

基于 GBMMAS 算法的“风-光” 互补系统容量优化研究*

谢磊¹, 王飞², 余世杰², 陈晓高¹
(1. 中山大学数学与计算科学学院, 广东 广州 510275;
2. 中山大学物理与工程技术学院, 广东 广州 510275)

摘要: 在保证“风-光”互补系统供电可靠性的前提下, 对系统各组件的容量大小进行优化。提出一种基于有向图思想的“最大-最小”蚂蚁系统算法, 在满足一定负载失电率 (LPSP) 的前提下, 对系统能量均摊成本 (LCE) 进行优化, 从而得出对应于最小 LCE 的系统各组件的容量大小。仿真及运算结果表明, 该优化算法运算效率很高, 得出的优化结果是合理可行的。

关键词: “风-光”互补系统; 基于有向图的“最大-最小”蚂蚁系统; 负载失电率; 能量均摊成本

中图分类号: O224 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 01-0039-05

The Research on Capacity Optimization of “Wind-Photovoltaic” Hybrid Power System Based on GBMMAS Algorithm

XIE Lei¹, WANG Fei², YU Shijie², CHEN Xiaogao¹

(1. School of Mathematics and Computational Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The research focus on the optimization of components capacity of “Wind-Photovoltaic” hybrid system under the premise of reliable power supply. A Graph-based “Max-Min” Ant System algorithm (GBMMAS) has been proposed to optimize levelized cost of energy (LCE) of system under the premise of certain loss power supply probability (LPSP), and finally figured out system components capacity corresponding to minimized LCE. The simulation and operation results show that the optimization algorithm proposed is effective, the optimization results is reasonable and feasible.

Key words: “Wind-Photovoltaic” hybrid system; GBMMAS; loss power supply probability; levelized cost of energy

“风-光”互补系统的出现为偏远地区及海岛居民的用电提供了一条合理、有效的途径。其充分利用了风、光资源在时间及地域上的互补性, 能够在有效降低系统成本的同时提高系统供电可靠性。目前运行的“风-光”互补系统中普遍存在组件容量设计不合理的现象, 造成系统供电可靠性低、成本过高等问题, 因此需要对系统组件容量进行优化。在“风-光”互补系统中, 组件的不同容量组合会对系统的性能表现产生重要影响, 属于组合

优化中典型的 NP-hard 问题, 对此问题可应用蚁群优化算法进行求解^[1-2]。本文提出了一种基于有向图思想的“最大-最小”蚂蚁系统算法, 在满足一定负载失电率 (LPSP) 的前提下, 对系统能量均摊成本 (LCE) 进行优化, 从而得出系统各组件的容量大小。

1 系统结构及工作原理

图 1 所示为本文中所研究的“风-光”互补

* 收稿日期: 2010-03-14

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (8451027501001493)

作者简介: 谢磊 (1981 年生), 男, 博士研究生, 通讯作者: 王飞; E-mail: wangfei@mail.sysu.edu.cn

系统的结构, 其主要工作原理如下。

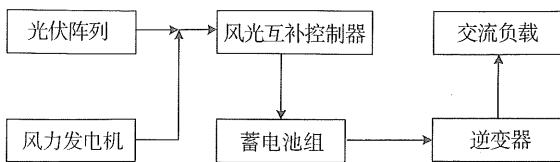


图1 “风-光”互补系统的结构

Fig. 1 Configuration of “Wind-Photovoltaic” hybrid system

由光伏阵列和风力发电机所产生的电能经过风光互补控制器后向蓄电池组充电, 蓄电池组在储存电能的同时经过逆变器(直流-交流)向交流负载供电。

2 负载失电率 $LPSP$ 和能量均摊成本 LCE

在“风-光”互补复合能源供电系统中, 评价整个系统性能表现的主要指标是供电可靠性和系统成本。对这两项指标的评估是通过计算负载失电率 $LPSP$ 和能量均摊成本 LCE 这两个参数来实现的。

2.1 负载失电率 $LPSP$

负载失电率 $LPSP$ 被定义为在运行周期内, 系统亏欠负载的电量与评估期内负载所要消耗的总电量的比值^[3-4]:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T P_{Load}(t) \cdot \Delta t} \quad (1)$$

系统在 t 时刻亏欠负载的总电量 $LPS(t)$ 为^[5]

$$LPS(t) = P_{Load}(t)\Delta t - (P_{PV}(t) + P_{WT}(t))\Delta t \cdot \eta_{inv} - C_{bat} \cdot (SOC(t-1) - SOC_{min}) \cdot \eta_{inv} \quad (2)$$

