

含有分布式发电的配电网重构研究

崔金兰, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 分布式发电作为现有电力系统的有益补充, 具有广阔的发展前景。分析了分布式发电并网对配电网重构问题的影响。在应用遗传算法时, 采用了以网络中环路数为染色体长度, 环路开关号为染色体基因的十进制编码策略, 结合提出的三条禁忌规则, 以纠正染色体不在可行解空间的问题; 潮流算法采用以分布式发电为“负”负荷模型的前推回代法, 更加符合配电网的实际情况。研究结果表明, 对含有分布式电源的配网优化重构后, 可在更大程度上减少网损, 并对电压起到一定的支撑作用。最后对含有分布式发电的配网重构问题的未来研究方向进行了探讨。

关键词: 电力系统; 分布式发电; 配电网重构; 遗传算法

Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation

CUI Jin-lan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan

(Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: There is a growing interest in distributed generation (DG) as an alternative for supplying electric power. This paper discusses the network reconfiguration at the power distribution systems with distributed generations (DG) based on Genetic Algorithm (GA). The GA takes loop switch label as gene and loop number as chromosome length for coding, with three tabu rules, to restrain the infeasible solution. The backward-forward power flow algorithm is used with DG as negative load model. From the results of this paper, it can be seen that DGs have the effects of loss reduction and voltage profile improvement over feeders. And at last, the research trend of this problem is debated.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50577044).

Key words: power system; distributed generation; network reconfiguration; genetic algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0037-04

0 引言

近年来分布式发电 DG (distributed generation) 以其独有的环保性、经济性引起人们越来越多的关注, 将成为 21 世纪电力工业的发展方向之一。已有研究指出, 到 2010 年, 新增分布式电源总容量将占新增电源总容量的 20%^[1]。

随着与配电系统并网运行的分布式电源容量的增加, DG 将对配电网的各个方面产生不可忽略的影响, 其中一个问题就是配电网重构。配电网重构是配电网优化运行的一种手段, 网络重构是通过改变线路开关的开合状态来变换网络拓扑结构, 以平衡各馈线的负荷、消除过载、降低网损, 从而提高网络的供电能力。由于配电网含有大量的常闭和常

开开关, 所以决定各个开关状态的网络重构问题是一个复杂的大规模非线性整数组合优化问题。

目前, 众多学者提出了很多方法解决配电网重构问题^[2-6], 但只有很少文献考虑了 DG 对此问题的影响。文献[7]以提高 DG 渗透率为目标进行了网络优化, 提出, 现行的“先到先服务”原则可能对后续 DG 的安装容量有阻碍作用。文献[8]考虑了含有 DG 的配电自动化系统中故障恢复情况下的配电网重构。文献[9]基于启发式算法, 简要介绍了 DG 并网后的配电网重构问题, 着重研究了含有 DG 的配电网网损分摊问题。

本文分析了分布式电源对配电网重构问题的影响, 基于改进的遗传算法对含有 DG 的配电系统优化重构并对优化结果进行了分析研究, 最后对该问题今后的研究重点及方向进行了探讨。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577044)

1 网络重构的数学模型

配电系统中一般有两种类型的开关：联络开关和分段开关。本文中网络重构问题的主要任务是确定配电网络中哪些联络开关需要闭合、哪些分段开关需要打开，以使最终的配网具有最小的线路损耗。可用数学公式描述为

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{L_i} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

式中： L_i 为线路总数； r_i 为支路电阻； P_i 为有功功率； Q_i 为无功功率； V_i 为功率注入节点的电压幅值。

含有 DG 的配电网重构应当满足如下约束条件：(1)配电网的潮流约束；(2)节点电压、电流约束；(3)配电网辐射状运行且无孤岛；(4)分布式发电容量约束等。

2 分布式发电对配电网重构问题的影响

DG 并网对配电系统各个方面都产生一系列影响，例如配电网规划、负荷预测、继电保护等等，这些问题中与配网重构紧密相关的是负荷预测和潮流计算。

2.1 分布式发电并网对负荷预测的影响

配电网重构的计算是建立在一定的负荷数据上的，因此负荷值对于配电网重构的计算结果有比较大的影响。DG 并网后由于 DG 的分散性和灵活性使得配电网负荷预测更加困难。

