

Optimization of Short-Term Operation of Hydro-Photovoltaic Power System

Ding Hang, An Yuan, Wang Songkai, Wang Hao

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

Email address:

971742938@qq.com (Ding Hang), anyuan@xaut.edu.cn (An Yuan), 407097615@qq.com (Wang Songkai),

1214699177@qq.com (Wang Hao)

To cite this article:

Ding Hang, An Yuan, Wang Songkai, Wang Hao. Optimization of Short-Term Operation of Hydro-Photovoltaic Power System. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 6, 2016, pp. 374-379. doi: 10.11648/j.sd.20160406.15

Received: November 2, 2016; **Accepted:** November 22, 2016; **Published:** December 1, 2016

Abstract: Photovoltaic has characteristics of randomness, volatility and intermittent which are the restriction of ability of power grid to accept the clean energy. With the rapid development of photovoltaic power generation, to increase the ability of photovoltaic given is a big problem to be solved. Use of the joint of hydropower and photovoltaic power generation is a way to improve the ability that photovoltaic can be absorbed by the grid. The short-term operation model was built in this paper, and two objectives as the maximum peak load capacity and minimum offset of the load demand were built, and to solve the built model an improved simulated annealing based particle swarm optimization(SA-PSO) was adopted. Addressing the problem of multi-objective use crowded distance sorting, and using the method of external files for data maintenance. Finally, the result shows the complementary power system can obviously improve the load peak capacity.

Keywords: Hydro-Photovoltaic, Complementary, Short-Term Operation, Simulated Annealing Based PSO Algorithm, Multi-objective, Peak Load Capacity

水光互补的短期优化调度

丁航, 安源, 王颂凯, 王浩

水利水电学院, 西安理工大学, 西安, 中国

邮箱

971742938@qq.com (丁航), anyuan@xaut.edu.cn (安源), 407097615@qq.com (王颂凯), 1214699177@qq.com (王浩)

摘要: 光伏发电的随机性、波动性和间歇性限制了电网对光伏发电的接纳能力, 随着光伏发电的快速发展, 提高光伏的消纳能力是一个亟待解决的大问题。利用水电和光伏进行联合发电是一条提高光伏消纳能力新的途径。本文建立了短期的优化调度模型, 以调度期内调峰能力最大和互补系统的出力和负荷需求的偏差最小为目标函数, 采用模拟退火粒子群算法进行求解, 处理多目标问题时采用拥挤距离排序, 并采用外部档案的方法进行数据维护, 最终得出水光互补可以明显提高系统的调峰能力。

关键词: 水-光电, 互补, 短期调度, 模拟退火粒子群算法, 多目标, 调峰能力

1. 引言

近些年，人类对环境问题和资源枯竭关注日益增大，使得以光伏为代表的新能源发电得到了大规模的发展。截至2015年底，中国光伏发电累计装机容量4318万千瓦，成为全球光伏发电装机容量最大的国家[1]。但是，光伏具有“随机性、间歇性和波动性”的特点[2-4]。光伏发电的并网对电力系统的规划、安全、调度和控制等方面的影响也越来越大。虽然光伏的装机容量很大，但是并网消纳仍是一个有待解决的问题[5-6]。

水电是一种清洁可再生的能源，其出力具有快速调节的优良性能，在电力系统中常常担任调峰的任务[7]。利用水电出力的特点来平衡光伏出力的波动，可以为电网提供更多的优质电能。世界上第一座水光互补电站2009年在青海玉树建成[8]，到2015年全球最大的龙羊峡水光互补电站的建成[9]，水光互补已得到了全世界的广泛关注。

本文以龙羊峡水光互补一期工程为研究对象，建立短期内水光互补系统的调峰模型，采用模拟退火粒子群算法进行求解该模型。

2. 水光互补

水光互补是指水电和光伏联合运行，利用水电机组快速调节的优良特性以及水电站的库容调节光伏出力的“随机性、波动性和间歇性”，同时光伏可以在水电匮乏时给予联合系统电量上的支持。

