

文章编号:0254-0096(2019)01-0134-08

## 基于改进灰狼优化算法的分布式电源优化配置

蔡国伟<sup>1</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 张旺<sup>1</sup>, 孟涛<sup>2</sup>, 郑天宇<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 长春 130021;  
3. 通化市供电公司, 通化 134000)

**摘要:** 计及源荷侧随机波动性的影响,采用机会约束规划方法,建立综合考虑配电网运行费用、电压稳定性和污染气体排放量的分布式电源随机规划模型。考虑各评价指标的数量级不同,为避免过度优化某一评价指标,采用模糊技术建立综合满意度函数。结合半不变量理论和 Cornish-Fisher 级数展开计算配电网随机潮流,得到节点电压幅值的概率密度曲线,从概率的角度对系统电压水平进行评估。对一种新颖的灰狼优化算法进行改进,采用 Tent 映射产生的混沌序列代替随机产生的初始种群,同时提出一种非线性收缩因子。PG&E33 节点系统的仿真结果验证该文模型和算法的有效性及其合理性。

**关键词:** 配电网; 分布式电源; 灰狼优化算法; 机会约束规划; Cornish-Fisher 级数

**中图分类号:** TM614

**文献标识码:** A

### 0 引言

分布式电源以其低污染、安装方式灵活和可再生等优点受到国内外学者广泛关注,并取得快速发展<sup>[1]</sup>。但风、光等资源具有随机波动性,分布式电源的接入将增加配电网规划的不确定性和复杂性,若规划合理,则会降低系统网损、改善电压质量和提高投资效益,反之则可能出现电压质量恶化、网损增大和潮流逆流等一系列安全问题<sup>[2]</sup>。

目前,含分布式电源的配电网优化配置研究已成为国内外研究热点,并取得一定的进展。文献[3]建立以有功损耗减小量为最优的配电网规划模型,采用改进粒子群算法对模型求解,但仅从网损的角度考虑分布式电源优化配置问题并不全面。文献[4]从投资成本、网损费用和停电损失的角度建立配电网规划模型,但未考虑环境因素的影响。文献[5]建立综合考虑投资成本和网损的多目标规划模型,采用线性权重将多目标转化为单目标处理,但忽略了各评价指标数量级不同对优化结果的影响。文献[6]考虑投资效益、网损和电压偏差3个优化指标,采用改进多目标粒子群算法对模型求

解,但从静态的角度将间歇性分布式电源按确定性出力电源处理,并不符合配电网实际规划运行现状。文献[7]考虑源荷侧随机波动性,建立基于机会约束规划的配电网规划模型,采用蒙特卡洛模拟计算配电网随机潮流,但存在计算量大和求解效率低的问题。

灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法是 Mirjalili 等<sup>[8]</sup>于 2014 年提出的一种启发式优化算法,该算法具有设置参数少、原理简单和易于实现等优点,已被证明具有良好的全局搜索性能,但该方法仍存在寻优速度慢和早熟收敛的问题。目前关于灰狼优化算法的改进研究仍处于起步阶段,且尚无将灰狼优化算法运用于求解分布式电源优化配置问题的相关研究。

针对以上问题,本文从配电网运行费用、污染气体排放量和电压稳定性的角度,建立配电网随机规划模型,提出一种改进的灰狼优化(improved grey wolf optimization, IGWO)算法对模型求解。考虑源荷侧的随机波动性,采用半不变量法和 Cornish-Fisher 级数计算配电网随机潮流,并利用随机潮流计算结果对相关机会约束进行检验。

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(SS2014AA052502); 长江学者和创新团队发展计划(IRT144); 国家自然科学基金(51377017)

通信作者: 蔡国伟(1968—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统运行分析方面的研究。caigw@mail.nedu.edu.cn

## 1 随机优化数学模型

### 1.1 目标函数

在进行风电、光伏出力特性分析时,需要重点考虑时间连续性,而本文侧重于分布式电源的选址定容计算,是相对在宏观上进行的,并且风电、光伏出力受天气、季节等因素影响较大,不确定因素较多,综合考虑起来求解难度较大。为简化问题,采用配电网运行费用、污染气体排放量的期望值乘以8760 h来表示全年配电网的性能指标,而电压指标则采用全年的期望值。

