

冰蓄冷空调直接供冷电费贯序削减 趋优控制方法

张勇军, 李其霖, 黄健昂

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:冰蓄冷空调优化控制方法中, 基于智能算法的控制方法建模及求解复杂, 可行性差, 而工程常用的控制方法经济效益不佳。为解决上述问题, 首先, 以机组工况容量、蓄冰容量为约束条件, 以日运行费用最小为目标函数, 构建冰蓄冷空调优化运行的数学模型。然后, 提出一种基于直接供冷电费贯序削减的冰蓄冷空调趋优控制方法, 根据电价及直接供冷电费的排序安排制冰及融冰的时段, 经迭代计算可寻得优化解。最后, 与 GAMS 软件优化结果相比较, 验证该方法的有效性, 与工程常用的控制方法相比较, 验证所提的方法的经济性和可行性。

关键词:冰蓄冷空调; 控制方法; 电费; 贯序削减

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.011 中图分类号:TM925 文章编号:1673-9140(2021)03-0092-08

An optimal control method of ice-storage air conditioning based on sequential reduction in direct cooling cost

ZHANG Yongjun, LI Qilin, HUANG Jianang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Among optimal control methods of ice-storage air conditioning, control methods based on intelligent optimization algorithms are complicated to solve and lack of feasibility, and common engineering control methods are of poor economic benefit. To solve the above problems, in this paper, the mathematical model of the ice-storage air conditioning optimal operation is built, in which the capacities of operation patterns and ice-storage capacity are constraint conditions, and the minimum daily operation cost is the objective function. Then, an optimal control method based on the sequential reduction in direct cooling cost is proposed. Periods of storing or melting ice can be planned according to the arrangement of electricity price and direct cooling cost. Through several iterative computations, an optimal solution can be found. The proposed control method is of certain reliability by making a comparison with the optimal result obtained by GAMS. Compared with common engineering control methods, the proposed method has good feasibility and economical efficiency.

Key words: ice-storage air conditioning; control method; electricity charge; sequential reduction

收稿日期:2019-11-03; 修回日期:2020-03-01

基金项目:国家自然科学基金(51777077)

通信作者:张勇军(1973-),男,博士,教授,主要从事电力系统无功规划与电压控制、主动配电网的规划与运行控制研究;E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

随着能源互联网的理论及技术不断深化发展,如何为用户提供清洁优质的能源成为备受瞩目的热点研究课题^[1-3]。储能是能源互联网中的重要环节,有利于提高能源利用效率及供能系统的稳定性^[4-6]。在城市用电中,空调用电所占比例很大。作为储能关键技术之一,冰蓄冷技术利用夜间廉价电力制冰蓄冷,在电价高峰时段融冰供冷^[7],以减少空调运行费用、平缓电网负荷、节能减排^[8-10]。

控制策略是影响冰蓄冷空调经济性的重要因素,良好的控制策略可以有效地降低冰蓄冷空调的运行费用,减少其投资回收期^[11]。

目前,冰蓄冷空调优化运行方面的研究主要着眼于冰蓄冷空调的详细建模,并以运行费用、能源损耗、环境影响等指标的最小化为目标函数,采用遗传算法、粒子群算法、混合整数非线性规划等算法进行寻优控制^[12]。文献[13]从能量、焓、经济、环境 4 个角度对冰蓄冷空调进行建模,采用遗传算法对系统运行及参数设计进行多目标优化。文献[14]在日前电价及负荷预测的场景下,提出双功能负荷转移优化算法对冰蓄冷空调进行优化控制。文献[15]以总运行费用最小为目标函数,采用混合整数线性规划实现优化运行。文献[16-17]对机组、风机、蓄冷设备进行详细建模,应用直接搜索复合形法寻优。文献[18]提出模型预测控制(model predictive control, MPC)算法,在冷负荷预测的基础上,对制冷机组及蓄冰装置的出力进行优化控制。文献[19]对能量存储系统建立复杂的数学模型,采用改进的细菌觅食算法(bacterial foraging algorithm, BFO)实现运行费用及污染排放的最小化。文献[20]的建模考虑了水的物态变化,采用非线性模型预测控制法(nonlinear model predictive control, NLMPC)对机组工况进行寻优。以上方法在实际操作中存在建模及算法复杂,寻优计算量大等问题。

