

# 风电-抽水蓄能-供热联合优化运行——以蒙西为例

施泉生, 丁建勇

(上海电力学院经济与管理学院, 上海 200090)

## Wind Power-pumped Storage-heating Joint Optimized Operation: Case Study in Region of West Inner Mongolia

SHI Quansheng, DING Jianyong

(College of Economics Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**摘 要:** 风电因为其随机性和不稳定性等特点使得风电无法实现大规模的并网而产生弃风, 而抽水蓄能电站具有的良好“削峰填谷”能力, 能够消纳过剩的风电。本文以供热季弃风现象尤为严重的蒙西地区为例, 基于蒙西电网和呼与浩特抽水蓄能电站的实际数据, 建立风电-抽水蓄能-供热联合运行的优化模型。通过研究对比结果发现在风电和抽水蓄能联合的基础上再加以蓄热锅炉对风电进行进一步的消纳, 既能提高风能的利用率减少弃风, 又能解决煤炭供热污染物的排放问题, 缓解化石能源资源短缺问题。

**关键词:** 风电消纳; 抽水蓄能; 供热; 联合运行

**Abstract:** Due to the characteristics of randomness and instability, wind power can not be connected to the grid in a large scale, and the wind curtailment is produced. Pumped storage power station has a good ability of “peak load shifting” to absorb the excess wind power. In this paper, taking the region of west Inner Mongolia where the phenomenon of wind curtailment is particularly serious during the heating season as an example, based on the actual data of power grid in region of west Inner Mongolia and pumped storage power station in Hohhot, the optimization model of wind power - pumped storage - heating combined operation is established. Through the comparative study, it is found that thermal power boilers can further consume wind power based on combining wind power and pumped storage, which enhances utilization efficiency of wind energy and reduces wind curtailment. In addition, the emission problem of coal heating pollutant is solved, and the shortage of fossil energy resources is alleviated to some extent.

**Keywords:** consumption of wind power; pumped storage; heating; combined operation

## 0 引 言

清洁能源发电特别是并网规模日益增大的风电

系统对于缓解传统电网的供电压力、转变能源结构具有重要作用<sup>[1]</sup>。近年来, 中国的风电规模不断扩大, 风电消纳的问题也日益突出, 资料显示, 目前中国风电弃风量已达 497 亿 kWh, 尤以内蒙古蒙西区域最为严重(由于数据的不可得性, 本文结合中电联数据分析可知蒙西地区的风电规模和弃风电量均远大于蒙东地区。因此本文重点分析蒙西地区。)风电的随机性、间歇性、波动性和反调峰性等特点, 使得大规模风电并网会给电网调度在系统的备用、电力电量的平衡、系统的调峰调频以及电网的安全等方面带来很大困难。为缓解电网负荷低谷时段风电机组“弃风限电”现象, 提高风电的消纳效率, 2015 年国家能源局综合司发布国能综新能[2015] 306 号文件《关于开展风电清洁供暖工作的通知》, 提出利用风电供暖的新思路。这一举措对于促进清洁能源的利用效率, 提高冬季北方地区空气质量意义重大。

现有文献针对风电消纳问题的研究主要有:

① 存储风能。文献 [2-3] 综合介绍了现有的储能方式, 抽水蓄能、压缩空气储能(CAES)、氢能储能、热储能、飞轮储能、超导储能(SMES)、电容器储能、液流电池、铅酸电池和锂电池等电化学储能等。其中, 应用比较广泛的是抽水蓄能技术<sup>[4-5]</sup>。由于受到技术手段等条件的限制, 上述存储风能方式除抽水蓄能外大都存在存储容量有限, 使用经济性不足的问题。

② 抽水蓄能电站与风电并网联合运行。鉴于风电的固有特点, 主要采用风电并网与抽水蓄能电站联合运行来实现“削峰填谷”, 达到平衡电网负荷, 充分利用风能的目的。文献 [6-8] 以减少弃风量实现效益的最大化为目标建立风电与抽水蓄能

