

# 考虑设备全生命周期成本的工厂 多能微网经济调度策略

殷伟<sup>1</sup> 童勤毅<sup>1</sup> 徐洋<sup>1</sup> 王亮<sup>1</sup> 董树锋<sup>2</sup> 何仲潇<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏省苏州市 215000;  
2. 浙江大学电气工程学院, 杭州市 310027)

**摘要:** 工厂是供能结构复杂的典型能源系统, 生产过程中存在多能流耦合, 优化空间大, 是多能源系统的重点发展区域。同时, 工厂中含大量的能源设备, 各种能源设备的全生命周期成本会对工厂的用能策略产生较大影响。为此, 文章针对同时考虑光伏、风机、储能、冰蓄冷空调、中央空调等多种能源设备的工厂多能微网模型, 提出了一种考虑设备全生命周期成本的工厂多能微网经济调度策略。在考虑设备全生命周期成本的基础上, 以工厂整体的运行费用最低为目标, 建立工厂日前经济优化调度模型, 并采用混合整数线性规划方法进行求解。算例结果表明, 所提的优化策略使得多种能源进行协同互补, 减小了能源转换和存储时的能量损耗, 提升了能源利用效率。同时, 在价格信号的激励下, 充分发挥了需求侧设备的调节潜力, 促进了可再生能源的消纳和电网的削峰填谷, 并优化了能源消费结构。由于将设备的全生命周期成本考虑在内, 在工程实际中具有更好的推广价值。

**关键词:** 工厂多能微网; 全生命周期成本; 经济调度; 综合能源系统

## An Economic Dispatch Strategy of Plant Multi-Energy Microgrid Considering Life Cycle Cost of Equipment

YIN Wei<sup>1</sup>, TONG Qinyi<sup>1</sup>, XU Yang<sup>1</sup>,

WANG Liang<sup>1</sup>, DONG Shufeng<sup>2</sup>, HE Zhongxiao<sup>2</sup>

(1. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215000,

Jiangsu Province, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**ABSTRACT:** Plant is a typical energy system with complex energy supply structure, there are many energy flow coupling in production process, and the optimization space is large, which is the key development area of multi-energy system. Meanwhile, there are a large number of energy equipments in plant, whose life cycle cost has a great impact on the energy strategy of plant. Therefore, aiming at the multi-energy microgrid model of the plant with considering photovoltaic, wind, energy storage, ice storage, central air-conditioning and other energy equipment, this paper presents a plant economy scheduling strategy considering full life cycle cost of equipment. With considering the whole life cycle cost of equipment, we construct a day-ahead economic dispatch model of plant with the lowest plant operating costs as the goal, and use the mixed integer linear programming method to solve the model. Numerical results show that the proposed optimization strategy enables multiple energy sources to complement each other, reduces energy consumption during energy conversion and storage and improves energy utilization efficiency. Meanwhile, under the stimulation of the price signal, the adjustment potential of the demand side equipment has been fully brought into play; renewable energy consumption and power grid peak are promoted; energy consumption structure has been optimized. Because the total life cycle cost of the equipment is considered, it has better generalization value in engineering practice.

**KEYWORDS:** plant multi-energy microgrid; life cycle cost; economic dispatch; integrated energy systems

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2017)12-0097-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2017.12.012

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901300)

## 0 引言

随着能源安全、气候危机等相关问题日益突出,能源结构变革与能源消费转变迫在眉睫。工厂作为经济发展产业的聚集区,也是区域能源系统的重点区域。工厂结构复杂,供能方式多样,各个生产环节都存在多能流耦合。然而,工厂长期存在能源结构不合理、能源利用率偏低等问题,这也意味着工厂存在较大的优化空间<sup>[1-2]</sup>。因此,提高工厂的能源利用率,实现工厂的能源结构转型与变革是经济、能源和环境之间协调发展的突破口。在此背景下,含有多种分布式能源的工厂多能微网成为业内的研究热点。该系统以优化能源结构并提高能源利用效率为目标,通过对多种能源的协同优化与控制,结合各类能源的优缺点与互补特性,对各种能源进行高效利用,并从根本上对能源消费结构进行调整,促进能源、经济、环境的可持续发展,是我国工厂能源系统未来重要的发展方向<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内外针对多能微网优化调度已有比较丰富的研究成果。文献[5]建立了以电动汽车充放电功率为优化变量,以减少微网用电费用为目标的能量管理模型,并采用基于遗传算法与粒子群算法的混合优化算法(*genetic algorithm-particle swarm optimization, GA-PSO*)进行求解;文献[6]建立以综合发电成本最低、环境效益最好以及蓄电池损耗最低作为优化目标的微网多目标优化模型,并引入一种改进的多目标粒子群优化算法进行求解;文献[7]考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略,借助二次规划与混合整数规划方法对微网中相关设备的运行策略进行优化;文献[8]提出了微网中可削减负荷补偿代价模型,以微网运行一天的综合经济成本最低为目标,建立了可削减负荷、分布式电源、燃料电池联合优化调度的4种模式;文献[9]通过考虑实时电价、风功率值以及负荷状态,构建了微电网用能费用最小的目标函数,基于预测的滚动时域优化控制框架,根据预测结果利用复杂过程全局优化进化算法对微网系统预测时域内每个时刻的控制量进行滚动最优求解;文献[10]提出了一种考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型,以运行维护成本以及能耗成本所构成的运行费用最小为目标函数,对工厂用能进行优化,得到工厂的综合需求响应策略。

