

基于改进粒子群算法的多目标分布式电源选址定容规划

周 洋 许维胜 王 宁 邵炜晖

(同济大学电子与信息工程学院控制科学与工程系 上海 201804)

摘 要 通过分析分布式电源对配电网的影响,以有功功率损耗、电压质量及分布式电源总容量为优化目标,基于模糊理论建立了分布式电源在配电网中选址定容的多目标优化模型,并提出了一种改进粒子群算法进行求解。在算例仿真中,基于 IEEE 14 标准节点系统,采用 MATLAB 仿真工具对所提算法进行了测试,证实了所提算法全局搜索能力较强、收敛速度较快,并通过比较分析验证了该模型和算法的可行性及有效性。

关键词 分布式电源,选址定容,粒子群算法,多目标优化

中图法分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Multi-objective Siting and Sizing of Distributed Generation Planning Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

ZHOU Yang XU Wei-sheng WANG Ning SHAO Wei-hui

(Department of Control Science and Engineering, School of Electronics and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract By analyzing the impact of the distributed generations(DGs) on the distribution network, a method was built for siting and sizing of DGs in the distribution network. Comprehensively considering three indices of active power losses, voltage quality and DG capacity, the paper presented an improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective optimization based on fuzzy theory. The proposed method was testified on IEEE 14-node system achieved by MATLAB. Simulation results show that the solving algorithm has high capability of global search and better convergence rate. The feasibility and effectiveness of the method and the algorithm were finally evaluated through comparative analysis.

Keywords Distributed generations, Siting and sizing, Particle swarm optimization, Multi-objective optimization

1 引言

将可再生能源的分布式发电技术与大电网结合,是普遍公认的节能减排、绿色环保、安全可靠的电力系统运行方式,是电力发展的方向^[1,2]。分布式电源(Distributed Generation, DG)是指在一定的地域范围内,以分散方式布置在用户附近,与环境兼容的小型模块化发电单元,其发电功率为几千瓦到几十兆瓦。

分布式发电系统目前大多与配电网并网运行。DG 入电网后,会对配电网的潮流分布产生影响,进而可以优化配电网,缓解配电网输电电压^[3]。但是由于 DG 的投入和退出有很大的随机性,且输出功率的稳定性易受环境影响,因此, DG 的不当接入会对电网产生诸多负面影响,如影响配电网的稳定性及电压质量,产生谐波等^[4]。这些影响的大小与 DG 的容量和接入位置有很大关系^[5,6],因此, DG 的选址定容是在 DG 规划阶段中需要考虑的重点问题。

由于规划的优化目标较为单一,传统的规划方法无法很

好地解决这一问题^[7-9]。近年来,考虑电压、电流质量和环境等因素的多目标优化迅速发展,但量纲的不统一,使得求解的复杂性大大提高,给多目标优化提出了新的挑战^[10]。本文在研究标准粒子群优化算法的基础上,针对配电网中 DG 的选址定容问题,建立了包括有功功率损耗、电压质量及接入 DG 的总容量为目标函数的数学模型,运用模糊理论将多目标优化模型转化为基于模糊隶属度的单目标优化模型,并利用改进的粒子群优化算法进行优化。在 IEEE-14 标准节点测试系统上进行仿真,提出了具有实用价值的 DG 配置方案。

2 含 DG 的配电网规划模型

2.1 含 DG 的配电网潮流计算

连接到配电网的 DG 所采用的模型既可简化为 PV 节点,也可以是 PQ 节点。本文将其当成具有恒定功率因数的 PQ 节点,由于 DG 的位置一般靠近负荷中心,因此本文假设 DG 的位置就在负荷节点上。

DG 接入负荷节点的模型如图 1 所示,只需考虑改变接入 DG 节点的负载功率变化即可。

本文受国家自然科学基金资助项目(71401125),高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130072110045)资助。

周 洋(1991—),女,硕士生,主要研究方向为电动汽车在智能电网中的优化管理, E-mail: zhouyang_43@126.com; 许维胜(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为智能控制理论及应用, E-mail: xuweisheng@tongji.edu.cn; 王 宁(1992—),男,博士生,主要研究方向为智能电网需求侧管理。

