

# 基于自适应遗传算法的分布式电源优化配置

郝文斌<sup>1</sup>, 谢明洋<sup>2</sup>, 谢波<sup>1</sup>, 曾鹏<sup>1</sup>, 史晨豪<sup>2</sup>, 徐灵渊<sup>2</sup>, 张明玉<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

**摘要:**针对能源互联网背景下大量分布式电源接入配电网的优化配置问题,从经济性出发,建立了以投资成本、运行维护成本、网络损耗成本和购电成本之和最小为目标的分布式电源的选址定容优化模型。利用前推回推法计算配电网潮流,采用了自适应遗传算法对所提模型进行求解。结合 IEEE 33 节点构造算例进行分析,结果表明该模型在保证经济性的同时,能有效减少网络损耗并提高电压质量。

**关键词:**分布式电源;选址定容;优化配置;自适应遗传算法

**中图分类号:**TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0002-04

## Optimal Configuration of Distributed Generators Based on Adaptive Genetic Algorithm

Hao Wenbin<sup>1</sup>, Xie Mingyang<sup>2</sup>, Xie Bo<sup>1</sup>, Zeng Peng<sup>1</sup>, Shi Chenhao<sup>2</sup>, Xu Jiongyuan<sup>2</sup>, Zhang Mingyu<sup>2</sup>

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Aiming at the optimal configuration problem of a large number of distributed generators connected to distribution network under the background of Energy Internet, starting from economy, an optimization model for the location and capacity of distributed power generation is established with the goal of minimizing the sum of investment cost, operation and maintenance cost, network loss cost and power purchase cost. The power flow of distribution network is calculated by using forward and backward method, and an adaptive genetic algorithm is adapted to solve the proposed model. Combining with the analysis of IEEE 33 node structure example, the results show that the proposed model can effectively reduce the network loss and improve the voltage quality while ensuring the economy.

**Key words:** distributed generators; siting and sizing; optimal configuration; adaptive genetic algorithm

## 0 引言

全球经济的迅速发展和人们用电需求的提升导致以化石能源为主的自然资源逐渐枯竭<sup>[1]</sup>。基于风、光等可再生能源的分布式电源具有环境友好、调度灵活等特点,能有效促进社会的可持续发展<sup>[2]</sup>。随着能源互联网建设工作的持续推进,大量分布式电源随机接入城市配电网,导致配电网潮流改变,带来严重的安全问题<sup>[3-5]</sup>。如何在配电网中确定分布式电源的接入点和安装容量以提升系统的安全性和经济性是当前的研究重点。

目前,已有较多学者对分布式电源如何接入配

电网进行了研究。文献[6]提出了采用带惯性权重的粒子群算法进行分布式电源选址和定容的计算方法,通过算例验证了所提算法有较强全局搜索能力和收敛速度。文献[7]建立了光伏电源选址和定容的配电网损耗最小、节点电压偏移最小和接入费用最小的多目标优化模型,并提出一种基于遗传算法改进的并列选择法,通过算例验证了该方法的可行性。文献[8]以降低配电网运行线损为优化目标,采用了粒子群优化与非支配遗传排序协同进化算法,结合算例得出了分布式电源最优接入容量。上述文献的侧重点局限于以电压和网损作为优化目标,或通过改进求解算法提高收敛速度,并未充分考虑站在电网规划角度,以投资运行成本等经济性指

标为优化目标对分布式电源进行优化配置。

在未知分布式电源的接入点、容量和接入个数的前提下,建立了以投资成本、运行维护成本、网络损耗成本和购电成本之和最小为目标的分布式电源的选址定容优化模型,结合前推回推潮流计算法,利用自适应遗传算法求解该模型。潮流计算过程中,将分布式电源视为PV节点,以其接入配电网的位置和对应的容量为主要变量,从而对其进行优化配置。通过IEEE 33配电网节点进行算例仿真,得到了同时满足安全性和经济性的分布式电源优化配置方案,同时有效减少了网络损耗,提高了电压水平。

## 1 分布式电源选址定容优化模型

### 1.1 目标函数

站在电网运行角度,综合考虑分布式电源接入的投资成本、运行维护成本、网络损耗成本和购电成本,建立了目标函数:

$$\min Z = \min(Z_{\text{INV}} + Z_{\text{OP}} + Z_{\text{PL}} + Z_{\text{B}}) \quad (1)$$

式中: $Z$ 为总运行成本; $Z_{\text{INV}}$ 为投资成本; $Z_{\text{OP}}$ 为运行维护成本; $Z_{\text{PL}}$ 为网损成本; $Z_{\text{B}}$ 为购电成本。