综上可见,目前针对多能微网优化调度研究的优化目标大多只考虑了一次能源的成本,而未将微网中能源设备的全生命周期成本考虑在内。而在实际的微网系统中,考虑设备的全生命周期成本会对优化结果造成较大影响。鉴于此,本文针对工厂多能微网现状,将设备

全生命周期内的运行维护费用、折旧费用、启停费用均考虑在内,以工厂多能微网总体的运行费用最低为目标,建立考虑设备全生命周期成本的工厂多能微网经济调度模型,并采用混合整数线性规划法进行求解。算例结果表明,所提出的经济调度策略可提高当地可再生能源的利用率,最小化能源转换和存储时的能量损耗,并提升工厂的经济效益。同时,由于将设备的全生命周期成本考虑在内,更贴近实际情况,实用性强,能为工厂的经济最优运行提供更准确的用能策略。

## 1 工厂多能微网经济优化调度策略

工厂典型的供能系统框架如图1所示<sup>[11-12]</sup>。工厂内供给侧能源种类丰富,包括多种分布式能源与传统常规能源。除了常见的负荷外,需求侧还包括需求响应负荷等可调控负荷。能源转换与能源存储模块是实现多能互补与耦合的关键。通过各个设备自建的信息传输,能源管理器能够实现多种能源的优化调度与控制。

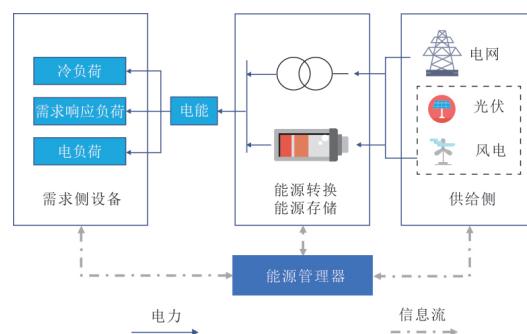


图1 工厂典型供能系统框架  
Fig. 1 Framework of typical energy supply system in plant

本文针对图1所示的工厂典型供能系统,在考虑设备全寿命周期成本的基础上,提出了工厂经济调度的模型。设计了日前经济优化调度策略。首先,输入包括用户交/直流负荷<sup>[13]</sup>、冷负荷<sup>[14]</sup>、光伏出力<sup>[15-16]</sup>、分时电价数据、各种能源设备的设备参数以及经济参数。其次,在考虑设备全生命周期的基础上,以系统整体运行成本最低为目标,在设备物理约束与能源平衡约束下,进行优化求解,制定工厂下一日的用能策略。工厂的多能微网结构如图2所示。

