (8)$$

其中: $C_{SC}(t)$ 为变频螺杆式冷水机组实时制冷量, kW; COP_{screw} 为变频螺杆式冷水机组能效比; $Q_{SC}(t)$ 为变频螺杆式冷水机组实时电功率, kW。

③蓄冰槽

蓄冰槽的运行模式包括以蓄冰为主的“储冷过程”和以融冰为主的“释冷过程”。其中冷量储存与释放过程的功率如式(9)所示:

$$W_{CS,A} = W_{CS,B} (1 - \sigma_{CS}) + \left(P_{CS,C} \eta_{CS,C} - \frac{P_{CS,D}}{\eta_{CS,D}} \right) \Delta t \quad (9)$$

其中: $W_{CS,A}$ 为蓄冰后的蓄冰槽容量; $W_{CS,B}$ 为蓄冰前的蓄冰槽容量; σ_{CS} 为蓄冰设备自然散热率; $P_{CS,C}$ 为蓄冰功率; $\eta_{CS,C}$ 为蓄冰效率; $P_{CS,D}$ 为

融冰功率； $\eta_{CS,D}$ 为融冰效率。

通过对全国各冰蓄冷空调系统进行文献调研^[18-22]，得知冰蓄冷空调的蓄冰率约为 10.65% 至 46.58%，取决于空调负荷大小与系统规模。本文分析中通过改变园区内可再生能源发电比例，采用计算得到对应情景下蓄冰率为 10% 至 48%，符合文献调研结果。

1.3 系统能量平衡与约束

夏季平衡公式如式 (10)、(11) 所示：

电：

$$E_{grid}(t) + E_{PV}(t) = E_{facility}(t) \quad (10)$$

其中： $E_{grid}(t)$ 为电网逐时取电量，kW；

$E_{PV}(t)$ 为光伏逐时发电量，kW； $E_{facility}(t)$ 为设备逐时用电量，kW。

冷：

$$C_{DC}(t) + C_{CC}(t) + C_{SC}(t) + C_{CESS, out}(t) = C_{load}(t) \quad (11)$$

储能约束条件：

$$\sum_{t=n_2}^{n_3} C_{CESS, out}(t) \leq \left[\sum_{t=1}^{n_1} C_{CESS, in}(t) + \sum_{t=n_3}^{24} C_{CESS, in}(t) \right] \quad (12)$$

$\mu_{efficiency} * \eta_{CESS, abs}$

$$\sum_{t=1}^{n_1} C_{CESS, in}(t) + \sum_{t=n_3}^{24} C_{CESS, in}(t) \leq C_{capacity_total} \quad (13)$$

其他约束条件：

$$0 \leq C_{CESS, in}(t) \leq K * C_{capacity_total} \quad (14)$$

蓄冰设备在实际应用中，其在放冷后期放冷速率降低。此时，蓄冰设备的放冷能力已无法满足空调负荷的需求。由此产生以下两个问题。首先，蓄冰设备后期放冷速率降低，会导致蓄冰设备不可能在白天 16 个小时的时间内将全部蓄冷量（潜热）放完。故计算时应考虑该部分无法放出的蓄冷量。设可利用蓄冷量占总蓄冷量（热）的比率为 K 。根据蓄冰装置的放冷特性，各种蓄冰装置的 K 值如下：冰盘管 $K=0.95$ ，冰筒 $K=0.90$ ，冰球 $K=0.75$ ，本文选用冰盘管作为蓄冰装置。

2 优化目标及求解方法

2.1 优化目标函数确定

考虑冰蓄冷空调运行阶段的经济性和碳排放量，本文采用的优化目标为系统运行时碳排放总量和运行费用最低。公式 (15) 和 (16) 为优化目标函数。

$$Min_Emission = \sum_{t=1}^{24} [EF_{grid} * E_{grid}(t)] \quad (15)$$

$$Min_Eco = \sum_{t=1}^{24} [Pri_{grid}(t) * E_{grid}(t)] \quad (16)$$

其中： $Min_Emission$ 为能源系统碳排放量； Min_Eco 为能源系统运行费用； EF_{grid} 为电网电力碳排放因子； $E_{grid}(t)$ 为电网实时取电量； $Pri_{grid}(t)$ 为电网实时电价。