就短期负荷预测而言，其最大的特点是具有明显的周期性，且明显受到环境因素的影响。而分布式发电的主要组成部分地方小水电、风力发电、太阳能发电等都是环境敏感型的发电形式。以地方小水电的影响为例。在我国大部分地区，地方小水电由于数量众多、单机容量偏小、分散面广等客观原因，无法将其纳入统一调度范围。由此导致的结果是，电网调度部门只是关心网供负荷的数据，这对其安排统一调度机组的发电计划至关重要。但是，真正具有规律性的是全社会用电负荷；同时，地方小水电受气候影响明显，有了降雨就可以发电上网，没有来水就不发电。这种实际情况对网供负荷具有重大影响。因而，如果不参考小水电的变化情况，单纯依靠网供负荷自身的发展趋势进行负荷预测，则势必带来较大误差。

目前提及分布式发电的负荷预测文献极少，但

随着分布式发电在电力系统中的逐步渗透，考虑到分布式发电影响的负荷预测将成为一个值得研究的课题。

2.2 分布式发电并网对潮流计算的影响

目前的配电网潮流计算方法中没有考虑各种形式的 DG，因而随着不同形式 DG 的并网，配电网潮流计算难度将增大，一些传统计算方法将因未考虑 DG 的影响而失效。含 DG 的配电网潮流计算与普通潮流计算的区别之一是：DG 的潮流计算模型与传统发电机组计算模型不一致。传统发电机节点在潮流计算中一般取为 PQ 节点、PV 节点或平衡节点，而 DG 有特殊性，其节点能否取为这 3 类节点类型需要全面考虑^[10]。潮流计算中究竟如何选取 DG 的节点类型目前还没有得到充分研究^[11]，这与各种 DG 的运行方式和控制特性不确定有关。

文献[10]建立了异步发电机、具有无励磁调节能力的同步发电机和燃料电池各自在潮流计算中的数学模型，提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法。文献[12]运用牛顿—拉夫逊法求解带分布式电源的配电网潮流，将发电机视为有功功率恒定的受控电压源。文献[13]研究了分布式发电系统中风力发电和太阳能发电的随机出力对配电系统电压质量的影响，建立了风力发电和太阳能发电的随机分析模型，通过随机潮流计算得到了节点电压概率密度曲线和系统年期期望电压越限小时数。文献[14]提出了基于牛顿法的能够处理各种分布式电源的配电网不平衡三相潮流计算方法。

3 含分布式发电的配电网重构

3.1 改进的遗传算法

遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 是 J.Holland 于 1975 年受生物进化论的启发而提出的^[15]。GA 将问题的求解表示成“染色体”的适者生存过程，通过群体的世代进化(包括复制、交叉和变异等操作)，求得问题的最优解或满意解。

3.1.1 染色体编码

遗传算法的基础是染色体，它反映了所要解问题的特征，其编译情况直接影响到整个算法的操作和运算速度。虽然配网重构过程就是开关的开合过程，在遗传算法中似乎用 0, 1 编码表示很恰当，但开关的开合不是任意组合的，必须注意到配电网的性质：在整个配电网中，相对于常闭开关而言，联络开关只占非常小的一部分，且当任意 1 个联络开关闭合时，只需把环网中的 1 个一般开关断开。因此可以这样说，一个联络开关决定一个环网。在这个环里只有

一个开关是打开的,其余全部合上。如果用二进制 0, 1 编码,开关的开合是自由组合的,会产生大量的不可行解。

基于上述原因,本文采用十进制编码规则,以网络中环路数为染色体长度,环路开关号为染色体内容的编码方式。

3.1.2 适应度函数

用 GA 处理约束条件时,传统的方法是使用罚函数,即在适应度函数上再加上由罚因子构成的罚函数项。但这种方法生成的新目标函数的最优解依赖于罚因子的选择,而且无论罚因子过小或过大都会给求解最优解带来困难。本文直接将网损值的倒数作为染色体的适应度值^[16]不需要罚因子而直接比较个体优劣。

3.1.3 禁忌规则

即使采用本文的编码方法仍然存在部分不可行解的问题。为了及时有效地改正不可行解问题,本文基于配电网的特点制定了几条交叉和变异所遵循的规则:

(1)不在环网的支路开关号不纳入形成染色体的开关集合中;

