

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.04.005

# 考虑分时电价的风光储联合优化调度研究

杨晓萍, 刘浩杰, 黄 强

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对大规模风电和光伏发电对电网调度带来的负面影响, 利用钠硫电池储能系统, 综合考虑峰谷分时电价政策和减少弃风弃光等各方面因素, 提出了一种基于日前负荷、风电、光伏发电出力预测, 以钠硫电池为辅助设备的风光储联合申报计划出力新模式。以风光储联合系统总体收益最大化和净负荷方差最小作为目标, 考虑钠硫电池储能系统的充放电次数约束和风光实时出力偏移风光联合申报计划出力限制, 建立了电网短期优化调度模型, 并采用多目标粒子群算法求解所建模型。通过算例分析, 验证了所建模型的可行性和风光储联合系统在提高清洁能源消纳和平滑净负荷曲线方面的有效性。

**关键词:** 风电; 光伏发电; 钠硫电池电站; 计划出力; 多目标粒子群算法; 净负荷曲线

**中图分类号:** TM734

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2016)04-0403-07

## Research on wind-solar-battery hybrid optimization based on TOU electricity price

YANG Xiaoping, LIU Haojie, HUANG Qiang

(School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aiming at the negative impact of large-scale wind power and photovoltaic power generation on power grid dispatching, combined with the Na/S battery storage system, the TOU electricity price policy as well as the reduction of abandoned light and wind and other factors are taken into consideration, with a new based on load, wind power, photovoltaic power generation output forecast and the Na/S battery storage system as auxiliary equipment wind-solar-battery hybrid declaration planning mode proposed. The maximum revenue of wind-solar-battery hybrid system and the minimum net load are set as objectives, the constraint of the Na/S battery storage system charge and discharge times and the deviation of wind-solar-battery hybrid system output from the planning power output constraint are considered in the paper, a 96-period all-day optimal dispatching model is established, multi-objective particle swarm algorithm are adopted to solve the model, the validity of the model and the feasibility of wind-solar-battery hybrid system which can improve the clean energy use, and Net load curve smoothing is verified by an example.

**Key words:** wind power; photovoltaic power generation; the Na/S battery storage system; program output; multi-objective particle swarm optimization algorithm; net load curve

近年来, 风能和太阳能以其分布广、资源丰富以及清洁可再生等特点而得到广泛利用和发展。但风电和光伏发电固有的随机波动性、间歇性、预测精度低等特点会给电力系统安全稳定运行带来严峻考验。风电的反调峰特性间接拉大了负荷的峰谷差, 可能导致火电机组深度调峰或停机, 此外, 水、火电机组频繁调节以应对功率的盈余或缺失, 间接增大了系统总的运行成本<sup>[1-2]</sup>。光伏发电大幅度、频繁波动会对系统有功平衡造成冲击, 影响系统有功经济

调度, 增大频率质量越界的风险<sup>[3]</sup>。因此, 研究如何最大限度消纳风电和光伏发电, 同时又能实现电网中常规机组的经济运行具有重要的现实意义。

针对这一问题, 国内外的研究集中在储能系统与风、光伏电厂组成的混合系统的优化调度方面, 通过控制储能系统的充放电来减少风电和光伏发电的功率波动。其中以技术较为成熟、单位容量成本相对较低的抽水蓄能为主要储能设备的研究较为普遍。文献[4]研究了风电—抽水蓄能联合运行优化

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779053)

作者简介: 杨晓萍, 女, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制、电力电子在电力系统中的应用。