水电和光伏在年际、年内、日内有很好的互补特性。

2.1. 年际、年内互补特性

水电的发电量取决于径流的多少，径流在年内和年际间相差悬殊，年际有丰水年和枯水年之分，年内有丰、枯水期。水电在丰水年发电多、枯水年发电少，冬春季发电量少、夏秋季发电量多。相对而言，太阳能年际间波动很小，光电的年发电量几乎是恒定值；光伏发电还具有冬春季发电量大、夏秋季发电量小的季节性特点。光伏在水电匮乏时可以为联合系统提供电量上的支撑，减少系统负荷的缺额，因此，水电和光伏发电在年际和年内都存在很好地互补关系。

2.2. 日内互补特性

光伏发电取决于环境条件，光伏出力呈现“间歇性、随机性和波动性”地特点。在一天之内，水电可以利用机组的快速调节性能来平抑光伏出力的“随机性和波动性”；光伏只在白天出力，在夜间的出力几乎为零，水电可以平衡光伏出力的“间歇性”[10]。因此，水电和光伏发电在日内也存在着很好的互补关系，如图1所示。

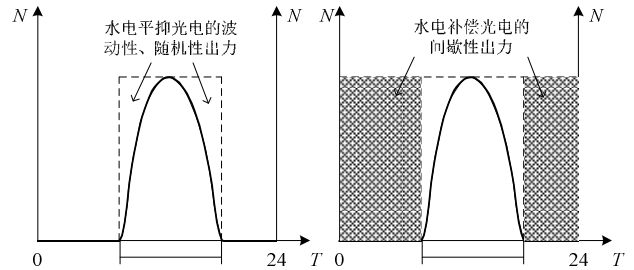


图1 水电与光电日内互补特性图。

3. 水光互补模型

水光互补的运行模式为以水电和光伏联合运行，以光伏出力为基荷，用水电来调节光伏出力，为了保证下游的用水，水电站在调度期内的出库流量恒定。在此模式下，建立水光互补调峰能力的模型，并考虑了各种约束条件。

3.1. 目标函数

1) 目标函数1: 调度期调峰能力最大

$$p_T = \max\{p_{W,m} + p_{P,m}\} \quad m \in [1, W] \quad (1)$$

式中 p_T 为水光互补出力的最大值； $p_{W,m}$ 和 $p_{P,m}$ 分别表示水电和光伏发电在第 m 时段的出力； W 为调度期时间段。

2) 目标函数2: 水光互补系统出力与负荷需求偏差最小

$$\min \frac{(p_{D,m} - p_{W,m} - p_{P,m})^2}{W} \quad m \in [1, W] \quad (2)$$

式中 $p_{D,m}$ 为第 m 时段负荷的需求。

3.2. 约束条件

3.2.1. 水电出力的约束

1) 水电出力

$$p_{W,m} = A Q_m H_m \quad (3)$$

式中 A 为水电站的出力系数； Q_m 和 H_m 为第 m 时段平均发电流量和水头高度。

2) 水电出力约束

$$p_{W,m,\min} \leq p_{W,m} \leq p_{W,m,\max} \quad (4)$$

式中 $p_{W,m,\max}$ 和 $p_{W,m,\min}$ 为第 m 时段水电出力的上下限。

3) 水电电量约束

$$\sum_{m=1}^W p_{W,m} \Delta t = C \quad (5)$$

式中 C 为调度期内水量约束下水电所发的电量。

3.2.2. 功率平衡约束

$$p_{W,m} + p_{P,m} \leq p_{D,m} \quad (6)$$

3.2.3. 其他约束

1) 水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t) \Delta t \quad (7)$$

式中 V_{t+1} , V_t 分别为水库在 $t+1$, t 时段的库容; I_t 为水库在 t 时段的入库流量; Q_t 为 t 时段出库流量; Δt 为计算时段长。

2) 库容约束:

$$V_{t,\min} \leq V_t \leq V_{t,\max} \quad (8)$$

式中 $V_{t,\min}$ 为水库在 t 时段所允许的库容下限;

