

基于改进遗传算法的风/光互补发电系统电压无功控制

王建彬, 杨宜民, 甘 璐

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 在风/光互补发电系统中, 风、光资源的随机性强, 导致系统电压的稳定性差, 电压控制显得尤为重要. 电压控制通常通过区域无功功率的优化来实现. 无功功率优化是一个带有约束的多极值非线性组合优化问题, 用传统的方法很难进行处理. 因此提出一种改进的遗传算法用以风光/互补发电系统的无功功率优化, 该算法在一般遗传算法的基础上, 对编码方式、遗传算子以及终止判据等方面作了改进. 通过算例分析表明, 改进的算法能够显著的提高收敛速度和计算精度, 有效的实现电压的无功控制.

关键词: 风/光互补发电系统; 无功优化; 电压控制; 遗传算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Reactive power and voltage control of wind/photovoltaic hybrid power farm based on an improved genetic algorithm

WANG Jian-bin, YANG Yi-min, GAN Lu

(Institute of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

Abstract: In the wind/photovoltaic hybrid power generation systems, with strong fluctuation of wind and photovoltaic resources, the stability of voltage becomes low. So voltage control is of the utmost importance for wind/photovoltaic systems. Voltage control is usually implemented by the optimization of local reactive power. The optimization of reactive power is a non-linear combination optimization problem with constraints and multi-extrema. It is very difficult to solve by the traditional methods. So an improved genetic algorithm (IGA) is designed for optimizing reactive power in the wind/photovoltaic hybrid power generation systems. Based on the simple genetic algorithm, the algorithm is improved with the method of coding, operators and termination conditions. Experimental results show that the improved algorithm can remarkably improve the convergent speed and calculational precision, and implement the reactive power and voltage control more efficiently.

Key words: wind/photovoltaic hybrid power generation; reactive power optimization; voltage control; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

风/光互补发电是一种新型的清洁能源获得方式^[1]. 它能够弥补风和太阳能间歇性的缺陷, 因此其发电效果优于单独的风力发电和太阳能发电. 目前在新能源发电控制领域, 国内外主要从事独立风力发电和独立太阳能发电的研究^[2,3], 从事风力/太阳能互补发电的较少^[4]. 风/光互补发电系统中, 由于风、光资源的间歇性和不稳定性, 负荷的变化, 发电机的运行情况, 使得对电压的控制和优化更加复杂. 本文根据风/光发电系统的特点, 对传统的遗传算法作了改进, 使其对目标函数做出快速的优化, 既能保证电压的质量, 又能减少系统的运行成本.

2 风/光互补发电系统中的电压优化控制模型(Optimization control model of voltage in wind/photovoltaic hybrid power generation systems)

电力系统无功优化作为最优潮流的一个分支, 已经备受各方专家、学者的关注. 它是指在保证满足系统各种运行方式约束的前提下, 确定最优无功补偿地点和无功补偿设备容量, 从而保证以尽量少的无功补偿设备投资, 最大限度地提高系统电压稳定性, 改善电压质量, 降低网损.

本文采用的无功优化的目标是在满足用户负荷需求及其它运行约束条件下, 使系统的运行成本最

低, 表述为式(1):

$$\min F = \sum_{i=1}^m ((c_1(x_i) + c_2(x_i)) + \sum_{j=1}^n (c_3(y_j)) + \sum_{k=1}^{N_c} \alpha_k Q_k). \quad (1)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m x_{P_i} &\geq P_l, \\ \sum_{i=1}^m x_{Q_i} + \sum_{k=1}^{N_c} Q_k &\geq Q_l, \\ x_{i \min} &\leq x_i \leq x_{i \max}, \\ Q_{k \min} &\leq Q_k \leq Q_{k \max}. \end{aligned}$$

其中: x_i 为风力发电机组、光伏阵列、蓄电池、柴油机的实际输出功率, x_{P_i} 和 x_{Q_i} 分别为上述设备的实际输出有功功率和无功功率, $c_1(x_i)$ 和 $c_2(x_i)$ 分别为它们的发电成本和运行时增加的维护成本, y_j 为它们的额定输出功率, $c_3(y_j)$ 分别为它们待机时的维护成本, m 为正在运转出力的设备台数, n 为设备的总台数, Q_k 为补偿节点的无功功率, α_k 为补偿节点 k 的无功补偿费用系数, N_c 为补偿节点总数. P_l 和 Q_l 为负载所需的有功功率和无功功率, $x_{i \max}$ 和 $x_{i \min}$ 为风力发电机组、光伏阵列、蓄电池、柴油机实际输出功率的上下限, $Q_{k \max}$ 和 $Q_{k \min}$ 为无功补偿功率的上下限.