E-mail: yangxiaop666@163.com

模型,将联合系统综合收益最大作为目标函数,降低了风电出力随机性对电网稳定运行带来的不利影响。文献[5]将峰谷电价考虑在风电—抽水蓄能联合系统中,建立了能量转化效益评估模型,分析了抽水蓄能电站对风电移峰填谷的影响,取得了良好的经济效益。文献[6]利用抽水蓄能电站的储能能力,消除了风电出力的不确定性,确保了火电机组开停机的平稳性。随着大容量钠硫电池储能技术的革新<sup>[7-11]</sup>以及抽水蓄能技术受地理和资源因素的限制,如何有效控制这些新型储能设备以提高清洁能源消纳,并减小其并网对系统带来的不利影响,受到越来越多的关注。文献[12]建立了以大容量钠硫电池为储能设备的多时间尺度下的混合系统联合调度模型,考虑了风电出力随机性和储能系统充放电的控制,使得风电具有一定的可调度性。

本文基于日前负荷、风电和光伏发电出力预测,利用钠硫电池储能系统的充放电功能,并考虑分时电价,提出一种新的风光储联合运行申报次日出力计划模式。以最大限度消纳清洁能源和实现平滑系统净负荷曲线为主要工作目标,将风光储联合系统收益最大和系统净负荷方差最小作为目标函数,综合考虑钠硫电池储能系统内部特性以及能量状态和充放电次数约束,并限制风光实时出力对风光联合申报计划出力差额的偏离程度,建立全天96个时段的优化调度模型;应用多目标粒子群算法求解所建模型,最后通过实例验证本文所建模型及算法的正确性和有效性。

## 1 风光储联合系统调度方式

### 1.1 风光储联合系统运行模式

风光储联合系统运行主要有以下几个步骤:

步骤1:电网调度中心和风电场、光伏电站分别预测次日负荷出力曲线和风功率、光伏发电功率曲线;

步骤2:风光储联合体综合考虑分时电价、减少弃风、弃光、考核惩罚等因素,采用改进比例法向调度中心申报次日计划出力;

步骤3:调度中心根据风光储联合体的申报出力计划,安排常规机组的出力。

### 1.2 改进风光联合系统计划出力

常规计算风光联合体的计划出力是根据预测负荷出力、风电功率和光伏发电功率<sup>[4]</sup>,按定比例方式安排计划出力 $L(t)$ :

$$L(t) = L_s(t) \cdot \frac{\sum_{t=1}^{96} (P_w^*(t) + P_p^*(t))}{\sum_{t=1}^{96} L_s(t)} \quad (1)$$

式中: $L_s(t)$ 、 $P_w^*(t)$ 、 $P_p^*(t)$ 分别为 $t$ 时段负荷、风电、光伏发电的预测出力。

上述定比例方式是以固定不变的比例安排风光联合计划出力,不能根据负荷的实时变化调整风光出力计划,缺乏调度的灵活性。本文在定比例申报法的基础上,通过追踪负荷的变化规律,调整申报计划出力 $L(t)$ :

$$\begin{cases} L(1) = L_s(1) \cdot \frac{\sum_{t=1}^{96} (P_w^*(t) + P_p^*(t))}{\sum_{t=1}^{96} L_s(t)} \\ (t=1) \\ L(t) = L_s(t) \cdot \frac{\sum_{t=1}^{96} (P_w^*(t) + P_p^*(t))}{\sum_{t=1}^{96} L_s(t)} + \epsilon(L_s(t) - L_s(t-1)) \\ (t=2, \dots, 96) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\epsilon$ 为负荷变化乘子,取值范围为 $0 \sim 1$ ,本文取 $0.6$ 。

