

# 抽水蓄能电站与风电场联合调峰优化调度

考虑峰谷分时电价政策和减少弃风等各方面的因素,并充分发挥抽水蓄能电站的调峰填谷作用,分析了抽水蓄能电站与风电场联合调峰优化调度的运行模式,提出了风水联合体申报计划出力的新模式。该模式基于火电机组出力曲线、风功率曲线和电网负荷特性,以风电-抽水蓄能联合运行的效益最大化为目标,计及抽水蓄能电站的库容、抽水发电、黑启动电源预留水量和旋转备用等约束,建立1天96个时段的混合整数规划模型,分析了抽水蓄能电站配合风电场对综合效益和电网稳定性的影响。算例分析表明,抽水蓄能电站配合风电场联合运行可以提高风电场的效益并减少弃风,起到调峰填谷的作用,并降低电力系统调度计划的不确定性。

康正/国网青岛供电公司 李灿 李超/山东大学电气工程学院



康正/助理工程师

近年来,在化石燃料供应趋紧和节能减排的双重压力之下,风电在我国迎来了一个快速发展的新时期,我国已经成为风电装机容量最大的国家。然而,与水电、火电机组相比,风能随机性和间歇性的特点造成风电机组的出力频繁波动,风电场出力的可靠性较差。风电的比重过大,会使电网的调频、调峰压力加大,且风力发电的开发成本很高,这些问题限制了我国风电的发展<sup>[1]</sup>。

风电的反调峰特性要求我国加强调峰电源建设并优化其运营,抽水蓄能是经济有效的调峰调频工具之一,优化现有抽水蓄能电站运行模式是促进短期内风电大规模并网的有效手段<sup>[2]</sup>。针对风电和抽水蓄能联合发电并入大电网的问题,文献<sup>[3]</sup>通过对抽水蓄能电站与风电联合运行的优化模型仿真计算,说明了联合运行的可行性以及带来的显著效益。文献<sup>[4,5]</sup>研究了以电力市场环境下的风电-抽水蓄能整体效益最优

为目标,量化分析了抽水蓄能电站与风电场联合运行的综合效益。文献<sup>[6]</sup>利用多场景和灵敏度分析的方法对风电-抽水蓄能联合运行进行优化,研究了在给定风电出力情形下抽水蓄能电站最优容量的优化方法。文献<sup>[7,8]</sup>针对抽水蓄能机组自身存在的如起动迅速、运行可靠灵活的优点,验证抽水蓄能机组与风电机组联合运行能够弥补风电机组输出随机性和波动性的不足,考虑峰谷电价时能够取得较好的稳定性和经济效益。文献<sup>[9]</sup>应用场景削减技术以及混合整数规划技术制定了风电储能混合系统的日前和日内生产计划,能够为混合系统的调度提供决策信息。文献<sup>[10-13]</sup>对电力系统中风电与抽水蓄能联合运行进行了建模分析,得出了风电-抽水蓄能联合系统的最优运行策略。文献<sup>[14,15]</sup>中提出风电-抽水蓄能联合系统采用固定比例向调度中心申报次日计划出力,以风电-抽水蓄能联合体总的效益最大为目标建立了日优化模型,风水联合体具有一定的负荷跟踪能力。

国内外关于风电与抽水蓄能联合发电优化调度的研究大多只考虑了如何使风电场和抽水蓄能电站的利益最大化。如何在联合体利益最大化的前提下,充分考虑抽水蓄能电站的调峰作用和旋转备用作用,并与常规火电机组协同调度则是本文研究的主要内容。本文在对风电特性的研究以及抽水蓄能电站的工作原理研究的基础上,考虑抽水蓄能电站的调峰作用和旋转备用效益,提出了风电与抽水蓄能电站联合发电优化调度的效益最优模型,具有良好的负荷跟踪特性和经济特性。最后通过实例分析验证了本文方法的有效性。

## 关键词/Keywords

风力发电·  
抽水蓄能·  
联合运行·  
调峰填谷·  
经济调度·

## 联合系统调峰调度方式

### 1. 联合系统发电运行模式

风电-抽水蓄能联合发电模式的运行原则: 在风电功率、火电功率及抽水蓄能电站可用功率与该时段负荷匹配的基础上, 尽量提高风能利用率, 发挥抽水蓄能电站的调峰能力, 以抽水蓄能为主、火电机组为辅来平抑风电功率的波动, 减少常规火电机组的深度调峰或起停调峰。结合联合运行原则, 本文采用风电-抽水蓄能联合调度策略, 如图1所示。



