

文章编号:0254-0096(2020)08-0079-07

风-光-水-火-抽蓄联合发电系统日前优化调度研究

张国斌¹, 陈 玥², 张佳辉², 唐宁宁², 牛玉广^{2,3}

(1. 内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020; 2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

3. 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 提出考虑发电成本、污染物治理成本以及可再生能源弃电成本的总成本计算模型, 建立风电光伏水电火电联合优化调度模型, 提出通过多种能源联合运行、与储能装置协调配合的调度方法减少可再生能源弃电率。通过对风光水火以及风光水火蓄联合系统在春夏秋冬4个典型日仿真计算说明抽水蓄能可有效降低新能源弃电率, 降低系统运行成本, 有效平抑电源功率波动, 降低季节变化对系统的影响。

关键词: 分布式能源; 经济调度模型; 抽水蓄能电站; 运行策略; 联合发电系统

中图分类号: TM715

文献标志码: A

0 引 言

大力发展可再生能源, 实现能源生产转型, 是能源可持续发展的重要途径。2030~2050年, 中国可再生能源的发电量将达到30%以上^[1], 目前可再生能源装机规模持续扩大, 高比例可再生能源并网, 中国可再生能源消纳面临严峻局面^[2], 存在大量弃风弃光。这不仅给电网的经济调度带来了挑战, 也增大了电网稳定运行的风险, 以2016年云南电网为例, 汛期水电水电输出功率增大, 导致光伏、风电大量无序脱网, 恶化电网频率稳定性。现有电网系统难以满足可再生能源大规模并网消纳的要求, 电网约束导致部分地区弃风、弃水、弃光问题严重。

文献[3]建立风-水-火电力系统协调调度的多目标优化模型, 利用改进的粒子群算法, 通过10机测试系统验证了改进算法的优越性; 文献[4]建立“风、光、火、蓄、储”多能源互补优化调度模型, 并提出用动态惯性权重粒子群算法求解, 以实现系统总运行成本最小的优化目标; 文献[5]基于电网功率平衡方法及储纳运行机制, 建立了可再生能源电网日前发电计划与实时调度的数学模型; 文献[6]建立抽水蓄能机组与火电机组联合运行的优化模型, 在此基础上以某实际系统为例进行联合优化模拟。文献[7]建立风光抽蓄联合发电系统, 用免疫粒子群算法进行求解。文献[8]对风光水互补发电运行特

性进行分析, 结果表明风光水互补发电系统的有功功率输出特性可对系统负荷保持良好的跟踪, 在日内时间尺度存在较强的互补性。

但上述文献针对高比例可再生能源并网利用火电与抽水蓄能调峰的联合优化运行研究较少, 不完全适用于中国的实际现状和未来需求。仅依靠火电机组的灵活性进行调节, 势必造成火电机组频繁启停, 威胁电网运行安全性与经济性。因此, 采用储能技术是解决电网调度问题、保证电网稳定、降低新能源并网弃风率的有效手段, 在提升电力系统灵活性方面日益显示出重要作用。目前, 抽水蓄能是电力系统中容量大、技术成熟、成本低廉的储能设施。本文提出一种风电光伏水电火电联合调度模式, 兼顾了节能减排环境成本最低、弃电惩罚成本最低、系统功率平衡、旋转备用容量保障的基本要求, 为多种可再生能源联合调度提供一种分析方法; 提出通过可再生能源与传统电源联合运行、与储能装置协调配合的调度方法减少可再生能源弃电率, 为综合提升可再生能源利用水平, 提高综合效益提供很好的借鉴。本文分春夏秋冬4个典型日, 利用Yalmip工具箱进行模型验证, 结果表明, 加入抽水蓄能电站能有效降低弃风弃水弃光率, 减小因季节变化造成的新能源出力波动, 降低系统总成本。比较Yalmip工具箱与传统遗传算法的求解结果, 结果表明前者求解效果更好。

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(内电科信[2017]135号; 内电科信([2018]-47号)

通信作者: 陈 玥(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事综合能源系统方面的研究。chenyue@ncepu.edu.cn

