

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.03.010

基于改进蝙蝠算法含分布式电源的无功优化

徐明玉, 肖强晖, 杨广文

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 将分布式电源与传统的配电网电压调节方式相结合, 分析包含分布式电源的配电网系统无功优化的问题, 并建立了有功网络损耗最低以及电压稳定裕度最大的多目标优化数学模型, 利用模糊理论将分布式电源的多目标无功优化问题转换成单目标优化问题, 进一步减少了有功网损, 提高了电压稳定性。鉴于传统蝙蝠群体易于聚集于局部极值, 导致早熟, 将混沌序列以及自适应调整策略融入到蝙蝠优化算法中, 提出了一种改进型多目标蝙蝠优化算法, 利用混沌理论以及动态自适应机制调整的特性, 对蝙蝠算法参数进行调整。通过 IEEE-33 测试系统验证, 所提算法具有良好的实用性和适应性, 并且也证明了所提模型的实际意义。

关键词: 蝙蝠算法; 无功优化; 分布式电源; 网络损耗; 电压稳定裕度

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)03-0051-06

Reactive Power Optimization with Distributed Generators Based on the Improved Bat Algorithm

Xu Mingyu, Xiao Qianghui, Yang Guangwen

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : Integrates the distributed generators (DGs) with traditional grid voltage regulation, analyzes the grid reactive power optimization of distributed generators, and builds the multi-objective optimized mathematical model with less active power network loss and maximum voltage stability margin. Applies fuzzy theory to transform the multi-objective reactive power optimization into single-objective optimization, further reduces active power network loss and improves the voltage stability. In order to overcome the problem of traditional bat algorithm tending to fall into the local optimal solution, integrates the chaos sequence and adaptive adjustment strategy into the bat optimization algorithm and proposes an improved multi-objective bat optimization algorithm. Adjusts the bat algorithm parameters by chaos theory and dynamic adaptive mechanism adjust characteristics. Through the IEEE-33 test system, verifies the practicability and adaptability of the proposed algorithm, and it also proves the practical significance of the model.

Keywords : bat algorithm; reactive power optimization; distributed generators; network loss; voltage margin

0 引言

分布式发电作为智能电网的重要组成部分, 近年来受到日益广泛的关注^[1]。但是, 分布式电源 (distributed generator, DG) 接入配电网后, 会引起各

支路潮流大小和方向改变, 对传统配电网的电压稳定、运行、继电保护等将造成重大影响。不同类型的分布式发电由于接入大电网的并网方式不同, 会对大电网的无功优化造成不同影响^[2]。

收稿日期: 2015-03-19

作者简介: 徐明玉 (1991-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统无功优化,

E-mail: 1524643238@qq.com

文献[3]提出一种基于变异因子与克隆机制相结合的混合无功优化算法,并把它运用到含分布式电源的配电网无功优化求解中,验证DG能够对无功优化产生较大的影响。文献[4]研究了在分布式电源接入的位置和容量在都不确定的情况下,会对配电网运行产生哪些影响。文献[5]研究了不同类型的分布式电源接入配电网以后,无功控制的方法和策略,提出了基于同步PI控制的方法,并对其建模仿真。文献[6]提出了一种改进型粒子群优化算法,应用到电力系统无功优化中,然而这种改进形式一般计算时间较长、运行复杂。文献[7]以网损为目标函数,提出采用常规萤火虫算法(firefly algorithm, FA)求解该问题,但FA算法存在收敛精度不高,易于陷入局部最优的缺陷。文献[8]提出了一种改进型粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO),并建立了以有功网损最小为目标函数的优化模型,然而这种改进形式一般计算时间较长、运算复杂。文献[9]提出蝙蝠优化算法(bat algorithm, BA),将其应用在求解典型的数学模型上,并将优化结果与改进的粒子群以及遗传算法相比较,验证该算法的有效性和快速性,但是蝙蝠基本算法易容陷入局部最优值,全局搜索能力不高。文献[10]将模拟退火算法与蝙蝠算法相结合,提出改进的蝙蝠算法,通过20个典型的基准测试函数,将实验结果与改进PSO算法以及人工鱼群算法相比较,验证该算法优越性,但是改进的算法编程复杂,参数较多,运行时间较长。

本文首先建立了含分布式电源的配电网的无功优化模型,应用模糊理论将多目标转化为单目标,在此基础上,提出了一种改进型多目标蝙蝠优化算法,用来处理含DG无功优化问题。

1 无功优化模型建立

无功优化的目标函数包括很多种,本文从经济学的角度考虑目标模型的建立,以降低系统的网络损耗作为目标函数。系统损耗^[11]包括:输电线路的传输损耗、变压器损耗以及机段损耗等,而输电线路的损耗是系统损耗的主要部分。

