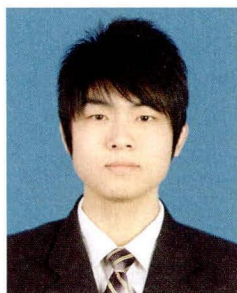


基于改进粒子群算法的配电网分布式电源规划策略

针对既有配电网架结构下的分布式电源选址与定容问题,提出了一种抑制局部最优的带惯性权重的粒子群优化算法(PSO),在算法搜索过程中通过引入变异算子和偏移算子,根据适应度标准差及当前最优适应度值,确定目前部分粒子的畸变程度,摆脱了寻优过程中局部最小点的束缚,改善了多目标优化的非线性准确度。同时改进了PSO中对于速度和位置的更新方法和终止判据,提高了算法的收敛特性。通过IEEE-33节点配电网和延边配电网算例表明,改进的粒子群算法能够有效地寻找到全局最优解并且具有良好的收敛特性。

曲 鑫 王小君 和敬涵/北京交通大学电气工程学院



曲 鑫/硕士研究生

关键词/Keywords

分布式电源(DG) ·
选址定容 ·
粒子群算法 ·
局部最优 ·
变异算子 ·

随着大量分布式电源(DG)的出现,使得配电网的负荷预测、潮流计算以及保护方案与以往相比有较大的改变。尽管分布式电源在减少网络损耗方面有较大潜力,一定程度上可以减缓和推迟对电网网架升级的投资,但是配电网中不同的DG接入位置和容量对配电网网损和配电网整体节点电压水平也会造成不同程度的影响^[1-3]。针对上述问题,国内外对于配电网中的DG规划开展大量工作,然而如何合理配置间歇式新能源与储能装置等DG单元,积极消纳可再生能源仍缺乏有力的理论与方法支撑。为了实现配电公司与用户的最大期望,需要规划人员对分布式电源的影响做出正确的评估,并给出分布式电源的最优位置和规模,避免不同种类的DG在电网的逐步渗透过程中舍本逐末,一味追求经济效益而破坏了电网的安全稳定运行。文献[4]采用了自适应多目标的粒子群算法,通过自适应改变惯性系

数来提高算法的全局收敛能力,但是在含分布式电源的配电网的目标优化模型当中,该文只考虑了有功损耗和无功补偿设备投资,未能充分反映分布式电源规划的多目标特性,有一定的局限性。文献[5]提出基于群搜索优化算法确定DG的位置和容量,但是没有考虑负荷的动态特性,同时适应度函数只考虑了网络损耗,缺乏代表性。针对上述问题本文提出一种改进的带惯性权重的粒子群优化算法,通过在搜索过程中引入变异算子和偏移算子,使得PSO能更有效地摆脱局部最小点,防止早熟现象的出现。算例一表明改进后的粒子群算法在寻优能力以及收敛性方面明显优于标准遗传算法。算例二通过改进的粒子群算法对延边66 kV配电网进行了DG的布点规划,结果表明该方法能够准确、快速和有效地寻找到DG的最优接入位置及容量。

配电网规划中的DG规划建模

配电网中分布式电源的规划策略从数学层面上看是一种非线性、多目标优化布点问题,其主要涉及到电源位置和容量的确定。

1. 含DG的配电网潮流计算

配电网的潮流计算基于配电网的放射状网络架构,在已知首端节点电压和各节点的负荷功率的情况下,前推各线路潮流和各节点电压。然而不同分布式电源的接入位置和容量都会对配电网潮流的大小和方向产生不同的影响,进而改变整体的线路损耗。图1为一条包含

DG的辐射型配电网线路。其中 P_{li} 和 Q_{li} 分别为节点 i 的有功负载和无功负载； V_i 为节点 i 处的节点电压； P_{DG} 和 Q_{DG} 为DG容量。

