

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-685-07

夏热冬冷地区办公建筑冰蓄冷空调系统 仿真实践与经济潜力分析

刘铁凝 徐杨 王梓冰 顾磊 潘文卓 陈小凡

(常州市建筑科学研究院集团股份有限公司 常州 213000)

【摘要】 冰蓄冷空调技术通过夜间利用电网谷电蓄冰, 日间用电高峰时段融冰供冷, 以实现“移峰填谷”。以常州市某办公大楼为例, 将现场检测实践与仿真计算相结合, 对冰蓄冷空调系统进行负荷、能耗分析以及经济性分析, 并基于序列最小二乘规划算法建立针对冰蓄冷空调系统经济效益的潜力分析模型, 为运行方案设计的经济效益水平设立衡量基准。实践与研究结果表明, 在同等条件下, 所述项目应用冰蓄冷空调系统在6月-9月四个月间可节省20.55%的电费开销; 经潜力计算, 其电费节约量最高可达26.33%。

【关键词】 冰蓄冷; 逐时负荷仿真; 能耗分析; 经济性分析; 潜力模型
中图分类号 TU831.6 文献标志码 A

Numerical Practice and Potential Analysis of Economic Effectiveness on Ice Storage System of Office Buildings Hot-summer and Cold-winter Zone

Liu Tiening Xu Yang Wang Zibing Gu Lei Pan Wenzhuo Chen Xiaofan

(Changzhou Institute of Building Science Group Co., Ltd, Changzhou, 213000)

【Abstract】 Ice storage-air conditioning can achieve “peak clipping and channel filling” by storing ice at night and cooling during the day. Focusing on a practical engineering, in this study, load calculation, energy consumption calculation and economic analysis have been conducted, subsequently, potential analysis of economic benefit model basing on SLSQP (Sequential Least Squares Programming) were built to measure economic benefit of different operation schemes. Results show that under the same conditions, ice storage system of this project can save 20.55% of electricity costs during the four months from June to September, and the potential cost can achieve 26.33% of electricity expenses saving.

【Keywords】 Ice storage system; Hourly load simulation; Energy consumption analysis; Economic analysis; Potential model

0 引言

据统计, 空调耗电量占公共建筑能耗60%左右^[1], 是建筑节能领域的重点研究方向。冰蓄冷空调系统因有“移峰填谷”作用^[2,3], 于国家层面可减少电力建设投资及碳排放^[4,5], 于用户端可减少电费开销, 已在我国得到快速推广与应用。

目前关于冰蓄冷空调系统应用的研究多集中于运行策略的设计与分析^[6-8], 或着眼于不同运行策略及系统间的比较^[9-11], 而以实际项目为例将现场实测与仿真计算相结合的研究较少, 有关实际运行中的系统经济潜力分析相对缺乏。现场实测不仅能为仿真计算提供更真实可信的关键数据以保证

基金项目: 创新能力建设计划(研发机构)——碳达峰碳中和科技专项资金项目(BM2022035)

作者(通讯作者)简介: 刘铁凝(1992-), 男, 硕士, 助理工程师, E-mail: 2275362885@qq.com

收稿日期: 2024-07-03

结果的准确性,同时可作为实践案例积累供其他工程参考借鉴。因此基于工程实际,探究冰蓄冷系统的经济效益潜力作为运行策略进一步优化设计的基准具有重要的现实意义。

本文研究的内容与目的如下:(1)根据项目实际情况对冰蓄冷系统进行策略分析、现场检测及仿真模拟,以得到可靠的负荷及耗电量计算结果;(2)设立条件相同的常规冷水机组系统对照组,展开经济性分析,以验证现实工程中冰蓄冷系统的优势所在;(3)进行经济效益潜力分析,基于SLSQP算法(Sequential Least Squares Programming,序列最小二乘规划算法)建立具备普遍适用性的潜力分析模型,计算利用冰蓄冷系统可达到的最大经济效益,为进一步的策略设计提供基准。

1 建筑及系统概况

项目位于常州市钟楼区,应用冰蓄冷空调系统的建筑为某办公大楼,楼高75.30m,地上共16层,建筑面积52678.44m²,空调供冷采用双工况冰蓄冷空调系统,主要设备型号见表1,双工况主机不同工况下的主要性能参数见表2,其中不同负荷下的COP值由机组厂家提供,水泵及冷却塔主要性能参数见表3,蓄冷装置选用钢制盘管蓄冰装置,总潜热蓄冷量可达3972RTH。

