

# 基于改进粒子群算法的分布式电源选址定容优化设计

王秀丽<sup>\*1</sup>, 赵兴勇<sup>1</sup>, 曹建文<sup>2</sup>, 袁晓明<sup>2</sup>

(1. 山西大学 工程学院, 山西 太原 030013;

2. 中国煤炭科工集团 太原研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 在分析了分布式电源接入对配电网影响的基础上, 针对配电网中的关键问题——分布式电源的选址和定容, 进行了优化设计. 通过构建包含分布式电源的投资运行费用、环境因素、网损费用的目标函数, 并考虑潮流约束、电流约束、电压约束、系统容量约束等条件, 搭建了分布式电源的模型, 采用一种改进的粒子群算法, 设计出了分布式电源所处位置及容量. 通过仿真分析计算, 验证了该方案的正确性和有效性.

**关键词:** 改进粒子群算法; 分布式电源; 选址定容; 优化设计

**中图分类号:** TM715

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201403014

## 0 引言

分布式电源 (distributed generation, 简称 DG), 是指所发出的电能就地使用的发电及储能设备, 它包括风力发电、光伏发电、柴油机发电、燃料电池等. 然而它们的特性是不同的, 如柴油机成本低, 但污染严重. 风力发电和光伏发电没有污染, 但设备成本高, 易受天气影响, 功率不易控制. 燃料电池污染小、易控制, 但反应速度慢、成本高. 将 DG 接入配电网会对配电网的谐波、稳定性、潮流和可靠性等产生影响, 影响的程度与 DG 的容量、接入位置有很大关系, 因此, DG 接入位置的选择和容量的确定是配电网规划需要考虑的重要问题.

文献[1]采用改进的自适应遗传算法, 对分布式电源进行选址和定容, 是通过把多个目标分解成单个目标来进行优化的. 文献[2]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, 但遗留的问题一是气候对分布式发电出力的影响; 二是分布式发电的扩展规划问题; 三是分布式发电故障时对电网暂态影响及控制策略. 文献[3]采用粒子群算法进行分布式电源的优化, 但在优化时仅考虑了有功网损最小, 却没有考虑其约束条

件. 文献[4]提出基于功率圆和支路权值的概念, 以改善电压水平和降低网损为目标函数. 文献[5]采用免疫遗传算法对分布式电源进行优化, 考虑了一些约束条件, 但目标函数也只考虑了网损最小, 没有考虑投资成本和环境因素.

为解决上述问题, 本文采用带惯性权重的粒子群算法, 在考虑潮流约束、电压约束、电流约束、系统容量约束等条件的基础上, 建立包含投资运行费用、环境因素和网损费用的目标函数模型, 并通过仿真实验验证其有效性.

## 1 粒子群及改进粒子群算法

### 1.1 粒子群算法

粒子群算法<sup>[6]</sup>是通过模仿鸟群、鱼群等群体的行为模拟, 利用 Heppner 提出的生物群体模型, 并利用鸟群确定飞行方向和飞行速度的数学分析方法. 这种算法思路清晰, 容易理解, 参数的设置比较简单, 收敛速度快, 应用范围广泛.

粒子群优化算法 (PSO) 的初始状态为一群随机的粒子, 然后这些粒子以当前最优的粒子为参考, 在问题的解空间中不断地搜索, 直至找到全局最优的解. 每一次的迭代中, 粒子都是通过跟踪个体最优值和全局最优值来调整自身的位置和速

度.图1描述了单个粒子在解空间的搜索过程.

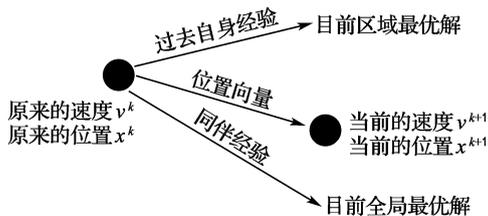


图1 单个粒子搜索过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of a single particle search

假设  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  表示第  $i$  个粒子, 其中  $d$  为粒子维数, 其经历的最好位置表示为  $p_b = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ , 而单个粒子群经历的最好位置表示为  $g_b = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{id})$ . 粒子  $i$  的速度表示为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ . 上述粒子经过第  $k$  次搜索之后, 可根据下面的公式更新自己得到新一代粒子, 即

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \times rand_1() \times (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2() \times (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

其中  $rand_1()、rand_2()$  为  $0 \sim 1$  内的随机数;  $c_1、c_2$  为学习因子;  $k$  为迭代次数.

