

# 罚函数改进粒子群算法的风光储系统优化配置

贾彦<sup>1,2</sup>, 李文雄<sup>1,2</sup>, 赵萌<sup>1,2</sup>, 张驰<sup>1,2</sup>, 汪尧<sup>1,2</sup>, 谭建峰<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 风能太阳能利用技术省部共建教育部实验室, 呼和浩特 010051)

**摘 要:** 考虑风光储系统中风光资源、储能和负载之间复杂的匹配关系, 建立以年度平均发电成本(AAGC)为优化目标, 以全年负载缺电率(LPSP)为约束条件的优化模型。采用改进的粒子群算法(IPSO), 并加入罚函数将非线性约束条件转化为一组无约束问题。在考虑各组件数量作为决策变量的基础上, 增加风力机塔架高度以及光伏板倾角用以提高优化过程的全面性。通过对算例的计算, 对比分析各组件最优配置结果和多目标遗传算法结果, 证明算法的有效性和优越性。

**关键词:** 互补系统; 粒子群算法; 优化; 全年负载缺电率; 年度平均发电成本

**中图分类号:** TK01.9

**文献标识码:** A

## 0 引 言

太阳能和风能具有可永续利用、资源丰富的优点, 但也存在一定缺点, 即周期性和时变性, 随季节、昼夜不断波动, 且不能按照需求进行控制<sup>[1]</sup>。考虑到风能和太阳能 2 种可再生能源在昼夜、季节上具有较强的互补性, 综合利用风能和太阳能, 建立风光储供电系统能取长补短, 为居民分散、交通不便以及电网不能覆盖地区的分布式能源建设提供稳定可靠的选择<sup>[2,3]</sup>。

目前已有研究人员对风光储系统进行优化设计, 当前风光储供电系统设计的主流方法是运用遗传算法对一次成本进行优化<sup>[4-7]</sup>。然而, 传统的遗传算法仅把成本作为唯一目标, 对于风光储供电系统的优化配置而言, 系统成本与负载缺电率等都是需要考虑的重要问题, 采用简单约束很难体现风光储之间的复杂关系<sup>[8]</sup>。有学者为克服单目标算法的这一劣势, 选择改进的多目标算法对风光储供电系统进行优化配置<sup>[9]</sup>, 多目标算法有很多组解, 需进行后续处理和分析, 这给结果的运用和分析带来较大困难。

针对上述问题, 本文引入罚函数改进粒子群算法, 在给定负载状况和长期气象统计数据的情况下, 对风力机额定功率、光伏板数量、蓄电池数量、

风力机塔架高度以及光伏板倾斜角度进行优化配置。

## 1 风光储供电系统的数学模型

风光储供电系统主要由发电单元、储能单元、负载 3 部分组成<sup>[10]</sup>。发电单元主要指光伏板与风力机。发电单元供电不足时蓄电池会充当暂时电源供给负荷。欲对风光储系统进行容量配置, 须先对系统各发电单元以及储能单元进行建模分析<sup>[11]</sup>。

### 1.1 风力发电系统建模分析

决定风力发电系统输出的因素主要有 3 个: 风力机的功率曲线、风力机安装位置的风速分布以及风力机安装高度。

风力输出功率的最简化模型为:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_c, v \geq v_f \\ P_N \frac{v^3 - v_c^3}{v_n^3 - v_c^3} & v_c \leq v \leq v_n \\ P_N & v_n \leq v \leq v_f \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_N$  ——风力机的额定功率, W;  $v_c$ 、 $v_n$ 、 $v_f$  ——风力机的切入、额定、切出风速, m/s。

一般而言, 用幂函数法来模拟风速在平坦地形(如田地、沙漠、草原等)垂直分布的性质, 其基本形式如式(2):

收稿日期: 2018-09-27

基金项目: 内蒙古自治区科技厅科技计划(201601064); 内蒙古自治区自然科学基金(2018LH1011)

通信作者: 赵 萌(1986—), 女, 博士、硕士生导师, 主要从事新能源开发利用方面的研究。mzhao\_imut@163.com

$$\frac{v}{v_r} = \left( \frac{H_{WT}}{H_r} \right)^\zeta \quad (2)$$

式中,  $v$  —— 风力机安装高度  $H_{WT}$  处的风速, m/s;  $v_r$  —— 参考高度  $H_r$  下测量的风速, m/s;  $\zeta$  —— 风速能量定律系数, 随海拔、时间、季节、地形的性质、风速、温度以及各种热力学和机械混合参数等参数的变化而变化, 本文取在平坦地形下的参考值 1/7。