图1 风电-抽水蓄能联合系统调度策略

### 2. 联合系统计划出力

本文提出了申报计划出力的一种新模式, 根据峰谷电价政策和负荷需求等方面的因素, 采用变比例法申报计划出力  $L_k$

$$L_k = L_{Sk} \frac{\sum_{k=1}^{96} g_k^{pw}}{\sum_{k=1}^{96} L_{Sk}} + \lambda \sum_{k=1}^{96} (L_{Sk} - L_{Sk-1}) - \mu \quad (1)$$

式中,  $g_k^{pw}$  为  $k$  时段风电机组预测出力;  $L_{Sk}$  为  $k$  时段系统的总负荷;  $\lambda$  为变比例乘子;  $\mu$  为负荷变化系数。

根据图2可以看出, 采用变比例法申报计划出力对系统进行优化时, 在负荷低谷时风电-抽水蓄能联合计划出力小于负荷预测值, 在负荷高

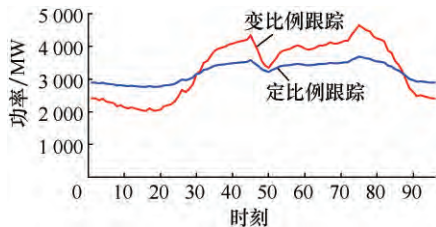


图2 变比例计划出力跟踪负荷曲线

峰时联合计划出力高于负荷预测值。

## 联合系统发电优化调度模型

### 1. 目标函数

考虑联合体偏离计划出力的惩罚并忽略抽水蓄能机组较小的起停成本, 以风电-抽水蓄能联合运行的效益最大化为目标, 建立目标函数

$$\max \sum_{k=1}^{96} [p_k (g_k^p + g_k^w - p_k) - \omega \pi_k |g_k^p + g_k^w - p_k - L_k|] \quad (2)$$

式中,  $k$  表示时间序列, 以 15 min 为一个时间段,  $k=1, 2, \dots, 96$ ;  $\pi_k$  为  $k$  时段风电-时段的上网电价 (考虑不同时段电价的变化);  $g_k^p$  为  $k$  时段抽水蓄能电站发电机组总出力;  $g_k^w$  为  $k$  时段风电机组出力;  $p_k$  为  $k$  时段抽水蓄能电站水泵的抽水总功率;  $\omega$  是惩罚系数;  $L_k$  为  $k$  时段风电-抽水蓄能电站联合体的计划出力。目标函数第一项表示净售电收益, 第二项表示偏离计划出力的惩罚费用。

### 2. 模型约束条件

抽水/发电约束为

$$n_k^p \leq N \quad (3)$$

$$p_k = n_k^p p_{con} \quad (4)$$

$$g_{min} \leq g_k^p \leq (N - n_{k-1}^p) g_{max} \text{ 或 } g_k^p = 0 \quad (5)$$

$$(1 - \varepsilon) L_k \leq g_k^p + g_k^w - p_k \leq (1 + \varepsilon) L_k \quad (6)$$

$$n_k^p = n_{k-1}^p + n_k^{su} - n_k^{sd} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{96} (n_k^{su} + n_k^{sd}) \leq 2N \quad (8)$$

式中,  $N$  为抽水蓄能电站所有可用的可逆式抽水-发电机组数;  $n_k^p$  为  $k$  时段工作水泵总数;  $p_{con}$  为单台水泵的额定抽水功率;  $g_{min}$ 、 $g_{max}$  为单台机组出力的上、下限;  $\varepsilon$  为给定负荷的偏离系数;  $n_k^{su}$ 、 $n_k^{sd}$  分别为  $k$  时段起、停的水泵数。

抽水蓄能电站库容约束为

$$V_{min}^u + \nu_0 \leq V_k^u \leq V_{max}^u \quad (9)$$

$$V_{min}^d \leq V_k^d \leq V_{max}^d \quad (10)$$

$$V_k^u = V_{k-1}^u + f_{up}(p_k, H_k) - f_{down}(g_k^p, H_k) \quad (11)$$

$$V_k^d = V_{k-1}^d - f_{up}(p_k, H_k) + f_{down}(g_k^p, H_k) \quad (12)$$

式中,  $V_{min}^u$ 、 $V_{max}^u$ 、 $V_{min}^d$  和  $V_{max}^d$  分别为上、下水库的最小、最大库容;  $\nu_0$  为抽水蓄能电站黑启动最优预留水量;  $V_k^u$ 、 $V_k^d$  分别为  $k$  时段上、下水库的实际库容;  $f_{up}(p_k, H_k)$  是以抽水功率和扬程为自变量

