

文章编号:0254-0096(2020)01-0273-09

# 基于风电-蓄热式电锅炉联合供暖的风电消纳 多目标双层优化调度

杨锡运<sup>1</sup>, 张洋<sup>1</sup>, 谢志佳<sup>2</sup>, 付果<sup>1</sup>, 耿娜<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;  
3. 吉林省电力科学研究院, 长春 130021)

**摘要:**为解决中国“三北”地区供热期间“风热冲突”问题,在风电消纳困难的电网末端加装蓄热式电锅炉,利用弃风电量进行供热以促进风电就地消纳。该文以弃风消纳最大和运行成本最小为目标建立基于风电-蓄热式电锅炉联合供暖的风电消纳多目标优化模型,提出双层优化求解的思想,并采用改进型多目标粒子群优化算法进行求解,对生成的 Pareto 解集使用模糊隶属度法进行筛选。基于中国吉林省某示范工程的实际数据的仿真结果验证了该方法能够有效降低运行成本,提高风电消纳水平。

**关键词:** 风电消纳; 蓄热式电锅炉; 多目标双层优化

**中图分类号:** TM61

**文献标志码:** A

## 0 引言

中国“三北”地区是弃风最为严重的地区<sup>[1,2]</sup>,一个重要原因是“三北”地区电网电源以热电联产机组为主,电网灵活性差。首先,在冬季供暖期间热电联产机组因按照“以热定电”模式运行使得向下调峰能力不足<sup>[3]</sup>,若遇风电大发,电网只能采用弃风手段平衡电力需求,即“风热冲突”问题;其次,风电出力具有季节性,在冬季风电平均出力最高,且具有“昼低夜高”的反调峰特性<sup>[4]</sup>,使风电消纳问题形势更加严峻;另外,因“三北”本地负荷不足而外送通道受限的问题,电网建设与“三北”地区风电发展不匹配也是导致弃风限电的一个重要原因<sup>[5]</sup>。

为解决“三北”地区的风电消纳问题,国家出台了一系列政策措施,鼓励推广使用弃风电力供热,利用电采暖方式实现电能替代,增大风电上网空间<sup>[6-7]</sup>。此外,采用储能技术辅助消纳弃风也引起了业界的广泛关注<sup>[8-10]</sup>。文献[11]提出热电机组通过配置电锅炉来解耦其“以热定电”约束,进而降低强迫出力以接纳风电上网的方案。文献[12]将储热纳入包含风电的电力系统有功调度体系,通过对储热环节的控制打破以热定电的耦合关系,提升电

力系统调节能力,从而提升风电消纳能力。文献[13]以风电、蓄热式电锅炉联合构成供热系统,结合热负荷需求建立风电、蓄热式电锅炉联合调度优化模型,并通过仿真来验证其合理性。文献[14]提出在电网末端加装蓄热式电锅炉,利用弃风电量进行供热,并以系统发电成本最低为目标函数,构建多区域热-电模型,同时也给出了蓄热式电锅炉的运行方式。综上所述,目前对利用蓄热式电锅炉以提升风电场风电就地消纳的研究主要集中在建立调度模型和经济性评估2个方面<sup>[15,16]</sup>,从而构建单一的目标函数。

本文建立以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标的双层多目标优化模型,提出双层优化求解的思想,并采用多目标非支配粒子群算法对所建模型进行求解,通过吉林某示范工程算例证明该方法能有效提高风电消纳水平和系统运行经济性。

## 1 蓄热式电锅炉用于风电供暖实施方式

### 1.1 蓄热式电锅炉技术特点

蓄热式电锅炉是一种广义上的储能系统,其产生的

收稿日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(51677067); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015MS32); 国家电网公司总部科技项目(KY-SG-2016-204-JLDKY)

通信作者: 张洋(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源发电与大规模储能技术方面的研究。1021688090@qq.com

热量一部分直接供热,另一部分存入蓄热装置作为可时移负荷,若考虑峰谷电价,在低电价时蓄热,高电价时放热将会节省大量购电开支,并对电网起到削峰填谷的积极作用。

算例采用水箱蓄热电极式锅炉,为电极加热方式。三相电流经过炉内悬挂的电极间通过炉水,利用炉水高热阻特性,在炉水中将电能转换为热能。炉水的温度即锅炉的功率可通过升降电极浸没在水中的深度,从而改变通过炉水的电流自动控制,且能实现从零至满功率运行无极调节。电极式锅炉还可集成大规模使用,功率达到百 MW 级,广泛应用在弃风电量供热和火电机组灵活性改造工程,其工作原理及系统结构如图 1 所示。