## 1.2 PV 系统建模分析

### 1.2.1 任意倾斜面上光伏板吸收的太阳辐射

PV 系统的输出和光伏板接收的太阳能直接相关, 而大多数天文台仅监测水平面上的太阳辐射数据, 因此需计算任意倾斜面上光伏板吸收的太阳辐射。由于地球以赤道为轴进行自转, 我国处于北半球, 光伏板的方位角为正南时接收太阳辐射最大, 所以本文假设光伏板面南放置, 只计算任意倾斜面上的太阳辐射, 不同时刻倾斜面上的太阳辐射计算公式为:

$$R_\theta = S \times [\sin(h + \theta) / \sin h] + D \quad (3)$$

$$\sin h = \sin \varphi \sin \sigma + \cos \varphi \cos \sigma \cos \omega \quad (4)$$

$$\sin \sigma = 0.39795 \cos[0.98563(N - 173)] \quad (5)$$

$$\omega = 15 \times (ST - 12) \quad (6)$$

式中,  $R_\theta$  —— 倾斜面上的太阳能总辐射量,  $\text{W/m}^2$ ;  $S$  —— 水平面上的太阳直接辐射量,  $\text{W/m}^2$ ;  $h$  —— 太阳高度角, 它随时间不断变化, 需利用各参数对同时刻下的太阳高度角进行确认;  $\theta$  —— 倾斜面的倾角, ( $^\circ$ );  $D$  —— 散射辐射量,  $\text{W/m}^2$ ;  $\varphi$  —— 当地纬度,  $^\circ\text{N}$ ;  $\sigma$  —— 太阳赤纬, ( $^\circ$ );  $\omega$  —— 太阳时角, ( $^\circ$ );  $N$  —— 按天数顺序排列的积日;  $ST$  —— 真太阳时, 以 24 h 为周期。

### 1.2.2 光伏板输出功率建模

光伏板功率输出与很多因素有关, 本文定义电池开路状态:  $I=0$ ,  $V=V_{oc}$ ; 最大功率点:  $V=V_m$ ,  $I=I_m$ 。具体计算公式为:

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

$$C_1 = 1 - \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left( - \frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right) \quad (8)$$

$$C_2 = \left( \frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

该模型需输入短路电流  $I_{sc}$ 、开路电压  $V_{oc}$ 、最大功率点电流  $I_m$ 、最大功率点电压  $V_m$ , 而这 4 个参数会随太阳辐射量或温度的变化而变化, 其修正方法为:

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_0 \\ \Delta G = \frac{G}{G_0} - 1 \\ I'_{sc} = \frac{I_{sc} G}{G_0} (1 + a \Delta T) \\ V'_{oc} = V_{oc} (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta G) \\ I'_m = \frac{I_m G}{G_0} (1 + a \Delta T) \\ V'_m = V_m (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta G) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $I'_{sc}$ 、 $V'_{oc}$ 、 $I'_m$ 、 $V'_m$  —— 不同环境下的修正值;  $T$ 、 $T_0$  —— 光伏板温度和标准电池温度, 取  $25^\circ\text{C}$ ;  $G$ 、 $G_0$  —— 太阳辐射量和标准太阳辐射, 取  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  —— 相关性系数, 典型值取  $a = 0.0025/^\circ\text{C}$ 、 $b = 0.5$ 、 $c = 0.00288/^\circ\text{C}$ 。

## 1.3 蓄电池状态模型

蓄电池组在风光储供电系统中除起改善电能质量的作用外, 更大的用途是改善电量的供需平衡, 其容量由蓄电池的剩余电能和充放电状态确定。

蓄电池组处于充电状态的条件是:

$$\begin{cases} [W_{WT}(t) + W_{PV}(t)] \times \eta_{inv} - E_L(t) > 0 \\ E_B(t-1) < E_{Bmax} \end{cases} \quad (11)$$

蓄电池组充电运行的状态为:

$$\begin{cases} E_B(t) = E_B(t-1) \times (1 - \delta) + \{ [W_{WT}(t) + W_{PV}(t)] \times \eta_{inv} - E_L(t) \} \times \eta_{Bc} & E_B(t) < E_{Bmax} \\ E_B(t) = E_{Bmax} & E_B(t) \geq E_{Bmax} \end{cases} \quad (12)$$

