

基于电压稳定指标的分布式电源位置与容量优化配置

蒋浩, 王 鸪

东南大学电气工程学院, 南京 210096

摘要 分布式发电 (Distributed Generation, DG) 的电源位置和注入容量对配电网有重要影响。以配电网网损最小及电压稳定指标为目标, 将 DG 位置和容量优化问题转化为一个多目标的非线性规划问题。构造模糊性的多目标优化算法, 将 2 个优化子目标转化为单一目标, 同时将节点电压越限和 DG 有功出力越限以罚函数的方式进行处理。采用惯性因子自适应的粒子群算法进行求解, 为了加快求解速度, 先计算节点有功网损微增率并进行排序, 选出绝对值较大的节点作为 DG 安装候选节点。仿真结果表明, 此算法收敛效率高, 具有较强的搜索能力和自适应能力。

关键词 分布式发电; 多目标优化; 网损; 电压稳定; 粒子群算法

中图分类号 TM715

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.27.005

Allocation and Capacity Optimization of Distributed Generation Considering Voltage Stability Index

JIANG Hao, WANG Shuang

School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract The power location and injected capacity of the Distributed Generation (DG) have a major impact on the distribution network. Based on the smallest power loss and voltage stability index, the optimization problem involving DG location and capacity is turned into a multi-objective nonlinear programming problem. A fuzzy multi-objective optimization algorithm is constructed in order to turn two optimal sub-objectives into a single object. The penalty function is introduced to deal with the beyond-boundaries of the node voltage and DG active power output. Inertia factor adaptive particle swarm optimization algorithm is adopted to solve the problem. In order to speed up the solving speed, firstly the active power loss incremental rates of the nodes are calculated and sequenced; then the nodes with larger absolute values are selected as the candidate nodes for DG installation. The simulation results show that the algorithm proposed has high converged efficiency, strong search ability, and adaptive ability.

Keywords distributed generation; multi-objective optimization; power loss; voltage stability; particle swarm optimization algorithm

0 引言

分布式发电 (Distributed Generation, DG) 通常指功率在几千瓦至数百兆瓦的小型模块化、分散式、布置在用户附近的高效、可靠的发电单元。随着智能电网的发展, 以及可再生能源利用率的提高, 分布式发电在电能生产中占有越来越大的比重。

目前, 中国城乡大多数的配电系统仍以辐射状链式结构为主。分布式发电的接入, 虽然能够提高配电网的可靠性和经济性, 但同时也将对网损、电压分布等产生较大影响^[1-3], 且其影响程度与分布式电源的位置与容量密切相关^[4-6]。

国内外已有学者对 DG 的优化位置和容量确定问题进行了研究。Tautira 等^[7]以获得的最大经济效益为目标, 利用遗传算法来确定 DG 的最佳位置和容量, 但该方法未考虑电压稳定指标。Achara 等^[8]以系统总网损最小为目标, 先按有功网损微增率大小对节点进行排序, 选择最利于减少网损的节点作为 DG 的安装位置, 进而确定 DG 的最佳容量, 但该方法只能在配电网中的某一个节点安装 DG。石嘉川等^[9]以提高全网电压质量、降低网络损耗和抑制电压波动为目标, 并计及分布式发电启停的影响, 建立多目标电压优化模型, 采用主动禁忌搜索算法求解。王成山等^[10]应用遗传算法优化分布式电源

收稿日期: 2012-05-03; 修回日期: 2012-08-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2011AA05A105)

作者简介: 蒋浩, 讲师, 研究方向为可再生能源、电气信息技术, 电子信箱: jiangh@seu.edu.cn

的位置和容量,运用基于支路交换的模拟退火算法进行网络扩展规划。郑漳华等^[11]先确定 DG 的最优安装位置,以有功网损、电压改善程度和环境改善程度为目标建立多目标模型,计算 DG 的最佳容量,但该模型只能建立在单个 DG 的情况下。