1 联合发电系统优化调度模型

1.1 目标函数

传统的联合调度模型多采用单一的经济调度模型,本文基于经济、环保、高效的目标,构造风-光-水-火-蓄联合优化调度模型。考虑系统的功率平衡约束及风、光、水、火各发电机组运行的相关约束,建立以系统运行成本最低、燃煤机组排放污染物的治理费最低、弃风弃光弃水量最低的目标函数。

考虑到优化调度模型的经济性,使系统运行成本最低(假设风、光、水运行成本为零,仅考虑火电成本),则体现系统运行成本的目标函数为:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T (z_{t1} + z_{t2} + z_{t3}) \quad (1)$$

式中, f_1 ——系统运行成本; t ——运行时段, $t=1, 2, \dots, T$; T ——总运行时间段; z_{t1} 、 z_{t2} 、 z_{t3} ——第 t 时段内火电机组燃煤成本、污染物治理成本和弃电惩罚成本。

1.1.1 火电机组燃煤成本

火电机组的运行成本^[9]为凸性非线性二次函数:

$$z_{t1} = \sum_{i=1}^{N_g} w \left[a_i (P_{it}^g)^2 + b_i P_{it}^g + c_i \right] \quad (2)$$

式中, N_g ——火电机组总数; a_i 、 b_i 、 c_i ——第 i 台机组的煤耗系数; P_{it}^g ——火电机组 i 在 t 时段的输出功率; w ——煤价。

1.1.2 污染物惩罚成本

SO_2 、 NO_x 、粉尘的排放量由煤耗量^[10-11]计算得出。每吨煤产生的 SO_2 、 NO_x 、粉尘排放量如表 1 所示。

表 1 不同污染物排放量与惩罚成本表

Table 1 Emissions of different pollutants and penalty costs

项目	$[\text{SO}_2]$	$[\text{NO}_x]$	粉尘
排放量/t	0.000416	0.000476025	0.00077814
惩罚成本/元·t ⁻¹	630	0.9977	0.9981

污染物总惩罚成本 z_{t2} 为:

$$z_{t2} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{N_p} (Q_{\text{NO}_x,i} + Q_{\text{SO}_2,i} + Q_{\text{YC},i}) \quad (3)$$

$$Q_{\text{SO}_2,i} = q_1 \times \mu_1 \times \left[a_i \times (P_{it}^g)^2 - b_i \times P_{it}^g + c_i \right] \quad (4)$$

$$Q_{\text{NO}_x,i} = q_2 \times \mu_2 \times \left[a_i \times (P_{it}^g)^2 - b_i \times P_{it}^g + c_i \right] \quad (5)$$

$$Q_{\text{TSP},i} = q_3 \times \mu_3 \times \left[a_i \times (P_{it}^g)^2 - b_i \times P_{it}^g + c_i \right] \quad (6)$$

式中, $Q_{\text{NO}_x,i}$ 、 $Q_{\text{SO}_2,i}$ 、 $Q_{\text{YC},i}$ ——机组 i 的污染罚款成本;

q_1 、 q_2 、 q_3 ——单位惩罚成本; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 ——污染物的排放系数。

1.1.3 弃电惩罚成本

弃电惩罚成本表示为弃风、弃光、弃水成本之和:

$$z_{t3} = \sum_{i=1}^T \xi_w (P_{i,t}^w - P_t^w) + \sum_{i=1}^T \xi_{pv} (P_{i,t}^{pv} - P_t^{pv}) + \sum_{i=1}^T \xi_h (P_{i,t}^h - P_t^h) \quad (7)$$

式中, ξ_w 、 ξ_{pv} 、 ξ_h ——风、光、水弃量的惩罚费用; $P_{i,t}^w$ 、 $P_{i,t}^{pv}$ 、 $P_{i,t}^h$ —— t 时段风电场、光伏电站、水电站的发电预测值; P_t^w 、 P_t^{pv} 、 P_t^h —— t 时段风电场、光伏电站、水电站的调度计划发电量; 下标 w 、 pv 、 h 代表风电、光伏和水电。

1.2 约束条件

1.2.1 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_g} y_{it} P_{it}^g + P_t^w + P_t^h + P_t^{pv} + P_t^{ph} = P_t^D \quad (8)$$