蓄电池组处于放电状态的条件是:

$$\begin{cases} [W_{WT}(t) + W_{PV}(t)] \times \eta_{inv} - E_L(t) < 0 \\ E_B(t-1) > E_{Bmin} \end{cases} \quad (13)$$

蓄电池组放电运行的状态为:

$$\begin{cases} E_B(t) = E_B(t-1) \times (1 - \delta) + \{ [W_{WT}(t) + W_{PV}(t)] \times \eta_{inv} - E_L(t) \} \times \eta_{Dc} & E_B(t) > E_{Bmin} \\ E_B(t) = E_{Bmin} & E_B(t) \leq E_{Bmin} \end{cases} \quad (14)$$

蓄电池组处于静止状态的条件是:

$$[W_{WT}(t) + W_{PV}(t)] \times \eta_{inv} - E_L(t) = 0 \quad (15)$$

蓄电池组电量静止状态的变化:

$$E_B(t) = E_B(t-1) \quad (16)$$

式中,  $W_{WT}(t)$ 、 $W_{PV}(t)$ 、 $E_L(t)$ ——风力机、光伏板产生的电能以及负载需求的电能, 单位转化为  $W \cdot h$ ;  $\eta_{inv}$ 、 $\eta_{Bc}$ 、 $\eta_{Dc}$ ——逆变器效率和蓄电池的充、放电效率。

## 2 供电系统优化的目标与约束分析

为了经济有效地利用可再生能源, 系统优化在保证充分利用太阳能、风能和蓄电池的同时, 以投资成本低、投资和产能可靠性要求最高为目标进行优化。本文基于对全年负载缺电率 LPSP (loss of power supply probability) 和年度平均发电成本 AAGC (annual average generation cost) 的选择与优化, 通过控制 LPSP 值对 AAGC 进行最优值的优化, 在相关计算的简化条件下, 实现全局优化。

### 2.1 基于 LPSP 的系统可靠性模型

负载缺电率是反映风光储供电系统供电可靠性的指标, 定义为系统停电时间与供电时间的比值<sup>[12]</sup>。考虑到蓄电池对能量的积累, 为了准确展现系统运行的情况, 用时序法表征负载缺电率。LPSP 按时间从 0 到  $T$  可表示为:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=0}^T Time(P_{available}(t) < P_{needed}(t))}{T_{hours}} \quad (17)$$

式中,  $T_{hours}$ ——输入的逐时气象数据小时数;  $Time(P_{available}(t) < P_{needed}(t))$ ——负载缺电时间, 指当风力机和光伏板产生的电量不足, 且蓄电池电量已耗尽时, 不能满足负荷用电需求的时间。

### 2.2 基于 AAGC 的系统经济性模型

系统全寿命周期经济性的评估是风光储供电系统在其寿命运行周期内的总成本费用, 包括系统初期设备购买费用、重置费用、设备的维护成本。对于经济性的研究, 采用年度平均发电成本 (AAGC) 的概念作为系统经济性分析的基石, 这个概念是在年度平均成本的基础上除以系统的全年输出功率, 增强各组件成本与输出功率的相关性。在系统生命周期评估中, 考虑光伏板、风力机、蓄电池组以及风力机塔架 4 个部件。计算过程实际为系统整个寿命周期内所有资金投入的现值折合到每年的费用和系统年输出功率的比值。

$$AAGC = \frac{C_{acap} + C_{arep} + C_{amain}}{P_{out}} \quad (18)$$

$$C_{acap} = C_{cap} \times \frac{i \cdot (1+i)^{Y_{proj}}}{(1+i)^{Y_{proj}} - 1} \quad (19)$$

$$C_{arep} = C_{rap} \times \frac{i}{(1+i)^{Y_{rep}} - 1} \quad (20)$$

$$C_{amain} = C_{main}(1) \times \left[ \sum_{n=1}^{Y_{sys}} (1+f)^n \right] / 25 \quad (21)$$