本文以 33 节点配电系统为例,首先运用雅克比矩阵法求得各节点有功网损微增率,选出 DG 安装候选节点。其次在分布式电源容量、位置都不确定的情况下,以有功网损和电压稳定指标为目标函数,应用模糊理论,在各单目标最优解的模糊集中寻求使各个目标都尽可能优的满意解。最后,利用惯性因子自适应的粒子群优化算法对分布式电源的位置和容量进行优化,并将计算结果与采用标准粒子群算法、以及采用惯性因子线性递减权重策略的粒子群算法^[12]的计算结果进行对比,结果表明本文提出的改进算法具有良好的全局搜索能力和自适应能力。

1 分布式电源优化配置的数学模型

1.1 分布式电源配置的优化目标

1.1.1 有功网损最小

DG 接入配电网会改变系统潮流分布,影响系统网损。在分布式电源的功率因素一定的情况下,得出系统网络损耗最小的目标函数为^[13]

$$\min f_{\text{loss}}(x_1) = \sum_{k=1}^n G_{k(i,j)} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (1)$$

式中, n 为系统支路总数; $G_{k(i,j)}$ 为第 k 条支路的电导; i,j 分别为支路 k 两端节点编号; U_i, U_j 为节点 i,j 的电压幅值; θ_i, θ_j 为节点 i,j 的电压相角。

1.1.2 静态电压稳定指标最小

DG 的接入会对配电网的节点电压产生很大的影响,有可能导致电压稳定水平降低。本文采取文献^[13]中推导的静态电压稳定指标公式

$$U_{\text{stab},k} = \frac{4[(XP_i - RQ_i)^2 + (XQ_i + RP_i)U_i^2]}{U_i^4} \quad (2)$$

式中, $U_{\text{stab},k}$ 为以 i,j 为首末端节点的电压稳定指标; X, R 为支路 k 的电抗和电阻; U_i 为首节点的电压幅值。

静态电压稳定指标最小的目标函数为

$$\min f_{\text{Ustab}}(x_2) = \max\{U_{\text{stab},1}, U_{\text{stab},2}, \dots, U_{\text{stab},n}\} \quad (3)$$

1.2 模糊性的多目标优化模型

多目标最优解和各子目标最优解密切相关,但各子目标之间、各子目标最优解同多目标最优解之间的关系是模糊的。采用模糊优化算法一般能够得到满意的结果。本文采用三分法的基本思想,通过如图 1 所示的降半梯形的偏小型分段线性函数来表示子目标的模糊隶属度函数。

假设子目标函数的模糊隶属度为 μ_i ^[14],则

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_i^* \\ \frac{\bar{f}_i - f_i}{\bar{f}_i - f_i^*} & f_i^* \leq f_i \leq \bar{f}_i \\ 0 & f_i \geq \bar{f}_i \end{cases} \quad (4)$$

式中, \bar{f}_i 为子目标函数的上限值; f_i^* 为各子目标单独优化得到的最佳值。

为了将多目标优化转化为单一目标的总体优化,在分别求出 2 个优化子目标最佳优化值的基础上,对 2 个模糊隶属度函数进一步求最小值,得到总体满意度。总体满意度 L 为

$$\max L = \min\{\mu_1, \mu_2\} \quad (5)$$

图 1 为偏小型的梯形图。

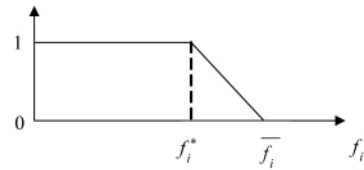


图 1 偏小型梯形图

Fig. 1 Figure of partial small trapezoid

1.3 约束条件

优化模型的等式约束为节点潮流方程,不等式约束为电压幅值的上下限和允许加入 DG 总容量的限制。电压约束为:

$$|V|_{\min} \leq |V_i| \leq |V|_{\max} \quad (6)$$

接入 DG 总容量约束为

$$0 \leq \sum_{i=1}^n P_{\text{DG}i} \leq P_{\text{DG,max}} \quad (7)$$

式中, V 为节点电压; $P_{\text{DG}i}$ 为第 i 个节点接入的 DG 容量。

1.4 多目标优化数学模型

本文采用上述模糊优化算法将两个目标转化为单一目标,并将节点电压越限和 DG 有功出力越限以罚函数的方式进行处理,建立分布式电源优化配置的多目标优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min F = & 1 - \min(\mu_1, \mu_2) + \\ & k_1 \sum_{i=1}^n [\max(|V_i| - |V_{\max}|, 0) + \max(|V_{\min}| - |V_i|, 0)] + \\ & k_2 \sum_{i=1}^n [\max(P_{\text{DG}i} - P_{\text{DG,max}}, 0) + \max(0 - P_{\text{DG}i}, 0)] + \\ & k_3 \max\left(\sum_{i=1}^n P_{\text{DG}i} - P_{\text{DG,max}}, 0\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, k_1, k_2 和 k_3 为惩罚因子; n 为节点个数。

2 惯性因子自适应的粒子群算法

2.1 基本粒子群优化算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法^[12]中,每个优化问题的解都是搜索空间中的一个“粒子”。所有粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值(fitness value),每个粒子同时具有一个速度,决定其飞翔的方向和距离。在寻优过程中,粒子群追随当前的最优粒子在解空间中搜索。

PSO 算法是随机初始化一群粒子,这群粒子在迭代过程中,通过学习两个“极值”来调整自己搜索方向和位置,以寻找最优解。这两个“极值”,一个是个体极值 $pBest_{id}$,是每个粒

子自身当前找到的最优值,另一个是全局极值 $gBest_{id}$,是所有粒子当前找到的最优解。粒子在搜索过程中,根据这两个值来调整自己的速度 V_{id} 和位置 X_{id} 。

为加快 PSO 的收敛速度^[12],引入惯性因子,粒子的速度和位移公式为

$$\begin{aligned} V_{id}^{k+1} &= wV_{id}^k + C_1 \text{rand}() (pBest_{id}^k - X_{id}^k) + \\ &C_2 \text{rand}() (gBest_{id}^k - X_{id}^k) \quad (9) \\ X_{id}^{k+1} &= X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \end{aligned}$$

式中, w 为惯性因子; X_{id} 为粒子位置; V_{id} 为粒子速度; c_1, c_2 为加速系数(学习因子),本算法中均等于 2; $\text{rand}()$ 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2.2 惯性因子自适应的粒子群算法

基本 PSO 算法虽然收敛速度比较快,但是其适应环境的能力不强,很难找到适应于不同问题的最佳值。本文提出一种惯性因子自适应的粒子群算法,将优化函数的适应值和惯性因子 w 紧密联系,随着迭代的进行,对惯性因子 w 进行动态改变,这样能增强 PSO 算法的搜索能力和自适应能力,使其更适应环境。惯性因子 w 的计算公式为

$$w_i^k = \begin{cases} w_{\max} & f_i^k \geq f_{\text{avg}}^k \\ w_{\min} + \frac{(f_i^k - f_{\min}^k)(w_{\max} - w_{\min})}{f_{\text{avg}}^k / 2 - f_{\min}^k} & f_i^k / 2 \leq f_i^k \leq f_{\text{avg}}^k \\ w_{\min} + \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T_{\max}} (T_{\max} - k) & f_i^k \leq f_{\text{avg}}^k / 2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, w_{\max} 和 w_{\min} 分别为惯性因子的最大和最小值,本文中按线性递减方法中的取值,即 $w_{\max}=0.9, w_{\min}=0.4$; f_i^k, f_{\min}^k 和 f_{avg}^k 分别为第 k 次迭代时粒子 i 的适应度、种群的最小适应度和种群的平均适应度。

3 基于惯性因子自适应的粒子群算法的分布式电源优化配置

3.1 分布式电源优化配置中粒子的构造

本文采用每个节点的 DG 注入有功来代表粒子

$$P = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, P 为粒子群体; M 为种群数目; N 为待安装的节点数目。