系统有功功率损耗最小的目标函数,以牛顿拉夫逊潮流公式为基本,结合充电站的节点注入功率,给出网损计算公式:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} [a_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + b_{ij}(Q_i P_i - P_i Q_j)], \quad (1)$$

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), \quad b_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j). \quad (2)$$

式中: N_b 为线路中的节点数;线路的阻抗为 $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$;

$V_i \angle \delta_i$, $V_j \angle \delta_j$ 为节点电压。

分布式电源接入配电网之后的系统的网损和分布式电源安装节点相应的有功和无功功率注入容量有关:

$$P_i = P_{DG_i} - P_{D_i}, \quad (3)$$

$$Q_i = Q_{DG_i} - Q_{D_i} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: P_{DG_i} , Q_{DG_i} 分别是分布式电源节点注入有功功率和无功功率; P_i , Q_i 分别为节点 i 的注入有功功率和无功功率; P_{D_i} , Q_{D_i} 分别为节点的注入有功功率和无功功率。

将式(3)和(4)带入到式(1)和(2)得到接入分布式电源之后的系统有功网损:

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} [a_{ij}(P_i(P_{DG_i} - P_{D_i}) + Q_i(Q_{DG_i} - Q_{D_i})) + b_{ij}(P_i(P_{DG_i} - P_{D_i}) - Q_j(Q_{DG_i} - Q_{D_i}))]. \quad (5)$$

电力系统电压是否稳定是系统的一个关键参考因素,本文的第2个目标函数最大电压稳定裕度, ij 支路电压稳定裕度的计算公式如下:

$$f_{ij}^2 = 4 \left[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) V_i^2 \right] / V_i^4. \quad (6)$$

式中 f_{ij} 是线路的电压稳定裕度。

从上面的公式可以看出,线路电压稳定裕度越大,系统的稳定性越好。

电力系统的无功优化包括等式约束条件和不等式约束条件。

1) 等式约束

等式约束为:

$$\begin{cases} P_i - \sum_{j=1}^N e_j (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} + B_{ij} e_i) = 0, \\ Q_i - \sum_{j=1}^N f_j (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i (G_{ij} + B_{ij} e_i) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{G_i} , Q_{G_i} 分别为发电机节点 i 的有功功率和无功功率; G_{ij} , B_{ij} 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳; e_i , f_i 分别为第 i 个节点的电压幅值和相角; e_j , f_j 分别为第 j 个节点的电压幅值和相角。

2) 不等式约束条件

不等式的约束条件包括:控制变量的约束条件和状态变量的约束条件。

控制变量的约束条件:

$$\begin{cases} Q_{DG_i, \min} \leq Q_{DG_i} \leq Q_{DG_i, \max}, \\ Q_{c_j, \min} \leq Q_{c_j} \leq Q_{c_j, \max}, \\ K_{TK, \min} \leq K_{TK} \leq K_{TK, \max}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: Q_{DG_i} , Q_{c_j} , K_{TK} 分别为分布式电源的无功容量、无功补偿设备的无功容量、有载调压变压器电压比;

$i=1, 2, \dots, N_G$, N_G 为分布式电源的编号;

$j=1, 2, \dots, N_C$, N_C 为电容器容量的编号;

$K=1, 2, \dots, N_T$, N_T 为变压器编号。

状态变量的约束条件:

$$V_{Dj, \min} \leq V_{Dj} \leq V_{Dj, \max}, j=1, 2, \dots, N_D。 \quad (9)$$

2 模糊理论

为解决多目标优化问题,引入了模糊理论将多目标的优化转换成单目标的优化问题。本文采用模糊理论对单目标函数的非劣解进行模糊化,并利用隶属度代表对每个目标的满意度。根据优化调度模型极小化型和极大化型的特点,选用降半直线形为有功网损和电压稳定裕度的隶属度函数:

$$u_1(P_{\text{loss}}) = \begin{cases} 1, & P_{\text{loss}} \leq P_{\text{loss}}^{\min}; \\ 1 - \frac{P_{\text{loss}} - P_{\text{loss}}^{\max}}{P_{\text{loss}}^{\max} - P_{\text{loss}}^{\min}}, & P_{\text{loss}}^{\min} < P_{\text{loss}} < P_{\text{loss}}^{\max}; \\ 0, & P_{\text{loss}} \geq P_{\text{loss}}^{\max}。 \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{loss} 为网损单目标函数; $u_1(P_{\text{loss}})$ 为单目标函数满意度; P_{loss}^{\min} 和 P_{loss}^{\max} 分别表示有功网损的最大值和最小值。

