

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.014

# 水电-风电联合运行优化调度研究

安源, 黄强, 丁航, 王浩, 王颂凯

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 风电出力的非平稳性是目前制约风电并网运行的关键因素, 将水电和风电联合运行调度是一种新的思路。本文以黄河上游 5 座百万千瓦级的梯级水电站与甘肃河西千万千瓦级的风电场为研究对象, 综合考虑各种复杂约束条件, 以弃风电量最小为目标, 建立了水电-风电互补运行优化调度数学模型, 采用改进的量子粒子群算法对该模型进行求解。实例研究表明: 经过风水互补后, 风电出力基本平稳, 最大的波动偏差为 1.65%, 最小的仅为 0.04%, 满足了电网稳定性的要求。因此, 将水电风电联合运行优化调度合理、可靠, 以期为大规模风电并网运行提供了一条有效途径。

**关键词:** 水电-风电; 联合运行; 改进量子粒子群算法

**中图分类号:** TV697.1<sup>+</sup>1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2016)03-0333-05

## Research on the joint operation of hydropower and wind power system

AN Yuan, HUANG Qiang, DING Hang, WANG Hao, WANG Songkai

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

**Abstract:** It is very difficult for the strong instability of wind power to be absorbed by the grid on large scale, and the joint operation of wind power and hydropower provides a new idea. In this paper, the wind power-hydropower system is discussed involving five million-kilowatts hydropower stations located in the upstream of the Yellow River and a ten million-kilowatts hydropower stations located in Hexi of Gansu province. A model aiming at minimizing the loss of wind power is established in considering all kinds of complicated constraints, which is solved by the modified QPSO method. Case study reveals that the output of wind power compensated by hydropower becomes stable, and that the maximum and minimum volatility deviations are 1.65% and 0.04%, which satisfies the requirement for system stability and improves the amount of wind on-to the grid, and decreases the loss of the wind power. Therefore, the joint operation of the wind power and hydropower is feasible and rational, providing an effective way to make the wind power absorbed by the grid.

**Key words:** hydropower and wind power system; joint operation; modified quantum particle swarm optimization algorithm

风电作为一种取之不尽、用之不竭的可再生能源, 具有广阔的开发前景<sup>[1]</sup>。截止 2014 年底, 全球新增风电装机容量高达 51 477 MW, 其中, 我国新增 23 351 MW, 约占全球的 45%。然而, 风电受天气影响显著, 其出力呈现间歇性、随机性、波动性等特征<sup>[2]</sup>。由于风电电能质量较差, 因而难以直接并入电网<sup>[3]</sup>。随着我国风电的快速发展, 各大中型风力发电站的相继投入运行, 风电在电力系统中所占的比重也越来越大, 对电网的安全稳定运行带来了一定的冲击<sup>[4-7]</sup>, 如调峰、调频、系统稳定性等。为此,

需要利用风电与其他电源之间的互补性, 建立互补发电系统上网, 以弥补风电单独并网的不足。

我国的水电资源极为丰富, 且水电在调峰性能上具有很大优势, 具有启动灵活, 调节速度快等优点。水风电互补运行, 充分利用水电、风电的互补性, 进行合理调度, 可实现这两种清洁能源的“强强联合”<sup>[8]</sup>。近年来, 一些学者探讨了抽水蓄能电站与风电互补运行的若干问题<sup>[9]</sup>, 但对于风电与常规水电的互补运行<sup>[10]</sup>研究的相对较少。包小庆等<sup>[11]</sup>构建了水电-风电互补系统, 用以解决当地的冬季电力

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51190093)

作者简介: 安源, 男, 副教授, 研究方向为电力系统保护与自动化。E-mail: 1749847981@qq.com

供应以及调峰问题;Raby等<sup>[12]</sup>利用梯级水电站来配合风电联合运行,研究了风场与多级水电站互补运行的调度策略。

然而,上述研究大多数基于联合系统的出力与负荷相一致性条件下进行的,由此而得到的优化出力波动性大,在实际调度中难以被电网所接受。因此,可考虑利用水电调节能力、启停迅速的优点来弥补风电出力的缺点。

甘肃河西酒泉地区,风能资源丰富,无破坏性风速,为大规模开发风电场提供了有利条件。但该地区处于电网末端,电网网架结构不够坚强,且电源结构相对单一,将风电直接并入电网,不利于电网的稳定运行以及调峰。黄河中、上游水电资源丰富,已建成的梯级水库群调节性能强,是西北电网主要的调峰电源。因此,本文以黄河上游5座100万kW级的水电站和甘肃酒泉的1000万kW级风电场进行互补运行作为研究对象,建立水-风电互补优化调度模型,采用量子粒子群算法求解模型,以期水-风电联合运行、减少弃风电量,大规模风电顺利有效上网提供科学依据。