图1为中国西北某地区24h的96时段风电站、光伏电站及典型日负荷预测出力曲线。图2为风光联合系统改进定比例法申报计划出力曲线。

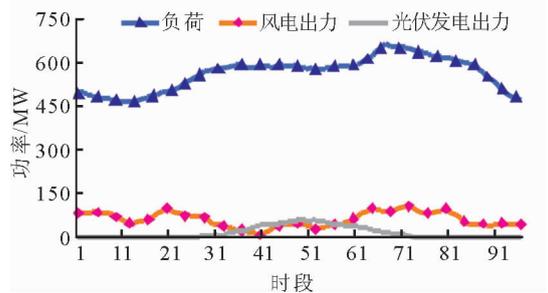


图1 风电站、光伏电站及典型日负荷预测出力曲线

Fig. 1 Forecasting load-wind-solar power curve

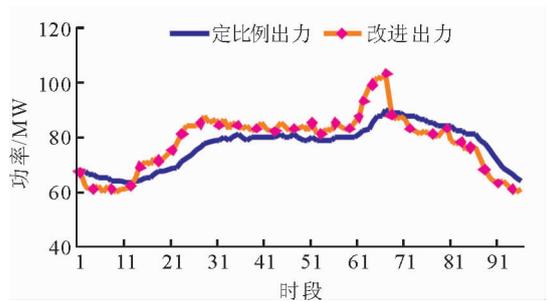


图2 改进前后风光联合系统计划出力对比曲线

Fig. 2 Wind-solar combined system output plan curve comparing before and after improvements

由图2可看出,与定比例法相比较,采用改进定

比例法在负荷低谷时风光联合计划出力小,在负荷高峰时风光联合计划出力大,能很好地追踪负荷的变化规律,并间接地减小了负荷的峰谷差,潜在的对系统实现了“移峰填谷”的作用。

### 1.3 钠硫电池、风电和光伏发电的调度策略

将实时风电和光伏发电的功率之和与申报计划出力进行比较。

1) 若风电和光伏发电的实时功率比申报计划出力小,即:

$$P_p^*(t) + P_w^*(t) < L(t) \quad (3)$$

则风电和光伏发电全部上网:

$$P_w(t) + P_p(t) = P_w^*(t) + P_p^*(t) \quad (4)$$

式中: $P_w(t)$ 和 $P_p(t)$ 分别为 $t$ 时段风电和光伏发电的上网电量。

钠硫电池电站在满足能量状态和最大功率约束的情况下进行放电:

$$P_x(t) \in (0, P_{rate}) \quad (5)$$

$$P_x(t)\Delta t \leq E_{bat}(t) - E_{bat, min} \quad (6)$$

式中: $P_x(t)$ 为 $t$ 时段钠硫电池电站的调度出力, $P_{rate}$ 为钠硫电池电站额定功率, $E_{bat}(t)$ 为钠硫电池电站 $t$ 时段的能量状态, $E_{bat, min}$ 为钠硫电池电站最小能量状态。

考虑到钠硫电池电站容量过大会导致投资成本的增加,风光实时出力对风光联合申报计划出力的差额允许有一定的偏移:

$$(1 - \eta)L(t) \leq P_w(t) + P_p(t) + P_x(t) \leq (1 + \eta)L(t) \quad (7)$$

式中: $\eta$ 为申报计划出力的偏移系数。本文取20%。

2) 若风电和光伏发电的实时功率比申报计划出力大,即:

$$P_p^*(t) + P_w^*(t) \geq L(t) \quad (8)$$

则风电和光伏发电的上网电量为:

$$P_w(t) + P_p(t) = L(t) \quad (9)$$

当风电和光伏发电的剩余电量大于钠硫电池电站的最大充电功率时,即:

$$(P_w^*(t) + P_p^*(t)) - (P_w(t) + P_p(t)) \geq 1.2P_{rate} \quad (10)$$

钠硫电池电站的调度出力为:

$$P_x(t) = 1.2P_{rate} \quad (11)$$

当风电和光伏发电的剩余电量小于钠硫电池电站的最大充电功率时,即:

$$(P_w^*(t) + P_p^*(t)) - (P_w(t) + P_p(t)) < 1.2P_{rate} \quad (12)$$

钠硫电池电站的调度出力为:

$$P_x(t) \in (0, (P_w^*(t) + P_p^*(t)) - (P_w(t) + P_p(t))) \quad (13)$$

且要满足:

$$P_x(t)\Delta t \leq E_{bat, max} - E_{bat}(t) \quad (14)$$

式中: $E_{bat, max}$ 为钠硫电池电站最大能量状态。

当负荷处于高峰时段时,为实现对清洁能源的最大化消纳并减小负荷峰值,如果风电和光伏发电的实时功率比风光联合申报计划出力大,且在风光联合申报计划出力的偏移范围内,那么风电和光伏发电的上网电量与风光联合申报计划出力之间的倍数可适当增大。