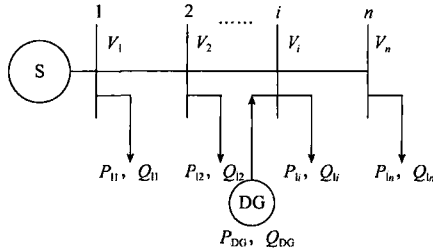


图1 带分布式电源的单条辐射馈线

考虑节点上负荷有功与分布式电源出力的不同情况，配电网中的有功流动有以下三种场景：

- 1) 当节点 i 处DG出力 P_{DG} 大于负荷需求 P_{li} 时，该负荷节点向配电网提供 $P_{DG} - P_{li}$ 有功。
- 2) 当 $P_{DG} = P_{li}$ ，配电网和该负荷节点之间没有有功流动。
- 3) 当 $P_{DG} < P_{li}$ 时，配电网向该负荷节点提供 $P_{li} - P_{DG}$ 有功。

本文采用前推回代潮流算法将分布式电源作为具有恒定功率因数的PQ节点，及相当于相应的负荷节点上添加一个负的负荷。同时，传统的继电保护大部分只适应单向潮流，不具有方向性，为保证DG接入后配电网潮流方向不会改变，要求安装分布式电源装机容量不超过所在节点的负荷大小。潮流方程为

$$P_i = P_{i-1} - R_{i-1}(P_{i-1}^2 + Q_{i-1}^2)/U_{i-1}^2 - P_{li} + P_{DG_i} \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{i-1} - X_{i-1}(P_{i-1}^2 + Q_{i-1}^2)/U_{i-1}^2 - Q_{li} + Q_{DG_i} \quad (2)$$

$$U_i^2 = U_{i-1}^2 - 2(P_{i-1}R_{i-1} + Q_{i-1}X_{i-1}) + (R_{i-1}^2 + X_{i-1}^2)(P_{i-1}^2 + Q_{i-1}^2)/U_{i-1}^2 \quad (3)$$

式中， $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2. 布点规划的数学模型

本文在既有的配电网架结构下，综合考虑分布式电源安装运行费用、网损费用和购电费用，同时在保证节点电压不等式约束、导线电流不等式约束以及DG容量约束的情况下，针对分布式电源的接入位置和容量进行布点规划。

(1) 目标函数

$$\min Z_{\text{cost}} = C_{DG} + C_L + C_{\text{en}} + \sum_{i=1}^n K_U(U_i) +$$

$$\sum_{j=1}^L K_I(I_j) + K_{\Sigma DG}(S_{\Sigma DG}) \quad (4)$$

式中， $K_U(U_i)$ 、 $K_I(I_j)$ 和 $K_{\Sigma DG}(S_{\Sigma DG})$ 分别为节点电压约束、支路电流约束以及DG容量约束的惩罚系数，根据文献[8]，本文算例中取 $K_U(U_i) = K_I(I_j) = K_{\Sigma DG}(S_{\Sigma DG}) = 100$ 。

$$C_{DG} = (\alpha_1 + \beta_1) \sum_{i=1}^{nDG} [\partial_i (C_{i1} + C_{i2}) P_{DG_i}] + C_R P_{DG\Sigma} \tau_{\text{max}} \quad (5)$$

式中， C_{DG} 为折算到每年的DG投资及运行费用； α_1 、 β_1 分别为DG的年投资收益率和年运行维修率； $\partial_i = 0.34$ 为分布式电源的年费用均衡系数； C_{i1} 、 C_{i2} 分别为分布式电源的单位容量设备的综合投资成本以及安装成本； P_{DG_i} 为第 i 个分布式电源的额定容量；分布式发电的单位电价成本 $C_R = 0.533$ 元/(kW·h)^[7]，其中包括分布式电源的上网电价以及政府补贴电价； $P_{DG\Sigma}$ 为DG的年平均有功出力； τ_{max} 为分布式发电的最大利用小时数。

对于不同种类负荷，系统的年负荷率也不尽相同，为了贴近实际配电网中的线路损耗费用，基于最大负荷损耗时间与最大负荷利用小时数的关系得出如下经验公式

$$C_L = 8760 \left[K \frac{T_{\text{max}}}{8760} + (1-K) \left(\frac{T_{\text{max}}}{8760} \right)^2 \right] C_e \sum_{i=1}^{nL} P_{li} \quad (6)$$

式中， K 为负荷损耗经验系数，其大小随不同的负荷类型而改变，通常取值 $K = 0.1 \sim 0.4$ ；最大负荷利用小时数 $T_{\text{max}} = 3000$ h； $C_e = 0.5$ 元/(kW·h)为单位电价； P_{li} 为线路 i 的有功损耗。

