

文章编号: 1673-5196(2011)05-0078-05

# 风电-抽水蓄能电站联合运行的多目标优化

王晓兰, 李志伟

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为了充分利用风能,改善风电场的功率输出特性,建立风电场-抽水蓄能联合供电系统的优化模型.以联合运行系统的效益最大和输出功率平滑为优化目标,采用多目标克隆选择算法,对模型进行求解和仿真分析.通过优化计算使风电-抽水蓄能联合运行系统在提高运行效益的同时,输出功率得到平滑.应用风电场功率预测技术,通过上述优化,可以得到预测日联合运行系统各部分的优化功率调度值.

**关键词:** 风力发电; 多目标优化; 克隆选择算法; 抽水蓄能; 功率预测

**中图分类号:** TM614 **文献标识码:** A

## Multi-objective optimization of combined operation of power station with wind power and pumped water power storage

WANG Xiao-lan, LI Zhi-wei

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to make full utilization of wind energy, and improve the output characteristics of wind farm, a optimization model of combined power supply system with wind power and pumped water power storage was established. The maximum benefit from this system and the smoothness of the output power of this system were taken as the optimization object and by using the multi-objective clonal selection algorithm, the solution and simulation analysis of this model were performed. The operation effectiveness of the system was improved by means of optimization and at the same time, the smoothness of the output power obtained. By using wind power forecasting and foregoing optimization, the dispatching values of either part in this system could be obtained for daily forecast of the combined operation.

**Key words:** wind power generation; multi-objective optimization; clonal selection algorithm; pumped water power storage; power forecasting

风能的随机性和波动性给电力系统的稳定运行带来了新的挑战<sup>[1]</sup>. 利用储能技术为风电场配置一个储能系统,是改善风力发电特性的措施之一. 目前已有很多蓄能方案,如抽水蓄能、压缩空气蓄能、超导磁力蓄能、流体电池组等,其中抽水蓄能在大规模蓄能方面具有经济和技术上的优势<sup>[2]</sup>.

风电-水电联合运行研究同时涉及到水电、风电及电力系统负荷等多种因素. 文献<sup>[3]</sup>分析了偏远海岛孤立风电-柴油发电-抽水蓄能系统的技术和经济可行性. 文献<sup>[4]</sup>为风电场配置一个水力发电系统,

建立了单目标优化模型,并采用混合遗传算法求解,分析验证了这种方法不但可以增加风电场的效益,同时也平滑了风电场的功率输出.

本文为已建成的风电场配置一个小型抽水蓄能发电系统,与风电场联合运行. 以风电场效益最大化和联合运行输出功率波动最小为目标函数,建立多目标优化问题. 采用克隆选择算法进行求解,得到每个时段风电场和抽水蓄能发电系统的出力值,利用该值进行调度,不但能够提高风电场的效益,而且能够平滑输出功率. 在此基础上,利用风电场输出功率预测技术,预测出次日风电场的输出功率. 按照上述优化方法,可得到次日风电场和抽水蓄能发电系统的优化出力值,从而为优化调度提供了依据.

收稿日期: 2011-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(50967001)

作者简介: 王晓兰(1963-),女,甘肃天水人,教授.

### 1 联合优化运行数学模型的建立

抽水蓄能发电系统如图 1 所示. 系统包含一个上水库、一个下水库和一组可逆的水轮发电机. 利用风电和水电二者之间的互补特性, 当风速很高而风电场无法实现全部功率输出时, 可以用多余的风能带动水泵抽水, 将下水库的水提升到上水库, 以重力势能的形式储存起来; 当风速较小, 单独的风力发电不能满足负荷要求时, 利用上水库的水推动水轮机发电. 在充分利用风能, 增加了风电场运行效益的同时<sup>[4]</sup>, 平滑了联合运行系统的输出功率波动.

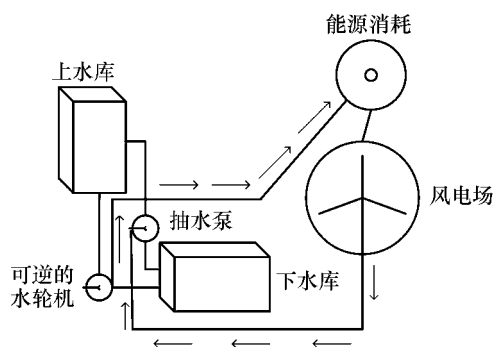


图 1 风电-抽水蓄能联合运行模型图

Fig.1 Model of combined system of wind power and pumped water power storage

假定风电场没有配置水力蓄能系统时的初始输出功率, 以及配置的水电机组容量是确定的, 建立如下的优化模型:

目标函数:

$$F_1 = CP_w + CP_h - C_p P_p = \sum_{i=1}^n (C_i P_{w,i} + C_i P_{h,i} - C_{p,i} P_{p,i}) \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (2)$$

约束条件:

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad (3)$$

$$P_{g,\min} \leq P_{w,i} + P_{p,i} \leq P_{g,\max} \quad (4)$$

$$P_{h,\min} \leq P_{h,i} \leq \min\left(P_{h,\max}, \frac{E_i}{t} \eta_h\right) \quad (5)$$

$$P_{\min} \leq P_{p,i} \leq P_{p,\max} \quad (6)$$

$$0 \leq E_i \leq E_{\max} \quad (7)$$

$$P_{DL} \geq 0 \quad (8)$$

$$P_i = P_{w,i} + P_{h,i} \quad (9)$$

$$P_{v,i} = P_{w,i} + P_{p,i} + P_{DL,i} \quad (10)$$

$$E_{i+1} = E_i + t\left(\eta_p P_{p,i} - \frac{P_{h,i}}{\eta_h}\right) \quad (11)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  时段风电场输送到电网的总功率,  $P_{w,i}$  为  $i$  时段风力机直接输送到电网的功率,  $P_{h,i}$  为  $i$  时段水力发电功率,  $P_{p,i}$  为  $i$  时段水泵抽水功率,  $P_g$  为风电场装机容量,  $P_{DL,i}$  为  $i$  时段舍弃的功率,  $E_i$  为  $i$  时段水库储能,  $\eta_p$  为水泵抽水效率,  $\eta_h$  为水力发电效率,  $t$  为每个时段的长度,  $C_i$  为  $i$  时段的上网电价,  $C_p$  为抽水费用,  $n$  为每日的时段总数.

目标函数  $F_1$  描述联合运行系统的效益, 目标函数  $F_2$  描述联合运行系统输出功率的波动. 上述优化问题为在满足约束条件的情况下, 使  $F_1$  和  $F_2$  取得最大值的风电场、水泵和水力发电机组在各个时段的出力值.

### 2 多目标克隆选择算法

在科学和工程实践中, 许多优化问题具有多目标的特性, 这些目标之间往往是相互冲突的, 这类问题被称为多目标优化问题. 本文所建立的优化问题, 包含 2 个目标函数, 一个是效益最大, 另一个是输出功率平滑. 为了同时获得二者的不同折中值, 需要采取多目标优化算法进行求解. 与单目标优化问题的本质区别在于, 多目标优化的解不是唯一的, 而是存在一个最优解集合, 集合中的元素称为 Pareto 最优解.

用于求解多目标优化问题的算法有: Schaffer 提出的 VEGA<sup>[5]</sup>, Fonseca 等人提出的 MOGA<sup>[6]</sup>, Zitzler 等人提出的 SPEA<sup>[7]</sup> 和 Knowles 等人提出的 PAES. 近年来, 出现了一些新的改进算法, 如 Deb 等提出的 NSGA-II 以及 Zitzler 等人提出的 SPEA2<sup>[8]</sup>, 这些方法取得了一定的效果, 但仍需要设计更高效的算法以获得具有更好的多向性、均匀性的解, 并提高算法的收敛性. 基于克隆选择学说出现的多目标克隆选择算法<sup>[9]</sup>可以获得更高的优化效率.

多目标克隆选择算法的原理及其实现步骤如下:

1) 初始化: 随机生成  $N$  个实数编码的个体组成初始群体  $A_k$ , 令  $k=0$ .

2) 选择操作: 从群体  $A_k$  中选择出进行下一步克隆扩增和高频变异操作的群体  $B_k$ . 当  $A_k$  中所包含的 Pareto 解的个数小于或等于上限值  $n_{\max,1}$  时, 取  $B_k = A_k$ . 当  $A_k$  中所包含的 Pareto 解的个数大于上限值  $n_{\max,1}$  时, 按照一种个体局部拥挤距离的定义方法对  $A_k$  的 Pareto 解进行排序, 选取局部拥挤距

离较大的  $n_{\max,1}$  个 Pareto 解进入  $B_k$ .