## 2 工厂综合能源协同优化模型

### 2.1 优化目标

本文构建的工厂日前经济优化调度策略以考虑设备全生命周期成本的日运行费用 $C_{DOC}$ 最小为目标,

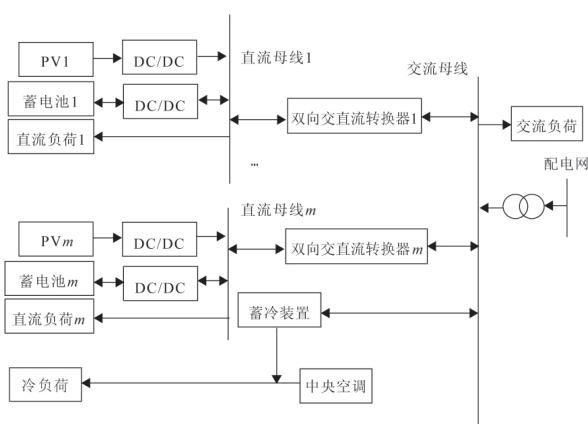


图2 工厂多能微网系统结构

Fig.2 Structure of multi-energy microgrid system in plant

包括系统的购电成本、设备运行维护成本、设备的折旧成本以及设备的启停成本。

$$\min C_{\text{DOC}} = C_E + C_{\text{OM}} + C_{\text{bw}} + C_{\text{ss}} \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{DOC}}$  为考虑设备全生命周期成本的日运行费用;  $C_E$  为系统的购电成本;  $C_{\text{OM}}$  为设备运行维护成本;  $C_{\text{bw}}$  为设备的折旧成本;  $C_{\text{ss}}$  为设备的启停成本。

(1) 购电成本:

$$C_E = \sum_t P_{\text{buy}}^t C_{\text{buy}}^t T \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{buy}}^t$  和  $C_{\text{buy}}^t$  分别为时段  $t$  的购电功率和购电价格;  $T$  为单位时段长度。

(2) 运行维护成本:

$$C_{\text{OM}} = \sum_i \sum_t \xi_i^{\text{om}} P_{\text{out},i}^t T \quad (3)$$

式中:  $\xi_i^{\text{om}}$  为设备  $i$  输出单位功率的运行维护费用;  $P_{\text{out},i}^t$  为设备  $i$  在时段  $t$  的输出功率。

(3) 设备折旧成本。假设能源设备在全寿命周期内的输出能量基本保持恒定, 则能源设备累计输出  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  能量的折旧成本  $c_{\text{bw}}$ <sup>[12]</sup> 为:

$$c_{\text{bw}} = \frac{C_{\text{bat,rep}}}{Q_{\text{lifetime}}} \quad (4)$$

$$C_{\text{bw}} = \sum_i \sum_t c_{\text{bw}} P_{\text{out},i}^t T \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{bat,rep}}$  为能源设备的更换成本;  $Q_{\text{lifetime}}$  为能源设备单体全寿命输出总能量。

(4) 设备启停成本:

$$C_{\text{ss}} = \sum_i \sum_t c_{\text{ss},i} |U_i^t - U_i^{t-1}| \quad (6)$$

式中:  $c_{\text{ss},i}$  为设备  $i$  单位时间的开停机成本;  $U_i^t$  为设备  $i$  在时段  $t$  的启停状态, 其值为 0 表示停机状态, 为 1 表示开机状态。

## 2.2 约束条件

(1) 分布式能源设备约束。

1) 电储能系统:

$$S_{\text{ES},i}^{t+1} = (1 - \sigma_{\text{ES}}^e) S_{\text{ES},i}^t + (\eta_{\text{ES}}^s P_{\text{B},s,i}^t - \frac{P_{\text{B},r,i}^t}{\eta_{\text{ES}}^r}) T \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{\text{ES}}^e$  为储能设备的自损耗系数;  $S_{\text{ES},i}^t$ 、 $P_{\text{B},s,i}^t$ 、 $P_{\text{B},r,i}^t$  分别为电储能设备  $i$  在时段  $t$  的储能量、充电功率、放电功率;  $\eta_{\text{ES}}^s$ 、 $\eta_{\text{ES}}^r$  分别为储能设备的充电效率和放电效率。

储能设备需满足储能状态约束与充放能功率约束。为了保证调度的连续性, 调度周期前后, 储能设备的储能量应保持一致。

$$\begin{cases} S_{\text{ES},i}^{\min} \leq S_{\text{ES},i}^t \leq S_{\text{ES},i}^{\max} \\ S_{\text{L},i} = S_{\text{T},i} \\ 0 \leq P_{\text{B},r,i}^t \leq \gamma_{\text{r},i}^t P_{\text{r},i}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{B},s,i}^t \leq \gamma_{\text{s},i}^t P_{\text{s},i}^{\max} \\ 0 \leq \gamma_{\text{s},i}^t + \gamma_{\text{r},i}^t \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $S_{\text{ES},i}^{\max}$ 、 $S_{\text{ES},i}^{\min}$  分别为电储能设备的最大和最小的储存容量;  $S_{\text{L},i}$ 、 $S_{\text{T},i}$  分别为储能设备的初始容量和调度周期结束时的容量;  $P_{\text{s},i}^{\max}$ 、 $P_{\text{r},i}^{\max}$  分别为储能设备的最大充电功率和最大放电功率;  $\gamma_{\text{s},i}^t$  和  $\gamma_{\text{r},i}^t$  分别为 0-1 状态变量,  $\gamma_{\text{s},i}^t$  取 1 表示充电,  $\gamma_{\text{r},i}^t$  取 1 表示放电,  $\gamma_{\text{s},i}^t$  与  $\gamma_{\text{r},i}^t$  不同时为 1。