#### 1) 配电网运行费用

综合考虑分布式电源投资运行费用、网损费用和购电费用的目标函数为:

$$f_1 = C_{DC} + C_{loss} + C_{en} \quad (1)$$

$$C_{DC} = \sum_{i=1}^{N_{DC}} \alpha_{dgi} S_i^{\text{rated}} C_i^{\text{fixed}} + 8760 \sum_{i=1}^{N_{DC}} C_i^{\text{op}} S_i^{\text{rated}} \lambda_{cfi} \quad (2)$$

$$C_{loss} = C_e 8760 P_{loss} \quad (3)$$

$$C_{en} = [P_w - P_{\Sigma DC} - (P_{loss} - P_{DC,loss})] 8760 C_e \quad (4)$$

式中,  $C_{DC}$ 、 $C_{loss}$ 、 $C_{en}$ ——全年分布式电源投资运行费用、网损费用和购电费用;  $N_{DC}$ ——分布式电源类型数;  $\alpha_{dgi}$ 、 $C_i^{\text{fixed}}$ —— $i$ 类型分布式电源的折算系数和单位投资成本;  $S_i^{\text{rated}}$ 、 $\lambda_{cfi}$ —— $i$ 类型分布式电源的额定装机容量和容量系数;  $C_i^{\text{op}}$ —— $i$ 类型分布式电源单位出力的运行维护费用和燃料费用;  $C_e$ ——售电电价;  $P_w$ ——变电站输出有功功率;  $P_{\Sigma DC}$ ——所有分布式电源输出的有功功率;  $P_{loss}$ 、 $P_{DC,loss}$ ——分布式电源接入前后系统总的有功损耗。

#### 2) 污染气体排放量

分布式电源在发电过程会向空气排放大量的 $\text{CO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 等污染气体,各类污染气体排放量与电源有功输出存在一定函数关系,本文采用如下全年污染气体排放模型<sup>[9]</sup>:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_{DC}} \sum_{k=1}^{N_q} 8760 P_{DC}(ij) \alpha_k ER_{jk} \omega_k \quad (5)$$

式中,  $N_p$ ——分布式电源安装节点集合;  $N_q$ ——污染气体类型数;  $P_{DC}(ij)$ ——节点 $i$ 处 $j$ 型分布式电源输出的有功功率;  $\alpha_k$ 、 $\omega_k$ —— $k$ 类污染气体排放系数比和权重系数;  $ER_{jk}$ —— $j$ 型分布式电源的 $k$ 类污染气体排放率。

#### 3) 电压稳定性指标

电压质量是配电网运行可靠性的重要评价指标,分布式电源合理优化配置能有效提高系统电压质量,本文采用配电网第一类电压稳定性指标的年期期望值<sup>[10]</sup>:

$$f_3 = \max\{L_1, L_2, \dots, L_b\} \quad (6)$$

$$L_{ij} = [4(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + 4U_i^2(P_j X_{ij} + Q_j R_{ij})] / U_i^4 \quad (7)$$

式中,  $\{L_1, L_2, \dots, L_b\}$ ——配电网中所有支路的第一类电压稳定性指标的集合;  $L_{ij}$ ——支路 $ij$ 的第一类电压稳定性指标的年期期望值,其值越大说明系统电压稳定性越差;  $P_j$ 、 $Q_j$ ——节点 $j$ 的有功负荷和无功负荷;  $X_{ij}$ 、 $R_{ij}$ ——支路 $ij$ 的电抗和电阻;  $U_i$ ——节点 $i$ 的电压幅值。

### 1.2 约束条件

#### 1) 等式约束

$$\begin{cases} P_i - P_{DCi} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - Q_{DCi} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_{DCi}$ 、 $Q_{DCi}$ ——分布式电源注入节点 $i$ 的有功功率和无功功率;  $j \in i$ ——表示节点 $i$ 、 $j$ 相连;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ ——支路 $ij$ 的电导和电纳;  $\theta_{ij}$ ——节点 $i$ 、 $j$ 的电压相角差。

#### 2) 不等式约束

$$\begin{cases} (\sum_{i=1}^{N_p} P_{DCi}) / (\sum_{i=1}^{N_{bus}} P_i) \leq p_{\max} \\ S_{DCi} \leq S_{DCi, \max} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $N_{bus}$ ——网络节点数(平衡节点除外);  $p_{\max}$ ——系统渗透率上限;  $S_{DCi}$ 、 $S_{DCi, \max}$ ——节点 $i$ 处分布式电源安装容量及上限。