## 2 风光储联合优化调度模型

### 2.1 目标函数

本文综合考虑风光储联合系统在分时电价下的售电收益、偏离申报计划出力的惩罚成本、减少弃风量和弃光量等因素,将满足系统各项约束条件的最大的期望收益作为目标函数。此外,为实现风光储联合出力对系统净负荷曲线的平滑作用,提高系统中水、火电机组运行效率,将净负荷的方差最小作为另一个目标函数。净负荷方差越小,净负荷的峰谷差越小,水、火电的频繁调节次数越小,运行效率越高。

目标函数1:风光储联合系统收益最大

$$\begin{aligned} \max f_1 = & \sum_{t=1}^{96} \frac{1}{M} [\rho_{pri, t} (P_w(t) + P_p(t) + P_x(t)) - \\ & \rho_{pen, t} |P_w(t) + P_p(t) + P_x(t) - L(t)| - \\ & \rho_{dro, t} (P_{dro, w}(t) + P_{dro, p}(t))] \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $M$ 为1h内的单位时段数,本文为4, $\rho_{pri, t}$ 、 $\rho_{pen, t}$ 、 $\rho_{dro, t}$ 分别为 $t$ 时段联合系统的售电价格、偏离计划出力惩罚价格、弃风和弃光惩罚价格; $P_{dro, w}(t)$ 、 $P_{dro, p}(t)$ 为 $t$ 时段弃风、弃光功率。

目标函数2:净负荷的方差最小

$$\min f_2 = \frac{1}{96} \sum_{t=1}^{96} (P_j(t) - P_{jt, av})^2 \quad (16)$$

式中: $P_j(t)$ 为 $t$ 时段的净负荷值; $P_{jt, av}$ 为所有时段净负荷的平均值。

$t$ 时段的净负荷值 $P_j(t)$ 可以表示为:

$$P_j(t) = L_s(t) - P_w(t) - P_p(t) - P_x(t) \quad (17)$$

净负荷的平均值可以表示为:

$$P_{jt, av} = \frac{1}{96} \sum_{t=1}^{96} P_j(t) \quad (18)$$

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 风电场出力约束

$$0 \leq P_w(t) \leq P_w^*(t) \quad (19)$$

#### 2.2.2 光伏电场出力约束

$$0 \leq P_p(t) \leq P_p^*(t) \quad (20)$$

### 2.2.3 钠硫电池电场的特性及约束

由于钠硫电池具有比能量高、适应面宽且已实现批量生产等优势,本文选取钠硫电池储能系统为研究对象。本文中钠硫电池储能系统存在放电  $u_{\text{disch}}(t)$ 、充电  $u_{\text{ch}}(t)$  两种运行状态。

$$u_{\text{disch}}(t), u_{\text{ch}}(t) \in \{0, 1\} \quad (21)$$

钠硫电池通过变换器可以控制其充放电功率。当钠硫电池的变换器容量足够大时,钠硫电池的瞬时充放电功率可达额定功率的 1~5 倍,但基于内部温度,其输出功率有一定的限制,该限制称为钠硫电池脉冲限制  $N_{\text{pulse}}(t)$ , 电池的可持续放电时间  $T_{\text{dur}}(t)$  与  $N_{\text{pulse}}(t)$  的关系为<sup>[3]</sup>:

$$T_{\text{dur}}(t) = -3.4497N_{\text{pulse}}^3(t) + 21.5962N_{\text{pulse}}^2(t) - 45.7961N_{\text{pulse}}(t) + 34.7117 \quad (22)$$

钠硫电池内部的能量状态  $E_{\text{bat}}(t)$  随时间不断变化,  $E_{\text{bat}}(t)$  表达式为:

充电时:

$$E_{\text{bat}}(t+1) = E_{\text{bat}}(t) + \frac{1}{M}P_x(t)\Delta t/\eta_c \quad (23)$$

放电时:

$$E_{\text{bat}}(t+1) = E_{\text{bat}}(t) - \frac{1}{M}P_x(t)\Delta t/\eta_f \quad (24)$$

式中:  $\eta_f$ 、 $\eta_c$  为钠硫电池电站的放电和充电效率。

根据钠硫电池储能单元的运行特性,其在风光储联合系统中所满足的约束条件为:

1) 运行状态约束

$$u_{\text{disch}}(t) + u_{\text{ch}}(t) = 1 \quad (25)$$

钠硫电池储能系统的 2 种状态是互斥的。

2) 脉冲因数约束

$$0.8 \leq N_{\text{pulse}}(t) \leq 1 \quad (26)$$

$$N_{\text{pulse}}(t) = N_{\text{pulse}}(t+1) \quad (27)$$

3) 充放电功率约束

$$0 \leq P_x(t) \leq N_{\text{pulse}}(t)P_{\text{rate}} \quad (28)$$

$$-1.2N_{\text{pulse}}(t) \cdot P_{\text{rate}} \leq P_x(t) \leq 0 \quad (29)$$

其中,对钠硫电池进行最大功率充电时,所选取的充电功率一般略大于额定功率,取比额定功率高 20% 的数值。

4) 电池的能量约束状态

$$E_{\text{bat.min}} \leq E_{\text{bat}}(t) \leq E_{\text{bat.max}} \quad (30)$$

5) 一个调度周期内电池充放电次数约束

$$Y_{\text{dis}} + Z_{\text{ch}} \leq N \quad (31)$$

式中:  $Y_{\text{dis}}$ 、 $Z_{\text{ch}}$  分别为钠硫电池电站的放电转换总数

和充电转换总数,  $N$  为充放电次数。

## 3 风光储联合优化调度模型求解

利用粒子群算法求解多目标优化问题时,常规方法是将多目标转化为单目标进行求解,但各个目标之间的不可支配性决定了多个目标不能单纯的线性加权。本文将 Pareto 最优概念与粒子群算法相结合,通过 Pareto 最优机制选取个体最优与全局最优,引导粒子的飞行方向,并行地搜索多目标问题的最优解。

### 3.1 非支配解的拥挤距离计算

多目标优化问题的全局最优主要依靠非支配解的拥挤度来选取和更新。

非支配解的拥挤度可用拥挤距离来描述:将外部档案集中的所有非支配解的每个目标函数值从小到大进行排序,非支配解的拥挤距离为该粒子全部目标函数所对应的前后相邻的  $2k$  个粒子的目标函数之差的总和:

$$\text{crowdist}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^k (f_{(i+h)_j} - f_{(i-h)_j}) \quad (32)$$

式中:  $m$  为目标函数的总数,  $k$  为粒子总数的一半,  $f_{(i+h)_j}$ 、 $f_{(i-h)_j}$  为第  $i+h$  个粒子和第  $i-h$  个粒子所对应的第  $j$  个目标的目标函数值,  $\text{crowdist}_i$  表示粒子  $i$  ( $2 \leq i \leq m-1$ ) 的拥挤距离。

为保证边界个体粒子被无条件选入下一代,设定第一个粒子和最后一个粒子的拥挤度为无穷大。

### 3.2 个体最优与全局最优的选取

多目标粒子群算法(MOPSO)选取个体最优是将粒子当前位置与粒子个体历史最优位置进行比较,选取其中一个非支配解作为粒子个体最优位置,若粒子当前位置与粒子历史最优位置不存在支配关系,则按照 50% 的概率随机在粒子个体历史最优和当前位置中选出一个作为粒子新的个体最优位置。