群体  $A_k$  中个体局部拥挤距离可按下式计算:

$$D(x) = \frac{1}{2q} \times \sum_{i=1}^n (|f_i(x) - f_i(x_{im})| + |f_i(x) - f_i(x_{in})|) \quad (12)$$

式中:  $x, x_{im}, x_{in} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n_a}\}$ ,  $n_a$  表示  $A_k$  中的个体数,  $x_{im}$  和  $x_{in}$  分别表示仅按第  $i$  个目标函数对  $A_k$  中的个体进行排序时, 和  $x$  最接近的两个个体. 若  $f_i(x) = \min f_i(x_j)$  或  $f_i(x) = \max f_i(x_j)$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, n_a\}$  且  $j \neq i$ , 则令  $f_i(x) = M$ ,  $M$  表示一个足够大的正数.

计算出  $A_k$  中所有 Pareto 解的个体局部拥挤距离后, 按照从大到小的顺序选出  $n_{\max,1}$  个个体组成群体  $B_k$ .

3) 克隆扩增与高频变异: 首先,  $B_k$  中的每个个体克隆扩增与之完全相同的  $n$  个个体, 组成新的群体  $C$ . 然后, 对  $C$  中的个体  $x_1, x_2, \dots, x_p$  逐位按照相同的变异概率  $p_m$  进行高频变异操作, 具体方法如下式所示:

$$x'_i = x_i + r \cdot (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \cdot \text{rand} \quad (13)$$

式中:  $x_i, x'_i$  分别表示变异前后的基因位值,  $x_{i,\max}$ 、 $x_{i,\min}$  分别表示该基因位所表示的自变量可取的最大值和最小值,  $\text{rand}$  表示服从标准正态分布的随机数,  $r$  为变异扩展半径. 变异操作后的个体组成的新群体记作  $C^*$ .

4) 最优保留: 将  $C^*$  中新生成的 Pareto 解添加到外部记忆细胞库  $Bm_k$  中, 删除  $Bm_k$  中被支配的解. 若所得 Pareto 解的个数超过上限值  $n_{\max,2}$  时, 按照筛选  $B_k$  的方法选取  $n_{\max,2}$  个 Pareto 解保留到  $Bm_k$ .

5) 若满足算法收敛条件, 则算法结束, 否则令  $A_{k+1} = Bm_k, k = k + 1$ , 返回步骤 2).

### 3 模型计算结果分析

#### 3.1 模型参数设置

为了便于比较, 采用和文献[4]相同的模型参数设置. 假定水库的初始储能  $E_1 = 0$ , 电网要求的功率限制为  $3 \leq P_i \leq 8$  MW, 其他参数如表 1 所示.

多目标克隆选择算法中, 初始种群规模取  $N = 100$ , 外部记忆库  $Bm_k$  中保留的 Pareto 解的最大个数  $n_{\max,2}$  取 50, 运行代数数为 100 代. 每代被选取进行下一代进化操作的最大个体数  $n_{\max,1}$  取 25, 每一个

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameter

参数	取值
$p_{g,\max}/\text{MW}$	12
$p_{h,\max}/\text{MW}$	3
$P_{p,\max}/\text{MW}$	3
$E_{\max}/(\text{WM} \cdot \text{h})$	24
$\eta_h$	$\eta_s/\eta_p$
$\eta_p$	0.8
$\eta_s = \eta_h \times \eta_p$	0.75
装机容量/MW	$2 \times 6$

克隆扩增为原来的 4 倍.

风电价格体系设定如下:

$$C_i = \begin{cases} 540 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h}) & (0 \leq i < 8) \\ 1\ 038.4 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h}) & (8 \leq i < 22) \\ 540 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h}) & (22 \leq i < 24) \end{cases}$$

$$C_{p,i} = 0.25C_i$$

仅有风电时风电场的输出功率用一个均值为 6 MW、方差为 4 MW 的高斯模型近似模拟, 如图 2 所示.

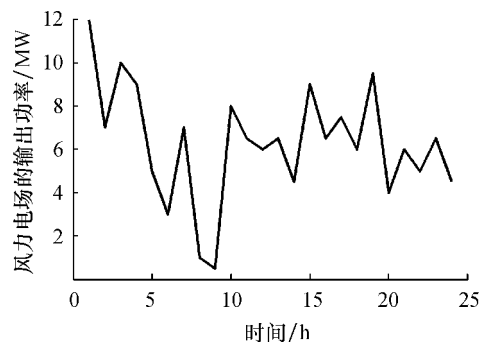


图 2 风电场的输出功率

Fig. 2 Output power of wind farm

#### 3.2 结果分析

按照上述算法步骤和参数设置, 求解式(1~11)的优化问题, 得到运行结果如图 3 所示.