#### 3) 机会约束

$$\begin{cases} P\{U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}\} \leq \lambda \\ P\{S_{ij} \leq S_{ij}^{\max}\} \leq \omega \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P\{\cdot\}$ ——事件 $\{\cdot\}$ 成立的概率;  $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$ ——允许节点 $i$ 电压波动的上、下限,分别取 $0.95U_{rate}$ 和 $1.05U_{rate}$ ,  $U_{rate}$ 为系统电压等级;  $S_{ij}$ 、 $S_{ij}^{\max}$ ——支路 $ij$ 的传输容量及上限;  $\lambda$ 、 $\omega$ ——节点电压约束和支路传输容量约束的置信水平。

### 1.3 模糊隶属度

考虑各子目标函数值的数量级相差较大,为避

过度优化某一评价指标,采用模糊技术建立各评价指标的隶属度函数:

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i \leq f_{ibest} \\ \frac{f_{imax} - f_i}{f_{imax} - f_{ibest}}, & f_{ibest} < f_i < f_{imax} \\ 0, & f_i \geq f_{imax} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $i=1, 2, 3$ ;  $\mu_i$ ——第  $i$  个目标函数值的隶属度,隶属度越接近 1,说明该评价指标越优; $f_i$ 、 $f_{imax}$ ——第  $i$  个目标函数值和最大值; $f_{ibest}$ ——单独优化第  $i$  个目标函数时的最优值。

采用各评价指标的隶属度值建立综合满意度函数:

$$F = \beta_1 \mu_1 + \beta_2 \mu_2 + \beta_3 \mu_3 \quad (12)$$

式中,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ ——3 个评价指标隶属度的权重系数,取值均为 1/3,认为 3 个评价指标的重要程度相同。

## 2 配电网随机潮流计算

### 2.1 半不变量计算

考虑源荷侧随机波动性的影响,采用半不变量法和 Cornish-Fisher 级数展开实现配电网随机潮流计算。风电、光伏出力概率模型和负荷功率概率模型详见文献[9]。配电网随机潮流的矩阵方程为:

$$\begin{cases} S = f(X) \\ Z = g(X) \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $S$ 、 $Z$ ——节点注入功率向量和支路潮流向量; $X$ ——系统状态向量,包括节点电压幅值和相角; $f$ 、 $g$ ——功率方程和潮流方程。

将式(13)在基准运行点处按泰勒公式展开,忽略高次项得:

$$\begin{cases} S_0 + \Delta S = f(X_0) + J_0 \Delta X \\ Z_0 + \Delta Z = g(X_0) + G_0 \Delta X \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $S_0$ 、 $\Delta S$ —— $S$  的期望值和扰动量; $Z_0$ 、 $\Delta Z$ —— $Z$  的期望值和扰动量; $X_0$ 、 $\Delta X$ —— $X$  的期望值和扰动量; $J_0$ ——基准运行点处的雅克比矩阵; $G_0 = \partial Z / \partial X|_{X=X_0}$ 。

节点注入功率的扰动量  $\Delta S$  包括负荷注入功率扰动量  $\Delta S_L$  和分布式电源注入功率扰动量  $\Delta S_{DC}$ ,则  $\Delta S$  的  $k$  阶半不变量可表示为:

$$\Delta S^{(k)} = \Delta S_L^{(k)} + \Delta S_{DC}^{(k)} \quad (15)$$

式中,  $\Delta S_L^{(k)}$ 、 $\Delta S_{DC}^{(k)}$ —— $\Delta S_L$  和  $\Delta S_{DC}$  的  $k$  阶半不

变量。

对分布式电源输出功率模型和负荷功率模型计算,得到  $\Delta S_{DC}$  和  $\Delta S_L$  的各阶原点矩,再根据独立随机变量的半不变量与各阶原点矩的关系<sup>[11]</sup>,可得到  $\Delta X$  与  $\Delta Z$  的各阶半不变量为:

$$\begin{cases} \Delta X^{(k)} = J_0^{-1(k)} \Delta S^{(k)} \\ \Delta Z^{(k)} = (G_0 J_0^{-1})^{(k)} \Delta S^{(k)} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\Delta S^{(k)}$ —— $S$  的  $k$  阶半不变量; $J_0^{-1(k)}$ 、 $(G_0 J_0^{-1})^{(k)}$ —— $J_0^{-1}$ 、 $G_0 J_0^{-1}$  矩阵的  $k$  次幂。