(2)确定染色体中无相同的开关号;

(3)属于两个或两个以上环路的公共开关出现在同一个染色体中的数量不能超过一个。

其中规则 1 是为了提高算法效率,尽可能地缩小搜索范围;规则 2 保证相对于给定编码的配电网无环网存在;规则 3 则是为了保证相对于给定编码的配电网没有孤岛存在。根据本文的编码方法,结合制定的禁忌规则,可以及时采取措施纠正染色体不在解空间的问题,进一步减少了不可行解。

3.1.4 其他策略

在遗传进化过程中,交叉操作采用随机定位、单点交叉的方式。进行变异操作时,首先随机选定要变异的基因,然后在此基因所对应的环路开关集合中随机选定一个其他开关来替换作为当前基因的开关。算法以是否达到最大进化代数作为终止条件。

3.2 对分布式发电的处理

本文假设系统负荷恒定;潮流算法采用适合于配电网的前推回代算法, DG 采用恒功率模型,把 DG 看作并网节点上的其功率值为负的负荷;另外由于分布式电源的出力受到诸如风速、太阳辐射强度等不确定性因素的影响,如果分布式电源总容量所占比例过高,将导致系统的电能质量下降,因此算例中 DG 容量未超过系统总容量的 25%^[17]。

3.3 算法流程

(1)初始化,输入网络原始数据(包括分布式

电源的安装位置及容量),以此确定染色体长度(即网络形成的环路数),设置种群规模 M 和遗传算子参数,设置最大迭代次数 G ;

(2)计算含有分布式电源的配电网潮流,得到各染色体适应度值;设定当前迭代次数 $G_i=1$;

(3)进行遗传操作;得到新种群;

(4)判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数 G ,若不满足,置迭代次数 $G_i=G_i+1$;反之,输出群体最优解;

(5)判断新种群各染色体是否满足 3.1.3 节三条禁忌规则,若满足,转到步骤 2,反之,对违反禁忌的基因随机修正后,转到步骤 2;

4 算例分析

本文算例取自文献[18]的 33 节点配电网,额定电压为 12.66 kV,有 37 条支路,5 个联络开关{33, 34, 35, 36, 37},总负荷为 3715kW+j2300kvar。DG 的并网节点和容量如表 1 所示,DG 一般安装在较重负荷节点。

表 1 分布式电源的安装节点及容量

Tab.1 Installation node and capacity of DG

节点号	容量 (kW/p. F.)
4	60/0.85
8	100/0.9
25	200/0.9
30	250/0.8

表 2 优化计算结果

Tab.2 The optimization results

	初始网络	无 DG 优化网络	含 DG 优化网络
网损/MW	202.66	139.55	89.43
最低电压	0.9101	0.9380	0.9420

运行算法程序后,得到的最优重构方案为打开开关 7, 9, 14, 28, 32。如表 2 所示初始系统网损为 202.66 MW,未接入 DG 前的最优网络损耗为 139.55 MW,并入 DG 后,系统网损减少到 89.43 MW,比初始系统减少了 55.9%,可见 DG 可以在很大程度上减少配电系统损耗;而且 DG 并网后,配电网的最优运行结构也随 DG 并网位置及容量的不同而变化。另外,由此例分析可见,DG 入网对系统电压有一定的支撑作用,但效果并不特别显著,这与此例中 DG 入网位置及其容量都不是最优而是具有一定的随意性密切相关。

实际的电力系统中,DG 的安装位置及容量一般都不是最优的,因为 DG 一般由用户所有;但 DG 的并网位置及容量对配电网有很大影响,如果 DG

在配网中安装不恰当,对电力系统甚至会带来诸多负面影响。因而,从系统规划的角度,考虑 DG 并网位置、并网容量的配电网综合优化重构,对提高电力系统的安全可靠性,经济效益都有重要的作用。

5 结论

长期以来,配电网重构问题一直侧重于搜索算法的研究,随着 DG 在配电网中的逐步渗透,研究重点应该有所偏移,需要对 DG 装置的快速渗透对现有电网的影响及其交互作用机制进行多层次、多方面的研究:(1)根据不同类型 DG 的特点,研究 DG 高度渗透系统的建模方法,建立含有随机能量预测的概率模型、电网发电量预测模型;采用灰色关联、神经网络、小波分析等技术建立比较精确的负荷预测模型,提高负荷预测精度;(2)研究含各种不同形式 DG 的配电网随机潮流模型与算法;(3) DG 并网的位置和容量对配电系统减少损耗、平衡负载等都有很大影响,但这对于 DG 用户来说却不是必须的。如何制定相关政策法规或对 DG 用户采用何种激励机制也是亟待解决的问题。

