

用于削减工业园区用电功率峰值的蓄冷空调系统的规划建模与优化

陈东文¹, 刘育权², 李 勇¹, 熊 文², 王如竹¹

(1. 上海交通大学 制冷与低温研究所, 上海 200240; 2. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620)

摘要: 针对工业园区综合能源系统的削峰问题, 建立将蓄冷空调系统用于削峰的优化规划模型, 提出采用临界运行电价和经济平衡电价分别作为蓄冷空调系统运行经济性与规划经济性的度量。进而根据经济平衡电价确定规划时的最优蓄冷容量, 进一步确定相关的设备容量。然后对冰蓄冷系统和水蓄冷系统进行经济性对比与分析, 为决策者提供选择蓄冷类型的经济依据。最后以某工业企业的空调系统改造为水蓄冷空调系统作为算例, 计算相应的经济平衡电价、最优蓄冷容量和相关设备容量, 并验证最优蓄冷容量的正确性。

关键词: 蓄冷空调系统; 规划建模; 削峰; 临界运行电价; 经济平衡电价; 最优蓄冷容量

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.013

0 引言

空调蓄冷作为一项重要的蓄能技术, 可利用峰谷电价差, 在电价较低的谷电时段蓄冷, 在电价较高的峰电时段释放冷量替代空调供冷, 从而减少峰电时段的用电量, 以达到减少空调系统运行成本的目的^[1]。虽然此时空调系统的能耗会增加, 但是空调系统的运行经济性得到提高, 并协助电网公司移峰填谷, 提高了电网公司的设备利用率及整个综合能源系统的能量利用效率^[2]。

工程应用中, 常见的蓄冷空调系统根据蓄冷介质主要可分为冰蓄冷空调系统和水蓄冷空调系统。冰蓄冷空调系统多用于场地受限制、供冷温度需求较低的场合, 如酒店、运动场馆等; 水蓄冷空调系统多用于场地较开阔的场合^[3]。

对于冰蓄冷空调系统的建模已有很多研究。文献[4]运用减法聚类法和网格法进行了冰蓄冷系统蓄冷量的模糊建模。文献[5]以最小生命周期成本为目标函数, 利用粒子群优化算法求得建筑冰蓄冷空调系统的优化容量, 然而该方法需要有企业大量的运行数据, 缺乏通用性。文献[6]提出了焓分析方法用于评价冰蓄冷空调系统。文献[7]结合了经济性与焓效率, 提出了焓-经济性分析方法用于评价冰蓄冷空调系统的规划建模与运行。文献[8]模拟了家用冰蓄冷空调系统用于削峰的能力。然而, 当前对于蓄冷空调系统的建模, 主要适用于典型的非工业用户建筑, 即白天负荷较大时, 使用蓄冷系统释放冷量或利用制冷机组供冷; 夜间负荷较小或者没有负荷

时, 采用制冷机组蓄冷。对于工业园区典型的加工生产企业而言, 空调系统往往需要 24 h 运行, 并且一天内的冷负荷逐时变化较小。因此, 传统蓄冷空调系统的规划建模并不适用于工业园区典型蓄冷空调系统。并且传统的冰蓄冷空调系统建模中都是基于经验确定蓄冷容量, 或基于历史数据用数值方法得出最佳蓄冷容量, 没有给出简洁、通用的确定最佳蓄冷容量的方法。

另一方面, 储能作为综合能源系统中重要的一个环节, 对削减峰值用电功率、调节能量/功率供需平衡, 起着重要的作用^[9-10]。对于纯粹的电网, 可以通过需求侧响应等协调优化方法实现调峰^[11-12], 同时也可以引入动态奖惩电价改变用户用电习惯实现调峰^[13]。而在综合能源系统中, 需通过优先考虑使用储能实现更灵活的调峰控制。空调蓄冷作为一种重要的储能手段, 长期以来没有被充分利用, 在规划阶段, 往往仅从经济性角度考虑系统的规划建模。对于工业园区的规划建模, 需要充分考虑蓄冷系统配合电网公司完成削减峰值用电负荷这一目标。

综上所述, 工业园区的综合能源系统中的蓄冷系统规划有以下 3 个特点:

- 空调系统 24 h 运行, 并且昼夜负荷变化不大;
- 空调系统容量相对于整个企业用电容量较小, 可以忽略容量电价的影响;
- 需要充分考虑其配合园区削减用电峰值功率的目标。

本文在考虑上述因素的同时, 建立工业园区满足削峰条件的蓄冷空调系统经济最优化规划模型, 并以某工业企业的空调系统改造为例进行蓄冷空调系统规划建模, 确定最佳蓄冷容量、最佳蓄冷率、主机容量、基载容量等关键规划参数。

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-05-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0901300)

