

风-光互补发电系统的频率控制

张伯泉¹, 杨宜民², 甘璐²

(1. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510090; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 由于风、光的强随机性和负荷的多变性, 风-光互补发电系统的频率稳定性变差. 有功功率优化既能够保证发电系统频率的安全与稳定, 又能够使其经济地运行. 但它是一个带约束的非线性多极值优化问题, 用传统的方法很难处理. 随着风-光互补发电场规模的增大, 频率控制的实时性变差. 针对这些问题, 建立了以发电成本最小为目标的频率优化控制的数学模型, 提出了基于均匀设计和惯性变异的粒子群算法和基于多Agent的协调优化方法, 并用于发电系统频率的优化控制. 实验验证了频率优化控制模型的正确性, 显示了改进的粒子群算法比标准的粒子群算法优化效果更好; 另一实验显示, 多Agent的协调优化方法比单一种群的粒子群算法更加高效、更加适合于大规模风-光互补发电系统的频率控制.

关键词: 风-光互补发电; 频率控制; 有功优化; 粒子群算法; 多Agent系统

中图分类号: TP18, TK51, TK8 **文献标识码:** A

Frequency control of wind-photovoltaic hybrid power systems

ZHANG Bo-quan¹, YANG Yi-min², GAN Lu²

(1. Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China;

2. Institute of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

Abstract: Because of strong randomness of wind and photovoltaic resources and the variety of loads, the stability of frequency of wind-photovoltaic hybrid power systems becomes low. The optimization of active power not only ensures the safety and stability of frequency of power systems, but also makes it operating economically. However, it is a non-linear optimization problem with constraints and multi-extremum, so this problem is difficult to be solved by traditional methods. With the size of wind-photovoltaic hybrid power farm increasing, the performance of real-time control becomes worse. Based on the above analysis, a mathematical model with the minimal generation cost as objective is constructed. Also a new particle swarm optimization(PSO) based on uniform design and inertia mutation (UMPSO) and a multi-Agent based collaborative optimization method are brought forward, which are used to optimize and control the frequency of power system. Experiment verifies the correctness of the mathematical model and shows the higher effect of UMPSO than that of the standard one. Another experiment indicates that the multi-Agent based collaborative optimization method is preferable for larger power generation farm to the sole population PSO.

Key words: wind-photovoltaic hybrid power generation; frequency control; active power optimization; particle swarm optimization (PSO); multi-Agent systems

1 引言(Introduction)

风-光互补发电的任务之一是保证发电系统频率的安全与稳定, 这也是影响风-光互补发电能否被推广的关键因素之一. 有功功率与频率的关系密切, 实现发电系统在额定频率下的有功功率供需平衡是保证频率质量的基本前提, 也是频率控制的基本方法之一^[1]. 发电装置有功出力的优化控制既可以实现有功功率的供需平衡, 从而保证发电系统频率稳定, 又能使发电系统经济地运行. 但它是一个带约束的非线性多极值优化问题, 用传统的方法很难处理.

大规模风-光互补发电系统发电装置多, 频率控制的实时性差, 这是大规模风-光互补发电系统面临的又一问题.

频率调节分为一、二、三次调节. 一次调节是发电装置的自然属性, 通常是有差调节. 要保证系统的频率安全, 必须利用发电机的同步器平行移动机组功频静特性进行频率的二次调整. 为了提高发电系统运行的经济性, 通常对发电装置进行优化调整, 这既能保证系统频率的安全, 又能降低发电系统的发电成本. 这是频率的三次调节. 本文针对频率的二次

与三次调节进行研究。

2 频率控制(Control of frequency)

由于风、光资源及负荷的随机性,使得频率控制成为具有多极值点非线性的组合优化问题^[1,2],通常以有功功率损耗最小、频率波动最小、有功功率负荷分配最经济、发电成本最低为目标函数^[3~5],传统的解决方法有等微增率准则法、动态规划法、线性规划法等^[3,6]。但这些方法存在对优化函数解析性要求高、维数灾难、易陷入局部极值解等缺点。