$V_{t,\max}$ 为水库在 t 时段所允许的库容上限。

3) 水位约束:

$$Z_{t,\min} \leq Z_t \leq Z_{t,\max} \quad (9)$$

式中 $Z_{t,\min}$ 为水库在 t 时段所允许的水位下限;

$Z_{t,\max}$ 为水库在 t 时段所允许的水位上限。

4) 发电流量约束:

$$Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\max} \quad (10)$$

式中 $Q_{t,\min}$ 为水库在 t 时段所允许的下泄流量下限;

$Q_{t,\max}$ 为水库在 t 时段所允许的下泄流量上限。

4. 算法

利用智能算法求解多目标优化问题时, 常规方法是将多目标转化为单目标进行求解, 但各个目标之间的不可支配性决定了多个目标不能单纯的线性加权。本文将 Pareto 最优概念与模拟退火粒子群算法相结合, 通过 Pareto 最优机制选取个体最优与全局最优, 引导粒子的飞行方向, 并行地搜索多目标问题的最优解。

4.1. 模拟退火粒子群算法

退火粒子群算法基于对固体退火的热力学过程的模拟, 用冷却的进度表来控制算法的进程, 使算法在控制参数 T 慢慢降温并趋于零时最终求得组合优化问题的相对全局最优解。基于模拟退火粒子群算法是把模拟退火机制

引入到基本的粒子群算法中, 采用杂交粒子群算法中的杂交运算和带高斯变异的粒子群算法中的变异运算, 进一步调整优化群体[11]。算法步骤[12]为:

- 初始化微粒的位置与速度;
- 计算种群中每个微粒的目标函数值;
- 更新微粒的 p_{best} 和 g_{best} ;
- 更新微粒的位置和速度, 生成下一代微粒;

$$v_{i,j}(k+1) = \omega v_{i,j}(k) + c r_1 (p_{i,j} - x_{i,j}(k)) + c_2 r_1 (p_{g,j} - x_{i,j}(k)) \quad (11)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) \quad (12)$$

式中 ω 为惯性权重; c_1 , c_2 为学习因子; r_1 , r_2 为 $(0 \sim 1)$ 的随机数; $p_{i,j}$ 为第 i 个微粒第 j 维的最优解; $p_{g,j}$ 为种群第 j 维的全局最优解; $v_{i,j}(k)$ 为第 k 迭代时第 i 个微粒第 j 维速度; $x_{i,j}(k)$ 为第 k 迭代时第 i 个微粒第 j 维位置。

ω 为惯性权重, 随迭代次数变化公式为

$$\omega = \omega_{\max} - t(\omega_{\max} - \omega_{\min}) / k_{\max} \quad (13)$$

式中 ω_{\max} , ω_{\min} 分别为惯性权重的最大值和最小值; k_{\max} 为最大迭代次数。

- 5) 对产生的新微粒按交叉概率 p_c 进行交叉运算, 运用模拟退火思想来接受交叉后的后代, 公式为

$$\min\{1, e^{-(f(x'_i) - f(x_i)) / T}\} > r_{and} \quad (14)$$

$$\min\{1, e^{-(f(x'_i) - f(x_i)) / T}\} > r_{and} \quad (15)$$

式中 $f(x_i)$ 、 $f(x'_i)$ 为微粒交叉前的适应度函数值; $f(x'_i)$ 、 $f(x_i)$ 为微粒交叉后的适应度函数值; r_{and} 为 $(0 \sim 1)$ 的随机数。满足式 (14) (15) 的新微粒将被接受, 替换原来的微粒。

- 6) 对交叉后的微粒按变异概率 p_b 再进行变异运算, 接受后代的公式同交叉运算。

- 7) 退火操作, 其公式为

$$T(k+1) = cT(k) \quad (16)$$

式中 $T(k)$ 为第 k 迭代时的退火温度; c 为冷却系数。

若迭代次数未达到设定值跳转到步骤2) 重复上述过程; 若迭代次数达到设定值, 则输出结果。

4.2. 多目标算法处理

该模型有两个目标函数，本文采用快速非支配解排序，并用外部档案对数据进行维护。通过Pareto最优的机制来选取粒子个体最优和全局最优，引导粒子飞行的方向，并行的搜索多目标问题的最优解，从而求得多目标问题的非支配解集。

