

基于自适应的配电网分布式电源优化配置研究

张 航,马 刚,仲泽天

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 针对分布式电源接入配电网引起的电压越限和电能质量下降等问题,提出了一种具备自适应特性的分布式电源优化配置方法.建立了光伏、风电两种典型分布式电源的数学模型,分析其功率输出特性.构建了同时考虑发电成本、环境成本、有功网损折算成本三项指标的分布式电源优化配置模型.针对多目标函数和多约束条件的优化配置模型,应用自适应粒子群算法求解,实现学习因子和惯性权重自适应调整以提高算法的寻优性能,由此得到分布式电源的最佳接入位置和容量.最后,以 IEEE33 节点配电系统为例进行仿真验证.结果表明,自适应粒子群算法与传统粒子群算法和混沌粒子群算法相比,求解得到的优化配置方案可达到更好的供电可靠性和经济性要求.

[关键词] 分布式电源,供电可靠性,优化配置,自适应粒子群算法

[中图分类号] TM727 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2020)02-0015-10

Research on Optimal Configuration of Distributed Power Supply in Distribution Network Based on Adaptive Particle Swarm Optimization Algorithm

Zhang Hang, Ma Gang, Zhong Zetian

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Aiming at the problems of voltage over-limit and power quality degradation caused by distributed power supply distribution network, a distributed power supply optimization configuration method for distribution network with adaptive characteristics is proposed in this paper. The mathematical model of photovoltaic and wind power is established to analyze its power output characteristics. A distributed power optimization configuration model for distribution network is constructed considering the three factors of distributed power generation; cost, environmental cost and active network loss. For the optimal configuration model of multi-objective function and multi-constraint condition, the adaptive particle swarm optimization algorithm is applied to realize adaptive adjustment of learning factor and inertia weight to improve the optimization performance of the algorithm, thus obtaining the best Location and capacity of distributed power. Finally, the IEEE33 node power distribution system is taken as an example for simulation verification. The results show that the proposed adaptive particle swarm optimization algorithm can achieve better power supply reliability and economical requirements than the traditional particle swarm optimization algorithm and chaotic particle swarm optimization algorithm.

Key words: distributed power supply, power supply reliability, optimized configuration, adaptive particle swarm optimization

电力因其清洁高效的优点得到了广泛应用,已经成为我国国民经济的命脉.为解决我国日益严重的能源和环境问题,必须转变能源发展和利用的方式.利用分布式发电形式,不仅可以充分利用分布式能源就近为用户提供电能,而且可以在大电网发生故障时离网运行来避免供电中断,提高配电网可靠性.虽然分布式电源可以为大电网提供有力的支撑,但是随着分布式电源的大规模接入,配电网线路潮流的方向和大小将受到分布式电源接入位置及容量大小的影响而发生变化,分布式电源装置电力电子元件的接入还会造成电压的波动、闪变等问题.配电网中接入分布式电源后,故障短路电流的方向和水平也将受分布式

收稿日期:2019-10-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(51607093).

通讯作者:马刚,博士,副教授,研究方向:新能源发电及入网技术、电力系统分析及故障诊断相关技术. E-mail: nnumg@ njnu.edu.cn

电源的类型、位置及容量的影响而导致原保护系统发生不正确动作,无法及时排除故障恢复供电^[1]. 因此,若分布式电源配置方式不合理,将会导致配电网的投资运营成本和有功网损的增加,从而影响其经济性,甚至危及配电网的安全稳定运行.

由于分布式电源受自然环境变化而具有很强的随机性,因此其接入给配电网的负荷预测和网架规划带来了很大的挑战. 为充分发挥分布式电源的积极影响并降低其不利影响,必须对分布式电源的配置进行优化,在保证配电网可靠性和稳定性的前提下,降低运行成本,以实现效益最大化并将危害降到最低^[2].

目前国内外学者对配电网分布式电源优化配置方案的研究主要针对优化目标和求解算法展开. 在优化目标方面,为了同时满足配电网经济和运行指标的要求,对接入配电网的分布式电源进行优化配置时往往需要考虑多项指标. 文献[3]综合考虑配电网的投资、运维等成本以及节能减排、降损等效益,以年化净效益最大为目标,利用遗传算法求解得到配电网分布式电源选址定容优化方案,确保配电网投资的最大经济性. 文献[4]考虑电压和线损指标对分布式电源进行优化配置,利用遗传算法求解得到了不同分布式电源对应的最优接入方案. 文献[5]在考虑分布式电源成本与网络损耗的基础上,附加电压质量与电压暂降两项指标,利用改进粒子群算法求解得到了优化配置方案.

配电网分布式电源多目标配置问题是一种复杂的优化问题,通常采用智能优化算法求解,通过计算机的迭代实现全局搜索最优解. 目前国内外学者已开发出多种新型的智能算法运用于解决优化配置问题,如细菌菌落优化算法^[6]、遗传算法^[7]、改进型多目标萤火虫算法^[8]等,但是这些新型算法原理复杂且产生时间短,是否适用于求解工程问题尚不明确. 而粒子群算法具有深厚的智能背景,原理简单易于实现,适用于求解工程优化问题. 但是目前大多采用的传统或改进粒子群算法都是将粒子群看作一个整体来调整惯性权重,而实际上不同适应度的粒子需要不同的惯性权重,因此这些粒子群算法无法做到自适应更新每个粒子的惯性权重,寻优效果不佳^[9-11].

本文考虑分布式电源发电成本、环境成本、有功网损三项优化指标,利用层次分析法把多目标优化问题化为单目标优化问题,以综合指标最小为目标建立配电网分布式电源优化配置模型,提出惯性权重和学习因子均可自适应调整的改进粒子群算法,并基于 IEEE33 节点配电系统采用自适应粒子群算法求解模型得到优化配置方案,最后与传统粒子群算法求解得到的配置方案进行指标的比较. 结果表明,基于自适应粒子群算法求解的配置方案可以使配电网的各指标均达到更优,有效改善分布式电源接入情况下的配电网运行的经济性和可靠性.

