

基于改进分层前推回代法的 含分布发电单元的配电网重构

王佳佳¹, 吕林¹, 刘俊勇¹, 胡灿², 祝源³

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065; 2. 四川电力试验研究院, 四川省 成都市 610072;
3. 西昌市电业局, 四川省 西昌市 615000)

Reconfiguration of Distribution Network Containing Distribution Generation Units Based on Improved Layered Forward-Backward Sweep Method

WANG Jiajia¹, LÜ Lin¹, LIU Junyong¹, HU Can², ZHU Yuan³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;
2. Sichuan Electric Power Test and Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan Province, China;
3. Xichang Power Supply Bureau, Xichang 615000, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: On the basis of simplifying topology of distribution network and by use of hybrid particle swarm algorithm the reconfiguration of distribution network containing distributed generation (DG) is solved. To simply solve this reconfiguration problem by decimal coding, the node-layer incident matrix-based intelligent network identification and forward-backward sweep method-based power flow calculation method are proposed. The proposed methods can meet the requirement of dynamic calculation of power flow in distribution network and offer a new idea for real-time dynamic reconfiguration. The DG units are led into network reconfiguration, so network loss can be evidently reduced and provide a better support to nodal voltage. The effectiveness and reasonableness are verified by calculation results of IEEE 33-bus system.

KEY WORDS: DG; distribution network reconfiguration; discrete particle swarm optimization; improved layered forward-backward sweep method; node-layer incident matrix

摘要: 在简化配电网拓扑的基础上, 应用混合粒子群算法对含分布发电单元的配电网重构问题进行求解。采用 10 进制编码进行简化求解, 提出了基于节点-分层关联矩阵进行智能网络拓扑识别及分层前推回代的潮流计算方法。该方法可适应动态计算配电网潮流的需要, 为实时动态重构提供新的思路。在网络重构中引入分布式电源, 大幅降低了网损, 对节点电压有较好的支撑作用。IEEE 33 节点算例验证了该方法的有效性和合理性。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB-217905)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217905).

关键词: 分布式电源; 配电网重构; 离散粒子群算法; 改进分层前推回代法; 节点-分层关联矩阵

0 引言

配电网重构是优化配电系统运行的有效手段之一。通过对联络开关和分段开关的开、合状态进行切换来改变网络拓扑, 以在馈线或变电站之间转移负荷, 从而影响网络中的潮流分布, 最终达到优化网络运行的目的。

由于配电网中存在大量的分段开关和联络开关, 因此从数学角度来讲, 配电网重构是一个复杂的多目标非线性整数组合优化问题。传统的数学优化法^[1-2]可从理论上保证得到全局最优解, 但是随着配电网规模的增大, 将导致严重的“组合爆炸问题”。启发式算法^[3-4]由于采用近似技术及相关启发式手段, 结果易受系统初态影响, 不能保证收敛于最优解。随机化和智能方法^[5-6]较适于寻找全局最优解, 但在收敛速度以及计算效率上有待提高。

本文分析分布式发电对于配电网重构问题的影响, 采用混合粒子群算法求解配电网重构问题。基于图论及配电网特点对网络进行有效简化, 并结合广度优先搜索法与生成树原理, 提出节点-分层关联矩阵, 以改进传统前推回代法, 将其用于配电网重构后的动态潮流计算。典型 33 节点系统算例分析结果表明, 本文算法具有良好的计算速度及全局寻优能力。

1 配电网重构的数学模型

配电网重构的优化目标可以是最小化系统有功功率损耗,最小化系统能量损耗、平衡系统负荷、提高系统可靠性、提高电压水平等1个或多个目标的组合,本文以最小化系统有功功率损耗为目标函数,其数学表达式为

$$\min f = \sum_{k=1}^{n_L} R_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} \quad (1)$$

式中: n_L 为系统支路总数; R_k 、 P_k 、 Q_k 、 U_k 分别为某一时刻第 k 条支路的电阻、有功功率、无功功率、支路首端母线电压。

配电系统网络重构同时要求满足如下网络拓扑约束、支路容量约束、节点电压约束:

$$g_k \in G \quad (2)$$

$$S_i < S_{i\max}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

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

式中: g_k 为重构后网络结构; G 为所有可行的辐射状网络结构的集合; n 为支路总数; S_i 为支路 i 上的功率; $S_{i\max}$ 为支路 i 的线路容量; m 为节点总数; U_i 、 $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 的电压及其上下限。