式(1)中第一部分是粒子当前的飞行速度, 主要是平衡全局搜索和局部搜索; 第二部分为“认知”部分, 体现的是粒子本身的认识, 旨在提高粒子的全局搜索能力, 以避免粒子收敛于局部最小值; 第三部分为“社会”部分, 体现的是诸多粒子之间对信息的共享和合作. 这三部分共同决定了粒子在空间的搜索能力.

一般来说, 群体规模不用取得太大, 几十个粒子就足够用了, 粒子的维度, 也就是解空间的维度, 由优化问题所决定.

## 1.2 改进粒子群算法

Shi 和 Eberhart 在粒子群算法的基础上, 在速度更新公式中引入了惯性权重<sup>[2-7]</sup>, 提高了算法的计算性能. 惯性权重  $\omega$  表示下一代粒子对当代粒子信息的继承程度, 可以对下一代粒子的搜索提供一定的参考和指导作用. 惯性权重的优点在于它不是一个定值, 而是一个随时间变化的函数, 这样做使得粒子群算法在刚开始的时候倾向于扩展, 然后逐渐转向于内敛, 可在局部区域调整解, 使得改进的粒子群算法在寻优速度和准确性方面得到提高.

惯性权重的大小决定了对当前粒子的继承程度, 为了保证粒子能快速准确地找到最优解, 提高算法的计算效率,  $\omega$  必须进行合理的选择. 研究发现, 搜索时, 粒子的速度大有利于全局搜索, 而且收敛速度快, 但不容易得到精确解; 速度小则利于局部搜索, 能得到精确解, 但是收敛速度慢. 标准粒子群算法中的  $\omega$  为固定值. 有专家提出了线性递减变化的惯性权重, 即:

$$v_{id}^{k+1} = \omega \times v_{id}^k + c_1 \times rand_1() \times (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2() \times (p_{gd}^k - x_{id}^k);$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (3)$$

其中  $k$  为当前迭代次数,  $k_{\max}$  为算法的最大迭代次数,  $\omega_{\max}$  为算法的最大权重,  $\omega_{\min}$  为算法的最小权重. 通过式(3)可知,  $\omega$  变化趋势是线性递减的, 因此该算法在搜索的初始阶段能够较快地确定最优解的大概方向, 随着迭代次数的增加,  $\omega$  不断减小, 粒子速度更新变缓, 有利于其进行局部细致搜索, 从而提高算法的求解速度和精度.

粒子群优化算法的流程如图2所示. 图中  $T$  为搜索的累积时间,  $T_{\max}$  为设定的最大仿真时间.

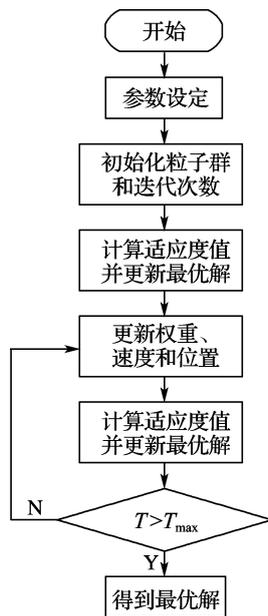


图2 粒子群优化算法的流程图

Fig.2 PSO algorithm flowchart

## 2 分布式电源的模型

### 2.1 目标函数

本文建立的目标函数, 考虑了 DG 的投资运

行费用、环境因素和网损费用。

(1) 投资运行费用

$$C_i = \left[ a_i \times \frac{r_i \times (1 + r_i)^{m_i}}{(1 + r_i)^{m_i} - 1} + u_i \right] \times N_i \quad (4)$$

其中  $i = 1, 2, 3$ , 分别表示风力发电机、光伏阵列、燃气轮机三种分布式电源;  $a_i$  为造价;  $r_i$  为贴现率;  $m_i$  为运行年限;  $u_i$  为年运行维护费用;  $N_i$  为数量。风力发电机和燃气轮机的年运行维护费用一般取风力发电机和燃气轮机造价的 5%, 光伏阵列的年运行维护费用一般取光伏阵列造价的 1%。