1 分布式电源建模

目前配电网中应用最广泛的是太阳能光伏发电和风力发电两种发电形式,但是其间歇性和不稳定性将对配电网运行的稳定性带来影响,使配电网的供电质量降低.

太阳能光伏电池的原理是光电材料收到光照射后产生光电效应,实现能量转换. 光伏电池的等效电路如图 1 所示^[12].

根据图 1 可得光伏电池的输出电流为:

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\}. \quad (1)$$

其中, I_{ph} 是光子激发的电流; I_o 是无光照时二极管的反向饱和电流; q 是电子的电荷量; k 是波尔兹曼常数; A 是二极管的特性因子; T 为环境温度; R_s 是光伏电池的内部等效电阻.

基于 MATLAB 环境下对光伏电池的模型进行仿真,得到其输出特性如图 2 所示.

风力发电是将风能转化为机械能后再利用机械能驱动风力发电机发出电能的过程^[13]. 风机的有功出力与风速关系的分段函数表示为:

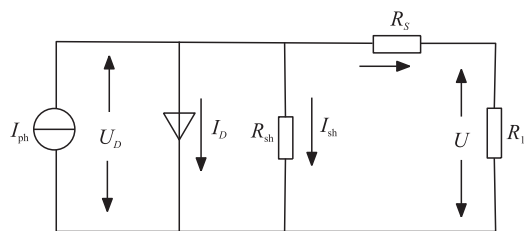


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Photovoltaic cell equivalent circuit

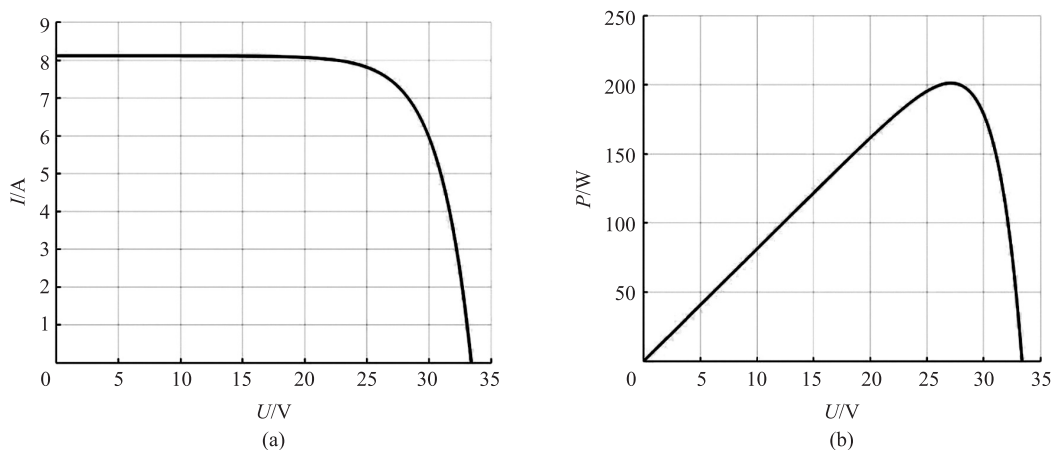


图2 光伏电池输出特性

Fig. 2 Photovoltaic cell output characteristics

$$P_w = \begin{cases} 0, & V < V_{ci} \text{ or } V > V_{co}, \\ \frac{V - V_{ci}}{V_n - V_{ci}} \times P_{wn}, & V_{ci} < V < V_n, \\ P_{wn}, & V_n < V < V_{co}. \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_w 为风机实际输出功率; V 为实际风速; P_{wn} 为风机额定输出功率; V_{ci} 为切入风速; V_{co} 为切出风速; V_n 为额定风速。

基于 MATLAB 环境下对风力发电模型进行仿真, 得到其输出特性如图 3 所示。

如图 2、图 3 所示, 光伏电池和风机发电的输出功率均呈现波动的状态, 因此将以光伏电池和风机为主的分分布式电源接入配电网时, 将对配电网的功率潮流产生影响, 进而影响配电网的电能质量, 因此必须对其进行优化配置, 避免对配电网造成不利影响。

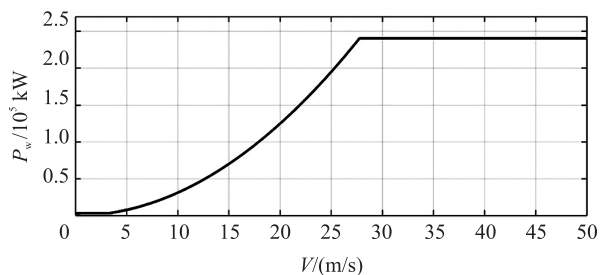


图3 风机输出特性

Fig. 3 Fan output characteristics

2 分布式电源优化配置模型

随着分布式电源的大规模接入, 配电网节点负荷变化, 配电网负荷预测和规划的难度提高。同时由于可再生能源的随机性和间歇性, 其容量和位置都会对配电网的网络损耗、节点电压、潮流、短路电流等产生影响, 合理的配置可以对配电网的电压水平有改善作用、减少线路有功损耗、提高线路承载负荷的能力, 但是如果配置不合理, 将对配电网运行产生不利影响, 甚至危及配电网的稳定性。因此, 必须对分布式电源的配置方案进行优化, 使其成为大电网的有力补充^[14]。为了同时满足配电网运行的经济性和可靠性的要求, 本文同时考虑环境成本和分布式电源发电成本两项经济指标以及有功网损一项运行指标来对分布式电源的配置进行优化。