2 分布式电源对配电网重构问题的影响

2.1 分布式电源对潮流计算的影响

分布式电源(distributed generation, DG)是指在配电系统靠近用户侧引入的中小型电源。DG引入配电系统后,系统功率分布将发生改变,系统电压水平、可靠性、辐射状结构等也会受到影响。对于配电网重构来讲,DG引入与重构过程的潮流计算、结果可靠性分析等有着密切联系。

随着DG的引入,传统配电系统中加入了新的节点类型,主要包括:1)有功功率、电压恒定的PV节点;2)有功功率、电流恒定的PI节点;3)有功功率恒定、电压不定、无功功率受有功功率和电压限定的P-V-Q节点。潮流计算时,需对不同节点采用不同处理方法,但实质都是将各种节点转换为传统的易处理的PQ或PV节点。

在潮流计算中,对于分布式电源的常用简化处理方法是将其视为“负的负荷”。对采用异步发电机的风力发电机节点,将其视为PQ节点来简化处理。而对于采用同步发电机的内燃机等DG可以处理成PV节点。在迭代过程中,通过节点转换来处理,若修正后节点无功功率越限,则将其转换为对应PQ节点。而在后续迭代过程中,若又出现该节点电压越限情况,则将其重新转化为PV节点。对

于光伏发电系统、部分风力发电机组和燃料电池这类通过逆变器接入电网的DG,可认为其是PI节点,潮流计算时相应无功功率由前次迭代得到的电压、恒定电流幅值和有功功率计算得到。这样就将PI节点转换为PQ节点。对于采用异步电机的风力发电机组,可将其视为P-V-Q节点处理,每次迭代时,根据给定有功功率和上步迭代计算的电压计算出无功功率,这样即转化为PQ节点。

2.2 分布式电源对配电系统可靠性的影响

分布式电源的接入会对配电系统的结构和运行产生较大影响,并会使系统可靠性得到改善。当系统中某一馈线发生故障,通过相应开关操作将分布式电源供电用户与系统隔离,由分布式电源独立向用户负荷供电,形成孤岛运行,从而提高了负荷用电的可靠性。该过程体现在重构过程中则为原来的孤岛不可行解可能变为可行解,增大了重构的寻优范围,使重构结果发生变化。

随着目前配电网重构的研究向智能电网概念过渡,以提高系统可靠性为目的,计及分布发电单元的重构综合模型的构建成为值得研究的课题。

3 含分布式发电单元的网络重构混合粒子群算法

3.1 网络化简及粒子群算法的改进

结合配电网闭环设计、开环运行的基本特征,本文按照以下步骤化简:1)将所有联络开关闭合,形成多环网。每个环路断开一条支路,且不与其他环路断开支路相同;2)与电源直接相连或不在任何环路上的支路全部闭合;3)找出所有T节点,2个T节点间的所有支路因解环效果相同等效为1个支路集合,该支路集内部最多只能有一条支路断开。