供电公司从常规电源购电年费用

$$C_{\text{en}} = C_e \left(P_{\Sigma \text{新增}} - \sum_{i=1}^{nDG} \lambda_i S_{DG_i} \right) T_{\text{max}} \quad (7)$$

式中， $P_{\Sigma \text{新增}}$ 为考虑负荷增长的负荷总量； λ_i 为第 i 个DG的功率因数； S_{DG_i} 为第 i 个DG的视在功率。

(2) 不等式约束

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ I_j < I_{j\max} \\ S_{\Sigma DG} \leq 20\% S_{\text{load}} \end{cases} \quad (8)$$

式中， U_i 为 i 节点的节点电压； $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 为节点 i 的电压上下限； I_j 、 $I_{j\max}$ 分别为支路 j 的电流以及最大允许电流；同时，为避免接入的分布式发电总

量 $S_{\Sigma DG}$ 过大而影响系统的电能质量,文中约定 $S_{\Sigma DG}$ 不超过负荷总量的20%。

改进的粒子群优化算法

传统的PSO算法由于初始化的速度与位置的差异,在搜索过程中容易陷入局部最优,造成结果的早熟现象,本文通过引入变异算子和偏移算子将早熟聚拢的粒子打散,进而扩大粒子的搜索范围,粒子在新的空间里能寻找新的gbest。如此反复,利用该算法最终可以找到全局最优解。

式(9)和式(10)分别为带惯性权重的粒子群算法的速度与位置的迭代公式,其中 $\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} k$,为惯性权重。

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (g_d^t - x_{id}^t) \quad (9)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (10)$$

通过比较当前粒子群的适应度标准差 λ 与未优化前的理论期望值 f_{best} 来获得种群收敛的判据。设

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{avr})^2} \quad (11)$$

式中, n 为粒子群规模数; f_i 为第 i 个粒子的适应度值;

$f_{avr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$ 为所有粒子群当前的平均适应度值。

λ 反映粒子群的收敛程度, λ 越小,粒子群趋向集中;相反, λ 越大,粒子群的搜索方向则处于多元化状态。当 $\lambda = 0$ 时,粒子群优化算法达到局部收敛或全局最优,将此时得到的 f_{gbest} 与理论最优值 f_{best} 做比较,如若两者不相等,即可判断 f_{gbest} 为局部极值。反之, f_{gbest} 为期望结果,其中 f_{gbest} 为与gbest对应的适应度值。在判断出算法趋于局部收敛时,为保证算法高效快速的收敛特性,对此时的粒子 x_i 按变异概率 p 进行变异。其中

$$p = \begin{cases} k & \lambda < 0.2 \text{ \& } f_{gbest} > f_{best} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中, k 取值范围为 $(0, 1)$,其值与实际情况有关,通常取为0.4。

通过随机扰动的方法对粒子 x_i 进行变异操作,设粒子群的维数为 D ,对 x_i 的前 $\text{Int}(p \cdot D)$ 维进行扰动,令 x_{id} 为 x_i 的第 d 维取值,则有

$$x_{id} = \omega(x_{id} + \Delta\mu) \quad (13)$$

式中, ω 为变异算子,有 $\omega = 1 + 0.64\beta$, β 在区间 $(-1, 1)$ 上服从均匀分布,当粒子群因早熟而出现“聚拢”时,依靠变异算子将“聚拢”的粒子打散。 $\Delta\mu = \beta(u_{\max} - u_{\min}) + u_{\min}$ 为偏移算子,防止粒子群陷入边界最优,其中 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 分别为粒子位置的上下限。同时为了保存粒子群在之前迭代过程中获取的良好特性,只对群体中的部分粒子变异,文中采用对粒子群中的 $\text{Int}(n/2)$ 个粒子进行变异。为了增加粒子的变异特性,处理需要变异的 $\text{Int}(n/2)$ 个粒子时,对其 $\text{Int}(n/2)$ 个粒子的前 $\text{Int}(p \cdot D)$ 维采用式(13)进行变异;对另外 $\text{Int}(n/2)$ 个粒子的后 $\text{Int}(p \cdot D)$ 维进行变异,计算公式为

$$x_{id} = \omega(x_{id} + \Delta\mu) \quad (14)$$

当判断出 $\lambda = 0$ & $f_{gbest} \leq f_{best}$ 时,则跳出算法迭代过程,输出最优方案,减少了算法的迭代次数与时间。改进后粒子群算法流程如图2所示。