式中, P_t^D —— t 时段的负荷值; P_t^{ph} —— t 时段抽水蓄能电站功率(若 $P_t^{ph} > 0$, 则表示电站处于发电状态, 若 $P_t^{ph} < 0$, 则表示电站处于抽水状态)。

1.2.2 火电机组约束

1) 火电机组出力约束

$$P_{\min i}^g \leq P_{it}^g \leq P_{\max i}^g \quad (9)$$

式中, $P_{\min i}^g$ ——第 i 台火电机组出力下限; $P_{\max i}^g$ ——第 i 台火电机组出力上限。

2) 爬坡速率约束

$$-R_{it}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{it}^g - P_{i(t-1)}^g \leq R_{it}^{\text{up}} \Delta t \quad (10)$$

式中, R_{it}^{down} ——机组 i 在 t 时段内减载的速率限值; R_{it}^{up} ——机组 i 在 t 时段内加载的速率限值。

1.2.3 水电机组约束

水电机组出力约束

$$P_{\min}^h \leq P_{it}^h \leq P_{\max}^h \quad (11)$$

式中, P_{\min}^h ——水电站最小出力; P_{\max}^h ——水电站最大出力。

1.2.4 风电约束条件

风电上网功率 ≤ 风电场最大预测出力, 即:

$$0 \leq P_{it}^w \leq P_{i,t}^w \quad (12)$$

1.2.5 光伏约束条件

光伏上网功率 ≤ 光伏电站最大预测出力, 即:

$$0 \leq P_{it}^{pv} \leq P_{i,t}^{pv} \quad (13)$$

1.2.6 抽水蓄能电站约束条件

1) 抽水蓄能电站出力约束

$$0 \leq P_{it}^{ph} \leq P_{\max}^{ph} \quad (14)$$

式中, P_t^{PH} —— t 时段内抽水蓄能电站发电功率, 若 $P_t^{\text{PH}} < 0$, 则表示抽水蓄能电站处于抽水状态; $P_{\text{max}}^{\text{PH}}$ ——抽水蓄能电站发电及抽水功率上限, 抽水蓄能机组最大发电出力 and 最大抽水功率相同, 均等于其装机容量。

2) 水库能量平衡约束

设抽水蓄能转换效率为 η_c , 取 75%, 单日内水库总能量保持平衡, 即抽水蓄能机组抽发平衡 (其发电量等于抽水电量的 75%):

$$\sum_{t=1}^{T_G} P_t^{\text{PH}} \Big|_{P_t^{\text{PH}} \geq 0} = -\eta_c \sum_{t=1}^{T_G} P_t^{\text{PH}} \Big|_{P_t^{\text{PH}} < 0} \quad (15)$$

式中, T_G ——抽水蓄能发电工况运行时间段。

3) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_g} S_i^g + S^{\text{PH}} \geq (1 + \delta) P_{\text{max}}^{\text{D}} \quad (16)$$

$$P_{\text{max}}^{\text{D}} = \max(P_1^{\text{D}}, P_2^{\text{D}}, \dots, P_T^{\text{D}})$$

式中, S_i^g ——第 i 台火电机组的装机容量; S^{PH} ——抽水蓄能机组的装机容量; δ ——系统的旋转备用率; $P_{\text{max}}^{\text{D}}$ ——最高负荷。

1.3 可再生能源预测

1.3.1 风电出力预测

风力机输出功率特性需要考虑切入风速 W_{in} 和切入风速 W_{out} 。风力机输出功率与风速和风力机的风速-功率特性曲线有关。当风速高于 W_{in} 时, 风力机方可启动。当风速高于切入风速 W_{out} 时, 风力机停机^[12]。采用对数分布对其进行处理, 以得到所需高度的风速。对数分布假设风速和距地高度的对数成正比, 即:

$$\frac{v(z_{\text{hub}})}{v(z_{\text{anem}})} = \frac{\ln\left(\frac{z_{\text{hub}}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{\text{anem}}}{z_0}\right)} \quad (17)$$