工程上常用的控制方法有主机优先、融冰优先、定比例控制等,或者仅根据峰谷电价政策,甚至仅依靠运行人员的工作经验进行控制,不能达到良好的经济效益。

该文以日运行费用最小为趋优控制的目标,构建冰蓄冷空调优化运行的数学模型,以直接供冷电费贯序削减的方式,经迭代计算求得优化运行策略,

与工程常用控制方法进行经济性比较。

1 冰蓄冷空调优化运行的数学模型

冰蓄冷空调的工作模式可分为直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷、制冰同时供冷、制冷机与融冰同时供冷等模式。其中,前 3 种模式最为常见,如图 1 所示。

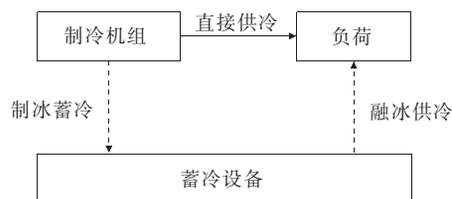


图 1 冰蓄冷空调常用工作模式

Figure 1 Common operation patterns of ice-storage air conditioning

该文以冰蓄冷空调日运行费用最小为目标函数,建立数学模型:

$$\min c = \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{q_d[t]}{\eta_d} + \frac{q_m[t]}{\eta_m} + \frac{q_f[t]}{\eta_f} \right) \cdot p[t] \quad (1)$$

式中 c 为冰蓄冷空调全天的运行费用,元; t 为时段, $t=1\sim 24$ h,该文以 1 h 为一个时段,可得全天 24 个时段; $q[t]$ 为第 t 时段的冷负荷, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $q_d[t]$ 、 $q_m[t]$ 、 $q_f[t]$ 分别为第 t 时段直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷的冷量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; η_d 、 η_m 、 η_f 分别为冰蓄冷空调直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷的能效比; $p[t]$ 为第 t 时段的电价,元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

冷负荷由直接供冷及融冰供冷 2 种工况所释放的冷量来满足,具体为

$$\text{s. t. } q_d[t] + q_m[t] = q[t] \quad (2)$$

容量约束,即各工况所提供的冷量应小于该工况的容量:

$$\begin{cases} 0 \leq q_d[t] \leq M_d \\ 0 \leq q_m[t] \leq M_m \\ 0 \leq q_f[t] \leq M_f \end{cases} \quad (3)$$

式中 M_d 、 M_m 、 M_f 分别为冰蓄冷空调系统在直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷工况下 1 h 所能提供的最大冷量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_x 为蓄冰设备的最大蓄冷量, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

此外,机组融冰供冷的总冷量应该小于制冰蓄冷的总冷量,即

$$\sum_{t=1}^{24} q_m[t] \leq \sum_{t=1}^{24} q_i[t] \leq Q_x \quad (4)$$

2 直接供冷电费贯序削减趋优控制方法

假设机组直接供冷工况的容量足够大,冷负荷全部由直接供冷工况满足,根据冷负荷及电价曲线,可计算得到全天直接供冷电费曲线。各时段的直接供冷电费计算公式:

$$s_0[t] = \frac{q[t] \cdot p[t]}{\eta_d} \quad (5)$$

式中 $s_0[t]$ 为第 t 时段的直接供冷电费,元。

目前,有根据电价曲线安排融冰供冷时段的控制方法,即以电价由高到低的顺序优先进行融冰供冷,但在仅考虑电价的情况下,较大可能出现非峰值电价时段内高峰冷负荷得不到满足的情况。