1 蓄冷空调系统概述

典型的蓄冷空调系统由制冷主机系统、基载系统、蓄冷系统、负荷侧 4 个部分构成。其中,由于工业企业需要 24 h 供冷,为此需要增加一组并联的基载机组。在夜间谷电时段,制冷主机进行蓄冷,基载提供空调冷负荷。蓄冷空调系统运行流程示意图如图 1 所示。图中,箭头表示换热介质流动方向; P_1 、 P_2 分别表示泵 1、泵 2; V_1 — V_5 表示阀门。

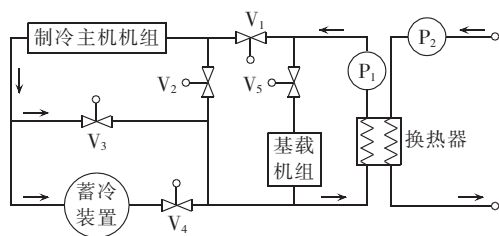


图 1 蓄冷系统运行流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of CSS operation

蓄冷系统基本工作原理如下:蓄冷时段,由换热介质(冰蓄冷系统中为乙二醇溶液,水蓄冷系统中为水)与制冷主机系统进行换热,换热后温度较低的换热介质通过循环,与蓄冷装置中的液态水进行换热,使其降温或者凝固为冰,此时若有空调负荷需求,可由基载系统提供空调负荷所需的冷量;释冷时段,蓄冷装置内的冷水直接作为冷冻水进行循环或者蓄冰装置内的冰融化为液态水释放冷量,此过程中其与温度较高的换热介质换热输出冷量。

2 考虑削峰时的设备容量

冰蓄冷系统主要由双工况制冷主机系统、蓄冰系统、基载系统与负荷侧 4 个部分构成。对于水蓄冷系统而言,蓄冷温度一般为 4℃ 左右,无需使用双工况主机进行制冷,故水蓄冷系统由制冷主机系统、蓄水箱/池和负荷侧 3 个部分构成。由于水蓄冷系统占地面积比较大,因此在实际使用过程中,其受场地限制,应用较少。

2.1 蓄冷空调制冷系统运行方式

根据制冷主机与基载运行优先关系,蓄冷空调制冷系统的运行方式可以分为以下 2 种:基载优先模式,制冷主机仅在谷电时段蓄冷,其余时段完全由基载进行空调供冷,适用于主机供冷功率小于冷负荷需求功率的场合;主机优先模式,主机在非谷电时段进行空调供冷,在谷电时段进行蓄冷,此时由基载进行空调供冷,适用于主机供冷功率大于冷负荷需求功率的场合。对于 24 h 有供冷需求的大部分工业企业,其夜间空调系统冷负荷较小,故一般选择主机优先的运行模式。

2.2 释冷模式

根据释冷模式的不同,蓄冷空调系统的运行模式主要分为部分释冷、全部释冷、分时释冷 3 种模式^[14]。为了实现削峰与充分利用蓄冷装置实现更高的运行经济性这一双重目标,往往采用分时释冷模式。考虑到分时电价与实现削峰目标的结合,本文针对具有 24 h 冷量需求的工业企业的冰蓄冷系统,采用分时释冷运行方案,该运行方案示意图如图 2 所示。

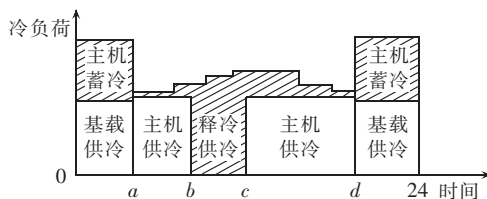


图 2 蓄冷系统分时释冷示意图

Fig.2 Schematic diagram of period-dependent cooling loads of CSS

如图 2 所示, d 至 24、0 至 a 为谷电时段,在此时段内双工况主机进行蓄冷,由基载进行空调供冷; a 至 b 、 c 至 d 时段为平电时段,在此时段内由主机与释冷系统共同供冷,其中,主机维持恒定功率,不足部分由释冷系统提供; b 至 c 时段为峰电时段,在此时段内完全由释冷系统提供所需的空调冷量。

进行配合实现削峰目标的蓄冷空调系统规划时,需要考虑如下因素的限制:

- a. 释冷时期在满足经济性的同时,限制制冷主机功率,使得蓄冷系统储存足够的冷量用于特定时刻的调峰;
- b. 夜间蓄冷时期和主机空调供冷时期,由于园区用电功率限制,蓄冷时长受到限制。

2.3 主机系统容量

蓄冷系统的规划建模主要由制冷主机系统、基载系统、蓄冷系统的容量确定。

主机系统的能效比 EER(Energy Efficiency Ratio)是确定容量的重要参数之一,记为 R_{EE} ,其主要受到干湿球温度、部分负荷的影响^[15]。进行系统规划时,忽略这些影响,假定系统 EER 不变进行规划。