根据以上步骤简化图1所示IEEE 33节点系统。简化后的IEEE 33节点系统见图2,图中 $b_1 \sim b_{14}$ 为支路。

为提高算法效率,简化寻优空间,本文采用10进制编码^[7],并对每一等效支路集合采用一个优化

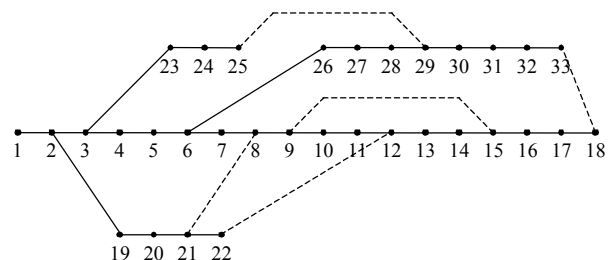


图1 IEEE 33节点系统
Fig. 1 IEEE 33 bus system

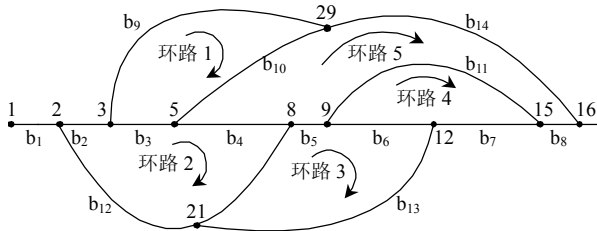


图2 简化后的 IEEE 33 节点系统

Fig. 2 IEEE 33 bus system after simplified

变量表示。粒子的维数等于环路数，粒子每一维代表 1 个等效支路集合，每维取值代表该支路集合内断开的支路号，若其值为 0，则表示该支路集合内的支路全部闭合。这样确保每一支路集合仅断开一条支路。确定断开支路集合后，通过对选定支路集合的不同断开支路进行随机组合，大大缩小了寻优空间，且不出现孤岛及环网，保证辐射状网络生成。

综上，优化过程通过以下步骤实现：1) 支路集合的选择。在保证网络约束条件下随机选择与环路数相等的支路集合。2) 支路集合内部的选择。离散化更新传统粒子群算法速度位置公式，将对应参数设为适合整数，根据粒子每维搜索空间大小制定权重来确定每维速度限值，以使优化变量为整数。

传统粒子群算法将群体中每一个个体视为以一定速度飞行于搜索空间的粒子，粒子根据迭代过程中自身最优值 p_{best} 和群体最优值 g_{best} 来不断修正其前进方向和速度，从而形成正反馈寻优机制。迭代公式如下：

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \varphi_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \varphi_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (5)$$

$$x_{id} = \begin{cases} 1, & f_{rand}() < S(v_{id}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中： c_1 和 c_2 都为正常数； φ_1 和 φ_2 为区间[0,1]上的随机数； p_{id} 和 p_{gd} 分别为个体极值和全局极值； $f_{rand}()$ 为取区间[0,1]上的随机数； $S(v_{id})$ 为 sigmoid 函数， $S(v_{id}) = 1/[1 + \exp(-v_{id})]$ 。

本文采用文献[8]提出的混合粒子群算法迭代公式进行更新：

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} v_{id}^k, & x^k = 0 \\ v_{id}^k, & x^k \neq 0, p_{id} = p_{gd} = 0 \\ v_{id}^k + f_{rand}[c_1(p_{id}^k - x_{id}^k)] + f_{rand}[c_2(p_{gd}^k - x_{id}^k)], & x^k \neq 0, p_{id} \neq 0, p_{gd} \neq 0 \\ v_{id}^k + f_{rand}(v_{maxd}) + f_{rand}[c_2(p_{gd}^k - x_{id}^k)], & x^k \neq 0, p_{id} = 0, p_{gd} \neq 0 \\ v_{id}^k + f_{rand}[c_1(p_{id}^k - x_{id}^k)] + f_{rand}(v_{maxd}), & x^k \neq 0, p_{id} \neq 0, p_{gd} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} f_{rand}(1, 2, \dots, L_d), & x^k = 0 \\ f_{rand}(1, 2, \dots, L_d), & x^k \neq 0 \text{ 且 } p_{id}^k = p_{gd}^k = 0 \\ x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f_{rand}(1, 2, \dots, L_d)$ 为从 $1, 2, \dots, L_d$ 中随机选择的整数； L_d 为第 d 个支路集合含有的支路数。

3.2 分布式电源处理及潮流计算

由 2.1 节可知，对于加入不同类型 DG 的节点，通过特定方法可将其转换为 PQ 节点来处理，因此本文将 DG 视为“负的负荷”，作为 PQ 节点处理。

网络每进行一次重构，整个拓扑结构就改变 1 次，传统的前推回代方法^[9]需要按照潮流流向重新编号，以适应计算需要，而编号的处理相当复杂。

本文基于图论，由初始支路信息生成节点-节点关联矩阵，按照广度搜索对配电网进行合理分层，生成节点-分层关联矩阵，每层存储该层所属节点及其上层直接相连节点，并按层进行前推回代，避开复杂的编号工作，可对大规模配电网进行网络拓扑动态智能识别，适应动态计算潮流需要，编程简单，速度较快，改进前推回代算法的流程如图 3 所示。