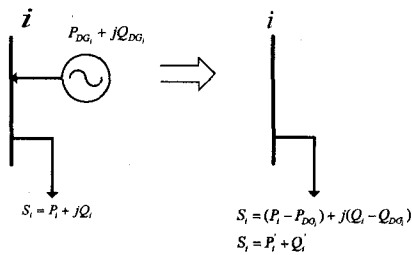


图1 DG接入电网模型

建立了DG接入配电网模型后,便可以根据相应的节点发电负载功率参数和配电网线路参数进行潮流计算,进而得到配电网中各个节点的电压以及功率分布。本文在算例仿真过程中采用牛顿拉夫逊法进行潮流计算,该方法具有良好的线性收敛性能。

2.2 基于多目标优化的目标函数

本文提出包括有功功率损耗、电压质量和DG接入的总容量为目标函数的多目标优化,并根据模糊理论,将三者归一化综合考虑进行DG的选址定容的优化。

2.2.1 功率损耗

电能从发电端传输到负载端的过程中,输电线路产生的电能损耗不可避免,其中有功损耗将会转化为热能。合理地配置配电网中的DG,可以有效地减小有功功率损耗,提高发电利用率,节约能量。基于有功功率损耗的目标函数最优数学表达式为:

$$\min C_1 = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (1)$$

式中, n 为输电线路总数; I_i 为第*i*条支路的电流,可通过上文中的潮流计算求得; R_i 为第*i*条支路的电阻参数。

2.2.2 电压质量

某些状况下,电力系统在遭受干扰后的几秒或几分钟内,系统中的某些母线电压可能经历大幅度、持续性降低,从而使得系统的完整性遭到破坏,功率不能正常地传送给用户。这种灾变称为系统电压不稳定,其灾难后果则是电压崩溃。通常用静态电压稳定指标来表示系统电压稳定性。配电网中电压质量受配电系统的电压稳定性影响。本文采用配电网节点电压基于期望电压的方差来描述电压质量。基于电压质量的目标函数最优数学表达式为:

$$\min C_2 = \sum_{i=1}^N (U_i - U_{rated})^2 \quad (2)$$

式中, N 为配电网节点总数; U_i 为第*i*个节点的点电压; U_{rated} 为期望的稳态电压幅值(1.0 p.u.)。

2.2.3 DG总容量

在实际应用中不仅要考虑改善电网带来的经济效应,还需要考虑DG安装、运行和维护的成本费用问题。本文中不涉及经济模型,仅考虑接入配电网的DG总容量。基于DG总容量的目标函数最优数学表达式为:

$$\min C_3 = \sum DG_i \quad (3)$$

2.2.4 基于模糊理论的多目标归一化

由于有功功率损耗、电压质量和接入DG总容量这3个优化子目标具有不同的量纲,且互相间还可能存在矛盾,为协调不同目标之间的关系,常用的方法有权重系数法和模糊法。本文采用模糊理论将3个优化子目标归一化,转化为单一目标进行优化。引入通用的线性分段函数来表示各个子目标的

模糊隶属度函数:

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & C_i \leq C_{i \min} \\ \frac{C_{i \max} - C_i}{C_{i \max} - C_{i \min}}, & C_{i \min} < C_i < C_{i \max} \\ 0, & C_i \geq C_{i \max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i=1,2,3$; μ_1, μ_2, μ_3 分别对应有功功率损耗、电压质量和接入DG总容量3个优化子目标隶属度; $C_{1 \max}, C_{2 \max}$ 和 $C_{3 \max}$ 分别对应各个子目标函数值的上限,在优化过程中可根据实际情况确定; $C_{1 \min}, C_{2 \min}$ 和 $C_{3 \min}$ 分别对应各个子目标单独优化得到的最佳目标值。

经过模糊化处理,原来多目标优化问题就转化为基于单一目标函数的优化问题:

$$\max \lambda = \min \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\} \quad (5)$$

式中, λ 表示总体满意度。

3 改进的粒子群优化算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是Kennedy和Eberhart于1995年提出的基于集群智能的随机优化算法,适用于求解非线性、不可微的复杂优化问题^[11]。PSO算法由于简单、易实现且需要调节的参数不多,因此已被应用于多个学科和工程领域。但该算法收敛精度不高,易陷入局部最优值。为避免陷入局部最优,本文将改进的PSO算法应用于求解配电网DG的选址和定容。