直接供冷电费正比于冷负荷及电价的乘积,当冷负荷或电价处于较高水平时,直接供冷电费处于较高水平。根据直接供冷电费的高低顺序安排融冰供冷可以兼顾冷负荷及电价两者的特性。

根据以上分析,可提出基于直接供冷电费贯序削减的冰蓄冷空调趋优控制方法,其基本思路为:按照电价由低到高的顺序,安排某一个时段以最高速率制冰蓄冷,所蓄的冷量按照直接供冷电费由高到低的顺序,以最高速率安排融冰供冷,从而实现各时段直接供冷电费按序排列逐个削减(即贯序削减),不足的冷量由机组直接供冷补充。每一次安排蓄冷和放冷后,计算其日运行费用。反复迭代,由于安排蓄冷时段电价的上升和安排融冰供冷时段电价的下降,运行费用存在极小值点。当本次日运行费用的计算结果高于上一次时,结束计算,上一次的工况安排即为所求的趋优控制策略。

其具体步骤的数学表达如下。

1) 获取冷负荷预测序列 Q 。

对次日冷负荷情况进行预测,得到次日的冷负荷预测序列 Q , $q[t]$ 为 Q 中的第 t 个元素,表示第 t 时段的冷负荷。

2) 获取电价序列 P , 与 t 组合排序得序列 P_A 。

根据电价政策得到电价序列 P , $p[t]$ 为 P 中的第 t 个元素,表示第 t 时段的电价。将序列 P 中的元素 $p[t]$ 与所对应的时段 t 组成数组 $[p[t], t]$, 按 $p[t]$ 的数值由低到高排序得序列 $P_A = [[p_{\min}, t_{p_{\min}}], \dots, [p_{\max}, t_{p_{\max}}]]$, $p_A[s][k]$ 为序列 P_A 中第 s 个数组的第 k 个元素, $s=1 \sim 24$; $k=1, 2$; $p_A[s][1]$ 为第 s 低的电价, $p_A[s][2]$ 为第 s 低的电价所对应的时段。

3) 计算直接供冷电费序列 S_0 及直接供冷总电费 c_0 , 将 S_0 与 t 组合排序得序列 S_A 。

按式(5)计算得到直接供冷电费序列 S_0 , 并计算直接供冷总电费,即

$$c_0 = \sum_{t=1}^{24} s_0[t] \quad (6)$$

将序列 S_0 中的元素 $s_0[t]$ 与所对应的时段 t 组成数组 $[s_0[t], t]$, 按 $s_0[t]$ 的数值由高到低排列得序列 $S_A = [[s_{\max}, t_{s_{\max}}], \dots, [s_{\min}, t_{s_{\min}}]]$, $s_A[s][k]$ 为序列 S_A 中第 s 个数组的第 k 个元素, $s_A[s][1]$ 为第 s 高的直接供冷电费, $s_A[s][2]$ 为第 s 高的直接供冷电费所对应的时段。

4) 变量初始化。

定义制冰蓄冷时段顺序变量 i , 融冰供冷时段顺序变量 j , $i, j = 1 \sim 24$, 初始值 $i = 1, j = 1$; 定义机组直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷工况序列分别为 Q_d, Q_m, Q_f , $q_d[t], q_m[t], q_f[t]$ 分别为 Q_d, Q_m, Q_f 中的第 t 个元素, 初始值 $q_d[t] = q[t], q_m[t] = 0, q_f[t] = 0, t = 1 \sim 24$; 定义融冰供冷累计变量 q_{ma} , 初始值 $q_{ma} = 0$ 。