主机系统的容量需要满足 3 个条件:保证白天空调系统的供冷;保证夜间的蓄冷;不超过调峰允许的最大用电功率 P_R 。

满足白天空调系统制冷需求时的主机容量 $P_{m,1}$ 为:

$$\begin{cases} P_{m,1} = \frac{Q_C - Q_S - Q_{C,G}}{R_{EE}(24 - n - m)} \\ Q_{C,G} = \sum_{i=1}^n Q_{C,i} \end{cases} \quad (1)$$

其中, m 为峰电时段时长,单位为 h; n 为谷电时段时长,单位为 h; $Q_{C,G}$ 为夜间谷电时段空调系统的冷负荷需求,单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_S 为蓄冷系统容量,单位为

$\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_c 为设计日总冷负荷,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; $Q_{c,i}$ 为设计日逐时冷负荷,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

满足夜间蓄冷需求时的主机容量 $P_{m,2}$ 为:

$$P_{m,2} = \frac{Q_s}{R_{EE}(n-T_2)k\eta_s} \quad (2)$$

其中, T_2 为由于需要调峰,夜间谷电时段暂停蓄冷的时长,单位为 h ; η_s 为蓄冷装置蓄冷、释冷效率; k 为同样工况下,主机蓄冷与空调制冷的 EER。

令 $P_{m,1}=P_{m,2}$, 可得临界情况如下:

$$\left(\frac{Q_s}{Q_c-Q_{c,G}}\right)_0 = \frac{(n-T_1)k\eta_s}{24-n-m+(n-T_2)k\eta_s} \quad (3)$$

其中, T_1 为谷电时段主要削峰的时长。当 $Q_s/(Q_c-Q_{c,G}) > [Q_s/(Q_c-Q_{c,G})]_0$ 时, $P_{m,2} > P_{m,1}$, 此时选择 $P_{m,2}$ 作为优选主机容量; 当 $Q_s/(Q_c-Q_{c,G}) < [Q_s/(Q_c-Q_{c,G})]_0$ 时, $P_{m,2} < P_{m,1}$, 此时选择 $P_{m,1}$ 作为优选主机容量。

调峰允许最高功率 P_R 的限制体现为对主机运行时的控制, 因此主机容量 P_m 为:

$$P_m = \max(P_{m,1}, P_{m,2}) \quad (4)$$

2.4 基载系统容量

基载系统一般在夜间主机蓄冷时, 进行空调供冷或者在白天主机供冷能力不足时, 进行辅助供冷。基载容量 P_B 为:

$$P_B = \max(Q_{c,i}/R_{EE}) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

即基载容量为夜间最大逐时冷负荷。

3 规划的经济性分析

3.1 初始投资

初始投资主要由设备费用(双工况主机、基载、各类泵)、安装费用、土建费用三部分构成。为了便于分析, 假定初始投资分别与双工况主机容量、基载容量、蓄冷量呈一次函数关系。则初始投资 $y_{\text{invest, total}}$ 为:

$$y_{\text{invest, total}} = k_1 P_m + k_2 P_B + k_3 Q_s \quad (6)$$

其中, k_1, k_2, k_3 分别为对应于双工况主机容量、基载容量、蓄冷量的单位成本。

与传统非蓄冷空调系统相比, 增加的成本 y_{invest} 为:

$$\begin{cases} y_{\text{invest}} = k_1 P_m + k_2 P_B + k_3 Q_s - k_2 P_{\text{cool}} \\ P_{\text{cool}} = \max(Q_{c,i}/R_{EE}) \quad i=1, 2, \dots, 24 \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_{cool} 为无蓄冷设备时的基载容量。

3.2 运行成本

运行成本主要包含 2 个部分: 节省的电费和故障修复、日常维护费用。

与传统空调系统相比, 蓄冷空调节约的电费主要来自于替代的峰电、平电时段制冷系统用电费用与谷电时期蓄冷增加的用电费用之间的差值。可以节约的空调系统运行电费按照设计日 100% 负荷、设计日 75% 负荷、设计日 50% 负荷、设计日 25% 负荷进行考虑。为了表述方便, 取 $k_0 = P_{\text{pump}}/P_{\text{cool}}$, 表示蓄冷

系统释冷时, 冷冻水泵耗电功率与采用空调系统供冷耗电功率之比。随着设计日冷负荷与蓄冷量的不同, 对应的节约的运行费用变化结果如下。

当 $Q_s \leq Q_{c,F}$ 时, 有:

$$y_{01} = [f_1(1-k_0) - f_3/(k\eta_s)] Q_s / R_{EE} \quad (8)$$

当 $Q_{c,F} < Q_s \leq Q_{c,F} + Q_{c,P}$ 时, 有:

$$y_{02} = [f_1(1-k_0) Q_{c,F} + f_2(1-k_0)(Q_s - Q_{c,F}) - f_3 Q_s / (k\eta_s)] / R_{EE} \quad (9)$$

