

基于小生境的配电网多目标分布式电源规划

刘学平, 刘天琪, 王剑

(四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065)

Niche-Based Multi-Objective Distributed Generators Planning in Distribution Network

LIU Xueping, LIU Tianqi, WANG Jian

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: In allusion to the optimization of network-connecting positions of distributed generators (DGs) in distribution network and their configured capacity, a multi-objective optimal configuration model of DGs, in which the minimization of investment cost and network loss as well as optimal stability of steady state voltage are taken as objectives, is built. On this basis, by use of niche-based multi-objective genetic algorithm, in which the adaptability of individuals is evaluated by objective series-based sorting matrix, the optimal Pareto solution set of network-connecting positions of DGs and the configured capacity of DGs are solved, thus the multi-objective optimization is implemented. Taking IEEE 37-bus distribution system for example, the proposed model and solving algorithm are simulated and simulation results show that the proposed model and algorithm are feasible and available.

KEY WORDS: distributed generator; genetic algorithm; Pareto optimal solution; niche; distribution network planning

摘要: 针对分布式电源接入位置及其配置容量的优化问题, 建立了含最小化投资成本、最小化配电网网损、最大化静态电压稳定性 3 个目标的多目标优化配置模型。在此基础上, 应用基于目标序列排序矩阵评价个体适应度及小生境技术的多目标遗传算法, 求解得到分布式电源接入位置及其配置容量的 Pareto 最优解集, 实现多目标优化。最后, 以 IEEE37 节点配电网为例进行仿真计算, 结果表明, 该方法能得到合理的分布式电源接入位置及其容量配置方案, 验证了所建模型及求解算法的可行性和有效性。

关键词: 分布式电源; 遗传算法; Pareto 最优解; 小生境; 配电网规划

0 引言

随着社会经济建设的发展、传统能源的逐渐枯竭, 世界各国对环保问题日益重视, 需要一种环保、灵活的方式来解决能源问题。分布式发电凭借其损耗低、系统可靠性高、效率高、能源种类多样等优点^[1], 得到了电力工业越来越多的关注, 已成为一

个研究热点, 但是, 分布式电源 (distributed generation, DG) 引入配电网后, 会使配电网中的节点电压、各线路潮流、可靠性等发生改变, 随之将引起配电网网络损耗的变化, 使得网络损耗不仅与负荷大小有关, 同时还与 DG 的安装位置以及注入节点的功率有关, 因此需要对分布式电源的合理配置进行研究^[2-6]。

近年来, 国内外学者对分布式电源的配置问题进行了一些研究。文献[7]应用基于电压稳定约束的最优潮流模型, 并运用拉格朗日乘子分析 DG 最优接入位置, 达到最小化系统运行成本和增强电压稳定性的目的, 但是未分析接入容量对优化指标的影响; 文献[8]在分布式电源总容量已知的情况下, 以配电网损耗最小为目标, 提出利用禁忌搜索算法确定分布式电源位置和容量的分解协调方法; 文献[9]利用模糊方法将多目标转化为单目标, 并用遗传算法来优化配置 DG 的位置和容量。

本文主要研究 DG 在配电网中的最优接入位置和配置容量, 建立分布式电源投资成本最小、配电网网损最小、系统静态电压稳定性最好的多目标 DG 优化配置模型。在传统遗传算法的基础上, 应用一种基于目标序列的排序矩阵评价个体适应度的多目标求解方法, 找到一系列的 Pareto 最优 DG 配置方案, 在该算法中引入小生境技术, 最后, 通过算例仿真, 验证其可行性。

1 含分布式发电的配电网多目标规划模型

1.1 目标函数

1) 投资成本目标函数。

分布式发电的投资成本包括设备综合成本和安装成本 2 部分。投资成本 C_{DG} 最小的目标函数为

$$\min C_{DG} = \sum_{i=1}^{n_{DG}} (C_{i1} + C_{i2}) P_{di} \quad (1)$$

式中： n_{DG} 为能安装分布式发电的节点总数； P_{di} 为安装在第*i*个节点的分布式发电额定容量； C_{i1} 和 C_{i2} 分别为第*i*个节点的分布式发电单位容量设备综合成本和安装成本。

2) 网络损耗目标函数。

电网网络损耗费用 C_L 的目标函数为

$$\min C_L = \min \{P_{\text{loss}}(P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn_{\text{DG}}})\} \quad (2)$$