#### 1) 投资成本

$$Z_{\text{INV}} = \sum_{k=1}^N \left( x_k c_{\text{inv}} P_{\text{DG},k} \frac{r(r+1)^n}{(r+1)^n - 1} \right) \quad (2)$$

式中: $N$ 为配电网的节点数量; $x_k$ 表示是否在节点安装分布式电源; $c_{\text{inv}}$ 为单位容量的投资成本; $P_{\text{DG},k}$ 为装在第 $k$ 个节点上分布式电源的容量; $r$ 为年投资回报率; $n$ 为规划年限。

#### 2) 运行维护成本

$$Z_{\text{OP}} = \sum_{k=1}^N x_k c_{\text{op}} P_{\text{DG},k} \quad (3)$$

式中, $c_{\text{op}}$ 为单位容量的分布式电源运行维护成本。

#### 3) 网络损耗成本

$$Z_{\text{PL}} = \sum_{i=1}^{N_L} c_e \tau_{\text{max}} \frac{P_i^2}{(\lambda U_N)^2} R_i \quad (4)$$

式中: $N_L$ 为配电网支路总数; $c_e$ 为单位电价; $\tau_{\text{max}}$ 为年最大电网损耗小时数; $P_i$ 为配电网第 $i$ 条支路上的有功功率; $\lambda$ 为系统功率因数; $U_N$ 为系统额定电压; $R_i$ 为第 $i$ 条支路上的电阻阻值。

#### 4) 购电成本

分布式电源接入配电系统后可直接为负荷供电,从而减少电网向发电企业的购电费用。

$$Z_{\text{B}} = c_e T_{\text{max}} \left( \sum_{j=1}^N P_{\text{load},j} - \sum_{k=1}^{N_{\text{DG}}} x_k P_{\text{DG},k} \right) \quad (5)$$

式中: $T_{\text{max}}$ 为年最大电网利用小时; $P_{\text{load},j}$ 为第 $j$ 个节点的负荷。

### 1.2 约束条件

#### 1) 潮流平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = P_i \\ \sum_{j=1}^N f_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = Q_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: $e$ 为节点电压实部分量; $f$ 为节点电压虚部分量; $G_{ij}$ 为节点导纳矩阵中的电导; $B_{ij}$ 为节点导纳矩阵中的电纳; $P_i$ 和 $Q_i$ 分别为注入节点 $i$ 的有功功率和无功功率。

#### 2) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (7)$$

式中: $U_i$ 为第 $i$ 个节点的电压; $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点 $i$ 处电压的上、下限。

#### 3) 分布式电源接入总容量约束

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG},k} < \mu \sum_{j=1}^N P_{\text{load},j} \quad (8)$$

式中, $\mu$ 为分布式电源总容量限制系数,这里取0.22。

#### 4) 分布式电源接入节点容量约束

为避免分布式电源的接入改变潮流,对其接入点容量进行约束。

$$0 \leq P_{\text{DG},k} \leq P_{\text{DG},k}^{\max} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{DG},k}^{\max}$ 为第 $k$ 个节点允许安装分布式电源的最大容量。

## 2 求解方法

遗传算法(genetic algorithm, GA)是根据生物界的自然选择机制演变而来的一种随机搜索算法。类似于遗传过程中染色体的分裂重组,GA主要算子包括选择、交叉和变异,通过一系列运算后将最大适应度的个体作为最优解。传统遗传算法中的交叉、变异概率为定值,不具备物种进化过程中的自适应特性,容易陷入局部最优,制约算法全局搜索能力。为此,自适应遗传算法应运而生,其自适应交叉概率和变异概率根据式(10)一式(11)动态生成,提高了遗传多样性,避免过早陷入局部最优。

$$P_c = \begin{cases} P_c^{\max} - \text{gen} \times \left( \frac{P_c^{\max} - P_c^{\min}}{M} \right), & f' > f_{\text{avg}} \\ P_c^{\max}, & f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_c$ 为自适应交叉概率； $\text{gen}$ 为当前迭代次数； $P_c^{\max}$ 为最大交叉概率； $P_c^{\min}$ 为最小交叉概率； $M$ 为最大迭代次数； $f'$ 为即将交叉运算中较大的适应度； $f_{\text{avg}}$ 为当前迭代次数中所有个体的适应度平均值。

$$P_m = \begin{cases} P_m^{\min} + \text{gen} \times \left( \frac{P_m^{\max} - P_m^{\min}}{M} \right), & f > f_{\text{avg}} \\ P_m^{\min}, & f \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $P_m$ 为自适应变异概率； $P_m^{\max}$ 为最大变异概率； $P_m^{\min}$ 为最小变异概率； $f$ 为当前代数变异过程中个体的适应度； $f_{\text{avg}}$ 为当前迭代次数中所有个体的适应度平均值。