当 $Q_s > Q_{c,F} + Q_{c,P}$ 时, 有:

$$y_{03} = [f_1(1-k_0) Q_{c,F} + f_2(1-k_0) Q_{c,P} - f_3(Q_{c,F} + Q_{c,P}) / (k\eta_s)] / R_{EE} \quad (10)$$

其中, f_1, f_2, f_3 分别为峰电、平电、谷电电价; $Q_{c,F}, Q_{c,P}$ 分别为峰电时段、平电时段的空调冷负荷需求, 单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 计算公式如下:

$$Q_{c,F} = \sum_{i=1}^m Q_{c,i}, \quad Q_{c,P} = \sum_{i=1}^{24-m-n} Q_{c,i} \quad (11)$$

计算年节约运行费用时, 按照设计日 100% 负荷天数为 d_1 、设计日 75% 负荷天数为 d_2 、设计日 50% 负荷天数为 d_3 、设计日 25% 负荷天数为 d_4 考虑。 d_1, d_2, d_3, d_4 满足:

$$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 = 365 \quad (12)$$

则年节约运行费用为:

$$y_0 = \sum_{j=1}^4 y_{0,j} d_j \quad (13)$$

其中, $y_{0,1}, y_{0,2}, y_{0,3}, y_{0,4}$ 分别为表示设计日 100%、75%、50%、25% 负荷节约的运行电费。

3.3 临界运行电价

蓄冷系统的运行存在临界运行电价, 当实际峰电电价低于此数值时, 蓄冷替代供冷将不再经济。因此当蓄冷用于替代供冷时, 需要满足的运行经济性条件为:

$$\frac{f_3 Q'_s / (1-k_0)}{R_{EE\text{ref}} \eta_s} \leq \frac{f'_0 Q'_s}{R_{EE\text{cooling}}} \quad (14)$$

其中, Q'_s 为假定的供冷需求; f'_0 为满足运行经济性的运行电价; $R_{EE\text{ref}}, R_{EE\text{cooling}}$ 分别为制冷空调系统在制冰、空调供冷 2 种工况下的 EER。当式(14)恰好取等号时, 得到设计日临界运行电价需要满足的临界条件为:

$$\frac{f_0}{f_3} = \frac{1}{(1-k_0)k\eta_s} \quad (15)$$

其中, f_0 为临界运行电价。若蓄冷系统在某一时段内的实际电价与谷电电价之比小于 f_0/f_3 , 则在平电时段蓄冷没有经济效益, 此时建议不考虑用蓄冷空调替代供冷; 若蓄冷系统在某一时段内的实际电价与谷电电价之比大于 f_0/f_3 , 此时需要进一步考虑由于初始投资、设备运行维护成本等带来的影响, 从而进一步与临界成本作比较。

3.4 维护成本

维护成本指的是为了维持设备正常运行需要投入的检测、维修、护理等费用。为了简化计算,通常假定蓄冷系统在整个生命周期内的年运行维护成本按照初始投资的固定比例考虑。运行维护成本 y_{om} 为:

$$y_{\text{om}} = \sum_{i=1}^l \frac{t y_{\text{invest}}}{(1+r)^i} \quad (16)$$

其中, l 为系统运行寿命,单位为 a; r 为折现率; t 为年运行成本占初始投资的比例,一般取 2%~5%。

3.5 经济性分析及优化

空调系统一般运行年限较长,可达到 20~30 a,因此残值很小,故在此处忽略残值的影响。则在整个生命周期内,蓄冷空调系统总的收益为:

$$y = \sum_{i=1}^l \frac{y_0}{(1+r)^i} - y_{\text{invest}} - y_{\text{om}} \quad (17)$$

其中, y 为采用蓄冷空调系统后相对于非蓄冷空调系统获得的收益。

3.6 经济平衡电价

当某一时段的实际电价与谷电电价的比值高于 f_0/f_3 时,实际电价需要进一步地与经济平衡电价作比较以最终确定采用蓄冷替代供冷并用于削峰是否经济的问题。

考虑蓄冷空调系统在全寿命周期内的初始投资及运行维护成本,并考虑到由于运行蓄冷而减少的空调供冷用电费用带来的收益,从而满足 $y \geq 0$ 。当 $f_{00} < f_2$ 时,将式(8)~(10)中的 f_1 与 f_2 均替换为 f_{00} ;当 $f_{00} > f_2$ 时,将式(8)~(10)中的 f_1 替换为 f_{00} ;再令式(17)中 $y=0$,可以解得经济平衡电价 f_{00} 。