式中 P_{loss} 为系统网损，与分布式电源的位置和容量有关。

3) 静态电压稳定裕度目标函数。

配电网电压稳定性指标为

$$L_{ij} = 4[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})V_i^2] / V_i^4 \quad (3)$$

式中： L_{ij} 表示支路*ij*(首节点为*i*末节点为*j*)的电压稳定指标； R_{ij} 和 X_{ij} 分别为支路*ij*的电阻和电抗； P_j 和 Q_j 分别为流入支路末节点*j*的有功和无功功率； V_i 为首节点*i*的电压。

整个配电网的电压稳定指标为各支路中 L_{ij} 的最大值，即

$$L = \max \{L_1, L_2, \dots, L_N\} \quad (4)$$

式中 N 为系统总支路数。

整个配电网的电压稳定裕度为

$$K=1-L \quad (5)$$

则静态电压稳定裕度最大的目标函数就等价于求配电网电压稳定指标的最小值，即 $\min L$ 。

1.2 约束条件

1) 等式约束。

等式约束为节点功率方程

$$h(x) = \begin{cases} P_{Gi} - V_i \sum_{j=1}^b V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - V_i \sum_{j=1}^b V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为各节点的注入有功、无功功率； V_i 为节点*i*的电压幅值； G_{ij} 为支路电导； B_{ij} 为支路电纳； θ_{ij} 为节点*i*与节点*j*电压相角差， b 为与节点*i*相关联的支路数。

2) 不等式约束。

不等式约束为

$$g(x) = \begin{cases} P_{\text{DGmin}} \leq P_{di} \leq P_{\text{DGmax}}, & i=1, \dots, n_{\text{DG}} \\ Q_{\text{DGmin}} \leq Q_{di} \leq Q_{\text{DGmax}}, & i=1, \dots, n_{\text{DG}} \\ V_{\text{imin}} \leq V_i \leq V_{\text{imax}}, & i=1, \dots, N_b \\ P_l \leq P_{l\text{max}}, & l=1, \dots, N \\ \sum_{i=1}^{n_{\text{DG}}} S_{\text{DG}i} \leq S_{\text{DGmax}}, & i=1, \dots, n_{\text{DG}} \\ N-1 \text{ 安全规范} \end{cases} \quad (7)$$

式中： Q_{di} 为第*i*台发电机无功出力； P_l 为线路*l*的传输功率； P_{DGmax} 、 P_{DGmin} 、 Q_{DGmax} 、 Q_{DGmin} 分别为分布式电源有功出力的上下限，无功出力的上下限； V_{imin} 和 V_{imax} 为第*i*个节点电压的上下限； N_b 为节点数； $S_{\text{DG}i}$ 为第*i*个DG的容量， S_{DGmax} 为系统最大准入DG容量。

2 基于小生境的多目标遗传算法

2.1 适应度的确定

个体适应度是通过个体间的相互比较得到的，则只需知道各目标函数的优劣衡量标准即可将个体对目标表现的优劣进行排序^[10]，如表1所示。表中： $O_{bj}(i)(i=1,2,3)$ 依次表示投资成本、网络损耗和静态电压稳定指标3个目标函数值； P 为个体总数，在文中对应种群的大小，即可行解的数量。

表1 基于目标函数的表现矩阵
Tab. 1 The sorting matrix created by the objective function performance

目标	排序				表现序列
	1	2	...	P	
$O_{b1}(1)$	X_{11}	X_{12}	...	X_{1P}	X_1
$O_{b1}(2)$	X_{21}	X_{22}	...	X_{2P}	X_2
$O_{b1}(3)$	X_{31}	X_{32}	...	X_{3P}	X_3

针对每一个目标，所有个体即所有配置方案，都会依据对该目标的函数值优劣生成一个可行解的排序序列 X_i 。根据个体的排序计算其适应度，即

$$E_i(X_j) = \begin{cases} (P - R_i(X_j))^2, & R_i(X_j) > 1, \quad i=1,2,3 \\ kP^2, & R_i(X_j) = 1, \quad i=1,2,3 \end{cases} \quad (8)$$

$$E(X_j) = \sum_{i=1}^n E_i(X_j), \quad j=1,2,\dots,P \quad (9)$$

式中： X_j 为种群的第*j*个个体； R_i 为其在种群所有个体中对目标*i*的优劣排序后所得的序号； $E_i(X_j)$ 表示 X_j 对目标*i*所得的适应度， $E(X_j)$ 为 X_j 对全部目标所得的综合适应度，对应各个体的适应值； k 为(1,2)区间的常数，用于加大个体函数值表现最优时的适应度。由上式可以看出，对于总体表现较优的个体能得到更大的适应度，获得更多的参与进化的机会。

