文章编号：1007-2322(2014)03-0012-05　　文献标志码：A　　中图分类号：TM74

含风电机组的配电网中分布式电源的最优配置

王　枭，刘天琪，李兴源
（四川大学电气信息学院，四川成都　610065）

Optimized Location of Distributed Generation in Distribution Network With Wind Turbine Generators

WANG Xiao, LIU Tianqi, LI Xingyuan
(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

摘　要：为解决配电网中含风电机组分布式电源的最优配置问题，首先根据风速概率密度分布函数，推导出风电机组的输出功率函数，之后构建了含有分布式电源的固定投资费用、负荷增量与分布式电源出力的相关费用和以最小网损和最小常规发电机有功出力为目标的风电机组的惩罚成本的目标函数，并以配电系统中电压、电流等为约束条件，提出了一种以自适应惯性粒子群算法为全局搜索和以混沌算法为局部搜索的混合粒子群算法来获取目标函数的最优解。最后通过 IEEE 69 节点系统验证了所提出模型和算法的优异性。

关键词：风电机组；输出功率；分布式电源；惩罚成本；潮流模型；混沌粒子群算法

Abstract: In order to solve the problem of optimized locating distributed generation in the distribution network with the wind turbines, the output power function is deduced according to the probability density function of wind speed. Then an objective function of penalty cost of wind turbine generators is built with such indexes as fixed investment cost and cost associated with load increment and output power of distributed generation, and minimum system loss and minimum active power output of conventional generators. In addition, voltage and current in distribution network are taken as constraint condition. Furthermore, the hybrid particle swarm optimization approach with the adaptive inertia particle swarm algorithm is used for global searching, and chaotic algorithm is used for local searching, which can obtain the optimized solution of objective function. In the end, the advantage of proposed model and algorithm is verified through IEEE 69 system.

Keywords: wind turbine generators; output power; distributed generation; enalty cost; power flow model; chaotic particle swarm optimization algorithm

0　引　言

随着常规能源的日益告急和全球生态环境的逐步恶化，风能作为一种高效清洁的新能源正表现出巨大的发展潜力[1-4]。风力发电不仅不消耗资源、污染环境，而且其建设周期较短、运行简单、实际占地少等特点为解决当今的能源短缺提供了新的途径。因此，在配电网中，以风力发电、燃料电池等为主的可再生能源分布式电源[5-6]（Distributed Generation，DG)以其灵活方便、低污染排放等独特的性能，开始受到电力行业广泛的关注。但是对于分布式电源来说，如何提高风能等清洁能源的比重，加快调整电源结构，减小因分布式电源的波动性、分散性等特点造成的对配电网的不利影响，显得尤为重要。

近年来，国内外学者在这方面做了大量研究。文献［7］从配电网规划及并网变压器等方面分析了并网分布式电源对电网的影响，但未考虑分布式电源数量和容量对电网的影响。文献［8］采用层次分析法对分布式电源规划进行了综合评判，其模型涉及评价指标建立，不同指标间相互关系的分析以及权重确定等，但该方法未考虑客观事实与主观判断的差别，也未能将二者有机结合。文献［9］则考虑了负荷预测值和不同类型分布式电源输出功率的不确定性，以年投资运行费用进行模糊建模，但是缺乏了对后期分布式电源容量和数量扩展性的考虑。

本文研究了配电网中含有风电机组的分布式电源配置问题，首先通过解决因风速而导致的风电机

基金项目：国家自然科学基金项目(51037003)；国家 863 高技术基金项目(2011AA05A119)

组功率输出的不确定性，得到相关的风电机组功率输出函数，进而构建配电网中含有风电的 DG 的潮流模型，在此基础上建立分布式电源最优配置模型并提出了混沌粒子群算法(Chaotic Particle Swarm Optimization，CPSO)，通过模型求解可得到接入风电的配电网分布式电源的最优配置结果。

1　含风电的配电网中分布式电源模型

1.1　风电机组的输出功率模型

由于风是具有不确定性的随机变量，风电机组的输出功率通过从风速到输出功率的特定变换也可以定性为随机变量。忽略机组内部的各种非线性情况及损耗，给定风速风电机组的功率输出[10]可以用式(1)来表示二者关系：

$$\begin{cases} w=0, v<v_{\mathrm{i}}, \text{或 } v>v_{\mathrm{o}} \\ w=w_{\mathrm{r}}\dfrac{v-v_{\mathrm{i}}}{v_{\mathrm{r}}-v_{\mathrm{i}}}, v_{\mathrm{i}}\leqslant v\leqslant v_{\mathrm{r}} \\ w=w_{\mathrm{r}}, v_{\mathrm{r}}\leqslant v\leqslant v_{\mathrm{o}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：w 为风电机组输出功率；w_{r}为风电机组额定输出功率；v_{r}为额定风速；v_{i}为切入风速；v_{o}为切出风速。