风力发电机和光伏阵列分别以自然界免费使用的风能和太阳能作为“燃料”, 年成本只需要考虑设备投资和运行维护费用。燃气轮机运行时需要消耗天然气, 因此在燃气轮机的成本费中需要考虑燃料费用。由文献[8-9]得到燃气轮机运行消耗的天然气费用如下式所示:

$$C_r = \sum_{t=1}^n r_t \times V_t$$

式中:  $r$  为天然气价格;  $V$  为天然气用量;  $t$  为年利用时间(h)。

最终 DG 折算到每年的总的年运行费用和投

资成本为  $C_{DG} = \sum_{i=1}^3 C_i + C_r$ 。

(2) 环境因素

$$C_{ec} = \sum_{l=1}^n (v_{el} \times Q_l + v_l) \quad (5)$$

$$C_{ee} = 8\,760 \times C_s \times \sum_{i=1}^n P_{DG_i} \times C_{fr_i} \quad (6)$$

式(5)为分布式发电环境成本, 其中  $C_{ec}$  为 DG 发电所需要的环境成本;  $v_{el}$  为第  $l$  项污染物的环境价值;  $Q_l$  为第  $l$  项污染物的排放量;  $n$  为污染物种类;  $v_l$  为第  $l$  项污染物的排污收费额。式(6)为政府补贴, 其中  $C_{ee}$  为 DG 发电获得的政府补贴;  $C_s$  为单位 DG 发电量的政策补贴;  $P_{DG_i}$  为节点  $i$  处接入的 DG 容量;  $C_{fr_i}$  为第  $x_i$  种 DG 的容量系数。

环境因素总费用:

$$C_e = C_{ec} - C_{ee}$$

(3) 网损费用

DG 引入配电网改变了电网的潮流, 使得配电网从无源网络变成有源网络, 影响了系统网损。本文将年网损转化成经济度量指标。

$$C_{loss} = \sum_{h=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n R_{ij} \times \left( \frac{\Delta V_{ij}}{|Z_{ij}|} \right)^2 \times t \times C_p$$

式中:  $R_{ij}$  为支路两端电阻;  $Z_{ij}$  为支路两端阻抗;  $\Delta V_{ij}$  为支路两端电压降;  $t$  为运行时间;  $C_p$  为单位电价。

2.2 约束条件

约束条件分别考虑了潮流约束、电压约束、电流约束、系统容量约束<sup>[8]</sup>, 具体如下:

(1) 潮流约束

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$\sum P_{DG} - \sum P_f = P_i$$

$$Q_f = Q_i$$

其中  $\sum P_{DG}$  是 DG 总的功率,  $\sum P_f$  是总的负荷,  $P_i$  是节点负荷。

(2) 电压约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}; \text{一般 } V_{\min} \text{ 取 } 0.95, V_{\max} \text{ 取 } 1.05.$$

(3) 电流约束

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{ij\max}; I_{ij} \text{ 为节点 } i, j \text{ 支路电流, } I_{ij\max} \text{ 取 } 300 \text{ A.}$$

(4) 系统容量约束

$$\sum_{i=1}^n C_{fi} \times P_{DG_i} \leq 0.25 \sum_{i=1}^n P_i; C_{fi} \text{ 为各 DG 的容量系数.}$$

由以上可得, 总的目标函数为

$$F = \omega_{DG} C_{DG} + \omega_e C_e + \omega_{loss} C_{loss}$$

3 仿真结果及分析

根据本文提出的模型和算法, 利用 Matlab 对 IEEE 标准 33 节点进行仿真分析, 本网络有 32 条支路、5 条联络开关支路、1 个电源点, 因配电方式一般是辐射型的, 故选择这样的结构。其节点与支路编号见图 3(假定 1 为源节点, 即平衡节点)。网络首段电压 12.66 kV, 三相功率基准值取 10 MVA, 系统总的有功负荷为 5 084.26 kW, 无功负荷为 2 547.32 kvar, 收敛精度  $\epsilon = 10^{-4}$ 。

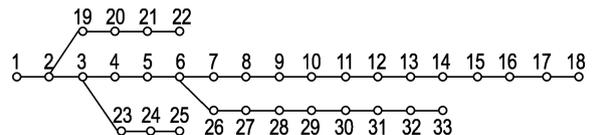


图 3 33 节点测试系统结构图

Fig. 3 33 Node test system structure diagram

### 3.1 潮流计算

潮流计算采用一种新的拓扑结构分析方法,用节点分层矩阵来描述微电网,只需要通过系统的节点分层矩阵及其上层节点矩阵两个辅助矩阵,前推回推<sup>[10-11]</sup>即可快速计算得到系统的潮流,处理 PV 节点时引入了无功电流补偿法,在 Matlab 中建立了 IEEE33 节点的潮流模型.