2.2 小生境技术

生物总是倾向于和特征、形状等相类似的生物生活^[11]，使得若干种类的生物形成了一个小小生境。加上自然选择的方向和压力也各不相同，导致了物种间基因组成产生更大的差异，于是各物种向各自的方向发展进化。

受小生境现象的启发，本文在根据式(8)(9)计算

出各个体的适应值以后，依次计算并比较各个体之间的距离 $d(i,j)$ 。个体 i 和个体 j 之间的距离可由以下公式计算

$$d(i,j) = \sqrt{\sum_{n=1}^3 (O_{bji}(n) - O_{bij}(n))^2}, i, j = 1, \dots, P \quad (10)$$

式中： $O_{bji}(n)$ 、 $O_{bij}(n)(n=1,2,3)$ 表示个体 i 和个体 j 的投资成本、网络损耗和静态电压稳定指标归一化后的函数值。

由于 $d(i,j)$ 反映了 2 个体在空间坐标上的距离，于是进行以下操作：当 $d(i,j) < D$ 时(D 为一常数)，若 $E(X_i) > E(X_j)$ ，即个体 i 的适应值大于个体 j 的适应值，则令 $E(X_j) = P_e$ (P_e 为一很小的数，使进行选择操作时，该个体被选择的概率极小，本文中 P_e 取 0.001)；反之，若 $E(X_i) < E(X_j)$ ，则令 $E(X_i) = P_e$ 。当 $d(i,j) > D$ 时，不进行任何操作(D 的数值可根据目标函数值和种群决定， D 越大，淘汰掉的个体会越多)。

通过以上操作可以看出在距离 D 内将只存在一个优良个体，这样既维护了群体的多样性，又使得各个体之间保持一定的距离，并使得个体能够在整个约束的空间中分散开来。

2.3 优解保存策略和 Pareto 输出

采用精英保存策略，即保留父代中的优良个体直接进入子代，其过程如下：

- 1) 将第一代产生的最好的 M 个解作为现有的最优个体保存。
- 2) 等下一代进化完毕，将保存的最优的 M 个父代种群与进化后的子代合并。
- 3) 依据适应值大小和小生境技术，选择出最好的 M 个个体作为父代种群。
- 4) 重复过程 2)、3)，直到满足终止条件。

本文算法的输出为 Pareto 解集。在多目标优化中的最优解称为 Pareto 最优解。通常情况下，满足 Pareto 最优解条件的往往不止 1 个，而是一个最优解集，解集中的解互不支配，互不占优，各有优势。

2.4 求解步骤

采用遗传算法对配电网中的分布式电源进行优化配置^[12-14]，具体流程如图 1 所示，步骤如下：

- 1) 输入规划的原始数据，对分布式电源位置和容量进行编码^[15-16]。本文算例中含 35 个负荷节点(不计电源点)，因此可将分布式电源的建设方案用一组变量 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{35}\}$ 来表示。设 P_c 为单位编号对应的额定容量，令 $P_{di} = C_i P_c$ ，其中 C_i 由二进制数表示， C_i 的值为 0 说明该负荷节点 i 没有建设分布式电源，若 C_i 的值为 1 则表示该负荷节点上待建分布式电源，安装容量 P_c 为 $1 \times P_c$ ，以此类推。