2.2 求解算法

本文采用 NSGA-II 算法，基于 Python3.7 编程进行求解。

NSGA-II 算法，即带有精英保留策略的快速非支配，多目标优化算法，是一种基于 Pareto 最优解的多目标优化算法，是用来分析和解决多目标优化问题的一种进化算法，其核心就是协调各个目标函数之间的关系，找出使得各个目标函数都尽可能达到比较大的（或者比较小的）函数值的最优解集。在众多目标优化的遗传算法中，NSGA-II 算法是影响最大和应用范围最广的种多目标遗传算法。在其出现后，由于它简单有效以及比较明显的优越性，使得该算法已经成为多目标优化问题中的基本算法之一。算法流程图如图 2 所示。

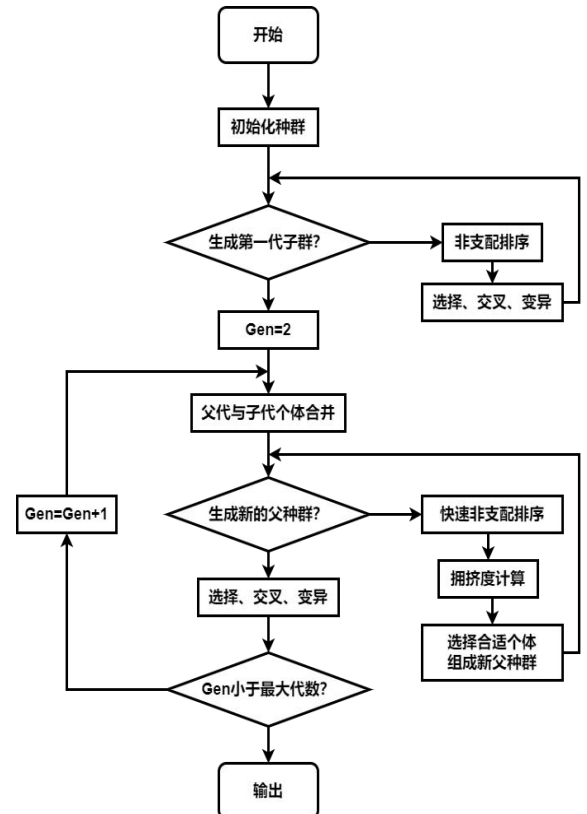


图 2 NSGA-II 算法流程图

Fig.2 NSGA-II algorithm flowchart

该遗传算法核心为精英保留策略, 可以概括为: 首先, 将父代种群 C_i 和子代种群 D_i , 合成种群 R_i ; 其次, 根据 Pareto 等级从低到高的顺序, 将整层种群放入父代种群 C_{i+1} , 直到某一层该层个体不能全部放入父代种群 C_{i+1} , 将该层个体根据拥挤度从大到小排列, 依次放入父代种群 C_{i+1} 中, 直到父代种群 C_{i+1} 填满, 由此从种群 R_i 中生成新的父代种群 C_{i+1} 。

3 优化算法在案例中的应用

3.1 案例概况

以上海市某低碳商业园区为例, 总建筑面积为 212445m², 总供冷面积为 130581m²。包括 4 台双工况冰蓄冷主机、2 台离心式基载制冷主机、1 台变频螺杆式冷水机组。采用装配式冰盘管蓄冰槽总蓄冰量 28906RTH。

电价为一般工商业用电及其他用电的两部制分时电价, 夏季 7~8 月: 尖峰时段 (12:00~14:00) 为 1.5131 元 /kWh, 高峰时段 (8:00~12:00、

14:00~15:00、18:00~21:00) 为 1.2105 元/kWh, 平时段 (6:00~8:00、15:00~18:00、21:00~22:00) 为 0.6725 元/kWh, 低谷时段 (22:00~次日 6:00) 为 0.2690 元/kWh; 夏季 9 月: 高峰时段 (8:00~15:00、18:00~21:00) 为 1.2105 元/kWh, 平时段 (6:00~8:00、15:00~18:00、21:00~22:00) 为 0.6725 元/kWh, 低谷时段 (22:00~次日 6:00) 为 0.2690 元/kWh。