### 2.2 概率分布函数求取

采用 Cornish-Charlier 级数展开获得随机变量的概率分布。假定  $\kappa$  为随机变量  $z$  的分位数,则  $z(\kappa)$  可表示为<sup>[12]</sup>:

$$z(\kappa) \approx \zeta(\kappa) + \frac{\zeta(\kappa)^2 - 1}{6} \chi_3 + \frac{\zeta(\kappa)^3 - 3\zeta(\kappa)}{24} \chi_4 - \frac{2\zeta(\kappa)^3 - 5\zeta(\kappa)}{36} \chi_5 + \frac{\zeta(\kappa)^4 - 6\zeta(\kappa)^2 + 3}{120} \chi_6 + \dots \quad (17)$$

式中,  $\zeta(\kappa) = \Phi^{-1}(\kappa)$ ,其中  $\Phi$  为标准正态分布函数。

根据  $z(\kappa) = F^{-1}(\kappa)$  的关系,可求得随机变量  $z$  的概率分布  $F(z)$ 。

## 3 求解算法

### 3.1 改进灰狼优化算法

GWO 算法<sup>[8]</sup>是通过模拟灰狼觅食行为而提出的一种新型优化算法,该算法已被证明具有较好的鲁棒性和搜索能力,但算法在求解高维、多峰函数时,仍存在早熟收敛和寻优速度慢的问题。为改善这种现状,本文从种群初始化和参数控制 2 个角度对算法进行改进。

#### 3.1.1 Tent 映射的应用

混沌运动是非线性系统中的普遍现象,具有随机性和遍历性,能在一定范围按照自身规律不重复的遍历所有状态。因此,本文将混沌算子与 GWO 算法结合,采用 Tent 映射的混沌序列对初始种群赋值,以保证初始种群的多样性。Tent 映射的表达式为<sup>[13]</sup>:

$$x_{i+1} = \begin{cases} 2x_i, & 0 \leq x_i \leq 0.5 \\ 2(1-x_i), & 0.5 < x_i \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

Tent 映射经贝努利移位变换后可表示为:

$$x_{i+1} = (2x_i) \bmod 1 \quad (19)$$

### 3.1.2 非线性收缩因子

在GWO算法中,当系数变量 $|A| < 1$ 时表示狼群缩小包围圈,对应算法的局部搜索,当 $|A| \geq 1$ 时表示狼群扩大包围圈,对应算法的全局搜索。由此可见, $A$ 的大小对均衡全局与局部搜索能力起着至关重要的作用,同时 $A$ 又是收缩因子 $a$ 的线性函数。通常 $a$ 采用线性递减策略,然而并不符合实际优化过程对 $A$ 取值的要求,因此本文提出一种非线性的收缩因子 $a(t)$ :

$$a(t) = a_{\max} - \left(\frac{t-1}{T-1}\right)^{\varphi(t)}(a_{\max} - a_{\min}) \quad (20)$$

式中, $a_{\max}$ 、 $a_{\min}$ —— $a$ 的上下限,本文分别取值2和0.01; $\varphi(t)$ ——动态递减指数,取值为 $\cos(t/T)$ ;  $T$ ——迭代阈值,当 $t \geq T$ 时, $a(t)$ 等于常数 $a_{\min}$ 。

由式(20)可知,当 $t < T$ 时, $a(t)$ 较大并且下降缓慢,此时有利于狼群进行全局搜索,确定猎物所在位置的大致区域;当 $t \geq T$ 时, $a(t)$ 等于常数 $a_{\min}$ ,此时狼群缩小包围圈,进行细致的局部搜索。综上所述,非线性收缩因子能较好的均衡算法全局与局部搜索性能,提高寻优精度。

### 3.2 测试函数

采用2个标准测试函数对算法进行测试。

Sphere函数:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (21)$$

Griewank函数:

$$f_2(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (22)$$

算法参数设置:种群规模为100,最大迭代次数为1000,IGWO算法的迭代阈值为700,粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法的惯性权重从0.9线性递减至0.4,学习因子均为2。测试结果如图1和表1所示。

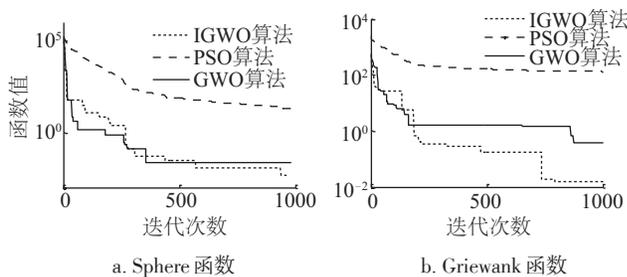


图1 测试算法收敛曲线

Fig. 1 Convergence curve of test algorithm

表1 测试结果

Table 1 Test results

函数	搜索范围	维度	理论最优	计算最优解		
				IGWO	GWO	PSO
$f_1(x)$	[-100,100]	60	0	$1.04 \times 10^{-2}$	$3.71 \times 10^{-1}$	95.21
$f_2(x)$	[-600,600]	50	0	$5.71 \times 10^{-2}$	4.51	113.21

