

DOI: 10.7667/PSPC170262

# 基于改进遗传算法的含分布式电源和储能装置 配电系统网络重构

江卓翰<sup>1</sup>, 何禹清<sup>1</sup>, 曹丽璐<sup>2</sup>, 徐超<sup>1</sup>, 禹海峰<sup>1</sup>, 刘博<sup>1</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410000; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 通过以有功网损最小为目标建立配电网重构数学模型, 应用改进的遗传算法寻求含分布式电源和储能装置配电网的最优重构方案。该算法采用一种十进制编码方式, 将配电网中环网个数作为染色体长度, 环网中各开关开合状态作为组成染色体基因。在潮流计算中把分布式电源和储能装置等效为“负”的负荷, 并基于配电网特有的层次结构特性, 采用分层前推回代进行潮流求解。通过对 IEEE33 节点算例的计算表明, 对含分布式电源和储能装置的配电网进行重构, 可在很大程度上减少网络损耗和电压降落。

**关键词:** 配电网; 网络重构; 分布式电源; 储能装置; 改进遗传算法; 分层迭代

## Reconfiguration of distribution network with distributed generations and energy storing devices based on improved genetic algorithm

JIANG Zhuohan<sup>1</sup>, HE Yuqing<sup>1</sup>, CAO Lilu<sup>2</sup>, XU Chao<sup>1</sup>, YU Haifeng<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Limited Corporation Economy Institute, Changsha 410000, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The paper establishes a mathematical model of distribution network reconfiguration with minimum network loss as objective function. An improved genetic algorithm is used to seek the best reconfiguration scheme of distribution network with distributed generations and energy storing devices. The algorithm adopts a decimal encoding, which regards the number of loops as the length of the chromosome and the on/off states of the switches in loop network as the chromosome genes. The distributed generations and energy storing devices are equivalent to "negative" load in calculating power flow. Based on the unique hierarchical structure characteristics of the distribution network, the paper applies the layer-by-layer back/forward sweep method to solve load flow. Simulation result of IEEE33 node example indicates that the reconfiguring the distribution network with distributed generations and energy storing devices can decrease network loss and voltage drop to a large extent.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5216A016000K and No. 5216A2160004).

**Key words:** distribution network; network reconfiguration; distributed generation; energy storing device; modified genetic algorithm; hierarchical iteration

## 0 引言

近年来, 随着人们节能环保和可持续发展意识的增强, 风力发电、光伏发电、生物质能发电、燃料电池发电等类型的分布式电源(Distributed Generation,

DG)<sup>[1-3]</sup>越来越多接入到配电网中。储能装置作为一种特殊的分布式能源, 由于能够减小风电、光伏等分布式电源波动性出力对电网的影响, 在电网中逐步得到应用。由于这些分布式电源的接入, 配电网由传统的无源网络转变为有源网络, 这改变了配电网中潮流流向、节点电压水平、网络有功损耗, 对配电网规划和运维提出了更高要求。

为满足配电网可靠供电的需要, 配电网各条线

基金项目: 国家电网公司科技项目(5216A016000K, 5216A2160004)

路间通过大量开关互相联络, 这些开关打开或闭合的组合构成了大量不同的配电网网架结构。因此, 对配电网中所有开关开合状态进行组合优化是一个复杂且规模庞大的整数组合优化过程。研究一种计及分布式电源接入的网络重构算法, 辅助调度运行人员判断网络运行状况, 实现网络的优化运行, 具有重要的理论意义和现实意义。文献[4]将分布式电源处理为“负”负荷开展了基于改进遗传算法的配电网重构研究。文献[5]通过对遗传算法的交叉率和变异率两项关键指标进行自适应调整, 提高配电网重构过程中遗传算法的寻优速度。文献[6]提出了一种改进的二进制量子粒子群算法, 对含分布式电源的配电网重构模型进行求解。文献[7]将混合蛙跳思想引入粒子群算法, 针对配电网特点进行网络简化, 提出一种基于双重混合粒子群算法的配电网重构策略。文献[8]计及风电随机性和波动性进行配电网重构建模, 采用改进二进制粒子群算法进行模型求解。为了综合评价网络长期网损情况, 文献[9]基于边界分析理论建立了网损异常增量模型, 并运用该模型开展配电网重构研究。这些文献在提高计算效率时注重对寻优算法进行优化, 但未考虑潮流计算方法的改进。