的向上抽水流量函数,  $f_{\text{down}}(g_k^p, H_k)$  是以发电功率和水头为自变量的向下放水流量函数, 在实际计算中用式 (13)、式 (14) 进行线性化处理。

各时段发电用水量

$$f_{\text{down}}(g_k^p, H_k) = \frac{3\,600\,g_k^p t_k}{\eta_g g H_k} \quad (13)$$

式中,  $t_k$  为第  $k$  时段的时间长度;  $\eta_g$  为抽水蓄能机组的发电效率;  $g$  为重力加速度;  $H_k$  为额定水头。式 (13) 给出了各时段发电用水量函数, 根据抽水蓄能电站的效率  $\eta$ , 可以确定抽水流量函数为

$$f_{\text{up}}(p_k, H_k) = \eta \frac{3\,600\,p_k t_k}{\eta_g g H_k} \quad (14)$$

考虑到抽水蓄能电站发电和抽水状态的互斥, 设置约束为

$$\sum_{k=1}^{96} (n_k^{\text{su}} n_k^{\text{sd}} + p_k g_k^p) = 0 \quad (15)$$

## 算例分析

### 1. 算例系统

本文是以山东泰安抽水蓄能电站的参数和山东地区某日 24 h 的 96 点风电场出力及山东春季典型日负荷曲线构造算例, 对所提出的风电-抽水蓄能联合优化方法进行测试。风电-抽水蓄能联合优化模型是一个混合整数规划问题, 本文采用成熟的商业优化软件 IBM ILOG CPLEX 12.3 [14] 进行编译求解。该电力系统中风电功率、火电机组计划发电功率、典型日负荷功率和联合计划出力如图 3 所示。

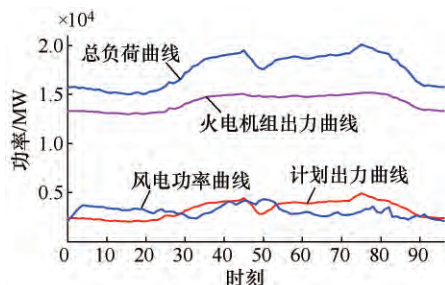


图3 风电功率、火电功率、日负荷功率及计划出力曲线

### 2. 计算结果与分析

#### (1) 风电场独立运行

当模型中只有风电场时, 风电场可获得的收

益为

$$\max \sum_{k=1}^{96} [\pi_k g_k^w - \omega \pi_k |g_k^w - L_k|] \quad (16)$$

通过计算, 风电场可获得的最大收益为 4 153.46 万元, 惩罚费用为 18.42 万元, 相对于计划出力的最大偏离为 1 604 MW。

#### (2) 抽水蓄能电站配合风电场运行

如果只考虑风电场和抽水蓄能电站配合的经济效益, 而不考虑净出力对计划出力的偏离程度时, 即不考虑约束式 (6), 联合体可获得的最大经济收益为 4 508.69 万元, 惩罚费用为 4.6 万元, 最大偏离为 2 150 MW, 得到的优化结果如图 4 所示。

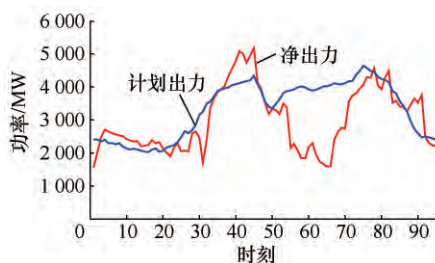


图4 无偏离约束的净出力曲线

通过配置抽水蓄能电站后, 风电场和抽水蓄能电站联合运行, 收益增加了 355.23 万元, 上升了 8%, 同时惩罚费用显著减少, 降低了 75%。主要原因是风电场配置抽水蓄能电站后, 抽水蓄能电站利用它的蓄能作用存储低谷电价时的风电, 在高峰电价时送入电网, 从而使风水联合体的总体效益提高, 且减轻了电网的调控压力。