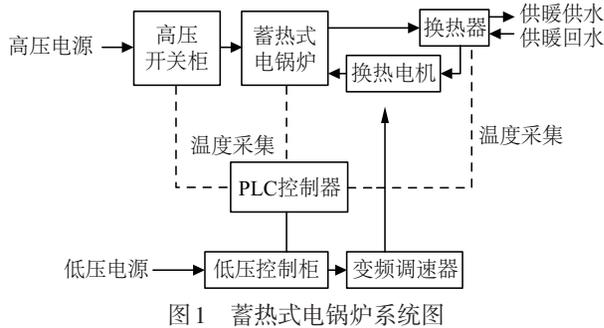


图1 蓄热式电锅炉系统图

## 1.2 蓄热式电锅炉非直接供电模式

目前,蓄热式电锅炉大多建设于热负荷集中区域,距离风电场较远,新建线路由风电场对蓄热式电锅炉进行直供电成本投资较大,所以目前大多采用非直接供电模式,即风电场所发电力送入电网,蓄热式电锅炉从电网购电制热,由风电场和电网公司协商确定交易电量。当风电出力不足无法满足基本热负荷时,系统能够及时从电网购电,增加系统供热的安全性和可靠性。其中蓄热式电锅炉在夜间负荷低谷时段开始运行,增加电网中电负荷,进而增加风电消纳量、减少弃风,将电能转换成热能,一部分直接用于该时段的居民供热,另一部分储存在蓄热罐内;在电负荷高峰时段,电锅炉减少风电供热或停运,蓄热罐开始进行供热。此种方式虽能消纳部分风电,但效率较低。为提升风电消纳能力,需利用蓄热式电锅炉跟踪风电出力,依据《关于完善电力用户与发电企业直接交易试点工作有关问题的通知》-电监市场[2009]20号,蓄热式电采暖符合“大用户直购电”的准入条件,通过直接与风电场协商以协定电价购入弃风电,电网只收取输配电成本,其余部分电量按分时电价从电网购入。风电场和蓄热式电锅炉的非直接供电模

式运行示意如图 2 所示。

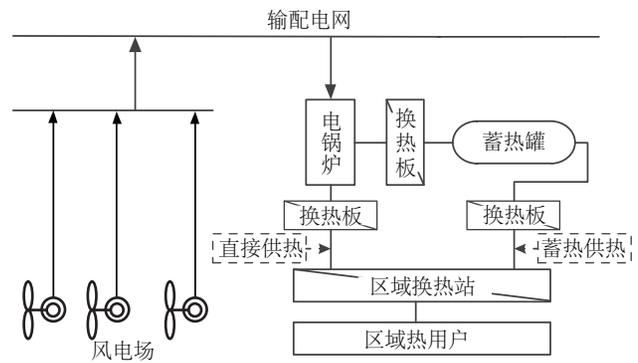


图2 非直接供电模式运行机制图

Fig. 2 Operation mechanism of non direct power supply mode

## 2 蓄热式电锅炉多目标双层调度优化模型

采用蓄热式电锅炉供暖能够使电力系统在既有调节能力内消纳更多的风电,但也会增加电力系统运行成本。因此如何以最低的成本实现最大风电消纳是蓄热式电锅炉优化运行的关键。本文以弃风消纳最大和运行成本最小为目标函数,综合考虑设备容量、供热合约、设备功率等约束条件,采用改进的多目标粒子群优化算法,得出风电-蓄热式电锅炉系统最优调度计划。

### 2.1 多目标优化数学模型

在非直供模式下,以弃风消纳最大为目标的目标函数为:

$$\max W_a = \sum_{t=1}^T P_{a,t} \cdot h \quad (1)$$

式中,  $T$ ——调度周期,取调度周期为 1 d,调度时长为 1 h,即  $T=24$  h;  $t$ ——调度时段;  $P_{a,t}$ —— $t$  时段蓄热式电锅炉消纳弃风功率, MW。

运行成本是指供暖期蓄热式电锅炉运行所消耗电量对应的成本,目标函数为:

$$\min C = Q_a(C_a + C_n) + Q_b C_t \quad (2)$$

式中,  $Q_a$ ——蓄热式电锅炉消耗的弃风电量, MWh;  $Q_b$ ——蓄热式电锅炉消耗的非弃风电量, MWh;  $C_a$ ——与风电场签订的协定电价, 0.2617 ¥/kWh;  $C_t$ ——分时电价, ¥/kWh;  $C_n$ ——电网公司输配电成本, 0.11 ¥/kWh。分时电价如表 1 所示。

约束条件——消纳弃风约束、系统功率平衡约束、电锅炉功率约束、蓄热装置状态约束、供热合约约束等。

表1 分时电价表  
Table 1 Time-of-use price

	峰段	平段	谷段
时段	08:00~12:00 14:00~21:00	05:00~08:00 12:00~14:00 21:00~00:00	00:00~05:00
电价/度·kWh <sup>-1</sup>	0.804	0.550	0.329

### 1) 弃风约束

本文研究的风电-蓄热式电锅炉系统的调度优化问题是以消纳弃风为前提的,所以应满足弃风约束:

$$P_{a,t} \leq P_{w,t} \quad (3)$$

式中,  $P_{w,t}$  ——弃风功率, MW。

### 2) 功率平衡约束

功率平衡约束分别包括蓄热式电锅炉的热功率平衡约束、电功率平衡约束:

$$Q_{c,t} = Q_{c,t-1} + H_{io,t} \cdot h \quad (4)$$

$$P_{ch,t} = P_{a,t} + P_{n,t} \quad (5)$$

式中,  $Q_{c,t}$  ——  $t$  时段蓄热罐的储热量, kWh;  $H_{io,t}$  ——  $t$  时段蓄热罐储放热功率, MW, 且当  $H_{io,t} > 0$ , 表示蓄热罐放热,  $H_{io,t} < 0$ , 表示蓄热罐储热;  $h$  ——蓄热式电锅炉工作时间;  $P_{n,t}$  ——  $t$  时段蓄热式电锅炉消耗的非弃风功率, MW。