表1 主要设备型号

Table 1 Unit type

| 设备分类 | 型号 |
|-------------|---------------|
| 双工况水冷离心冷水机组 | YKFJD7Q75EOH |
| 冷却塔 | LRCM-HS-250C2 |
| 冷冻水泵 | WE3-250M-4 B3 |
| 乙二醇泵 | WE3-225S-4 B3 |
| 冷却水泵 | WE3-250M-4 B3 |

表2 双工况主机性能参数表

Table 2 Performance parameter of air condition unit

| 工况 | 额定 | 额定 | COP | COP | COP | COP |
|------|--------|-------|----------|---------|---------|---------|
| | 制冷量/kW | 功率/kW | (100%负荷) | (75%负荷) | (50%负荷) | (25%负荷) |
| 空调工况 | 1875 | 347.2 | 5.404 | 5.760 | 6.087 | 6.503 |
| 蓄冷工况 | 1163 | 307.4 | 3.783 | 4.520 | 5.401 | 4.150 |

表3 水泵及冷却塔参数表

Table 3 Performance parameter of water pumps and cooling tower

| 种类 | 流量/(m ³ /h) | 扬程/m | 功率/kW | 数量 |
|------|------------------------|------|---------|------|
| 冷冻水泵 | 445 | 30 | 55 | 2用1备 |
| 冷却水泵 | 443 | 35 | 55 | 2用1备 |
| 乙二醇泵 | 317 | 32 | 37 | 2用1备 |
| 冷却塔 | — | — | 7.5/2.2 | 4 |

冰蓄冷空调系统运行策略设计时,考虑融冰设备性能对释冷速率的限制、释冷量波动对系统稳定性的影响、融冰与制冷机释冷量比例对系统效率的等多种影响因素^[12],系统运行模式如下:

(1)在晚间00:00-6:00,两台双工况主机共同制冰;

(2)6:00-8:00期间由基载主机供冷,双工况主机补充,8:00过后日间部分负荷时优先融冰;

(3)当夜间蓄冷量不能满足日间冷负荷需求时,双工况主机与蓄冰装置联合供冷,融冰尽量保证匀速释冷以保证系统稳定性;

(4)在主机与蓄冰装置联合供冷时,为保证系统高效率运行,优先开启一台主机,当负荷达到主机额定负荷80%时,开启第二台主机,以保证主机可多数时间在高能效区间的工况下运行。

2 检测实践与仿真模拟

2.1 检测实践

根据JGJ/T 177-2009《公共建筑节能检测标准》与JGJ/T 260-2011《采暖通风与空气调节工程检测技术规程》对冰蓄冷空调系统进行现场检测,制冷机房现场如图1所示。



图1 制冷机房现场

Fig.1 Refrigerating station

经形式检查确认建设资料合规、设备关键部件合格、系统完整且运行正常, 其后对系统进行性能检测, 检测设备如表 4 所示。

表 4 检测设备表

Table 4 Checkout equipment

| 设备分类 | 型号 | 量程 | 精度 |
|--------|----------|------------|-------|
| 钳形功率计 | CM3286 | 60mA-600A | ±0.7% |
| | | 5W-360kW | |
| 超声波流量计 | TDS-100H | 0.01-25m/s | ±0.5% |
| 温湿度计 | RC-4HC | -40℃-85℃ | ±0.5% |
| | | 0%-100%RH | |

注: 钳形功率计测点位置在电源输入端; 超声波流量计测点位置在冷冻水管道; 温湿度计测点位置在功能房间内部。

本次测试时间为 2023 年 7 月 25 日至 7 月 30 日, 测试期间内室外最高及最低温度分别为 32.8℃ 与 26.7℃, 最高及最低相对湿度分别为 86.3% 与 55.3%。

测量参数包括冷冻水供回水温度、流量以及功能房间室内温度, 空调水系统输送冷热量和室内热舒适参数的测量均在系统已连续正常运行 2h 后进行, 各参数的自动储存记录时间间隔为 10 分钟。测试结果如表 5 所示。