1) 基于Pareto最优的快速非支配解排序

Pareto最优的非支配排序是结合Pareto最优思想与各种排序的技术，不断地进行循环排序，舍弃被支配的个体，保留非支配的个体，最终得到非支配解集。为了提高排序算法的效率，目前多采用将Pareto最优概念与最高效的快速排序算法相结合的方法。此类快速排序算法主要是将搜索范围划分为受支配和不受支配的两部分，淘汰受支配部分，然后继续划分受支配部分，直至划分完毕，最后保留不受支配的部分作为多目标寻优的非劣解集。但是，该算法每次只能得到一个非支配解，若非支配解在待排序中所占的比例比较大，容易产生“慢速链”的问题。

为了解决“慢速链”的问题，本文进行了改进，在原算法的基础上再增加了一个非支配解，这样每次排序会有两个非支配解，从而大大减小了选取非支配解的比较次数，提高了算法的整体效率。

2) 外部档案维护

对多目标优化问题的外部档案集的维护主要通过个体粒子的拥挤距离排序来实现的。当非支配解总个数大于外部档案集的大小时，首先应淘汰拥挤距离小，即拥挤度大的粒子，从而达到满足算法在可行域内可以均匀的搜索。非支配解的拥挤度用拥挤距离来描述：将外部档案中的所有非支配解的每个目标函数值从小到大进行排序，非支配解*i*的拥挤距离为该粒子全部目标函数所对应的前后相邻的粒子的目标函数之差的总和。

$$crowdist_i = \sum_{j=1}^m (f_{(i+1)j} - f_{(i-1)j}) \quad (17)$$

式中*m*为目标函数的总数， $f_{(i+1)j}$ 、 $f_{(i-1)j}$ 为第*i*+1、*i*-1个粒子所对应第*j*个目标函数值， $crowdist_i$ 表示粒子*i*($2 \leq i \leq m-1$)的拥挤距离。为了保证边界粒子被无条件带入下一代，设定第一个粒子和最后一个粒子的拥挤距离为无穷大。

将上述公式拓展到与某个体粒子相邻2*k*个粒子的拥挤距离情况，定义粒子*i*的拥挤距离计算公式为，

$$crowdist_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^k (f_{(i+h)j} - f_{(i-h)j}) \quad (18)$$

将外部档案集中的所有非支配解按照粒子的拥挤距离从大到小排序，只保留外部档案集大小数量的非支配解。

3) 个体最优与全局最优的选取

必须解决多目标问题的个体最优和全局最优的选取的问题，同单目标算法一样，多目标算法在选取粒子的个

体最优时是将粒子当前位置与历史最优进行比较，选取一个非支配解作为粒子个体最优解。不同的是多目标算法中粒子的当前位置与历史最优解可能不存在支配关系，在此情况下，本文采用50%概率随机在粒子个体历史最优和当前位置选择出一个作为粒子新的最优解。

多目标算法的全局最优和单目标的全局最优的选取存在很大的不同。多目标算法在每次迭代的过程中会产生一组新的非支配解集，并且非支配解集中的粒子相互不受支配，因此，非支配解集中的任何一个粒子都有可能成为种群的全局最优解。为了保证粒子在迭代过程中的多样性，本文为每个粒子选取不同的种群全局最优位置，确保粒子在多个可行域搜索，为了在搜索过程中得到均匀的Pareto最优前沿，鼓励粒子向拥挤度小的区域搜索。将非支配解集中的粒子按拥挤度从大到小排序，在经过排序的非支配解集中的前10%随机选取一个非支配解作为每个待更新的粒子的种群全局最优位置。这样粒子可以向拥挤度小的非支配解方向进行优化，从而有利于多目标算法均匀地逼近Pareto最优前沿。