2.1 目标函数

本文考虑分布式电源发电成本、环境成本、有功网损折算成本三项优化指标, 利用层次分析法把多目标化为单目标, 以综合指标最小构造目标函数。其中, 发电成本主要包括发电装置的前期安装成本和后期运维成本, 环境成本包括各种能源发电排放的 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 等气体对环境造成影响后的治理成本。分布式电源的发电成本具体计算方式如下:

$$C_{DG} = C_{in} + mPTkn. \quad (3)$$

其中, C_{in} 为分布式电源装置的安装成本 (万元); P 为单个分布式电源的额定功率 (kW); T 为分布式电源的年运行时间 (h); k 为容量系数, 是无量纲; n 为分布式电源装置安装个数 (个); m 为分布式电源运行维护成本系数 (元/(kW·h))。各种分布式电源的成本参数如表 1 所示。

分布式电源发电的环境成本具体计算方式如下:

$$C_{\text{en}} = P_e T F_e K_p. \quad (4)$$

其中, P_e 为分布式电源输出功率(kW); T 为发电时间(h); F_e 为排放系数即单位电排放的污染气体量(kg/(kW·h)); K_p 为惩罚系数即排放单位千克污染气体后治理所需的成本(元/kg). 具体各种污染气体的治理成本参数如表 2 所示.

表 1 分布式电源成本参数

Table 1 Distributed power cost parameters					
电源种类	C_{in}	m	P	T	k
光伏	0.45	0.009 6	2	1 289	0.293 4
风力	1 000	0.045 0	1 100	2 006	0.372 7
燃气轮机	1 000	0.120 0	1 350	8 750	0.602 0

表 2 各气体治理成本参数

Table 2 Gas treatment cost parameters		
排放气体类型	排放系数	惩罚费用
NO _x	0.002 78	8
SO ₂	0.009	6
CO ₂	0.86	0.023

配电网所有支路的有功网损之和计算方式如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i,j \in N} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{|V_i|^2} r_{ij}. \quad (5)$$

其中, P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间线路上输送的有功和无功功率; r_{ij} 为节点 i 、 j 之间线路的阻抗值; N 为节点个数.

为使各目标函数在同一单位下, 将配电网总有功网损转换为经济费用, 即可以理解为由于损耗掉的有功功率而造成的经济损失, 计算方式为

$$C_{\text{loss}} = T_{\text{max}} \cdot C_{\text{pu}} \cdot P_{\text{loss}}. \quad (6)$$

式中, T_{max} 为最大年负荷小时数; C_{pu} 为实时电价.

则配置的目标函数 F 为

$$F = \lambda_1 C_{\text{DG}} + \lambda_2 C_{\text{en}} + \lambda_3 P_{\text{loss}}. \quad (7)$$

2.2 约束条件

分布式电源优化配置必须同时满足等式、不等式约束, 且不等式约束条件通过罚函数形式体现在模型中.

①潮流等式约束

$$\begin{cases} P_{\text{Gi}} + P_{\text{DGi}} - P_{\text{Di}} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \\ Q_{\text{Gi}} + Q_{\text{DGi}} - Q_{\text{Di}} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}). \end{cases} \quad (8)$$

其中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为节点 i 处的发电机注入的有功、无功功率; P_{DGi} 、 Q_{DGi} 为节点 i 处注入的分布式电源的有功、无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 为节点 i 处的有功、无功负荷; V_i 、 V_j 分别为配电输入节点 i 、输出节点 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为系统节点导纳矩阵的实部、虚部; δ_{ij} 为节点 i 、 j 间的相位差.

②不等式约束

(i) 节点电压约束

$$V_{\min(i)} \leq V_i \leq V_{\max(i)}. \quad (9)$$

其中, $V_{\min(i)}$ 、 $V_{\max(i)}$ 分别为节点 i 电压的下限、上限. 关于节点电压的罚函数表现为

$$P(V_i) = \begin{cases} k_V (V_{\min(i)} - V_i), & V_i < V_{\min(i)}, \\ k_V (V_i - V_{\max(i)}), & V_i > V_{\max(i)}, \\ 0, & V_{\min(i)} \leq V_i \leq V_{\max(i)}. \end{cases} \quad (10)$$

其中, k_V 为惩罚因子, 电压未越限时取 0.

(ii) 分布式电源总容量约束

$$\sum_{i=1}^N S_{\text{DG}(i)} \leq S_{\text{DGmax}}. \quad (11)$$

其中, $S_{\text{DG}(i)}$ 为所有节点接入的分布式电源的容量总和; S_{DGmax} 为分布式电源并网总容量的最大值. 关

于节点处分布式电源接入容量的罚函数表现为

$$P(S_{DG}) = \begin{cases} k_s \left(\sum_{i=1}^N S_{DG(i)} - S_{DGmax} \right), & \sum_{i=1}^N S_{DG(i)} \geq S_{DGmax}, \\ 0, & \sum_{i=1}^N S_{DG(i)} \leq S_{DGmax}. \end{cases} \quad (12)$$

其中, k_s 为惩罚因子,总容量未越限时取 0.

综上,得到优化配置模型为:

$$\min f = \lambda_1 C_{DG} + \lambda_2 C_{en} + \lambda_3 P_{loss} + \sum_{i=1}^N P(V_i) + P(S_{DG}). \quad (13)$$

其中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为分布式电源发电成本 C_{DG} 、环境成本 C_{en} 、有功网损 P_{loss} 三项指标在目标中所占的权重系数, $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, 即采用对各目标加权后求和的方法把多目标问题化为单目标问题. 其中权重系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的选择采用层次分析法确定.