式中,  $C_{acap}$ ——各组件的初始投资;  $C_{arep}$ ——各组件的年度重置费用, 因为整个系统中只有蓄电池需要更换, 所以计算过程中只考虑蓄电池组的年度重置费用;  $C_{amain}$ ——年度维修费用;  $P_{out}$ ——系统全年的输出功率;  $Y_{sys}$ 、 $Y_{proj}$ ——系统的使用寿命和各组件的寿命;  $Y_{rep}$ ——蓄电池的使用寿命;  $i$ ——用于计算资金现值的利率值;  $C_{main}(1)$ ——各组件第 1 年维修费用;  $f$ ——通货膨胀率。

综上所述, 基于经济性原则, 最小年度平均发电成本 (AAGC) 对应的系统配置为保证电力可靠性的最佳配置。

### 2.3 约束条件

系统配置的初始假设基于以下约束条件:

$$\min(P_{WT}, N_{PV}, N_{bat}) \geq 0 \quad (22)$$

$$H_{low} \leq H_{WT} \leq H_{high} \quad (23)$$

$$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \quad (24)$$

$$LPSP = 0 \quad (25)$$

加入 LPSP 值为零作为非线性等式约束, 保证系统的可靠性, 其中风力机的安装高度最小值由厂家给出, 最大值取  $v_{Hmax} \leq v_{safe}$ , 即安装高度处全年最高风速不大于风力机安全风速。

## 3 算法及优化模型

### 3.1 罚函数粒子群算法的分析

传统 PSO 算法中, 加速因子  $c_1$ 、 $c_2$  和惯性因子  $\omega$  通过影响粒子向个体最优位置、全局最优位置移动的速度以及对粒子速度的继承能力会对算法的迭代过程产生较大影响<sup>[13]</sup>。在风光储供电系统优化问题中, 为了避免粒子群算法寻优过程速度较慢的问题, 提高罚函数更新过程与 PSO 算法更新过程的结合程度, 本文选用一种改进的粒子群

优化算法(IPSO)。

在传统 PSO 算法的基础上,引入粒子随机衰减因子  $\alpha$ 、收敛速度  $\beta$  和  $\gamma$  参数并在初期对其赋予初值<sup>[14]</sup>。其中粒子随机衰减因子  $\alpha$  随迭代次数而改变;收敛速度  $\beta$  可表征算法收敛速度的快慢,呈正相关;  $\gamma$  为  $\alpha$  的迭代更新表达式中的常量,且  $\alpha$  的迭代更可表示为:

$$\alpha^{m+1} = \alpha^m \cdot \gamma, \alpha \in [0, 1] \quad (26)$$

即下一次迭代过程的  $\alpha$  参数数值为本次迭代过程  $\alpha$  的  $\gamma$  倍。

本文使用改进粒子群算法计算目标函数的同时,将约束函数组成一个惩罚项,加在原来的目标函数上迫使迭代点逼近可行域。罚函数用公式解释为<sup>[15]</sup>:

$$F(x, M) = f(x) + Mp(x) \quad (27)$$

式中,  $f(x)$  ——目标函数;  $Mp(x)$  ——惩罚项。

当罚因子  $M$  足够大时,  $F(x, M)$  的最优解逼近约束问题的最优解。加入罚函数的 IPSO 算法的具体流程如图 1 所示。

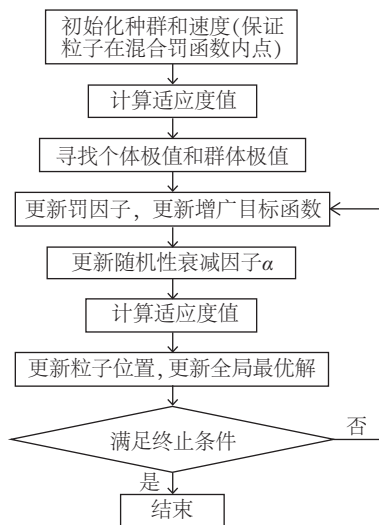


图1 罚函数改进粒子群算法流程图

Fig. 1 Penalty function particle swarm algorithm flow chart

本文针对风光储供电系统的罚函数 IPSO 基本参数设置如表 1 所示。

表1 基本参数设置

Table 1 Basic parameter setting

种群大小	迭代次数	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$M$
100	150	0.95	0.2	0.2	$10^{10}$

### 3.2 算例仿真

依据以上模型分析,选用科左中旗典型气象年的风光资源参数作为算例,采用当地 10 m 高度处测量逐时风速(如图 2 所示)、水平面上的辐照强度(如图 3 所示)等数据,同时配置符合当地用户使用状况的用户负载(如图 4 所示),在配置负载时,以每日负载用电量为基础,为每小时加上 0~10 W 的随机用电量,用以加强负载用电的波动性。