### 3.2 不同 DG 位置和容量对网损的影响

本文设计 5 种方案进行测试. 方案一:不加 DG;方案二:只加光伏阵列,并且寻找最优位置;方案三:只加风力发电机,并且寻找最优位置;方案四:只加燃气轮机,并且寻找最优位置;方案五:

加入光伏阵列和燃气轮机,并且寻找最优位置.

图 4 通过仿真说明, DG 在不同的位置、不同的容量对网损的影响,以找到合理的 DG 组合及所在的位置.

由表 1 可见,不加 DG 时,网损为 0.028 26,只加光伏阵列、风力发电机、燃气轮机时,网损分别为 0.025 53、0.029 97、0.025 26. 由此可见,单独加光伏阵列、燃气轮机时网损大为减小,但只加风力发电机时,对减小网损没有帮助;只加光伏阵列和燃气轮机时,由图可得,在 2 节点加光伏阵列且在 18 节点加燃气轮机时,网损明显减小.

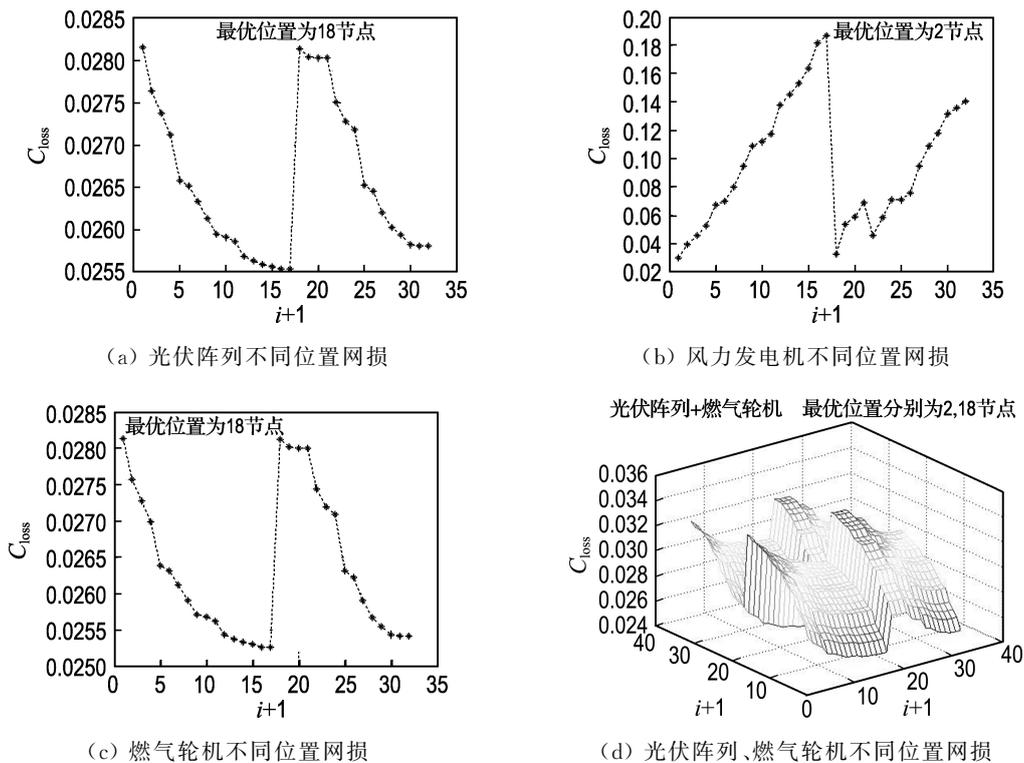


图 4 不同方案曲线图

Fig. 4 Different scenarios graph

表 1 不同 DG 和位置对网损的影响

Tab. 1 Effect of different DG and net loss position

方案	最优位置	网损	方案	最优位置	网损
1	—	0.028 26	4	18	0.025 26
2	18	0.025 53	5	2、18	0.025 46
3	2	0.029 97			

通过改进粒子群算法得到:在节点 2 加入 3 套光伏板子和 2 个风力发电机,在节点 30 加入 10 台燃气轮机,网损为 0.018 733 773 319 834,大大减小了网损. 仿真结果如图 5 所示.