整体算法的流程图如图2所示。

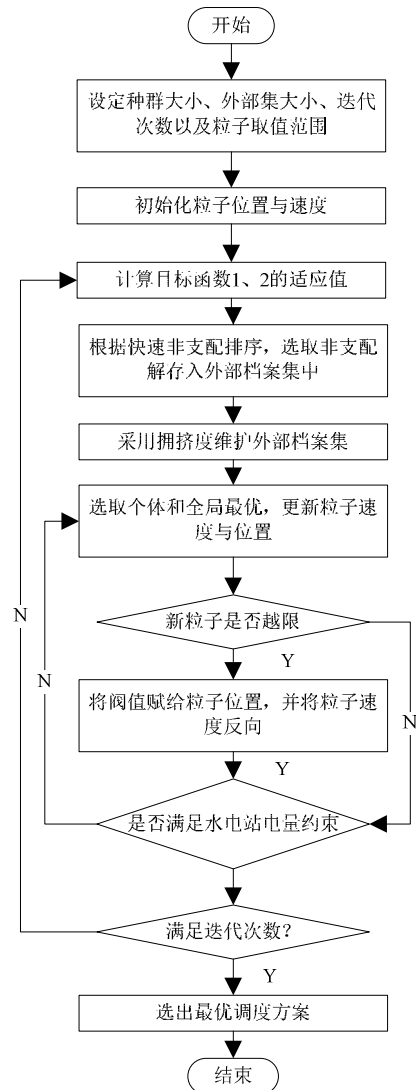


图2 优化调度模型求解流程图。

5. 算例分析

5.1. 算例描述

以龙羊峡水光互补一期工程为对象进行仿真计算，其中光伏容量为320MWp，水电站有4台单机容量为320MW的水轮发电机。本算例调度时长为24h，时间间隔为1h。

根据光伏电站的实际出力，选取了光伏的三种典型出力，其出力的数据如表1所示。

表1 光伏三种典型出力表。

时间/h	晴天典型出力/MW	阴天典型出力/MW	雨天典型出力/MW
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	2	0	0
8	31	11	6
9	97	61	14
10	169	139	20
11	192	106	50
12	258	147	40
13	274	193	41
14	277	249	38
15	266	223	27
16	226	163	38
17	176	128	35
18	79	98	16
19	38	32	8
20	9	9	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0

参数设置：种群规模为200，迭代次数为100，学习因子 c_1 、 c_2 都为2，惯性权重的最大值和最小值分别为0.9和0.4；交叉概率和变异概率分别为0.5和0.05，冷却系数取0.8，外部档案的规模为10。