3.7 最优蓄冷容量

根据经济平衡电价与实际电价的大小关系,可以得到最优蓄冷容量。

当经济平衡电价满足 $f_3 \leq f_{00} < f_2$ 时,在平电时段采用蓄冷替代供冷在经济上可行,则最优蓄冷容量 $Q_{s,m}$ 为:

$$Q_{s,m} = (Q_{c,F} + Q_{c,P}) / \eta_s \quad (18)$$

当经济平衡电价满足 $f_2 \leq f_{00} < f_1$ 时,在平电时段采用蓄冷替代供冷在经济上不可行,在峰电时段采用蓄冷替代供冷在经济上可行,因此最优蓄冷容量 $Q_{s,m}$ 为:

$$Q_{s,m} = Q_{c,F} / \eta_s \quad (19)$$

当经济平衡电价满足 $f_{00} > f_1$ 时,无论在峰电时段还是在平电时段,蓄冷替代供冷运行均不经济。

3.8 冰蓄冷系统与水蓄冷系统运行费用对比

蓄冷系统的运行费用比较可通过蓄冷、释冷过程中的能量利用效率得出。从蓄存冷量至释放冷量,在整个过程中蓄冷系统的运行效率为:

$$\eta_{\text{system}} = (1 - k_0) k \eta_s \quad (20)$$

对于水蓄冷空调系统而言,由于工业园区企业的空调房间多为一层,因此可以采用无板式换热器的水蓄冷空调系统,释冷时的泵仅为冷冻水泵。设冷冻水泵占非蓄冷空调系统的耗电比例为 k_{01} ,则 $k_0 = k_{01}$;对于冰蓄冷系统而言,由于增加了换热器,增加了乙二醇泵,设乙二醇泵占非蓄冷空调系统的耗电比例为 k_{02} ,则 $k_0 = k_{01} + k_{02}$ 。水蓄冷空调系统主机蓄冷效率较高,取 $k = 0.95$;冰蓄冷空调系统蓄冷效率一般较低,取 $k = 0.75$ 。水蓄冷空调系统的冷量利用效率取经验值 $\eta_s = 0.8$,冰蓄冷系统取经验值 $\eta_s = 0.85$ 。得到水蓄冷空调系统运行效率 $\eta_{\text{system,water}}$ 与冰蓄冷空调系统运行效率 $\eta_{\text{system,ice}}$ 的比值为:

$$\frac{\eta_{\text{system,water}}}{\eta_{\text{system,ice}}} > \frac{(k \eta_s)_{\text{water}}}{(k \eta_s)_{\text{ice}}} > 1 \quad (21)$$

其中, $(k \eta_s)_{\text{water}}$ 、 $(k \eta_s)_{\text{ice}}$ 分别表示水蓄冷空调系统、冰蓄冷空调系统的 $k \eta_s$ 值。由式(21)可知,从运行经济性角度考虑,水蓄冷系统比冰蓄冷系统更加经济。

3.9 蓄冷空调系统规划流程

蓄冷空调系统规划流程图如图 3 所示。

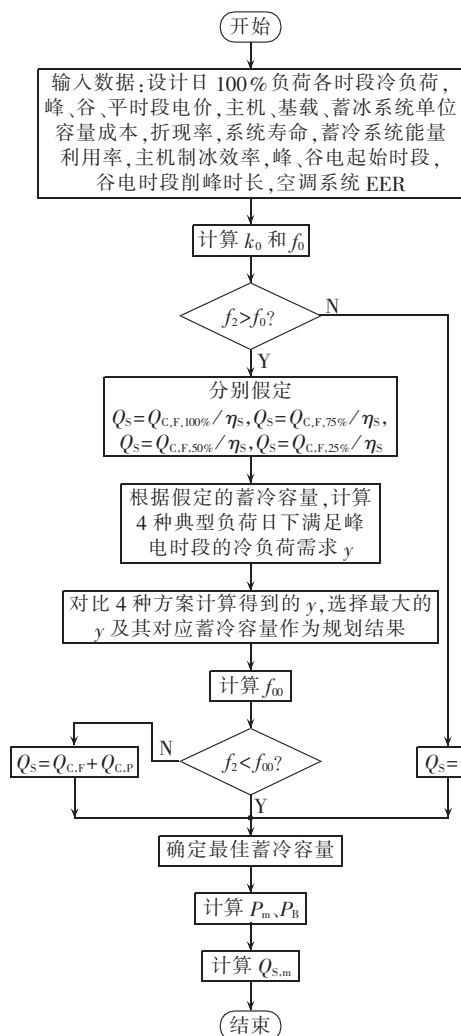


图 3 蓄冷空调系统规划流程图

Fig.3 Flowchart of CSS planning

蓄冷空调系统在规划时,首先根据输入条件计算出 k_0 和 f_0 。判断 $f_2 > f_0$ 是否成立,若不成立,则最佳蓄冷容量为 0;若 $f_2 > f_0$ 成立,则进一步地假定最佳蓄冷容量分别恰好能满足设计日 100%、75%、50%、25% 负荷峰电时段冷负荷需求 $Q_{C,F,100\%}$ 、 $Q_{C,F,75\%}$ 、 $Q_{C,F,50\%}$ 、 $Q_{C,F,25\%}$,并计算相应的 f_{00} ,选择总收益 y 的最大值及其对应的蓄冷容量作为初步规划结果。再判断 $f_2 < f_{00}$ 是否成立,若不成立,则最佳蓄冷容量为满足峰电时段和平电时段冷负荷之和的冷量;若 $f_2 < f_{00}$ 成立,则最佳蓄冷容量为满足峰电时段冷负荷的冷量,并计算相应的 P_m 和 P_B 。

