

基于遗传算法的含分布式发电的配电网无功优化控制研究

李晶¹, 王素华², 谷彩连¹

(1. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 河南省电力公司商丘供电公司, 河南 商丘 476000)

摘要: 提出了基于遗传算法的含分布式发电的配电网无功优化算法。构建了包含分布式发电系统的配电网无功优化数学模型, 充分考虑了网损最小和节点电压的约束, 采用遗传算法对分布式发电的无功功率给定进行了优化, 仿真结果表明该优化算法能够有效地减少功率损耗和提高电压质量。

关键词: 分布式发电; 遗传算法; 无功优化

Research of reactive power optimization control in distribution networks based on genetic algorithm

LI Jing¹, WANG Su-hua², GU Cai-lian¹

(1. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. Shangqiu Power Supply Company, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Reactive power optimization algorithm in distribution network based on genetic algorithm with distributed generation is proposed. Reactive power optimization mathematical model including distributed power generation system is constructed, the smallest loss and node voltage constraints are also taken into account, and reactive power output for distributed generation is optimized by using genetic algorithms. Simulation result shows that the optimization algorithm can effectively reduce the power loss and improve voltage quality.

Key words: distributed generation; genetic algorithm; reactive power optimization

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0060-04

0 引言

配电网无功优化控制是电力系统提高电压合格率、降低损耗的重要手段之一, 进行配电网优化, 首先要保证电压质量, 电压是电能质量的重要指标之一, 配电网的无功功率控制应要满足其在各种正常及事故后各节点电压水平的需要, 保证电压质量, 使电压偏移在规定的范围内。其次, 力争经济性能最佳, 即有功损耗最小。再次, 配电网中无功源随时能满足无功功率的需求。最后, 要求配电网中无功功率控制要采用就地平衡, 分层分区控制的原则。本文介绍了一种基于遗传算法的无功优化算法。

1 分布式发电的简介

分布式发电(Distributed Generation, DG)指的是直接接入配电网或用户侧的发电系统, 功率等级一般在几十千瓦到几十兆瓦之间, 经济、高效、可靠地发电。

根据使用的技术进行分类, DG主要可分为以下几类: (1) 以天然气为常用燃料的燃气轮机、内燃

机和微燃机等为基本核心的发电系统。它是目前最成熟最具有商业竞争力的分布式发电电源。(2) 燃料电池发电系统。燃料电池按照电化学的原理, 等温的把贮存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能。这种发电系统的发电效率几乎是传统发电厂发电效率的两倍, 并且排放量小, 噪音低。(3) 太阳能光伏电池发电系统。它是利用半导体材料的光电效应直接将太阳能转换为电能, 具有不消耗燃料, 不受地域限制, 规模灵活, 无污染, 安全可靠, 维护简单等优点。(4) 风力发电系统。风能是指太阳辐射造成地球各部分受热不均匀, 引起各地温差和气压不同, 导致空气运动而产生的能量。风力发电技术是将风能转换为电能的发电技术。(5) 生物质能发电系统。生物质能发电是首先将生物质转化为可驱动发电机的能量形式(如燃气、燃料、酒精等), 再按照通用的发电技术发电。

以上的分布式发电系统普遍具有以下的特点:

(1) 经济性。由于DG可用发电的余热来制热、制冷, 因此能源得以合理的梯级利用, 从而可提高能源的利用效率(达70%~90%), 此外还可降低初

级投资费用和网损。(2) 环保性。因其采用天然气做燃料或以氢气、太阳能、风能为能源,故可减少有害物的排放总量,减轻环保的压力;大量的就近供电减少了大容量远距离高压输电线的建设,由此不但减少了高压输电线的电磁污染,也减少了高压输电线的征地面积和线路走廊,减少了对线路下树木的砍伐,有利于环保。(3) 能源利用的多样性。分布式发电可利用多种能源,如洁净能源(天然气)、新能源(氢)和可再生能源(风能和太阳能等),并同时为用户提供冷、热、电等多种能源应用方式,因此是解决能源危机和能源安全问题的一种很好的途径。(4) 调峰作用。夏季和冬季往往是负荷的高峰时期,此时如采用以天然气为燃料的燃气轮机等冷、热、电三联供系统,不但可解决冬夏季的供热与供冷的需要,同时也提供了一部分电力,由此可降低电力峰荷,起到了电力调峰的作用。此外,也部分解决了天然气供应时的峰谷差过大问题,发挥了天然气与电力的互补作用。(5) 安全性和可靠性。当大电网出现大面积停电事故时,具有特殊设计的分布式发电系统仍能保持正常运行,由此可提高供电的安全性和可靠性。(6) 边远地区的供电问题。我国许多边远及农村地区远离大电网,因此难以从大电网向其供电。采用太阳能光伏发电、风力发电和生物质能发电的独立发电系统,不失为一种优选的方法。

2 分布式发电系统无功优化的数学模型

含分布式发电的配电网的无功优化即分布式电源发出的无功功率的控制来降低系统有功网损并保证节点电压在规定范围内。其数学模型包括目标函数、潮流方程等式约束和不等式约束三个部分。

(1) 目标函数

选取目标函数为网损最小,即有

$$\min F = P_{\text{loss}} = \sum_{i=1, j \in H}^n G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

其中: P_{loss} 为网损; U_i, U_j 为节点 i, j 的电压幅值; $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$ 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳和电压相角差; H 表示所有与节点 i 直接相连的节点集合。

(2) 潮流方程等式约束

各节点有功功率和无功功率平衡的约束条件如下:

$$P_i = U_i \sum_{j \in H} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in H} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

其中: P_i, Q_i 为节点 i 的注入有功、无功; U_i, U_j 为节点 i, j 的电压幅值; $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$ 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳和电压相角差; H 表示所有与节点 i 直接相连的节点集合。

(3) 不等式约束

配电网无功优化问题中的变量可分为控制变量和状态变量。他们需满足的条件为:

控制变量需要满足:

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中: $Q_{gi \max}, Q_{gi \min}$ 为无功补偿容量的上、下限值; n 为接入的分布式电源的台数;

状态变量需要满足:

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (i = 1, 2, \dots, m, i \neq s) \quad (4)$$

其中: $U_{i \max}, U_{i \min}$ 为节点电压幅值的上、下限值; m 为负荷节点的个数; s 代表平衡节点。

(4) 以负荷节点电压越界为罚函数的扩展目标函数

无功优化问题的控制变量约束,可通过设定控制变量的搜索边界自动满足,状态标量约束通常采用罚函数法处理。罚函数法是将越界的不等式约束以惩罚项的形式附加在原来的目标函数上,从而构成一个新的目标函数。应用罚函数的思想,配电网无功优化目标函数可转化为:

$$\min F = P_{\text{loss}} + \lambda \sum_{i=1, i \neq s}^n \left| \frac{\Delta V_i}{V_{i \max} - V_{i \min}} \right|^2 \quad (5)$$

式中: λ 为负荷节点电压越限的罚因子; ΔV_i 为负荷节点 i 的电压越限偏差值; 当 $V_i \leq V_{i \min}$ 时, $\Delta V_i = V_{i \min} - V_i$; 当 $V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$ 时, $\Delta V_i = 0$; 当 $V_i \geq V_{i \max}$ 时, $\Delta V_i = V_i - V_{i \max}$ 。

根据以上所确定的目标函数和约束条件,把具体的优化模型化为一般的数学模型为:

$$\begin{cases} \min f(u, x) \\ h(u, x) = 0 \\ g(u, x) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