层次分析法通过比较将对各因素的评价量化,从而导出其针对特定属性的排序. 本文模型有 3 个指标,通过专家打分的方式获得它们对应的分值,计为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ,由此得到判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} \omega_1/\omega_1 & \omega_1/\omega_2 & \omega_1/\omega_3 \\ \omega_2/\omega_1 & \omega_2/\omega_2 & \omega_2/\omega_3 \\ \omega_3/\omega_1 & \omega_3/\omega_2 & \omega_3/\omega_3 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

计算矩阵 A 的特征向量及特征值,特征向量即表示各指标对上一层目标的权重. 通过对比建立的指标体系与标准,应用判断矩阵方法就可得到各指标的相对权重值. 以上一级的要素作为评价准则,对本级的要素进行比较以确定判断矩阵的元素. 假设评价指标体系中某个一级指标为 F_i ,其下有二级指标 B_1 、 B_2 、 \dots 、 B_n ,对它们进行两两比较,建立矩阵 B ,其形式为:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

矩阵 B 中的元素表示依评价准则 A 而言要素 B_i 对 B_j 的相对重要性,其值由专家利用判断尺度确定的,判断尺度的制定如表 3 所示:

表 3 判断尺度
Table 3 Judging scale

判断尺度	定义	判断尺度	定义
9	对 A 而言, B_i 比 B_j 极为重要	1/3	对 A 而言, B_i 比 B_j 稍次重要
7	对 A 而言, B_i 比 B_j 重要得多	1/5	对 A 而言, B_i 比 B_j 次要
5	对 A 而言, B_i 比 B_j 重要	1/7	对 A 而言, B_i 比 B_j 次要得多
3	对 A 而言, B_i 比 B_j 稍重要	1/9	对 A 而言, B_i 比 B_j 极为次要
1	对 A 而言, B_i 比 B_j 同样重要	2, 4, 6, 8 及其倒数	介于上述两相邻判断之间

根据矩阵 B ,一级指标 F_i 在整个目标问题中的重要程度为^[15]:

$$\alpha_i = \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (16)$$

然后可求得一级指标 F_i 的权重系数为^[15]:

$$\omega_i = \alpha_i \left(\sum_{j=1}^n \alpha_j \right)^{-1}, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (17)$$

对于本文提出的 3 个目标,根据经验将其相对重要性由大到小排序为:环境成本、分布式发电成本、有功网损,按照上述计算确定各目标的权重系数即式 (13) 中的 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ,将各个目标函数加权后求和转化为单目标问题.

3 自适应粒子群算法

粒子群算法是一种基于群体搜索的处理连续或离散空间内优化问题的算法,将在解空间中不断移动的粒子作为寻优的群体,先初始化一组随机的速度和位置,然后在空间中不断搜索进行寻优,每次迭代过程中粒子根据自己已寻找过的最优解(个体最优值)和群体当前寻找到的最优解(全局最优值)来实时调整自己的速度和位置,直到搜索到更优的解^[16].

一个由 n 个粒子组成的群体在 D 维空间内搜索,以粒子 i 为例,其每次迭代公式为:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k), \quad (18)$$

$$x_{i,l}^{k+1} = x_{i,l}^k + v_{i,l}^{k+1}. \quad (19)$$

式中, i 表示第 i 个粒子, $i=1, 2, \dots, n$; d 表示第 d 维分量, $d=1, 2, \dots, D$; k 表示迭代次数; g 表示群体. 由此, $v_{id}^k, x_{id}^k, p_{id}^k, p_{gd}^k$ 分别表示第 k 次迭代后的粒子 i 的速度、位置、当前个体极值、群体极值的第 d 维分量. ω 为惯性系数, c_1, c_2 为加速因子.

惯性权重 ω 是粒子群算法中调整粒子搜索能力的参数. ω 取值较大时,粒子搜索的速度较大,有利于全局搜索,但是搜索效率低;取值较小时,能够加速收敛,但是容易陷入局部最优,因此为了实现高效率、高精度寻优,必须设置合适的 ω . 本文采用自适应权重为^[17]:

$$\begin{cases} \omega = \omega_{\min} + (f_{v(i)} - f_{\min}) (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / (f_{\text{vag}} - f_{\min}), f_{v(i)} \leq f_{\text{vag}}, \\ \omega = \omega_{\max}, f_{v(i)} > f_{\text{vag}}. \end{cases} \quad (20)$$

其中, $f_{v(i)}$ 为适应度函数值; f_{avg} 、 f_{min} 为适应度函数的平均值、最小值; ω_{max} 、 ω_{min} 分别为惯性权重的上限、下限。

研究表明,在粒子的寻优过程中理想的情况是:在搜索初期,其速度较大,粒子的全局搜索能力强,不至于陷入局部最优。在搜索后期,其速度减小,局部搜索能力增强。因此,初期希望 c_1 、 c_2 较大,增强粒子向历史经验学习的能力,而后期则希望 c_1 、 c_2 减小。本文借鉴线性递减惯性权重的粒子群算法中对惯性权重 ω 的处理方法,对学习因子 c_1 、 c_2 进行处理,得到线性递减的学习因子为^[18]:

$$c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \times t/M, \quad (21)$$

$$c_2 = c_{2_{\max}} - (c_{2_{\max}} - c_{2_{\min}}) \times t/M. \quad (22)$$

其中, $c_{1\max}$ 、 $c_{1\min}$ 、 $c_{2\max}$ 、 $c_{2\min}$ 分别为 c_1 、 c_2 的上限、下限; t 为当前迭代次数; M 为最大迭代次数.