3 用于无功优化的遗传算法与改进(Genetic algorithm and its improvement for reactive optimization)

电力系统的无功优化问题是一个多目标、多变量、多约束的混合非线性规划问题, 没有精确的数学模型, 用传统的数学优化方法很难进行处理. 而遗传算法(GA)是一种模拟自然选择和遗传机制的随机优化算法, 它只需目标函数作为寻优信息, 通过对初始群体的不断选择、交叉、变异来找到最优个体, 具有很强的全局寻优能力, 成为解决无功优化问题的一种有效手段.

3.1 参数编码(Parameter coding)

编码的主要任务是建立解空间和染色体空间的对应关系. 常见的编码方式有二进制、浮点数编码等^[5]. 由于浮点数编码不仅可以缩短染色体长度, 降低算法的搜索空间, 且可以避免初始化及遗传操作中生成的不可行解, 从而提高算法的效率, 因此本文采用浮点数方式.

3.2 选择和适应度函数的改进(Improvement of selection and fitness function)

选择是最具有自然进化特色的操作之一, 它是从

所有父代中选取部分个体组成繁殖库的过程, 它建立在对个体的适应度进行评价的基础之上, 有时直接关系到收敛速度问题. 借鉴模拟退火的思想, 在遗传算法的执行过程中对适应度不断地进行修正^[6]. 变换公式如下:

$$F' = \exp(-\frac{k^t}{T_0} \cdot F). \quad (2)$$

式中: F 为个体的目标函数值; t 为进化代数; T_0 为模拟退火的初始温度, 该值一般取与目标函数值同一数量级的值, k^t 为一个系数, 该值一般取略小于10的数. 这样在遗传算法的初期阶段, 个体之间的适应度相差不大, 有利个体的多样性; 随着遗传代数的增加, 复制适应度较大个体的强制性就增大, 有利于遗传算法的收敛.

3.3 交叉和变异(Crossover and mutation)

为了克服早熟和避免陷入局部最优解, 引入自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm)^[7], 当群体有陷入局部最优解的趋势时, 就相应地提高交叉概率 P_c 和变异概率 P_m ; 当群体在解空间发散时, 就降低 P_c 和 P_m . 自适应遗传算法在保持群体多样性的同时, 能保证遗传算法的收敛能力, 有效地提高了遗传算法的优化能力^[8], 它的交叉率和变异率的公式如公式(3)(4):

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}}, \\ P_{c1}, & f' < f_{\text{avg}}, \end{cases} \quad (3)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{P_{m1} - P_{m2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}}, \\ P_{m1}, & f' < f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_{\max}$ 代表群体中最大的适应度值, f_{avg} 代表每代群体的平均适应度值, f' 代表要交叉的两个个体中较大的适应度值.

3.4 算法终止判据(Termination conditions of the algorithm)

本文采用的是最大遗传代数 N 与最优个体适应值连续保持不变的最小保留代数 N_p 相结合的终止迭代准则, 在给定的遗传代数限定范围内来搜索最优解, 并确定该解经过后面的多次迭代后仍为最优, 直到满足最优个体最小保留代数为止. 如果在最大遗传代数 N 限定范围内没有满足最优个体最小保留代数的解, 则输出当前得到的最优解.

4 实例分析(Experiment analysis)

系统由75 kW、45 kW共120 kW的风力发电机组、30 kW的光伏发电阵列、80 kWh的蓄电池、36 kW的柴油发电机组组成. 在满足负荷要求的前提下应

用设计的遗传算法进行优化, 其中种群规模 $N = 20$, $P_c = 0.9$, $P_m = 0.06$, 终止代数50, $P_{c1} = 0.9$, $P_{c2} = 0.6$, $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$. 在计算中, 负荷所需功率为 $P_l = 48 \text{ kW}$, $Q_l = 17.91 \text{ kvar}$. 风电机组的发电成本为 $0.6 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$, 75 kW 与 45 kW 的风电机组停机维护成本分别为 $0.005 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$ 和 $0.007 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$, 发电时额外维护成本分别为 $0.1 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$ 和 $0.15 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$. 光伏阵列的发电成本为 $1.5 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$, 停机维护成本 $0.01 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$, 发电时额外维护成本 $0.05 \text{ 元}/\text{kW}$. 柴油机的停机维护成本不计, 发电时维护成本 $0.05 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$, 发电成本 $1.6 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$. 蓄电池的发电成本 $1.7 \text{ 元}/(\text{h} \cdot \text{kW})$. 电容器容量为 $[0, 60 \text{ kvar}]$, 分10组投切, 无功补偿费用系数为 $0.01 \text{ 元}/\text{kvar}$.

