

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191092

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

何后裕¹, 郭健翔¹, 王永利²

(1. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 未来配电系统可再生能源渗透率日益提高。针对配网中风电消纳问题, 考虑在系统中引入具有负荷转移特性的冰蓄冷空调进行需求响应控制, 将夜间产生的风能转化为冷能并以冰形式存储, 在日间用电峰段融冰释冷削减空调的用电峰值。具体来说, 考虑系统内供电公司和风电生产商的综合运行成本以及空调用户的用电成本, 建立基于能源效率和经济效益的多目标优化模型。以供电公司、风电生产商和空调用户的利益最大化为目标, 采用非支配排序遗传算法-II(NSGA-II)对 Pareto 非支配解集进行求解, 生成的 Pareto 解集, 通过模糊隶属度法过滤选取最优解。最终根据最优解内参数变量的数值, 对空调制冷机功率和蓄冰设备的融冰量进行调控。提出的算例验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 风电消纳; 冰蓄冷空调; 多目标优化; 非支配排序遗传算法

Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption

HE Houyu¹, GUO Jianxiang¹, WANG Yongli²

(1. Quanzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Company, Quanzhou 362000, China;
2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the future, the distribution rate of renewable energy in distribution systems is increasing. For the problem of wind power consumption in distribution networks, it is considered to introduce the ice storage air conditioning with load transfer characteristics in the system to control the demand response, and convert the wind energy generated at night into cold energy and ice storage, reducing the peak electricity consumption of air conditioners during the daytime peaking of ice melting. Specifically, considering the comprehensive operating costs of power supply companies and wind power producers in the system as well as the cost of electricity for air-conditioning users, it establishes the multi-objective optimization model based on energy efficiency and economic benefit which aims at maximizing the interests of power supply companies, wind power producers and air-conditioning users. The non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is used to solve the Pareto non-dominated solution set. The optimal solution of the generated Pareto solution set is filtered and selected by the fuzzy membership method. Finally, according to the value of the parameter variables in the optimal solution, the power of the air conditioner and the ice melting capacity of the ice storage device are regulated. The effectiveness and feasibility of the proposed method is verified by the example.

This work is supported by Beijing Social Sciences Foundation (No. 18GLB034).

Key words: wind power consumption; ice storage air conditioning; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)

0 引言

在化石能源日益短缺和用户负荷迅猛增长的背景下, 中国对新能源技术的需求越来越大, 随着新

能源渗透率的日益提高, 风能作为污染小, 储量大的可再生能源, 已经成为能源发展的重点方向。

风机出力存在随机性、间歇性和波动性大等问题。当风电大规模接入电力系统, 超出系统调控范围时, 为保障系统的动态平衡, 就会产生弃风现象。为了有效地利用风能, 减少风力发电对电力系统的

影响, 本文考虑在配电系统中以风电消纳最大化为目标, 提出了一种考虑供电公司、风电生产商、空调用户三者经济效益实现最优的需求响应控制策略。首先利用冰蓄冷空调的蓄冰设备对夜间出力较高的风电机组进行消纳, 将风能以冰的形式储存起来, 在日间用电峰段融冰释冷, 降低空调的制冷功率, 缓解电网的负荷压力, 同时考虑供电公司和风电生产商的售电利润和空调用户的用电费用, 构建以三者的利益最大化为优化目标的目标函数, 制定供电公司对风电生产商和空调用户的补贴政策。之后利用非支配排序遗传算法得到上述多目标优化函数的 Pareto 非支配解集, 利用模糊隶属度函数法对生成的 Pareto 解集进行筛选, 选取最优解。最后在不影响用户温度舒适度的前提下, 根据最优解中相关参数变量的数值, 分析空调用户在优化调控前后制冷机组功率和蓄冰设备融冰量的变化。