## 1 水电-风电联合运行的互补原理

风力发电与地区风速的变化情况有很大的关系,风速季节波动性较小,而短期波动性却较大<sup>[13]</sup>。水力发电跟水库库容和水量的调度有很大的关系。水库短期的入库流量变化不大,但是年际径流却波动性较大。

我国风力和水力资源都很丰富,有些地区既有丰富的水力资源,又有丰富的风力资源。风电有很大的波动性,水电也有季节性波动,但是风电和水电可以在时间和季节上形成互补。图1给出了甘肃省瓜州风电场群与黄河水电站在季节上的互补性。

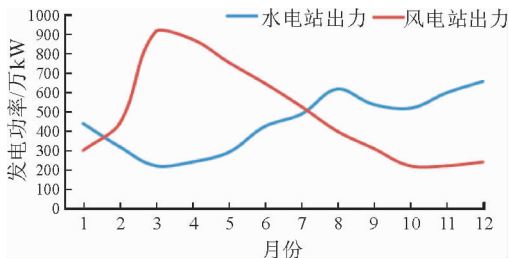


图1 风能和水利的季节互补性

Fig.1 Season complementary performance of wind and water resource

## 2 水-风电互补优化调度优化模型

风电并入电网后,为了满足系统电力电量平衡,

当风电出力降低时,需要增加水电机组的出力;当风电出力增加时,须配合降低水电机组的出力。水电站来水的随机性特点,可通过具有调节能力的水库对径流进行调节,使水电出力可控。

水-风电互补优化调度是充分发挥水电、风电各自的优势,利用水电站水库的调节能力,平衡风电的随机性、波动性和间歇性。当风电出力降低时,须加大水电出力,使风电与水电出力之和始终保持在某一恒定的范围内;当风电出力增加时,降低水电的出力,水电可利用水库蓄能。当风电出力很大,甚至超过系统需要维持的稳定值时,可适当地进行弃风。

因此,水-风电互补优化调度目标可选弃风电量最小,目标函数如下:

$$\min \Delta E = \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \omega(t) NF(i, t) \right] \Delta t \quad (1)$$

其中:

$$\omega(t) = \begin{cases} 0 & \text{当 } \sum_{i=1}^T NF(i, t) \leq N_t \\ 1 & \text{当 } \sum_{i=1}^T NF(i, t) > N_t \end{cases}$$

约束条件有:

$$NS(j)_{\min} \leq NS(j, t) \leq NS(j)_{\max} \quad (2)$$

$$NF(i)_{\min} \leq NF(i, t) \leq NF(i)_{\max} \quad (3)$$

$$V(i+1, t) = V(j, t) + 3600[QR(j, t) - QC(j, t)] \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$Q(j, t)_{\min} \leq QC(j, t) \leq Q(j, t)_{\max} \quad (5)$$

$$V(j)_{\min} \leq V(j, t) \leq V(j)_{\max} \quad (6)$$

式(1)~(6)中:  $I$  为风电站个数;  $T$  为计算时段;  $\Delta t$  为计算时段内的小时数;  $NF(i, t)$  为第  $i$  个风电站第  $t$  时段的出力;  $NS(j, t)$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段出力;  $N_t$  为电网第  $t$  时段允许水电上网的负荷;  $NS(j)_{\min}$  为第  $j$  个水电站强迫出力;  $NS(j)_{\max}$  为第  $j$  个水电站预想出力;  $NF(i)_{\min}$  为第  $i$  个风电站第  $t$  时段最小出力;  $NF(i)_{\max}$  为第  $i$  个风电站第  $t$  时段最大出力;  $V(j, t)$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的库容;  $V(j)_{\min}$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的最小库容;  $V(j)_{\max}$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的最大库容;  $QR(j, t)$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的入库流量;  $QC(j, t)$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的出库流量;  $Q(j, t)_{\min}$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的允许最小流量;  $Q(j, t)_{\max}$  为第  $j$  个水电站第  $t$  时段的允许最大流量。其中,水电站和风电场出力的单位为万 kW; 水库库容的单位为亿  $m^3$ , 流量的单位为  $m^3/s$ 。