园区目前的运行策略: 夜间蓄冰 (22:00~6:00)。末端面积无大幅度增加的情况下, 白天根据室外温度结合近段时间运行, 通过白天融冰效果判断融冰供冷量大约能够维持几个小时。假设末端平均负荷 10000kW (能源中心自控系统可实现计算末端单位时间总负荷, 并由此预判下一小时的末端负荷需求量), 按此条件, 融冰大约能够维持使用 8h。8:00~11:00、13:00~15:00、18:00~22:00 时段先采用融冰系统 (时间 9h)。11:00~13:00、15:00~18:00 时段开启 2 台基载离心式冷水机组 (单台制冷量: 4920kw), 同时关闭融冰系统 (时间 5h), 系统设备性能参数与经济性参数如表 1、表 2 所示。

表 1 该项目蓄冰空调设备设计信息

Table 1 Information on the design of ice storage and air conditioning equipment

设备名称	设备参数	数量
双工况离心式冷水机组	型号: 19XR8Q82E63MHE5A, 单台机组制冰工况制冷量: 3165KW (900RT), 单台机组制冷工况制冷量: 4572KW (1300RT)	4 台
基载离心式冷水机组	型号: 19XR8084E65MHB5A, 单台机组制冷工况制冷量: 4924KW (1400RT)	2 台
基载螺杆式冷水机组	型号: 30XW-V456, 单台机组制冷工况制冷量: 1597KW (454RT)	1 台
燃气常压热水锅炉	型号: WNS5.6-1.0/95/70-YQ, 单台热负荷: 5.6MW	3 台
电热储能炉	型号: DCL-10N-A-4500, 单台热负荷: 4500KW	2 台
板式换热器 (冷)	型号: T25-PFG, 换热量: 8400KW	4 台
板式换热器 (热)	型号: T20-MFG, 换热量: 5600KW	3 台
冰盘管	单台冰盘管蓄冰量 298RTH/组, 总蓄冰量: 28906RTH	97 组
双工况冷却塔	单台流量: 600m ³ /h	8 台
基载冷却塔	单台流量: 600m ³ /h	4 台

表 2 该项目蓄冰空调设备性能与经济参数设定值

Table 2 Performance and economic parameters of ice storage and air conditioning equipment

分类	名称	符号	值	单位
设备性能参数	双工况离心式冷水机组制冷系数 (制冰)	$COP_{dual_condition_i}$	3.8	—
	双工况离心式冷水机组制冷系数 (制冷)	$COP_{dual_condition_c}$	4.6	—
	基载离心式冷水机组制冷系数	$COP_{centrifugal}$	4.7	—
	基载螺杆式冷水机组制冷系数	COP_{screw}	4.5	—
	储冷充能效率	$\eta_{CESS,abs}$	0.9	—
	储冷放能效率	$\eta_{CESS,relea}$	0.96	—

续表 2 该项目蓄冰空调设备性能与经济参数设定值

Table 2 Performance and economic parameters of ice storage and air conditioning equipment

分类	名称	符号	值	单位
经济性参数	电价	$Pri_{grid,pro}$	1.5131	元/kWh
		$Pri_{grid,peak}$	1.2105	元/kWh
		$Pri_{grid,flat}$	0.6725	元/kWh
		$Pri_{grid,vally}$	0.2690	元/kWh
	电网当量二氧化碳排放系数	EF_{grid}	0.429	kg/kWh

3.2 光电比例对冰蓄冷系统性能的影响

3.2.1 工况设计与数据处理方法

在本案例中，使用 NSGA-II 算法求解多目标优化问题，设置 NSGA-II 算法的种群规模为 500，最大进化代数为 5000，交叉算子的交叉概率为 0.9，变异算子的变异概率为 0.5，调用 Geatpy 库求解最优运行策略。在能源系统运行阶段，以能源站每日运行费用和碳排放量最低作为目标，两目标权重各设为 50%，如式（17）所示，以便在 NSGA-II 算法得到的帕累托前沿解中找到最优解。

$$object = W_1 * Obj_{Emi} + W_2 * Obj_{Eco} \tag{17}$$

其中： W_1 为目标 1 所占权重，取 0.5； Obj_{Emi} 为能源系统运行碳排放目标系数； W_2 为目标 2 所占权重，取 0.5； Obj_{Eco} 为能源系统运行费用目标系数。