表 5 测试结果

Table 5 Test result

| 测试参数 | 测试值 |
|-----------|------------------------|
| 冷冻水供水平均温度 | 7.6℃ |
| 冷冻水回水平均温度 | 12.05℃ |
| 冷冻水平均流量 | 839.3m ³ /h |
| 功能房间平均温度 | 26.8℃ |

冷负荷计算如式 (1) [13]。

$$Q = C \cdot m \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

其中: Q 为冷负荷, kW; C 为工质比热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; m 为冷冻水流量, m^3/h ; T_1 为冷冻水供水温度, $^{\circ}C$; T_2 为冷冻水回水温度, $^{\circ}C$ 。

经计算, 测试期间平均冷负荷为 4357.5kW。

2.2 负荷模拟

由于本研究旨在对冰蓄冷系统在制冷工况下的运行状态进行分析研究, 经咨询大楼管理人员得知该冰蓄冷空调系统主要于六月初至九月末启用,

故模拟时间选取全年空调负荷最大的 6-9 月进行模拟计算, 根据《中国建筑热环境分析专用气象数据集》, 6-9 月逐时干球温度如图 2 所示, 逐时辐照量如图 3 所示, 全年最热工况出现在 7 月 20 日 15 时, 干球温度为 37.2℃, 湿球温度为 27.8℃。

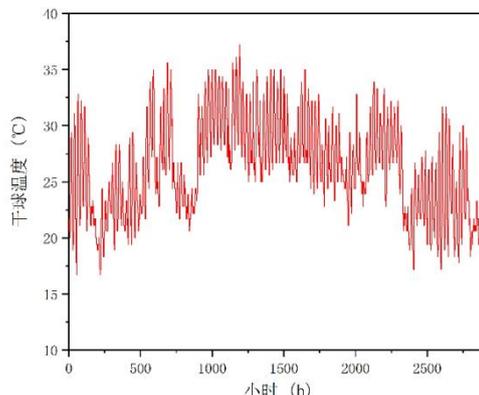


图 2 逐时干球温度

Fig.2 Hourly dry-bulb temperature

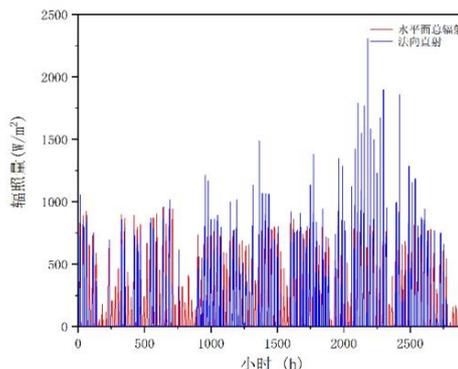


图 3 逐时辐照量

Fig.3 Hourly irradiation

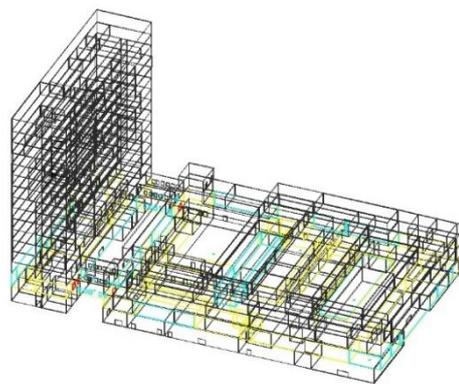


图 4 三维模型

Fig.4 Three-dimensional model

本次仿真计算中的逐时负荷模拟采用 DeST 软件, 建立三维模型如图 4 所示, 外围护结构构造及

材料参照建筑图纸设置，屋面平均传热系数 $0.44\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，吸收系数 0.75；外墙总体平均传热系数 $0.70\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，吸收系数 0.75；挑空楼板传热系数 $0.68\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；外窗 1 传热系数 $2.10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，太阳得热系数 0.35，可见光透射比 0.62；外窗 2 传热系数 $2.10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，太阳得热系数 0.44，可见光透射比 0.62。

建筑内各房间区域温度设置参考现场检测结果，功能房间平均温度为 26.8°C ，人员密度、设备密度、人员及设备作息时间表依现场调研结果设置，人员及设备散热综合考虑实际情况与标准值设置。