结合表1和图1可知,对于单峰函数Sphere,IGWO和GWO算法优化结果相差不大,均接近理论最优解,而PSO算法的优化结果较差。在求解多峰函数Griewank时,由于存在大量的高大障碍物和局部最优点,使得各变量显著相关,算法很容易陷入局部最优,此时采用GWO算法的求解精度明显低于IGWO算法,分析原因是由于IGWO算法采用Tent映射获得的初始种群均匀分布在搜索空间中,提高了种群多样性,同时非线性收缩因子的应用很好均衡了全局与局部搜索性能。综上所述可知,在3种测试算法中,IGWO算法的优化效果最好,GWO算法次之,PSO算法最差。

## 4 算例分析

### 4.1 算例概况

在Matlab软件编译环境下,以PG&E 33节点配电系统为仿真算例,该系统的电压等级和基准容量分别为12.66 kV和10 MW,总有功负荷和无功负荷分别为3715 kW和2300 kvar,网络接线图如图2所示,线路参数和节点数据详见文献[14]。风电(wind turbine, WT)和光伏(photovoltaic, PV)的候选安装节点为7、18、21、25和31,燃料电池(fuel cell, FC)和微型燃汽轮机(micro-turbine, MT)的候选安装节点为4、13、15和30,采用恒功率因数控制方式接入配电网,功率因数均为0.85,在潮流计算过程中当做PQ节点处理。燃料电池和微型燃汽轮机作为确定性出力电源,规定单位安装容量为20 kW,风电和光伏的发电性能参数分别见表2和表3。负荷有功功率和无功功率的期望值为系统原始负荷,均方差值为0.2。污染气体排放参数如表4所示,投资效益参数详见文献[15]。系统渗透极限系数为30%,机会约束置信水平 $\lambda$ 、 $\omega$ 均为0.9,售电电价为0.4 ¥。

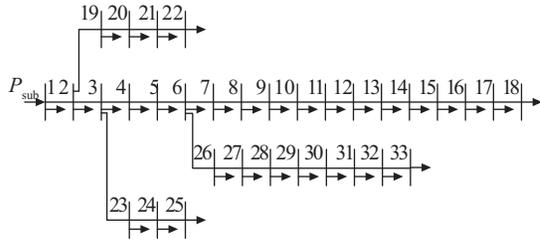


图2 PG&E33节点配电系统接线图

Fig. 2 PG&E33 node distribution system wiring diagram

表2 风力发电性能参数

Table 2 Performance parameter of WT

$P_{rate}/kW$	$v_{in}/m \cdot s^{-1}$	$v_{cut}/m \cdot s^{-1}$	$v_{out}/m \cdot s^{-1}$	$K$	$C$
100	4	16	28	3.8	9.14

表3 光伏发电性能参数

Table 3 Performance parameter of PV

$P_{rate}/kW$	$A/m^2$	$\eta/\%$	$r_{max}/W \cdot m^{-2}$	$\alpha$	$\beta$
100	1000	15	28	2.8	6.32

表4 DG污染气体排放指标( $kg \cdot (kWh)^{-1}$ )

Table 4 DG pollution gas emission parameters( $kg \cdot (kWh)^{-1}$ )

类型	$NO_x$	$SO_2$	$PM_{10}$	CO	$CO_2$
WT	0	0	0	0	0
PV	0	0	0	0	0
MT	0.091	0.002	0.018	0.247	0.72
FC	0.006	0.012	0	0.002	0.46

## 4.2 算法参数设置

为验证 IGWO 算法在求解此类问题的优越性,采用标准 GWO 算法和 PSO 算法与其进行实验比较。3 种算法的种群规模均为 100,最大迭代次数为 100,IGWO 算法的迭代阈值为 70,PSO 算法的惯性权重从 0.9 线性递减至 0.4,学习因子均为 2。