如果假设风速呈 Weibull 分布状态[11-12]，就需要将该风速分布转化为相应的风电机组的功率分布，如下式：

$$w=T(v)=av+b \tag{2}$$

$$f_{\mathrm{W}}(w)=f_{\mathrm{v}}[T^{-1}(w)]\left[\frac{\mathrm{d}T^{-1}(w)}{\mathrm{d}w}\right]=f_{\mathrm{v}}\left(\frac{w-b}{a}\right)\left|\frac{1}{a}\right| \tag{3}$$

式中：v 为风速随机变量；w 为机组功率输出随机变量。

而风电机组的功率输出随机变量的离散部分可从 Weibull 概率分布函数中得到如下：

$$P_{\mathrm{r}}\{w=0\}=1-\exp\left(-\left(\frac{v_{\mathrm{i}}}{c}\right)^{k}\right)+\exp\left(-\left(\frac{v_{\mathrm{o}}}{c}\right)^{k}\right) \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{r}}\{w=w_{\mathrm{r}}\}=\exp\left(-\left(\frac{v_{\mathrm{r}}}{c}\right)^{k}\right)-\exp\left(-\left(\frac{v_{\mathrm{o}}}{c}\right)^{k}\right) \tag{5}$$

为了便于在连续部分将风速随机变量转换为风电机组功率输出随机变量，定义：$\rho=w/w_{\mathrm{r}}$，ρ 为风电机组输出功率与额定功率的比值；$l=\dfrac{v_{\mathrm{r}}-v_{\mathrm{i}}}{v_{\mathrm{i}}}$，$l$ 为风速与切入风速的比值。

利用式(2)，得到连续区域内的风电机组功率输出的概率分布函数，如(6)式：

$$f_{\mathrm{W}}(w)=\frac{klv_{\mathrm{i}}}{c}\left(\frac{(1+\rho l)v_{\mathrm{i}}}{c}\right)^{k-1}\exp\left(-\left(\frac{(1+\rho l)v_{\mathrm{i}}}{c}\right)^{k}\right) \tag{6}$$

1.2　接入风电的分布式电源最优配置模型

对于配电网中接入风电机组的分布式电源，考虑其投资总成本，网损成本及系统额外购电成本，以总成本最低为优化目标建立目标函数如下：

$$\min F(x)=\lambda_1\sum_{i=1}^{n}(C_{\mathrm{DG}i}+W_{\mathrm{DG}i})+\lambda_2 T_{\max}C_{\mathrm{pu}}(P_{\sum\text{新增}}-P_{\sum\mathrm{DG}})+\lambda_3\sum_{i=1}^{n}k_{\mathrm{p},i}(W_{i,\mathrm{av}}-w_i) \tag{7}$$

式中：$C_{\mathrm{DG}i}$为分布式电源的固定投资成本(万元)；$W_{\mathrm{DG}i}$为分布式电源运行检修维护成本(万元)；$T_{\max}$为最大年负荷小时数；C_{pu}为单位电价；$P_{\sum\text{新增}}$为系统新增负荷量；$P_{\sum\mathrm{DG}}$为分布式电源的总有功出力；$k_{\mathrm{p},i}$为风电机组的惩罚成本系数；$W_{i,\mathrm{av}}$为风电机组的可用输出功率；w_i为风电机组的实际输出功率；λ_1，λ_2和λ_3分别为加权因子。

同时还要满足电网潮流等式约束条件为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}i}-P_{\mathrm{L}i}-U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\cos\alpha_{ij}+B_{ij}\sin\alpha_{ij})=0 \\ Q_{\mathrm{Gi}}-Q_{\mathrm{L}i}-U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\sin\alpha_{ij}-B_{ij}\cos\alpha_{ij})=0 \end{cases} \tag{8}$$

相关电压、电流、以及分布式电源的容量等不等式约束条件为

$$\begin{cases} U_{\min}\leqslant U_i\leqslant U_{\max} \\ |I_i|\leqslant I_{\max} \\ P_{\mathrm{DGmin}}\leqslant P_{\mathrm{DG}i}\leqslant P_{\mathrm{DGmax}} \end{cases} \tag{9}$$