文献[1]首先建立了能源、环境和经济效益的多目标优化模型, 之后对系统的设备容量和运行策略进行了优化, 通过分析优化结果证明太阳能联供系统的综合性能优于分供系统; 文献[2]基于国家能源局发布的数据, 通过对新能源上网电量以及各地区弃风率和弃光率的计算, 分析了造成当前中国新能源高弃风弃光率的原因, 提出了解决中国高弃风弃光率的措施; 文献[3]根据需求响应的不同机理, 分别建立基于激励和基于价格的需求响应虚拟电厂模型, 并在需求响应虚拟电厂模型中考虑了不确定性的影响; 文献[4]在负荷聚合商的概念下, 分析了受控用户的调度潜力并构建了最小化聚合商运行成本为目标的调度模型; 文献[5]对工厂 IES(Integrated Energy System)提出一种考虑冰蓄冷空调多种工作模式的多能协同优化模型, 并以运行维护成本、储能折旧成本等构成的日运行费用最低为优化目标, 采用混合整数线性规划法对模型进行了求解; 文献[6]通过对商用办公建筑的冷负荷需求预测数据分析, 基于不同的运行策略、年用电量预测和电价政策, 计算投资收益及经济性指标证明了冰蓄冷技术的应用可以产生良好的经济效益。此外, 近年来在需求响应和优化控制领域, 也取得了较多的进展^[7-25]。这些研究都为考虑冰蓄冷空调的多目标需求响应优化策略提供了理论基础和技术支撑。

以上对冰蓄冷空调参与电网互动和新能源消纳的分析大多只考虑了空调自身的物理特性、风机出力特性等因素, 并未考虑风电生产商的售电利润和供电公司对于风电生产商, 空调用户的补贴。而实际上, 为了确保二者能够积极地参与到供电公司的响应调控中来, 风电生产商的售电利润和供电公司

对于风电生产商、空调用户的补贴都十分重要。针对上述问题, 本文在考虑风机出力有效消纳的同时, 考虑供电公司、风电生产商和空调用户三者利益最大化, 之后根据优化算法的解集, 设计满足空调用户冷量需求的冰蓄冷空调控制策略, 考虑供电公司、风电生产商和空调用户三者利益的同时, 减小了风机出力和制冷机组在优化日内的功率波动。

1 冰蓄冷空调系统

冰蓄冷空调系统主要由制冷机组、蓄冰设备和用户末端三个部分组成, 运行原理图如图 1 所示。

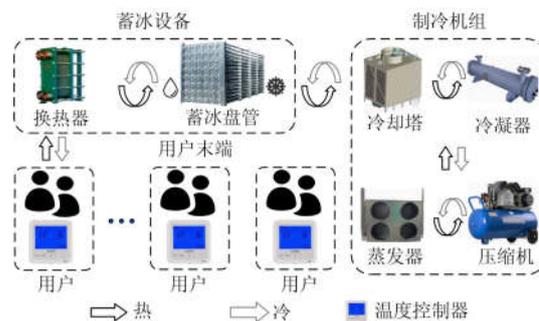


图 1 冰蓄冷空调运行原理图

Fig. 1 Ice storage cold air conditioning cooling operation flow

传统冰蓄冷空调的控制策略是在用电的谷段蓄冰制冷, 将产生的冷量以冰的形式储存起来, 在白天用电平段和峰段, 空调通过融冰兼制冷运行将冷量释放出来为用户提供冷量。这种控制策略对于电网侧来说有助于舒缓电力供应的紧张, 改善电力供应时出现的峰谷差, 对于用户侧来说, 有助于减少用电费用, 提高了空调用户的用电经济性^[3]。

2 多目标优化模型及求解

本文构建的系统结构图如图 2 所示。



图 2 系统结构图

Fig. 2 System structure diagram

2.1 优化目标一

供电公司作为用户侧的售电者，上层电网和风电生产商的购电者，在需求响应调控过程中有着十分重要的地位，第一个优化目标设为供电公司的利润最大，供电公司的利润：售电利润 K_1 、从上级电网购电的购电费用 K_2 、从风电生产商购电的购电费用 K_3 、对风电生产商的补贴费用 K_4 (见优化目标二)、对用户参与调控的补贴费用 K_5 (见优化目标三)。

$$E_1 = K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - K_5 \quad (1)$$

$$K_1 = \sum_{t=0}^T \left(\sum_{g=1}^G m_t \max \{0, P_z\} \right) \Delta t \quad (2)$$

式中： G 是参与响应调控的空调用户数量； m_t 是实时电价； P_z 是制冷机组的实时功率。

$$K_2 = m_g \cdot P_{\text{upper}} \quad (3)$$

式中： m_g 是供电公司从上层电网购电的购电价格； P_{upper} 是从上层电网购电的购电功率。

$$K_3 = m_f \cdot P_f \quad (4)$$

式中： m_f 是供电公司从风电生产商购电的购电价格； P_f 是风机的实时出力。

2.2 优化目标二

风电生产商作为系统内风电的主要提供者，由于风电的利用率与它的利润额呈正比，当电价一定时，其利润额的大小可以反应风电消纳率的变化，第二个优化目标设为风电生产商的利润最大，风电生产商的利润包括：向供电公司售电的售电利润 V_1 (同 K_3)，供电公司对风电生产商的补贴费用 V_2 。

$$E_2 = \max \{0, v_1\} + \max \{0, v_2\} \quad (5)$$

$$v_2 = \begin{cases} b_1 P_f^* + b_2 (P_f - P_f^*) & P_f > P_f^* \\ b_1 P_f & 0 < P_f \leq P_f^* \end{cases} \quad (6)$$