结合式(2)可知:

$$Q_b = \sum_{t=1}^T P_{n,t} \cdot h \quad (6)$$

### 3) 电锅炉功率约束:

$$0 \leq P_{ch,t} \leq P_{ch,max} \quad (7)$$

式中,  $P_{ch,t}$  ——电锅炉加热功率, MW;  $P_{ch,max}$  ——电锅炉最大功率, MW。

### 4) 设备状态约束

蓄热罐的储热量应处于其限值之内,即:

$$Q_{min} \leq Q_{c,t} \leq Q_{max} \quad (8)$$

式中,  $Q_{min}$  ——蓄热罐最小储热量, kWh;  $Q_{max}$  ——蓄热罐最大储热量, kWh。

### 5) 合约约束

蓄热式电锅炉与供热公司的合约规定了每个时段向供热公司供热的下限,即:

$$Q_{hot,t} \geq Q_{hot,min} \quad (9)$$

式中,  $Q_{hot,t}$  ——  $t$  时段锅炉向供热公司提供的热量, MW;  $Q_{hot,min}$  ——  $t$  时段锅炉向供热公司供热下限, MW。

$Q_{hot,t}$  可进一步表述为:

$$Q_{hot,t} = \alpha \cdot P_{ch,t} \cdot h - \beta \cdot H_{io,t} \cdot h \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  ——电锅炉电热转化系数, 取  $\alpha = 0.99$ ;  $\beta$  ——蓄热罐管道热损失, 取  $\beta = 0.05$ 。

## 2.2 多目标双层优化求解

双层规划(bi-level programming, BLP)是一类具有主从递阶关系结构的数学模型,上层问题和下层问题都有各自的目标函数和约束条件。上层问题的目标函数和约束条件不仅与上层决策变量有关,而且还依赖于下层问题的最优解,双层规划的数学模型描述为:

$$\begin{aligned} (U) & \begin{cases} \min F(x,y) \\ \text{s.t. } G(x,y) \leq 0 \end{cases} \\ (L) & \begin{cases} \min f(x,y) \\ \text{s.t. } g(x,y) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, (U) ——上层规划; (L) ——下层规划;  $F$  ——上层规划的目标函数;  $f$  ——下层规划的目标函数;  $x$  ——上层规划的决策变量;  $y$  ——下层规划的决策变量;  $G$  ——上层规划的约束条件;  $g$  ——下层规划的约束条件。

蓄热式电锅炉运行功率  $P_{ch,t}$  既是合约约束中的变量,又是电功率平衡中的约束条件,考虑到1天24个调度时段,  $P_{ch,t}$  的变化会引起对应调度时段的  $P_{w,t}$  和  $P_{n,t}$  的变化,如采用单层多目标优化算法进行优化,则  $P_{ch,t}$  作为电功率平衡中的约束条件也在不停地变化,运算量过大对寻优过程带来极大的困难,且寻优后的效果并不好。

因此,本文采用多目标双层优化调度模型。下层规划以蓄热式电锅炉加热电量最大和蓄热式电锅炉处从电网购电费用最低为目标函数:

$$\begin{cases} \max W_{ch} = \sum_{t=1}^T P_{ch,t} \cdot h \\ \min C_{an} = \sum_{t=1}^T C_t P_{ch,t} \cdot h \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $W_{ch}$  ——蓄热式电锅炉加热电量, kWh;  $C_{an}$  ——蓄热式电锅炉处从电网购电费用, ¥。

以  $P_{ch,t}$  为决策变量,根据热功率平衡约束、设备状态约束、合约约束、电锅炉功率约束等约束条件,利用多目标优化算法进行优化,得到蓄热式电锅炉加热功率  $P_{ch,t}$  的一簇 Pareto 最优解。

将其作为约束条件代入上层规划中,上层规划以式(1)和式(2)作为目标函数:

$$\begin{cases} \max W_a = \sum_{t=1}^T P_{a,t} \cdot h \\ \min C = Q_a(C_a + C_n) + Q_b C_t \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $W_a$  ——弃风电量消纳最大, kWh;  $C$  ——供暖期

蓄热式电锅炉运行所消耗电量对应的成本, ¥。

以  $P_{a,t}$  为决策变量, 各时段消纳的弃风电量为变量, 根据弃风约束、电功率平衡约束、电锅炉功率约束等约束条件, 用多目标优化算法进行优化, 得到消纳弃风电量的一簇 Pareto 最优解。

### 2.3 最优折衷解的选取

由于两目标函数量纲不同, 本文采用模糊隶属度函数来对每一个目标分别构造隶属度函数, 将其转化为对优化结果的满意度, 通过满意度比较找出最优折衷解。消纳弃风越大, 相应隶属度越大; 运行成本越少, 相应的隶属度越大。