粒子群算法(PSO)^[7]是一种智能进化算法,它计算速度快、对函数的解析性要求低,易于处理非线性问题。但对多极限值问题,标准的PSO往往只能找到局部最优解。采用均匀设计法初始化粒子群,使粒子均匀分布在解空间,使某些粒子以更大概率落入全局最优解所处的位置或其附近;在进化过程中,对惰性粒子以概率为1进行变异,保证粒子的多样性。这样能够以更大的概率找到全局最优解。

2.1 数学模型(Mathematical model)

在系统无功潮流调度已确定的前提下,以系统的频率为状态变量,以发电装置的有功出力为控制变量,建立以系统发电成本最低为目标的频率控制数学模型,如公式(1)所示。

$$\begin{cases} \min F(P) = \sum_{i=1}^M C_i(P_{Gi}) \\ \text{s.t. } P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max}, i=1, \dots, M, \\ f_{\min} \leq f \leq f_{\max}, \\ \sum_{i=1}^M (P_{Gi} - \frac{P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2}{V_i^2} R_i - P_L) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: P 是发电装置的有功出力构成的矢量; $P_{Gi}, Q_{Gi}, C_i(P_{Gi})$ 分别是第 i 台发电装置实际发出的有功功率、无功功率和发电费用; $f, f_{\min}, f_{\max}$ 分别是频率优化值、频率控制区的下限值、上限值; R_i 是第 i 个发电装置到负荷端的等值电阻; M 是发电装置的台数; P_L 是当前的负荷功率。

在风-光互补发电系统中,引起频率波动的原因主要有两个,一个是风、光资源的变化,另一个是负荷的变化。负荷值往往很难检测,用公式(2)计算:

$$P_L = P_{DN} - (f - f_N)(K_{D*} \frac{P_{DN}}{f_N} + \sum_{i=1}^n \frac{K_{Gi*} P_{GiN}}{f_N}). \quad (2)$$

其中: f, f_N 分别是发电系统母线当前频率和额定频率; P_L 是当前的负荷功率; i 是具有一次调频能力的发电装置台数; K_{D*}, K_{Gi*} 分别是负荷的频率调节效应系数和发电装置的功频静特性系数; P_{DN}, P_{GiN} 分

别是额定频率下的负荷功率和发电机功率。 K_{D*} 由发电场负荷的类型及所其占的比例决定。通常, $K_{D*} = 1 \sim 3$ 。不同类型的发电机,其 K_{Gi*} 不同。在本文中,设 $K_{D*} = 2, K_{Gi*} = 25$ 。

2.2 改进的粒子群算法(Improved PSO)

均匀设计^[8,9]是王元、方开泰于1978年提出的一种新的试验方法。与正交设计比较,它的试验次数大大减少,在许多多水平试验问题中非常实用。对粒子群算法来说,将其问题域划分为适当多的水平,在这些水平中均匀地取值,使得粒子均匀分布在问题域中。

定义 1 惰性粒子是指这样的粒子: 在连续 C 代, 其适应度函数值与粒子群当前最优适应度函数值之差小于给定的小的正数 δ_1 , 并且它与粒子群最优适应度函数值对应的粒子的距离小于 δ_2 。其公式如式(3)所示:

$$\begin{cases} d_{fi} = \frac{f_i - f_g}{\min\{|f_i|, f_g\}}, \\ d_{di} = \sum_{j=1}^N (x_{ij} - P_{gj})^2. \end{cases} \quad (3)$$

其中: d_{fi} 是粒子 i 与粒子群最优适应度函数值的差值, f_i 是粒子 i 的适应度函数值, f_g 是粒子群最优适应度函数值, d_{di} 是粒子 i 与粒子 g 的距离差。