供电公司对风电生产商的补贴，分为两档，当风机出力大于零小于 P_f^* 时，供电公司对风电生产商的补贴费用为 $b_1 P_f$ ，当风机出力大于 P_f^* 时，供电公司对风电生产商的补贴费用为 $b_1 P_f^* + b_2 (P_f - P_f^*)$ 。

2.3 优化目标三

空调用户作为需求响应调控时段对上层电网调度指令的主要参与者，调控指令的变化对空调用户的用电费用有着直接的影响，第三个优化目标设为空调用户的用电费用最小。

参与调控的空调用户总的用电成本 E_3 为

$$E_3 = g_1 - \max \{0, K_5\} \quad (7)$$

$$g_1 = \sum_{t=0}^T \left(\sum_{g=1}^G m_t P_z \right) \Delta t \quad (8)$$

$$K_5 = \max \{0, l \cdot \Delta p\} \quad (9)$$

式中： g_1 是用户的用电成本； K_5 是供电公司对用户参与调控的补贴费用；供电公司对用户的补贴费用为 $l \cdot \Delta p$ ， Δp 是空调用户参与调控时的调控量。

2.4 约束条件

1) 容量约束

考虑在日间实际运行时， t 时刻空调蓄冰设备中蓄冰量的大小应介于夜间最大蓄冰量和蓄冰设备最低蓄冰量之间，此时的蓄冰设备容量约束为

$$0 \leq X^{\min}(t) \leq X(t) \leq X^{\max}(t) \quad (10)$$

式中： $X^{\min}(t)$ 为 t 时刻蓄冰量下限； $X^{\max}(t)$ 为 t 时刻蓄冰量上限。

2) 蓄冷和释冷约束

蓄冰设备 t 时刻，蓄冷和释冷 $P_z(t)$ 不小于该时刻释冷功率最大数值的负值 $P_{z,f}^{\max}(t)$ ，不超过该时刻蓄冷功率最大值 $P_{z,z}^{\max}(t)$ ，此时有：

$$P_{z,f}^{\max}(t) \leq P_z(t) \leq P_{z,z}^{\max}(t) \quad (11)$$

本文提出的优化控制策略，是在考虑不影响用户的温度舒适度下提出的，在调控前后始终保持用户的冷负荷需求量不改变，有式(12)。

$$0 \leq \sum_{g=1}^G L_{r,g}(t) \leq \sum_{g=1}^G L_{m,g}(t) + \sum_{g=1}^G L_{d,g}(t) \quad (12)$$

式中： $L_{r,g}$ 是用户的冷负荷需求量； $L_{m,g}$ 是冰蓄冷空调的融冰制冷量； $L_{d,g}$ 是冰蓄冷空调制冷机组的制冷量。

3) 负荷平衡约束

供电公司向空调用户供电的总功率应小于供电公司从上层电网和风电生产商的购电量，并且由于从上层购电的购电量的存在， t 时刻供电公司从风电生产商的购电量应小于供电公司向空调用户供电的总功率。

$$P_f(t) \leq P_g(t) \leq P_f(t) + P_{\text{upper}}(t) \quad (13)$$

4) 响应电量约束

根据冷量平衡约束计算 t 时刻可调控功率上下限大小，用户在 t 时刻的冷负荷需求记为 $L_{r,g}(t)$ ，蓄冰设备在 t 时刻最小的融冰制冷量记为 $L_{m,g}^{\min}(t)$ ，根据能效比公式^[4]，用户 g 在 t 时刻可调控功率上限为

$$P_g^{\max}(t) = \max \{0, L_{r,g}(t) - L_{m,g,t}^{\min}(t) / \delta, L_{r,g}(t) / \delta\} \quad (14)$$