#### (3) 考虑出力偏离约束的优化

由图 4 可以看出, 尽管风电场出力的整体趋势与负荷曲线相符, 但在某些时段存在很大的偏离, 这显然不符合调度的需求。所以必须考虑出力偏离约束式 (6), 提高净出力和计划出力的相符程度。设  $\varepsilon$  分别为 15% 和 20%, 即净出力与计划出力相对偏差的绝对值不超过 15% 和 20%, 得到的优化结果如图 5 所示。

20% 偏离约束时, 风水联合体的总收益为 4 425.57 万元, 惩罚费用为 5.09 万元, 净出力最大偏离为 1 178 MW, 最大相对偏离为 20%; 当  $\varepsilon$  为 15% 时, 总收益为 4 379.3 万元, 惩罚费用为 5.51 万元, 最大偏离为 662 MW。与取  $\varepsilon = 20\%$  相

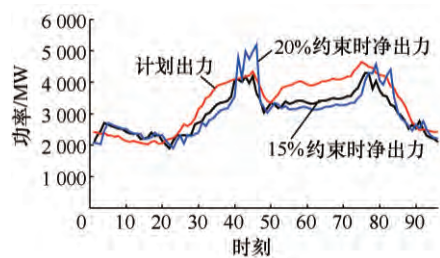


图5 偏离约束下的净出力曲线

比，收益下降 1.1%，最大偏离为 15%。

为了得到更好的负荷跟随效果，可进一步减小  $\varepsilon$ ，但可能出现优化模型无解的情况。设定增加出力偏离约束可以使风电－抽水蓄能联合体的综合出力更加平滑且与负荷变化趋势更加相符，满足调度的需求。

(4) 两种计划出力的比较

采用固定比例的计划出力进行优化时：设定  $\varepsilon = 20\%$ ，此时获得的收益为 4 420.51 万元，惩罚费用为 1.40 万；相比于变比例，收益减少 5.07 万元。

设定  $\varepsilon = 15\%$ ，此时获得的收益为 4 365.75 万元，惩罚费用为 1.55 万元；相比于变比例，收益减少 13.55 万元。

上述数据表明，采用变比例申报计划出力对系统进行优化时，可以增加风电场－抽水蓄能电站联合体的经济效益，同时也为整个电力系统带来了很大的经济效益。

(5) 抽水蓄能旋转备用收益

抽水蓄能电站旋转备用是指在其正常运行工况下与系统保持同步运行，在系统需要时能够在很短的时间内投入运行的机组容量，包括在正常发电工况下机组的剩余容量，以及在抽水工况下机组的抽水容量。

任意  $k$  时刻的旋转备用容量用公式可以表示为

$$P_{rk} = \begin{cases} P^{\max} - g_k & \text{发电时} \\ p_k & \text{抽水时} \end{cases} \quad (17)$$

式中， $P_{rk}$  为抽水蓄能电站提供的备用容量； $P^{\max}$  为抽水蓄能电站的最大发电容量。

下表汇总了采用变比例申报计划出力时几种测试情景的优化结果，计及了抽水蓄能电站的旋转备用容量效益。可以看出，通过与抽水蓄能电站配合，风电场出力的可控程度显著增加，收益

也显著增加，使其更加符合调度的需求，有利于保持常规机组的平稳运行。

表 各场景下优化结果比较

| 场景       | 总收益/万元   | 惩罚费用/万元 | 最大偏离/MW |
|----------|----------|---------|---------|
| 风电独立运行   | 4 153.46 | 18.42   | 1 604   |
| 风储联合运行   | 5 831.69 | 4.6     | 2 150   |
| 20% 偏离约束 | 5 725.57 | 5.09    | 1 178   |
| 15% 偏离约束 | 5 679.30 | 5.51    | 662     |

结束语

建立了风电－抽水蓄能联合运行模式，要求风电场与抽水蓄能电站综合出力采用可变比例的方式跟踪负荷变化。以风电场－抽水蓄能电站联合体效益最大化为目标建立了含全天 96 个时段的日优化模型。

算例分析表明，采用可变比例的方法申报计划出力可以明显增加联合体的经济效益，抽水蓄能电站起到了很好的调峰作用，并且能够减少常规机组的起停，更加满足调度的需求，提高了整个电网的稳定性。

本文主要考虑了抽水蓄能电站的调峰、旋转备用和作为黑启动电源的功能，在模型中如何优化常规火电机组的起停和出力将是下一步工作的重点。

参考文献

[1] 王卿然，谢国辉，张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型 [J]. 电力系统自动化，2011，35 (5)：15-18.