在新的电力市场下, DG 这一新能源形式的作用将会日益明显和重要。相关部门应该加大对该方面研究的重视程度和支持力度,配电网重构作为问题之一,其研究深度和广度将直接影响到下一代 DG 高度渗透的配电网自动化系统的完善和发展。

参考文献

- [1] PENG F Z. Editorial Special Issue on Distributed Power Generation[J]. IEEE Trans on Power on Electronics, 2004,19(5):1157-1158.
- [2] 张栋,张刘春,傅正财.配电网重构的快速支路交换法[J].电网技术,2005,29(9): 82-88.
ZHANG Dong,ZHANG Liu-chun, FU Zheng-cai. A Quick Branch-exchange Algorithm for Reconfiguration of Distribution Networks[J].Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.
- [3] 刘蔚,韩祯祥.基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J].电网技术,2004,28(19):29-33.
LIU Wei, HAN Zhen-xiang. Distribution Network Reconfiguration Based on Optimal Flow Pattern Algorithm and Genetic Algorithm[J].Power System Technology,2004, 28(19):29-33
- [4] 靳晓凌,赵建国.基于改进二进制粒子群优化算法的负荷均衡化配电网重构[J].电网技术,2005,29(23):41-43.
JIN Xiao-ling, ZHAO Jian-guo. Distribution Network Reconfiguration for Load Balancing Based on Improved Binary Particle Swarm Optimization [J]. Power System Technology, 2005, 29(23):41-43.
- [5] 余贻鑫,段刚.基于最短路算法和遗传算法的配电网

- 重构[J].中国电机工程学报,2000, 20(9):44-49.
YU Yi-xin,DUAN Gang. Shortest Path Algorithm and Genetic Algorithm Based Distribution System Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 44-49.
- [6] 毕鹏翔,刘健,张文元.配电网重构的改进支路交换法[J].中国电机工程学报,2001,21(8): 98-103.
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Refined Branch-exchange Algorithm for Distribution Network Reconfigurations[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(8): 98-103.
 - [7] Calderaro V, Piccolo A, Siano P. Maximizing DG Penetration in Distribution Networks by means of GA Based Reconfiguration[EB/OL]. <http://www.ieeeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=10666,2006-03-06>
 - [8] Joon-Ho Choi, Jae-Chul Kim, Seung-II Moon. Integration Operation of Dispersed Generations to Automated Distribution Networks for Network Reconfiguration[A]. In:IEEE Bologna Power Tech Conference[C]. Bologna(Italy): 2003.
 - [9] de Oliveira M E, Ochoa L F, PadilhaFeltrin A, et al. Network Reconfiguration and Loss Allocation for Distribution Systems with Distributed Generation[A]. In:IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition[C].Latin America:2004.
 - [10] 陈海众,陈金富,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):35-40.
CHEN Hai-zhong, CHEN Jin-fu,DUAN Xian-zhong. Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1):35-40.
 - [11] Zhu Y, Tomsovic K. Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems with Dispersed Generation[J]. IEEE Trans on Power Delivery.
 - [12] Singly A H, Klingensmith L H W N. Three Phase Power Flow for Distribution Systems with Dispersed Generation[A]. In: 14th PSCC[C]. Sevilla:2002.
 - [13] 王成山,郑海峰,谢莹华,等.计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J].电力系统自动化,2005, 29(24): 39-44.
WANG Cheng-shan, ZHENG Hai-feng, XIE Ying-hua, et al. Probabilistic Power Flow Containing Distributed Generation in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
 - [14] 王守相,黄丽娟,王成山,等.分布式发电系统的三相不平衡潮流计算[J].电力自动化设备,2007,27(8):11-15.
WANG Shou-xiang,HUANG Li-juan,WANG Cheng-shan, et al. Unbalanced Three-phase Distributed Power Flow Calculation for Distributed Power Generation System[J].Electric Power Automation Equipment, 2007,27(8):11-15.