5) 安排制冰蓄冷工况。

按照电价由低到高的优先顺序安排制冰蓄冷。

$$q_f[p_A[i][2]] = M_f \quad (7)$$

6) 安排融冰供冷、直接供冷工况。

按照直接供冷电费由高到低的顺序安排融冰供冷, 不足的冷量由直接供冷工况补充。

由于融冰供冷最高速率 M_m 及本轮制冰蓄冷量 $q_f[p_A[i][2]]$ 的限制, 各时段融冰供冷最大冷量 M_c 取两者的较小值, 即

$$M_c = \min\{q_f[p_A[i][2]], M_m\}$$

若 $q[s_A[j][2]] > M_c$, 则:

$$q_d[s_A[j][2]] = q[s_A[j][2]] - M_c \quad (8)$$

$$q_m[s_A[j][2]] = M_c \quad (9)$$

若 $q[s_A[j][2]] \leq M_c$, 则:

$$q_d[s_A[j][2]] = 0 \quad (10)$$

$$q_m[s_A[j][2]] = q[s_A[j][2]] \quad (11)$$

7) 采用融冰供冷累计变量 q_{ma} 对该轮融冰供冷量进行累计,越限时对融冰供冷序列进行修正:

$$q_{ma} = q_{ma} + q_m[s_A[j][2]] \quad (12)$$

若 $q_{ma} \geq M_f$, 则:

$$q_d[s_A[j][2]] = q[s_A[j][2]] - q_m[s_A[j][2]] + q_{ma} - M_f \quad (13)$$

$$q_m[s_A[j][2]] = q[s_A[j][2]] - q_d[s_A[j][2]] \quad (14)$$

$$q_{ma} = -q_m[s_A[j][2]] \quad (15)$$

前往步骤 8; 若 $q_{ma} < M_f$, 则: $j = j + 1$, 返回步骤 6。

8) 日运行费用计算。

第 i 次蓄冰的电费序列 S_i 以及日运行费用 c_i 的计算方法:

$$s_i[t] = \left(\frac{q_d[t]}{\eta_d} + \frac{q_m[t]}{\eta_m} + \frac{q_i[t]}{\eta_f} \right) \cdot p[t] \quad (16)$$

$$c_i = \sum_{t=1}^{24} s_i[t] \quad (17)$$

9) 极值点判断及蓄冰容量约束校核。

比较 $c_{(i-1)}$ 与 c_i 的大小, 若 $c_i > c_{(i-1)}$, 则结束蓄冷优化计算, 输出第 $(i-1)$ 次的结果, 获得冰蓄冷空调优化控制策略。

若 $c_i \leq c_{(i-1)}$, 则令 $i = i + 1$ 。由于蓄冰设备容量的限制, 需判断若下一步按照最高速率蓄冷, 是否超过蓄冷容量。按照以下步骤操作, 可保证总蓄冷量不超过蓄冰设备的蓄冷容量。

若 $i \times M_f \leq Q_x$, 则返回步骤 5; 若 $i \times M_f > Q_x$, 则令 $q_f[p_A[i][2]] = Q_x - (i - 1) \times M_f$, 若 $q_f[p_A[i][2]] > 0$, 则返回步骤 6, 若 $q_f[p_A[i][2]] \leq 0$, 则结束优化计算, 输出第 $(i-1)$ 次的计算结果, 获得初次冰蓄冷空调优化控制策略。

10) 直接供冷序列校正。

若优化结果出现某一时段 $q_d[t] > M_d$, 则按照电价由低到高的顺序, 转移 $q_d[t] < M_d$ 时段的部分融冰供冷量到 $q_d[t] > M_d$ 时段, 直至保证所有时段的 $q_d[t] \geq M_d$ 。

该趋优控制方法旨在尽量降低空调运行费用,

在满足约束条件的前提下, 逐步逼近、但不着意强求全局最优解。目标函数及约束条件检验: 该方法中, 式(16)为该趋优算法的目标, 与目标函数式(1)相同。式(8)~(11)及步骤 10 满足式(2)。由式(7)、(9)、(11)、(14)可知, $q_f[t] \leq M_f$, $q_m[t] \leq M_m$, 以直接供冷电费由高到低的优先顺序, 高峰冷负荷时段更容易被选中进行融冰供冷, 经融冰供冷补充, $q_d[t] \leq M_d$, 满足式(3)。该方法中, 融冰供冷总量等于制冰蓄冷总量, 且步骤⑨保证制冰蓄冷总量不超过蓄冰设备的最大蓄冷量, 满足式(4)。