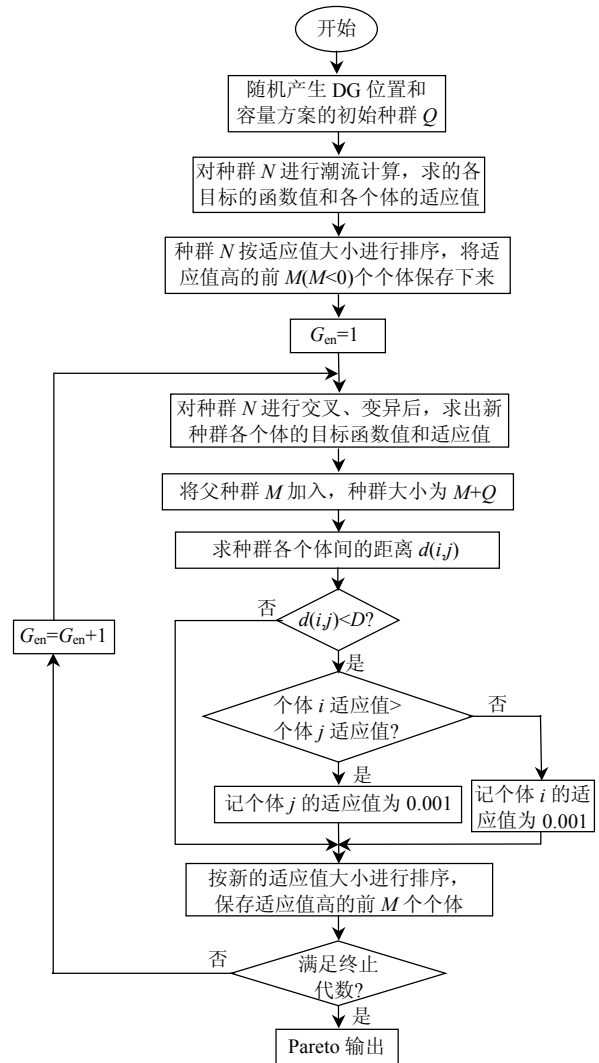


图 1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of algorithm

2) 初始化种群，并按照初始种群的容量进行潮流计算(潮流计算采用针对辐射状网络的前推回代算法)，计算各目标函数值和适应值并排序，保存最好的前 M 个个体。

3) 对种群 Q 进行交叉、变异，计算潮流，求出各个体的目标函数值和适应值后，把父代种群加入，这时种群大小为 $M+Q$ 。

4) 计算各个体间的距离，淘汰掉在距离范围内适应值小的个体。

5) 按适应值大小重新排序，保存最优的 M 个个体。

6) 重复步骤 3) — 5)，直到达到最大迭代次数。

7) 从保存的最优的 M 个解中，找出所有的 Pareto 解，计算结束。

3 算例分析

本文以修改后的 IEEE 37 节点配电网系统为例，如图 2 所示，对分布式电源的位置和容量进行

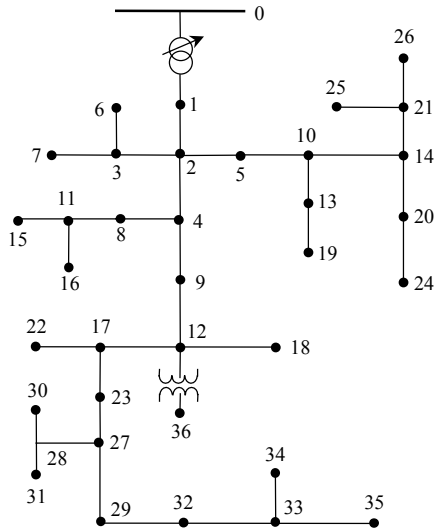


图 2 IEEE 37 节点配电网系统

Fig. 2 IEEE 37 distribution network system

优化配置，其电压等级为 35 kV。系统总有功负荷为 12.285 MW，总无功负荷为 6.005 Mvar。取系统基准容量为 15 MVA，平衡节点为 0 号节点。分布式电源接入比例不超过 50%，分布式电源安装节点集合为 {1,2,...,35} (节点 36 为一变压器支路连接的末端节点，不考虑接入分布式电源)。将各分布式电源看作负 PQ 节点处理，功率因数取 0.9。分布式发电单位容量设备综合成本和安装成本分别为 0.63×10^6 USD/MVA 和 0.18×10^6 USD/MVA。遗传操作参数设置如下：种群规模为 90，迭代次数为 100，交叉率为 0.8，变异率为 0.2。

图 3 为采用本文模型和算法得到的分布式电源配置 Pareto 解的目标函数空间分布。从图 3 可以看出，这些解之间互不支配或优于其他解，不同的解代表不同的配置效果。图中解 1、解 2、解 3 是 3 个代表性的 DG 配置结果。解 1 的投资成本最小，但网损和电压稳定性较差；解 3 的网损和电压稳定性最好，但投资成本较大；解 2 的投资、网损、电压稳定性均适中，是一个各方面都较满意的解。解 1、解 2、解 3 的 DG 配置方案结果如表 2 所示，分