对于案例园区环境工况设置，调用 Energyplus 中的上海市典型气象年天气数据作为输入参数，模拟计算目标建筑典型日冷热电负荷。

3.2.2 案例计算

本案例使用 Designbuilder 建立园区建筑模型，如图 3 所示，根据园区设计图纸设置模型参数，如表 3 所示。使用 Energyplus 模拟得到全年冷热电负荷情况，如图 4 所示，选择夏季典型日计算园区整体冷负荷、电负荷与光伏发电情况，本案例中的园区由于屋顶设计了标志性钢结构流线造型，考虑到建筑承重有限，因此仅在造型上敷设了少量光伏，约占建筑屋顶面积的 10%。

通过改变园区屋顶光伏面积占比（ σ_{PV} ），即园区分布式光伏发电量在能源站总用电量中的占比（ δ_{PV} ），设置了 4 个 case 进行研究，分别是

case1： $\sigma_{PV} = 0$ （无光伏 $\delta_{PV} = 0$ ）；case2： $\sigma_{PV} = 0.92\%$ （园区实际情况 $\delta_{PV} = 10\%$ ）；case3： $\sigma_{PV} = 15.34\%$ （一般低碳园区光伏覆盖情况 $\delta_{PV} = 30\%$ ）；case4： $\sigma_{PV} = 34.71\%$ （理想情况 $\delta_{PV} = 100\%$ ），使用 NSGA-II 算法计算不同光伏覆盖率情况下该低碳园区蓄冰空调系统的多目标优化运行策略结果。

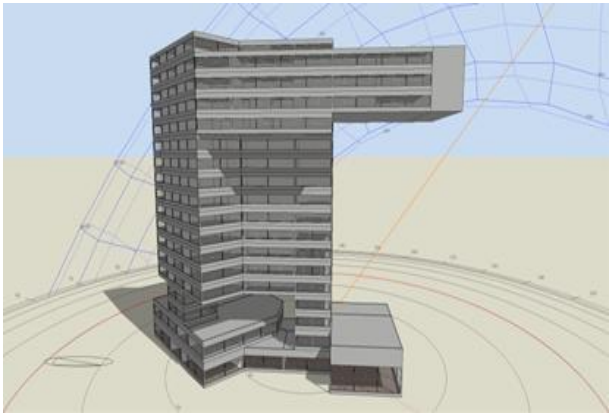


图 3 某项目园区代表建筑模型（基于 Designbuilder 建立）

Fig.3 Representative architectural model of a project campus (based on Designbuilder)

表 3 该项目建筑围护结构参数设计值

Table 3 Building envelope parameters

围护结构	设计值	负荷设计余量
屋面（疏散平台）传热系数	0.48W/(m ² ·K)	夏季 1.15 冬季 1.25
屋面传热系数	0.46W/(m ² ·K)	
外墙传热系数	0.77W/(m ² ·K)	
底部架空楼板传热系数	0.85W/(m ² ·K)	
外窗传热系数	2.1W/(m ² ·K)	
窗墙比	52.75%	
体型系数	0.22	

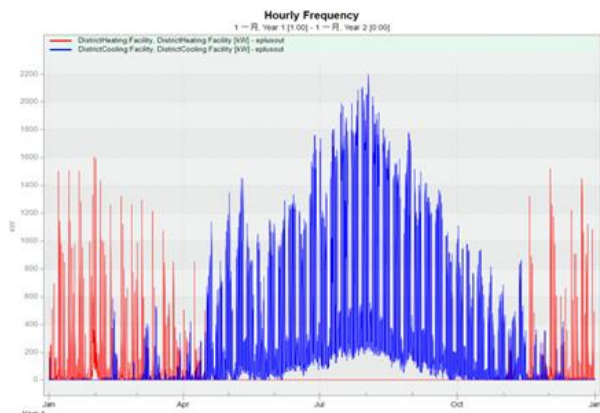


图 4 某项目园区全年负荷模拟曲线
(基于 Energyplus 模拟)