式中, z_{hub} ——风力机轮毂高度; z_{anem} ——风速测量点高度; z_0 ——地表粗糙长度; $v(z_{\text{hub}})$ ——风力机轮毂处的风速; $v(z_{\text{anem}})$ ——测量点风速。

1.3.2 光伏出力预测

采用式(18)计算光伏阵列^[13]的输出功率:

$$P_{\text{PV}} = f_{\text{PV}} P_{\text{V, cap}} \frac{I_{\text{T}}}{I_{\text{S}}} \quad (18)$$

式中, f_{PV} ——光伏阵列降额因数, 一般取 0.9; $P_{\text{V, cap}}$ ——光伏阵列的额定容量; I_{T} ——光照强度, 为标准测试条件下的光照强度, 取值为 1 kW/m^2 。

1.3.3 水电出力预测

水电站的理论出力可表示为单位时间内的天然水能^[14], 即:

$$P_0 = \rho g Q H_0 = 9.81 Q H_0 \quad (19)$$

式中, Q ——发电流量 (单位时间内通过水轮机参与发电的水的体积); H_0 ——静水头。

由于在水能转换为电能的过程中, 不可避免地会产生一定的能量损失, 因此水电站的实际出力总会小于其理论出力。经过换算, 水电站的实际出力 P 可由式(20)计算得到:

$$P = \rho g Q (H_0 - \Delta h) \eta \eta_d \eta_g = 9.81 Q H \eta_T = k Q H \quad (20)$$

式中, Δh ——水流经由输水道流入水轮机的过程中产生的水头损失; η ——水轮机效率系数; η_d ——传动设备效率系数; η_g ——发电机效率系数; η_T ——水轮发电机组的总效率系数, 即 $\eta_T = \eta \eta_d \eta_g$; k ——水电站出力系数。对于中小型水电站来说, 一般取 $k \approx 6.5 \sim 8.0$ 。

2 算例分析

本文选取多能源互补联合发电系统进行日前调度分析, 配置系统总装机容量为 400 MW 的风电场, 总装机容量为 400 MW 的水电站, 总装机容量为 100 MW 的光伏电站, 总装机容量为 1000 MW 的火电机组, 总装机容量为 200 MW 的抽水蓄能电站, 抽水蓄能能量转换效率为 75%。数据取自文献[8]。

2.1 典型日负荷及可再生能源出力分析

4 个典型日的负荷预测值如图 1 所示。由图 1 可知, 负荷在 10:00~23:00 时段为用电高峰时段, 01:00~09:00 时段负荷较低且较为平稳, 其中夏季和冬季的负荷值高于春季和秋季。

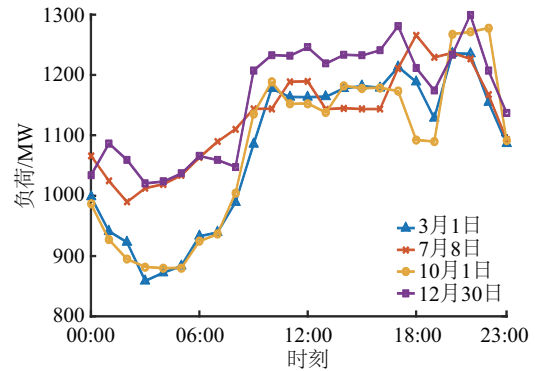


图 1 电网负荷预测曲线

Fig. 1 Load forecasting curve

风电、光电和水电的预测值如图 2 所示。如图 2a 所示, 水电站的发电量受水流影响, 而短时间内水流基本不会发生很大变化, 所以短期内水电站的出力较为平稳, 一个典型日中变化不大, 但季节性特征明显, 夏季为丰水期, 冬季为枯水期。如图 2b 所示, 光伏出力集中在

白天,昼发夜停,不同季节光伏发电的大致趋势相同,且与负荷变化方向一致,有正调峰的作用^[15-18]。夏季典型日总出力最大,冬季最小,且总出力时长最长。如图 2c 所示,风电发电有较强的随机性,所以风电出力单日内变化较大,且早晚出力高于中午,具有反调峰性^[3,19]且不同季节区别较大,冬季风电出力较高。