基于均匀设计和惰性变异的粒子群算法(UMPSO)的流程如下:

1) 基于均匀设计初始化粒子的位置 x_i 、速度 v_i , 设置进化代数 G 、种群数目 P 、收敛标准 ε 、惰性代数 T 、惰性适应度函数差值标准 δ_1 、惰性距离差值标准 δ_2 、学习因子 C_1 与 C_2 。

2) 按式(1)计算每个粒子的适应值。

3) 对于每个粒子, 按式(4)对粒子最优位置进化; 按式(5)对粒子群最优位置进化:

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t), & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(P_i(t)), \\ x_i(t+1), & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(P_i(t)), \end{cases} \quad (4)$$

$$P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), \dots, P_K(t)\} / (P_g(t)) = \min\{f(P_0(t)), f(P_1(t)), \dots, f(P_K(t))\}. \quad (5)$$

4) 对每个粒子, 按式(3)计算其与 P_g 的偏差, 以决定其惰性累加器 T_i 是否加1。

5) 对每个粒子判断其 T_i 与 T 的大小。如果 $T_i > T$, 则在解空间中以概率1对其变异, 并与粒子群当前最优解进行比较。如果 $f(x_i) < f(P_g)$, 则令 $P_g = x_i$, 且对 x_i 在解空间重新以概率1变异, 直到产生 x_i , 使 $f(x_i) \geq f(P_g)$, 并令 $T_i = 0$ 。

6) 根据式(6)和(7)对粒子的位置和速度进行进

化:

$$v_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \chi(v_{i,j}(t) + c_1 r_{1,j}(t)(P_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + \\ c_2 r_{2,j}(t)(P_{g,j}(t) - x_{i,j}(t))), \\ \text{if } -V_{\max,j} \leq v_{i,j}(t+1) \leq V_{\max,j}; \\ v_{\max,j}(t), \text{ if } v_{i,j}(t+1) > v_{\max,j}; \\ v_{\min,j}(t), \text{ if } v_{i,j}(t+1) < -v_{\max,j}. \end{cases} \quad (6)$$

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), \\ \text{if } X_{\min,j} \leq x_{i,j}(t+1) \leq X_{\max,j}; \\ X_{\max,j}(t), \text{ if } x_{i,j}(t+1) > X_{\max,j}; \\ X_{\min,j}(t), \text{ if } x_{i,j}(t+1) < X_{\min,j}. \end{cases} \quad (7)$$

7) 判断进化代数是否达到预设的最大的进化代数 G ; 或者连续 T 代全群最优值之差小于收敛标准 ε , 并且频率偏差在频率的控制区内. 若是, 则转向8); 否则转向2)。

8) 输出 P_g 及其对应的最优适应度函数值和系统频率值, 算法运行结束。

2.3 实验与分析(Experiment and analysis)

图1是一个风-光互补发电系统的等效图, 线路旁边标注的是发供电装置到负荷点的传输线路的阻抗, 线路的其他参数未计。

系统由 75 kW 和 45 kW 的变速风力发电机组(BDFM, PM)、30 kW 的光伏发电阵列(PV)、140 kW·h 的蓄电池(BAT)、辅助电源(AS)和负荷(LD1, LD2)组成. 负荷点的额定电压为 400 V, 允许电压波动范围为 [380 V, 420 V], 额定频率为 50 Hz, 频率允许波动范围为 [49.5 Hz, 50.5 Hz], 频率调节控制区为 [49.8 Hz, 50.2 Hz]。

在某采样点, LD1 为 $48 + j15.67$, LD2 为 $4 + j1.38$, BDFM 的无功出力是 5.46 kW、有功出力范围是 [0, 21 kW], PM 的无功出力是 2.74 kW、有功出力

范围是 [0, 12.5 kW], PV 的无功出力是 2.86 kW、有功出力范围是 [0, 18.5 kW], 蓄电池的有功出力范围是 [0, 41 kW]。