2) 蓄冷装置。蓄冷装置利用夜间的低价电进行蓄冰作业, 在白天冷负荷高峰期释放, 实现负荷转移, 均衡城市电网负荷。再通过多能微网经济优化控制策略, 可以在满足用户需求的条件下, 实现运行费用最少。这不仅可提升用户的满意度, 还可减少用电高峰出现的概率, 对大电网安全有序用电有重要意义。

$$\begin{cases} -Q_{\text{icemax}} \leq Q_{\text{ice}}^t \leq Q_{\text{idmax}} \\ \sum_t Q_{\text{ice}}^t T \leq Q_{\text{i}} \\ \sum_t Q_{\text{ice}}^t = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $Q_{\text{ice}}^t$  为蓄冰槽供冷功率;  $Q_{\text{icemax}}$  为蓄冰槽最大蓄冷功率;  $Q_{\text{idmax}}$  为蓄冰槽最大供冷功率;  $Q_{\text{i}}$  为蓄冰槽容量。

3) 中央空调:

$$\begin{cases} Q_{\text{k}}^t = I_{\text{EER}} P_{\text{k}}^t \\ Q_{\text{k}}^t + Q_{\text{ice}}^t = Q_{\text{sys}}^t \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $Q_{\text{k}}^t$  为中央空调时段  $t$  的供冷量;  $I_{\text{EER}}$  为空调的能效比;  $P_{\text{k}}^t$  为中央空调时段  $t$  的耗电量;  $Q_{\text{sys}}^t$  为时段  $t$  的系统总冷负荷。

(2) 系统功率约束。

1) 总功率平衡约束:

$$P_{\text{buy}}^t = P_{\text{AC-load}}^t + P_{\text{AC-DC}}^t + P_{\text{ice}}^t + P_{\text{k}}^t \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{AC-load}}^t$  为交流负荷;  $P_{\text{AC-DC}}^t$  为交直流转换器功率;  $P_{\text{ice}}^t$  为冰蓄冷空调系统耗电量。

### 2) 交直流转换器约束:

$$P_{\text{AC-DC}}^t = \begin{cases} \eta_{\text{A/D}} P_{\text{DC}}^t, & \text{if } P_{\text{DC}}^t > 0 \\ 0, & \text{if } P_{\text{DC}}^t = 0 \\ \eta_{\text{D/A}} P_{\text{DC}}^t, & \text{if } P_{\text{DC}}^t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\eta_{\text{A/D}}$ 、 $\eta_{\text{D/A}}$  分别为交流转换为直流和直流转化为交流的转换效率;  $P_{\text{DC}}^t$  为直流母线的总负荷。

### 3) 直流母线总负荷约束:

$$P_{\text{DC}}^t + P_{\text{PV}}^t + P_{\text{B}_{\text{fx}}^t}^t = P_{\text{DC-load}}^t + P_{\text{B}_{\text{si}}^t}^t \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{PV}}^t$  为光伏发电功率;  $P_{\text{DC-load}}^t$  为直流负荷。

## 2.3 优化求解

上述公式中,除式(12)外,其他均为线性函数,式(12)为分段线性函数,采用文献[17]中方法可以将含分段线性函数的线性优化问题转化成混合整数线性规划来求解,最终得到工厂下一日的用能策略。