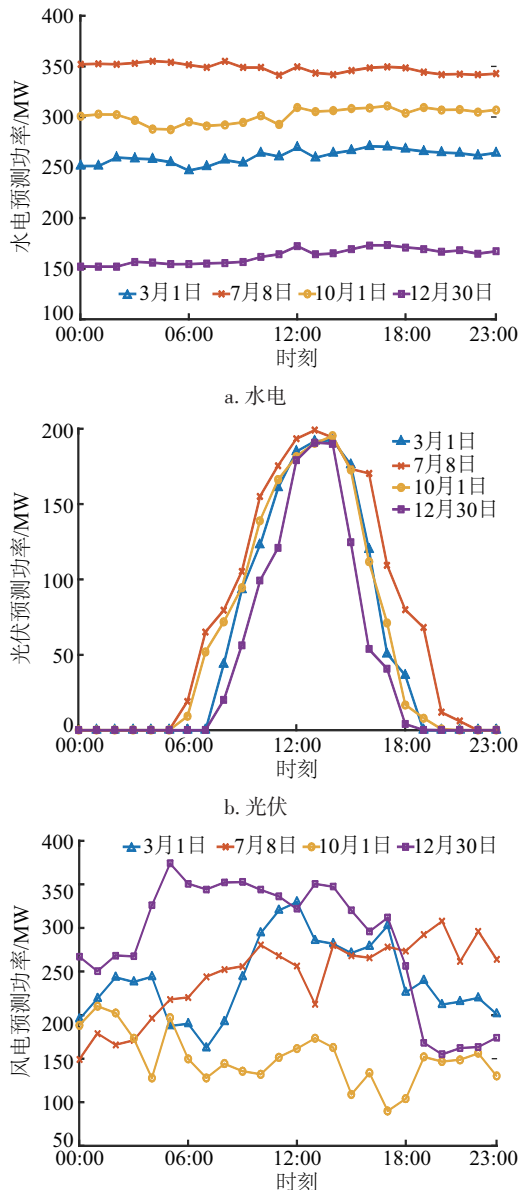


图2 水电、光伏和风电出力预测曲线

Fig. 2 Hydropower, photovoltaic and wind power output forecasting curve

2.2 联合发电系统运行策略

联合发电系统作为一个整体参与电网调度的步骤可以归为:在日前调度运行时综合考虑新能源的预测出力,以联合发电系统总收益最大化为目标安排各部分出

力,通过联合发电系统内部调整,使联合发电系统尽可能满足出力计划。

夏季汛期时,为保证汛期用电安全,水电站满发,优先调用水电及光伏发电,调节风电及火力出力以满足负荷需求。通过调整弃电惩罚系数使存在弃电时,使系统先弃风再弃光伏最后弃水。为减少弃电量,平抑火电波动性,在原系统中配置抽水蓄能电站时,若可再生能源预测出力与火电出力下限总和大于负荷预测值,则抽水蓄能处于抽水状态,在火电发电峰值时刻发电以平抑火电的波动性,并降低系统总成本。