定义模糊隶属度函数为:

$$\mu(k) = \begin{cases} 0, & f(k) < K_{\max} - \delta_1 \\ \frac{f(k) - (K_{\max} - \delta_1)}{\delta_1}, & K_{\max} - \delta_1 \leq f(k) \leq K_{\max} \\ 1, & f(k) > K_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu(p) = \begin{cases} 1, & f(p) < P_{\min} \\ \frac{(P_{\min} + \delta_2) - f(p)}{\delta_2}, & P_{\min} \leq f(p) \leq P_{\min} + \delta_2 \\ 0, & f(p) > P_{\min} + \delta_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\mu(k)$ 、 $\mu(p)$  —— 弃风消纳电量隶属度函数和运行成本隶属度函数;  $f(k)$ 、 $f(p)$  —— 弃风消纳电量  $W_a$  和运行成本  $C$ ;  $K_{\max}$  —— 以弃风消纳最大为目标时的值;  $P_{\min}$  —— 以运行成本最小为目标时的值;  $\delta_1$  —— 消纳弃风可接受的伸缩值;  $\delta_2$  —— 运行成本可接受的伸缩值。两目标隶属度函数如图 3 所示。

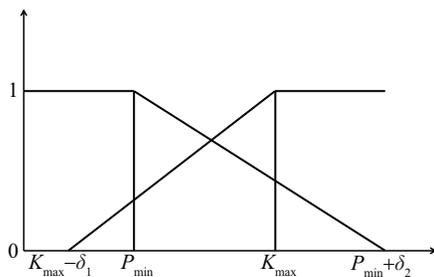


图 3 各目标相应的隶属度函数

Fig. 3 Corresponding membership function of each target

当隶属度函数  $\mu = 0$  时表示对某个目标函数值完全不满意, 而当  $\mu = 1$  时表示对某个目标函数值完全满意。根据式(16)求解 Pareto 最优解集中个解的标准化满意度值, 其中满意度值最大的解即为最优折衷解:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \mu_i^k} \quad (16)$$

式中,  $\mu^k$  —— 标准化满意度值;  $N$  —— 待优化目标函

数个数,  $N = 2$ ;  $M$  —— 最优解个数;  $i$  —— 第  $i$  个隶属度函数。

### 2.4 改进粒子群算法

本文采用改进的多目标粒子群算法来求解式(3)~式(15)的优化问题。在标准粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)中, 粒子分别根据式(16)、式(17)所示的更新速度和位置:

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - z_i^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - z_i^k) \quad (17)$$

$$z_i^{k+1} = z_i^k + v_i^{k+1} \quad (18)$$

式中,  $v_i^k$  —— 第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代时的速度;  $k$  —— 当前迭代次数;  $\omega$  —— 惯性权重因子;  $r_1$ 、 $r_2$  —— 0~1 之间的随机数;  $c_1$ 、 $c_2$  —— 学习因子;  $z_i^k$  —— 第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代时位置;  $p_{\text{best}}$  —— 粒子找到的个体最优解;  $g_{\text{best}}$  —— 粒子找到的群体最优解。

当目标函数规模大且复杂时, 算法易陷入到局部最优, 且后期收敛速度慢, 求解精度不高。为改善这些缺陷, 本文做如下改进:

1) 采用动态惯性权重  $\omega$

则有:

$$\omega(k) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \left( \frac{k}{k_{\max}} \right)^2 \quad (19)$$

式中,  $k_{\max}$  —— 最大迭代次数,  $k_{\max} = 100$ 。

$\omega$  随进化代数的增加减小, 取值较大, 因而前期变化缓慢, 提高了算法的全局搜索能力, 后期  $\omega$  变化迅速, 增强了算法的局部优化能力。

2) 改进学习因子  $c_1$ 、 $c_2$

学习因子可理解为粒子间信息交流能力的强弱, 值不应设得太大或太小。通常  $c_1 = c_2 = 2$  且取值范围为 0~4。考虑到学习因子对粒子群算法的影响, 本文采用线性调整策略:

$$\begin{cases} c_1 = 2.5 - \frac{k}{k_{\max}} \\ c_2 = 1 - \frac{1.5k}{k_{\max}} \end{cases} \quad (20)$$

### 2.5 多目标函数的求解步骤

步骤 1: 第 1 层优化模型以弃风消纳量最大和蓄热式电锅炉处从电网购电费用最低为目标函数, 得到蓄热式电锅炉加热功率  $P_{\text{ch},t}$  的一簇 Pareto 最优解。

步骤 2: 将其作为约束条件代入第 2 层优化模型, 得到消纳弃风电量的一簇 Pareto 最优解。

步骤 3: 对消纳弃风电量的 Pareto 最优解集中的每个解利用模糊隶属度函数求得满意度值, 满意度值最大的解即为最优折衷解。具体流程图如图 4 所示。

图 4 中,  $M$  为第 1 层优化模型 Pareto 最优解集数量,  $m$  为第 1 层优化模型 Pareto 最优解集中第  $m$  个最优解。