模糊理论对每一个单目标函数,都有一个隶属度函数。电压稳定裕度的隶属度函数为:

$$u_1(f) = \begin{cases} 1, & f \leq f^{\min}; \\ 1 - \frac{f - f^{\max}}{f^{\max} - f^{\min}}, & f^{\min} < f < f^{\max}; \\ 0, & f \geq f^{\max}。 \end{cases} \quad (11)$$

式中, f^{\max} , f^{\min} 分别为电压稳定裕度的最大值和最小值,隶属度函数的变化曲线如图1所示。

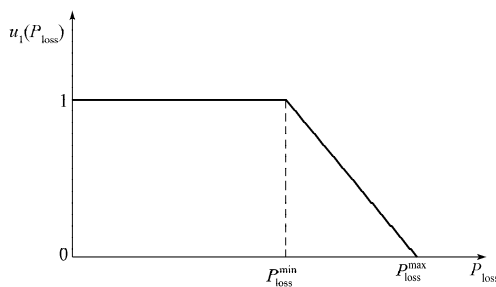


图1 极小型

Fig. 1 Minimization

极小型是一种应用比较广泛的方法,这种方法元素应该是各个函数的隶属度而不是函数本身,因此依据模糊理论和最大满意度法,定义为各隶属函数 $u_1(P_{\text{loss}})$, $u_1(f)$ 中最小的隶属变量,称为满意度,即

$$F = \min(u_1(P_{\text{loss}}), u_1(f))。 \quad (12)$$

模糊多目标最优点集 f 在求解裕的隶属度内求解多目标优化问题严格单调递增,则可以转化为求解

隶属度函数最大满意度问题,即

$$\begin{aligned} & \max\{F\}, \\ & \text{s.t.} \begin{cases} u_i(x) \geq u, \\ \text{式(7)~(9)}. \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

3 蝙蝠优化算法的基本原理

3.1 BA 优化机理

蝙蝠算法是从微型蝙蝠捕获食物的特性中得到的启发,2010年由著名的印度学者杨新社(Yang Xinshe)提出,是一种模拟微型蝙蝠捕食行为的智能优化算法^[12]。

微型蝙蝠是否能够寻找到食物所在空间或者能否寻找到更高质量的优化解主要取决于蝙蝠算法的脉冲音强和脉冲频度,在开始进行目标函数寻优的时候,微型蝙蝠发射较小的频度和较强的音强,因为较强的音强使得微型蝙蝠能探索到较远空间食物,而较小的频度能够增加寻找食物的精确度,当微型蝙蝠个体寻找到空间食物所在位置时(当前最优解),则逐渐提高的微型蝙蝠的频率幅度,使得局部搜索更具有精度。与此同时,逐渐缩小微型蝙蝠的音频强度,减少更新速度,则更有利于局部最优解的探索。

3.2 BA 算法数学描述

主要有3个参数决定蝙蝠算法寻优速度和精度,分别是:频率和音强以及脉冲发射频度^[11]。下面从数学角度定义算法的寻优机制。

定义1 蝙蝠的脉冲频率为

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) * \beta, \quad (14)$$

式中: f_i 表示蝙蝠个体的脉冲频率; $[f_{\min}, f_{\max}]$ 为频率的范围; β 是一个随机扰动,在 $[0, 1]$ 上服从均匀分布。

定义2 蝙蝠的飞行速度

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*) f_i, \quad (15)$$

式中: x_i^{t-1} 代表第 i 个蝙蝠在第 $t-1$ 次迭代的空间位置; x_* 为当前空间最优位置; v_i^t 代表第 i 个蝙蝠在第 t 次的速度。

定义3 蝙蝠 i 在被吸引向蝙蝠 j 的位置每一次迭代更新中,遵循下列公式

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t。 \quad (16)$$

定义4 脉冲强度和频度的更新公式

$$\begin{aligned} r_i^{t+1} &= r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)], \\ A_i^{t+1} &= \alpha \cdot A_i^t, \end{aligned} \quad (17)$$

式中: r_i^0 表示第 i 个蝙蝠脉冲频度的最大值; $\gamma > 0$ 表示脉冲频度增加系数; $\alpha \in (0, 1)$ 表示音频衰减系数,均为常量; A_i^t 表示第 t 次迭代时蝙蝠个体发射脉冲的音

强。另外,不难发现, $t \rightarrow \infty, A'_i \rightarrow \infty, r_i \rightarrow r_i^0$ 。