式(8)中U_i为节点电源幅值；$P_{\mathrm{G}i}$和$Q_{\mathrm{G}i}$为节点 i 的有功和无功发电功率；$P_{\mathrm{L}i}$和$Q_{\mathrm{L}i}$为节点 i 的有功和无功负荷功率。而 B_{ij}、G_{ij}、α_{ij}分别为支路电纳、电导和节点 i 与节点 j 之间的相角差。式(9)中$U_{\max}$和$U_{\min}$分别为电压最大、最小幅值；$I_{\max}$为支路上允许流过的电流的最大值；P_{DGmax}和 P_{DGmin}分别为分布式电源有功出力的上下限。

2　混沌粒子群算法

粒子群优化算法[13](Particle Swarm Optimization) 属于进化算法的一种，和遗传算法相似，它

也是从随机解出发，通过迭代寻找最优解，它也是通过适应度来评价解的品质。粒子群算法使用速度-位移模型，确定在 t 时刻每个粒子所经过的最佳位置($pbest$) $P_i=[p_{i,1}, p_{i,2}, \cdots, p_{i,d}]$ 以及群体所发现的最佳位置($gbest$)P_g，对各粒子的目标函数进行评价并以如下公式更新各粒子的速度和位置[14]：

$$v_{i,j}(t+1)=wv_{i,j}(t)+c_1r_1[p_{i,j}-x_{i,j}(t)]+c_2r_2[p_{g,j}-x_{i,j}(t)] \quad (10)$$

$$x_{i,j}(t+1)=x_{i,j}(t)+v_{i,j}(t+1), j=1,\cdots,d \quad (11)$$

式中：w 为惯性权因子；c_1 和 c_2 为加速常数；r_1 和 r_2 为均匀分布的随机数，其取值范围在 0 到 1 之间。

2.1 自适应惯性权因子

从式(10)中可知，惯性权因子决定着粒子上一时刻速度对当前速度的影响。因此，通过合理调节惯性权因子的值有利于准确快速找到最优解。为了改善 PSO 算法的全局搜索能力，引入了自适应惯性权[15]系数(Adaptive Inertia Weight Factor，AIWF)，使惯性权系数随粒子目标值变化而变化，表达式如下：

$$w=\begin{cases} w_{\min}+\dfrac{(w_{\max}-w_{\min})(f-f_{\min})}{f_{\text{avg}}-f_{\min}}, f\leqslant f_{\text{avg}} \\ w_{\max}, f>f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

式中：f 为粒子的当前目标函数值；$f_{\min}$ 和 f_{avg} 分别为粒子的最小和平均目标值。

2.2 混沌局部搜索

混沌优化算法能使搜索过程避免陷入局部极小值，直至最终获得全局最优解，其优化过程由两个步骤组成：①将混沌空间映射到需要优化问题的解空间；②利用混沌动态特性来对解空间进行搜索[16]。其主要步骤如下：

步骤 1：令 $k=0$，将决策变量 x_j^k，$j=1$，2，…，n 按式(13)映射为 0 到 1 之间的混沌变量 cx_j^k：

$$cx_j^k=\frac{x_j^k-x_{\min,j}}{x_j^k-x_{\max,j}}, j=1,2,\cdots,n \quad (13)$$

式中：$x_{\max,j}$ 为第 j 维变量的搜索上界；$x_{\min,j}$ 为第 j 维变量的搜索下界。

步骤 2：根据 cx_j^k，利用式(14)计算得出下步的迭代混沌变量 cx_j^{k+1}：

$$cx_j^{k+1}=4cx_j^k(1-cx_j^k), j=1,2,\cdots,n \quad (14)$$

步骤 3：将混沌变量 cx_j^{k+1} 按式(15)转化为决策变量 x_j^{k+1}：

$$x_j^{k+1}=x_{\min,f}+cx_j^{k+1}(x_{\max,j}-x_{\min,j}), j=1,2,\cdots,n \quad (15)$$

步骤 4：根据决策变量 x_j^{k+1}，$j=1$，2，…，n，对新解进行评价。

步骤 5：如果评价后得到的新解优于初始解 $\boldsymbol{X}^{(0)}=[x_1^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}]$ 或者此时的混沌搜索次数已经达到了预先设置的迭代次数的最大值，那么此搜索结果即为新解，否则令 $k=k+1$ 并再次返回步骤 2。