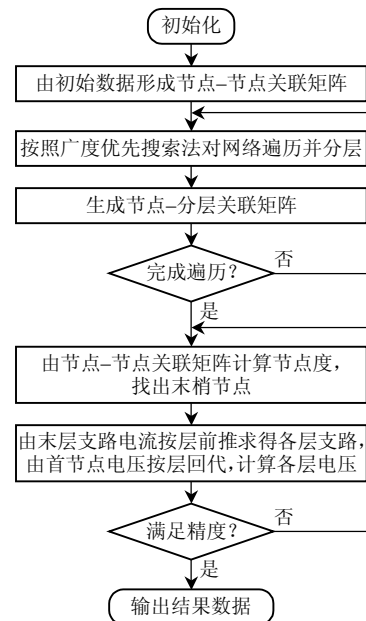


图3 改进前推回代法的流程

Fig. 3 Flowchart of the improved forward-backward sweep method

上述流程的具体步骤如下：

1) 初始化。输入网络信息，确定优化变量的维数，设置粒子群规模 M 及其他参数，同时设置最大迭代次数 I_{max} 。

2) 随机生成 M 个解，由改进前推回代法计算其所对应的目标函数，选择目标函数最小值所对应

粒子的位置向量为本次最优解 P_{ibest} 。

3) 计算所有解所对应的目标函数, 得到本次最优解 P_{ibest} , 并与上一次的最优解所对应的目标函数比较, 2 者目标函数较小者对应的解为当前最优解 P_{gbest} 。

4) 根据式(7)(8)更新粒子位置。

5) 比较当前解对应的目标函数, 得出本次最优解 P_{ibest} , 与当前最优解 P_{gbest} 比较, 选择 2 者中最小的为更新过后的当前最优解 P_{gbest} 。

6) 判断是否已经达到迭代次数上限。如果达到迭代次数上限, 算法结束, 否则回到步骤 3)。

4 算例结果与分析

本文采用图 2 所示的 IEEE 33 节点配电网系统^[10]。图 2 系统的额定电压为 12.66 kV, 网络总负荷为 3 715 kW + j2 300 kvar, 平衡节点电压的标幺值为 1.0 pu, 最大迭代次数 M 为 100。

由于采用节点-节点及节点-分层关联矩阵进行改进分层前推回代, 本文方法适应大规模网络动态变化, 能快速进行重构后拓扑识别, 缩短网络重构时间, 为实时动态重构提供了一种新的思路^[11-13]。

采用基于禁忌算法的改进粒子群算法^[14]、免疫二进制粒子群算法^[15]和本文算法得到 IEEE 33 节点系统的重构结果如表 1 所示。由表 1 可知, 3 种算法的重构结构一致, 与采用基于禁忌算法的改进粒子群算法相比, 采用本文算法将电压水平标幺值提高至 0.933 5 pu, 略高于文献[12]的重构结果。

表 1 采用不同算法得到的 IEEE 33 节点系统的重构结果
Tab. 1 Reconstruction results of the IEEE 33 bus system by different algorithms

原始结构与算法	打开的开关集合	网损/kW	最低节点电压/pu
原始结构	8-21 9-15 12-22	191.01	0.913 2
	18-33 25-29		
本文算法	7-8 9-10 14-1	131.39	0.932 5
	25-29 32-33		
基于禁忌算法的改进粒子群算法	7-8 9-10 14-15	131.39	0.932 5
	25-29 32-33		
免疫二进制粒子群算法	7-8 9-10 14-15	141.53	0.930 9
	25-29 32-33		

分布式电源加入前后 IEEE 33 节点系统的重构结果如表 2 所示。本文假定在节点 3、6、24、29 设置分布式电源点, 这些电源点的容量分别为 50、100、200、100, 功率因数分别为 0.8、0.9、0.9、1.0, 分布式电源存在后, 增加了电源支持点, 因此重构产生的网络状态发生变化, 其直接表现为结构的变化, 分别由无分布式电源的初始打开开关组合