3 模型求解

本文通过 Yalmip 工具箱,分别求解春夏秋冬 4 个典型日含抽蓄以及不含抽蓄的调度模型。系统在春夏秋冬 4 个典型日的日前优化调度结果如图 3 所示。

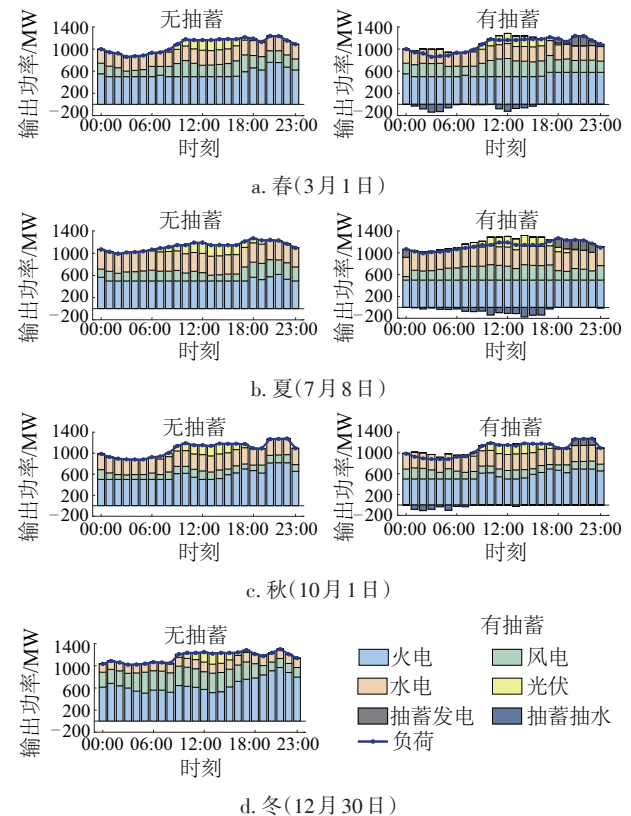


图3 典型日日前优化调度

Fig. 3 Optimal dispatch on typical days

模型求解结果表明,可再生能源并网时,光伏发电对负荷的跟踪能力最强,白天光伏成正调峰,在夜间时,负荷高峰期光伏停止发电,而风力发电有很强的随机性,具有一定的反调峰性,此时加入抽水蓄能后能较好地跟踪负荷高峰期。由于新能源不同季节出力波动较大,对火电机组的调峰能力要求也较高,夏季光伏出力

较大,且丰水期水电出力也较大,导致系统弃电率上升,加入抽蓄后能有效减小弃电率且在夏季夜间负荷高峰值时出力,降低火电机组波动性。冬季枯水期,水力发电和光伏发电出力都较小,系统仅依靠火电调峰就可使弃电率为零,此时可抽水蓄能电站处于停机状态。

引入衡量火电波动性的指标:

$$\sigma = \frac{(P_{t+1}^g - P_t^g)^2}{n-1}, t=1,2,\cdots,n-1 \quad (21)$$

分别计算该地区春、夏、秋、冬四季典型日有抽蓄和无抽蓄情况下,系统的可再生能源弃电率、系统单日运行的总成本和风光水火互补发电系统中火电波动性指标,结果如表 2 所示。

表 2 不同典型日求解指标比较

Table 2 Comparison of solving indexes for different typical days

典型日	弃电率/%		总成本/万元		波动性/MW	
	无抽蓄	有抽蓄	无抽蓄	有抽蓄	无抽蓄	有抽蓄
3月1日	6.10	0.00	933.80	895.18	1933.10	402.69
7月8日	8.19	3.81	928.64	899.64	984.01	0.00
10月1日	4.27	0.00	943.68	918.27	4312.40	1677.30
12月30日	0.00	0.00	971.78	971.78	3669.90	3669.90

根据 2 节确定的目标函数,求解不同典型日的弃电惩罚成本、火电运行成本以及污染物惩罚成本的大小如表 3、表 4 所示。由表 3 可知,系统在加入抽水蓄能后可有效降低新能源弃电率,降低季节变化对系统的影响,使系统弃电率保持在 4%以下,降低系统运行成本,有效平抑电源功率波动。

表 3 有无抽蓄情况下系统运行成本

Table 3 Operating cost of system with and without pumped storage

典型日	有无抽蓄	弃电惩罚成本/万元			火电运行成本/万元	污染物惩罚成本/万元
		弃风	弃光	弃水		
3月1日	无	24.58	0.00	0.00	900.45	8.78
	有	0.00	0.00	0.00	886.54	8.64
7月8日	无	39.37	0.00	0.00	880.69	8.59
	有	18.32	0.00	0.00	872.81	8.51
10月1日	无	15.79	0.00	0.00	918.93	8.96
	有	0.00	0.00	0.00	909.41	8.87
12月30日	无	0.00	0.00	0.00	962.40	9.38

以配置抽水蓄能电站为例,分别用遗传算法和 Yalmip 工具箱求解,比较求解得到的系统弃电率、系统

总成本以及求解时间,结果如表 4 所示。从表 4 可看出,后者的弃电率和经济性较好,且求解时间明显少于前者。结果表明,Yalmip 工具箱在求解整数非线性规划时效果较好。