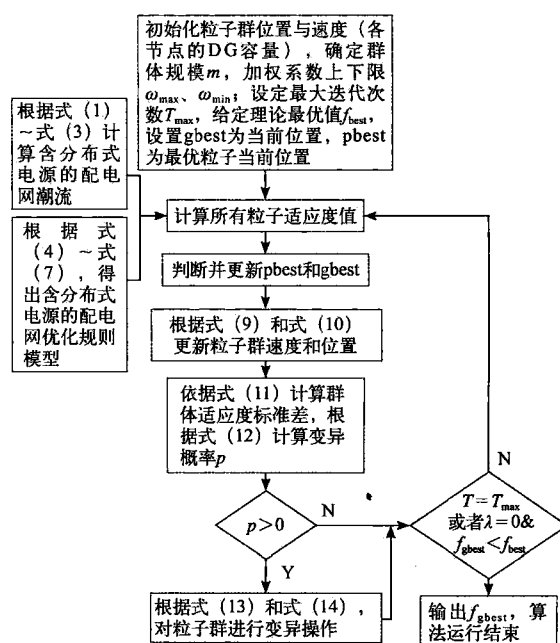


图2 改进后PSO算法流程

本文在所有可以添加DG的负荷节点进行DG的容量规划,并将DG的容量作为算法的位置和速度变量参与迭代,通过适应度函数约束DG数量,最终找出粒子群中DG最优的安装位置和容量。

算例分析

按照DG的有效收益寿命，本文拟配电网规划期限为20年，并假设在规划期间内，负荷需求以每年1%的速度增长，同时保证变电站容量满足负荷增长需求，无须增加新的变电站节点。

1. IEEE-33节点配电网算例

图3为IEEE-33节点12.66 kV配电网拓扑结构，网络中负荷节点2~33节点均可运行安装分布式电源，且假设分布式电源直接安装于负荷节点上。DG功率因数为0.9，且容量为0.01 MW的整数倍。各节点的DG安装容量低于所安装节点的负荷有功需求。

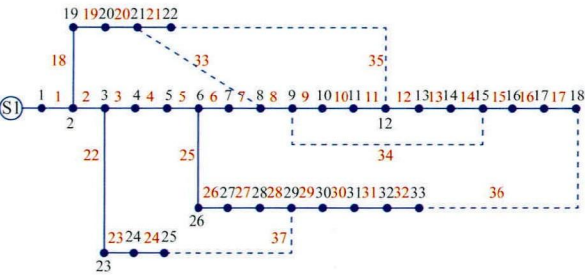


图3 IEEE-33节点配电网示意图

假设DG种类、位置、规模以及单个分布式电源容量均未知，分别采用改进的带惯性权重的粒子群算法（初始粒子群规模20，最大迭代次数100）以及遗传算法（种群规模20，交叉率 $P_c=0.8$ ，变异率 $P_m=0.05$ ，最大迭代次数100）对分布式电源进行选址和定容，所得分布式电源优化方案如表1所示。两种规划方案下的费用比较如表2所示。

从表1和表2可以看出，优化后的分布式电源主要集中在辐射型配电网的末端，且改进的带惯性权重的粒子群算法优化后网络总费用结果比遗传算法优化后的总费用减少5.453万元，可以看出采用改进后的带惯性权重的粒子群算法比采用遗传算法更为可行，能够使得网络损耗费用达到更小。图4为两种优化算法的收敛特性比较，可以看出改进的粒子群算法迭代次数更少，计算速度更快，有效地减少了潮流计算的时间。综上所述，改进后的PSO算法应用在配电网中的DG规划，是

表1 两种优化算法的优化的DG位置与容量

算法名称	接入DG的负荷节点	DG容量/kV·A
改进的PSO	10	70
	17	60
	18	100
	26	60
	30	630
	32	230
GA	16	70
	17	60
	18	100
	31	130
	32	200
	33	50