优化方法流程如图3所示。

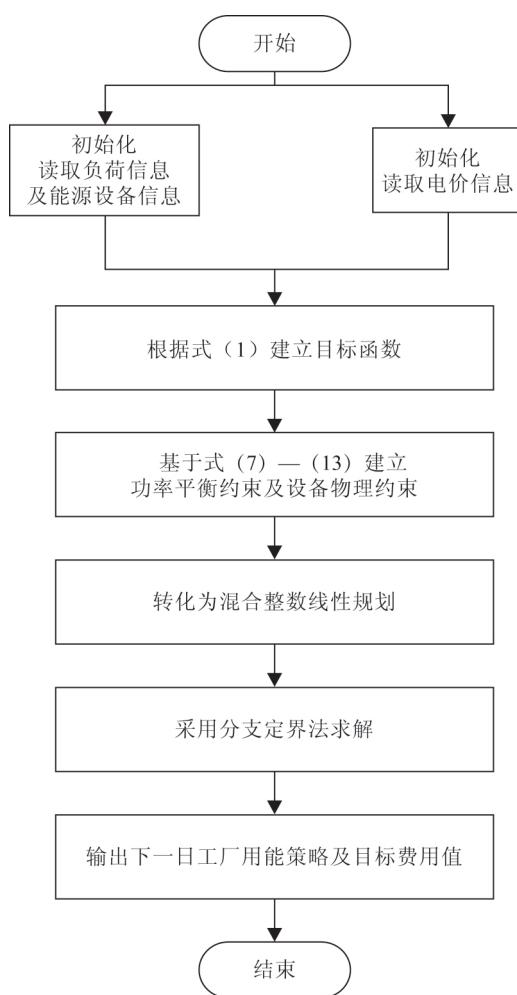


图3 优化方法流程  
Fig. 3 Flowchart of optimization method

## 3 算例分析

本文以广州某工厂为例,对工厂多能微网经济优化调度策略进行性能分析。由于生产工艺需求,大工业企业常采用三班倒的工作方式,一天内的负荷变化较为平稳,无明显的峰谷用电时段出现。本文算例所用工厂交流/直流负荷及冷负荷功率曲线如图4—6所示,光伏出力曲线如图7所示。