在典型气象时段 7 月 22 日上午 8:00-12:00 内，室外干球温度为 28.3°C - 32.2°C ，相对湿度为 68.2%-84%，该时段室外温湿度条件与现场测试时的气候条件相近，故选取此时段的负荷计算结果与实测结果进行对比，以验证本次负荷模拟计算的准确性。

经计算该时段平均冷负荷为 4193.9kW ，与实测结果差距为 3.75%，故可认为模拟结果可靠。

对 6 月 1 日至 9 月 30 日进行仿真模拟计算，2928 小时的逐时冷负荷计算结果如图 5 所示。

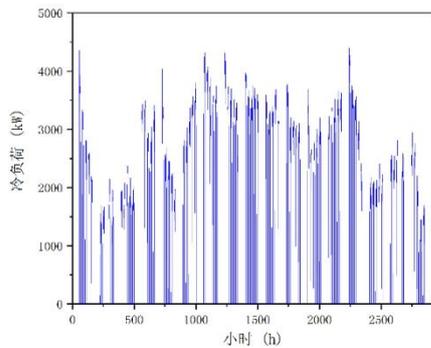


图 5 逐时冷负荷

Fig.5 Hourly cooling load

经负荷计算，6 月-9 月期间总耗冷量为 2625271kWh ，冷负荷高峰出现于 7 月 15 日，该日总耗冷量达到 49179.65kWh 。

2.3 能耗计算

在双工况系统运行时，夜间蓄冰，白天融冰、必要时开启冷水机组供，总耗电量计算如公式 (2) [13]。

$$E = \sum E_V + \sum E_P \quad (2)$$

其中： E 为总耗电量； E_V 为夜间蓄冷逐时耗电

量； E_P 为日间供冷逐时耗电量。

E_V 的计算如公式 (3)。

$$E_V = \frac{ESC}{COP_A} + \sum ECR_A \cdot ESC + E_A \quad (3)$$

其中： ESC 为蓄冷量， kWh ； COP_A 为机组蓄冷效率； ECR_A 为蓄冷线路上泵的耗电输冷比； E_A 为蓄冷过程中冷却塔及冷却泵的耗电量， kWh 。

日间供冷时段可分为三种工况，当冷负荷全部由融冰提供时， E_P 的计算如公式 (4)。

$$E_P = \sum ECR_M \cdot Q \quad (4)$$

其中： ECR_M 为冰蓄冷系统融冰过程线路上泵的耗电输冷比； Q 为冷负荷， kW 。

当主机与蓄冰装置联合供冷时， E_P 的计算如公式 (5)。

$$E_P = \sum ECR_M \cdot ERC + \frac{Q - ERC}{COP_C} + \sum ECR_C \cdot (Q - ERC) + E_C \quad (5)$$

其中： ERC 为融冰释冷量； COP_C 为冷水机组空调制冷效率； ECR_C 为冷水机组空调制冷线路上各泵的耗电输冷比； E_C 为空调制冷过程中冷却塔及冷却泵的耗电量， kWh 。

当仅由主机供冷时， E_P 的计算如公式 (6)。

$$E_P = \frac{Q}{COP_C} + \sum ECR_C \cdot Q + E_C \quad (6)$$

根据厂家提供的样本数据，利用最小二乘法拟合机组 COP 曲线，结合建筑的负荷计算结果及设备性能曲线，对系统进行能耗计算，6 月-9 月的逐日耗电量计算结果如图 6 所示，四个月的总耗电量为 682621.32kWh ，日耗电量最高值同样出现在 7 月 15 日，日耗电量为 12034.27kWh 。