当蓄冰设备在 t 时刻的融冰制冷量为 $L_{m,g}(t)$ 时, 根据能效比公式, t 时刻可调控功率下限为

$$p_g^{\min}(t) = \min\{0, (L_{r,g}(t) - L_{m,g}(t))/\delta\} \quad (15)$$

式中: $L_{r,g}(t)$ 是用户在 t 时刻的冷负荷需求; δ 是空调的能效比。

2.5 选取最终解

为了从 Pareto 解集中选取到最优解, 本文采用模糊隶属度函数法对各优化目标单独构造隶属度函数, 并将其变为对优化结果的符合程度, 通过对各优化目标符合程度的比较找出最贴近的解。当 Pareto 解集中存在 n 个解时, 对每个解的单个目标函数求其符合度, 得到 I, A 两个解, 如公式(17)所示, 其中 I 为目标函数值的符合程度最低的点, A 为目标函数值的符合程度最高的点。

$$\begin{cases} I = \min\{F_{\min} + \alpha - f_m(x)/\alpha\} \\ A = \max\{F_{\min} + \alpha - f_m(x)/\alpha\} \end{cases} \quad (m=0,1,2,\dots,n) \quad (16)$$

式中: F_{\min}, α 是 Pareto 解集中目标函数的最小值与函数取值范围。Pareto 解集中的每个解, 都可以根据标准化公式求解其符合程度值, 其中符合程度值最大的解可以作为最终所选的解。

3 仿真结果与分析

为了验证上述优化模型的可行性和有效性。本文利用 IEEE34 节点配网系统对多目标优化策略进行验证。系统电压取 12.66 kV, 基准容量取值 12 MVA, 各节点负荷基于配网系统的基本参数结合实际情况做出相应修改, 于节点 1, 2, 3 接入风机, 于节点 5, 7, 9, 31 接入参与含空调负荷和不可控负荷的商业楼宇。IEEE34 配网测试系统如图 3 所示。系统负荷预测曲线, 风机出力预测曲线如图 4、图 5 所示。算例中采用的分时电价价格表如表 1 所示。