表5 不同算法的优化结果

Table 5 Optimal results of different algorithms

优化 算法	DG 配置容量(安装节点)				评价指标				
	$P_{WT}/kW$	$P_{PV}/kW$	$P_{FC}/kW$	$P_{MT}/kW$	有功 网损/kW	无功 网损/kvar	配电网运行 费用 $\times 10^6/\text{年}$	污染气体 排放量 $\times 10^5/\text{kg}$	电压稳定性 指标/pu
IGWO	400(18)	200(25)	320(13)	180(30)	98.6769	69.0260	6.5889	6.9309	0.0251
GWO	300(21)	300(31)	220(15)	280(30)	108.1360	75.7147	6.3982	7.7684	0.0265
PSO	200(18)	300(31)	240(13)	360(30)	81.7312	57.2575	6.5260	9.6570	0.0248

从表 5 可知,各优化算法得到的分布式电源安装位置和配置容量不同,其对应的配电网运行费

## 4.3 算例结果分析

### 4.3.1 算法性能分析

分别采用 IGWO、GWO 和 PSO 算法对 DG 随机规划模型进行求解,3 种算法收敛特性曲线的对比结果如图 3 所示。

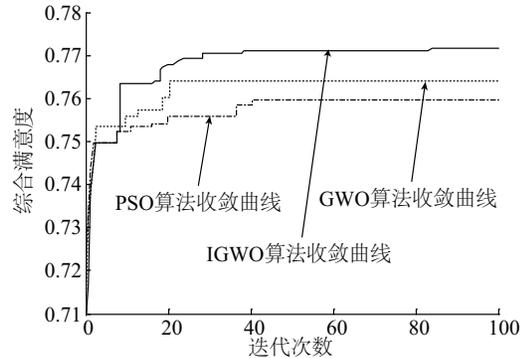


图3 不同算法收敛特性对比图

Fig. 3 Convergence curves comparison of different algorithms

从图 3 可知,GWO 算法在迭代初期具有较快的收敛速度,但由于收缩因子下降较快,导致算法过早的陷入局部最优,早熟收敛,但其求解精度仍高于 PSO 算法;IGWO 算法采用 Tent 映射产生的混沌序列代替初始种群,提高了种群多样性,使算法在迭代初期具有较快的收敛速度,并且非线性收缩因子的应用很好均衡了算法全局与局部搜索性能,其求解精度较 GWO 和 PSO 算法有较大提高。综上分析可知,IGWO 算法在求解此类问题上优势明显,增加了分布式电源规划方案的可行性。

### 4.3.2 规划结果及分析

#### 1) 优化结果分析

分别采用 IGWO、GWO 和 PSO 算法进行 DG 优化配置计算,3 种算法的优化结果如表 5 所示。

用、电压指标和污染气体排放量也不相同,其中 IGWO 算法优化得到的污染气体排放量最优,分别

较 GWO、PSO 算法降低了 12.1%和 24.3%;GWO 算法优化得到的配电网运行费用最优,但其电压指标最差;PSO 算法优化得到的电压指标最优,但其配电网运行费用和污染气体排放量均较差。综上分析可知,3 个评价指标存在相互竞争的关系,即一个指标的进一步的优化会损害另外一个或两个指标。与采用单一优化目标相比,如仅考虑污染气体排放量,则优化结果可能会出现分布式电源配置容量较小,甚至不接入的情况。因此,综合考虑配电网运行费用、电压稳定性和污染气体排放量的规划模型更加符合实际配电网规划运行现状。结合图 3 和表 5 分析可知,虽然 IGWO 算法得到的各子目标函数值均非最优,但其综合满意度值最大,表示的是一个最优折中解,能客观反映该规划方案的优越性。

## 2) Cornish-Fisher 级数有效性验证

为验证 Cornish-Fisher 级数的有效性,分别与应用较为广泛的 Gram-Charlier 级数和 Monte Carlo 抽样进行比较,其中 Monte Carlo 抽样作为检验各方法有效性的判断依据。图 4 给出分别采用 Gram-Charlier 级数、Cornish-Fisher 级数和 6000 次 Monte Carlo 抽样得到的系统有功网损累计概率分布曲线。

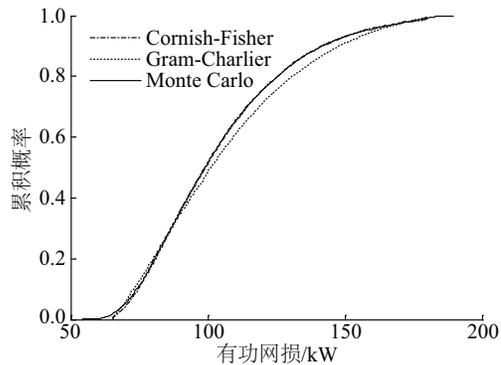


图4 不同方法的系统有功网损累计概率分布

Fig. 4 Cumulative probability function of active power loss with different methods