4 算例分析

4.1 分布式电源接入对配电网电压和有功网损的影响分析

以 IEEE33 节点配电系统为例,该系统接线图如图 4 所示。

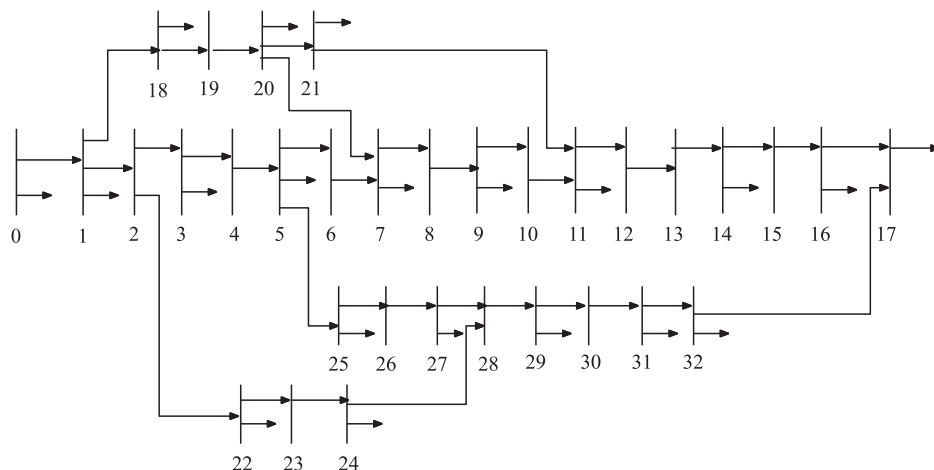


图 4 IEEE33 节点系统接线图

Fig. 4 IEEE33 node power distribution system diagram

在 IEEE33 节点系统的节点 4,10,17,30 处接入分布式电源前后,系统各节点电压标幺值和各支路网损值如图 5、图 6 所示.

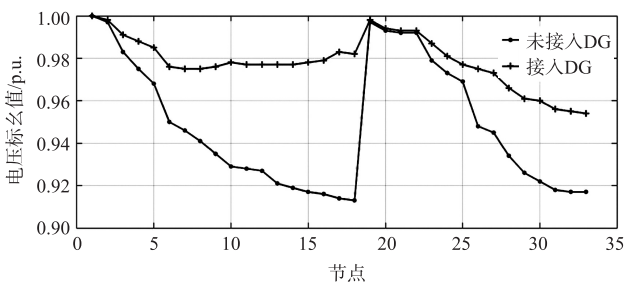


图 5 4 节点接入 DG 后的各节点电压
Fig. 5 Voltage of each node with DG connected
to 4 nodes

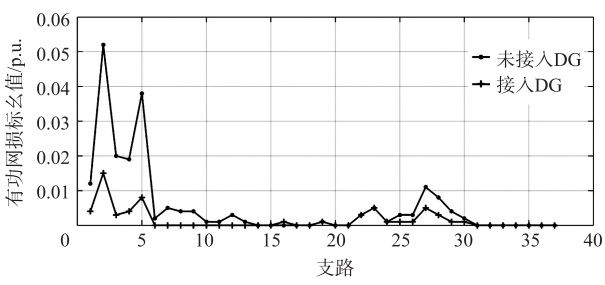


图 6 4 节点接入 DG 后的各支路有功网损值
Fig. 6 Active network loss of each branch with DG
connected to 4 nodes

当接入分布式电源后,配电网节点电压水平升高,支路有功网损减少,且各个节点处的电压升高程度和各条支路上的有功网损减少程度是不同的。

4.2 仿真结果分析

为了分析不同的粒子群算法的寻优性能,选择传统、混沌、自适应粒子群算法 3 种方法分别求解得到配置分布式节点位置和容量的最佳方案,并对比按照不同方案接入分布式电源后配电网各节点电压、各支路有功网损的变化情况及分布式电源发电成本、环境成本的大小。假设单个分布式电源容量为 1 kW,节点处的分布式电源接入总容量除以单个分布式电源容量即可得到该节点处安装分布式电源的个数,若安装个数为 0 即表示在该节点处不配置分布式电源,反之则表示该节点是配置分布式电源的节点,由此可确定分布式电源安装的位置和容量,实现选址定容。

①方案 1:自适应粒子群算法求解优化配置模型,配置方案如表 4 所示。

表 4 自适应 PSO 配置方案

Table 4 Adaptive PSO configuration scheme

节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数
1	0	6	0	11	0	16	0	21	7	26	0	31	0
2	0	7	0	12	0	17	2	22	1	27	2	32	0
3	0	8	0	13	0	18	0	23	0	28	0	33	0
4	0	9	12	14	1	19	11	24	0	29	0		
5	4	10	0	15	0	20	0	25	0	30	0		

按照表 3 所示的配置方案接入分布式电源前后,配电网各节点电压和各支路有功网损如图 7、图 8 所示。

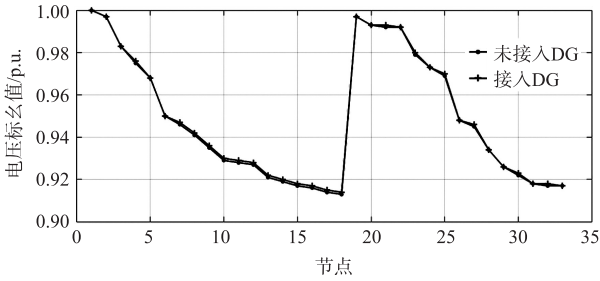


图 7 自适应 PSO 方案下各节点电压
Fig. 7 Voltage of each node under adaptive
PSO scheme

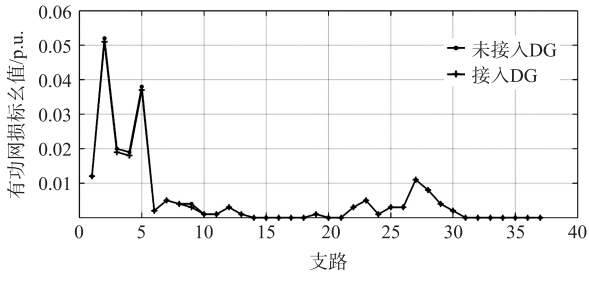


图 8 自适应 PSO 方案下各支路有功网损值
Fig. 8 Active network loss of each branch under
adaptive PSO scheme