### 3 求解模型的量子粒子群算法

#### 3.1 量子粒子群算法原理

标准 PSO 算法的基本原理是:当其中一个粒子搜索到较好的位置时,则种群中其他粒子都要依照位置和速度更新公式向这个最优粒子的方向进行逼近。虽然 PSO 算法的收敛速度快,但算法容易陷入局部最优解,呈现出“早熟”现象。因此,许多学者在粒子群算法的基础之上,做出了诸多改进。

Sun 等<sup>[14]</sup>在研究粒子收敛行为相关成果后,从量子力学的角度出发提出量子粒子群算法(QPSO)。QPSO 认为粒子具有量子行为,无法同时精确测定粒子的位置和速度,采用波函数描述粒子状态,通过求解薛定谔方程得到粒子在空间某点出现的概率密度函数,利用 Monte-Carlo 随机模拟得到粒子在量子空间中的位置方程。在进化过程中,各粒子在最优位置中心的 DELTA 势阱中移动,通过跟踪个体极值和全局极值不断更新位置,能够以一定的概率分布于搜索空间任意位置。粒子状态的进化方程,即粒子的移动方程为:

$$m_{\text{best}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_{g,d}(t) \quad (7)$$

$$p = \frac{\varphi_1 p_{i,d} + \varphi_2 p_{g,d}}{\varphi_1 + \varphi_2}$$

$$\begin{cases} x_i(t+1) = p + \alpha |m_{\text{best}}(i) - x_i(t)| \ln(1/u) \\ \quad \text{if } r \geq 0.5 \\ x_i(t+1) = p - \alpha |m_{\text{best}}(i) - x_i(t)| \ln(1/u) \\ \quad \text{if } r < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和(8)中,  $\varphi_1 = \text{rand}()$ ,  $\varphi_2 = \text{rand}()$ ,  $r = \text{rand}()$ ,  $u = \text{rand}()$ ;  $m_{\text{best}}$  为  $p_{\text{best}}$  中间位置,  $D$  为空间维数,种群规模为  $M$ ,  $p_{i,d}$  为粒子本身所找到的最优解  $p_{\text{best}}$ ,  $p_{g,d}$  为种群目前找到的最优解  $g_{\text{best}}$ ,  $\alpha$  为 QPSO 收缩扩张系数。

#### 3.2 量子粒子群算法寻优原理

本文采用 MATLAB 平台实现 QPSO 算法,具体计算步骤如下:

1) 根据实际问题确定粒子维数  $D$  以及种群规模  $M$ , 初始化粒子种群;同时,计算个体极值  $p_{\text{best}}$  和群体极值  $g_{\text{best}}$ ;

2) 根据优化目标设计适应度函数,并计算各个粒子的适应度值;

3) 评价适应度值优劣,更新个体的最优位置  $p_{\text{best}}(i)$  和群体的最优位置  $g_{\text{best}}$ ;

4) 依据粒子状态进化方程(即速度公式和位置

公式)更新当前所有粒子的位置,从而生成新的粒子群体;