在多目标粒子群算法全局最优的选取上,为了保证粒子在迭代过程中的多样性,使粒子可以在多个可行域搜索并得到均匀的 Pareto 前沿,鼓励粒子向拥挤度小的区域搜索。本文将非支配解集中的每个粒子按拥挤度从小到大排序,在经过排序的非支配解集中的前 10% 中随机选取一个非支配解作为全局最优位置,确保粒子可以向拥挤度小的非支配解方向进行优化,有利于算法均匀地逼近 Pareto 最优前沿。

将此方法引入到风光储联合优化调度模型求解中,具体流程图如图 3 所示。

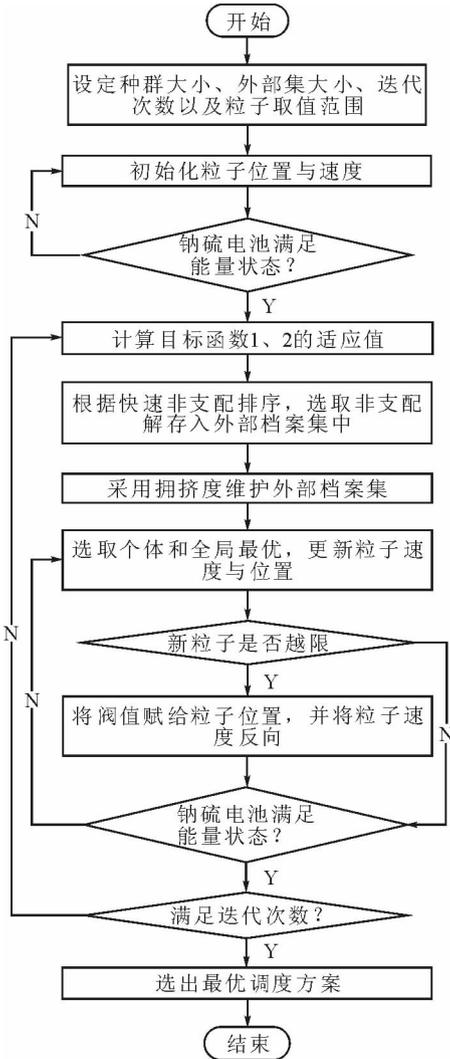


图3 风光储联合优化调度模型求解流程图  
Fig. 3 Wind-solar-battery joint optimization scheduling model for solving flowchart

## 4 算例结果与分析

### 4.1 基本数据与参数

本文对中国西北某地区风光储联合系统及典型日负荷曲线构成的系统进行优化分析。其中, 24 h 的 96 时段风电站、光伏电站及典型日负荷预测曲线见图 1。风电和光伏的装机容量分别为 150 MW 和 100 MW, 为避免钠硫电站容量设置过大导致投资成本的急剧上升, 且考虑到风光联合申报计划出力有一定的功率偏移范围, 本文设置钠硫电池储能系统的最大放电功率为 30 MW, 额定容量为 96 MW·h, 初始能量状态为 50%, 市场售电的分时电价如表 1 所示<sup>[12]</sup>。为了减小偏离计划出力的差值, 联合系统的出力偏差惩罚系数取为售电价格的 1.5 倍, 弃风、弃光的惩罚费用为 0.05 元/kW·h。

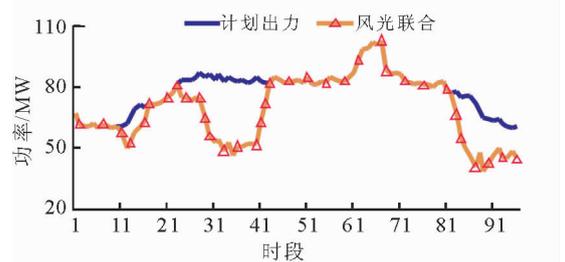
表 1 市场售电的分时电价

Tab. 1 Market sale of electricity TOU

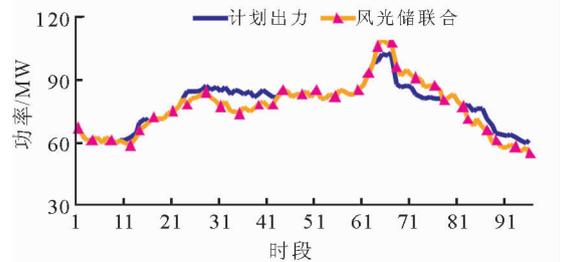
时段	时间范围	分时电价
峰时段	11:00~15:00	0.8 元/(kW·h)
	19:00~21:00	
平时段	8:00~10:00	0.5 元/(kW·h)
	16:00~18:00	
谷时段	22:00~23:00	0.2 元/(kW·h)
	0:00~7:00	