本文在近年来国内外分布式电源接入配电网后对重构影响研究成果的基础上, 基于改进遗传算法开展含分布式电源和储能装置的配电网重构研究, 分析了分布式电源和储能装置安装位置对配电网重构的影响。主要研究特点如下: 一是采用一种十进制遗传算法编码方式, 即将配电网中环网个数作为染色体长度, 环网中各开关开合状态作为组成染色体基因; 二是在重构方案寻优过程中引入禁忌约束来改进算法计算效率; 三是采用分层前推回代进行潮流计算以提升计算效率。

## 1 数学模型

本文采用的配电网重构计算数学模型如式(1)所示。

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

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  表示节点注入的有功功率、无功功率;  $U_i$  表示注入功率节点电压幅值;  $r_i$  表示线路电阻值;  $L_i$  表示线路总条数。

本模型需要满足的约束条件如下所示。

### ① 潮流计算收敛性约束

当潮流计算时, 计算收敛性受到网络规模、计算初值选取等多个因素影响。在本文算例计算时将迭代计算超过 40 次仍无法收敛的方案视为网架不

合理重构方案。

### ② 电压幅值合格约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (2)$$

式中,  $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$  表示节点电压幅值的最低和最高要求。

### ③ 线路输送极限约束

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (3)$$

式中,  $S_{i\max}$  表示线路最大允许输送容量。

### ④ 网架结构约束

重构方案必须保证配电网为各线路相互联通的辐射结构。

### ⑤ 分布式电源渗透率约束

$$S_G \leq 0.25 S_L \quad (4)$$

式中:  $S_G$  表示分布式电源额定功率;  $S_L$  表示配电网的总负荷。

对于不满足约束条件①—③的重构方案, 本文的处理方法是用一个随机生成的满足约束条件的重构方案代替它。对于约束条件④, 通过采用十进制编码并配合禁忌约束规则, 所有重构方案将满足该约束。对于约束条件⑤, 在选取分布式电源容量时将得到满足。

## 2 树状网络潮流的分层前推回代法

配电网前推回代潮流计算过程为: 前推计算从网架结构末端向首端逐层计算线路功率, 回代计算从网架结构首端向末端逐层计算节点电压, 且前推和回代计算必须逐层进行<sup>[10]</sup>。虽然逐层计算制约了不同层次线路功率和节点电压的并行计算能力, 但由于同一层的各条线路功率和节点电压计算互不干扰, 完全满足并行计算的要求<sup>[11]</sup>。

本文采用如下矩阵表示配电网的网架结构<sup>[11]</sup>:

1) 电网分层矩阵  $C$ , 表示配电网网架结构中每一层包含的线路信息。

2) 线路首、末端节点矩阵  $S$  和  $M$ , 表示每条线路的首端和末端节点信息。

3) 电网层次关联矩阵  $G$ , 表示配电网网架结构中各线路之间的直接上下层关系。

在获得以上几个矩阵之后, 将采用恒功率模型分布电源和储能装置的发电功率加入到并网节点<sup>[3]</sup>, 即可对任意拓扑结构的含分布式电源和储能装置配电网进行并行的前推回代潮流计算。

## 3 计算步骤

### 3.1 运用改进遗传算法<sup>[12]</sup>进行重构的基本步骤

1) 编码: 本文采用十进制编码方式, 将配电网

中环网个数作为染色体长度，环网中各开关开合状态作为组成染色体的基因信息。

2) 生成种群：综合考虑重构网络的规模、结构和参数等因素进行种群规模选取。

3) 解码：为了将经过编码的染色体信息“翻译”为网络重构所需的断开开关编号，结合第 2 节中介绍的 4 个矩阵将染色体中信息解码成为相应的断开开关编号。

4) 选择：本文采用重构方案网络损耗的倒数作为适应度函数，运用轮盘赌选择方法进行选择操作。

5) 交叉：本文采用两点交叉操作即在染色体中随机选择两个位置，交换两染色体中相应于这两个位置之间的基因段。

6) 变异：本文采用基本位变异操作即对染色体中每一个基因按照一定变异概率做变异运算。

7) 进化操作：通过不断进化搜索最优重构方案，进化操作代数需根据网络规模合理选择。

### 3.2 禁忌规则

虽然采用十进制的编码方式能在一定程度上减少不可行解的产生，但在实际运算过程中仍然会产生一定数量的不可行解<sup>[13]</sup>。为此，本文引入了两条禁忌规则<sup>[4]</sup>：