综上所述, 该趋优算法符合目标函数及约束条件的要求, 适合寻求前文所述的冰蓄冷空调优化运行数学模型的趋优解。趋优控制方法流程如图 2 所示。

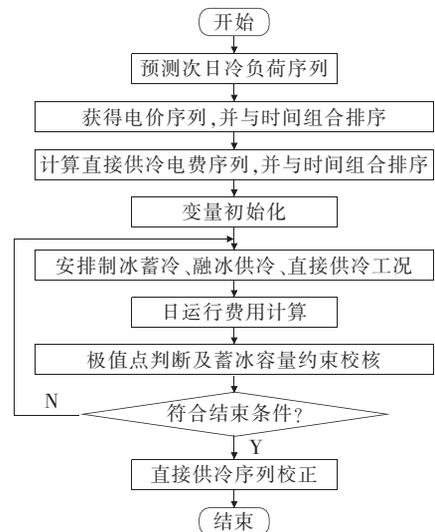


图 2 趋优控制方法流程

Figure 2 Flow chart of the proposed control method

3 算例分析

某地区峰谷电价政策及位于该地区的某建筑物次日冷负荷预测数据如表 1、2 所示, 计算可得直接供冷电费序列, 结果如表 3 所示。该建筑物装设冰蓄冷空调, 该空调系统直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷工况的能效比分别为 $\eta_d = 4.2$ 、 $\eta_m = 42.5$ 、 $\eta_f = 2.8$ 。直接供冷、融冰供冷、制冰蓄冷的最高速率分别为 $M_d = 1\ 500\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 、 $M_m = 1\ 300\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 、 $M_f = 1\ 400\ \text{kW} \cdot \text{h}$, 蓄冰设备的最大蓄冷量 $Q_x = 11\ 000\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

表 1 某地区峰谷电价

Table 1 The electricity price in this area

电价类型	时间	电价/(元/(kW·h))
低谷	23:00—06:00	0.32
	06:00—08:00	
平峰	12:00—13:00	0.76
	17:00—23:00	
	08:00—09:00	
高峰	11:00—12:00	1.23
	13:00—14:00	
	15:00—17:00	
	09:00—11:00	
尖峰	14:00—15:00	1.34

表 2 冰蓄冷空调次日冷负荷预测值

Table 2 The prediction of ice-storage air conditioning cooling load of the next day kW·h

时段	冷负荷	时段	冷负荷	时段	冷负荷
1	0	9	1 746	17	1 837
2	0	10	1 960	18	1 135
3	0	11	2 054	19	1 074
4	0	12	2 238	20	958
5	0	13	1 653	21	0
6	0	14	2 168	22	0
7	0	15	2 214	23	0
8	0	16	2 272	24	0

表 3 各时段直接供冷电费

Table 3 Direct cooling cost in each period 元

时段	$s_0[t]$	时段	$s_0[t]$	时段	$s_0[t]$
1	0.0	9	511.3	17	538.0
2	0.0	10	625.3	18	205.4
3	0.0	11	655.3	19	194.3
4	0.0	12	655.4	20	173.4
5	0.0	13	299.1	21	0.0
6	0.0	14	634.9	22	0.0
7	0.0	15	706.4	23	0.0
8	0.0	16	665.4	24	0.0

按照电价由低到高的顺序,安排某一时段以最高速率制冰蓄冷,所蓄冷量按直接供冷电费由高到低的顺序,以最高速率安排融冰供冷,从而实现直接供冷电费的循序削减,计算冰蓄冷空调的日运行费用,循环迭代,日运行费用变化情况如图 3 所示。

$c_8 > c_7$, 输出 $i=7$ 时的各工况冷量分配,结果如表 4 所示。采用求解复杂数学规划问题的高级计算机软件 GAMS 进行最优化求解,结果如表 5 所示。