3.2 算法求解步骤

(1) 按石磊等^[15]中的雅克比矩阵法计算系统节点有功网损微增率,选出 DG 安装的候选节点。

(2) 输入原始数据,获取系统节点信息和支路信息,获取粒子群的群体规模等参数。

(3) 初始化种群,设置参数。在粒子取值范围内随机初始化粒子的速度和位置,设置最大迭代次数。

(4) 对初始化粒子群中的每个粒子进行潮流计算,并按有功网损最小求得各自的适应度值和当前个体最优解 $pBest_{id}$ 及全局最优解 $gBest_{id}$ 。

(5) 计算参数 w ,调整 V_{id}^{k+1} 和 X_{id}^{k+1} ,对个体粒子中越界点的控制变量进行调整,修正越界状态变量。

(6) 对更新后的粒子群中的每个粒子进行潮流计算。若粒子的当前状态优于迭代过程中的历史个体极值,则以此状态更新历史个体极值 $pBest_{id}$; 若群中有粒子的当前状态优于迭代过程中的历史全局极值,则以此状态更新历史全局极值 $gBest_{id}$ 。

(7) 终止条件判断:若粒子群迭代次数已经达到最大迭代次数则停止迭代输出最优解;若不满足,则回到步骤 5。

(8) 以静态电压稳定指标最小为目标,重复步骤(2)—(7)。

(9) 按照 1.2 节中所述的模糊性的多目标模型,重复步骤(2)—(7),得出最优总体满意度。

4 算例分析

本文采用如图 2 所示的 33 节点辐射状配电网系统。配电系统数据见文献^[13]。

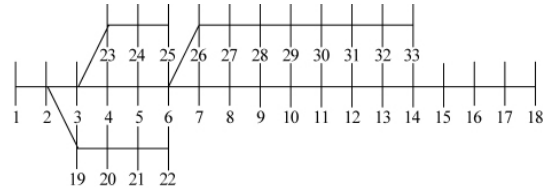


图 2 33 节点配电系统

Fig. 2 33-bus distribution system

先计算有功网损微增率,确定 DG 候选节点能够减小 PSO 搜索的空间,从而能够加快求解速度。33 节点配电系统按照石磊等^[15]方法计算,各节点网损微增率的绝对值大小排序见表 1。

表 1 有功网损微增率

Table 1 Active power loss incremental factors

有功网损微增率	节点号
-0.0080354	33
-0.0075457	32
-0.0071368	31
-0.0059048	30
-0.0053471	29
-0.0043569	28
-0.0030576	27
-0.0027457	26
-0.0026778	18
-0.0026752	17

选取以上 10 个节点作为 DG 的候选节点,运用惯性因子自适应的粒子群优化算法进行 DG 的优化配置。分布式电源总有功出力不超过系统总负荷的 20%, 给定参考容量为 $100\text{MV}\cdot\text{A}$ 。分布式电源的功率因素为 0.9。

(1) 单独对系统网络损耗最小的目标函数进行优化,迭代后得出系统网络损耗最小为 0.27921MW ,总体满意度 L 为

0.96193,系统静态电压稳定指标为 0.020340。

(2) 单独对静态电压稳定指标最小的目标函数进行优化,迭代后得出的静态电压稳定指标最小为 0.020310,总体满意度 L 为 0.95565,系统有功损耗为 0.28093MW。

(3) 对总体满意度 L 进行优化,迭代计算后系统网络损耗为 0.27969MW,静态电压稳定指标为 0.020318。总体满意度 L 最大为 0.98869。分布式电源的最佳位置和容量如表 2。

表 2 分布式电源位置和容量

Table 2 Location and capacity of the DG

DG 接入节点号	DG 容量/kW
17	34.72
30	11.61
32	12.61
33	7.23

由以上 3 种情况可以看出,对于两个单目标规划方案而言,虽然得到的单个优化目标的模糊隶属度最高,但是没有考虑另一指标的变化,导致总体满意度不高,规划方案不是最优。第三种情况同时考虑网损和电压稳定指标,可以得到全局意义上的最优的方案。