### 4.2 结果分析

在未加入钠硫电池电站时, 风光联合系统出力偏离计划出力的曲线如图 4(a) 所示, 加入钠硫电池电站后, 风光储联合系统出力偏离计划出力的曲线如图 4(b) 所示。图 5 给出了加入钠硫电池电站前后的净负荷曲线, 表 2 给出了加入钠硫电池电站前后的对比数据。



(a) 风光联合出力偏离计划出力曲线



(b) 风光储联合出力偏离计划出力曲线

图 4 加入钠硫电池前后偏离计划出力曲线  
Fig. 4 Addition to battery deviate from the plan power curve

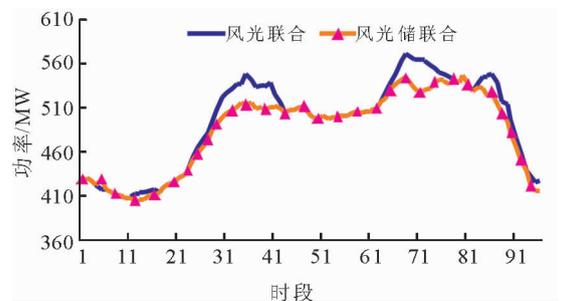


图 5 加入钠硫电池电站前后的净负荷曲线  
Fig. 5 Join net load curve of battery power station before and after

表2 加入钠硫电池电站前后对比数据

Tab.2 Join the battery power station before and after the contrast data

项目	风光联合	风光储联合
总收益/(万元)	664.6	796.4
惩罚成本/(万元)	230.7	83.4
弃风光总量/(MW·h)	239	52
最大偏移量/(MW)	32	5
最大相对偏移/%	39.5	6.2
净负荷方差	2493	1759

根据图4、图5和表2可得出几点结论。

1) 在没有加入钠硫电池电站前,风光联合系统24h的总收益为664.6万元,而在加入钠硫电池电站以后,由于钠硫电池电站能存储低谷电价时的风电和光伏发电,并在高峰电价时送入电网,所以风光储联合系统总的收益明显提高,达到796.4万元。在钠硫电池电站容量不大,投资不高的情况下,通过钠硫电池电站的辅助作用,实现了较高的经济收益。

2) 在未加入钠硫电池电站前,由于风光联合系统出力的不确定性,导致风光联合出力曲线明显偏离计划出力曲线,惩罚成本、最大偏移量、最大相对偏移百分数分别为230.7万元、32 MW、39.5%。而在加入钠硫电池电站以后,钠硫电池储能系统对缩减风光实时功率和风光联合申报计划出力的差额起到了辅助作用,明显改善了风光实时功率与计划出力曲线的相符程度,惩罚成本、最大偏移量、最大相对偏移百分数大幅度降低,分别为83.4万元、5 MW、6.2%。另外,通过合理控制钠硫电池电站的充放电策略,最大化地利用了风能和太阳能,将弃风光总量由原来的239 MW·h降低为52 MW·h,实现了清洁能源的最大化消纳。

3) 加入钠硫电池电站以后,风光储联合出力很好地平滑了净负荷曲线,减小了净负荷的峰谷差。净负荷的方差由原来的2493降低为1759,从而可以有效提高系统中常规机组的运行效率。