5) 评价新群体的适应度值,找出最优粒子。

不断迭代,并判断是否满足收敛性条件(一般采用最大迭代次数或者达到某一寻优精度),是则退出,否则继续迭代。

量子粒子群算法寻优计算流程图如图 2 所示。

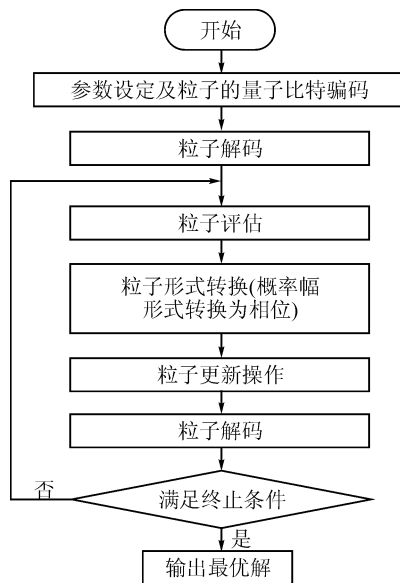


图 2 QPSO 算法流程图

Fig. 2 QPSO algorithm flow chart

### 4 实例研究

黄河上游参与风电补偿有 5 座百万千瓦的水电站。其中,龙羊峡水库总库容为 247 亿  $\text{m}^3$ , 调节库容为 193.5 亿  $\text{m}^3$ , 总装机容量为 128 万 kW, 是黄河上唯一的多年调节水库;拉西瓦水电站距上游龙羊峡水电站 32.8km, 总库容为 10.79 亿  $\text{m}^3$ , 调节库容为 1.5 亿  $\text{m}^3$ , 为日调节水库, 电站装机为 420 万 kW;李家峡水电站距上游拉西瓦水电站 73 km, 水库库容为 16.5 亿  $\text{m}^3$ , 调节库容为 0.6 亿  $\text{m}^3$ , 为日、周调节水库, 电站总装机为 200 万 kW; 公伯峡水电站距上游李家峡水电站 76 km, 水库库容为 6.2 亿  $\text{m}^3$ , 为日调节水库, 电站装机为 150 万 kW; 积石峡水电站, 总库容为 2.635 亿  $\text{m}^3$ , 为日调节水库, 电站总装机容量为 100 万 kW。甘肃河西酒泉地区风能资源丰富, 是我国规划建设第一个 1000 万 kW 级风电基地。

#### 4.1 QPSO 算法参数设置

根据优化问题,对 QPSO 算法基本参数进行设置如下: $t$  为计算时段,按小时计,1 天 24 小时,共 24 个时段; $D$  为粒子维数,设置为 6; $M$  为粒子个数,设

置为 20;最大迭代次数 100。

#### 4.2 水-风电互补优化调度计算

水电站的参数设置:参与互补的水电站有 5 个,各个水电站调节出力范围如表 1 所示。其中,5 座水电站群的强迫出力为 158.9 万 kW,预想出力为 998 万 kW。

表 1 水电站调节能力

Tab. 1 Hydropower station adjustment ability

出力形式	龙羊峡	拉西瓦	李家峡	公伯峡	积石峡
强迫出力/ 万 kW	34.6	51	30.4	24.7	18.2
预想出力/ 万 kW	128	420	200	150	100

风电场参数设置:参与的 1 000 万 kW 级瓜州风电场处于同一个大型风电场,2015 年 3 月 14 日的典型日风电的出力过程,以及水-风电互补优化调度出力过程如图 3 所示。

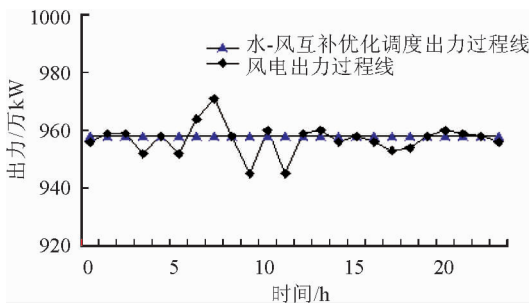


图 3 典型日水-风电互补优化调度出力过程

Fig. 3 The process of wind power-hydropower joint operation system

据有关资料介绍,若风电单独上网,仅能利用 30%左右的风电,弃风高达 70%;若火电与风电打捆上网,且不考虑参与受端电网调峰,其利用率可达 83%左右,弃风率约 17%。相比水-风电互补上网,由图 3 结果分析可知:

1)水-风电互补优化调度后都能够满足水、光电各自的出力约束,5 个水电站的优化出力都在其可调区间以内,水-风电互补上网电量为 22999.2 万 kWh。

2)在全天 24 小时优化时段内,水-风电互补优化调度出力基本保持稳定,平均出力为 958.3 万 kW。其中,最大的波动偏差为 1.65%,最小的仅为 0.04%,这样的一种持续稳定的功率是能够被电网所接受的。

3)水-风电互补优化调度后,弃风电量 90.8 万 kWh,弃风占风力发电量比例 4.1%,远比火电与风

电打捆上网的弃风率低。说明水-风电互补联合运行上网优势明显。

#### 5 结 语

本文以黄河上游常规水电和甘肃酒泉风电为研究对象,研究了水-风电互补运行调度问题,通过分析、建模和计算,得到主要结论如下:

1)在优化时段内,水-风电互补优化调度出力基本保持稳定。其中,最大的波动偏差为 1.65%,最小的仅为 0.04%,这样的一种持续稳定的功率是能够被电网所接受的。

2)水-风电互补优化调度后,弃风率约 4.1%,风电基本能得到利用,弃风电量大大减少。

因此,水-风电互补优化调度后出力基本达到了平稳,满足了电网稳定性的要求,大大提高了风电上网电量,减少了弃风率,水-风电互补优化调度是实现大规模风电并网运行的切实可行有效途径。