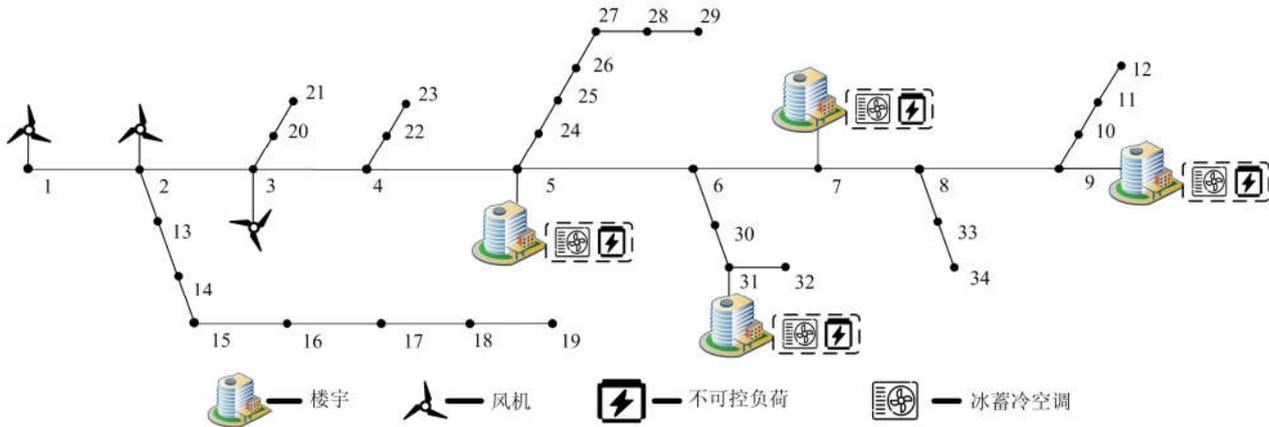


图3 IEEE34 节点配网模型

Fig. 3 IEEE34 node distribution network model

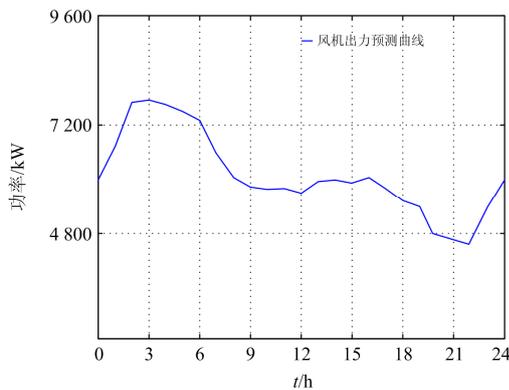


图4 风机出力预测

Fig. 4 Air conditioning load forecasting

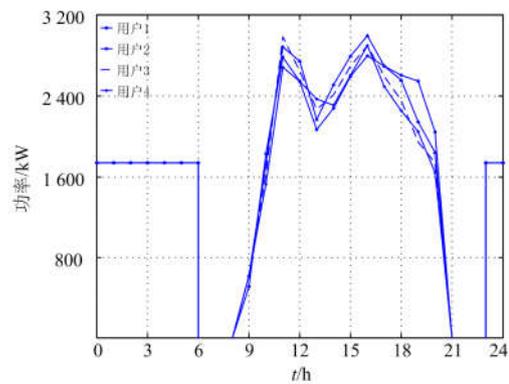


图5 用户冷负荷预测

Fig. 5 Air conditioning load forecasting

表 1 峰谷分时电价

Table 1 Peak and valley time-of use price

电价类别	时间	价格/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷时电价	23: 00—00: 00	0.4
	00: 00—07: 00	
峰时电价	08: 00—12: 00	1.2
	19: 00—23: 00	
平时电价	07: 00—08: 00	0.8
	11: 00—18: 00	

由于用户温度舒适度的改变对用户参与供电公司的需求响应调控的影响很大，所以确保用户温度舒适度不改变十分重要，利用非支配排序遗传算法以供电公司和风电生产商利润最大化，居民用户日用电费用最低为优化目标，设置的遗传算法种群规模为 100，进化次数为 500，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.1，求解出的 Pareto 前沿如图 6 所示。

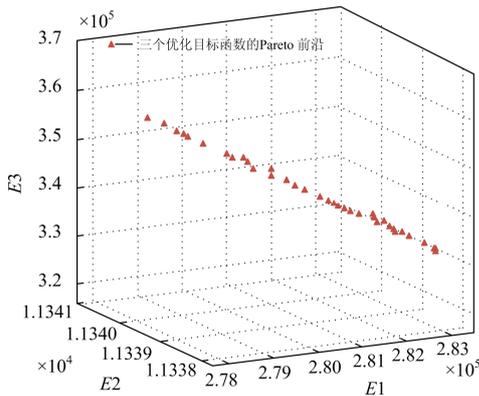


图 6 Pareto 前沿

Fig. 6 Pareto frontier

求解出的 Pareto 前沿是一个近似的平面，经验证明所有点均为非支配解。图 7、图 8 分别为供电公司，风电生产商优化前后的收益曲线，图 9 为空调用户优化前后的日用电费用曲线。