2.3 混沌 PSO 算法

本文将自适应 PSO 算法与混沌局部搜索相结合，提出了一种两个阶段的混沌自适应粒子群算法(Chaotic Adaptive Particle Swarm Optimization，CAPSO)，其中自适应 PSO 主要负责全局搜索，而 CLS 依照自适应 PSO 的结果进行局部搜索。为了保持种群的多样性和加强搜索的分散性，混沌 PSO 算法首先保留一定数量的优秀粒子，再动态收缩搜索区域，又在收缩区域内随机产生粒子来代替性能较差的粒子。其步骤如下：

步骤 1　初始化系统参数和种群中的每个粒子。

步骤 2　根据式(10)、式(11)和式(12)修正粒子的速度和位置，计算每个粒子的新位置和其目标函数值，并保留群体中性能最好的 20%的粒子。

步骤 3　对保留的性能最佳的粒子，进行混沌局部搜索(CLS)，并更新其 P_i 及群体的 P_g。

步骤 4　若算法满足停止条件，则搜索停止，输出 P_g，否则继续下一步。

步骤 5　将搜索区域收缩并随机产生群体中剩余的 80%的粒子，然后再返回步骤 2。

3 算例分析

在 MATLAB 环境下对 IEEE 69 节点配电系统进行分析验证，其系统图如图 1 所示。其中，分布式电源节点安装比例不超过系统总容量的 20%。在此取初始种群大小为 90，$c_1=c_2=2.0$，$v_{\max}$ 选为搜索空间的 15%，自适应惯性权因子中，令 $w_{\max}=1.2$，$w_{\min}=0.2$；在风电机组模型中，风电机组额定功率为 1.5MW，切入风速 $v_i=3$m/s，额定风速 $v_r=18$m/s，切出风速 $v_o=25$m/s，假设风机安装地点地形平坦[17]，使尺度参数 $c=8.9$，形状参数 $k=2.2$，风电机组的惩罚成本系数 $k_{p,i}=4.2$。假设

待选单个含风电的 DG 容量(单位为 MVA)为 0.1X(X 为一个随机常数)，且小于所安装节点的负荷量，DG 的总装机容量小于最大负荷总量的 15%，单个分布式电源的功率因数为 0.9，令 $\lambda_1=0.3$，$\lambda_2=0.4$，$\lambda_3=0.3$ 且 $\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3=1$。

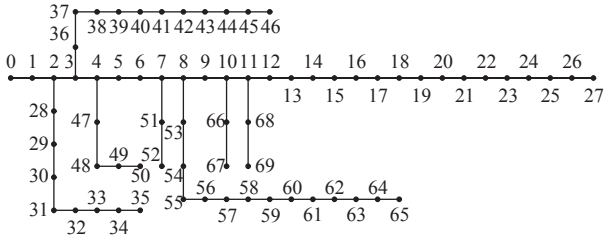

图 1　IEEE 69 节点配电网系统图

根据该配电网中负荷类型的不同，分别选取节点 1-节点 17 为工业负荷，节点 18-节点 35 为农业负荷，节点 36-节点 52 为商业负荷，节点 53-节点 69 为市政生活负荷。其中，风电机组的相关电气参数，如表 1。

表 1　风电机组的电气参数

参数	x_1/p. u.	x_2/p. u.	r_2/p. u.	x_m/p. u.	转差率 s_N
参数值	0.099 85	0.109 06	0.003 73	3.547 08	−0.004

由于这 4 种负荷时序特性的差别，按照优先满足重要负荷，优先满足容量较大的负荷点，优先满足用户数较大的负荷的原则，将 DG 接入该配电网，其接入位置 DG 如表 2 所示。

表 2　接入配电网的 DG

编号	接入点	类型	额定容量/kW
1	5	风电	300
2	14	其它 DG	420
3	24	风电	300
4	30	其它 DG	250
5	38	风电	400
6	59	其它 DG	300

由图 2 可见，在配电网重要负荷节点中接入了分布式电源，使得节点间的有功和无功流动减少，优化了系统潮流，降低了整个配电网系统的运行费用和 DG 的投资费用，而且使整个系统的负荷-功率输出更加平衡，提高了系统的稳定性和安全性。