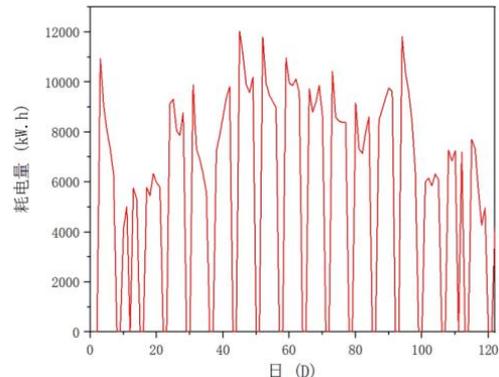


图 6 逐日耗电量

Fig.6 Daily power consumption

3 效益分析

冰蓄冷空调系统通过“移峰填谷”减少电网侧生产电的碳排放量。峰谷电价是电网电力供需情况另一种形式的体现,因此,冰蓄冷空调系统的经济效益同时也可反映其减碳效益水平。

3.1 经济性分析

设立常规冷水机组系统作为对照组,分析双工况冰蓄冷系统在本工程项目中所能获取的经济效益。

对照组中冷水机组系统使用主机及其它设备型号均与原系统相同,为满足全时段供冷需求,基载主机与两台双工况主机联合供冷,根据逐时冷负荷量确定主机开启台数。

根据国网江苏省电力有限公司发布购电公告,2023 年常州市 6-9 月企业电费标准如表 6 所示。

表 6 2023 年常州市企业电费标准

Table 6 Business electricity charge standard of Changzhou in 2023

| 月份 | 时段 | 电价 (元 /kWh) | 月份 | 时段 | 电价 (元 /kWh) |
|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|
| 六 月 | 00:00-08:00 | 0.3391 | 八 月 | 00:00-08:00 | 0.3497 |
| | 08:00-11:00 | 1.2549 | | 08:00-11:00 | 1.2941 |
| | 17:00-22:00 | | | 18:00-20:00 | |
| | 11:00-17:00 | 0.7506 | | 11:00-14:00 | 0.7740 |
| | 22:00-24:00 | | | 15:00-18:00 | |
| | 七 月 | 00:00-08:00 | | 0.3557 | 九 月 |
| 08:00-11:00 | | 1.3161 | 14:00-15:00 | | |
| 18:00-20:00 | | | 0.3443 | 20:00-21:00 | |
| 21:00-22:00 | | 0.7872 | | 00:00-08:00 | |
| 11:00-14:00 | | | 08:00-11:00 | | |
| 15:00-18:00 | | | 17:00-22:00 | 1.2742 | |
| 22:00-24:00 | 11:00-17:00 | | | | |
| 14:00-15:00 | 1.5793 | 22:00-24:00 | 0.7621 | | |
| 20:00-21:00 | | | | | |

经计算,双工况冰蓄冷系统与常规冷水机组系统对照组逐日耗电量对比见图 7,用电花费对比见图 8。

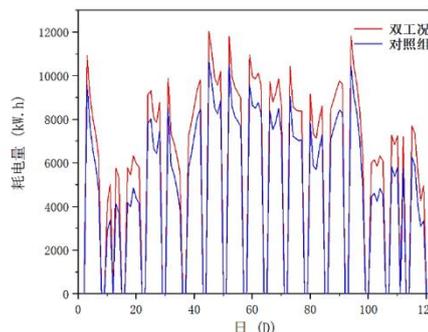


图 7 逐日耗电量对比图

Fig.7 Comparison of daily power consumption

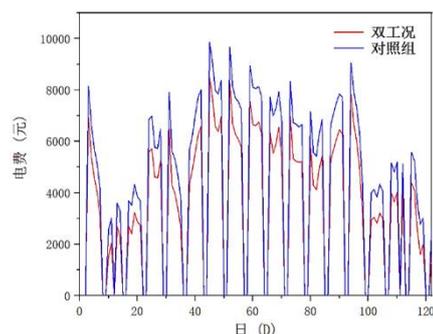


图 8 逐日电费对比图

Fig.8 Comparison of electric charge

在 6-9 月间,双工况冰蓄冷系统耗电量为 682621.32kWh,电费开销共 411619.19 元;对照组耗电 564344.20kWh,电费开销共 518081.65 元。通过对比分析可知,由于机组蓄冰工况 COP 相对较低且系统制冰-融冰过程环路更为复杂,相对于冷水机组系统,虽然应用冰蓄冷系统总耗电量增加 20.96%,但通过合理利用夜间谷电,在四个月内日间移峰电量共 234077.2kWh,电费开销节省 20.55%,共节省 106462.46 元。

对比电费计算结果发现,在夜间蓄冷量可满足日间 8:00-18:00 冷负荷需求的日期,经济效益更为理想,可节约 40%左右的电费支出;当夜间蓄冷量占日间冷负荷 35%以上时,经济效益受由负荷率变化所引起的机组 COP 波动影响较大;当日间蓄冷量小于日间冷负荷 35%时,由于融冰释冷量占比较小,电费支出减少比率也随之降低。