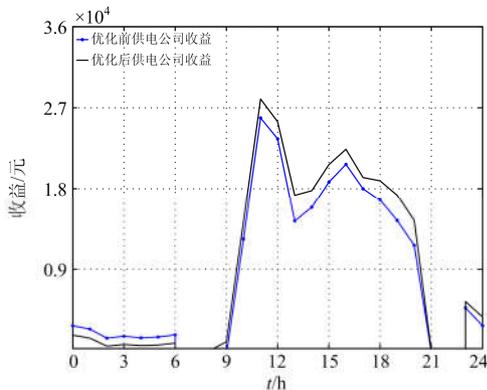


图 7 供电公司优化后收益变化

Fig. 7 Optimal revenue changes of power supply company

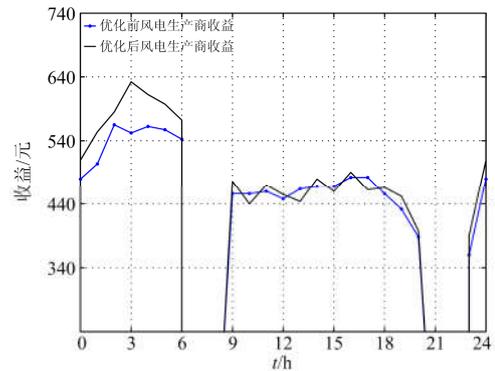


图 8 风电生产商优化后收益变化

Fig. 8 Optimal revenue changes of wind power producers

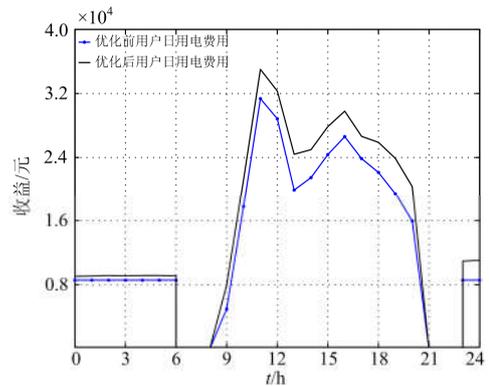


图 9 空调用户优化后收益变化

Fig. 9 Optimal revenue changes of air-conditioning users

从图中可以看出供电公司的收益在优化后有明显的提升，空调用户的日用电费用在优化后的日间蓄冷时段有明显的下降，而风电生产商的收益情况在优化前后变化不大。

冰蓄冷型中央空调参数配置如表 2 所示。根据各用户空调系统的响应潜力大小，对优化结果中供电公司的响应潜力进行分配，得到各用户制冷机组功率曲线变化，如图 10—图 13 所示，由图中可以看出，优化后用户的蓄冰设备为了响应白天供电公司更多的调控电量，在夜间增大了制冷机组的功率，提升了蓄冰设备的蓄冰量。

蓄冰设备蓄冰量的变化如图 10—图 13 所示，可以看出在夜间蓄冰时段，由于制冷机组制冷功率的增加，夜间时段蓄冰量有所上升，而在日间供冷时段，为了保证用户冷负荷需求量不变，需要蓄冰设备更多的融冰制冷量补充减少的冷量，蓄冰设备的融冰制冷速率加快。对比优化前后的经济效益，发现供电公司优化后的利润上升了 20 137.1 元，风电生产商的利润上升了 593.2 元，用户的用电费用上升了 22 065.4 元。

对比优化前后的经济效益，发现供电公司优化后的利润上升了 20 137.1 元，风电生产商的利润上升了 593.2 元，用户的用电费用上升了 22 065.4 元。

表 2 冰蓄冷型中央空调参数配置

Table 2 Parameter configuration of ice storage type

central air conditioning

名称	数值
蓄冰槽蓄冰量上限容量	40 160 kW·h
日间工作时最低融冰量	50 kW·h
空调系统能量转化效率	3.6
单制冷时额定制冷量	7 120 kW·h
单蓄冰时额定制冰量	4 820 kW·h
风电生产商补贴等级 b_1 /元	0.02
风电生产商补贴等级 b_2 /元	0.03
用户用电费用补贴 l /元	0.6
蓄冰槽传热率	0.85
制冷机组容量变化率	0.67
保温效率	0.98
取冷效率	0.95
供水温度	15 °C

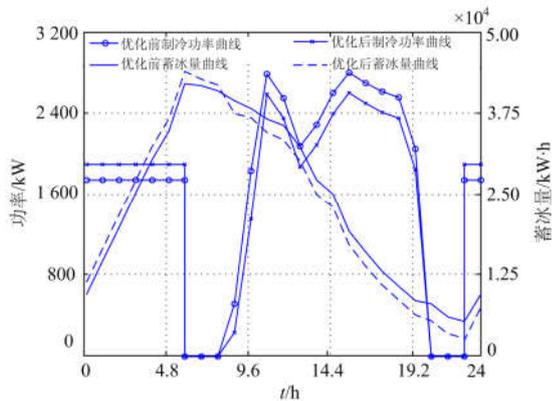


图 10 空调用户 1 优化前后功率和蓄冰量变化

Fig. 10 Power and ice storage changes before and after optimization of air conditioner user 1

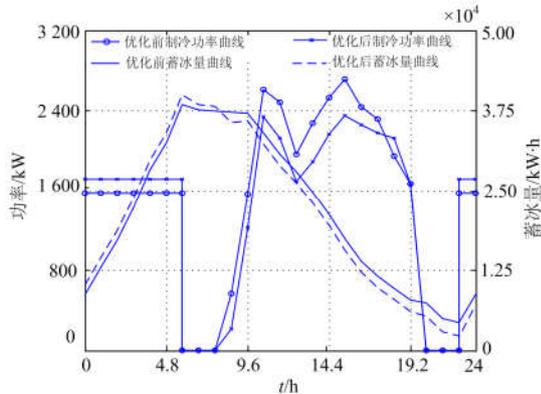


图 11 空调用户 2 优化前后功率和蓄冰量变化

Fig. 11 Power and ice storage changes before and after optimization of air conditioner user 2