依据风电和光伏发电出力情况,绘制钠硫电池电站能量变化曲线,如图6所示。可以看出,钠硫电池电站可以存储低谷时段富余的风能和太阳能,并在负荷高峰时段进行释放,提高了风光储联合系统的总体收益。

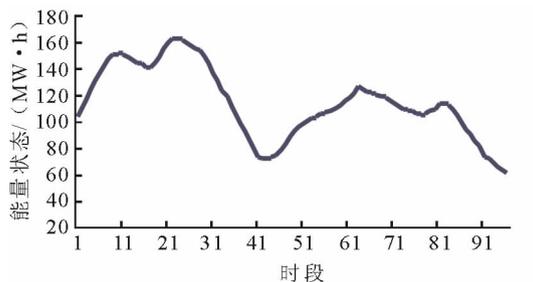


图6 钠硫电池电站能量变化曲线

Fig.6 Battery power plant energy curve

## 5 结 语

本文将钠硫电池电站并入到风光联合系统中,通过利用钠硫电池电站的充放电功能,实现了风光能源上网的经济性和对系统净负荷曲线的平滑作用。在风光储联合优化调度模型中,考虑了钠硫电池储能系统的充放电次数约束以及风光实时出力偏离申报计划出力的差额限制。算例分析表明:风光储联合优化调度模型充分利用了钠硫电池储能系统的充放电特性,将低价、低负荷时段的盈余风光出力转化为高价、高峰负荷时段的紧缺电能,改善了风光实时功率与申报计划出力曲线的相符程度,提高了风光电能的消纳量,并在钠硫电池电站容量不大、投资不高的情况下实现了较高的总收益;风光储联合出力很好的实现了平滑净负荷曲线的作用,并且在提高系统中水、火电机组运行效率方面有很大的优势。

### 参考文献:

- [1] 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 Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Wind power consumptive key problems and countermeasures analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (22):29-34.
- [2] 余健明,刘飞.基于禁忌搜索算法的含风电机组的配电网无功优化研究[J].西安理工大学学报,2013,29(1):70-75.  
YU Jianming, LIU Fei. Research on reactive power optimization of the distribution network with wind power generation base on tabu search[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(1):70-75.
- [3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A

- review of the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):1-14.
- [4] 胡泽春,丁华杰,孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):36-44.  
HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):36-44.
- [5] 李强,袁越,李振杰,等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术,2009,33(6):13-18.  
LI Qiang, YUAN Yue, LI Zhenjie, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind power and pumped hydro storage system considering peak-valley electricity price[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 13-18.
- [6] 静铁岩,吕泉,郭琳,等. 水电-风电系统日间联合调峰运行策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):97-104.  
JING Tieyan, LÜQuan, GUO Lin, et al. An inter-day combined operation strategy of hydro and wind power system for regulating peak load[J]. Automation of Electric Power Systems,2011, 35(22):97-104.
- [7] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-15.  
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CESS,2011,31(4):7-15.
- [8] SANISLO M. Energy storage and distributed generation technologies; real options valuation/benefit case studies [R]. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2006.
- [9] SCHOENUNG S M, HASSENZAHL W. Long vs short-term energy storage[R]. Palo Alto, CA, USA; Sandia National Laboratories, 2007.
- [10] 靳文涛,李建林. 电池储能系统用于风电功率部分“削峰填谷”控制及容量配置[J]. 中国电力,2013,46(8):16-22.  
JIN Wentao, LI Jianlin. BESS for wind power “peak shaving” control and capacity configuration[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 16-22.
- [11] 黄秀琼,鲁籍元,牛焕娜,等. 用于主网削峰填谷调度的风/光/储微电网控制策略[J]. 中国电力,2013,46(2):87-93.  
HUANG Xiuqiong, LU Jiyuan, NIU Huanna, et al. Control strategies of wind/photovoltaic/storage micro-grid for load shifting schedule of main grid[J]. Electric Power, 2013, 46(2): 87-93.
- [12] 吴雄,王秀丽,李骏,等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):10-17.  
WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17.

(责任编辑 周 蓓)