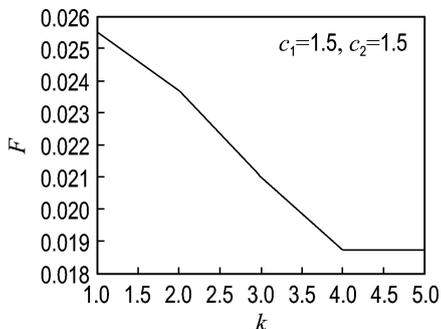


图 5 网损寻优结果

Fig. 5 Net loss optimization results

### 3.3 定容选址

本文采用改进的粒子群算法,求解 DG 的最优位置和容量. 因为考虑了光伏阵列、风力发电机、燃料电池 3 种 DG,所以粒子维数为 3,粒子个数取为 20,  $c_1 = c_2 = 1.5$ , 惯性权重  $\omega_{\max} = 2, \omega_{\min} = 0$ . 对 33 节点系统进行仿真.

因光伏发电和风力发电不需要燃料,没有污染,由文献[9]得到燃气轮机和火力发电的污染物参数如表 2 所示. 污染物成本为  $\text{NO}_x$ : 8 元/kg,  $\text{SO}_2$ : 6 元/kg,  $\text{CO}_2$ : 0.023 元/kg.

表 2 污染物排放特性参数

Tab. 2 Pollutant emission characteristics parameters

项目	M/(g · MW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )		
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
火力发电	2.78	9	860
燃气轮机发电	0.20	0.003 6	724

目标函数为投资运行费用、环境因素、网损费用之和:

$$F = \omega_{\text{DG}} \times C_{\text{DG}} + \omega_e \times C_e + \omega_{\text{loss}} \times C_{\text{loss}}$$

设三者权重相同,取  $\omega_{\text{DG}} = \omega_e = \omega_{\text{loss}} = 1/3$ . 仿真结果如图 6 所示. DG 接入节点及位置如表 3 所示.

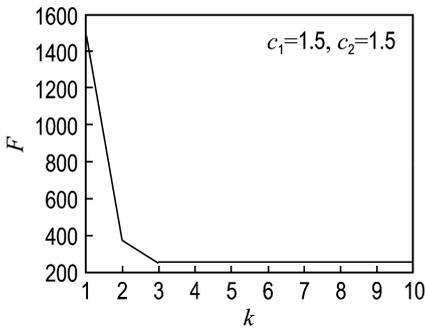


图 6 仿真结果

Fig. 6 Results of simulation

表 3 DG 接入节点数量及位置

Tab. 3 DG access nodes number and locations

DG	位置	数量
光伏阵列	2	40
风力发电机	2	1
燃料电池	18	1

各值如下:

$$C_{\text{DG}} = 6.292\ 937\ 326\ 618\ 210 \times 10^2;$$

$$C_e = -84.384\ 471\ 256\ 362\ 502;$$

$$C_{\text{loss}} = 2.136\ 512\ 783\ 969\ 703 \times 10^2;$$

$$F = 2.528\ 535\ 132\ 674\ 763 \times 10^2$$

## 4 结 论

本文在总结国内外研究成果的基础上,对含 DG 配电网的选址和定容进行了研究. 在 DG 位置和容量不确定的条件下,首先以有功网损最小进行验证,实验证明,加入 DG 大大减小了网损. 接着建立了包含投资运行费用、环境因素、网损费用的目标函数的数学模型,采用带惯性权重的粒子群算法对目标函数进行优化. 在 Matlab 上通过算例分析,得到了 DG 较为合理的接入位置和容量,验证了算法的可行性和收敛性.