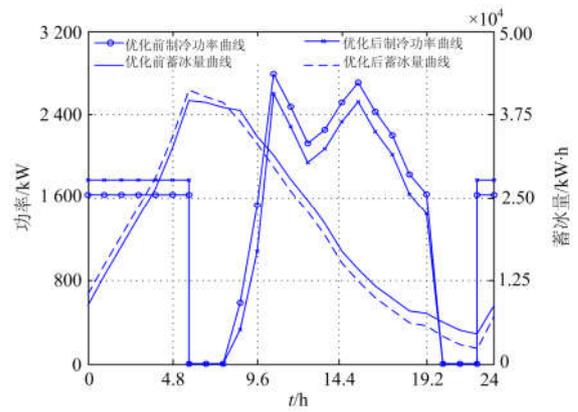


图 12 空调用户 3 优化前后功率和蓄冰量变化

Fig. 12 Power and ice storage changes before and after optimization of air conditioner user 3

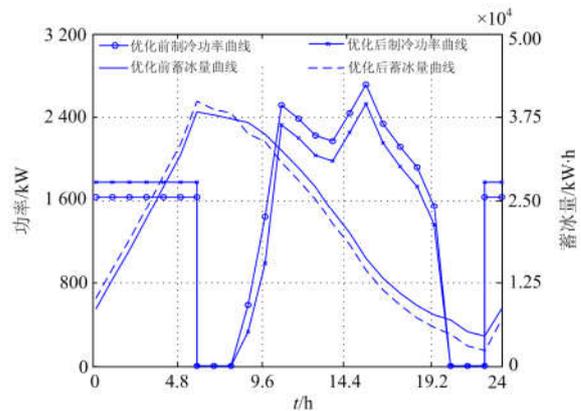


图 13 空调用户 4 优化前后功率和蓄冰量变化

Fig. 13 Power and ice storage changes before and after optimization of air conditioner user 4

4 结论

在考虑分时电价的情况下, 分析了商业园区内供电公司、风电生产商和空调用户的运行特性和经济特性, 并根据约束条件建立了基于能效和经济效益的多目标优化模型, 将优化日内制冷机组功率、蓄冰设备融冰制冷量、风机出力、制冷机组响应潜力等变量作为决策变量, 采用非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 进行求解, 对生成的 Pareto 解集使用模糊隶属度法筛选得到最优解, 根据最优解制定了冰蓄冷空调对电网调控最大响应量下的控制策略, 通过 IEEE34 节点配网算例验证了所提方法的有效性和实用可行性。

结果显示该优化运行策略可以提高风电生产商的经济效益。

参考文献

[1] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多

- 目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87, 143.
- JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of solar cooling cogeneration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87, 143.
- [2] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shi'en, et al. Summary and prospects of China's new energy development under the background of high abandoned wind and abandoned light[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [3] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3630-3637.
- NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Modeling of demand response virtual power plant considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [4] 张文彦. 负荷聚合商模式下的冰蓄冷空调弃风消纳研究[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(3): 28-33, 39.
- ZHANG Wenyan. Study on the abandonment of ice storage air conditioning in the load aggregator mode[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3): 28-33, 39.
- [5] 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.
- SUN Ke, HE De, LI Chunxiao, et al. Multi-energy collaborative optimization model of plant integrated energy system considering ice storage air conditioning multi-mode[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 12-19.
- [6] 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, 80.
- DING Qing, DUAN Shaohui, WANG Zhizhong, et al. Economics of ice storage air conditioning in the loads of peak valley loads[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(1): 72-75, 80.
- [7] 李姣姣, 卢军, 李永财, 等. 基于负荷预测的冰蓄冷空调系统运行策略研究[J]. 暖通空调, 2019, 49(3): 129-134, 43.
- LI Yushu, LU Jun, LI Yongcai, et al. Study on operation strategy of ice storage air conditioning system based on load forecasting[J]. HV&AC, 2019, 49(3): 129-134, 43.
- [8] YANG Lian, TAI Nengling, FAN Chunju. Regulation and stabilization by ice storage air-conditioning and battery energy storage system in microgrids[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12(2): 176-184.
- [9] 郭晨露, 于军琪. 西安某商城冰蓄冷空调系统优化运行策略研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(1): 42-44, 31.
- GUO Chenlu, YU Junqi. Study on optimized operation strategy of ice storage air conditioning system in a mall in Xi'an[J]. Building Energy Ventilation and Air Conditioning, 2017, 36(1): 42-44, 31.
- [10] 吴喜平. 冰蓄冷空调最佳释冷量和制冷机容量的分析研究[J]. 流体机械, 2000(12): 43-45.
- WU Xiping. Analysis and research on the optimal release cooling capacity and refrigerator capacity of ice storage air conditioning[J]. Fluid Machinery, 2000(12): 43-45.
- [11] 廖勇, 陈建飏. 冰蓄冷空调系统的优化控制方案设计[J]. 工业控制计算机, 2008(2): 38-39.
- LIAO Yong, CHEN Jianbiao. Design of optimal control scheme for ice storage air conditioning system[J]. Industrial Control Computer, 2008(2): 38-39.
- [12] 王修岩, 高冲, 李宗帅. 冰蓄冷空调系统的多目标优化控制策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 4057-4059.
- WANG Xiuyan, GAO Chong, LI Zongshuai. Study on multi-objective optimization control strategy of ice storage air conditioning system[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(12): 4057-4059.
- [13] GHAZVINI M A F, FARIA P, RAMOS S, et al. Incentive-based demand response programs designed by asset-light retail electricity providers for the day-ahead market[J]. Energy, 2015(82): 786-799.
- [14] 曾鸣, 武赓, 王昊婧, 等. 智能用电背景下考虑用户满意度的居民需求侧响应调控策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2917-2923.
- ZENG Ming, WU Geng, WANG Haojing, et al. Resident demand side response regulation strategy considering user satisfaction under the background of intelligent electricity use[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2917-2923.
- [15] 闫华光, 陈宋宋, 钟鸣, 等. 电力需求侧能效管理与需求响应系统的研究与设计[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 42-47.
- YAN Huaguang, CHEN Songsong, ZHONG Ming, et al. Research and design of power demand side energy efficiency management and demand response system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 42-47.
- [16] 李文才, 彭程. 分布式光伏电源并入配电网的故障分析及保护研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(6): 186-188.