4 蓄冷空调系统规划案例分析

下面以广州明珠工业园区某工业企业空调系统改造为例,进行蓄冷空调系统改造规划。

已知该企业的典型设计日空调系统逐时冷负荷如图 4 所示。

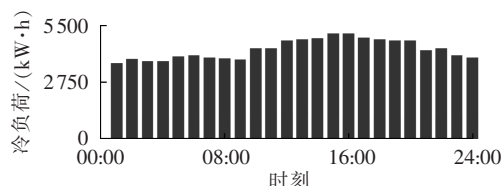


图 4 空调系统逐时冷负荷

Fig.4 Hourly cooling loads of air-conditioning system

企业现有中央空调系统为螺杆冷水机组,主要用于维持生产车间 24 h 恒定温度和湿度。企业现有变压器容量为 31.5 MV·A,要求蓄冷系统建成后,增加的运行功率最大不应超过该变压器容量的 5%。企业场地充足,既可以考虑建立冰蓄冷空调系统,也可以考虑建立水蓄冷空调系统。

由于需要配合园区削减峰值用电功率,因此需要保证非谷电时段至少要有 1 h 配合园区削减峰值用电功率,谷电时段有 1 h 配合园区削减峰值用电功率而停止蓄冷。按照以往运行数据统计可知,每年设计日 100% 负荷天数、设计日 75% 负荷天数、设计日 50% 负荷天数、设计日 25% 负荷天数分别为 $d_1=146$ d, $d_2=d_3=55$ d, $d_4=109$ d。峰电时段为 14:00—17:00、19:00—22:00,电价均为 $f_1=1.0911$ 元/(kW·h);谷电时段为 00:00—08:00,电价为 $f_3=0.3647$ 元/(kW·h);其余时段为平电时段,电价为 $f_2=0.6805$ 元/(kW·h)。目前政策中容量电价为 276 元/(kW·a)。

下面以该系统为例进行考虑电力系统削峰条件下的蓄冷系统规划。

4.1 蓄冷系统类型的确定

设计日总冷负荷 $Q_c=104081$ kW·h,峰、谷、平电时段冷负荷计算结果见表 1。

表 1 设计日峰谷平电价时段负荷

Table 1 Cooling loads of peak, normal and valley periods for day designed

典型日冷负荷占比/%	冷负荷/(kW·h)		
	$Q_{C,F}$	$Q_{C,P}$	$Q_{C,G}$
100	28526	44611	30944
75	21395	33458	23208
50	14263	22306	15472
25	7132	11153	7736

蓄冷系统相关参数^[16-17]如下: $R_{EE}=3.7$, $f_1=1.0911$ 元/(kW·h), $f_2=0.6805$ 元/(kW·h), $f_3=0.3647$ 元/(kW·h), $l=20$ a, $m=6$ h, $n=8$ h, $t=2\%$, $T_1=1$ h, $T_2=1$ h, $r=8\%$ 。对原空调系统进行水蓄冷空调系统改造时,可以将原中央空调冷水机组作为蓄冷空调系统的基载部分,因此不需要增加基载新设备。原中央空调系统改造为水蓄冷空调系统,其相关参数如下: $k=0.95$, $k_0=0.12$, $k_1=550$ 元/(kW·h), $k_3=100$ 元/(kW·h)。对应地,冰蓄冷空调系统相关参数如下: $k=0.76$, $k_0=0.31$, $k_1=600$ 元/(kW·h), $k_3=128$ 元/(kW·h)。

根据式(15)计算得到临界运行电价比,对于冰蓄冷空调系统,有 $f_0/f_3=2.24$;对于水蓄冷空调系统,有 $f_0/f_3=1.50$ 。

园区峰、谷电电价比为 $f_1/f_3=2.99$,平、谷电电价比为 $f_2/f_3=1.87$ 。当采用冰蓄冷系统时, $f_2/f_3 < f_0/f_3$, 系统经济性受损;当采用水蓄冷系统时, $f_2/f_3 > f_0/f_3$, 此时蓄冷系统运行更加经济,因此采用水蓄冷空调系统。