3.3 BA 算法改进

基本蝙蝠算法中以参数设置较少,及其更新公式清晰等优点,在很多领域已经得到应用,但是,与其它群智能算法相比,基本蝙蝠算法存在着种群过早收敛等不足之处。因此,课题组对蝙蝠算法进行了以下2点改进。

1) 适应惯性调整的方法

蝙蝠算法的关键优势是探索过程(全局最优值能力)转换开发(局部最优值能力)解空间的速度较快,然而如果智能优化算法转换的开发阶段的速度较快,会使得算法容易陷入局部最优解。因此,本文提出利用自适应调整因子调整从探索到开发的过程。

$$v'_i = wv_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*)f_i, \quad (18)$$

$$w = 1 - 0.5(g/G)^2. \quad (19)$$

式中: g 是当前的迭代次数; G 是最大的迭代次数; w 是惯性权重因子。

在蝙蝠算法刚开始迭代过程中要求蝙蝠个体有全局搜索能力,在寻找到全局最优值所在空间位置之后,要求蝙蝠个体降低飞行速度,在全局最优解的局部领域内逐步对领域进行开发,寻找更高质量的优化,此时要求蝙蝠算法具有较低飞行速度,并尽量使每一次迭代更新距离也比较小,这样才能在全局最优解的局部领域内附近寻找到更优解。

2) 混沌搜索策略

为了避免陷入局部最优解,提高种群的利用率,利用混沌理论本身的搜索机制来提高种群利用率。对于蝙蝠算法引入混沌搜索策略的基本原理是:将算法初始化的种群映射到 self-logical mapping 函数中,将初始化的解集映射到解空间中。其数学表达式为:

$$y_{(n+1),s} = 1 - 2y_{n,s}^2; \quad (20)$$

$$y_{n,s} = 2(x_{i,s} - a_{i,s}) / (b_{i,s} - a_{i,s}) - 1; \quad (21)$$

$$x'_{i,s} = 0.5(b_{i,s} - a_{i,s})y_{(n+1),s} + 0.5(b_{i,s} + a_{i,s}). \quad (22)$$

式(20)~(22)中: $n = 0, 1, \dots, N$; $y_{(n),s} \in (-1, 0) \cup (0, 1)$; d 是解空间的搜索维度; N 是混沌序列的最大迭代次数; $b_{i,s}, a_{i,s}$ 分别是 $x_{i,s}$ 最大值和最小值。

应用产生混沌序列的3个步骤:

- 1) 将位于 D 解空间中第 i 个蝙蝠个体,根据 self-logical mapping 函数利用式(21)映射到 $[-1, 1]$ 上;
- 2) 利用式(20)产生新的混沌序列 $y_{(n+1),s}$;
- 3) 最后根据式(22)得到新的 $x_{i,s}$ 个体,带入目标函数求取适应度值。

在混沌序列产生中,寻找到更高质量的解,则将其代替原始蝙蝠第 i 个体的原先位置;否则,继续进行混沌搜索,直到达到最大迭代次数。

3.4 算法步骤

本文应用改进蝙蝠算法求解微电网优化流程如图2所示。

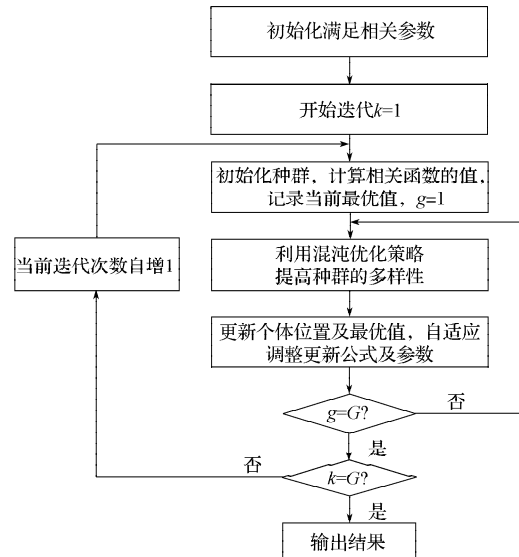


图2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

4 算例仿真及结果分析

4.1 算例仿真

本文采用IEEE-33节点作为测试系统,对该系统增加有载调压变压器,VR为变比,2组并联补偿电容器 C_1, C_2 ,以及2个分布式电源 DG_1, DG_2 。其测试系统图如图3所示。