3.2 经济潜力分析

在双工况冰蓄冷空调系统中,经济效益受环境及建筑本体条件与系统设备条件等复杂因素共同影响,需根据不同因素的影响程度差别设定运行策略以实现经济效益的提高。

上文所述项目中所设运行策略考虑了盘管性

能、系统控制复杂程度等制约因素，若要进一步提高经济效益，则需要综合考虑融冰冷量在日间冷负荷中的占比、双工况机组不同工况下 COP 差距、不同负荷下系统能效波动及不同时段电费差等影响因素，权衡逐时负荷分配，进行策略优化，以实现经济效益最大化，即冰蓄冷空调系统的经济潜力。

为实现上述目的，本小节将基于 SLSQP 算法（Sequential Least Squares Programming，序列最小二乘规划）建立数学模型，以分析冰蓄冷空调系统的经济潜力，首先，潜力分析需设立如下理想化假设。

- (1) 不考虑释冷量波动对输配系统的影响；
- (2) 双工况系统可实现复杂调控。

SLSQP 是一种基于最小二乘法和二次规划的优化算法，可在目标变量受约束函数限制的条件下，查找出最优值，符合本次经济潜力分析的计算

需求，约束条件如下。

- (1) 冰蓄冷系统夜间蓄冷量不超过蓄冰装置容量；
- (2) 冰蓄冷系统日间释冷量不超过其夜间蓄冷量；
- (3) 主机供冷工况及蓄冰工况负荷率均需小于 100%；
- (4) 融冰供冷量与主机供冷量之和等于实时负荷。

计算逻辑图见图 9，通过设置限定条件及电费标准，调用双工况主机的 COP 曲线，将计算日期的逐时负荷输入函数中，利用 SLSQP 算法求解查找最优负荷分配方案及电费支出最小值，逐日将电费支出累计相加，即可得到计算时间内的最低电费支出，即经济效益的潜力值。

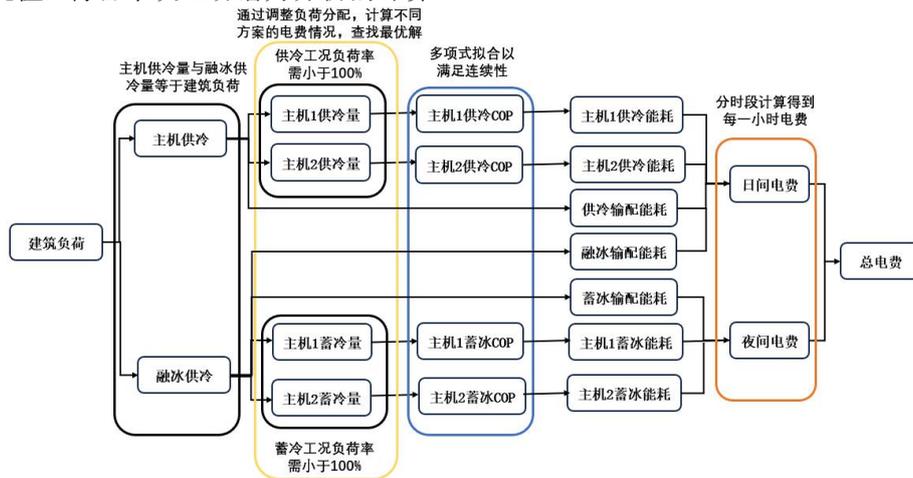


图 9 利用 SLSQP 算法计算逻辑图

Fig.9 Algorithmic logic diagram of SLSQP

以上文所述项目为例，通过计算，6月-9月四日间经济效益潜力值与原方案及常规冷水机组系统方案的逐日电费对比如图 10 所示。

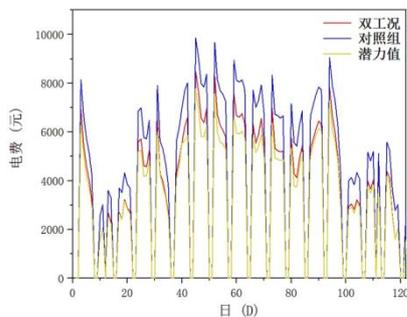


图 10 逐日电费对比图

Fig.10 Comparison of electric charge

计算得出通过运行方案调整可实现的最低电费总额为 381667.49 元，相对于常规冷水机组系统方案可实现 26.33% 的电费节省。

可将上述计算方法作为衡量运行方案经济效益的一项基准，由 C_c 表示常规系统的电费支出， C_d 表示设计方案的电费支出， C_p 表示利用上述数学模型计算所得最低电费支出，则潜力实现率 η_e 的表达式可表示为式 (7)。