3 基于遗传算法的无功优化流程

3.1 遗传算法的特点

遗传算法(GA)是美国密西根大学的 Hdland 教授于 1926 年首先提出来的,是一种基于自然选择和基因遗传学原理的优化搜索方法。与传统的优化

算法相比，遗传算法具有如下特点：

(1) 它不是从单个点，而是从多个点构成的群体开始搜索。

(2) 在搜索最优解过程中，只需要由目标函数值转换得来的适应信息值，而不需要导数、连续等其它辅助信息。

(3) 搜索过程不易陷入局部最优解。

3.2 无功优化流程简介

基于遗传算法的分布式发电系统无功优化流程如下：

(1) 输入原始数据。包括含分布式发电的配电网线路信息（节点信息、各支路阻抗信息和各负荷节点信息），变量范围，遗传算法参数。

(2) 编码及初始种群的产生。

(3) 解码并进行潮流计算。采用 MATPOWER 软件计算每一个个体对应的网络潮流。

(4) 计算目标函数适应值。根据潮流计算结果计算目标函数对应个体适应值。

(5) 评价选择优良个体。将每一代最优个体及其对应的目标函数值进行保存，并将产生的优良个体进入繁殖库。

体进行选择、交叉、变异等遗传操作，产生新的个体群。

(7) 循环进行遗传操作和潮流计算，直到满足迭代次数，最后输出最优结果。

基于遗传算法的无功优化流程图如图 1 所示。

4 实例分析

文章以 16 节点算例为例验证本算法，该算例为链式网络，网络结构如图 2 所示。

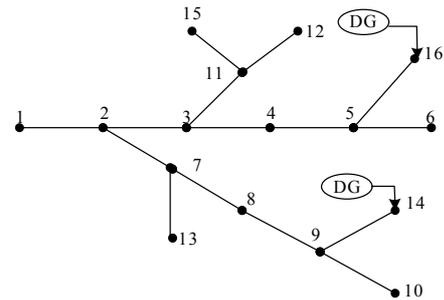


图 2 16 个节点含分布式发电的网络结构图

Fig.2 Distributed generation system of 16 nodes

表 1 优化前后各节点电压

Tab.1 The node voltage comparison before and after optimization

节点号	下限值	上限值	初始状态	优化结果
1	1.00	1.05	1.020 0	1.020 0
2	1.00	1.05	1.005 2	1.006 7
3	0.95	1.00	0.994 3	0.996 7
4	0.95	1.00	0.989 5	0.993 7
5	0.95	1.00	0.986 9	0.992 7
6	0.95	1.00	0.980 8	0.986 5
7	0.95	1.00	0.998 8	1.000 0
8	0.95	1.00	0.995 9	0.999 9
9	0.95	1.00	0.993 0	0.999 5
10	0.95	1.00	0.985 6	0.992 1
11	0.95	1.00	0.984 6	0.987 0
12	0.95	1.00	0.972 9	0.975 3
13	0.95	1.00	0.996 0	0.998 8
14	0.95	1.00	1.001 4	1.000 0
15	0.95	1.00	0.977 8	0.980 2
16	0.95	1.00	0.990 2	0.999 9

该配电网包括 16 个节点，其中节点 1 为平衡节点，其他节点为 PQ 节点，2 个分布式发电接入位置（节点 14 和节点 16）。本算例采用的遗传算法参数值为：交叉概率为 0.85，变异概率为 0.001，每一代种群的规模为 20 个个体，迭代次数为 120 次。