式中, P_{Load} 为负载功率需求, W; $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻由光伏阵列产生的功率, W; $P_{WT}(t)$ 为 t 时刻由风机产生的功率, W; C_{bat} 为蓄电池组额定容量, Ah; $SOC(t-1)$ 为蓄电池组在 $t-1$ 时刻的荷电状态; SOC_{min} 为蓄电池组允许的最小荷电状态; Δt 为时间步长, h; η_{inv} 为逆变器效率, 本文取 90%。

2.2 能量均摊成本 LCE

能量均摊成本 LCE 由下式定义^[6-7]

$$LCE = C_{total} \times CRF / E_{Load} \quad (3)$$

式中, E_{Load} 为系统每年向负载提供的电量, kWh; C_{total} 为系统中所有组件的总成本, ¥; CRF 为投资回报系数。 C_{total} 和 CRF 可分别通过下式计算^[8]:

$$C_{total} = C_{tot-PV} + C_{tot-WT} + C_{tot-bat} \quad (4)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

式中, i 为利息率, 本文取 8%; n 为系统寿命, 年; C_{tot-PV} 、 C_{tot-WT} 为分别为光伏组件、风机的初期投资和维护成本, ¥; $C_{tot-bat}$ 为蓄电池的初期投资和更换成本, ¥。

2.3 组件容量大小对 $LPSP$ 和 LCE 的影响分析

根据图 1 所示系统结构, 在负载对供电可靠性有一定要求的前提下, 可将组件容量对 $LPSP$ 和 LCE 的影响分为以下 3 种情况:

1) 组件容量设计过剩: 此时 $LPSP$ 虽满足要求, 但 LCE 将很高, 系统经济性差。且随着组件容量的增大, $LPSP$ 呈减小趋势, LCE 呈增加趋势。

2) 组件容量设计不足: 此时 LCE 虽然低, 但由于 $LPSP$ 不满足要求, 系统的供电可靠性差。且随着组件容量的减小, LCE 呈减小趋势, 而 $LPSP$ 呈增加趋势。

3) 组件容量设计良好: 此时 $LPSP$ 满足要求, 且 LCE 也不高, 系统经济型和供电可靠性佳。

3 基于有向图思想的“最大-最小”蚂蚁系统算法的实现

本文所研究的“风-光”互补系统组件容量优化问题是一个背包问题^[9-10], 该问题的实质即是从一个由多个风机、光伏组件和蓄电池构成的集合中, 选取其中一部分组件构成子集, 使得该子集在满足一定 $LPSP$ 的约束条件下, 系统 LCE 最低。基于此, 本文提出了一种基于有向图思想的“最大-最小”蚂蚁系统 (GBMMAS) 算法^[11-12], 在满足一定 $LPSP$ 的前提下, 对系统 LCE 进行优化: 目标函数:

$$LCE = \frac{\min(C_{tot-PV} + C_{tot-WT} + C_{tot-bat}) \times CRF}{E_{Load}} \quad (6)$$

约束条件:

$$LPSP \leq LPSP^* \quad (7)$$

解限制条件:

$$\min\{N_{PV_p}, N_{WT}, N_{bat_p}\} \geq 0 \quad (8)$$

式中, $LPSP^*$ 为 $LPSP$ 给定值; N_{PV_p} 为光伏组件并联数量; N_{WT} 为风机数量; N_{bat_p} 为蓄电池组并联数量。

下面介绍将有向图思想应用于优化本文所研究系统的原理: 将系统在满足 $LPSP$ 条件下最小 LCE 所对应的组件容量的求解视为蚁群在巢穴和食物之间觅食最短路径的选择。将系统各组件作为求解路径中的节点, 组件数量大小对应于蚁群在觅食中的路径长度, 这样即可将对此问题的求解转化为 TSP

问题的求解。由此可构建有向图：

$$G = (N, A) \quad (9)$$

式中， N 为结点的数量； A 为路径的数量。

令 R 为在有向图 G 中满足下列条件的所有路径 r 的集合：

- 1) 所有蚂蚁均从起始节点 0 开始移动，即从同一起始点进行“路径”的构建；
- 2) 在每条“路径”中，各节点只能出现一次。

由上述条件对本文中“路径”上节点设置如下：

{节点 0 节点 1 节点 2 节点 3} =
{起始点 光伏阵列 风机 蓄电池}

基于上述思想，本文中 GBMMAS 算法的流程如下（参见图 2）。

1) 初始化参数：蚂蚁数量 $m = 40$ ，最大迭代次数 $N_{cmax} = 100$ ，迭代计数器 $n = 0$ ，信息量 $\tau_{ij}(0) = \tau_{max}$ 、信息素增量 $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ ，初始化时信息素上限 τ_{max} 和下限 τ_{min} 为^[13]：