1) 一个染色体中无相同的开关号。它保证给定编码配电网没有环网存在。

2) 一个染色体中属于两个及以上环网的公共开关最多为 1 个。它保证给定编码的配电网没有孤岛存在。

## 4 算例分析

采用本文方法对 IEEE33 节点<sup>[14]</sup>配电网进行重构计算，其网架如图 1 所示。该配电网包含 37 条线路和 5 个联络开关，即支路 8-21、9-15、12-22、18-33 和 25-29；额定电压 12.66 kV；有功负荷 3715 kW；无功负荷 2300 kvar。

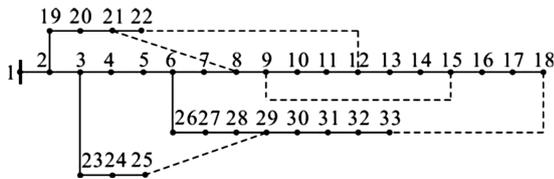


图 1 IEEE33 节点配电网

Fig. 1 IEEE33 node distribution system

基于 Matlab 环境编程实现上述算法，用编制的程序对 IEEE33 节点配电网进行网络重构计算。

1) 不考虑分布式电源的影响

不考虑分布式电源的影响，将本文方法与文献

[15-16]的方法分别应用于本算例。其中，文献[15-16]分别采用支路交换法和最优流模式法，计算结果比较如表 1 所示。

表 1 IEEE33 节重构结果对比

型式	重构前	文献[15]	文献[16]	本文
断开开关号	33,34,35, 36,37	6,11,31, 34,37	7,10,14, 36,37	7,9,14,32, 37
网损/kW	202.7	143.5	141.5	139.5

由表 1 的数据可见，重构前的网损为 202.7 kW<sup>[17]</sup>。文献[15-16]在优化后断开的开关与本文不同，系统的有功网损分别为 143.5 kW 和 141.5 kW，均大于本文的 139.5 kW。这说明本文的方法在不含分布式电源情况下找到了更好的重构方案。

2) 分布式电源和储能装置对重构的影响

首先假设分布式电源的输出功率为 16 kW，功率因数为 0.8。分别将该分布式电源安装在 17 节点和 31 节点时的计算结果如表 2 和表 3 所示。表中类型一表示无分布式电源时的重构结果；类型二表示在类型一重构方案基础上加入分布式电源的结果；类型三表示加入分布式电源后重新重构的结果。

表 2 16 kW/0.8 分布式电源位于 31 节点时网损和最低电压

重构类型	断开开关号	网络损耗/kW	最低电压/p.u.
类型一	7,9,14,32,37	139.551	0.938
类型二	7,9,14,32,37	118.705	0.947
类型三	7,9,14,32,37	118.705	0.947

表 3 16 kW/0.8 分布式电源位于 17 节点时网损和最低电压

重构类型	断开开关号	网络损耗/kW	最低电压/p.u.
类型一	7,9,14,32,37	139.551	0.938
类型二	7,9,14,32,37	125.343	0.938
类型三	7,9,14,31,37	121.269	0.942

对比表 2 和表 3 一二行的数据可知：31 节点在加入分布式电源前后网络损耗由 139.551 kW 降为 118.705 kW，网络损耗下降了 14.94%；17 节点在加入分布式电源后网络损耗由 139.551 kW 降为 125.343 kW，网络损耗下降了 10.18%。但分布式电源对于减少电压下降并没有十分明显的效果，甚至在 17 节点加入分布式电源后的网络最低电压与加入前基本一致。

对比表 2 和表 3 二三行的数据可知：31 节点在加入分布式电源后并没有影响网络的重构，最小损

耗的网络拓扑结构没有发生变化, 因而网络损耗和最低电压不变; 17 节点在加入分布式电源之后网络的最小损耗拓扑结构发生了变化, 若进行网络重构, 则网络损耗可进一步由 125.343 kW 减少为 121.269 kW, 网络损耗下降了 3.25%。由以上分析可以看到分布式电源安装位置的不同对配电网重构的影响。