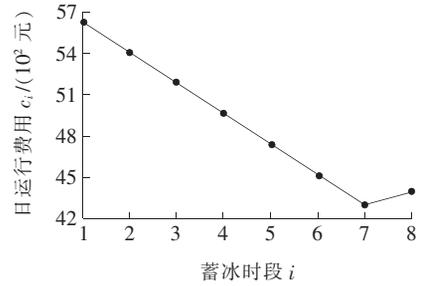


图 3 日运行费用的变化情况

Figure 3 Trend of the operation cost for the whole day

表 4 优化结果的各工况冷量分配

Table 4 Cooling distribution of each operation pattern in the optimization result

时段	$q_a[t]/$ (kW·h)	$q_m[t]/$ (kW·h)	$q_f[t]/$ (kW·h)	$s_7[t]/$ 元
1	0	0	1 400	160.0
2	0	0	1 400	160.0
3	0	0	1 400	160.0
4	0	0	1 400	160.0
5	0	0	1 400	160.0
6	0	0	1 400	160.0
7	0	0	0	0.0
8	0	0	0	0.0
9	1 199	547	0	367.0
10	660	1 300	0	251.6
11	754	1 300	0	281.6
12	938	1 300	0	312.3
13	1 500	153	0	274.2
14	868	1 300	0	291.8
15	914	1 300	0	332.6
16	972	1 300	0	322.3
17	537	1 300	0	194.9
18	1 135	0	0	205.4
19	1 074	0	0	194.3
20	958	0	0	173.4
21	0	0	0	0.0
22	0	0	0	0.0
23	0	0	0	0.0
24	0	0	1 400	160.0

表 5 GAMS 求解的各工况冷量分配

Table 5 Cooling distribution of each operation pattern obtained by GAMS

时段	$q_d[t]/$ (kW·h)	$q_m[t]/$ (kW·h)	$q_i[t]/$ (kW·h)	$s_7[t]/$ 元
1	0	0	1 400	160.0
2	0	0	1 400	160.0
3	0	0	1 400	160.0
4	0	0	1 400	160.0
5	0	0	1 400	160.0
6	0	0	1 400	160.0
7	0	0	0	0.0
8	0	0	0	0.0
9	446	1 300	0	168.2
10	660	1 300	0	251.6
11	754	1 300	0	281.6
12	938	1 300	0	312.3
13	1 500	153	0	274.2
14	868	1 300	0	291.8
15	914	1 300	0	332.6
16	972	1 300	0	322.3
17	1 290	547	0	393.6
18	1 135	0	0	205.4
19	1 074	0	0	194.3
20	958	0	0	173.4
21	0	0	0	0.0
22	0	0	0	0.0
23	0	0	0	0.0
24	0	0	1 400	160.0

由表 5 可知,该文所提方法在冰蓄冷空调优化控制上具有一定的有效性。

4 结果比较

以上述算例作为分析对象,采用主机优先、融冰优先、定比例控制 3 种工程常用的控制策略对冰蓄冷空调工况进行控制,并与该文所提趋优控制方法进行经济性比较。

1) 主机优先控制策略。

主机优先控制策略尽量让制冷主机满负荷运

行。如果冷负荷小于主机制冷能力,则蓄冰设备不进行融冰供冷,依靠制冷机组承担冷负荷。如果冷负荷超过了制冷机组供冷能力,则依靠蓄冰设备融冰来承担不足的部分。图 4 为按照主机优先控制策略所得的各工况冷量分配。

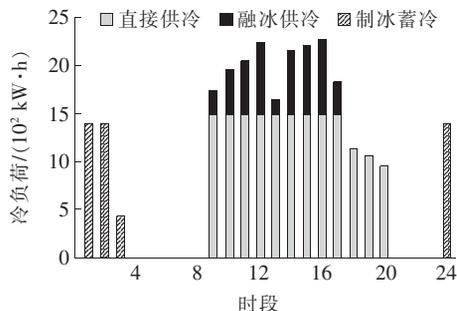


图 4 主机优先控制策略下的冷量分配

Figure 4 Cooling distribution of each operation pattern on the strategy of direct cooling first