Fig.4 Annual load simulation curves (based on Energyplus simulation)

使用 NSGA-II 算法对该多目标问题进行求解, 得到以下结论:

Case 1: $\sigma_{PV} = 0$ (无光伏 $\delta_{PV} = 0$)

以该情景作为基础参照模型, 模拟得到的设备运行策略结果与电力平衡情况如图 5、6 所示, 由于系统中没有光伏的接入, 所有设备能量来源均为电网取电, 计算结果显示, 为达到运行费用优化目标, 通过夜间大量蓄冰为系统的日间运行提供充足冷量, 系统蓄冰率为 48.77%, 蓄冰空调系统白天由基载制冷机组为主导进行供能, 双工况冰蓄冷机组作为补充供冷手段, 在白天部分运行。

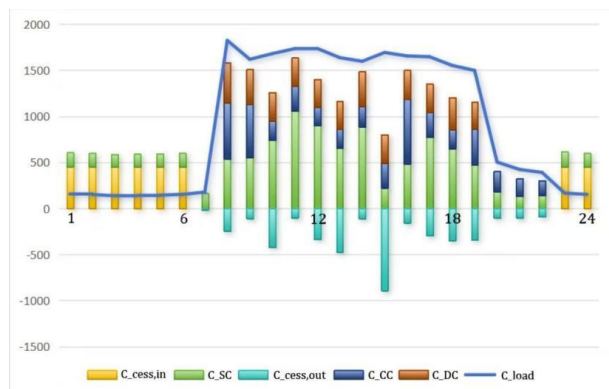


图 5 冰蓄冷空调机组优化运行示意图-case1

Fig.5 Schematic diagram of optimized operation of ice storage air-conditioning unit (case1)

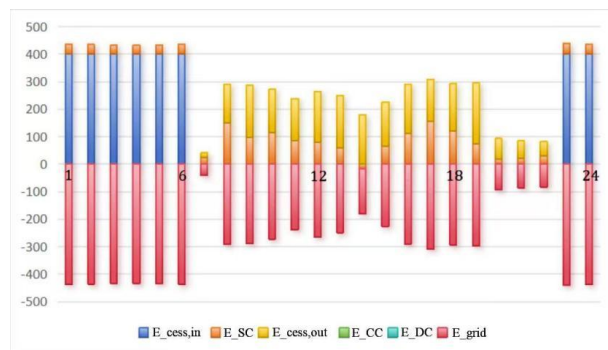


图 6 电力平衡图-case1

Fig.6 Power balance diagram (case1)

注: $E_{\text{cess,in}}$: 蓄冰系统充冷功率; E_{SC} : 基载螺杆式冷水机组运行功率; $E_{\text{cess,out}}$: 蓄冰系统放冷功率; E_{CC} : 基载离心式冷水机组运行功率; E_{DC} : 双工况离心式冷水机组运行功率; E_{grid} : 电网取电量; E_{pv} : 光伏发电功率; $C_{\text{cess,in}}$: 蓄冰系统充冷量; C_{SC} : 基载螺杆式冷水机组制冷量; $C_{\text{cess,out}}$: 蓄冰系统放冷量; C_{CC} : 基载离心式冷水机组制冷量; C_{DC} : 双工况离心式冷水机组制冷量; C_{load} : 逐时冷负荷需求量

Case 2: $\sigma_{PV} = 0.92\%$ (园区实际情况 $\delta_{PV} = 10\%$)

模拟得到的设备运行策略结果与电力平衡情况如图 7、8 所示, 考虑夜间低谷电价时蓄冰, 蓄冰率为 29.01%, 符合蓄冰率调研结果范围; 早上 7 点开启基载螺杆机进行预冷, 随后的 2 小时使用蓄冰满足园区建筑冷负荷; 接下来园区建筑冷负荷增加, 逐步开启基载离心式冷水机组; 随着基载机组无法满足末端需求, 开启双工况离心式冷水机组进行制冷补充; 下午 14 时考虑到尖峰电价, 使蓄冰装置以最大功率放能, 以减少制冷机组能耗; 进入平价电价时段再逐步增加基载机组运行功率, 随后冷负荷需求降低优先关闭双工况离心式冷水机组。由图可知, 系统经过多目标优化后的用能曲线几乎不受当日电价波动影响。目前实际建筑光伏发电量约占总电量 1%, 对系统运行的影响不大, 波动主要体现在正午 12-14 时, 少量光伏发电的接入反而增加了系统能量曲线的波动性。此外, 在该光伏面积比例情境下, 通过算法优化能够降低碳排放量 11.26%, 减少运行费用 2.53%。