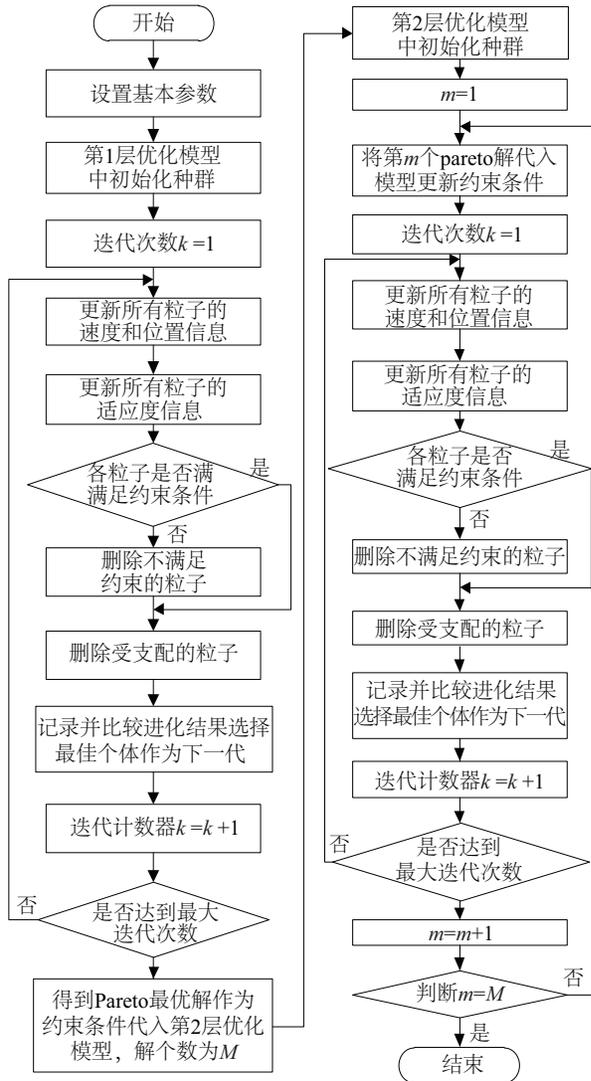


图 4 双层多目标优化模型具体流程图

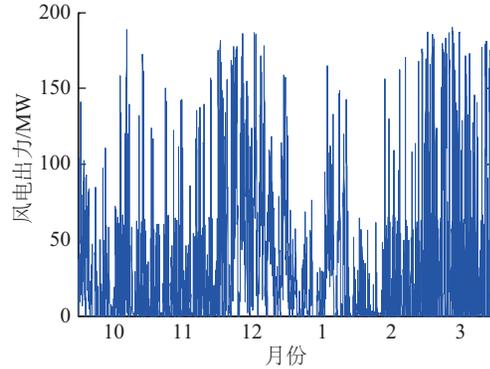
Fig. 4 Specific flow chart of multi-objective bi-level optimization operation

### 3 算例分析

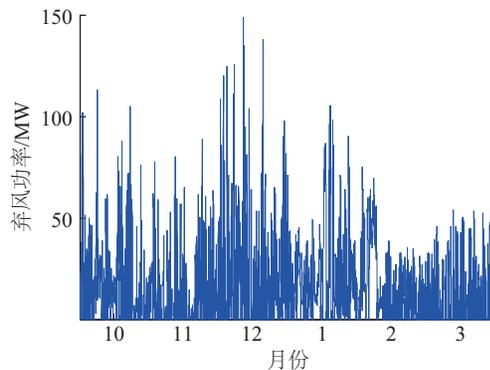
#### 3.1 算例说明

以中国风力富集的吉林某风电场为例,吉林地区的供热期一般约为 170 d,某风电场在 2015-2016 年供热期的风电出力及弃风功率如图 5 所示。从图 5b 中可看出吉林地区在冬季供热期内存在严重的弃风问题,统计供热期内弃风数据得到弃风出力概率如图 6 所示。从图 6 中不难发现,弃风功率在 10 MW 以下概率最大,功

率升高相应的概率下降,出现风电极端出力的概率较低,绝大多数波动位于 40 MW 以下,共占整个出力概率的 85%,据此本文选择蓄热式电锅炉加热功率为 30 MW、蓄热罐储热量 123 MWh (即 442 GJ)进行优化求解。



a. 整个供热期风电出力图



b. 整个供热期弃风功率

图 5 2015~2016年供热期的风电出力及弃风功率图

Fig. 5 Wind power output and abandoned wind power output during whole heating period from 2015 to 2016

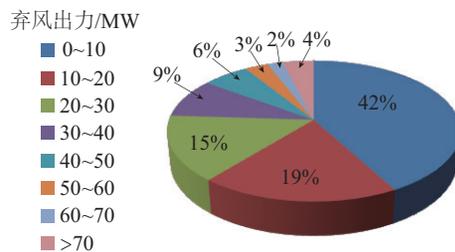


图 6 供热期内风电场弃风出力概率

Fig. 6 Abandoned wind power output probability of wind plant during heating period

吉林省风电大发时段集中在 22:00-次日 08:00,且此时段内负荷处于低谷时期,电网的消纳能力较弱,因此选择在 22:00 启动风电供热系统,以 22:00 至次日 21:00 为 1 个调度周期。在供热中期随机选取

1 d 实测数据进行分析,该日内弃风电量为 401.81 MWh,其中的供热负荷计算参数为供暖面积 20 万  $\text{m}^2$ ,供暖面积热指标  $80 \text{ W}/\text{m}^2$ ,则单位面积供热负荷曲线如图 7 所示。日调度内不考虑机组启停。