基于自适应遗传算法<sup>[9-10]</sup>的分布式电源优化配置模型的求解步骤如下：

1) 参数设置。求解前先设置算法的环境变量参数,如最大迭代次数、种群规模、最大最小交叉概率  $P_c^{\max}$  和  $P_c^{\min}$ 、最大最小变异概率  $P_m^{\max}$  和  $P_m^{\min}$  等。决策变量为  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ , 其中:  $N$  为配电网节点总数,  $x_i$  表示节点  $i$  处分布式电源的安装情况(功率大小和位置),  $x_i = a (0 \leq a \leq A \text{ 且 } a \text{ 为整数})$ ; 具体容量为  $P_{\text{DG},k} = aP_N$ ,  $P_N$  为单位基准容量(取 10 kW), 且  $A = P_{\text{DG},i}^{\max} / P_N$ ,  $P_{\text{DG},i}^{\max}$  为节点  $i$  处允许安装分布式电源的最大值。

2) 初始化种群。在 Matlab 中通过前推回推潮流计算方法,在满足约束的情况下,计算目标函数值和各个个体适应度。

3) 按照适应度排序保留前  $N_{\text{gen}}$  个个体,当随机变量小于自适应交叉概率时,进行双亲双子单点交叉,并将父代、子代合并形成新种群。对于该新种群,当随机变量小于自适应变异概率时,执行变异。消除无效个体,按照适应度保留  $N_{\text{gen}}$  个个体。

4) 重复上述步骤,直到达到最大迭代次数。具体流程如图 1 所示。

### 3 算例分析

选取了 IEEE 33 节点配电网构造算例,该配电

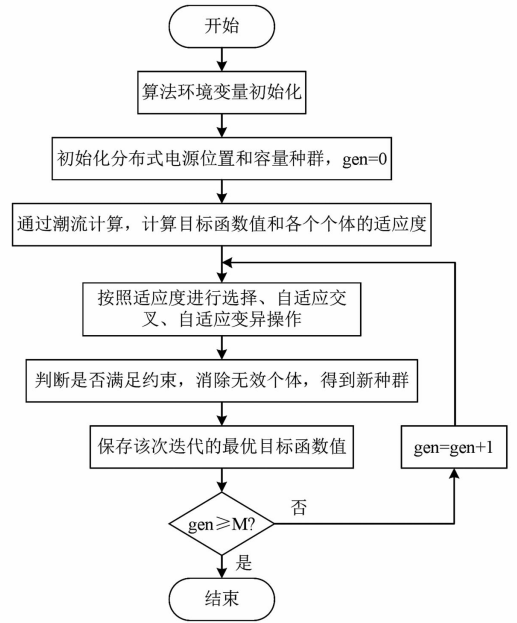


图 1 算法流程

网结构如图 2 所示。该配电网额定电压为 12.66 kV, 总有功负荷为 3715 kW, 总无功负荷为 2300 kvar。单位容量投资成本  $c_{\text{inv}}$  为 1500 元/kW, 年投资回报率  $r$  为 0.1, 规划年限  $n$  为 20 年, 单位运行维护成本  $c_{\text{op}}$  为 500 元/kW, 单位电价  $c_e$  为 0.5 元/kWh, 年最大电网损耗小时  $\tau_{\text{max}}$  为 3200 h, 系统功率因数  $\lambda$  为 0.9, 年最大电网利用小时  $T_{\text{max}}$  为 5600 h。

自适应遗传算法参数设置: 种群数  $N_{\text{gen}} = 100$ ; 最大迭代次数  $M = 150$ ; 最大交叉概率  $P_c^{\max}$  为 0.9; 最小交叉概率  $P_c^{\min}$  为 0.4; 最大变异概率  $P_m^{\max}$  为 0.1; 最小变异概率  $P_m^{\min}$  为 0.01。