表 4 不同算法结果比较

Table 4 Emissions of different pollutants and penalty costs

典型日	遗传算法求解			Yalmip 求解		
	弃电率/%	总成本/万元	求解时间/s	弃电率/%	总成本/万元	求解时间/s
3月1日	2.79	1356	38	0.00	934	1
7月8日	8.88	1527	127	0.00	900	2
10月1日	2.46	1365	124	0.00	918	2
12月30日	1.14	1209	134	0.00	972	1

4 结 论

本文建立了火电机组发电成本计算模型、污染物治理成本模型,并引入弃风、弃光、弃水惩罚成本模型;在此基础上,建立考虑火电机组新运行工况的风-光-水-火-蓄优化调度模型;采用遗传算法,以系统总运行成本最小为优化目标进行求解,考虑弃风弃光弃水增加的成本,更好地为电力系统多能互补运行调度计划提供策略。针对蒙西电网高比例可再生能源并网现状,通过案例分析可得出以下结论:

- 1)由于可再生能源季节性变化较大,高比例可再生能源并网时不同季节弃电情况有所不同。
- 2)加入抽水蓄能电站后,抽水蓄能电站能在系统产生弃电量时有效降低弃光、弃风、弃水率,且在负荷峰值出力调峰。
- 3)加入抽水蓄能电站能降低火电机组出力,减少火电机组运行成本以及污染物处理成本,同时减小火电机组因波动产生的爬坡成本,提高系统经济性。
- 4)由于风电处理的随机性和波动性以及光伏电站的昼发夜停,加入抽水蓄能电站能平抑负荷波动性以及风力、光伏发电不确定性带来的波动,降低电网系统对火电机组灵活性的要求,为含有抽水蓄能的多能互补系统运行提供调度策略。

[参考文献]

[1] 国家发改委能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 能源基金会, 2015-04-20.
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. Research on situation and

- approaches of 2050 high-proportion renewable energy development in China[R]. Energy Foundation, 2015-04-20
- [2] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG C Q, YAO L Z. Key scientific issues and theoretical research framework of high proportion renewable energy power system[J]. Power system automation, 2017, 41(9): 2-11.
- [3] 王开艳, 罗先觉, 吴玲, 等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.
WANG K Y, LUO X J, WU L, et al. Joint optimal dispatch of wind-water-fire power system with priority to clean energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 27-35.
- [4] 安磊, 王绵斌, 齐霞, 等. “风、光、火、蓄、储”多能源互补优化调度方法研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1492-1498.
AN L, WANG M B, QI X, et al. Study on multi-energy complementary optimal dispatching method of wind, light, fire, storage and storage [J]. Renewable energy, 2018, 36(10): 1492-1498.
- [5] 郭志忠, 叶瑞丽, 刘瑞叶, 等. 含抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 7-15.
GUO Z Z, YE R L, LIU R Y, et al. Optimal dispatching strategy of renewable energy grid including pumped storage power station [J]. Power automation equipment, 2018, 38(3): 7-15.
- [6] 聂金峰. 抽水蓄能电站与火电厂联合优化运行分析[J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 61-66.
NIE J F. Analysis on joint optimal operation of pumped storage power plant and thermal power plant [J]. Southern energy construction, 2018, 5(3): 61-66.
- [7] 吕优. 风-光-抽水蓄能联合发电系统优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
LYU Y. Study on optimal dispatching of wind- light-pumped storage combined power generation system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [8] 叶林, 屈晓旭, 么艳香, 等. 风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 158-164.
YE L, QU X X, YAO Y X, et al. Analysis of the daily time-scale operation characteristics of wind, solar and water multi-energy complementary power generation system [J]. Power system automation, 2018, 42(4): 158-164.
- [9] 宁志, 丛星亮, 陈永龙. 300 MW 和 1000 MW 燃煤机组能耗和污染物排放特性[J]. 电站辅机, 2019, 40(1): 28-33.
NING Z, CONG X L, CHEN Y L. Energy consumption and pollutant emission characteristics of 300 MW and 1000 MW coal-fired units [J]. Auxiliary equipment of power station, 2019, 40(1): 28-33.
- [10] 肖宇. 厂级燃煤发电机组节能调度系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
XIAO Y. Research on energy-saving dispatching system for plant-level coal-fired generating units [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [11] 闫顺林, 谷兵, 艾书剑, 等. 火电厂发电污染成本核算及敏感度分析[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(7): 62-67.
YAN S L, GU B, AI S J, et al. Cost accounting and sensitivity analysis of power generation pollution in thermal power plants [J]. Power science and engineering, 2016, 32(7): 62-67.
- [12] LILIENTHAL P, LAMBERT T, GILMAN P, et al. HOMER V. 2.68beta [EB/OL]. Colorado, USA: HOMER ENERGY, LLC. [2011-01-01]. <http://www.homerenergy.com/>.
- [13] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
GUO L, LIU W J, JIAO B Q, et al. Multi-objective optimal planning and design method for independent microgrid system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.
- [14] 张蕾. 考虑风功率预测不确定性的水电风电联合调度[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
ZHANG L. Combined dispatching of hydropower and wind power considering uncertainty of wind power forecast [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [15] 吴虹剑. 风/光/水互补微网储能配置与综合效益研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
WU H J. Study on energy storage allocation and comprehensive benefits of wind/ light/ water complementary microgrid [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [16] 徐璋, 李莎, 胡小坚, 等. 基于粒子群算法的风光互补发电系统配置优化设计[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(6): 650-655.