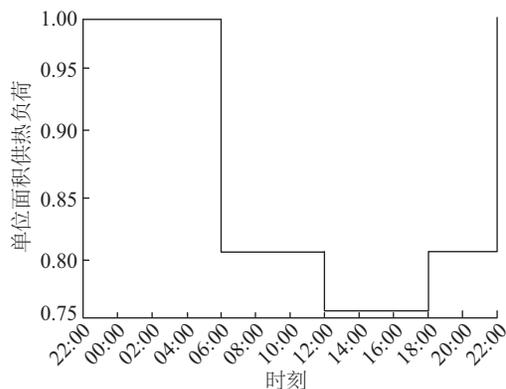


图 7 单位面积日热负荷曲线图

Fig. 7 Diagram of daily heat load curve

## 3.2 算例结果分析

### 3.2.1 双层优化与单层优化结果对比分析

采用 Pareto 算法分别求解多目标双层优化模型和单层优化模型,得到如图 8 所示的在目标函数空间上的分布最终非劣解集。

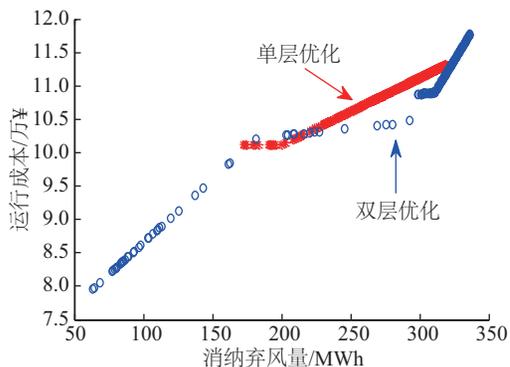


图 8 Pareto 最优解集

Fig. 8 Diagram of Pareto optimal solution set

分别以风电消纳电量和运行成本最小为目标搜索极端解,如表 2 所示。

单以风电消纳最大为目标会增加运行成本;单以经济运行目标则不利于风电消纳。需要综合考虑各方面因素,充分挖掘 Pareto 最优解里所包含的信息以便于做出决策。因此根据模糊隶属度函数计算 Pareto 最优解集中决策向量的满意度,选择满意度值最大的解作为最优折衷解,如表 3 所示。

表 2 Pareto 解集中极端解

Table 2 Extreme solution in Pareto optimal set

优化模型	优化目标	风电消纳/MWh	运行成本/元
多目标双层优化模型	$W_s$ 最大	336.3	117658.5
优化模型	$C$ 最小	63.42	79567.6
多目标单层优化模型	$W_s$ 最大	318.64	113184.7
优化模型	$C$ 最小	171.86	101208.9

表 3 最优折衷解

Table 3 Best compromise solutions

优化模型	风电消纳/MWh	运行成本/元
多目标双层优化模型	292.90	104817.3
多目标单层优化模型	233.94	104854.9

从图 8 和表 2、表 3 中可看出,相比于单层优化模型,双层优化模型的非劣解集在目标函数空间上的分布范围更为宽广,非劣解集的效果普遍更好;在求解过程中,双层优化模型的计算时间也大大少于单层优化模型;在最优折衷解比较中,双层优化模型的运行成本略少于单层优化模型,但却多消纳了 58.6 MWh 的弃风电量。

### 3.2.2 双层优化调度与传统调度结果对比分析

为说明蓄热式电锅炉供暖对风电消纳的作用,将蓄热式电采暖多目标双层优化模型与蓄热式电锅炉消纳风电的传统调度方式进行对比分析,并从蓄热式电锅炉调节情况、风电消纳情况和运行成本 3 个方面来验证本文模型的有效性。

#### 1) 蓄热式电锅炉调节情况

蓄热式电锅炉多目标双层优化模型与传统调度方式得到的蓄热式电锅炉加热功率如图 9 和图 10 所示。传统调度方式为每天 22:00~次日 05:00 电锅炉以 30 MW 额定功率稳定运行,产生的热量一部分直接供热,另一部分热量储存进蓄热罐,并在 05:00~22:00 时段内放空。传统调度方式并未考虑弃风功率的因素,无法跟踪弃风功率曲线,效率较低,在第 3 调度时段(22:30~22:45)和第 5 个调度时段(23:00~23:15)出现了蓄热式电锅炉加热功率大于弃风功率的情况。

如图 10 中黑线所示,蓄热式电锅炉加热功率在每个调度时段尽量跟踪弃风功率曲线,曲线与坐标周围为蓄热式电锅炉所消耗电量,由图 10 中可看出,所用电量绝大多数来源于弃风电量,仅在第 23 个调度时段(02:30~02:45)出现蓄热式电锅炉加热功率大于

弃风功率的情况。

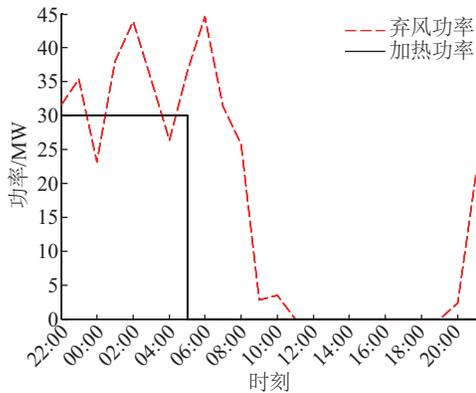


图9 蓄热式电锅炉传统方式消纳弃风

Fig. 9 Traditional way to eliminate wind use regenerative electric boiler

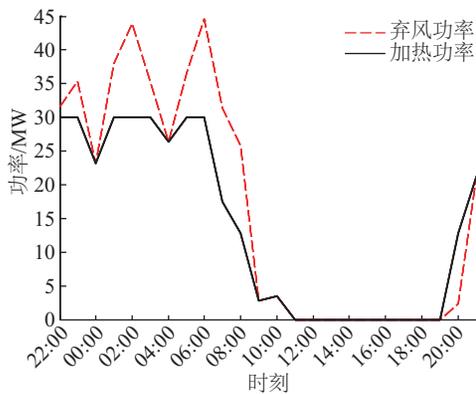


图10 本文提出的优化调度方法消纳弃风

Fig. 10 Optimal scheduling method proposed in this paper eliminates abandoned wind