3.1 惯性权重 ω

粒子群优化算法中,每个粒子*i*第*d*维的速度和位置更新公式如下:

$$v_i^d = \omega \times v_i^d + c_1 \times rand_1^d \times (pBest_i^d - x_i^d) + c_2 \times rand_2^d \times (gBest_i^d - x_i^d) \quad (6)$$

$$x_i^d = x_i^d + v_i^d \quad (7)$$

分析上述公式可知,粒子位置 x_i^d 受速度 v_i^d 的影响,而粒子的速度很大程度上受到惯性权重 ω 的影响。惯性权重 ω 使微粒保持运动惯性,使其有扩展搜索空间的趋势,有能力探索新的区域。若 ω 较大,粒子有能力扩展搜索空间,搜索以前所未到达的区域,算法的全局搜索能力强;若 ω 较小,粒子主要在当前解附近搜索,局部搜索能力较强。因此采用自适应MPSO算法调整 ω 的策略,让 ω 随算法迭代的进行而线性地减少,从而显著改善算法的收敛性能。自适应MPSO算法惯性权重 ω 的函数形式通常为:

$$\omega = \omega_{begin} - \frac{\omega_{begin} - \omega_{end}}{epoch_{max}} \times epoch \quad (8)$$

式中, ω_{begin} 为初始惯性权重, ω_{end} 为终止惯性权重, $epoch_{max}$ 为最大迭代次数, $epoch$ 为当前迭代次数。

3.2 边界变异

在粒子群优化算法中,当粒子飞越边界脱离搜索域后,通常将边界位置值赋给该粒子:

$$\text{if } x_i^d > x_{max}^d \text{ then } x_i^d = x_{max}^d$$

或者

$$\text{if } x_i^d < x_{min}^d \text{ then } x_i^d = x_{min}^d$$

经过这样的处理后,所有越界的粒子都易聚集在边界处,如果边界处存在局部最优,则粒子很容易陷入该局部最优;同时,随着边界处粒子的增多,种群的多样性也会降低,势必会影响算法的全局搜索能力,降低整个粒子群的效率。基于此,本文考虑采用如下边界变异策略进行处理:

if $x_i^d > x_{\max}^d$
then $x_i^d = x_{\max}^d \times (1 - c \times \text{rand}())$
或者
if $x_i^d < x_{\min}^d$
then $x_i^d = x_{\min}^d \times (1 - c \times \text{rand}())$

其中, $c=0.01$ 。通过这种操作,既使得粒子位于可行空间内,又克服了原算法易在边界上陷入边界局部最优的缺点,同时也增加了种群的多样性,有利于提高算法的全局搜索能力和解的质量。

基于改进粒子群优化算法多目标优化的 DG 选址定容的流程图如图 2 所示。

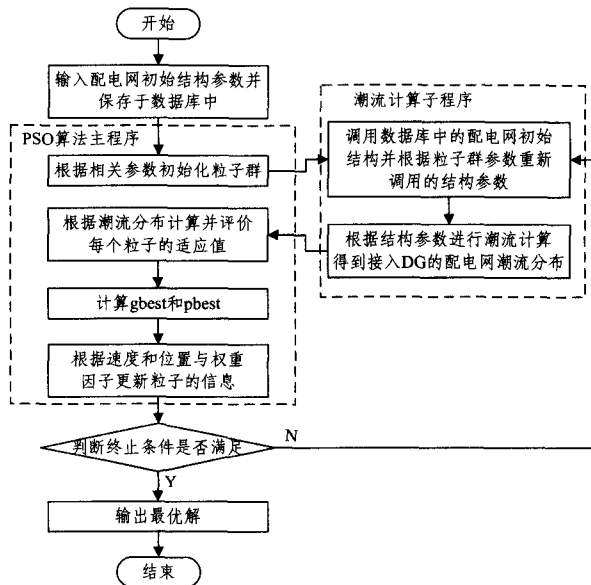


图 2 基于改进粒子群优化算法多目标优化的 DG 选址定容的流程

4 仿真算例与结果分析仿真

4.1 参数设置

利用上述模型以及改进的粒子群优化算法,在 MATLAB 环境下对 IEEE-14 节点标准系统进行仿真。

改进粒子群优化算法的参数设置为:粒子数目 $m=30$,权重因子 $c1=c2=2$,惯性权重系数 $\omega_{\max}=0.9, \omega_{\min}=0.4$,最大迭代次数设置为 3000。仿真时,涉及到功率的数据均精确到 0.1W,且配电网的电源及负载容量数量级为兆瓦(MW),因此设置目标结果精确度为 10^{-7} 。

仿真时对 DG 容量的处理是采用连续方式进行优化,得到相应的选址定容方案后,对 DG 的容量数据精确度进行处理。由于 DG 种类很多,容量等级从几十千瓦到 50 兆瓦不等,而仿真设置的 DG 容量数量级为兆瓦(MW),因此优化方式采用连续处理。假设 DG 最小容量为 50kW,且 DG 的功率因数均为 0.9,则得到相应的方案后应将容量精确至 0.05 后重新计算相应的目标参数。