$$\tau_{max}(n) = \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{1}{LCE(n)} + \frac{1}{LCE(n)} \quad (10)$$

$$\tau_{min}(n) = \frac{\tau_{max}(n)}{20} \quad (11)$$

式中， ρ 为信息素挥发系数，本文中取 $\rho = 0.2$ ； $LCE(n)$ 为第 n 次迭代后的系统最优 LCE ， $\text{¥}/\text{kWh}$ 。

2) 将所有蚂蚁放在起始节点 0 上，向下一节点移动。在移动过程中，蚂蚁 k 将依据状态转移概率 $p_{ij}^k(n)$ 随机的选择下一节点以及通往下一节点的路径：

$$p_{ij}^k(n) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(n)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(n)]^\beta}{\sum_{s \in N_i} [\tau_{is}(n)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(n)]^\beta}, & j \in N_i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

式中， N_i 为表示第 i 个变量的取值范围； α 为信息启发式因子； β 为期望启发式因子。本文取 $\alpha = 1$ ， $\beta = 4$ 。 $\eta_{ij}(n)$ 为表示由节点经由路径 j 到达下一节点的期望程度：

$$\eta_{ij}(n) = \frac{1}{C_i \cdot V_j} \quad (13)$$

式中， C_i 为表示第 i 个节点对应的设备单价， ¥ ； V_j 为路径 j 上设备的数量。

为满足每条“路径”中各节点只能出现一次的限制条件，算法中需要添加“禁忌表”，即将蚂

蚁走过的节点放入表中，蚂蚁 k 在访问下一节点时不能访问表中已有节点，直至所有蚂蚁完成对所有节点的访问后将禁忌表清空。

3) 本文中对信息素的更新采用 MMAS 算法：

$$\tau_{ij}(n+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(n) + \Delta\tau_{ij}^{min} \quad (14)$$

4) 由于蚁周模型在求解 TSP 问题的效果较好，故本文选取此模型对 $\Delta\tau_{ij}^{min}$ 进行更新：

$$\Delta\tau_{ij}^{min} = \frac{1}{LCE} \quad (15)$$

式中， $LCE = \min(LCE_k)$ ， $k = 1, 2, \dots, m$ 。

5) 当群体中的最优个体满足一定要求或迭代次数达到 N_{cmax} 时，优化结束，否则转入第 2 步进行操作。

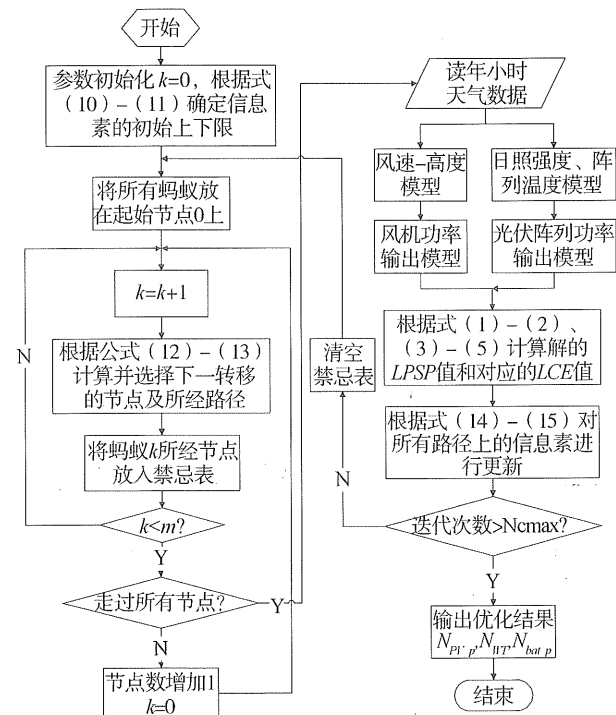


图 2 GBMMAS 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of GBMMAS

4 运算结果及分析

本文采用了珠海地区 2007 年 12 月份中 50 个点的年小时气象数据（风速、日照强度和环境温度，见表 1），并利用 Matlab 中的 M 语言编制了 GBMMAS 优化算法，在给定 $LPSP^* = 2\%$ 的约束条件下对系统中风机、光伏阵列及蓄电池组的容量进行了优化。算法中节点 1、2、3 分别代表风力、光伏组件和蓄电池组的设备编号，而路径长短则分别代表这三者的数量。