电站联合系统模型，通过模拟仿真等方法对风电和抽水蓄能电站的出力进行分析实现联合系统效益最大化。这种方法在一定程度上能减少弃风量，但尚不足以解决夜间弃风的问题。

③ 风电供暖与风电并网联合运行。文献 [9] 采用热电厂用电锅炉来消纳风电进行供热的基本原理，建立了节煤效益和国民经济性评价方案的数学模型并对其影响因素进行分析。文献 [10] 以吉林为例介绍了在用电低谷采用蓄热电锅炉对风电电能进行能量转换，实现风电并网与集中供热企业联合供热并行，达到节约煤炭资源，减少大气污染物排放的目的。这种方法有效提高了风电利用率，但无法缓解白天负荷高峰时电网压力。

现有文献的研究成果，虽然都能在一定程度上解决弃风问题，提高风电利用效率，但无法实现风电的最大限度利用。本文综合考虑上述研究的不足之处，基于蒙西电网和呼和浩特抽水蓄能电站实际数据，构建风电、抽水蓄能和供热联合优化运行模型，通过构建合理运营机制，解决风电的过剩问题，实现风能的最高利用效率。

## 1 数学模型

在考虑电网安全的前提下，联合运行可以实现风能的最高利用来减少煤耗量，通过蓄热电锅炉蓄热供热不仅可以节约煤炭还能减少污染物的排放进而减少环境治理的费用，故本文主要从经济效益角度，通过对风电-抽水蓄能-供热联合运行模式建立协调运行的目标模型来进行消纳风能、减少弃风量的研究。为了便于建模计算，把全天从0:00开始分为96个时段，每15min为一个时段。

### 1.1 目标函数

目标函数为风电-抽水蓄能-供热联合系统经济效益最优，经济效益  $M$  由5部分组成：风电场的发电上网收益  $C_w$ 、抽水蓄能电站发电上网收益  $C_h$ 、抽水蓄能电站的抽水成本  $C_{pg}$ （指利用主网供电抽水生成的成本，不包括风电抽水成本）、蓄热电锅炉蓄热成本  $C_{rg}$ （指采用主网供电蓄热产生的成本，不包含风电蓄热成本）、采用抽水蓄能电站发电以及用蓄热电锅炉供暖的采暖费用  $C_n$ ，即

$$\max M = C_w + C_h - C_{pg} + C_{rg} + C_n = \sum_{i=1}^N \Delta t (r_{w,i} P_{w,i} + r_{h,i} P_{h,i} - r_{pg,i} P_{pg,i} - r_{rg,i} P_{rg,i}) + r_n A \quad (1)$$

式中： $N$  为总时段数， $N=96$ ； $i=1, 2, 3, \dots, 95, 96$ ； $r_{w,i}$ 、 $r_{h,i}$ 、 $r_{pg,i}$ 、 $r_{rg,i}$  分别为第  $i$  时段内风电的上网电价、抽水蓄能电站的上网电价、抽水时主网的供电电价和主网给蓄热电锅炉的供电电价； $P_{w,i}$ 、 $P_{h,i}$ 、 $P_{pg,i}$ 、 $P_{rg,i}$  分别为  $i$  时段风场上网风电功率、抽水蓄能机组的发电功率、抽蓄电站利用主网供电进行抽水时的抽水功率和蓄热电锅炉利用主网供电进行供热蓄热的功率； $r_n$  和  $A$  分别为单位面积的采暖费用和蓄热电锅炉可承担的区域面积。