- XU Z, LI S, HU X J, et al. Optimal configuration design of wind-pv hybrid generation system based on particle swarm optimization [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2018, 46(6): 650-655.
- [17] 曾雪婷, 刘天琪, 李茜, 等. 基于虚拟电源配置策略的风光水火多源互补短期优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1379-1386.
- ZENG X T, LIU T Q, LI Q, et al. Short-term optimal dispatch of wind, solar, water, fire and multi-source complementary based on virtual power allocation strategy [J]. Power grid technology, 2016, 40(5): 1379-1386.
- [18] 夏永洪, 吴虹剑, 辛建波, 等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 63-69.
- XIA Y H, WU H J, XIN J B, et al. Evaluation method of microgrid economic operation considering wind/ light/ water/storage multi-source complementary characteristics [J]. Power automation equipment, 2017, 37(7): 63-69.
- [19] 夏新华, 高宗和, 李恒强, 等. 考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 59-65.
- XIA X H, GAO Z H, LI H Q, et al. Combined optimal dispatch of wind, solar, water, fire and multi-energy bases considering the complementary characteristics of time and space[J]. Power engineering technology, 2017, 36(5): 59-65.

RESEARCH ON OPTIMIZATION OF DAY-AHEAD DISPATCHING OF WIND POWER-PHOTOVOLTAIC-HYDROPOWER-THERMAL POWER-PUMPED STORAGE COMBINED POWER GENERATION SYSTEM

Zhang Guobin¹, Chen Yue², Zhang Jiahui², Tang Ningning², Niu Yuguang^{2,3}

(1. Inner Mongolia Power Research Institute, Hohhot 010020, China;

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. State Key Laboratory for Alternate Electric Power System with Renewable Energy Source, Beijing 102206, China)

Abstract: In this paper, a total cost calculation model which considers the cost of power generation, pollutant treatment and renewable energy waste power is proposed, and a wind power-photovoltaic-hydropower-thermal power combined optimal dispatching model is established. By using this dispatching model can reduce effectively the power rejection rate of renewable energy through the dispatching method of multi-energy joint operation and coordination with energy storage devices. In this paper, the simulation calculation of the combined system of wind power-photovoltaic-thermal power-hydropower, and wind power-photovoltaic-thermal power-hydropower-pumped storage on four typical days in spring, summer, autumn, winter shows that pumped storage can effectively reduce the power rejection rate of renewable energy, reduce the system operation cost, effectively stabilize the fluctuation of supply power, and reduce the influence of seasonal change on the system.

Keywords: distributed power generation; economic dispatch model; pumped storage power plants; operating principle; combined power generation system