75 kW 风机 45 kW 风机柴油机的发电成本分别是 0.705 元/kWh、0.757 元/kWh、1.65 元/kWh; 光伏阵列的发电成本为 1.56 元/kWh, 综合设计系数为 0.8; 蓄电池的发电成本 1.6 元/kWh, 充电系数为 0.9。

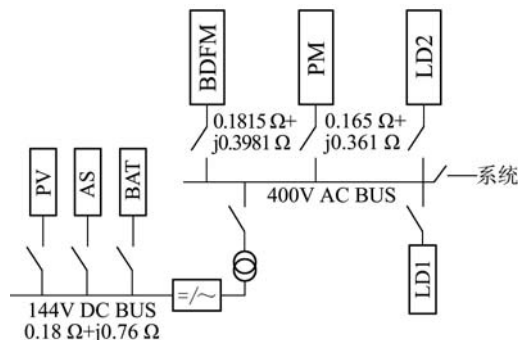


图 1 风-光互补发电系统的等效电路

Fig. 1 Scheme of wind/photovoltaic hybrid power systems

进化中, $P = 20$, $\varepsilon = 1E - 6$, $T = 4$, $\delta_1 = \delta_2 = 3E - 4$, $C_1 = 2.8$, $C_2 = 1.3$. 式(3)中的参数 $K_D = 2$, 均匀设计表是 $U_{20}(10^5)^{[9]}$. 连续运行 20 次的平均适应度值优化曲线如图 2 所示, 对照结果如表 1 所示。

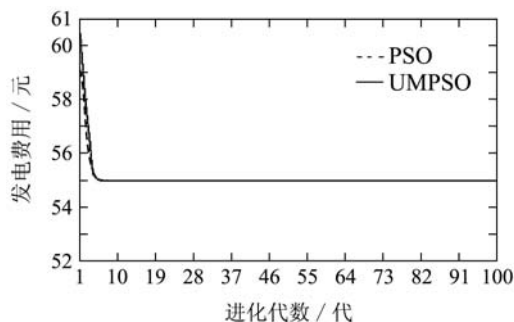


图 2 优化过程示意图

Fig. 2 Optimization procedure

表 1 标准 PSO 与 UMPSO 优化结果对照

Table 1 Comparison of optimization results between the standard PSO and UMPSO

算法	供电装置的有功出力/kW					监测点频率/Hz	供电费用/元	最优值出现的代数/所需时间/ms
	Battery	辅助电源	BDFM	PM	PV			
PSO	0.001097	0	21	12.5	18.5	50	53.13	4.67/3.32
UMPSO	0.001097	0	21	12.5	18.5	50	53.13	4.33/2.89

对照结果显示, 改进的粒子群算法和标准粒子群算法都能找到最优值, 但前者更快. 实验结果也显示, 用于频率调节的数学模型既能保证发电系统频率的安全, 又够使发电系统经济地运行。

3 多Agent协调优化(Collaborative optimization based on multi-Agent)

Agent 是物理上或逻辑上独立的智能体, 既能独立运行, 又能与其他 Agent 相互通信与合作, 共

同完成复杂的工作^[10]. 在图1所示的发电系统中, 构造两个同构的BDI Agent. Agent1管理两台风机, Agent2管理光伏阵列、蓄电池和辅助电源. Agent间的合作机制采用非固定主从式, 合作方法采用合同网方法. 某时刻的负荷功率为52 kW, Agent1为主Agent, Agent1、Agent2的协作优化过程如下:

1) Agent1用其粒子群算法优化所管辖的发电装置的有功出力, 用时1.06 ms, 优化结果: BDFM发电量为 $21+j5.46$, PM发电量为 $12.5+j2.74$. 负荷端有功缺额为18.500703 kW, Agent1发出招标通知.

2) Agent2获取招标通知.