- LI Wencai, PENG Cheng. Fault analysis and protection research of distributed photovoltaic power supply incorporated into distribution network[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(6): 186-188.
- [17] FARIA P, VALE Z, SOARES J, et al. Demand response management in power systems using particle swarm optimization[J]. IEEE Intelligent Systems, 2013, 28(4): 43-51.
- [18] 李哲, 刘澄, 周杨, 等. 用户侧分布式电源对配电网电流保护的影响[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 81-87.
LI Zhe, LIU Cheng, ZHOU Yang, et al. The influence of user-side distributed power supply on current protection of distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 81-87.
- [19] 段之英, 黄润长, 负保记. 风机接入配电网的自适应电流保护方案研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(2): 33-35.
DUAN Zhiying, HUANG Runchang, YUN Baoji. Research on adaptive current protection scheme for fans connecting to distribution network[J]. Electrical Automation, 2019, 41(2): 33-35.
- [20] 颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 等. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2022-2037.
YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power dynamic optimization of distribution network based on model predictive control with renewable distributed power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.
- [21] 唐权, 胥威汀, 叶希, 等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 83-92.
TANG Quan, YAN Weiting, YE Xi, et al. Optimized configuration of distributed energy storage system for distribution network considering the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 83-92.
- [22] 华锦修, 史守圆, 程乐峰, 等. 适用于自动需求响应的分体式智能用电测控终端[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 140-148.
- HUA Jinxiu, SHI Shouyuan, CHENG Lefeng, et al. Split-type intelligent power measurement and control terminal for automatic demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 140-148.
- [23] 伍惠铨, 王淳, 左远龙, 等. 基于分时电价和蓄电池实时控制策略的家庭能量系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 23-30.
WU Huicheng, WANG Chun, ZUO Yuanlong, et al. Home energy system optimization based on time-of-use price and real-time control strategy of battery[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 23-30.
- [24] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的含分布式电源配电网无功优化[J/OL]. 电力系统保护与控制: 1-9[2019-09-12]. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.190089>.
ZHANG Xiaoying, ZHANG Yi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J/OL]. Power System Protection and Control: 1-9[2019-09-12]. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.190089>.
- [25] ABAPOUR S, MOHAMMADI-IVATLOO B, HAGH M T. A Bayesian game theoretic based bidding strategy for demand response aggregators in electricity markets[J]. Sustainable Cities and Society, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101787>.

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-09-30

作者简介:

何后裕(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网规划、电力营销等方面的研究工作; E-mail: hhyqz0710@163.com

郭健翔(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网规划、综合线损管理、电力营销等方面的研究工作;

王永利(1980—), 男, 博士, 主要从事综合能源系统、技术经济的研究工作。

(编辑 葛艳娜)