从图 11 中看到通过优化调度方式可更充分发挥蓄热罐的作用,更多消纳在电负荷低谷时段的弃风,转换为热贮存在蓄热罐中,在电负荷高峰时段为热负荷供暖,起到削峰填谷的效果。

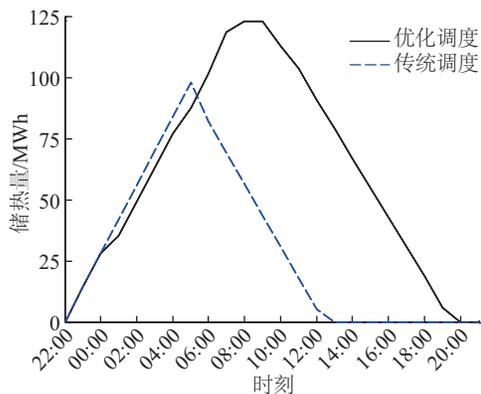
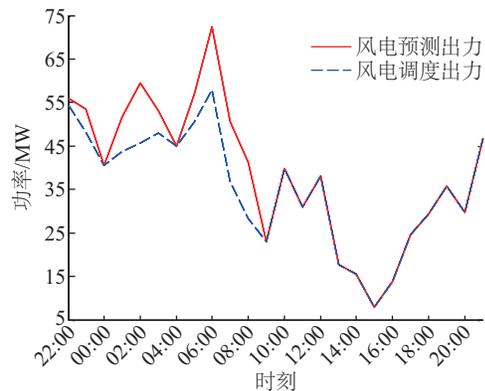


图11 蓄热罐储热量的变化

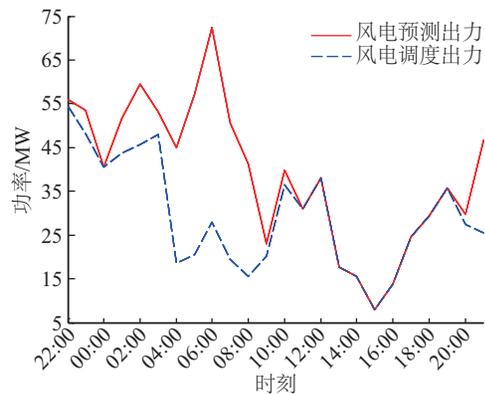
Fig. 11 Heat storage curve of heat storage tank

## 2) 风电消纳情况

蓄热式电采暖多目标双层优化模型与蓄热式电锅炉消纳风电的传统调度方式得到的风电调度出力曲线如图 12 所示。采用传统优化调度模型时(图 12b),电网消纳的风电量为 731.99 MWh,风电调度出力方案在一天 24 个时段中受限时段多达 14 个(如第 28 个调度时段 03:45~04:00 和第 29 个调度时段 04:00~04:15 等),弃风电量为 202.33 MWh,弃风率为 21.6%;采用多目标双层优化模型时(图 12a),电网消纳的风电量增加到 825.21 MWh,风电调度出力受限时段减少至 9 个,弃风电量为 108.91 MWh,弃风率为 11.66%,风电消纳水平得到明显提高,有效减少了弃风量。



a. 优化调度模型下



b. 传统调度模型下

图12 优化调度模型下和传统调度模型下的风电调度出力

Fig. 12 Wind dispatching of optimal model and traditional scheduling model

## 3) 系统运行成本

蓄热式电锅炉消纳风电的传统调度方式并不能完全满足热负荷的供暖需求,缺少的热量由供热公司供热,购买价格为 47 ¥/GJ。蓄热式电锅炉多目标双层优化模型与蓄热式电锅炉消纳风电的传统调度方式得到的系统运行成本如表 4 所示。

表 4 不同模型下的系统运行成本

Table 4 System operation costs of different model

优化模型	运行成本/元	购热费用/元	系统运行成本总费用/元
多目标双层优化模型	104817.30	0.0	104817.30
传统调度模型	80826.79	21824.9	102651.75

蓄热式电锅炉消纳风电的传统调度方式虽然比多目标双层优化调度的运行成本低,但由于从供热公司购热,使得传统调度方式的总费用与多目标双层优化模型几乎相差无几,如果考虑到风电上网和供热的收益,多目标双层优化模型的经济性会更好。综上,多目标双层优化模型是提高系统运行经济性和风电消纳水平的有效方式。