②方案 2:传统线性递减惯性权重粒子群算法求解优化配置模型^[19],配置方案如表 5 所示。

表 5 传统 PSO 配置方案

Table 5 Traditional PSO configuration scheme

节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数
1	0	6	1	11	4	16	7	21	19	26	1	31	13
2	15	7	1	12	2	17	8	22	12	27	16	32	9
3	22	8	13	13	10	18	9	23	5	28	5	33	1
4	9	9	5	14	2	19	1	24	38	29	6		
5	14	10	0	15	30	20	20	25	3	30	4		

按照表 4 所示的配置方案接入分布式电源前后,配电网各节点电压和各支路有功网损如图 9、图 10 所示.

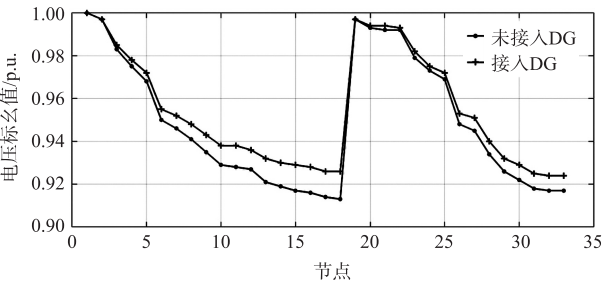


图 9 传统 PSO 方案下各节点电压值
Fig. 9 Voltage of each node under conventional
PSO scheme

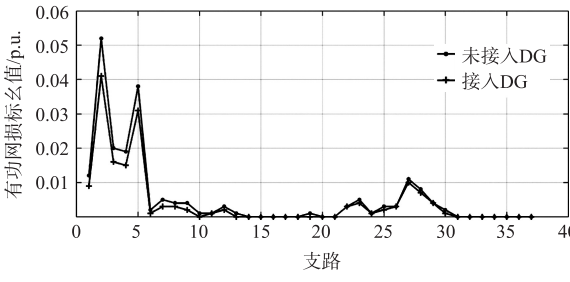


图 10 传统 PSO 方案下各支路有功网损值
Fig. 10 Active network loss of each branch under
conventional PSO scheme

③方案 3:混沌粒子群算法求解优化配置模型^[20],配置方案如表 6 所示.

表 6 混沌 PSO 配置方案
Table 6 Chaos PSO configuration scheme

节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数	节点	个数
1	0	6	2	11	9	16	3	21	3	26	22
2	5	7	9	12	28	17	1	22	5	27	12
3	24	8	13	13	16	18	5	23	0	28	3
4	20	9	4	14	10	19	2	24	0	29	0
5	9	10	0	15	19	20	18	25	9	30	0

按照表 5 所示的配置方案接入分布式电源前后,配电网各节点电压和各支路有功网损如图 11、图 12 所示.

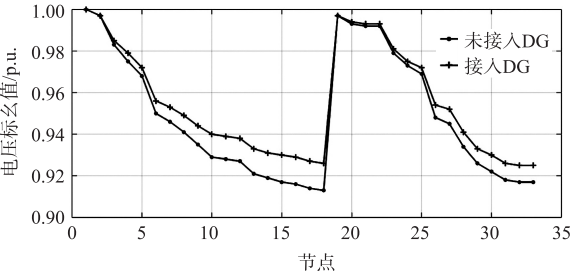


图 11 混沌 PSO 方案下各节点电压值
Fig. 11 Voltage of each node under chaotic
PSO scheme

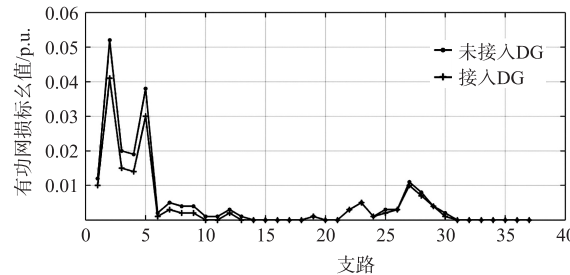


图 12 混沌 PSO 方案下各支路有功网损值
Fig. 12 Active network loss of each branch under
chaotic PSO scheme

对比图 7、图 9、图 11 可知,相对于传统粒子群算法和混沌粒子群算法,根据自适应粒子群算法求解得到的配置方案接入分布式电源后,与未接入分布式电源时相比各节点电压的波动程度最小,接入前后的电压曲线基本一致,即系统的状态变化不明显,整个配电网系统运行相对平稳. 对比图 8、图 10、图 12 可知,相比另两种粒子群算法,按照自适应粒子群算法求解得到的方案接入分布式电源前后,配电网各支路上的有功网损变化量也是最小的,且相对来说整个系统前端线路上的有功网损较大,后端线路上的有功网损在接入前后几乎无变化. 无论使用何种算法,按照所得配置方案接入分布式电源前后的电压变化量在节点 18 处达到最大,有功网损在支路 2 上达到最大.

为了进一步比较各粒子群算法的寻优性能,运行算法程序,得到各迭代曲线如图 13、图 14、图 15 所示.