## 参考文献:

[1] 周巧俏,汤云岩,海晓涛,等. 基于改进自适应遗传算法的分布式电源的选址和定容[J]. 陕西电力, 2010, 38(6):40-44.  
ZHOU Qiao-qiao, TANG Yun-yan, HAI Xiao-tao, et al. Location and size of distributed generation based on improved self-adaptive genetic algorithm [J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(6):40-44. (in Chinese)

[2] 张婷婷. 配电网规划中分布式电源的选址和定容的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.  
ZHANG Ting-ting. Study on siting and sizing of DG in distributed network planning [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

[3] 陈浩. 分布式电源对配电网网损影响的研究[J]. 科技信息, 2011(1):371-372,363.  
CHEN Hao. Research on the effects of distributed generation for power distribution network loss [J]. Science & Technology Information, 2011(1):371-372,363. (in Chinese)

[4] 荆江平,文杰. 基于功率圆的分布式电源并网选址和定容研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3):180-183.  
JING Jiang-ping, WEN Jie. Research on siting and sizing grid-connected distributed generation based on power circle [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3):180-183. (in Chinese)

[5] 海晓涛,徐岩,姚晓玲,等. 基于免疫遗传算法的智能配电网分布式电源选址定容[J]. 陕西电力, 2011, 39(12):58-61.  
HAI Xiao-tao, XU Yan, YAO Xiao-ling, et al.

- Setting and sizing of distributed generation based on immune genetic algorithm in smart grid [J]. **Shaanxi Electric Power**, 2011, **39**(12):58-61. (in Chinese)
- [6] 李欣然. 粒子群优化算法研究[J]. 计算机与现代化, 2010, **11**(6):6-8.  
LI Xin-ran. Research on particle swarm optimization algorithm [J]. **Computer and Modernization**, 2010, **11**(6):6-8. (in Chinese)
- [7] 赵兴勇, 康凯, 赵艳秋, 等. 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.  
ZHAO Xing-yong, KANG Kai, ZHAO Yan-qiu, *et al.* Optimal algorithm for selected location and selected capacity of the distributed generation [J]. **Electric Power Science and Engineering**, 2011, **27**(3):51-54. (in Chinese)
- [8] 刘幸. 基于量子粒子群算法的分布式电源多目标优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
LIU Xing. The multi-objective optimization of distribution generation (DG) based on quantum particle swarms optimization (QPSO) [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. (in Chinese)
- [9] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(29):11-15.  
QIAN Ke-jun, YUAN Yue, SHI Xiao-dan, *et al.* Environmental benefits analysis of distributed generation [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2008, **28**(29):11-15. (in Chinese)
- [10] 刘磊, 江辉, 彭建春, 等. 分布式发电对配电网网损和电压分布的影响[J]. 计算机仿真, 2010, **27**(4):279-283.  
LIU Lei, JIANG Hui, PENG Jian-chun, *et al.* Impact of distributed generation on distribution system power loss and voltage profile [J]. **Computer Simulation**, 2010, **27**(4):279-283. (in Chinese)
- [11] 杨梅, 杜欣慧. 基于前推回推的微电网潮流[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2013(2):38-41.  
YANG Mei, DU Xin-hui. Power flow of micro-grid based on back-forward substitution method [J]. **Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition**, 2013(2):38-41. (in Chinese)

## Optimization design for locating and sizing of distributed generation based on improved particle swarm algorithm

WANG Xiu-li<sup>\*1</sup>, ZHAO Xing-yong<sup>1</sup>, CAO Jian-wen<sup>2</sup>, YUAN Xiao-ming<sup>2</sup>

( 1. Engineering College, Shanxi University, Taiyuan 030013, China;

2. Taiyuan Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China )

**Abstract:** Based on the analysis of the impact of the access of the distributed generation on the power distribution network, the locating and sizing design of the distributed generation, a major issue of the power distribution network is optimized. By setting up the objective function containing the costs of investment and operation, environmental factors and the cost of network loss, and considering the constraints of tide current, current, voltage and system capacity, a model of distributed generation is established, and using an improved particle swarm algorithm, a system to locate and size the distributed generation is designed. Through the simulation analysis and calculation, the accuracy and validity of this design are verified.

**Key words:** improved particle swarm algorithm; distributed generation; locating and sizing; optimization design