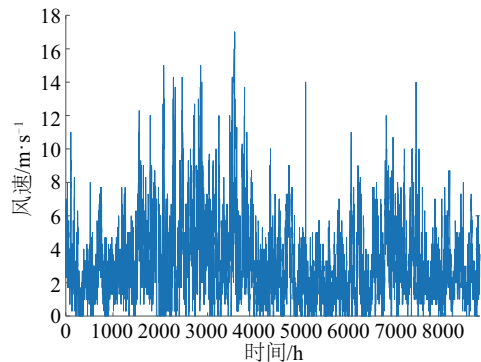


图2 10 m高度处测量逐时风速

Fig. 2 Measuring hourly wind speed at a height of 10 meters

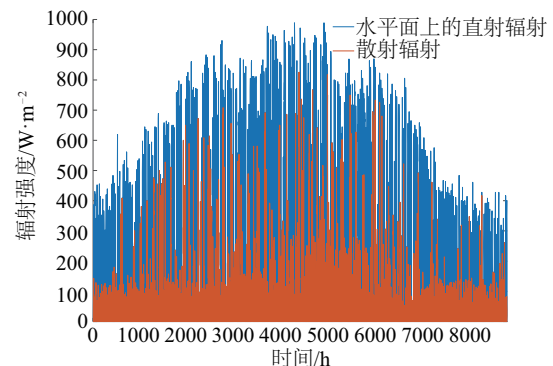


图3 水平面上的辐照强度

Fig. 3 Radiation intensity on a horizontal plane

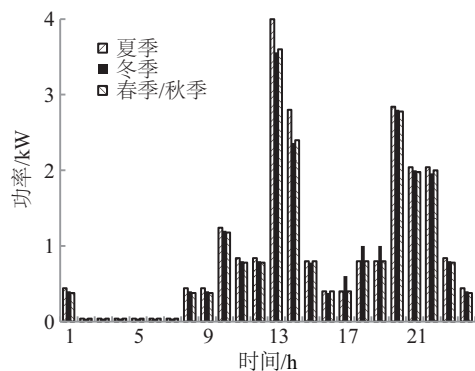


图4 日负载用电量

Fig. 4 Daily load power consumption



风力机选用 FD 系列风力发电机,该系列在 5~10 kW 范围内,拥有基本相同的切入切出风速以及额定风速;光伏板选用 DM60-270 型光伏板,蓄电池选用 12 V-240 Ah 铅酸蓄电池;风电机组塔架的高度,对于风电机组整机的载荷、寿命有直接影响,本文假设风力机在厂家设定的安全高度范围内安装,只考虑风力机塔架的安装费用。各组件经济性参数如表 2 所示。

表 2 各组件的经济性参数

Table 2 Economic parameters of each component

各组件名称	$C_{\text{acap}}$	$C_{\text{main}}(1)/\%$	$Y_{\text{proj}}/\text{a}$
风力机	8 ¥/W	3	25
光伏板	7 ¥/W	1	25
蓄电池	6 ¥/A·h	1	3
风力机塔架	300 ¥/m	0.1	25

从迭代过程适应度曲线(图 5)中可看出,计算过程收敛较快,在 20 步时完全收敛,优化结果(表 3)

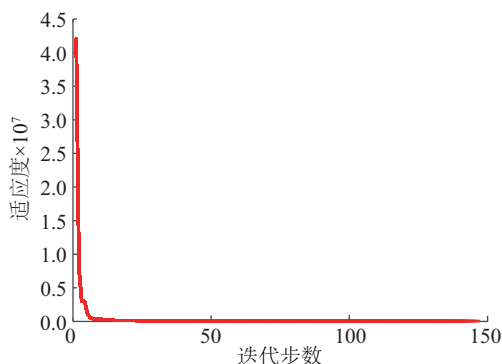


图 5 迭代过程适应度曲线

Fig. 5 Iterative process fitness curve

表 3 罚函数改进粒子群算法和多目标遗传算法优化结果

Table 3 Particle swarm optimization algorithm and multi-objective genetic algorithm optimization results