2) 融冰优先控制策略。

融冰优先控制策略是指空调冷负荷优先由融冰供冷承担,当冷负荷高于最大融冰释冷速率时,则在融冰供冷工况满负荷运行的情况下,由制冷机组补充不足的冷量。图 5 为按照融冰优先控制策略所得的各工况冷量分配。

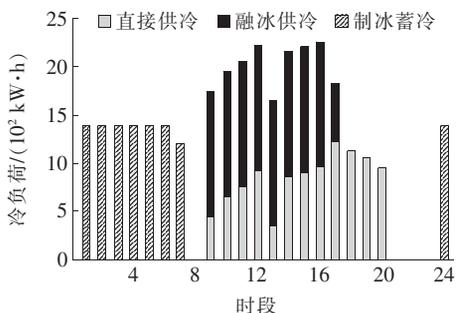


图 5 融冰优先控制策略下的冷量分配

Figure 5 Cooling distribution of each operation pattern on the strategy of ice-melting cooling first

3) 定比例控制策略。

定比例控制策略,是使制冷机组和蓄冷设备分别承担一定比例的供冷负荷。该文按照蓄冷总量与冷负荷总量的比例,安排各时段融冰供冷量,不足的冷量由直接供冷工况补充。图 6 为按照定比例控制策略所得的各工况冷量分配。

不同的工况冷量分配情况下,冰蓄冷空调的日运行费用如图 7 所示。

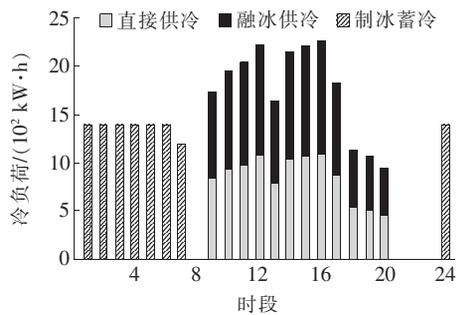


图6 定比例控制策略下的冷量分配

Figure 6 Cooling distribution of each operation pattern on the strategy of given proportion

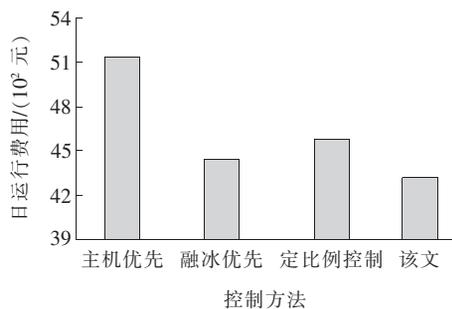


图7 4种控制方法的日运行费用比较

Figure 7 Comparison on operation cost of four control methods

5 结语

从结果比较可看出,该文所提出的直接供冷电费费率削减趋优控制方法可以有效降低冰蓄冷空调的运行费用。该方法以直接供冷电费作为安排融冰供冷的参考,综合考虑了日峰谷电价以及冷负荷的日分布情况,对冰蓄冷空调运行工况进行寻优,相比人为经验的控制更具优化依据,使得冰蓄冷空调运行更为经济。

该文所提趋优控制方法通过若干次迭代便可获得优化解,相比全局寻优的大规模优化计算更为简便、快捷,具有良好的经济性和可操作性。

参考文献:

[1] 代琼丹,邓昕,吴雪妍,等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器,2021,57(2):135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.

[2] 喻小宝,谭忠富,屈高强. 基于能源互联网的电力商业模式及关键技术研究[J]. 智慧电力,2019,47(2):9-14+36.
YU Xiaobao, TAN Zhongfu, QU Gaoqiang. Exploration for power business model and key technologies under condition of energy internet [J]. Smart Power, 2019, 47(2):9-14+36.