对于 IEEE-14 标准节点模型,运用牛顿拉夫逊法可以计算出该模型的电力潮流分布,根据 IEEE-14 标准节点模型的线路拓扑及参数,可以求得该电网模型的有功功率损耗(Active Power Loss)及电压质量(Voltage Quality),各节点的电压幅值分布($U(i)$)(1.0p.u)、有功功率损耗和电压质量如表 1 所列。

表 1 IEEE-14 标准节点模型的潮流分布

节点	潮流分布
U(1)	1.060
U(2)	1.045
U(3)	1.010
U(4)	1.026
U(5)	1.031
U(6)	1.070
U(7)	1.060
U(8)	1.090
U(9)	1.048
U(10)	1.043
U(11)	1.051
U(12)	1.055
U(13)	1.048
U(14)	1.029
Active Power Lose 有功功率损耗	0.0883479
Voltage Quality 电压质量	0.0370145

4.2 仿真算例分析

根据上文介绍的理论,可对单目标函数进行仿真求解,并基于各个单目标函数的 DG 选址定容的优化结果,构造出各个目标的模糊隶属度函数,将多目标优化问题转化为单一目标优化问题。通过优化各目标的总体满意度得出较优的 DG 选址定容配置方案。运用改进粒子群优化算法进行仿真求得最优解,得到有功功率损耗、电压质量、DG 总容量的相应数据,如表 2 所列。

表 2 原电网与单目标及多目标优化后电网目标参数的比较

DG(i)	原电网	有功功率 损耗的 单目标 函数优化	电压质量的 单目标 函数优化	基于模糊 隶属度的 多目标 函数优化
DG(1)	0	7.55	7.80	0
DG(2)	0	3.60	0	0
DG(3)	0	12.30	0	0
DG(4)	0	0	0	7.55
DG(5)	0	15.90	0	15.95
DG(6)	0	8.10	20	3.6
DG(7)	0	3.40	0	0
DG(8)	0	1.50	0	0
DG(9)	0	9.95	0	0
DG(10)	0	14.05	0	4.3
DG(11)	0	6.15	0	1.9
DG(12)	0	4.25	0	0.3
DG(13)	0	15.90	0	10.9
DG(14)	0	15	0.05	9.5
Active Power Loss 有功功率损耗	0.0883479	0.0574439	0.0875274	0.0633861
Voltage Quality 电压质量	0.0370145	0.0571105	0.0363309	0.0454090
DG Capacity DG 总容量	0	117.65	27.85	54

4.3 仿真结果分析

分析以有功功率损耗为单目标函数进行优化的结果发现,该改进的粒子群优化算法可以有效地寻得全局最优解。与原电网有功功率损耗比较可知,通过优化 DG 的选址定容配置方案,可以有效地降低配电网的有功功率损耗,上述仿真实验中有功功率损耗的下降率达 34.98%。在对以有功功率损耗为单目标函数进行多次优化仿真时发现,DG 的选址定容配置方案以及接入 DG 的总容量差异很大。在实际应用中,DG 的接入容量与经济成本息息相关,虽然可以使有功

(下转第 31 页)

- [9] 汪劲松,石薇. 种群遗传神经网络在股指预测中的应用[J]. 统计与决策,2014(14):76-79
- [10] Liu Sheng,Li Yan-yan. A novel predictive control and its application on water level system of ship boiler[C]// International Conference on Innovative Computing, Information and Control. 2006:8
- [11] 李强,刘光远,赖详伟. 改进的支持向量机在情感识别中的应用[J]. 计算机应用,2014,34(S1):117-119
- [12] 李翠平,郑瑶瑕,张佳,等. 基于遗传算法优化的支持向量机品位插值模型[J]. 北京科技大学学报,2013,35(7):837-843
- [13] 孙煦,陆化普,吴娟. 基于蚁群算法支持向量机模型的公路客运量预测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(1):124-129
- [14] 赵曦,李颖,徐江,等. 基于 PSO-SVM 的发动机及故障诊断研究[J]. 计算机仿真,2014,31(3):171-174
- [15] Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical

Optimization; TECHNICAL REPORTTR06[R]. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department,2005