采用惯性因子自适应 PSO 算法、标准 PSO 算法($w=0.8$)及惯性因子线性递减权重策略(LDW)PSO 算法,分别对分布式电源优化配置的单目标模型和多目标模型进行求解,结果如表 3 所示。

表 3 算法比较

Table 3 Optimal results at different algorithm

算法名称	有功损耗/MW	电压稳定指标	总体满意度
自适应 PSO	0.27921	0.020310	0.98869
标准 PSO	0.28350	0.020326	0.96398
LDWPSO	0.28340	0.020318	0.97471

由表 3 可以看出,无论目标函数是最小化有功损耗、最小化静态电压稳定指标、最大满意度指标,惯性因子自适应的 PSO 算法的求解结果都要优于其他两个算法。仿真结果表明,将优化函数的适应值和惯性因子 w 紧密联系,惯性因子的改变由适应值的范围来决定,并且随着迭代的进行,惯性因子动态地改变,能够使算法适应不同的环境,在不同优化目标的情况下都可以搜索到较满意的结果。

5 结论

本文提出了一种基于电压稳定指标的分布式电源优化配置方法,构造了模糊隶属度函数对网损和电压稳定两个指标进行评价,建立了多目标优化模型。为缩短计算时间,首先求解各节点的有功网损微增率,根据微增率排序结果,选择合适位置作为候选节点,进而采用惯性因子自适应的粒子群优化算法进行求解。通过对 33 节点配网算例的仿真结果表明,该方法同时可以降低总网损,并维持电压稳定水平。与标准粒子群算法、惯性因子线性递减算法相比,本文提出的惯

性因子自适应算法计算和收敛速度快,且具有较强的空间搜索能力和自适应能力。

参考文献 (References)

- [1] Caire R, Retiere N, Maetino S. Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network [C]//Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Piscataway: NJ, 2002: 1423-1428.
- [2] Barker P P, de Mello R W. Determining the impact of distributed generation on power systems part I: Radial distribution systems [C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle (USA), 2000: 1645-1656.
- [3] Silvedtri A, Berizzi A, Buonanno S. Distributed generation planning using genetic algorithms [C]//Proceedings of International Conference on Electric Power Engineering. Budapest (Hungary), 1999: 257.
- [4] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.
Wang Zhiqun, Zhu Shouzheng, Zhou Shuangxi, et al. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [5] Borges C L, Falcao D M. Impact of distributed generation allocation and sizing on reliability, losses and voltage profile [C]//Proceedings of IEEE Power Tech Conference. Bologna (Italy), 2003: 5.
- [6] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, et al. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators [C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Ohio (USA), 2001: 918-923.
- [7] Tautiva C, Cadena A. Optimal placement of distributed generation on distribution networks [C]//Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latin America, 2008: 5.
- [8] Achara N, Mithulananthan N, Mahat P. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(10): 669-678.
- [9] 石嘉川, 刘玉田. 计及分布式发电的配电网多目标电压优化控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 47-51.
Shi Jiachuan, Liu Yutian. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 47-51.
- [10] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 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, et al. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [11] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 23-29.
Zheng Zhanghua, Ai Qian, Gu Chenghong, et al. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(13): 23-29.
- [12] 刘波. 粒子群优化算法及其工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Liu Bo. Particle swarm optimization and its application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [13] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Wang Shouxiang, Wang Chengshan. Modern power distribution system analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [14] 胡毓达. 实用多目标优化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
Hu Yuda. Practical multi-objective optimization[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990.
- [15] 石磊, 陈恳, 张伯明, 等. 雅克比矩阵法计算有功网损微增率公式的推导[J]. 南昌大学学报, 2001, 23(2): 55-58.
Shi Lei, Chen Ken, Zhang Boming, et al. Journal of Nanchang University, 2001, 23(2): 55-58.

(责任编辑 岳臣)