从图 4 分析可知,采用 Cornish-Fisher 级数展开获得的累计概率分布曲线与 Monte Carlo 抽样得到的基本一致,而 Gram-Charlier 级数则存在一定误差,这说明 Cornish-Fisher 级数具有较高的求解精度。在求解效率方面, Gram-Charlier 级数、Cornish-Fisher 级和 Monte Carlo 抽样分别用时 38.25、41.07 和 1032.47 s, 2 种级数展开方法与 Monte Carlo 抽样相比优势明显。

## 3) 电压水平分析

受源-荷侧各种不确定因素的影响,系统电压会发生显著变化,有必要从概率的角度对电压水平进行分析,评价规划结果的合理性。本文以 IGWO 算法的优化结果为例,统计电压数据给出部分节点规划前后的电压期望与标准差如表 6 所示,并画出节点 18 和系统末端节点 33 的电压幅值概率密度曲线如图 5 所示。

表6 规划前后部分节点电压期望与标准差

Table 6 Expectation and standard deviation of partial node voltage before and after programming

节点编号	规划前电压幅值/pu	规划后电压幅值期望/pu	规划后电压幅值标准差/pu
13	0.9116	0.9635	0.0084
18	0.9038	0.9635	0.0092
21	0.9916	1.0023	0.0061
25	0.9693	0.9795	0.0105
33	0.9167	0.9653	0.0075

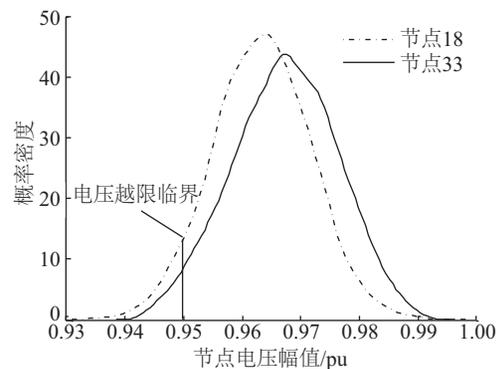


图5 节点18、节点33的电压幅值概率密度曲线

Fig. 5 Probability density curve of bus-18 and bus-33 voltage magnitude

从表 6 数据可知,规划前系统电压质量较差,部分节点电压幅值严重低于允许下限;分布式电源合理规划后,系统电压质量得到了显著提高,大多数节点电压幅值接近 1。但另一方面,受间歇性分布式电源出力随机性的影响,节点电压的波动性也有所提高。由图 5 分析可知,节点 18、节点 33 均存在小概率的电压越限事件发生,并且节点 18 的越限概率大于节点 33,分析原因是由于节点 18 接入了风电机组,并且配置容量较大。因此,有必要对电压越限的节点采取一定保护措施,提高系统电压质量。

## 5 结 论

1) 从配电网运行费用、电压稳定性指标和污染气体排放的角度多方面考虑影响分布式电源规划的因素,真实地反映配电网运行现状,由此得到的规划方案也更加贴合实际。

2) 与 GWO、PSO 算法相比,IGWO 算法具有更高的求解精度,增加了分布式电源规划方案的可行性,同时也说明了改进策略的有效性。

3) 对 Gram-Charlier 级数、Cornish-Fisher 级和 Monte Carlo 抽样 3 种方法进行比较,结果表明 Cornish-Fisher 级具有较高的拟合精度和求解效率。