(下转第 49 页 continued on page 49)

图6所示。

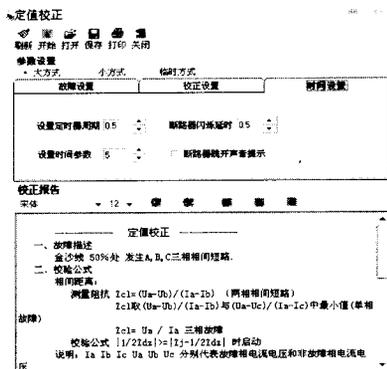


图6 定值校正界面

Fig.6 Interface of relay rectification

本定值校正系统可作为可视化继电保护整定计算综合管理系统的一个重要部分,解决了整定计算软件定值无法通过实际故障来验证其选择性和灵敏度的问题,减少了定值配合失误带来的各种事故,试运行效果良好;而且随着电力通信网络的迅速发展以及电力系统自动化水平的不断提高,在线校正更将展现良好的实用价值和应用前景。

5 结论

本文在分析定值校正必要性及定义的基础上,对实现定值在线校正的关键技术、功能结构和过程进行了详尽的阐述,并结合 VC++、.NET 可视化编程技术与 SQL2000 数据库技术,对其进行了软件实现,并通过实验验证了定值校正功能的实用性。

参考文献

- [1] 王明俊.大电网继电保护自动装置的隐藏故障、脆弱性和适应性[J].电力自动化设备, 2005, 25(3):4-8.

(上接第40页 continued from page 40)

- [15] Holland J H. Genetic Algorithm[J].Scientific American, 1992,9(7):44-50.
- [16] 毕鹏翔,刘健,刘春新,等.配电网重构的改进遗传算法[J].电力系统自动化,2002,26(2):57-61.
- BI Peng-xiang,LIU Jian,LIU Chun-xin, et al. A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(2):57-61.
- [17] 朱守真,张昊,郑竟宏,等.分布式电源与配电系统并网运行的探讨[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2005, 1(4):1-4.
- ZHU Shou-zhen,ZHANG Hao,ZHENG Jing-hong, et al. Discussion on Parallel Operation Between Distributed Generator and Distribution System[J]. Journal of

WANG Ming-jun. Hidden Failure Vulnerability and Adaptability of Relaying Automations in Large Interconnected Power Systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2005, 25(3):4-8.

- [2] 曾耿晖,李银红,等.电力系统继电保护定值的在线校正[J].继电器, 2002, 30 (1):24-26.
- ZENG Geng-hui, LI Yin-hong, et al. A Discussion About On-line Verifying of Relay Setting in Power System[J]. Relay, 2002, 30 (1):24-26.
- [3] 王慧芳,何奔腾.电网继电保护定值校正软件研究[J].电力系统及其自动化学报, 2006,18(2):90-94.
- WANG Hui-fang, HE Ben-teng. Study on Software of Relay Settings Examination and Rectification[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2006,18(2):90-94.
- [4] 段献忠,杨增力,等.继电保护在线整定和离线整定的定值性能比较[J].电力系统自动化,2005,24(19): 64-67.
- DUAN Xian-zhong, YANG Zeng-li, et al. Performance Analysis of Relay Settings Determined According to Off-line Calculation and On-line Calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,24(19): 64-67.
- [5] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社, 2002.
- [6] 高翔,张培超,等.电网故障信息系统应用技术[M].北京:中国电力出版社, 2007.

收稿日期:2007-11-07

作者简介:

李文清(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail:liwenqingjiangwei@163.com

姜伟(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场;

刘前进(1967-),男,副教授,主要研究方向为电力系统继电保护及电力系统智能控制。

Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2005,1(4):1-4.

- [18] Goswami S K, Basu S K.A New Algorithm for Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization [J].IEEE Trans on Power Delivery,1992,7(3):1484-1491.

收稿日期:2007-11-21; 修回日期:2008-03-06

作者简介:

崔金兰(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制,分布式发电; E-mail: everyou_81@yahoo.cn

刘天琪(1962-),女,博士,教授,IEEE会员,研究方向为电力系统稳定与控制,高压直流输电和调度自动化;

李兴源(1945-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE高级会员,研究方向为电力系统分析,电力系统稳定和控制等方面。