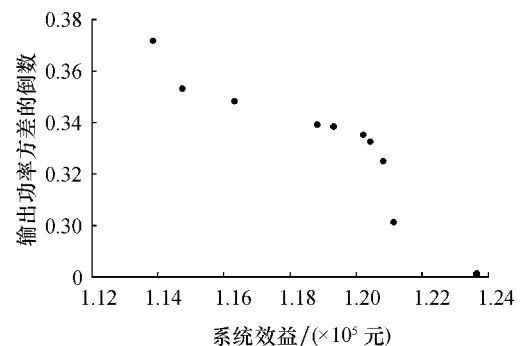


图 3 经过 100 代优化的 Pareto 解集

Fig. 3 Pareto disaggregation of optimization of 100 iterative evaluation

从图 3 可以看出,联合优化后风电场输出功率方差的倒数随着风电场获得效益的增大而减小,使目标函数  $F_1$  和  $F_2$  不可能同时达到最大. 在应用中,可以根据不同的需求,在运行效益和功率平滑方面选择一个折中. 在此选择图 3 中从左边数的第六个点,则联合运行每天获得的效益为 120 220 元,比文献[4]采用遗传算法优化的结果多出了 1 040 元,相比在没有配置水力蓄能系统时的风电场日效益 113 060 元,效益增加了 7 160 元. 经过联合优化运行后输出功率的最小方差为 2.982 MW,小于仅有风电时风电场输出功率的方差 4 MW,说明风电-抽水蓄能联合优化系统平滑了输出功率,对电网调度更加有利.

在上述目标函数的取值点上,对应的风力发电机组、水泵机组、水力发电机组在每个时段的功率值如图 4 所示.

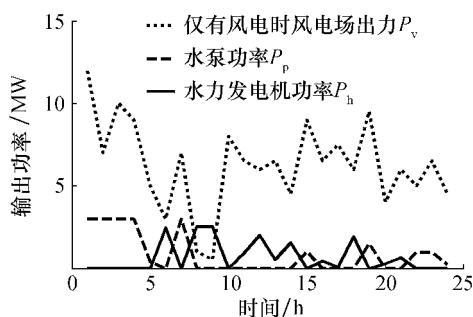


图 4 联合运行系统各部分的输出功率

Fig. 4 Output power of either part in combined operation system

从图 4 可以得到如下结论:

一天的 24 h 中,在 0 时到上午 7 时以及晚上 22 时到 23 时,为低上网电价(540 元/(MW·h))时段,而上午 8 时到晚上 21 时,为高上网电价(1 038.4 元/(MW·h))时段. 在低上网电价的时段里,风电场的输出功率在满足入网功率限制的条件下,让可能更多的“过剩”功率带动水泵抽水,将下水库的水抽至上水库,以重力势能储存起来. 在低电价时段里,当风电场的输出功率不能满足入网功率限制时,水力发电机组要启动,协同风电机组共同向电网供电,满足电网需求. 在高电价时段里,在满足入网限制功率的条件下,水力发电机组尽多地启动,协同风电机组共同向电网供电,这样可使风电场获得较大的效益.

联合运行系统优化后一天中每个时段的功率输出如图 5 所示. 可以看出联合优化运行后的输出功率相比风电场独立运行时的输出功率得到了平滑.

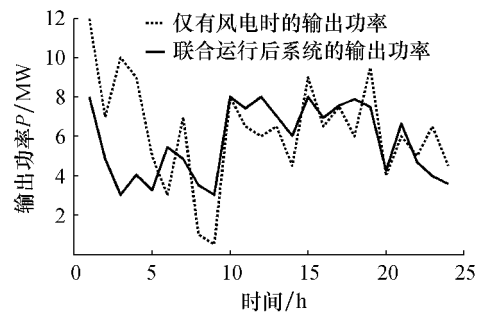


图 5 联合运行后系统的输出功率

Fig. 5 Output power of combined operational system

按照文献[10]的方法对风电场次日的输出功率进行预测,得到某典型日风电场输出功率的预测结果,如图 6 所示.

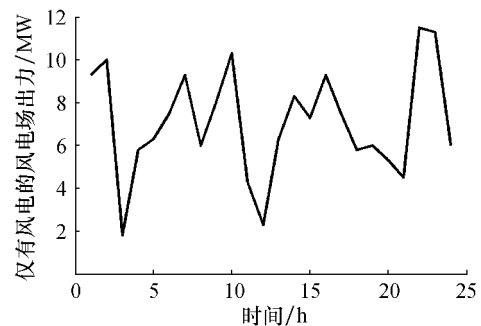


图 6 次日风电场的输出功率

Fig. 6 Output power of wind farm next day

应用上述算法进行优化计算,得到目标函数的优化结果如图 7 所示. 选取图 7 中第 7 个坐标点的目标函数值,得到联合运行系统各部分次日的输出功率调度值,如图 8 所示.