## 4 结 论

本文针对目前利用蓄热式电锅炉消纳风电模型目标函数单一、无法兼顾弃风消纳和经济性的问题,建立风电-蓄热式电锅炉联合供暖模型,以弃风消纳最大和运行成本最小为目标函数,综合考虑弃风约束、合约约束、状态约束及功率约束等约束条件,提出双层优化求解的思想,采用多目标非支配粒子群算法进行求解,通过模糊隶属度法解决不同目标不同量纲的问题选取最优折衷解,得到弃风消纳最大和运行成本最小下的优化调度方案。仿真结果表明:本文提出的优化调度方法比传统的蓄热式电锅炉运行方式不仅在消纳风电电量效率上有所提升,同时在经济性上有着优越性,统筹兼顾了蓄热式电锅炉用于弃风供暖对风电消纳和经济运行的影响,为调度运行人员的科学决策指导提供了借鉴。

### [参考文献]

- [1] 国家电力监管委员会. 重点区域风电消纳监管报告[R]. 北京: 国家电力监管委员会, 第10号, 2012.  
National Energy Administration. Key regions wind power consumption regulatory report [R]. Beijing: National Energy Administration, No.10, 2012.
- [2] 朱凌志, 陈宁, 韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 29-34.  
ZHU L Z, CHEN N, HAN H L. Key problems and solutions of wind power accommodation [J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [3] 张海明. 三北地区弃风限电现状及出路探索[J]. 科技创新与应用, 2015(32): 179-180.

ZHANG H M. Current situation of wind power curtailment and power limit in the three northern regions of China and the way out [J]. Technology innovation and application, 2015(32): 179-180.

- [4] 丁明, 朱乾龙, 韩平平, 等. 基于聚类-判别分析的风电场概率等值建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4770-4791.  
DING M, ZHU Q L, HAN P P, et al. Probabilistic equivalent model for wind farms based on clustering-discriminant analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4770-4791.
- [5] 汪宁渤, 王建东, 何世恩. 酒泉风电跨区消纳模式及其外送方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 82-89.  
WANG N B, WANG J D, HE S E. Cross-border accommodation method and transmission scheme of Jiuquan wind power [J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(22): 82-89.
- [6] 国家能源局. 关于做好2015年度风电并网消纳有关工作的通知(国能新能[2015]82)[2015-03-23][EB/OL]. <http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201504/t20150407-1900.htm>.  
National Energy Administration. Notice on the related work of 2015 annual wind power consumption, (No. 82, 2015) [2015-03-23] [EB/OL]. <http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201504/t20150407-1900.htm>.
- [7] 国家能源局. 国家能源局综合司关于开展风电清洁供暖工作的通知(国能综新能[2015]306)[2015-06-05][EB/OL]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201506/t20150615\\_1938.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201506/t20150615_1938.htm).  
Comprehensive Department of National Energy Administration. Notice on the work of clean heating using wind power (No.306, 2015) [2015-06-05] [EB/OL]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201506/t20150615\\_1938.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201506/t20150615_1938.htm).
- [8] 严干贵, 刘嘉, 崔杨, 等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 45-52.  
YAN G G, LIU J, CUI Y, et al. Economic evaluation on improving wind power scheduling-scale by using energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 45-52.
- [9] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14-18.  
YUAN X M, CHENG S J, WEN J Y. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-

- scale wind power [J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(1): 14-18.
- [10] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533-2543.  
ZHENG L, HU W, LU Q Y, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [11] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6-12.  
LYU Q, JIANG H, CHEN T Y, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(1): 6-12.
- [12] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.  
CHEN L, XU F, WANG X, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation [J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [13] 陈守军, 辛禾, 王涛, 等. 风电、蓄热式电锅炉联合供暖调度鲁棒优化模型[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 103-109.  
CHEN S J, XIN H, WANG T, et al. Heating operation scheduling robust optimization model for heat storage electric boiler combined with wind power [J]. Electric power construction, 2016, 37(1): 103-109.
- [14] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 面向提高风电接纳能力的多区域热-电联合调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4079-4088.  
DING M, LIU X Y, XIE J L, et al. Research on heat and electricity coordinated dispatch model of multi-area for improving wind power accommodation ability [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4079-4088.
- [15] VERDA V, COLELLA F. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks [J]. Energy, 2011, 36(7): 4278-4286.
- [16] 邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 利用热网储能提高供热机组调频调峰能力的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3626-3633.  
DENG T Y, TIAN L, LIU J Z. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3626-3633.

## MULTI-OBJECTIVE BI-LEVEL OPTIMIZATION OPERATION OF WIND POWER ACCOMMODATION FOR HEAT STORAGE ELECTRIC BOILER COMBINED WITH WIND POWER

Yang Xiyun<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1</sup>, Xie Zhijia<sup>2</sup>, Fu Guo<sup>1</sup>, Geng Na<sup>3</sup>

(1. College of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Jilin Electric Power Research Institute, Changchun 130021, China)

**Abstract:** In order to solve “wind-heat conflict” during the heating period in “San Bei” region of China, installing electric boiler with thermal storage in the end of grid where wind power was difficult to consume and using the wind power for heat supplying to promote the accommodation of abandoned wind power. In this paper, a multi-objective optimal model was established which the objective functions are both the maximum capacity of wind power accommodation and the minimum system operation costs, and the improved multi-objective two-layer differential evolution optimization algorithm was used to solve this model. Then the scheduling of the electric boiler with thermal storage was given. Based on the real data in the power grid of northern China, the simulation result showed that it can effectively reduce system operation costs and improve wind power utilization.

**Keywords:** wind power accommodation; heat storage electric boiler; multi-objective two-layer optimization