- [16] 张淑宁,王福利,尤富强,等. 基于鲁棒学习的最小二乘支持向量机及其应用[J]. 控制与决策,2010,25(8):1169-1172
- [17] Luttrell S P. The use of Bayesian and entropic methods in neural network theory, Maximum Entropy and Bayesian Methods[M]. Kluwer, Boston, 1989:363-370
- [18] 李秋玲,贾敏智. 基于改进 ABC 算法优化 SVM 的汽车发动机故障诊断[J]. 制造业自动化,2014,36(3):57-60
- [19] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2011, 2(3):27
- [20] 高立法,冯腾达. 企业经营分析与绩效评价[M]. 北京:经济管理出版社,2001
- [21] 史文利,高天宝. 供应链绩效评价的未知测度模型[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(5):983-987

(上接第 18 页)

率损耗降至最低,但是无法确定经济合理的 DG 的选址定容的具体配置方案,实际应用价值不大。

分析以电压质量为单目标函数进行优化的结果发现,虽然提高了电压稳定性使电压质量较原配电网得到优化,但是优化效果不明显;相反在多数情况下,为降低功率损耗而接入 DG 使得电网的电压潮流产生波动,电压质量降低,电网稳定性受到影响,存在潜在的电压崩溃风险。因此 DG 的接入需谨慎。

对于基于多目标优化的 DG 选址定容配置方案及优化后的结果进行分析发现,这种基于模糊隶属度的多目标优化方法可以有效地综合考虑各方面因素,得到一个比较满意的方案。仿真中,有功功率损耗较原电网的下降率达 28.25%,对于基于有功功率损耗单目标优化方案,电压质量较原电网的下降率有很大的改善,DG 总容量减少 54.1%。由此可见,对于 DG 的选址定容优化问题,有功功率损耗、电压质量以及接入 DG 总容量这几个目标是相互制约、相互矛盾的。实际问题中,求取 DG 的选址定容的配置方案需考虑多方面因素,因此对该问题进行多目标优化在实际应用中有较大的参考价值。

结束语 分布式发电在电力系统中将发挥重要作用,对 DG 进行选址和定容可以得到更好的网络规划结果。本文应用改进粒子群优化算法对 DG 接入配电网的选址定容问题进行了优化。优化目标为基于有功功率损耗、电压质量和接入 DG 总容量的多目标函数,通过模糊理论进行归一化处理将其转化为单一目标的优化问题。通过对惯性权重和边界处理的改进改善了传统粒子群算法易陷入局部最优的缺点,算法收敛速度快。结合 IEEE 14 节点系统进行了仿真,得出的相应结果具有实际应用意义。分析仿真结果可以看出,DG 的合理接入降低了配电网的线路投资和损耗成本。考虑到分布式发电带来的巨大社会和经济效益,DG 接入配电网具有十分重要的作用,是未来电力系统发展的方向。

参 考 文 献

- [1] 余贻鑫,秦超. 智能电网基本理念阐释[J]. 中国科学:信息科学,

2014,44(6):694-701

- [2] Shaoyun G E, Li X U, Hong L I U, et al. Low-carbon benefit analysis on DG penetration distribution system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1):139-148
- [3] 吕学勤,吴辰宁,陈树果. 分布式电源并网的潮流计算[J]. 上海电力学院学报,2012,28(4):321-324
- [4] 赵波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化,2014,38(18):125-135
- [5] 赵兴勇,康凯,赵艳秋. 分布式电源选址定容优化算法[J]. 电力科学与工程,2011,27(3):51-54
- [6] Sookananta B, Kuanprab W, Hanak S. Determination of the optimal location and sizing of Distributed Generation using Particle Swarm Optimization[C]// 2010 International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2010:818-822
- [7] Ahmad N A, Musirin I, Sulaiman S I. Exponential based PSO performed on DG installation for loss minimization considering THD[C]// 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). IEEE, 2014:607-612
- [8] Joseph S, Skariah E N, Joseph T, et al. PSO based controller algorithm for optimal allocation & setting of fuel cell in a wind-PV integrated power system for maximizing loadability[C]// 2014 International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE). IEEE, 2014:1-6
- [9] Anwar A, Mahmood A N. CF-PSO based loss sensitivity clustering technique to identify optimal DG allocation nodes for energy efficient smart grid operation[C]// 2014 IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2014:1130-1135
- [10] Phonrattanasak P. Optimal placement of DG using multiobjective particle swarm optimization[C]// 2010 2nd International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET). IEEE, 2010:342-346
- [11] 付国江,王少梅,刘舒燕,等. 含边界变异的粒子群算法[J]. 武汉理工大学学报,2005,27(9):101-103