### 1.2 约束条件

#### 1.2.1 抽水蓄能电站储能约束

抽水蓄能电站库容的大小限制着各时刻抽水蓄能电站的储能。抽水蓄能电站的水库在联合系统中起着储能的作用。在风能充足的时候，利用多余的电能把水从下游水库抽水送至上游水库，在风能不足的时候，利用上游水库的水流入下游水库来冲击水轮机发电，即

$$E_{\min} \leq E_i \leq E_{\max} \quad (2)$$

$$E_{i+1} = E_i + \Delta t (\eta_p P_{p,i} - \frac{P_{h,i}}{\eta_h}) \quad (3)$$

式中： $E_i$  为第  $i$  时间段抽水蓄能电站的储能值； $E_{\min}$  和  $E_{\max}$  分别为抽水蓄能电站最小储能值和最大储能值； $\eta_p$  为抽水蓄能电站抽水时的平均水量转换系数； $\eta_h$  为发电时的平均电量转换系数； $\Delta t$  为一时间段 15min。

#### 1.2.2 联合系统输电约束

为了电网的安全稳定，需要满足联合系统送入主网的功率极限要求，即

$$P_{wh,i} \leq P_{wh,\max} \quad (4)$$

$$P_{wh,\max} = \max [P_{wh,0}, \dots, P_{wh,N}] \quad (5)$$

$$P_{wh,i} = P_{w,i} + P_{h,i} - P_{pg,i} \quad (6)$$

式中： $P_{wh,i}$  和  $P_{wh,\max}$  分别为第  $i$  时间段内联合系统送出功率值及最大值，且  $P_{wh,\max}$  受系统的调峰、静态和暂态稳定及热稳定等综合因素的约束<sup>[11]</sup>。

受联合系统输出功率极限约束，实际上网风电功率为

$$P_{w,i} = \begin{cases} P_{wh,\max}, & P_{wg,i} \geq P_{wh,\max} \\ P_{wg,i}, & P_{wg,i} < P_{wh,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_{wg,i}$  为风机第  $i$  时间段的发电功率。

#### 1.2.3 风机发电功率约束

风机的发电功率受风机自身发电极限能力的限制，即

$$0 \leq P_{wg,i} \leq P_{wg,\max} \quad (8)$$

式中： $P_{wg,max}$ 为风机发电功率最大值。

### 1.2.4 抽水蓄能电站的抽水和发电约束

水库储能的大小、发电机的装机容量和发电效率决定了抽水蓄能电站的发电功率，即

$$P_{h,min} \leq P_{h,i} \leq \min(P_{h,max}, \frac{E_i - E_{min}}{\Delta t} \eta_h) \quad (9)$$

抽水蓄能电站抽水的电能为风能充足时过剩的风电或风能不足时主网的供电。本文基于呼和浩特抽水蓄能电站实际参数上进行分析，抽水状态下功率恒定，即

$$P_{p,i} = nP_0 \quad (10)$$

式中： $P_0$ 为单台抽水恒定功率； $n$ 为第 $i$ 时间段启动的台数。当 $P_{wg,i} - P_{w,i,max} \geq nP_0$ 时，第 $i$ 时间段由过剩风电进行抽水；当 $P_{wg,i} - P_{w,i,max} < nP_0$ 时，第 $i$ 时间段由风电和主网联合进行抽水，主网供电量为 $P_{pg,i} = nP_0 - (P_{wg,i} - P_{w,i,max})$ 。

抽水机组和发电机组不能同时出现，即

$$P_{p,i} \times P_{h,i} = 0 \quad (11)$$

### 1.2.5 蓄热电锅炉约束

本研究中蓄热锅炉只在电力负荷谷时段利用过剩的风能进行供热、蓄热，负责一天的热负荷，过剩风能优先用于抽水蓄能电站抽水，设计蓄热电锅炉数量保证每天所有锅炉都在电力负荷波谷时段能连续运行。蓄热电锅炉为恒定功率运行，即

$$P_{r,i} = mP_{r0} \quad (12)$$

式中： $P_{r0}$ 为单台蓄热电锅炉的恒定功率； $m$ 为锅炉台数； $i$ 为电力负荷波谷时用来供热蓄热的时间段。

当 $P_{wg,i} - P_{w,i,max} - P_{p,i} \geq P_{r,i}$ 时，由过剩的风电进行供热、蓄热；当 $P_{wg,i} - P_{w,i,max} - P_{p,i} < P_{r,i}$ 时，需要由主网参与供电来供热、蓄热，主网供电量 $P_{rg,i} = P_{r,i} - (P_{wg,i} - P_{w,i,max} - P_{p,i})$ 。