图 7 冰蓄冷空调机组优化运行示意图-case2

Fig.7 Schematic diagram of optimized operation of ice storage air-conditioning unit (case2)

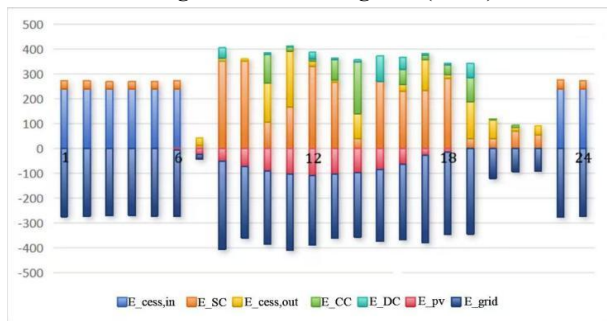


图 8 电力平衡图-case2

Fig.8 Power balance diagram (case2)

Case 3: $\sigma_{PV} = 15.34\%$ (一般低碳园区光伏覆盖情况 $\delta_{PV} = 30\%$)

模拟得到的设备运行策略结果与电力平衡情况如图 9、10 所示, 将光伏发电量占比增加到电力总用量的 30% 时, 再次对该冰蓄冷空调系统运行策略进行多目标优化, 计算得到系统蓄冰率为 15.92%, 得到相对平缓且中部呈现凹陷状态的电力需求曲线, 在这种情况下带来收益包括: 降低运行碳排放量 22.89%, 降低运行电费 20.42%。

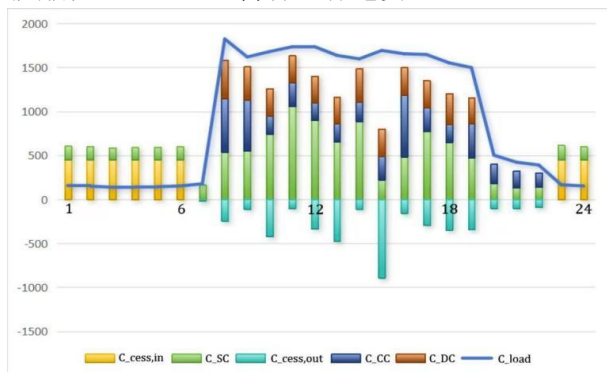


图 9 冰蓄冷空调机组优化运行示意图-case3

Fig.9 Schematic diagram of optimized operation of ice storage air-conditioning unit (case3)

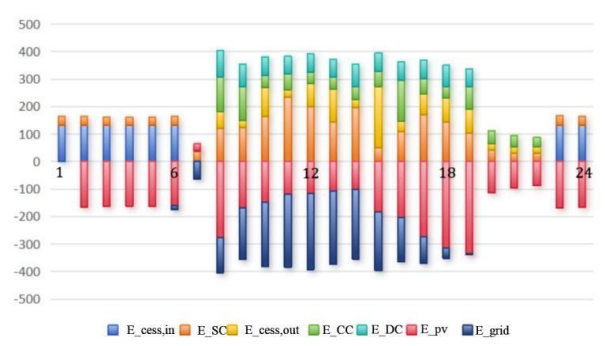


图 10 电力平衡图-case3

Fig.10 Power balance diagram (case3)

Case 4: $\sigma_{PV} = 34.71\%$ (理想情况 $\delta_{PV} = 100\%$)