4.2 经济平衡电价与最优蓄冷容量

根据上文的计算公式,最终计算得到该工业企业的最佳蓄冷容量为 $Q_{s,m}=26744$ kW·h。此时,最大收益为 $y=238.3$ 万元,即整个全寿命周期内水蓄冷空调系统相比于常规空调系统能够节约 238.3 万元的费用。根据最优蓄冷容量计算得到对应的经济平衡电价为:

$$f_{00} = \frac{\frac{R_{EE}k_3}{\eta_s} + \frac{k_1(1+2\%A)}{(n-T_2)k\eta_s}}{A(1-k_0)(d_1+d_2)} + \frac{f_3}{(1-k_0)k\eta_s} \quad (22)$$

$$A = \sum_{i=1}^l 1/(1+r)^i$$

代入企业的实际参数后,得到经济平衡电价为 $f_{00}=0.7631$ 元/(kW·h),满足条件 $f_2 < f_{00} < f_1$ 。

根据式(1)~(4),代入相关数据后得到主机容量为 $P_m=P_{m,2}=970$ kW,又 $P_R=1575$ kW,故 $P_m < P_R$,符合削峰的要求。由于采用水蓄冷空调系统,可以将原空调系统的制冷机作为蓄冷空调系统的基载系统,并且实际容量大于理论所需基载容量,无需增加基载设备,故不考虑基载设备费用。

企业峰值用电功率主要发生在 08:00—16:00,

企业峰值用电功率约为 22 MW,而蓄冷时段增加的用电功率最大约为 1 MW,并且发生在夜间谷电时段,即使企业运行蓄冷系统,夜间峰值用电功率依然小于企业白天峰值用电功率,对企业负荷峰值没有影响,故容量电价可以忽略。

4.3 最佳蓄冷容量验证

总收益随蓄冷量变化而变化的关系曲线如图 5 所示。

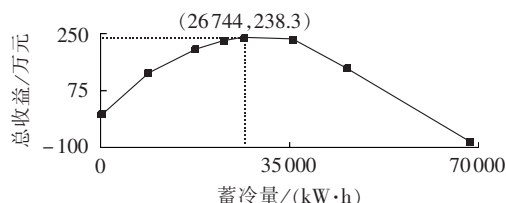


图 5 总收益随蓄冷量变化关系

Fig.5 Relationship between total benefit and cold-storage capacity

由图 5 可知,总收益与蓄冷量呈分段线性函数关系。当蓄冷量低于 26744 kW·h 时,总收益随蓄冷量增大而增大,但增大的速率逐渐减小,这是由于随着蓄冷量的增大,增加的蓄冷容量在全年范围内的设备利用率逐渐减小;当蓄冷容量超过 26744 kW·h 时,增加的蓄冷容量只能在设计日 75% 负荷的平电时段和设计日 100% 负荷的平电、峰电时段使用,设备利用率过低以至于无法回收成本,使得总收益减小。因此最佳蓄冷容量为恰好满足设计日 75% 负荷峰电时段全部冷负荷需求的蓄冷量。

5 结论

本文针对工业园区综合能源系统,提出了一种蓄冷空调系统的规划方法,使得蓄冷空调系统在满足削峰要求的前提下,获得最优蓄冷容量和设备容量,从而实现经济最优化。

分析结果表明,当蓄冷空调系统采用在峰电时段释放冷量,在谷电时段蓄存冷量,在平电时段由空调机组供应冷量的方案时,削峰对蓄冷系统规划的影响主要体现在限制主机夜间蓄冷时间、限制蓄冷主机容量 2 个方面。

在进行蓄冷系统类型的选择时,冰蓄冷系统由于乙二醇溶液泵能耗较大,增加了换热器使得换热效率降低,主机制冰效率较低等因素,导致冰蓄冷空调运行效率明显低于水蓄冷空调系统。因此,在场地足够大的情况下,建议采用水蓄冷系统。

最优蓄冷容量需要依据实际电价与临界运行电价 f_0 、经济平衡电价 f_{00} 的大小关系来确定。当实际电价小于临界运行电价时,采用蓄冷替代制冷用于削峰不经济;当实际电价大于临界运行电价时,由于受到初始投资和设备维护成本的影响,采用蓄冷用于削

峰时,需要进一步考虑经济平衡电价。具体如下:当实际电价大于经济平衡电价时,最佳蓄冷容量为覆盖该时段的全部冷量与蓄/释冷效率之比;当实际电价小于经济平衡电价但大于临界运行电价时,最优化蓄冷容量不应当覆盖该时段内的冷负荷。但对于已经建立的系统,可以通过蓄冷替代空调供冷以实现削峰和更高的运行经济性的目标。

参考文献:

- [1] 丁庆,段绍辉,王执中,等. 冰蓄冷空调在高峰谷负荷差地区应用的经济性[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(1):72-75.
DING Qing, DUAN Shaohui, WANG Zhizhong, et al. Economy of ice-storage air-condition used in the area of high peak-valley load difference[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 26(1): 72-75.
- [2] JAIN N. Thermodynamics-based optimization and control of integrated energy systems[D]. Bana, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
- [3] 张田. 水蓄冷空调系统的运行性能分析及经济性评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
ZHANG Tian. Performance analysis and economic evaluation of air-condition system with chilled water[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [4] 刘鸣, 张宝刚, 赵宏. 封装板式冰蓄冷系统蓄能模糊建模与分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2010(4): 459-463.
LIU Ming, ZHANG Baogang, ZHAO Hong. Fuzzy modeling and analysis for cold storage capacity of capsulated plate ice storage system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010 (4): 459-463.
- [5] LEE W S, CHEN Y, WU T H. Optimization for ice-storage air-conditioning system using particle swarm algorithm[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1589-1595.
- [6] PU J, LIU G, FENG X. Cumulative energy analysis of ice thermal storage air conditioning system[J]. Applied Energy, 2012, 93 (5): 564-569.
- [7] MOSAFFA A H, FARSHI L G. Exergoeconomic and environmental analyses of an air conditioning system using thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2016, 162: 515-526.
- [8] UPSHAW C R, RHODES J D, WEBBER M E. Modeling peak load reduction and energy consumption enabled by an integrated thermal energy and water storage system for residential air conditioning systems in Austin, Texas[J]. Energy & Buildings, 2015, 97: 21-32.
- [9] 梁浩, 龙惟定. 城市能源系统综合规划模型的研究与应用[J]. 山东建筑大学学报, 2010, 25(5): 524-528.
LIANG Hao, LONG Weiding. Research and application of integrated planning model for urban energy system[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(5): 524-528.
- [10] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828.
- [11] 赵洪山, 赵航宇, 侯杰群, 等. 需求响应对配电网供电可靠性影响分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 8-14.

- ZHAO Hongshan,ZHAO Hangyu,Hou Jiequn,et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):8-14.
- [12] 徐意婷,艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):18-26.
- XU Yiting,AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with micro-grids[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):18-26.
- [13] 胡晓通,刘天琪,刘舒,等. 基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):33-40.
- HU Xiaotong,LIU Tianqi,LIU Shu,et al. Coordinated optimal operation between microgrid and distribution network based on dynamic award and penalty price[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):33-40.
- [14] 白莉,迟铭书,张珂毓. 我国冰蓄冷空调技术现状及趋势研究[J]. 吉林建筑工程学院学报,2008,25(2):77-80.
- BAI Li,CHI Mingshu,ZHANG Keyu. The research of present situation and trend of air conditioning with ice storage in our country[J]. Journal of Jilin Institute of Architectural & Civil, 2008, 25(2):77-80.
- [15] 罗启军. 基于动态规划的冰蓄冷空调系统的优化控制[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- LUO Qijun. Optimization of an ice-storage air conditioning sys-

tem using a dynamic programming method[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2004.

- [16] 赵炜. 某冰蓄冷空调系统设计与经济性分析[J]. 建筑热能通风空调,2016,35(6):86-89.
- ZHAO Wei. An ice storage air conditioning system design and economic analysis[J]. Building Energy & Environment,2016,36(6):86-89.
- [17] 米秀伟,韦炜. 五星级酒店复合式水蓄冷系统的设计及应用[J]. 暖通空调,2014(12):35-41.
- MI Xiuwei,WEI Wei. Complex chilled water storage system design and application for a five-star hotel[J]. HV&AC,2014, 44(12):35-41.

作者简介:



陈东文

陈东文(1993—),男,安徽芜湖人,博士研究生,主要从事综合能源系统方面的研究(E-mail:dongwenchen@sjtu.edu.cn);

李勇(1969—),男,上海人,副教授,博士,通信作者,主要从事综合能源系统方面的研究(E-mail:liyo@sjtu.edu.cn)。

Planning, modeling and optimizing of cold-storage air-conditioning system for reducing peak load of industrial park

CHEN Dongwen¹, LIU Yuquan², LI Yong¹, XIONG Wen², WANG Ruzhu¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Guangzhou Power Supply Co. Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: An optimal planning model of CSS (Cold-Storage air-conditioning System) for the peak load reduction of integrated energy system in industrial park is built, which applies the critical operational electricity price and the economic equilibrium electricity price as the indexes to evaluate the operational economy and the planning economy of CSS respectively. The economic equilibrium electricity price is used during the planning to determine the optimal cold-storage capacity and the related equipment capacities. Comparison between ice-storage system and water-storage system is carried out to provide the economic basis for decision makers during the cold-storage type selection. As an example, the economic equilibrium electricity price, the optimal water-storage capacity and the related equipment capacities are calculated for an air-conditioning system retrofitting project of an industrial enterprise, and the correctness of the optimal cold-storage capacity is verified.

Key words: cold-storage air-conditioning system; planning and modeling; peak shifting; critical operational electricity price; economic equilibrium electricity price; optimal cold-storage capacity