由图 14、图 15 可知,传统粒子群算法和混沌粒子群算法分别在大约第 6 次和第 10 次时迭代结束,而自适应粒子群算法的迭代过程较长. 由图 16 可知,通过传统粒子群算法和混沌粒子群算法求解得到的方案所需的分布式电源发电成本和环境成本均高于由自适应粒子群算法求解得到的方案. 由此可知,虽然传统粒子群算法和混沌粒子群算法所需的迭代次数少于自适应粒子群算法,但是它们求解得到的方案并不理想,即它们的迭代陷入了局部最优,并没有得到所需的全局最优解,而自适应粒子群算法虽然迭代次

数多,但其迭代过程充分,求解得到的配置方案与另两种算法求解得到的配置方案相比,同时满足节点电压波动量、支路有功网损变化量最小以及发电成本、环境成本最低,使分布式发电能够在不影响配电网运行的可靠性和经济性的前提下,作为大电网有力支撑.由此可知,自适应粒子群算法求得解是理想的全局最优解,对于以获取最佳方案为目标而对迭代次数没有要求的情况,该配置方案更理想.

按照3种算法求解得到的配置方案接入分布式电源后,配电网的发电成本和环境治理成本如图16所示.

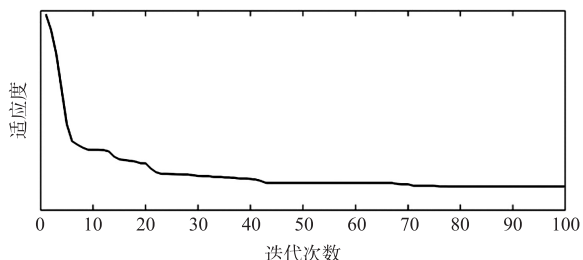


图 13 自适应 PSO 迭代曲线

Fig. 13 Adaptive PSO iteration curve

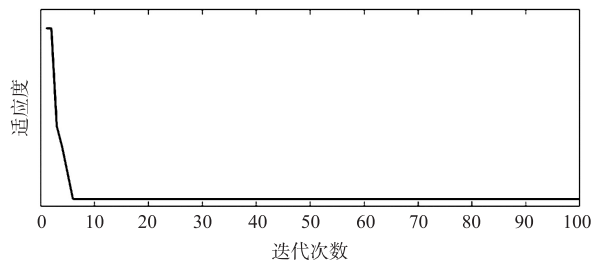


图 14 传统 PSO 迭代曲线

Fig. 14 Traditional PSO iteration curve

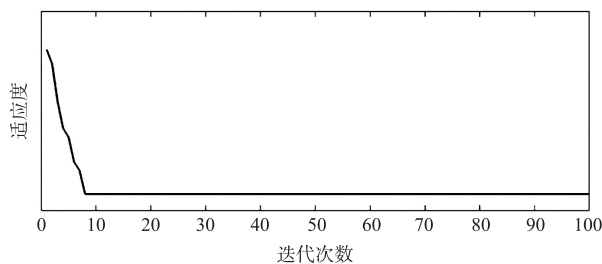


图 15 混沌 PSO 迭代曲线

Fig. 15 Chaos PSO iteration curve

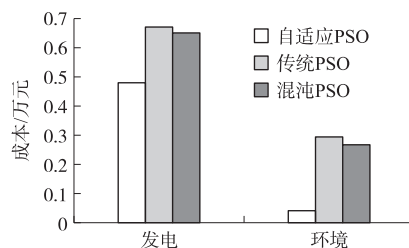


图 16 发电和环境成本

Fig. 16 Power generation and environmental costs

为了验证配置自适应粒子群算法求解得到的多目标优化配置方案的有效性和优越性,将多目标配置方案与只考虑经济指标和只考虑经济指标情况下的配置方案进行对比.

在满足经济性的前提下,多目标配置方案与只考虑经济指标配置方案两种情况下的配电网各节点电压和各支路有功网损如图17、图18所示.未接入分布式电源时的配电网各节点电压的均值为0.9485 p.u.,按照只考虑经济指标的分布式电源配置方案接入后的节点电压平均值为0.9487 p.u.,按照多目标分布式电源配置方案接入后的节点电压平均值为0.9491 p.u.,由此计算得到,只考虑经济指标的DG配置方案接入与按照多目标分布式电源配置方案接入时节点电压分别提高0.021%和0.063%,即按照多目标配置在满足经济性要求的情况下对节点电压水平的提高具有更好的效果.未接入分布式电源时的配电网各支路有功网损之和为0.203 MW,按照只考虑经济指标的分布式电源配置方案接入后的节点电压平均值为0.202 MW,按照多目标分布式电源配置方案接入后的节点电压平均值为0.198 MW,由此计算得到,只考虑经济指标的DG配置方案接入与按照多目标分布式电源配置方案接入时有功网损之和分别降低0.49%和2.46%,即按照多目标配置在满足经济性要求的情况下对支路有功网损的降低具有更好的效果.

在满足运行可靠性的前提下,多目标配置方案与只考虑运行指标配置方案两种情况下的配电网分布式电源发电成本和环境成本如图19所示.按照只考虑运行指标的分布式电源配置方案接入后的发电成

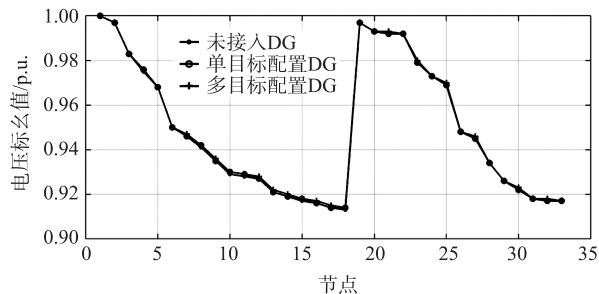


图 17 节点电压对比曲线

Fig. 17 Node voltage comparison curve

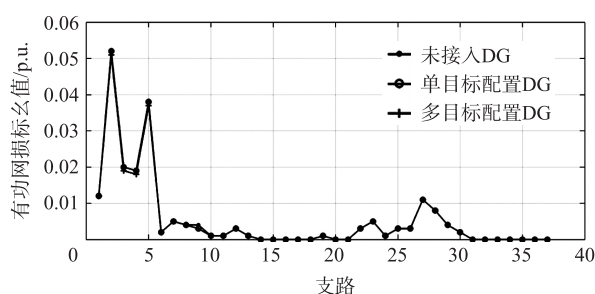


图 18 支路有功网损对比曲线

Fig. 18 Branch active power loss comparison curve

本和环境成本分别为0.508万元和0.076万元,按照多目标分布式电源配置方案接入后的发电成本和环境成本分别为0.479万元和0.038万元。由此可见,在满足系统运行可靠性的前提下,按照多目标配置可以进一步减少发电和环境成本,改善配电网运行的经济性。