参数	罚函数改进粒子群算法	多目标遗传算法
风力机功率/W	8000	8000
光伏板数量/组	36	34
蓄电池数量/组	20	25
风力机塔架高度/m	10.0	8.5
光伏板倾角/(°)	27	10
初始投资费用/¥	386320	403330

与实际工况相符,因此对于风光储供电系统的优化配置这类有复杂约束条件的优化分析,罚函数改进粒子群算法具有较好的适应性。

### 3.3 算例验证

为验证优化的有效性,本文利用多目标遗传算法对相同数据的风光储供电系统进行优化,取其中  $LPSP=0$  的优化结果进行对比,优化结果如表 3 所示。

2 种算法的计算结果相近,且罚函数改进粒子群算法计算结果的初始投资费用更低。本文通过进一步计算得到系统功率输出的逐小时值,并绘制系统输出与负载需求的差值的散点图(图 6)。从图 6 可看出,全年每个小时功率的差值均大于零,且 2 种算法的散点位置相近。很多学者已经验证了多目标遗传算法优化风光储供电系统容量的有效性,因此本文结果证明罚函数 IPSO 针对风光储供电系统优化配置也是有效的,且优化结果精度更高。

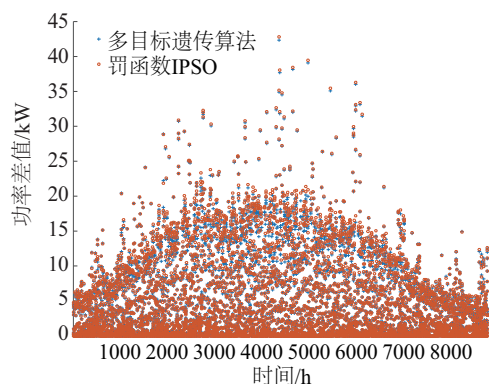


图 6 系统输出与负载需求的差值散点图

Fig. 6 Scatter plot of system output and load demand

为进一步验证罚函数在 IPSO 算法中约束的有效性,本文选取每月日平均功率输出较低或较高的月份,取该月系统输出和负载功率差值最小的一天,绘制系统输出与负载功率对比曲线,如图 7 所示。可看出,系统输出功率始终大于或等于负载的功率,证明系统供电始终满足负载要求,从而可证明罚函数对 IPSO 算法约束的有效性。

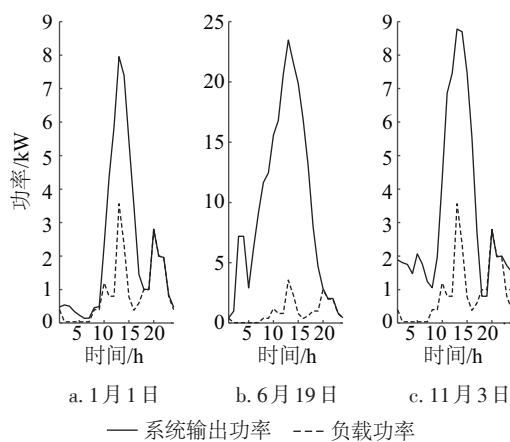


图7 系统输出与负载功率对比曲线

Fig. 7 System output and load power comparison curve

## 4 结 论

本文采用改进粒子群算法,在加入罚函数后,该算法能保证较快的收敛速度,且优化结果精度较高。建立以年度平均发电成本(AAGC)为目标函数,以全年负载缺电率(LPSP)为复杂约束条件的优化模型,得出与当地风光资源相匹配的风力机功率、光伏板数量、蓄电池数量以及风力机塔架高度和光伏板倾斜角度。通过对算例的求解以及与多目标遗传算法结果的对比,证明通过罚函数将全年负载缺电率(LPSP)转变为无约束问题在风光储供电系统的优化配置这种有复杂约束条件的优化分析中,具有较好的适应性。