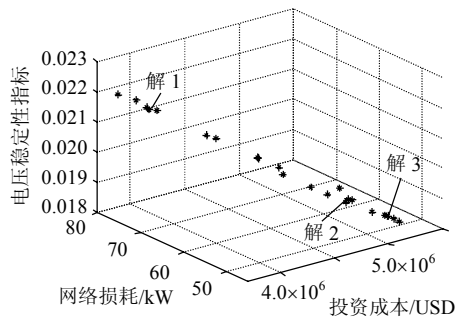


图 3 DG 配置 Pareto 解的目标函数空间分布
Fig. 3 Pareto optimal front of DG deployment

表 2 各 DG 配置方案比较
Tab. 2 Comparison of DG deployment schemes

参数	未接入 DG 时	方案 1	方案 2	方案 3
DG 接入位置	—	3-11-14-16-25-26-28-33	10-14-16-18-26-27-31-33-34	8-10-14-16-26-2
对应接入容量/kW	—	480-360-720-480-720	720-840-480-600-480-720-360	480-360-720-480-720
投资/USD	—	3.60×10^6	4.27×10^6	5.15×10^6
配电网网损/kW	218.12	73.82	58.79	45.73
电压稳定性指标	0.033 3	0.022 5	0.020 9	0.018 4

注：表 2 中 DG 接入位置一行的数字表示 DG 的接入点，接入容量一行的数字表示 DG 的接入点对应的分布式电源容量。

别对应表中方案 1、2、3。

由于分布式电源对线路潮流的影响，从表中分布式电源的接入位置可以看出，绝大部分分布式电源位于辐射线路的中末端。采用以上 3 种 DG 配置方案将 DG 接入配电网后，都有助于减小配电网网损，提高静态电压稳定性，尤其在网络损耗上，方案 3 较接入 DG 前减少了 79%。

4 结语

1) 本文获得的这些最优方案各有优势，兼顾各个规划目标，规划人员可以根据国家政策、企业利益、用户需求等因素进行决策，选择合适的方案。

2) DG 若配置在靠近距主变电站较远的馈线末端，能够最大程度地减少网络损耗，提高静态电压稳定性，发挥 DG 配置的最大效益。

参考文献

- [1] El-khattam W, Salama M M A. Distribution system planning using distributed generation[C]//Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Montreal, Canada: IEEE, 2003.
- [2] 赵岩, 胡学浩. 分布式发电对系统电压暂降的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 5-9.
Zhao Yan, Hu Xuehao. Impacts of distributed generation on distribution system voltage sags[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 5-9(in Chinese).
- [3] Carmen L T, Djalma M. Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006(28): 413-420.
- [4] 钱科军, 袁越. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 74-78.
Qian Kejun, Yuan Yue. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 74-78(in Chinese).
- [5] 王成山, 陈恺, 谢莹华. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.

- Wang Chengshan, Chen Kai, Xie Yinghua. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43(in Chinese).
- [6] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 84-88.
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 84-88(in Chinese).
- [7] William R, Nowicki E. Optimal placement of distributed generation[C]//14th PSCC. Sevilla, Spain: University of Sevilla, 2002.
- [8] Nara K, Hayashi Y, Ikeda k, et al. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Ohio, USA: IEEE, 2001.
- [9] 陈海焱, 陈金富, 杨雄平, 等. 配网中计及短路电流约束的分布式发电规划[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 16-21.
Chen Haiyan, Duan Jinfu, Yang Xiongping, et al. Planning for distributed generation in distribution network with short-circuit current constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 16-21(in Chinese).
- [10] 游进军, 纪昌民, 付湘. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水力学报, 2003(7): 64-69.
You Jinjun, Ji Changming, Fu Xiang. New method for multi-objective problem based on genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 64-69 (in Chinese).
- [11] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 51-59.
- [12] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 1-9.
- [13] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 计及配网静态电压稳定约束的分布式发电规划模型与算法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 11-14.
Chen Haiyan, Duan Xianzhong, Chen Jinfu. Distributed generation planning model and algorithm considering static voltage stability constrain in distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 16-21(in Chinese).
- [14] 米凯利维茨 Z. 演化程序-遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 15-21.
- [15] 李鹏, 廉超, 李波涛. 分布式电源并网优化配置的图解方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 91-96.
Li Peng, Lian Chao, Li Botao. A graph-based optimal solution for siting and sizing of grid-connected distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 91-96(in Chinese).
- [16] 张丽, 徐玉琴. 分布式发电条件下配电网重合器的优化配置[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 264-267.
Zhang Li, Xu Yuqin. Optimization placement of recloser in dg-enhanced distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 264-267(in Chinese).

收稿日期: 2010-07-13。

作者简介:

刘学平(1985), 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: liuxueping2004@163.com;

刘天琪(1962), 女, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化, E-mail: tqliu@sohu.com;

王剑(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制、分布式发电。



刘学平

(编辑 褚晓杰)