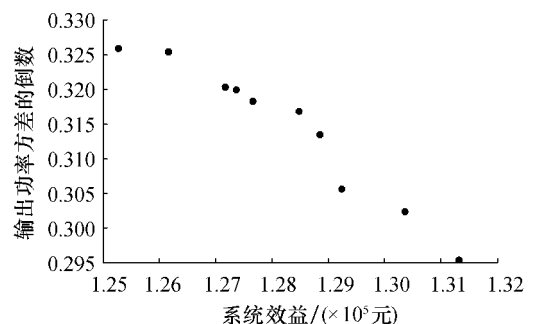


图 7 经过 100 代优化的 Pareto 解集

Fig. 7 Pareto disaggregation of optimization after 100 iterative evaluation

经过联合优化运行后,第二天风电场获得的效益为 128 846 元,比仅有风电场时获得的效益 125 680 元多了 3 166 元. 联合运行后系统次日每个时段的输出功率如图 9 所示. 联合运行后系统输出功率的方差为 3.19 MW,远小于仅有风电场时输出

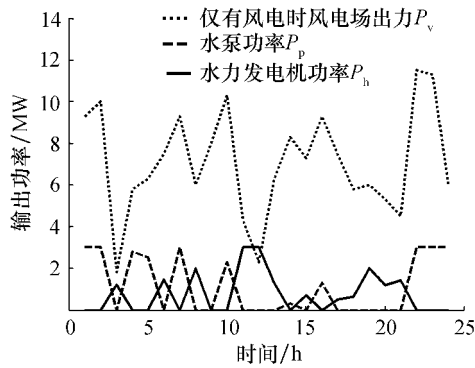


图 8 联合运行系统各部分次日的输出功率  
Fig. 8 Next day's output power of either part of combined operation system

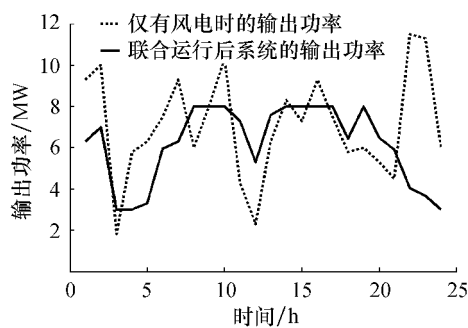


图 9 联合运行后系统次日的输出功率  
Fig. 9 Next day's output power of combined operation system

功率的方差 6.5 MW.

以上分析表明,风电场与抽水蓄能电站联合运行,通过优化调度,可以实现不同时段功率的优化输出.不仅使联合运行系统获得了更大的效益,同时平滑了系统的输出功率,为含风电场的电力系统调度提供了便利.

#### 4 结论

随着风力发电技术的迅速发展,与风能转换系统本身有关费用不断下降,但是风电的随机性造成的入网费用上升和风能利用率低下的问题一直存在.如何提高风电场的效益,同时提高风电场的供电

质量,已经成为一个急需解决的问题.本文采用风电场和抽水蓄能电站联合供电的运行模式,通过多目标克隆选择算法对所建立的优化模型进行求解,得到了风力发电机组、水泵机组、水力发电机组在每个时段的优化功率值.通过风电场功率预测技术,经优化计算,可以得到预测日各部分每个时段的优化功率值.为风电更大程度地参与电力系统调度提供了一个有效的方案.

#### 参考文献:

- [1] 雷亚洲,王伟胜,印永华,等.基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J].中国电机工程学报,2002,22(55):32-35.
- [2] 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.
- [3] KALDELLIS J K, KAVADIAS K A. Optimal wind-hydro solution for Aegean sea islands' electricity-demand fulfillment[J]. Applied Energy, 2001, 70(4): 333-354.
- [4] 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):80-83.
- [5] SCHAFFER J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms [D]. Nashville: Vanderbilt University, 1984.
- [6] FONSECA C M, FLEMING P J. Genetic algorithms for multi-objective optimization: formulation, discussion and generation [C]//Proceeding of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo: Morgan Kaufman, 1993: 416-423.
- [7] ZITZLER E, THIELE L. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [8] ZITZLER E, LAUMANN M, THIELE L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [R]. Zurich: Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Inst Technology (ETH), 2001.
- [9] 李恒杰.多目标克隆选择算法及其应用研究[D].兰州:兰州理工大学,2006.
- [10] 王晓兰,李辉.风电场输出功率年度预测中有效风速预测研究[J].中国电机工程学报,2010,30(8):117-222.