### [参考文献]

- [1] 张 露. 基于输出功率变化的风光储发电系统能量分配策略的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2013.
- [1] Zhang Lu. Research on control strategy of complementary of wind power and photovoltaic power generation system based on output power changes[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2013.
- [2] Ma Tao, Yang Hongxing, Lu Lin. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island[J]. Applied Energy, 2014, 121(10): 149—158.
- [3] 郭创新, 张 理, 张金江, 等. 风光互补综合发电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 102—108.
- [3] Guo Chuangxin, Zhang Li, Zhang Jinjiang, et al. Reliability analysis of wind and photovoltaic integrated generating system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 102—108.
- [4] Sopian K, Zaharim A, Ali Y, et al. Optimal operational strategy for hybrid renewable energy system using genetic algorithms[J]. WSEAS Transactions on Mathematics, 2008, 7(4): 130—140.
- [5] 胡林静, 赵 洋. 独立风光互补供电系统容量优化设计[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(s1): 386—389.
- [5] Hu Linjing, Zhao Yang. Capacity optimization design of independent wind and solar power system[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(s1): 386—389.
- [6] 欧嘉文, 许又丹, 吴薛伟, 等. 风光蓄互补发电系统电源容量优化配置[J]. 中国科技纵横, 2014, (11): 88—90.
- [6] Ou Jiawen, Xu Youdan, Wu Xuewei, et al. Optimal configuration for power supply capacity for wind-solar-battery and complementary power generation system[J]. China Science & Technology Overview, 2014, (11): 88—90.
- [7] 刘艳平, 贾春娟. 基于遗传算法的独立型风光互补发电容量优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 69—74.
- [7] Liu Yanping, Jia Chunjuan. Capacity optimization of independent wind/PV hybrid power generation system based on GA[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 69—74.
- [8] 宋洪磊, 吴俊勇, 冀鲁豫, 等. 风光互补独立供电系统的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 104—111.
- [8] Song Honglei, Wu Junyong, Ji Luyu, et al. Multi-objective optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 104—111.
- [9] 齐志远, 郭佳伟, 李晓扬. 基于联合概率分布的风光互补发电系统优化配置[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 203—209.
- [9] Qi Zhiyuan, Guo Jiawei, Li Xiaoyang. Optimal configuration for wind power and solar power hybrid systems based on joint probability distribution of wind speed with solar irradiance[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(1): 203—209.
- [10] Deshmukh M K, Deshmukh S S. Modeling of hybrid renewable energy systems[J]. Renewable & Sustainable

- Energy Reviews, 2008, 12(1): 235—249.
- [11] 沈利生. 小型风光互补发电系统的建模与仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [11] Shen Lisheng. Research on modeling and simulation of small wind and solar complementary power generation system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [12] 杨洪兴, 吕琳. 太阳能-风能互补发电技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 77—80.
- [12] Yang Hongxing, Lyu Lin. Application of hybrid solar-wind power generation technologies[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015: 77—80.
- [13] 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: 175—179.
- [13] Yu Shengwei. Case analysis and application of MATLAB optimization algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 175—179.
- [14] 李奇, 孟翔, 陈维荣, 等. 燃料电池混合动力系统参数匹配与多目标优化[J]. 西南交通大学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20180711.0843.004.html>.
- [14] Li Qi, Meng Xiang, Chen Weirong, et al. Parameter matching and multi-objective optimization of fuel cell hybrid system [EB/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20180711.0843.004.html>.
- [15] 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用(进阶篇)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 298—300
- [15] Yu Shengwei. Case analysis and application of MATLAB optimization algorithm (Advanced article) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 298—300.

## OPTIMAL CONFIGURATION FOR SOLAR-WIND-BATTERY HYBRID POWER SYSTEM BASED ON PENALTY FUNCTION IMPROVED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Jia Yan<sup>1,2</sup>, Li Wenxiong<sup>1,2</sup>, Zhao Meng<sup>1,2</sup>, Zhang Chi<sup>1,2</sup>, Wang Yao<sup>1,2</sup>, Tan Jianfeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Technology, Ministry of Education, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** In order to balance the complex matching relationship among the wind/solar resources, the energy storage devices and the load devices in a solar-wind-battery hybrid power system, an optimization model is established in the paper by defining the Annual Average Generation Cost (AAGC) as a target and the Loss of Power Supply Probability (LPSP) as a constraint condition. The optimization is driven by an Improved Particle Swarm Optimization (IPSO), and a penalty function is introduced to transfer the nonlinear constraint conditions into a series of unconstrained problems. Defining the amount of system component as the decision variables, the comprehensiveness of the optimization process is improved by taking the tower height of wind turbine and the photovoltaic panel angle into consideration. Compared with the results from multi-objective genetic algorithm, the effectiveness and advantage of the proposed method was verified.

**Keywords:** hybrid systems; particle swarm optimization; optimization; loss of power supply probability; annual average generation cost