运行改进的算法和简单算法各25次所得结果比较如表1和图1所示.

表1 简单算法和改进算法的仿真结果比较

Table 1 Comparison of experimental results between GA and IGA

	简单法(SGA)	改进法(IGA)
计算时间/s	51.397	41.142
陷入局部收敛次数	9	2
结果平均值	31.9138	27.3748
最优值	29.3125	27.1776

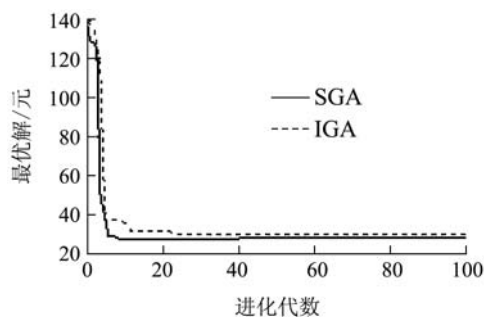


图1 简单算法和改进算法的优化过程

Fig. 1 Optimization procedure between GA and IGA

由表1和图1可以看到, 改进的遗传算法的运算时间比简单的算法少约20%, 25次运算中, 陷入局部最优解的情况比简单法少7次, 收敛速度快, 运行结果的平均值优于简单遗传算法, 而且简单算法的最优解都大于改进法的平均值.

5 结论(Conclusion)

本文简要介绍了风/光互补发电系统的结构, 并运用改进的遗传算法对所提出的电压无功优化控制目标函数进行了优化, 结果显示改进的算法能以大概率收敛到全局最优, 且收敛速度快, 其性能优于简单的遗传算法. 由于在实际应用中, 风/光互补电场的发供电装置比较多, 需要优化的变量进一步增多, 使得算法优化的时间比较长, 如何缩短计算时间, 提高算法实时性需要进一步的研究.

参考文献(References):

- [1] 张伯泉, 杨宜民. 风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势[J]. 中国电力, 2006, 39(6): 65 – 69.
(ZHANG Boquan, YANG Yimin. Status and trend of wind/ photovoltaic power development[J]. *Electric Power*, 2006, 39(6): 65 – 69.)
- [2] DOKOPOULOS P S, DIMOULIAS C S, MANOUSARIDIS I M, et al. Improvement of power quality in a grid with wind turbines using inductive storage[J]. *Wind Engineering*, 1999, 23(4): 215 – 224.
- [3] 太阳光发电协会(日). 刘树民, 等, 译. 太阳能光伏发电系统的设计与施工[M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2006.
(Photovoltaic power generation consortium(Japan). Translated by LIU Shumin, et al. *Design and Construction of Photovoltaic Power System*[M]. 1st edition. Beijing: Science Press, 2006.)
- [4] 张淼. 风力-太阳能混合发电控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
(ZHANG Miao. *Researches on the wind/photovoltaic hybrid power generation and control systems*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2004.)
- [5] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 第1版. 北京: 国防工业出版社, 1999.
(ZHOU Ming, SUN Shudong. *Theory and Application of Genetic Algorithm*[M]. 1st edition. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.)
- [6] 方鹏飞, 王惠祥, 等. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 15 – 18.
(FANG Gefei, WANG Huixiang, et al. Application of improved genetic algorithm in reactive power optimization[J]. *Proc of Power System and Automation*, 2003, 15(4): 15 – 18.)
- [7] 段玉倩, 贺家李. 遗传算法及其改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 39 – 52.
(DUAN Yuqian, HE Jiali. Genetic algorithm and improvement[J]. *Proc of Electric Power System and Automation*, 1998, 10(1): 39 – 52.)
- [8] 陈芳元, 汪玉凤. 基于改进遗传算法的电力系统无功规划优化[J]. 继电器, 2006, 34(13): 29 – 32.
(CHEN Fangyuan, WANG YuFeng. Optimization of reactive power in power system based on improved genetic algorithm[J]. *Relay*, 2006, 34(13): 29 – 32.)