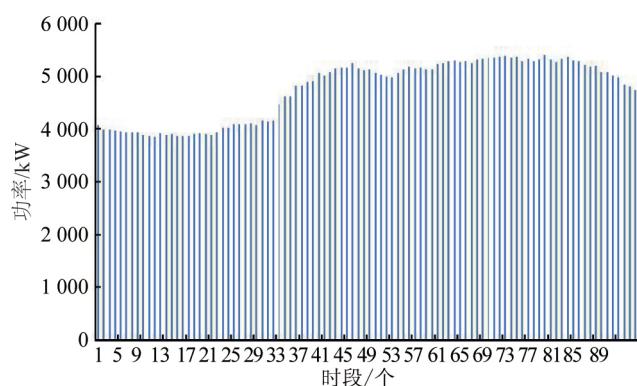


图4 工厂交流负荷功率曲线  
Fig. 4 Industry AC load curve

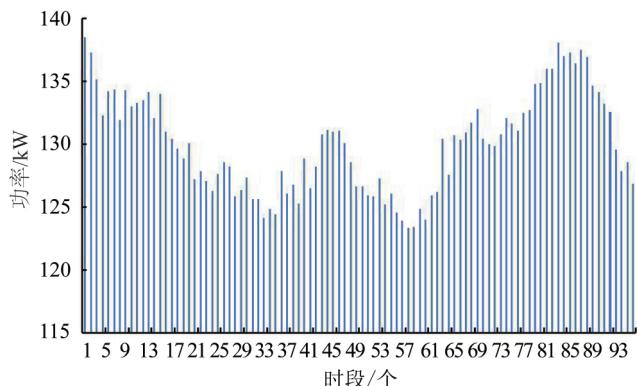


图5 工厂直流负荷功率曲线  
Fig. 5 Industry DC load curve

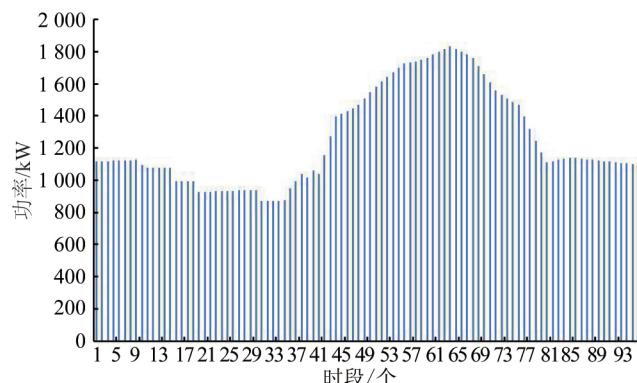


图6 冷负荷功率曲线  
Fig. 6 Cooling load curve

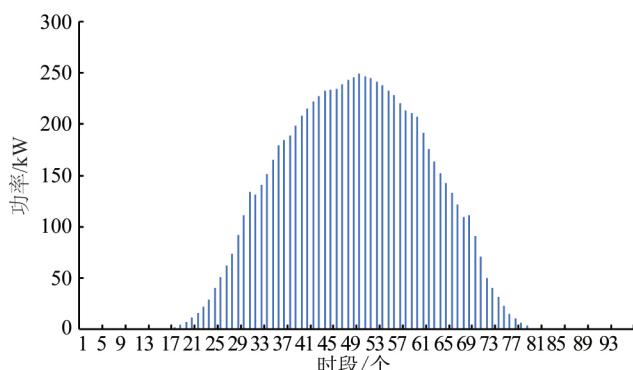


图7 光伏输出功率

Fig. 7 PV output

工厂多能微网中各种设备的运行参数和经济参数详见表1—6。

表1 大工业分时电价

Table 1 TOU tariffs of great industry

类别	时间段	价格/[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]
低谷	00:00—08:00	418
平段	12:00—17:00	754.1
	21:00—24:00	
高峰	08:00—12:00	1 190.2
	17:00—21:00	

表2 电储能参数  
Table 2 Battery parameters

电池参数	数值
容量/(kW·h)	8 200
最大/最小荷电状态	0.9/0.1
充电功率限制/kW	1 500
放电功率限制/kW	1 500
充、放电率/%	90
自放电率/%	1

表3 蓄冷装置参数  
Table 3 Parameters of cool storage device

蓄冷装置参数	数值
蓄冷容量/(kW·h)	5 000
制冷机工况制冷功率限制/kW	1 758
蓄冷工况制冷功率限制/kW	500

表4 运行维护费用  
Table 4 Operation and maintenance cost

设备	运行维护费用/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
电储能	0.005 0
蓄冷装置	0.009 7
中央空调	0.009 7

表5 设备折旧费用

Table 5 Depreciation cost of equipment

设备	折旧成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
电储能	0.36
蓄冷装置	0.22
中央空调	0.15

表6 设备启停费用

Table 6 Equipment start and stop cost

设备	单次启停成本/元
电储能	0.08
蓄冷装置	0.06
中央空调	0.06

经过上述日前经济调度策略优化后 相应的储能充放电策略和冷负荷分配情况如图8—9所示 工厂负荷变化情况如图10所示。

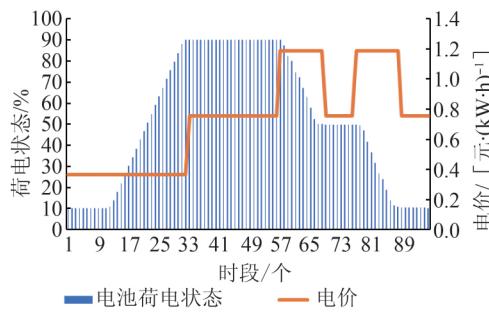


图8 电池荷电状态

Fig. 8 SOC of battery

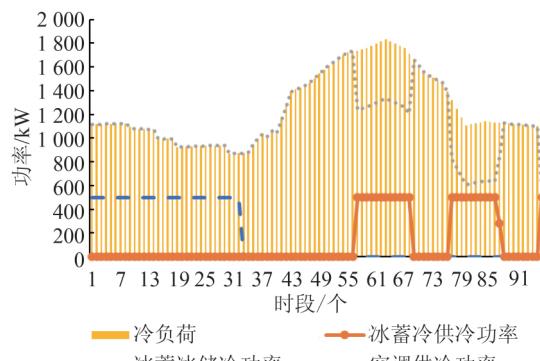


图9 冷负荷分配策略

Fig. 9 Cooling load distribution strategy

由图8可知,电池在低谷电价时段(00:00—08:00)进行充电至电池最大荷电状态(90%) ,而在高电价时段(08:00—12:00,17:00—21:00) 放电至荷电状态达到储能最小荷电状态(10%)。即由于峰

谷电价的激励,电池储能成功将峰值电价时段的负荷转移到了低谷和平段电价时段,更好地实现了削峰填谷。由于考虑了全生命周期设备成本的影响,储能充放电次数减少,避免了设备的频繁开启。同时,由于设备运行产生的费用比将平段电价时段负荷转移至低谷电价时段节约的电费要多,储能能在平段电价不放电。