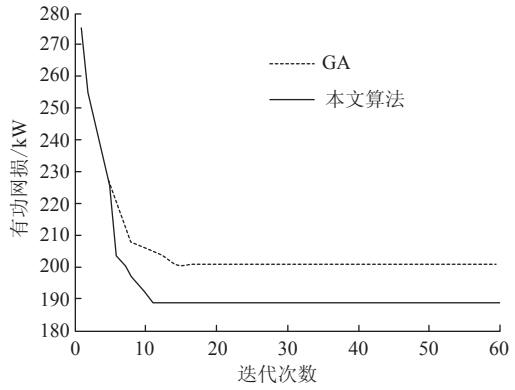

图 2　GA 和 CPSO 在 69 节点系统中得到的优化收敛图

表 3　不同算法下 IEEE 69 节点配电网的仿真结果

算法	DG 接入节点号	有功网损/kW	投资费用/元	运算次数/次
未接入 DG	—	275.087	—	—
遗传算法	5-14-24-30-38-59	177.792	3.81×10^6	15
本文算法	5-14-24-30-38-59	169.743	3.22×10^6	8

如表 3 所示采用本文的算法及 DG 接入前系统的有功网损分别 169.743kW 和 275.087kW，可见，采用文本算法优化后的有功网损下降了 38.29%。与遗传算法相比，本文算法优势主要体现在有功网损更小、投资费用更少，并且克服了遗传算法收敛较慢、局部搜索能力较弱运行时间长的缺点。从图 2 和表 3 可以看出本文算法迭代次数仅为遗传算法的一半，计算速度更快。

4　结　论

本文利用了混沌粒子群算法来解决含有风电机组接入的配电网中分布式电源优化配置。该算法和相应的模型能显著减小配电网中分布式电源的投资费用，降低系统的网损，使系统中的各部分负荷相对均衡，提高了配电网系统的供电可靠性和安全性，利用混沌局部搜索减小了算法求解的计算时间，大大提升了算法的效率。最后在 IEEE 69 节点的配电网系统进行测试，验证了所提算法和含风电机组的配电网分布式电源模型的优异性，具有一定的实际价值。

参　考　文　献

[1]　王承煦，张源. 风力发电[M]. 北京：中国电力出

版社，2003.
[2] 陕华平，肖登明，薛爱东. 大型风电场的风资源评估 [J]. 华东电力，2006，34(2)：15－19.
[3] Dorvlo. Estimating wind speed distribution. Energy Convers. Manage [J]. 2002，43：2311－2318.
[4] 刘峻，何世恩. 建设坚强智能电网助推酒泉风电基地发展 [J]. 电力系统保护与控制，2010，38(21)：19－23.
[5] Kuri B. Distributed generation planning in the deregulated electricity supply industry [C] // IEE Power Engineering Society General Meeting，Denver，2004：2085－2089.
[6] 崔金兰，刘天琪. 分布式发电技术及其并网问题研究综述 [J]. 现代电力，2007，24(3)：53－57.
[7] 韦钢. 分布式电源及其并网时对电网的影响 [J]. 高电压技术，2007，23(1)：36－40.
[8] 杨琦，马世英，宋云亭，唐晓骏. 分布式电源规划方案综合评判方法 [J]. 电网技术，2012，36(2)：212－216.
[9] 杨毅，韦钢. 含分布式电源的配电网模糊优化规划 [J]. 电力系统自动化，2010，34(13)：19－23.
[10] 张节谭，程浩忠，姚良忠等. 分布式风电源选址定容规划研究 [J]. 中国电机工程学报，2009，29(16)：1－7.
[11] 苏勋文，米增强. 基于运行数据的风电机组建模方法 [J]. 电力系统保护与控制，2010，38(9)：49－55.
[12] 陈金富，陈海焱. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流 [J]. 中国电机工程学报，2006，26(3)：31－35.
[13] 汪泳涛，汪琳红，罗松涛. 新型混合粒子群算法在电力系统最优潮流计算中的应用 [J]. 可再生能源，2013，31(6)：34－37.
[14] Clerc M，Kennedy J. The particle swarm：explosion，stability，and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Trans. Evolut. Comput. ，2002，6：58－73.
[15] Shi Y，Eberhart R C. A modified particle swarm optimization. In：Proc. of the IEEE CEC，1998：69－73.
[16] 王凌，郑大钟，李清生. 混沌优化方法的研究进展 [J]. 计算技术与自动化，2001，20(1)：1－5.
[17] 任博强，彭鸣鸿. 计及风电成本的电力系统短期经济调度建模 [J]. 电力系统保护与控制，2010，38(14)：67－72.

收稿日期：2013-06-08

作者简介：
王 枭(1986－)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定与分析计算，E-mail：wxiao333@foxmail.com；
刘天琪(1962－)，女，教授，博士生导师，研究方向为电力系统分析与稳定计算、高压直流输电、调度自动化等。

（责任编辑：林海文）