#### 参考文献:

- [1] 原陂,王希麟. 风能概论[M]. 北京:化学工业出版社, 2009. 12.
- [2] 张滋华. 含大规模风电电力系统中长期优化运行研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013. ZHANG Zihua. Long-term optimal operation of power system of large-scale wind power generation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [3] 孙亮. 大规模风电并网条件下提高电力系统调峰能力的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010. SUN Liang. Research on the capacity of peak regulation of power system with large-scale wind power penetration [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [4] 黄德琥,陈继军,张岚. 大规模风电并网对电力系统的影响[J]. 广东电力, 2010, 23(7): 27-29. HUANG Dehu, CHEN Jijun, ZHANG Lan. Impact of large-scale wind power integration on power system[J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(7): 27-29.
- [5] WANG L F, SINGH C. Tradeoff between risk and cost in economic dispatch including wind power penetration using particle swarm optimization [C]//International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006: 1-7.
- [6] 蒋大伟. 大规模风电并网对系统频率影响分析[D]. 吉林:东北电力大学, 2010. JIANG Dawei. Analysis of the impact on power system frequency in respect of large-scale wind integration into Grid[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2010.
- [7] 王长贵,王淳,董路影,等. 小型新能源和可再生能源发

- 电系统建设与管理[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [8] 白桦,迟凤岭,胡琼静.以风—水互补方式促进我国风电产业发展[J].中国软科学,2013,01:176-181.  
BAI Hua, CHI Fengling, HU Qiongjing. Complementarity between wind power and hydropower in promotion of wind power industry in China[J]. China Soft Science, 2013,01:176-181.
- [9] 谭志忠,刘德有,欧传奇,等.风电-抽水蓄能联合系统的优化运行模型[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36(1):58-62.  
TAN Zhizhong, LIU Deyou, OU Chuanqi, et al. Optimal operation model for wind-powered pumped storage system[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2008,36(1):58-62.
- [10] BROOK D, KEY T, FELTON L. Increasing the value of wind generation through integration with hydroelectric generation[C]//Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2005, 2:1923-1925.
- [11] 包小庆,李阵刚.风电/水电互补研究[J].新能源, 1997, 19(3):34-37.  
BAO Xiaoqing, LI Zhengang. Study on wind/water power generation complementation [J]. New Energy, 1997,19(3):34-37.
- [12] RABY M, RIOS S, JERARDINO S, et al. Hydro thermal system operation and transmission planning considering large wind farm connection [J]. Power Tech, 2009 IEEE Bucharest, 2009:1-8.
- [13] 尚志娟.风水互补微电网的优化运行研究[D].北京:北京交通大学,2011.  
SHANG Zhijuan. Research on optimal operation of wind and hydro power complementary in micro grid optimal operation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [14] SUN Jun, XU Wenbo, FENG Bin. Adaptive parameter control for quantum-behaved particle swarm optimization on individual level [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, 2005:587-602.
- (责任编辑 杨小丽)

(上接第 301 页)

- [7] TUZEL Y G A, ELTEZ R Z, TUZEL I H. Comparison of open and closed systems on yield and quality of greenhouse grown tomatoes [J]. Acta Horticulturae, 2002, 579:585-590.
- [8] REIS M, INACIO H, ROSA A, et al. Grape marc compost as an alternative growing media for greenhouse tomato [J]. Acta Horticulturae, 2000, 554:75-81.
- [9] SCHRADER F G, LIETH J H. Irrigation control in hydroponics [C]//SAVVAS D, PASSAM H. Hydroponic production of vegetable and ornamentals. Athens: Embryo publications, 2002:103-141.
- [10] 陈春宏,杨志杰,周强,等.引进现代化温室的作物肥水管理[J].上海农业学报,1998,14(增刊1):57-64.  
CHEN Chunhong, YANG Zhijie, ZHOU Qiang, et al. A preliminary study on the water and nutrient management under modern greenhouse cultivation [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 1998, 14(S1):57-64.
- [11] GALLARDO M, THOMPSON R B, RODRIGUEZ J S, et al. Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and N uptake concentration in tomato grown in open substrate [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(12):1773-1784.
- [12] MERIC M K, TUZEL I H, TUZEL Y, et al. Effects of nutrition systems and irrigation program on tomato in soilless culture [J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1):19-25.
- [13] 王振龙.无土栽培教程[M].北京:中国农业大学出版社,2008:23-314.
- [14] 杜森,高祥照.土壤分析技术规范[M].北京:中国农业出版社,2006:73,93.
- (责任编辑 王卫勋,王绪迪)