考虑理想低碳建筑情况, 模拟得到的设备运行策略结果与电力平衡情况如图 11、12 所示, 将该建筑屋顶表面最大限度铺设光伏板, 再次使用遗传算法对该优化对应的系统运行策略, 系统蓄冰率为 12.56%, 得到对应系统应能曲线, 电力需求曲线受可再生能源和实时电价影响, 建筑整体用电需求高峰呈现明显后移现象, 峰值期为 16-18 点, 在这种情况下带来收益包括: 降低运行碳排放量 43.61%, 降低运行电费 45.54%。该系统作为当地大型商业园区用能代表, 用电需求峰值后移也能够有效缓解当地电网高峰期用电紧张现象。

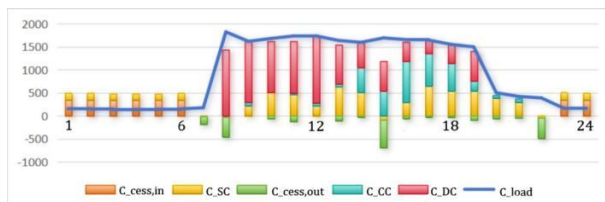


图 11 冰蓄冷空调机组优化运行示意图-case4

Fig.11 Schematic diagram of optimized operation of ice storage air-conditioning unit (case4)

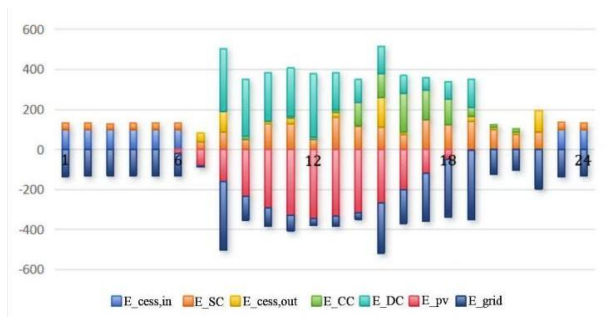


图 12 电力平衡图-case4

Fig.12 Power balance diagram (case4)

3.3 计算结果分析

本节以一个实际园区的案例,改变园区屋顶光伏面积,即改变园区分布式光伏发电占能源站用电比例,设置了四个Case,分别采用通过对比分析四个模拟结果,如表4所示。

表4 该项目各情景对应光伏面积比例及模拟结果

Table 4 Proportion of PV area corresponding to each scenario of the project and simulation results

情景	δ_{PV}	σ_{PV}	蓄冰率	减少碳排放量	减少运行电费
Case1 (参照)	0%	0%	48.77%	——	——
Case2	10%	0.92%	29.01%	11.26%	2.53%
Case3	30%	15.34%	15.92%	22.89%	20.42%
Case4	100%	34.71%	12.56%	43.61%	45.54%

得到以下结论:随着园区分布式可再生能源占比提高,园区冰蓄冷空调系统蓄冰率显著下降,能够为园区能源站节省储能空间,降低项目初始投资;此外,随着屋顶光伏面积的增加,调用多目标优化算法计算得到的运行策略能够为园区带来的减碳效果和经济效益也随之增加。

4 结论与讨论

本文针对冰蓄冷空调供能源系统的经济-碳排放多目标优化调度问题,从园区改变屋顶光伏覆盖率角度出发,基于能源交换网络,搭建了一个高效运转的冷热电联供能源网络架构对综合能源系统内多种供能及蓄能设备进行建模。通过NSGA-II算法建立了冷热电联供能源系统的多目标经济调度模型,该模型综合考虑了系统的日运行费用和碳排放量,旨在通过优化调度策略实现两者的共同最小化,从而整合和优化各种能源转换和存储过程,有效提升了整个能源系统的运行效率。

算例表明,随着园区屋顶光伏面积比例的增加,可再生能源接入园区,在经济与碳排放优化目标下,蓄冰空调系统蓄冰率降低,这意味着园区通过合理配置屋顶光伏比例,能够减少蓄冰容积,达到经济、节能、减碳的效果。此外,该算例通过调度冷热电能各供能设备的运行方式和出力,可以显著降低系统的日运行费用和碳排放量,降低运行阶段日碳排放量11.26%至43.61%,节省日运行费用