表 1 珠海地区 07 年 12 月气象数据

Table 1 Weather Data of Zhuhai on Dec. 2007

时间/ h	日照强度/ (kWh·m ⁻²)	风速/ (m·s ⁻¹)	环境温 度/°C	时间/ h	日照强度/ (kWh·m ⁻²)	风速/ (m·s ⁻¹)	环境温 度/°C
1	30	9.1	15.1	26	26	7	12
2	30	9.7	14.1	27	24	11	11.9
3	25	11.9	13.8	28	25	5.3	12
4	29	12.5	13.4	29	22	8.4	11.9
5	26	14.1	12.9	30	26	7.5	11.7
6	31	13.7	12.8	31	20	7.6	11.9
7	29	13.1	12.1	32	25	6	12.2
8	28	15.4	12.2	33	20	6.4	12.1
9	31	7.8	12.2	34	64	6.5	12.6
10	35	12	12	35	144	8.7	13.4
11	84	10.1	11.4	36	216	8.9	14
12	121	11	12.3	37	213	12.4	14.8
13	209	10.3	12.2	38	157	11.4	14.4
14	169	13.6	11.7	39	127	8.8	14
15	171	7.1	12.1	40	124	11.4	14.1
16	118	9.8	11.4	41	116	9.9	14.1
17	112	13.4	11.2	42	219	13.1	14.7
18	74	12.1	11.2	43	72	11.4	14.3
19	53	10.5	11.5	44	36	10.7	14.1
20	31	11.5	11.4	45	27	9	14
21	33	8.9	11.6	46	33	10.3	14.6
22	32	8.6	11.9	47	32	9.7	14.8
23	23	3.9	11.8	48	29	10.5	15.3
24	28	6.2	12	49	29	11.7	15.4
25	25	5.6	12	50	37	14.1	15.5

表 2、表 3 及表 4 分别为系统优化中选用的风机、光伏阵列及蓄电池的规格及参数。由于本系统中直流母线电压为 24 V，可知蓄电池组需采用 8 串结构。优化中系统负载大小设定为 5 kW。为了观察本文所提出优化算法的执行效率及稳定性，本文进行了 50 次算法优化运算，并记录了每一次解收敛时的算法迭代次数，结果如表 5 所示。

表 2 光伏组件 S-125C 参数

Table2 Parameters of PV module S-125C

U_{oc}/V	I_{sc}/A	V_{max}/V	I_{max}/A	P_{max}/W
46.8	3.55	39	3.21	125

表 3 蓄电池 GMF-500C 参数

Table3 Parameters of lead-acid battery GMF-500c

C_R/Ah	U/V	$\eta_{charge}/\%$	$DOD/\%$
500	2	90	80

表 4 BWC XL.1 风力发电机运行参数

Table4 Parameters of wind turbine generator BWC XL.1

U_o/V	$V_{ci}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{co}/(m \cdot s^{-1})$	$V_r/(m \cdot s^{-1})$	P_r/W	P_m/W
24(DC)	3	25	11	1 000	1 300

表 5 50 次优化过程中收敛解的迭代次数

Table5 Iterations of convergent solutions in 50 optimization procedures

运算次数	迭代次数									
1-10	5	10	15	12	31	2	3	3	10	1
11-20	4	14	8	22	1	2	59	11	5	25
21-30	1	13	16	20	4	46	14	4	1	10
31-40	25	2	1	4	11	9	73	12	4	47
41-50	5	3	2	47	4	3	6	3	2	1

经统计，本文所设计的 GBMMAS 优化算法在收敛时所经历的平均迭代次数为 16 次，可以看出该优化算法在对“风-光”互补系统进行系统配置优化时算法的运算效率很高，经过一定次数的迭代后 LCE 均收敛于 0.664 9 处。图 3 为算法收敛时解的迭代次数在 0-100 的概率分布。

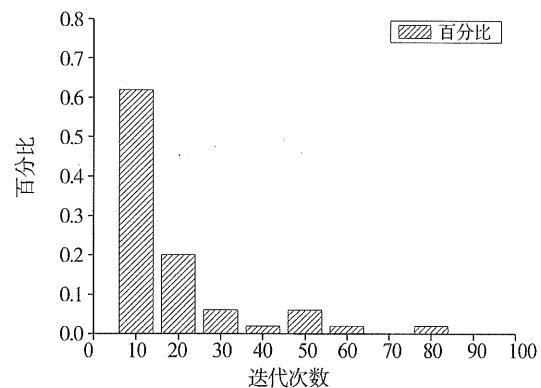


图 3 迭代次数的概率分布

Fig. 3 Probability distribution of iterations

由图可知，迭代次数在 0-20 次之间的概率为 0.82，这与 16 次的平均迭代次数是一致的，也充分说明算法是稳定的，而迭代次数在 0-10 次之间的概率为 0.62，说明算法在绝大多数情况下是很快就可以达到收敛的。