表2 两种优化方案的费用比较

方案名	改进PSO优化方案	GA优化方案
DG运行年费用/万元	174.6	96.84
线路损耗年费用/万元	12.568	20.208
购电年费用/万元	459.975	535.548
总的年费用/万元	647.143	652.596

一种较好的优化算法。

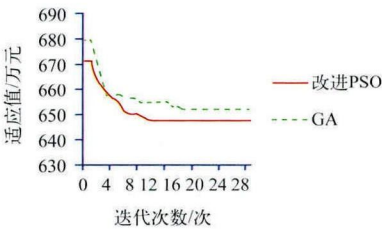


图4 改进PSO与GA收敛特性比较

2. 延边66 kV配电网算例

按照本文所述方法，对延边配电网的分布式电源进行了布点规划计算，其配电网结构以及优化后的最优方案如图5所示。由图5可知，分布式发电安装于节点7、8和10，安装容量以及安装DG前后的费用比较分别如表3和表4所示。

表3 分布式电源的接入节点与容量

接入DG的负荷节点	DG容量/MV·A
7	2 400
8	1 000
10	1 800

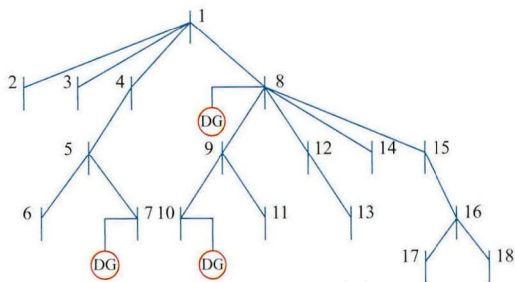


图5 延边配电网DG规划方案

表4 DG接入前后的费用比较

方案名	含分布式电源	不含分布式电源
DG运行年费用/万元	729.9	0
线路损耗年费用/万元	16.318	28.5
购电年费用/万元	7 371	8 096.816
总的年费用/万元	8 117.218	8 125.316

在总体的经济性指标上，规划前的总费用为8 125.316万元，而加入分布式电源以后，总费用节省了8.098万元。从网损方面看，接入分布式电源后，对配电网进行合理地规划，可以有效地降低线路年费用。在DG接入前，节点7为配电网节点电压幅值最小点，其幅值为0.954 (pu)，接入DG后，其幅值提高到0.985 pu。仿真结果表明该规划方案不仅有效地减少了配电网年运行总费用，也提高了系统节点电压水平。

结束语

本文采用改进的带惯性权重的粒子群算法，对配电网的分布式电源进行了布点规划，文中通过引入变异算子和偏移算子，有效地解决了标准粒子群算法的局部收敛和寻优速度慢等问题，改善了算法的综合特性，为配电网中的DG规划提供了有力的理论和方法支撑。

仿真算例表明，合理规划配电网中的分布式发电的位置和容量能在一定程度上降低配电网的

综合投资成本，同时考虑到分布式电源接入系统所带来的巨大的环境效应^[9]，尤其是在目前全球能源紧缺的情况下，在配电网中引入分布式发电具有非常重要的意义。

参考文献

[1] 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) : 7-10.

[2] 陈权, 李令冬, 王群京. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响 [J]. 电工技术学报, 2013, 21 (3) : 3-26.

[3] 柳睿, 杨镜非, 程浩忠. 分布式电源并网的综合评价 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25 (1) : 2-13.

[4] 程杉, 陈民铀, 黄意宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (10) : 5-16.

[5] 周杨烯, 黎灿兵, 何禹清. GSO算法在分布式电源选址与定容中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24 (5) : 10-19.

[6] 尤毅, 刘东, 于文鹏. 主动配电网技术及其进展 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (5) : 9-25.

[7] 张丽梅, 唐巍, 王少林. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (4) : 2-15.

[8] 苑津莎, 张铁峰, 刘建新. 基于级别高于关系和线性规划的配电网规划辅助决策方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12) : 6-5.

[9] 钱科军, 袁越, 石晓丹. 分布式发电的环境效益分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (29) : 10-15.

(收稿日期: 2014-07-22) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告