[3] 李培强,周丽英,李欣然,等. 基于二次型函数指标的双馈风机对系统电压稳定性影响的分析[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(1):17-24.
LI Peiqiang, ZHOU Liying, LI Xinran, et al. Analysis on DFIGs influence to system voltage stability based on quadratic function indexes[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 17-24.

[4] 高文浩,赵海兵,殷爽睿,等. 考虑负荷虚拟储能特性的商业区储能优化配置[J]. 中国电力,2020,53(4):96-104.
GAO Wenhao, ZHAO Haibing, YIN Shuangrui, et al. Optimal configuration of BESS in commercial area considering virtual energy storage characteristics of load[J]. Electric Power, 2020, 53(4):96-104.

[5] 李玲玲,王鑫,郎永波,等. 基于改进鲸鱼算法的微网复合储能系统容量优化配置[J]. 电测与仪表,2019,56(16):104-110.
LI Lingling, WANG Xin, LANG Yongbo, et al. Capacity configuration of micro-grid composite energy storage system based on improved whale optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(16):104-110.

[6] 王冠男,田传波,闫爱梅. 综合能源架构下的块数据应用服务[J]. 供用电,2019,36(3):14-19.
WANG Guannan, TIAN Chuanbo, YAN Aimei. Development and application of integrated energy internet platform[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 14-19.

[7] Wu Q H, Zheng J H, Jing Z X. Coordinated scheduling of energy resources for distributed DHCs in an integrated energy grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 95-103.

[8] Rismanchi B, Saidur R, Masjuki H H, et al. Energetic, economic and environmental benefits of utilizing the ice thermal storage systems for office building applications[J]. Energy and Buildings, 2012, 50: 347-354.

[9] Rismanchi B, Saidur R, Masjuki H H, et al. Cost-ben-

- efit analysis of using cold thermal energy storage systems in building applications [J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 493-498.
- [10] 单葆国,贾德香,李世豪,等. 基于 AHP-熵权法的省域节能减排动态综合评价方法[J]. *电网与清洁能源*, 2019,35(1):54-61.
SHAN Baoguo, JIA Dexiang, LI Shihao, et al. Dynamic comprehensive evaluation method of provincial energy-saving and emission-reduction based on ahp-entropy method[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(1):54-61.
- [11] Sun Yongjun, Wang Shengwei, Xiao Fu, et al. Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: a review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 71: 101-114.
- [12] 何后裕,郭健翔,王永利. 面向配电网风电消纳的冰蓄冷空调系统多目标优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(23):180-187.
HE Houyu, GUO Jianxiang, WANG Yongli. Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(23):180-187.
- [13] Sanaye S, Shirazi A. Four E analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage for air-conditioning applications[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(3): 828-841.
- [14] Murphy M D, O Mahony M J, Upton J. Comparison of control systems for the optimisation of ice storage in a dynamic real time electricity pricing environment[J]. *Applied Energy*, 2015, 149: 392-403.
- [15] Schütz T, Streblov R, Müller D. A comparison of thermal energy storage models for building energy system optimization[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 23-31.
- [16] Hajiah A, Krarti M. Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass-Part I: Simulation environment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 64: 499-508.
- [17] Hajiah A, Krarti M. Optimal controls of building storage systems using both ice storage and thermal mass-Part II: Parametric analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 64: 509-515.
- [18] 吴鸣,李振伟,孙丽敬. 一种混合储能变换器的模型预测整体控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21):84-91.
WU Ming, LI Zhenwei, SUN Lijing. A model predictive overall control method for a hybrid energy storage converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21):84-91.
- [19] Motevasel M, Seifi A R, Niknam T. Multi-objective energy management of CHP (combined heat and power)-based micro-grid[J]. *Energy*, 2013, 51: 123-136.
- [20] Beghi A, Cecchinato L, Rampazzo M, et al. Energy efficient control of HVAC systems with ice cold thermal energy storage[J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(6): 773-781.