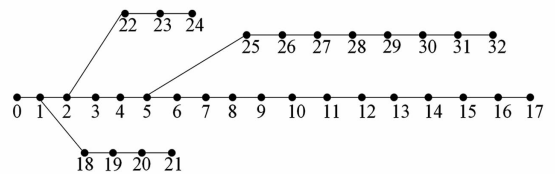


图 2 IEEE 33 节点配电系统

表 1 为分布式电源的配置方案, 分布式电源接入总容量为 880 kW, 小于总有功负荷的 22%, 满足要求。结合图 2 可知, 分布式电源都安装于网络末端, 这是由于网络末端传输功率较长, 就地提供功率能有效减少线路损耗。

表 2 为接入分布式电源前后的成本, 接入分布式电源前, 系统不需考虑投资和运行维护成本, 但是网络损耗成本和购电成本较高。分布式电源接入后, 通过在辐射网络末端供电, 使得网络损耗成本降

低了17.78万元,减少购电费用206.64万元,虽然增加了投资和运行维护成本,但是总成本减少了168.97万元。由此可见所提方法对分布式电源的优化配置,给配电网运行带来了可观的经济效益。

表1 分布式电源配置方案

接入节点	接入容量/kW
14	160
16	330
30	330

表2 分布式电源接入前后成本 单位:万元

项目	无 DG	接入 DG
投资成本	0	41
运行维护成本	0	14.45
网损成本	33.9	16.12
购电成本	1 040.2	833.56
总成本	1 074.1	905.13

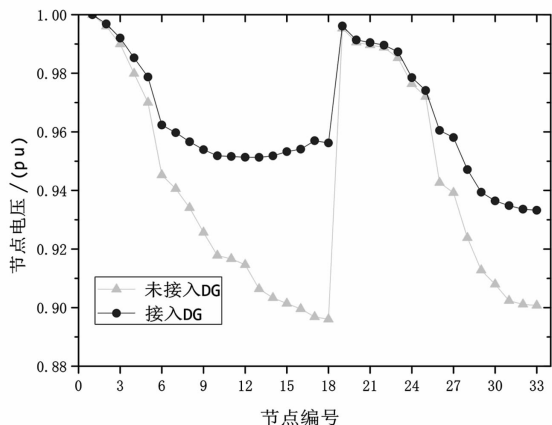


图3 分布式电源接入前后节点电压对比

图3为分布式电源接入前后节点电压对比,经所提配置方法将分布式电源合理接入配电网,有效提高了各节点尤其是最小电压节点的电压水平,增加了在负荷增加时系统的承受能力,极大提高了配电网运行的安全稳定性。

图4为分布式电源接入前后线路有功损耗对比,由图可知,系统接入分布式电源后,线路有功损耗由原来的211.92 kW降低到了100.75 kW,减少了52.46%,有效促进了电网的节能降耗。

图5为自适应遗传算法和传统遗传算法收敛曲线对比图,由图可知,采用自适应遗传算法,极大地提高了系统的收敛速度,有效避免了陷入局部最优。

## 4 结 语

站在电网规划角度,充分考虑经济效益,提出了

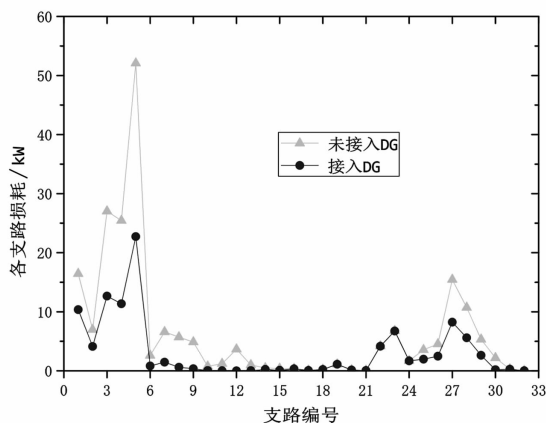


图4 分布式电源接入前后线路有功损耗对比

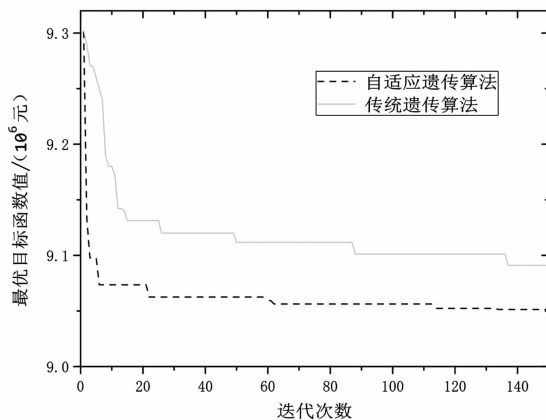


图5 算法收敛性对比

一种基于自适应遗传算法的分布式电源接入配电网的优化配置方法,经 Matlab 程序仿真验证,得出结论如下:

1) 所建分布式电源优化配置模型能够有效减少配电网运行成本,降低网络有功损耗,提高电压质量,可为分布式电源接入配电网的规划设计提供参考。

2) 将自适应遗传算法应用于分布式电源的选址定容中,提高了全局搜索能力,避免过早陷入局部最优。

## 参考文献

[1] 成升魁,沈镭,封志明,等. 中国自然资源研究的发展历程及展望[J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1757-1772.