采取全量蓄热模式，约束为

$$P_{r,i} = \frac{P_{TH}k}{t_{TH}\eta} \quad (13)$$

式中： $P_{TH}$ 为日总热负荷； $t_{TH}$ 为蓄热时间，取波谷时间段； $k$ 为热损失附加率，一般为1.05~1.10； $\eta$ 为电锅炉的热效率，一般为0.95~0.98。

煤耗量为

$$Q_c = \frac{P_{TH}}{H_c \eta_1 \eta_2} \quad (14)$$

式中： $H_c$ 为标准煤热值； $\eta_1$ 为室外管网输送效率

取0.9； $\eta_2$ 为锅炉运行效率，取0.68。

## 2 实例分析

根据研究目的，结合上文分析，针对蒙西电网与呼和浩特抽水蓄能电站联合的现实情况，本文进行实证分析。蒙西地区虽然风电装机容量大，但弃风电量也居于全国前列，并且供热季长达6、7个月，为了保证供热，火电机组的调峰能力进一步下降，使弃风量加大<sup>[12]</sup>。故将蒙西电网和现有的呼和浩特抽水蓄能电站联合进行分析具有典型意义。

### 2.1 数据

由文献[13]可知，呼和浩特抽水蓄能电站是内蒙古自治区第1座抽水蓄能电站，总装机容量1200MW，电站设计的每日抽水小时数为7h，每日发电小时数为7h(5h满负荷发电)，抽水时的平均水量转换系数分别为 $\eta_p = 749m^3/MWh$ ，发电时的平均电量转换系数为 $\eta_h = 998m^3/MWh$ ，抽水蓄能电站储能的最大值 $E_{max} = 6.6637 \times 10^6 m^3$ ，最小值 $E_{min} = 3.782 \times 10^5 m^3$ 。共有4台300MW立式单级可逆式抽蓄机组，处于发电状态时每台机组的功率连续可调，当处于抽水状态时功率恒定为300MW。拟采用2500kW蓄热电锅炉200台分区域布置。

根据2016年国家能源局公布的最新风电上网电价可知，蒙西风电上网电价为470元/MWh。由于抽水蓄能电站的电价机制还不成熟，以文献[8]中电价数据进行分析。

风电、抽水蓄能电站的抽水电价和上网电价如表1。

表1 各种价格表

		元/MWh	
方式	风电上网	抽水蓄能电站上网	抽水
价格	470	776	331

### 2.2 算例分析

本文基于文献[13]的模拟结果对1到96时间段作进一步的联合优化分析，在其风蓄联合的最优运行方式下利用剩余的风能进行蓄热供热。供热季典型日的蒙西电网直调风电机组出力的实际曲线和极限曲线如图1所示。