2.53%至45.54%,实现冷热电联供能源系统的经济优化运行,最终得到符合未来低碳社会发展的合理调度计划与方案。

随着未来分布式可再生能源的进一步渗透,蓄冰系统也可以作为消纳可再生能源的手段之一,在本文中蓄冰系统作为削峰填谷的单向供能设备,从经济性角度出发,仅考虑了夜间蓄冰的情况,未考虑其在可再生能源消纳中的潜力,在后续研究中,可以进一步深入这方面的研究,全面发掘冰蓄冷空调在低碳园区中的作用。

参考文献:

- [1] 杨鑫磊.中国可再生能源发展现状、挑战及政策建议[J].科技和产业,2024,24(18):156-159.
- [2] 马华,方叶兵,贝亦明,等.中国可再生能源发展水平时空分异特征及影响因素[J/OL].北京大学学报(自然科学版),1-13[2024-11-28].
- [3] 唐西胜,李伟,沈晓东.面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J].电力系统自动化,2024,48(9):178-191.
- [4] Zhu H, Li H, Liu G, et al. Energy storage in high variable renewable energy penetration power systems: technologies and applications[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020,9(6):2099-2108.
- [5] 石军兵,徐雪青,祝磊.低碳相变混凝土对办公建筑空调能耗的影响研究[J].安阳师范学院学报,2024,26(5):92-96.
- [6] Kasaeian A, Bahrami L, Pourfaya F, et al. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review[J]. Energy and Buildings, 2017,154:96-112.
- [7] 贾敬芝.近零能耗建筑中相变建筑材料的研究进展[J].暖通空调,2021,51(2):47-54.
- [8] 李亚龙,林理符,许志昆.计及柔性负荷的虚拟电厂日前优化调度方法[J].河北电力技术,2024,43(5):27-33.
- [9] 田子豪,王怡,杨知方.考虑冰蓄冷空调投资效益的分时电价优化设计[J].东北电力大学学报,2022,42(6):19-27.
- [10] Gregor P Henze, Bernd Biffar, Dietmar Kohn, et al. Optimal design and operation of a thermal storage system for a chilled water plant serving pharmaceutical

- buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2007,40(6):1004-1019.
- [11] 曹建伟,黄申,孙毅,等.冰蓄冷空调群参与风光本地消纳的微网随机经济调度策略[J].*南方电网技术*,2022,16(8):68-78.
- [12] 孙可,何德,李春筱,等.考虑冰蓄冷空调多模式的工厂综合能源系统多能协同优化模型[J].*电力建设*,2017,38(12):12-19.
- [13] 张勇军,李其霖,黄健昂.冰蓄冷空调直接供冷电费贯序削减趋优控制方法[J].*电力科学与技术学报*,2021,36(3):92-99.
- [14] Sha H, Xu P, Hu C, et al. A simplified HVAC energy prediction method based on degree-day[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,51:101698.
- [15] Singh Rana Veer Pratap, Singh Jaivardhan, Mathur Jyotirmay, et al. Calibrated simulation study for efficient sizing and operating strategies for the thermal storage integrated air conditioning system[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2021,40(4):389-411.
- [16] 中国建筑标准设计研究院.全国民用建筑工程设计技术措施(2009)暖通空调·动力[M].2009:140-144.
- [17] 牛满坡,王鲁鹏,张亦凝,等.某办公建筑冰蓄冷空调系统双工况冷水机组选型分析[J].*制冷与空调*,2023,23(8):48-53,92.
- [18] 李兰.某体育馆冰蓄冷空调方案经济性分析[J].*建筑节能*,2020,48(10):93-96.
- [19] 牛满坡,王鲁鹏,张亦凝,等.某办公建筑冰蓄冷空调系统双工况冷水机组选型分析[J].*制冷与空调*,2023,23(8):48-53,92.
- [20] 陈世玉.冰蓄冷冷源系统经济性分析与设计[J].*应用能源技术*,2020,(3):10-14.
- [21] 邹明霞,申瑞杰,陈凤君.北京某办公建筑冰蓄冷空调系统技术的应用[J].*节能与环保*,2020,(12):79-81.
- [22] 徐誉玮,胡宗宝,周涛,等.高效制冷与蓄冷耦合集中供冷系统经济运行敏感因素分析—以超大型城市核心区域供冷项目为例[J].*暖通空调*,2023,53(S2):89-92.