3) Agent2用其粒子群算法优化所管理的发电装置的有功出力, 用时1.13 ms, 优化结果: PV发电量为 $18.5+j2.86$, 蓄电池供电量为0.001097.

4) Agent1获得Agent2的供电信息后, 对Agent2的供电方案进行决策. 蓄电池供电量少, 对频率的影响可以忽略. 因此Agent1通知Agent2由其供电 $18.5+j2.86$.

5) Agent2接到通知, 发出发电指令. 供电后监测点的频率变为49.9994515 Hz, 在频率波动允许的范围內.

6) Agent1与Agent2比较供电量, 供电量大的成为主Agent, 并由其监测频率的变化. 如监测点的频率超出允许的范围, 则转向1); 否则, 继续监测.

实验表明, 多Agent协调优化的时间(2.19 ms), 比单一种群的粒子群算法优化的时间(2.89 ms)少, 优化效率更高. 实验证明, 只要Agent设置合理, 供电装置分组得当, 多Agent协调优化比单一种群的粒子群算法更适合应用于风-光互补发电系统的频率控制.

4 结论(Conclusion)

针对风-光互补发电系统的特点, 本文建立以发电系统发电成本最低为目标的频率优化控制的数学模型, 并用改进的粒子群算法进行了优化计算, 结果显示改进的粒子群算法的高效性和模型的正确性. 对于大规模风-光互补发电场, 提出了基于多Agent的协调优化方法. 实验表明只要供电装置分组合理, 该优化方法比单一种群的粒子群

算法具有更高的优化效率.

多Agent协调优化中, 发电装置的分组是一个既要考虑分组所增加的设备成本, 也要考虑优化效率的问题. 分组过粗, 会降低优化效率, 实时性不强; 分组过细, 会增加通信次数和设备成本. 限于篇幅, 本文没有作进一步展开.

参考文献(References):

- [1] PARK J B, LEE K S, SHIN J R. Economic load dispatch for non-smooth cost functions using particle swarm optimization[C] *Proc of IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2003, 2: 938 – 943.
- [2] PANCHOLI R K, SWARUP K S. Particle swarm optimization for economic dispatch with line flow and voltage constraints[C] *Proc of TENCON 2003 Conf on convergent technologies for Asia-Pacific region*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2003, 1: 450 – 455.
- [3] 杨俊杰, 周建中, 吴玮. 改进粒子群优化算法在负荷经济分配中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 1 – 4.
(YANG Junjie, ZHOU Jianzhong, WU Wui. Application of improved particle swarm optimization in economic dispatching[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(2): 1 – 4.)
- [4] 蒋秀洁, 乐良才. 基于改进PSO算法的电力系统机组优化组合[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2005, 27(6): 28 – 31.
(JIANG Xiujie, LE Liangcai. Improved PSO algorithms for unit commitment of power system[J]. *J of China Three Gorges Univ.(Natural Science)*, 2005, 27(6): 504 – 508.)
- [5] 张振宇, 葛少云, 刘自发. 粒子群优化算法及其在机组优化组合中的应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 28 – 31.
(ZHANG Zhenyu, GE Shaoyun, LIU Zifa. Particle swarm optimization algorithms and its application in unit commitment[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(5): 28 – 31.)
- [6] GAING Z L. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(3): 1187 – 1195.
- [7] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] *Proc of IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1995, IV: 1942 – 1948.
- [8] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(FANG Kaitai, MA Changxing. Orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [9] 方开泰. 均匀试验设计的理论、方法和应用——历史回顾[J]. 数理统计与管理, 2004, 23(3): 69 – 80.
(FANG Kaitai. History review of the theory, methods, and applications of uniform experimental design[J]. *Application of Statistics and Management*, 2004, 23(3): 69 – 80.)
- [10] SEOW K T, HOW K Y. Collaborative assignment: a multiagent negotiation approach using BDI concepts[C] *Proc of the First International Joint Conf on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. New York: ACM Press, 2002, 2: 256 – 263.