由图可以看出，风机在夜间极限出力比在白天大很多，实际需要出力夜间较小白天较大；白天负荷高峰时风电全部参与供电，夜间负荷低谷时

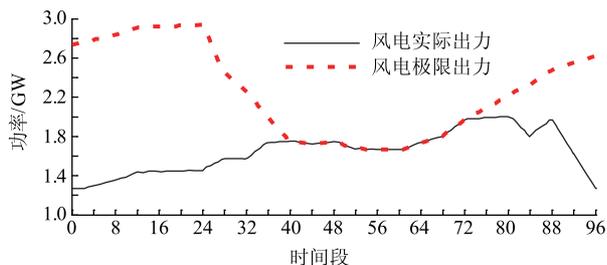


图 1 蒙西电网直调风电机组的实际出力和极限出力曲线  
60%以上的风电需要弃掉，故而需要进行联合来减少弃风。

对 3 种形式进行对比分析：①无联合的优化运行（图 2）；②风电和抽水蓄能电站的联合优化运行（图 3）；③风电抽水蓄能和蓄热电锅炉联合优化运行。

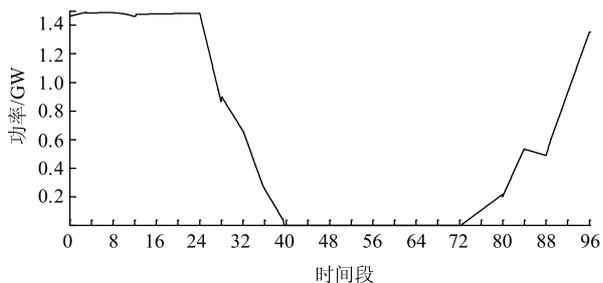


图 2 无联合的弃风曲线

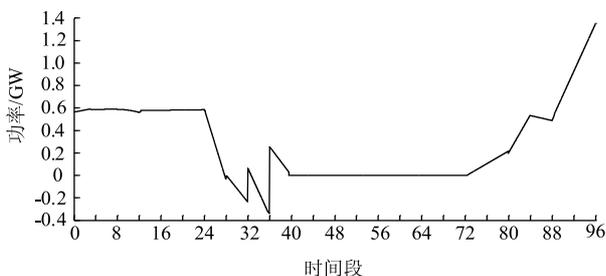


图 3 风蓄联合弃风曲线

图 3 中纵轴为负的部分表示该时间段需要主网供电来进行抽水以满足白天调峰的要求，从表 2 中可看出供热季不采用联合时平均每天弃风量 14 368.3MWh，采取风蓄联合优化运行平均每天可以减少弃风 7 800MWh(约 54.3%)，抽水蓄能电站的日发电量为 5 850MWh，需从主网供电 220MWh，节省煤炭 4 098.6t。采用形式③时每天前 24 个时间段任意时刻用 0.5GW 过剩风能利用蓄热电锅炉进行蓄热供热，可以平均每天多减少弃风量 3 000MWh，多节省煤炭 545.5t，按民用住宅设计供暖指标 60W/m<sup>2</sup> 计算，可以满足大约 1.8×10<sup>6</sup>m<sup>2</sup>

区域的供热需求。

从表中数据可以看出相对于方式①和②，方式③的经济效益最大，方式②是在风电和抽水蓄能联合运行最优状态下的运行状态，而方式③是在方式②的基础上对风电做的进一步消纳，故而方式③是联合系统的最优运行状态。

引入抽水蓄能电站后，在联合优化的方式下抽水蓄能电站的工作情况如图 4 所示，抽水蓄能电站在 1~32 时间段 3 台机组进行抽水，33~36 时间段 2 台机组抽水，其他时间段根据负荷要求情况对抽水蓄能电站安排出力来完成调峰等任务。从目标函数经济效益角度分析，收益见表 2。

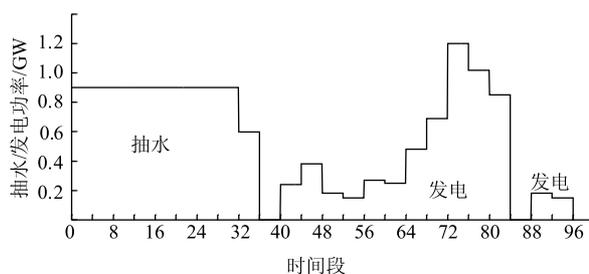


图 4 联合运行时抽水蓄能电站的工作情况

表 2 3 种运行方式比较

运行形式	弃风电量 /MWh	抽蓄电站发电量/MWh	节煤量/t	经济效益/万元
①	14 368.3			1 125
②	6 568.3	5 850	4 098.6	1 571.64
③	3 568.3	5 850	4 644.1	1 593.75