综合以上的对比分析可知,在满足经济性的前提下,多目标配置方案的运行指标优于只考虑经济指标配置方案。在满足运行可靠性的前提下,多目标配置方案的经济指标优于只考虑运行指标配置方案。因此,与单纯考虑某一类型指标而得到的配置方案相比,多目标配置可以同时达到经济性和可靠性更优的效果。

5 结论

本文针对配电网中分布式电源的选址定容接入位置及容量问题,运用自适应粒子群算法求解分布式电源优化配置模型得到分布式电源的选址定容配置方案。首先,考虑发电成本、环境成本、有功网损三项指标,以功率、节点电压、分布式电源容量为约束条件,并利用层次分析法把多目标化为单目标,利用罚函数处理约束条件,将优化配置问题归一化为单目标问题,构造优化配置模型。其次,针对目前粒子群算法不具备自适应特性的问题,引入自适应粒子群算法,实现惯性权重和学习因子同时自适应调整。最后,基于IEEE33节点系统进行仿真验证,结果表明本文提出的自适应粒子群算法可以有效求解多目标配置模型,相较于考虑单类型指标进行配置时的配电网经济指标和运行指标更优;并且该算法求解得到的配置方案与传统和混沌粒子群算法求解得到的配置方案相比,可以使接入分布式电源后配电网节点电压和支路有功网损变化量更小、分布式电源发电成本和环境成本更低,在满足经济性的前提下使含分布式电源的配电网运行更加安全稳定。

[参考文献](References)

- [1] 祁欢欢,荆平,戴朝波,等. 分布式电源对配电网保护的影响及保护配置分析[J]. 智能电网,2015,3(1):8-16.
- [2] 曹立平. 配电网规划中分布式电源的优化配置[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [3] 李登峰,谢开贵,胡博,等. 基于净效益最大化的微电网电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(20):20-26.
- [4] 逯明昊. 基于电压质量分析的分布式电源优化配置研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [5] 芦火青. 计及电能质量的分布式电源选址定容优化配置研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2016.
- [6] 邵珂,蒋铁铮. 基于细菌菌落优化算法的分布式电源优化配置[J]. 电力学报,2014,21(3):201-205.
- [7] 马冬宝,张鑫,辛义. 基于遗传算法的分布式电源的优化配置[J]. 数字技术与应用,2015,6(7):131-133.
- [8] 周勇,陈家俊,姜飞,等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置研究[J]. 现代电力,2014,31(5):54-58.
- [9] 徐满意,代祖华,王济深. 粒子群算法改进策略研究[J]. 甘肃科技,2013,29(6):41-44.
- [10] 王莉荣,祁云嵩. 基于函数最优解问题的粒子群算法改进[J]. 计算机技术与应用,2013,23(2):49-51,56.
- [11] 吴辰斌,李海明,刘栋,等. 一种改进型粒子群优化算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(10):44-48.
- [12] 孙航,肖海伟,李晓辉,等. 光伏电池模型综述[J]. 电源技术,2016,40(3):743-745.
- [13] 常虹,吴伟强,张宇昉,等. 基于MWorks的定速风力发电系统建模与仿真研究[J]. 机械工程师,2018,46(7):17-20.
- [14] 陈春泉,殷豪,陈清泉. 分布式电源优化配置研究现状与展望[J]. 广东电力,2013,26(3):45-49.
- [15] 董君. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 科技资讯,2016,13(29):218,220.
- [16] 陈祎熙,许洁,徐谷超,等. 基于粒子群算法的并网风电场最大接入容量研究[J]. 可再生能源,2017,35(9):1347-1351.
- [17] 吴富杰,苏小林,阎晓霞,等. 基于多目标的主动配电网有功无功协调优化[J]. 自动化技术与应用,2015,34(11):59-65.
- [18] 杜欣慧,卢小茜,薛英男,等. 基于LD-SAPSO的分布式电源选址和定容[J]. 电测与仪表,2015,52(7):118-122.
- [19] ARASOMWAN M A, ADEWUMI A O. On the performance of linear decreasing inertia weight particle swarm optimization for global optimization[J]. Scientific World Journal, 2013:1-12.
- [20] XU X L, RONG H Z, TROVATI M, et al. CS-PSO:chaotic particle swarm optimization algorithm for solving combinatorial optimization problems[J]. Soft Computing, 2016:1-13.

[责任编辑:陈 庆]

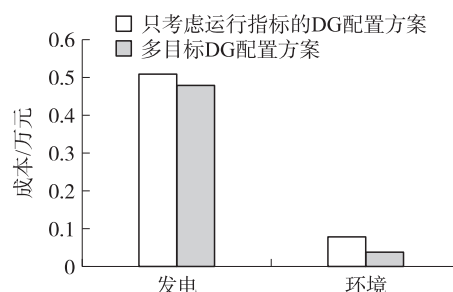


图19 发电和环境成本对比曲线

Fig. 19 Power generation and environmental cost comparison curve