表 2 DG 加入前后 IEEE 33 节点系统的重构结果

Tab. 2 Reconstruction results of the IEEE 33 bus system with and without DG

情况	打开的开关集合	网损/kW	最低节点电压/pu
无 DG 网络 初态	8-21 9-15 12-22 18-33 25-29	191.01	0.913 2
含 DG 网络 初态	8-21 9-15 12-22 18-33 25-29	88.4	0.934 6
无 DG 网络 重构后	7-8 9-10 14-15 25-29 32-33	131.39	0.932 5
含 DG 网络 重构后	7-8 9-10 14-15 28-29 32-33	60.59	0.956 4

{7-8, 9-10, 14-15, 25-29, 32-33}变为有分布式电源的重构后开关组合{7-8, 9-10, 14-15, 28-29, 32-33}。由此可知, 分布式电源的介入使原来的重构网络拓扑产生了变化。

分布式电源影响电网重构结构的原因主要是其引入配电网, 能够提高网络的电压水平, 因此采用本文重构算法得出的网络最低电压由原来的 0.932 5 pu 上升到 0.956 4 pu。电压水平的提高导致网损也相应地从 131.39 kW 减少到 60.59 kW。

5 结论

1) 本文通过化简配电网, 基于图论提出了适应重构后拓扑变化的改进节点-分层前推回代法, 并用混合粒子群算法求解配电网重构问题。

2) 进行配电网重构时, 首先在网络简化基础上按照环路随机选择等效支路集参与优化, 再应用能适应离散特性的改进粒子群算法对选中支路集内部进行寻优组合更新。本文提出的节点-节点关联矩阵及节点-分层关联矩阵的改进传统前推回代法能快速识别网络拓扑, 提高算法的整体速度。

3) 本文发现了 DG 引入配电网的情况。DG 提高电压水平的能力可有效减少线路损耗, 但其作为电源支持点的特性会改变原来优化的网络结构, 使优化问题更复杂。今后将重点进行 DG 接入点规划与增强系统可靠性相结合的配电网重构研究。

参考文献

- [1] Fan Jiyuan, Zhang Lan, John D M. Distribution network reconfiguration: single loop optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1643-1648.
- [2] Sarma N D R, Prakasa Rao K S. A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems[J]. Electric Power System Research, 1995(22): 125-131.
- [3] Dariush S H, Hong W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [4] Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al. Distribution feeder

- reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [5] Chiang H D, Jumeau R J. Optimal network reconfigurations in distribution systems part 1: a new fomulation and solution methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 1902-1909.
- [6] Koichi N, Atsushi S, Minoru K. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1044-1051.
- [7] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配电网重构遗传算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 65-69.
Ma Xiufan, Zhang Lizi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 65-69(in Chinese).
- [8] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
Li Zhenkun, Chen Xingying, Yu Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41(in Chinese).
- [9] 张尧, 王琴, 宋文南, 等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 217-222.
Zhang Yao, Wang Qin, Song Wennan, et al. A load flow algorithm for radial distribution power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-222(in Chinese).
- [10] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989(4): 1401-1407.
- [11] 余键明, 张凡. 基于改进免疫遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 100-106.
Yu Jianming, Zhang Fan. Distribution network reconfiguration based on improved immune genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 100-106(in Chinese).
- [12] 赵晶晶, 李新, 彭怡, 等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 157-162.
Zhao Jingjing, Li Xin, Peng Yi, et al. A comprehensive optimization algorithm for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 157-162(in Chinese).
- [13] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构优化算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-56.
Zhang Zhao, Feng Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-56(in Chinese).
- [14] 许立雄, 吕林, 刘俊勇. 基于改进粒子群优化算法的配电网网络重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 27-30.
Xu Lixiong, Lü Lin, Liu Junyong. Modified particle swarm optimization for reconfiguration of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30(in Chinese).
- [15] 董思兵. 基于免疫二进制粒子群算法的配电网重构[D]. 济南: 山东大学, 2008.



王佳佳

收稿日期: 2010-07-03.

作者简介:

王佳佳(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源对配电网经济运行的影响分析, E-mail: xinlanyujia@163.com;

吕林(1963), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事配电自动化方面的研究工作;

刘俊勇(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、灵活交流输电、电压稳定及控制、电力系统可视化等方面的研究工作;

胡灿(1971), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统规划及稳定控制方面的研究工作;

祝源(1981), 男, 助理工程师, 主要从事配电自动化方面的研究工作。

(责任编辑 杜宁)