[2] 张艺镔,艾小猛,方家琨,等. 基于极限场景的两阶段含分布式电源的配网无功优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 301-309.

[3] 卢艺,戴月,马伟哲,等. 含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 434-442.

(下转第20页)

Filters 算法去噪预处理;再选用 ACE 算法提高图像的视觉效果;最后通过标准边缘检测算法确定图像边缘,通过亚像素边缘检测算法得到小数级别的像素距离,提升测量精度。经过实际测试,该系统实现了电缆结构参数的实时在线检测,拓宽了电缆入场和安装前可检项目种类,提高了检测精度,对从源头强化电缆安全稳定运行可靠度有积极的促进作用。

参考文献

[1] 朱朝旭. 基于 STDR/SSTDR 的铁路信号电缆故障在线检测系统的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.

[2] 申海霞. 基于混沌序列的 SSTDR 检测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.

[3] 刘洋,刘忠,姜波,等. 高压电缆故障分析与检测方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(1):107-111.

[4] 袁燕岭,周灏,董杰,等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术,2015,41(4):1194-1203.

[5] 姚海燕,张静,留毅,等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(9):115-123.

[6] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术,2004(20):58-63.

[7] 王少华,叶自强,梅冰笑,等. 电力电缆故障原因及检测方法研究[J]. 电工电气,2011(5):48-51.

[8] 王传旭. 高压电缆故障分析及其状态检测技术[J]. 电气技术,2014(9):70-73.

[9] 袁燕岭,李世松,董杰,等. 电力电缆诊断检测技术综

述[J]. 电测与仪表,2016,53(11):1-7.

[10] 余靖. 基于扩展频谱时域反射法的电力电缆故障在线检测研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[11] 杨景豪,刘巍,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程,2016,24(2):300-308.

[12] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程,2013,21(4):1054-1061.

[13] 张潘杰. 基于机器视觉的复杂工件形位尺寸的高精度测量技术研究[D]. 济南:济南大学,2019.

[14] 叶帆. 大尺寸构件激光辅助视觉测量中图像处理方法[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[15] 崔恩坤. 高精度双目立体视觉测量系统关键技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.

[16] 伏圣群. 行波反射法电缆故障检测关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.

[17] 谢家欣. 基于机器视觉工件尺寸测量方法研究[D]. 长春:长春工业大学,2018.

[18] 吴凤英,魏章波,席金强,等. 基于单目视觉的球形电机转子方位测量方法[J]. 电测与仪表,2019,56(22):95-102.

[19] 杨斌,李明贞,周承科. 基于泄漏电流的高压电缆线路故障测距方法[J]. 电测与仪表,2020,57(5):120-124.

作者简介:

胡立锦(1986),男,硕士,主要从事输电线路工程建设管理和技术经济性分析等方面的研究;

杨永全(1973),男,高级工程师,主要从事特高压电力工程建设管理方面的研究。

(收稿日期:2020-10-12)

(上接第5页)

[4] 郭春菊. 分布式电源接入对配电网运行的影响[D]. 上海:上海交通大学,2013.

[5] Minglei B, Yi D, Changzheng S. Reference of International Energy System Transformation to Energy Internet Construction in China [J]. Distributed Energy, 2017(2):11-19.

[6] 张婷婷,张勤,张传雪,等. 配电网规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电子元器件应用,2010(11):56-59.

[7] 包广清,杨国金,杨勇,等. 基于改进遗传算法的光伏发电并网优化配置[J]. 电力建设,2014,35(6):13-17.

[8] 王涛,贺春光,周兴华,等. 基于分布式电源选址定容的配网降损方法研究[J]. 可再生能源,2020,38(9):

1246-1251.

[9] 张聪,许晓慧,孙海顺,等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):19-24.

[10] Ze-Heng Y, Run-Lan T, Xiao-Feng W. Radar Signal Feature Selection Based on Self-adaptive Genetic algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019-01.

作者简介:

郝文斌(1976),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统规划及调度运行研究;

谢明洋(1995),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化调度运行。

(收稿日期:2020-10-12)