5.2. 算例结果分析

据算法的最优结果如图3~5所示。

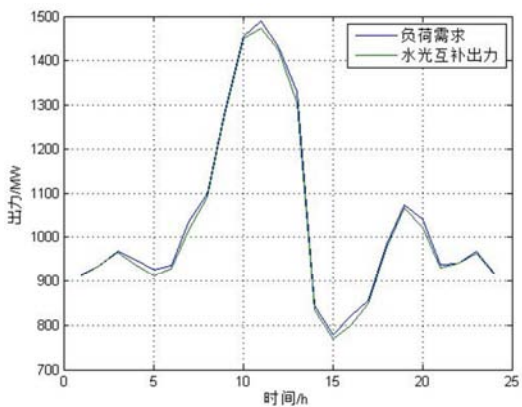


图3 晴天优化调度图。

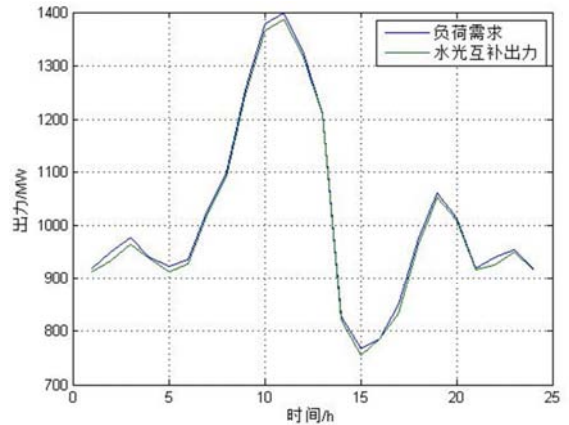


图4 阴天优化调度图。

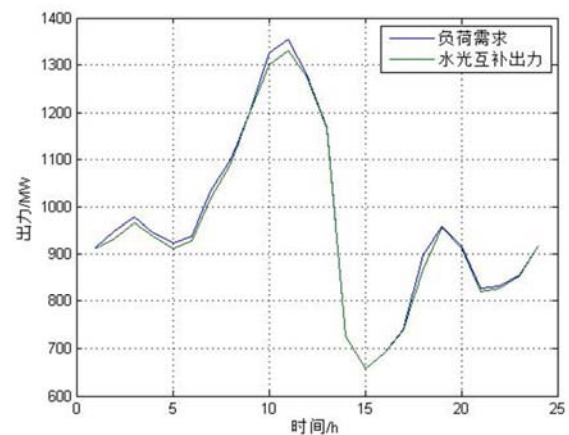


图5 雨天优化调度图。

根据图3~5可以水光互补系统在晴天、阴天和雨天出力分别为1472MW、1382MW、1344MW；最大的偏移和最小偏移为3%和0.1%。龙羊峡水电站装机容量为1280MW，理论上水电站最大的调峰能力也为1280MW。三种典型出力的情况下调峰能力相对未进行水光互补分别提高了15%、8%和5%。

由此可见，水光互补比水电和光伏单独运行性的调峰能力得到了很大的提高，即使是恶劣的天气条件下也可以提高5%。同时，水光互补系统的出力曲线能很好地跟随负荷需求的曲线，最大偏移仅为3%。综上所述，本文所用的算法具有很好的效果。

6. 结论

水光互补是大规模光伏并网的一条新的方式，本文通过建模和算例分析得出了以下结论：

1. 光伏出力受限于天气条件，三种天气情况下，互补系统的调峰能力最大能提高15%，即使最恶劣的情况也能提高5%。因此，短期水光互补与水电站单独运行可以明显提高调峰能力，平均能提高9%；
2. 本文采用模拟退火粒子群算法，文中有两个目标函数，在处理多目标问题时，采用了Pareto最优的方法，并用拥挤距离排序对外部档案的方法对数据进行维护。最终达到了一个很好地效果，互补系统出

力能很好的跟随负荷需求曲线,且在负荷高峰期能有更多的调峰容量。

致谢

本文是在安源副教授的悉心指导下完成的,在此特别感谢。另外也感谢国家自然科学基金(No. 51190093)对本文研究给予的大力支持。

参考文献

- [1] 2015年中国光伏发电总装机容量全球居首[EB/OL]. <http://solar.ofweek.com/2016-02/ART-260009-8420-29064342.html>。
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,宋云亭,陈得治,孙鸣. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 01:1-14。
- [3] 赵杰. 光伏发电并网系统的相关技术研究[D]. 天津大学, 2012。
- [4] 刘东冉,陈树勇,马敏,王皓怀,侯俊贤,马世英. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 08:47-52。
- [5] 胡泊,辛颂旭,白建华,张运洲. 我国太阳能发电开发及消纳相关问题研究[J]. 中国电力, 2013, 01:1-6。
- [6] 钱梓锋,李庚银,等. 龙羊峡水光互补的日优化调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 04:69-74。
- [7] 静铁岩,吕泉,郭琳,李卫东. 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, 22:97-104。
- [8] 汪洋. 水光互补模式推广应用的分析[J]. 资源节约与环保, 2015, 03:113。
- [9] 张娉,杨婷. 龙羊峡水光互补运行机制的研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 03:76-81。
- [10] 安源,方伟,等. 水-光电互补协调运行的理论与方法初探[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8)。
- [11] 余胜威. MATLAB优化算法案例分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2014。
- [12] 吴杰康,熊焰. 风、水、气互补发电模型的建立及求解[J]. 电网技术, 2014, 38(3)。