4) 从概率的角度分析源荷侧各种不确定因素对系统电压水平的影响,评估优化方案与配电网运行的契合度,结果表明,本文方法得到的电压质量满足配电网运行要求。

### [参考文献]

- [1] Mostafa N, Rachid C, Mario P. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300—2310.
- [2] Peyman K, Gharehpetian G B, Abedi M, et al. Long term scheduling for optimal allocation and sizing of DG unit considering load variations and DG type [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 9(54): 277—287.
- [3] 刘 波, 张 焰, 杨 娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用 [J]. 电工技术学报, 2008, 35(6): 103—108.
- [3] Liu Bo, Zhang Yan, Yang Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 35(6): 103—108.
- [4] 叶德意, 何正友, 臧天磊. 基于自适应变异粒子群算法的分布式电源选址与容量确定 [J]. 电网技术, 2011, 35(6): 155—160.
- [4] Ye Deyi, He Zhengyou, Zang Tianlei. Siting and Sizing of distributed generation planning based on adaptive mutation particle swarm optimization algorithm [J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 155—160.
- [5] 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 [J]. 现代电力, 2014, 31(5): 54—58.
- [5] Zhou Yong, Chen Jiajun, Jiang Fei, et al. Research on optimized distributed generations locating based on modified firefly algorithm [J]. Modern Electric Power, 2014, 31(5): 54—58.
- [6] 潘 超, 孟 涛, 蔡国伟, 等. 主动配电网广义电源多目标优化规划 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3): 41—46.
- [6] Pan Chao, Meng Tao, Cai Guowei, et al. Multi-objective optimization planning of generalized power in active distribution network [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(3): 41—46.
- [7] 夏 澍, 顾劲岳, 葛晓琳, 等. 风光联合优化配置的多目标机会约束规划方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 35—40.
- [7] Xia Shu, Gu Jinyue, Ge Xiaolin, et al. Multiobjective chance- constrained programming method for wind generations and photovoltaic allocating [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 35—40.
- [8] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimization [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46—61.
- [9] 潘 超, 孟 涛, 蔡国伟, 等. 广义电源多目标优化配置与运行 [J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3505—3512.
- [9] Pan Chao, Meng Tao, Cai Guowei, et al. Multi-objective optimal configuration and operation of generalized power sources [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3505—3512.
- [10] 武晓滕, 刘 健, 毕鹏翔. 配电网电压稳定性研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 31—35.
- [10] Wu Xiaomeng, Liu Jian, Bi Pengxiang. Research on voltage stability of distribution networks [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 31—35.
- [11] 王锡凡, 王秀丽. 电力系统随机潮流分析 [J]. 西安交通大学学报, 1988, 22(2): 87—97.
- [11] Wang Xifan, Wang Xiuli. Probabilistic load flow analysis in power systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1988, 22(2): 87—97.
- [12] 郭效军, 蔡德福. 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 85—110.
- [12] Guo Xiaojun, Cai Defu. Comparison of probabilistic load nflow calculation based on cumulant method among

- different series expansions[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(12): 85—110.
- [13] 张浩, 张铁男, 沈继红, 等. Tent混沌粒子群算法及其在结构优化决策中的应用[J]. *控制与决策*, 2008, 23(8): 857—862.
- [13] Zhang Hao, Zhang Tienan, Shen Jihong, et al. Research on decision-makings of struture optimization based on improved Tent PSO[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(8): 857—862.
- [14] Aman M M, Jasmon G B, Bakar A H A, et al. A new approach for optimum simultaneous multi- DG distributed generation units placement and sizing based on maximization of system loadability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm [J]. *Energy*, 2014, 66: 202—215.
- [15] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等. 含分布式电源的主动配电网双层规划模型[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(24): 19—34.
- [15] Pan Chao, Meng Tao, Cai Guowei, et al. Bi-level programming model of distributed generation in active distribution network [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(24): 19—34.

## OPTIMAL CONFIGURATION OF DISTRIBUTED GENERATION BASED ON IMPROVED GREY OPTIMIZATION ALGORITHM

Cai Guowei<sup>1</sup>, Liu Xu<sup>1</sup>, Zhang Wang<sup>1</sup>, Meng Tao<sup>2</sup>, Zheng Tianyu<sup>3</sup>

(1. *College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;*

2. *Electric Power Research Institute, State Grid Jilinsheng Electric Power Supply Company, Changchun 130021, China;*

3. *Tonghua Electric Supply Company, Tonghua 134000, China)*

**Abstract:** Stochastic programming model of distributed generations is proposed based on chance constrained programming method in this paper, which considers operating cost of distribution network, voltage stability, pollution gas emissions and stochastic volatility of generation side and demand side. The quantity level of each evaluation index is different. The fuzzy technology is used to establish comprehensive satisfaction function to avoid excessively optimizing a certain evaluation index. Stochastic power flow is calculated with semi-invariant theory and Cornish-Fisher series expansion in distribution network. System voltage level is evaluated by probability density curve of node voltage amplitude. An improved grey wolf optimization algorithm is proposed, which uses a non-linear shrinkage factor and makes chaotic sequence of Tent map instead of initial population. The simulation results of PG&E33 system verify the validity and rationality of the model and algorithm.

**Keywords:** distribution network; distributed generations; grey wolf optimization algorithm; chance constrained programming; Cornish-Fisher series