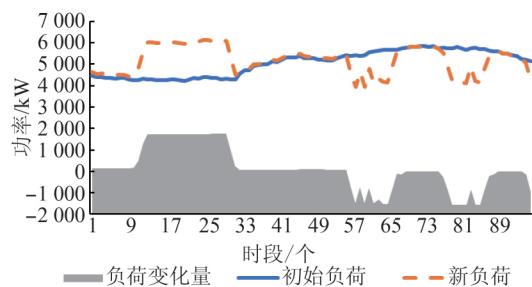


图 10 工厂的负荷变化  
Fig. 10 Load change in plant

由图 9 可知,冰蓄冷空调的蓄冰槽在夜间的低谷电价时段以最大的蓄冷能力蓄冷,将冷量存储起来,用于供应白天用电高峰时段全部或部分的冷负荷,根据夜间气温变化规律,提高机组产冷量,并利用低谷段电力,平衡峰谷用电负荷,缓解电力供应紧张。同时,充分利用了多能源置换效用,提高了工厂整体的用能效率。同样,在考虑了设备全生命周期成本后,冰蓄冷空调蓄/融冰次数有所减少。

由此可见,在分时电价的激励下,工厂中多种能源互补协同利用,充分发挥了能源互联网中的多能源置换效用,促使能量在不同能源系统中的切换和利用,优化了当地各种能源的利用率。同时,在考虑了设备全生命周期成本后,优化结果更加符合实际需求。

工厂在经济调度策略优化前后的费用节约情况如表 7 所示。

表 7 工厂的运行费用节约情况  
Table 7 Operating cost savings of industry

情况	费用/元
优化前	95 528.03
优化后	91 247.39
节约	4 280.64

由表 7 可以看出,本文提出的日前经济调度策略能够有效地减少运行费用,并通过光伏、电储能和蓄冷装置及中央空调等多种设备的协同,节约了 4.5% 的费用。

由此可见,通过多能微网中多种能源协同互补,

减小了能源转换和存储时的能量损耗,提升了能源利用效率。同时,在价格信号的激励下,充分发挥了需求侧的响应潜力,提高了用户在系统运行和能源市场中的参与程度,用户能对价格信号迅速反应,优化用户的综合用能行为,从而降低其用能成本。由于本文考虑了设备全生命周期成本的影响,更贴近工程实际,实用性强,能为工厂的经济最优运行提供更准确的用能策略。

## 4 结论

本文针对同时考虑光伏、风机、储能、冰蓄冷空调、中央空调等多种能源设备的工厂多能微网,提出了一种考虑设备全生命周期成本的工厂经济调度策略。同时将设备全生命周期内的运行维护费用、折旧费用、启停费用均考虑在内,以工厂整体的运行费用最低为目标,建立优化模型,并采用混合整数线性规划进行求解。

(1) 经过优化模型优化后,工厂中多种能源互补协同利用,充分发挥了多能源置换效用,促使能量在不同能源系统中的切换和利用,减小了能源转换和存储时的能量损耗,优化了当地各种能源的利用效率。

(2) 在考虑设备全生命周期成本时,电池的充放电次数和冰蓄冷空调的蓄/融冰次数明显减少,避免了设备的频繁开启。同时,因为此时由于设备运行产生的费用比负荷转移节约的电费要多,电池并不会在平段电价时段进行放电。由于考虑了设备的全生命周期成本,优化结果更加符合实际需求。

(3) 在分时电价的激励下,多能微网充分发挥了需求侧设备的调节潜力,提高了工厂用户在系统运行和能源市场中的参与程度,使工厂能对价格信号迅速反应,优化了工厂的能源消费结构,有效地减少了运行费用,在工程实际中具有较大的推广价值。

## 5 参考文献

- [1] 沈颖忱. 工业园区能源供给系统优化配置方法研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [2] SHEN Yingchen. Method of energy supply system configuration optimization in industrial park [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [3] 智勇, 郭帅, 何欣, 等. 面向智慧工业园区的双层优化调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 31-38, 101.
- [4] ZHI Yong, GUO Shuai, HE Xin, et al. Bilevel optimal dispatch model for intelligent industrial park [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 31-38, 101.
- [5] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- [6] JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of