若储能装置充/放电功率为 16 kW 且与分布式电源接入同一节点, 由于分布式电源满出力-储能装置处于充电状态(即分布式电源和储能装置总出力为零)时电网与未安装分布式电源时运行状态一致, 因此本文不再分析。分布式电源满出力-储能装置处于放电状态(即分布式电源和储能装置总出力为 32 kW)时, 分布式电源和储能装置位于 17 节点时对配电网重构的影响如表 4 所示。

表 4 16 kW/0.8 分布式电源和 16 kW 储能装置位于 17 节点时网损和最低电压

Table 4 Reconstruction result when distributed generation (16kW/0.8) and energy storing device (16 kW/0.8) is located on node 17

重构类型	断开开关号	网络损耗/kW	最低电压/p.u.
类型一	7,9,14,32,37	139.551	0.938
类型二	7,9,14,32,37	116.662	0.938
类型三	7,9,14,16,37	105.297	0.947

对比表 4 与表 3 可知: 若分布式电源和储能装置同时满出力, 在重构类型二条件下的网络损耗由 125.343 kW 减少为 116.662 kW, 网络损耗减少了 6.93%; 在重构类型三条件下网络损耗由 121.269 kW 减少为 105.297 kW, 网络损耗减少了 13.17%。与此同时, 在分布式电源和储能装置同时满出力条件下重构类型三对应的网络电压降落也有所减少。

由上可见分布式电源安装位置以及是否配置储能装置对配电网重构方案有很大影响。

## 5 结论

本文运用树状网络分层前推回代法编制配电网潮流计算程序, 将分布式电源和储能装置作为恒定负值“负荷”处理, 基于改进遗传算法进行含分布式电源和储能装置的配电网重构方案寻优求解。结合算例, 分析含分布式电源和储能装置的配电网重构对系统网络损耗和电压降落的影响。通过对重构前后网络损耗和最低电压的分析比较可以发现: 分布式电源和储能装置的加入可以在很大程度上减少配电网的损耗, 并对节点电压起到一定支撑作用。同时, 须注意分布式电源和储能装置的并网位置对配电网的影响, 考虑分布式电源和储能装置并网位

置差异的配电网综合优化重构研究对于提高电力系统的安全性和经济性都有重要作用。

## 参考文献

- [1] 梁志鹏, 谢正武. 中国分布式发电的机遇和挑战[J]. 节能与环保, 2004(11): 11-13.  
LIANG Zhipeng, XIE Zhengwu. The opportunity and challenge to the development of decentralized generation in China[J]. Energy Conservation and Environment Protection, 2004(11): 11-13.
- [2] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.  
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [3] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [4] 崔金兰, 刘天琪, 李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 38-40.  
CUI Jinlan, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 38-40.
- [5] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.  
TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [6] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.  
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [7] 马草原, 孙展展, 尹志超, 等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 120-128.  
MA Caoyuan, SUN Zhazhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double

- hybrid particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 120-128.
- [8] 初壮, 窦孝祥, 于群英. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 132-138.  
CHU Zhuang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 132-138.
- [9] 李春燕, 钟隽, 许中. 基于边界分析和线性回归的随机配电网重构判别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 2): 176-180.  
LI Chunyan, ZHONG Jun, XU Zhong. A test method for stochastic distribution system reconfiguration using boundary analysis and linear regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 176-180.
- [10] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [11] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 76-80.  
YAN Wei, LIU Fang, WANG Guanjie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 76-80.
- [12] 雷英杰, 张善文, 李旭武. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [13] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34-43.  
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34-43.
- [14] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the recon-figuration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [15] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [16] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [17] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 基于随机生成树策略的配电网重构遗传算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1726-1730.  
OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Genetic algorithm based on random spanning trees in distribution network reconfiguration[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1726-1730.

收稿日期: 2017-02-27; 修回日期: 2017-04-10

作者简介:

江卓翰(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电网规划。Email: 7194324@qq.com

(编辑 张爱琴)