图 4 所示为其中一次的 GBMMAS 算法的系统优化过程。对应于该优化过程的系统组件容量优化结果为：

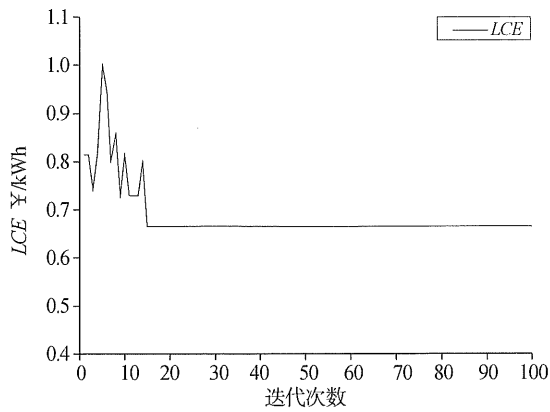


图 4 GBMMAS 算法的优化过程

Fig. 4 Optimization procedure of GBMMAS

1) 节点: 0—2—1—3, 代表蚂蚁的寻优所经节点顺序为: 0—光伏组件—风机—蓄电池组。

2) 路径: 0—1—7—1, 根据节点中的设备号可知, 光伏组件的并联数量为 1, 风机的数量为 7, 蓄电池组的并联数量为 1。表 6 即为系统优化结果。

表 6 $LPSP^* = 2\%$ 时系统优化结果Table 6 System optimization result on $LPSP^* = 2\%$

N_{PV_P}	N_{WT}	N_{bat_P}	LCE 元/kWh	$LPSP^* / \%$
1	7	1	0.664 9	1.94

5 结 论

本文针对目前运行的“风-光”互补系统中普遍存在的系统配置不合理的现象, 提出了一种基于有向图思想的“最大-最小”蚂蚁系统算法, 用于对“风-光”互补系统的配置优化。并运用该优化算法对系统成本及组件的容量进行了优化。运算结果的分析表明, 本文所设计的优化算法稳定性高, 并且在多次运算过程中均可以很快达到收敛, 算法的执行效率很高, 得出的优化结果是合理的。

参考文献:

[1] NOUREDDINE Liouane, IHSEN Saad, SLIM Hammadi, et al. Ant systems & local search optimization for flexible job shop scheduling production[J]. International Journal

of Computers, Communications & Control, 2007, 2(2): 174 - 184.

- [2] 罗中良, 易明珠, 周有平. 基于智能混合算法的经济调度问题及其参数调整方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(1): 33 - 37.
- [3] YANG H X, LU L, BURNET J. Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic - wind power generation systems in Hong Kong [J]. Renewable Energy, 2003, 28(11): 1813 - 1824.
- [4] DIAFA S, BELHAMELB M, HADDADIC M. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island [J]. Energy Policy, 2008, 36(2): 743 - 754.
- [5] AI B, YANG H, SHEN H, et al. Computer-aided design of PV/wind hybrid system [J]. Renewable Energy, 2003, 28(10): 1491 - 1512.
- [6] NELSON D B, NEHRIR M H, WANG C. Unit sizing of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems [J]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, 3: 2116 - 2122.
- [7] DIAF S, NOTTON G, BELHAMEL M. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions [J]. Applied Energy, 2008, 85(10): 968 - 987.
- [8] YANG H X, ZHOU W, LU L. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm [J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354 - 367.
- [9] 罗小虎, 赵雷. 一个解决 0/1 背包问题的蚁群方法 [J]. 苏州大学学报: 工科版, 2004, 24(1): 41 - 44.
- [10] KONG M, TIAN P, KAO Y CH. A new ant colony optimization algorithm for the multidimensional Knapsack problem [J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(8): 2672 - 2683.
- [11] GUTJAHR W J. ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution [J]. Information Processing Letters, 2002, 82(3): 145 - 153.
- [12] GUTJAHR W J. A generalized convergence result for the graph-based ant system metaheuristic [J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences, 2003, 17(4): 545 - 569.
- [13] 汪定伟. 智能优化算法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 200.