$$\eta_e = \frac{C_c - C_d}{C_c - C_p} \tag{7}$$

经计算，上述项目中所设方案的潜力实现率为 78.04%。

此外,可通过增加相邻时段释冷量差值限制等约束条件对数学模型进行进一步完善以适用不同实际工程。

4 结论

冰蓄冷空调系统在供冷量调节、缓解峰谷用电不平衡、减少电网端碳排放等问题上具有明显作用。本次分析通过使用数值模拟方法,对冰蓄冷系统在实际项目中的应用进行了系统分析,并通过利用 SLSQP 算法建立了冰蓄冷系统经济潜力的数学模型,具体结论如下:

(1) 在所述项目中,相较于同等条件下的常规冷水机组系统,应用冰蓄冷系统在6-9月间日间移峰电量共234077.2kWh,共可节省106462.46元电费支出。

(2) 经潜力分析,在理想条件下,通过优化运行策略该冰蓄冷系统最多可减少26.33%的电费支出。

本研究以常州市某办公大楼为例,结合现场检测与仿真模拟方法,验证了实际项目中冰蓄冷空调系统的经济效益,可为冰蓄冷空调系统在现实工程中的应用与推广提供可靠的数据支持和设计参考;同时潜力分析不仅证明了冰蓄冷空调系统具备可观的优化空间,所建计算方法也可作为冰蓄冷系统运行策略的衡量基准,以评价其经济效益水平,对冰蓄冷系统的优化应用具有指导意义。

为进一步拓展本研究的现实价值,后续工作主要从以下两个方向展开。

(1) 获取不同气候条件和建筑类型的实际案例,对冰蓄冷空调系统的适用条件和影响因素进行分析;

(2) 将潜力分析计算方法与预测控制方法结合,以实现冰蓄冷空调系统运行策略的进一步优化。

参考文献:

- [1] 中电联电力评价咨询院,工业领域电力需求侧管理促进中心.全国电力消费重点指标分析[J].中国电力企业管理,2019,(16):48-53.
- [2] He M L, Hu Y Q, Zhang M M, et al. Analysis and Research on Ice Storage and Water Storage Air Conditioning System of an Electric Power Building[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,2141(1): 012010.
- [3] Wang J, Peng Y. Distributed Optimal Dispatching of Multi-entity Distribution Network with Demand Response and Edge Computing[J]. IEEE Access, 2020,(99): 141923-141931.
- [4] 徐鹏,潘安东,段之殷.冰蓄冷空调系统经济性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1): 109-116.
- [5] 樊瑛,龙惟定.冰蓄冷系统的碳减排分析[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(1):105-108.
- [6] 梁康元,孙云增,吴忠名,等.北京某办公楼冰蓄冷空调系统控制策略分析[J].暖通空调,2020,50(4):79-81,96.
- [7] 于军琪,赵何超,陈登峰.基于IW—ABW算法的冰蓄冷空调系统优化调度研究[J].建筑科学,2023,39(8):124-133,175.
- [8] 王潇,康旭源,燕达,等.基于冷量预测的商业综合体冰蓄冷控制方法研究[J].建筑科学,2022,38(12):7-16,66.
- [9] 吴昊,徐以洋,谢若怡,等.基于TRNSYS的冰蓄冷空调系统能耗和经济性分析[J].建筑节能,2020,48(11):33-37,105.
- [10] 杨进学,力乙轩.亚洲金融大厦冰蓄冷系统设计及经济性分析[J].制冷与空调,2021,21(10):1-6,25.
- [11] 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.
- [12] 王于虎.某冰蓄冷项目运行策略分析[J].制冷与空调,2022,22(5):53-55.
- [13] 周昕玮.西北某机场能源站冰蓄冷空调负荷预测及优化运行策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.