- Electric Power Systems , 2015 ,39( 7 ) : 198-207.
- [4] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状 [J]. 电力系统自动化 , 2016 ,40( 5 ) : 1-7.  
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe [J]. Automation of Electric Power Systems , 2016 , 40( 5 ) : 1-7.
- [5] 苏粟,蒋小超,王玮,等. 计及电动汽车和光伏-储能的微网能量优化管理 [J]. 电力系统自动化 , 2015 ,39( 9 ) : 164-171.  
SU Su , JIANG Xiaochao , WANG Wei , et al. Optimal energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage [ J ]. Automation of Electric Power Systems , 2015 ,39( 9 ) : 164-171.
- [6] 胡晓通,刘天琪,何川,等. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行 [J]. 中国电机工程学报 , 2016 ,36( 10 ) : 2674-2681.  
HU Xiaotong , LIU Tianqi , HE Chuan , et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering the battery loss characteristics [J]. Proceedings of the CSEE , 2016 ,36( 10 ) : 2674-2681.
- [7] 魏繁荣,随权,林湘宁,等. 考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略 [J/OL]. 中国电机工程学报 , 2017 , 37 , http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170810.1632.004.html. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162499.  
WEI Fanrong , SUI Quan , LIN Xiangning , et al. Optimized energy control strategy about daily operation of islanded microgrid with wind/photovoltaic/ diesel/ battery under consideration of transferable load efficiency [J/OL]. Proceedings of the CSEE , 2017 ,37 ,http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107. TM.20170810.1632.004. html. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162499.
- [8] 李东东,徐连连,刘翔,等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度 [J]. 电力系统保护与控制 , 2017 ,45( 2 ) : 35-41.  
LI Dongdong , XU Lianlian , LIU Xiang , et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads , distributed generators ( DG ) and energy storage units [ J ]. Power System Protection and Control , 2017 ,45( 2 ) : 35-41.
- [9] 胡长斌,王鑫,罗珊娜,等. 微电网多微源能量优化协调控制 [J]. 中国电机工程学报 , 2015 ,35( 增刊 ) : 36-43.  
HU Changbin , WANG Xin , LUO Shanna , et al. Energy optimization coordination control of multi-sources in microgrid [J]. Proceedings of the CSEE , 2015 ,35 ( Supplement ) : 36-43.
- [10] 何仲潇,徐成司,刘育权,等. 考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型 [J]. 电力自动化设备 , 2017 ,37( 6 ) : 69-74.  
HE Zhongxiao , XU Chengsi , LIU Yuquan , et al. Industrial park IDR model considering multi-energy cooperation [J]. Electric Power Automation Equipment , 2017 ,37( 6 ) : 69-74.
- [11] 王成山,洪博文,郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略 [J]. 电网技术 , 2013 ,37( 7 ) : 1775-1782.  
WANG Chengshan , HONG Bowen , GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios [ J ]. Power System Technology , 2013 ,37( 7 ) : 1775-1782.
- [12] 赵耀. 基于分布式电源的微网控制及运行优化研究 [D]. 天津: 南开大学 , 2013.  
ZHAO Yao. Research on control and operation optimization of microgrid based on distributed generation [ D ]. Tianjin: Nankai University , 2013.
- [13] WU Z , ZHOU S , LI J , et al. Real-time scheduling of residential appliances via conditional risk-at-value [J]. IEEE Transactions on Smart Grid , 2014 ,5( 3 ) : 1282-1291.
- [14] 吴杰. 冰蓄冷空调系统负荷预测模型和系统优化控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学 , 2002.  
WU Jie. Study on load prediction model and optimal control of ice storage system [D]. Hangzhou: Zhejiang University , 2002.
- [15] LOCMENT F , SECHILARIU M , HOUSSAMO I. DC load and batteries control limitations for photovoltaic systems. Experimental validation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics , 2012 ,27 ( 9 ) : 4030-4038.
- [16] SKOPLAKI E , PALYVOS J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations [J]. Solar Energy , 2009 ,83( 5 ) : 614-624.
- [17] 钱颂迪,甘应爱,陈秉正,等. 运筹学 [M]. 北京: 清华大学出版社 2005: 1-475.

收稿日期: 2017-10-01

作者简介:

殷伟( 1971 ) 男 硕士 高级工程师 主要从事电网调度管理工作;  
童勤毅( 1979 ) 女 硕士 工程师 主要从事继电保护工作;  
徐洋( 1976 ) 男 高级工程师 主要从事电网运行工作;  
王亮( 1982 ) 男 硕士 高级工程师 主要从事电网运行工作;  
董树锋( 1982 ) 男 博士 副教授 主要研究方向为状态估计和有源配电网分析;  
何仲潇( 1993 ) 男 硕士研究生 主要研究方向为综合能源系统优化调度。

( 编辑 景贺峰)