### 2.3 小结

从数据结果可以看出，在供热季以蒙西地区为例通过风电抽水蓄能与蓄热电锅炉联合优化运行，可以有效地减少弃风量。不采用联合运行方式时，夜间大量的风电需要弃掉；采用联合运行方式后夜间过剩的风电得到了充分的利用。从经济效益角度看，平均每天减少弃风量约 10 800MWh，相当于节约煤炭约 4 644.1t，相比于无联合系统形式经济效益可增加 468.75 万元。

从图像上可以看出，虽然联合运行相对于不采用联合运行时可以有效减少弃风量，从而增加经济效益，但在早上 6:00 左右风电极限出力出现急剧的减少，这种风电的突变性可能会对联合系统的稳定性造成一定程度的冲击。

### 3 结论及建议

风电本身的出力特性是导致弃风的主要原因。本文基于蒙西电网和呼和浩特抽水蓄能电站的实际数据进行分析,研究风电抽水蓄能电站和蓄热电锅炉联合运行的可行性和经济效益。研究结果表明采用风蓄和蓄热锅炉联合运行具有可行性,存在以下意义:

① 通过联合优化机制,可有效减少风电的弃风量、充分利用风能;

② 联合运行既能实现“削峰填谷”又能解决供暖季机组为了供热导致调峰能力有限的问题;

③ 机制可节约大量的煤炭资源,缓解化石能源的短缺问题,减少污染物的排放,并节省一部分环境治理成本;

④ 联合系统经济效益远高于单独风电系统,虽需要一部分的成本投入,但从长远利益看联合系统的优势高于无联合系统;

⑤ 有效的机制运行有助于推进当前清洁能源采暖政策的落实。

联合系统优化运行对减少供暖季的大规模弃风具有重要价值,对节约煤炭资源和减少污染物的排放具有重大意义。国家能源局近日公布的《水电发展“十三五”规划》显示,抽水蓄能的建设速度得到了加快。而随着清洁能源供暖政策的推行,风电供暖势必会呈上升趋势。弃风量大的地区(例如吉林、甘肃、内蒙、新疆等地)冬季需要供暖,因此在这些地方推行风电—抽水蓄能—供热联合系统具有现实意义。目前由于抽水蓄能电站的电价机制还不成熟加之风电出力的不稳定性,使得研究受到一定的限制,随着抽水蓄能电站的增多,电价机制的完善和风电出力预测技术的不断成熟,未来将对研究进行进一步修正和完善。

#### 参 考 文 献

- [1] 高丹,胡三高,范辉,等. 风电-抽水蓄能系统优化运行建模与河北南网案例分析 [J]. 现代电力, 2011, 28(3): 57-61.
- [2] 杨腾栋. 风光互补抽水蓄能电站研究现状 [J]. 贵

州电力技术, 2014(7): 21-23.

- [3] 高赐威,罗海明,朱璐璐,等. 基于电力系统能效评估的蓄能用电技术节能评价及优化 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 140-148.
- [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): 36-41.
- [5] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [6] 曾鸣,张鲲,倪红芳. 考虑平衡风电出力偏差的风电-抽水蓄能联合运行模式研究 [J]. 可再生能源, 2014, 32(5): 642-648.
- [7] 肖白,丛晶,高晓峰,等. 风电-抽水蓄能联合系统综合效益评价方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 400-404.
- [8] 李惠玲,张志强,唐晓骏,等. 风电和抽水蓄能联合送出时大型风电最优入网规模研究 [J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2746-2750.
- [9] 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.
- [10] 李钦伟,郭伟,张端梅,等. 基于蓄热电锅炉的风电消纳效益研究 [J]. 吉林电力, 2015, 43(5): 12-13.
- [11] 孙荣富,张涛,梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-76.
- [12] 吕泉,王伟,李卫东,等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法 [J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1887-1894.
- [13] 徐飞,陈磊,金和平,等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 149-154.

收稿日期: 2017-06-16

作者简介:

施泉生(1961—),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为电力经济与管理科学, E-mail: shiqs@126.com;

丁建勇(1993—),男,硕士研究生,研究方向为能源与电力系统运行优化, E-mail: dingjy1993@126.com.

(责任编辑:杨秋霞)