[2] 谢石骁，杨莉，李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法 [J]. 电网技术，2012，36 (5)：79-84.

[3] 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.

[4] Garcia - Gonzelez J, Muela R M R, Santos LM, et al. Stochastic joint optimization of wind generation and pumped - storage units in an electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (2)：460-468.

[5] 肖白，丛晶，高晓峰，等. 风电－抽水蓄能联合系统综合效益评价 [J]. 电网技术，2014，38 (2)：

- 400-404.
- [6] Ning Zhang, Chongqing Kang, Daniel S. Kirschen. planning pumped storage capacity storage for wind power intergration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (2): 393-401.
- [7] 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换效益研究 [J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 13-18.
- [8] Javier G G, Rocio M R M, Luz M S, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind and pumped hydro storage system considering peak - valley electricity price [J]. Power System Technology, 2008, 23 (2): 460-468.
- [9] 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.
- [10] 陈峦, 陈池. 基于旋转备用和出力预测的风电抽水蓄能并网调度策略 [J]. 水力发电, 2011, 37 (12): 65-68.
- [11] 潘文霞, 范永威, 杨威. 风 - 水电联合优化运行分析 [J]. 太阳能学报, 2008, 29 (1): 80-84.
- [12] 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.
- [13] Bueno C, C J A. Technical - economic analysis of wind - powered pumped hydrostorage systems, part II: model application to the island of El Hierro [J]. Solar Energy, 2005, 78 (3): 396-405.
- [14] 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.
- [15] Huajie Ding, Zechun Hu, Yonghua Song. Stochastic optimization of the daily operation of wind farm and pumped - hydro - storage plant [J]. Renewable Energy, 2012 (48): 571-578.
- [16] IBM Corporation. IBM ILOG CPLEX V12.3 Getting started with CPLEX [EB/OL]. [2011 - 05 - 12]. [ftp://ftp.software.ibm.com/software/websphere/ilog/docs/optimization/optimization/cplex/ps\\_gscplex.pdf](ftp://ftp.software.ibm.com/software/websphere/ilog/docs/optimization/optimization/cplex/ps_gscplex.pdf).
- (收稿日期: 2014-06-10) EA
- 
- (上接第 21 页)
- [1] 黄娟娟, 郑英芬. 特高压网架对华中电网短路电流水平的影响分析及限流措施 [J]. 中国电力, 2007, 40 (3): 49-52.
- [2] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨 [J]. 华东电力, 2006, 34 (7): 55-59.
- [3] 王非, 李群炬. 京津唐电网限制短路电流问题探讨 [J]. 华北电力技术, 2007 (4): 17-19.
- [4] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (7): 104-107.
- [5] 叶幼君, 鲍爱霞, 程云志. 浙江 500 kV 电网短路电流的控制 [J]. 华东电力, 2006, 34 (3): 11-15.
- [6] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31 (10): 42-45.
- [7] 赵彩宏, 田立军, 江世芳. 一种新型故障限流器的拓扑结构及仿真 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (2): 40-44.
- [8] 章良栋, 刘为, 岑文辉, 等. 一种新型短路电流限制器的研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (7): 15-18.
- [9] 陈刚, 江道灼, 吴兆麟. 固态短路电流限流器的研究与发展 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (10): 89-94.
- [10] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 99-113.
- [11] 郝志杰, 江道灼, 蔡永华. 新型固态故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (8): 50-56.
- [12] 陆建忠, 张啸虎. 加强电网规划, 优化电网结构, 限制短路电流 [J]. 华东电力, 2005, 33 (5): 7-10.
- [13] 何肇. 关于改善华东电网结构、降低短路容量方案的探讨 [J]. 电网技术, 2004, 28 (2): 28-31.
- [14] 张铭. 短路电流限制器技术综述 [J]. 华东电力, 2008, 36 (9): 43-46.
- [15] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500 kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (21): 92-96.
- [16] 李继红, 黄良宝, 徐谦, 等. 一种降低短路电流水平的措施: 母线分裂运行 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 98-101.
- (收稿日期: 2014-02-13) EA