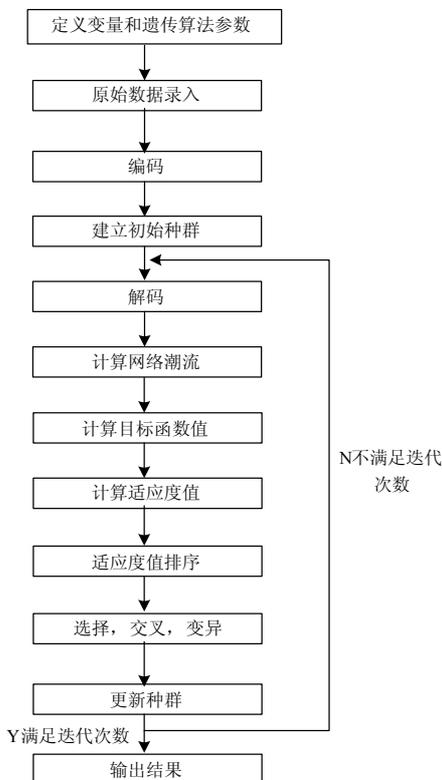


图 1 基于遗传算法的无功优化流程图

Fig.1 The flow chart of reactive power optimization based on genetic algorithm

(6) 选择，交叉，变异。对进入繁殖库中的个

优化前后的节点电压数据如表 1, 补偿的无功出力容量如表 2 所示。表 1 中的数据为标么值, 基准电压为 10 kV。表 2 中的数据为实值, 单位为 MW。

表 2 无功出力容量

无功出力	下限值	上限值	初始状态	优化结果
Q_{14}	0	2.00	0	1.205 6
Q_{16}	0	2.00	0	1.675 3

无功优化的时间为 1 021.65 s, 网损由 0.602 MW 下降到 0.462 MW, 下降了 23.3%。目标函数值的变化如图 3。

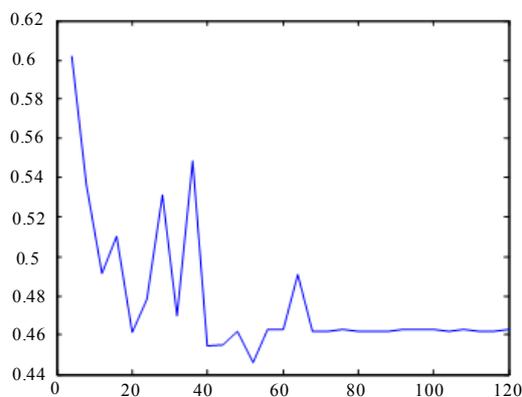


图 3 目标函数值变化图

Fig.3 Change of objective function

5 结论

本文研究了含多分布发电的配电网的无功优化模型与算法方面的研究工作, 确定了以网络损耗最小为目标函数, 以潮流方程约束为等式约束, 以分布式发电的无功出力为控制变量, 构造罚函数求解并以遗传算法进行寻优。并通过实例仿真验证了该遗传算法是可行的, 具有较强的收敛性和快速性, 对于减少网络的功率损耗和提高电压质量有一定的作用。

参考文献

- [1] 贾德香, 唐国庆, 韩净. 基于改进模拟退火算法的电网无功优化[J]. 继电器, 2004, 32(4): 32-35.
JIA De-xiang, TANG Guo-qing, HAN Jing. Reactive Power Optimization of Power System Based on Modified

Simulated Annealing Algorithm[J]. Realy, 2004,32(4): 32-35.

- [2] 王洪章, 熊信良, 吴耀武. 基于改进Tabu搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 15-18.
WANG Hong-zhang, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Reactive Power Optimization of Power System Based on Modified Tabu Search Algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 15-18.
- [3] 刘科研, 盛万兴. 基于改进免疫遗传算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 11-16.
LIU Ke-yan, SHENG Wan-xing. Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Immune Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 11-16.
- [4] 苏琳. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化(硕士学位论文)[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
SU Lin. Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm, Thesis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [5] 戴育辉. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化(硕士学位论文)[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
DAI Yu-hui. Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm, Thesis [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [6] 方鹤飞, 王惠祥, 黄晓烁. 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): 28-32.
FANG Ge-fei, WANG Hui-xiang, HUANG Xiao-shuo. Application of Improved Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization of Power System[J]. Proceeding of the EPSA-CUS, 2003, 15(4): 28-32.

收稿日期: 2009-10-09; 修回日期: 2009-11-06

作者简介:

李晶 (1964-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: lijing@sie.edu.cn

王素华 (1971-), 女, 继电保护技师, 从事继电保护工作;

谷彩连 (1980-), 女, 讲师, 研究方向为电力系统自动化。