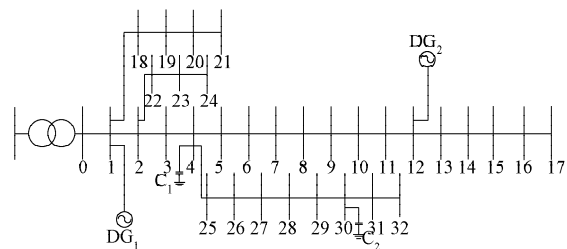


图3 IEEE-33节点测试系统图

Fig. 3 IEEE-33 node test system diagram

如图所示,有载调压变压器的电压比范围为0.9~1.1,上下档位数为 ± 8 ,步进量为1.25%。2个分布式电源均具有无功补偿的能力,设置每个DG的有功出力为1 MW。

无功容量的范围:100~500 kVar。并联电容的补偿容量分150 kVar \times 4和150 kVar \times 7。

采用 Matlab 编写算法程序算法参数设置:蝙蝠种

群大小 $m=100$, 脉冲频度增加系数 $\gamma=0.05$; 脉冲频率的范围 $[0, 100]$; 最大脉冲频度 $\gamma^0=0.75$; 最大声响 $A=0.25$; 音量衰减系数 $\alpha=0.95$ 。

4.2 结果分析

表1 为不同算法的优化结果。

表1 不同算法的优化结果

Table 1 Results of different algorithm optimization

算法	优化后网损/kW	迭代次数	计算时间/s
PSO	77.010 4	30	3.3
FA	76.728 0	60	4.0
本文算法	76.517 4	26	3.0

从表1中可知, 本文所提出的算法和所求的最优解均优越于FA算法和粒子群算法。并且整个网络系统的网损从 99.200 5 kW 减少到 76.517 4 kW, 下降了 22.81%, 并且各个节点的电压均在约束条件范围内。

表2 是这3种算法进行无功优化之后各个控制变量的解, 无功电源的接入位置与没有加入分布式电源的接入位置有所不同, 各种优化算法计算结果的DG接入容量也不相同, 而本文算法得出的DG接入节点和容量能使系统网损最小, 这就说明改进的BA算法能够优化出更合理的解, 同时也说明传统的无功调节手段与分布式电源相结合能够更好的进行无功优化, 减少系统的损耗。

表2 33节点系统无功优化前后控制变量参数

Table 2 The control variable parameters before and after 33-node system reactive power optimization

控制变量	节点编号	初始值	算 法		
			PSO	BA	本文算法
V_R	0	1	1.054 1	1.071 4	1.062 5
Q_{Dg1}/kVar	1	0	450.0	475.5	496.6
Q_{Dg2}/kVar	12	0	301.2	315.4	289.8
Q_{C1}/kVar	5	600	590	575	600
Q_{C2}/kVar	30	600	700	720	750

为了验证本文的分布式电源与无功补偿设备联合优化的实际效果, 进行了不同方案下使用本文算法的试验。表3 为优化结果。

表3 不同方案下优化结果

Table 3 Optimal results for different schemes

优化方案	网损/kW	最低电压/V	电压稳定裕度
优化前	220	0.924	0.871 8
仅DG	125	0.950	0.886 8
仅无功补偿	176	0.959	0.901 4
两者组合	76	0.981	0.916 1

从表3中可以分析得出, 本文所提模型能够更加有效减少系统网损, 并在满足约束条件下, 提高电能质量。

接入分布电源之后电压对比图如图4所示。

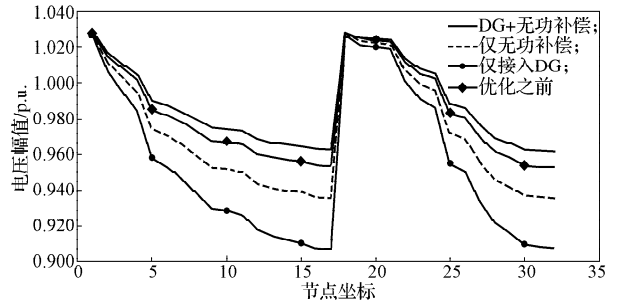


图4 IEEE-33各节点电压幅值

Fig. 4 IEEE-33 each node voltage amplitude

从图4可以发现, 接入分布式电源之前系统的平均电压为 0.962 3 V, 接入以后, 配网系统电压普遍有明显改善, 平均电压为 0.983 1 V, 提高了系统节点整体电压水平。

为了证明本文改进 BA 算法能够非常有效获取高性能的最优解, 分别与原始 BA 算法、PSO 算法优化结果进行分析与比较。这3种方法都为智能随机搜索算法, 故分别进行了20次实验, 取试验的平均值作为参考值, 结果如图5所示。

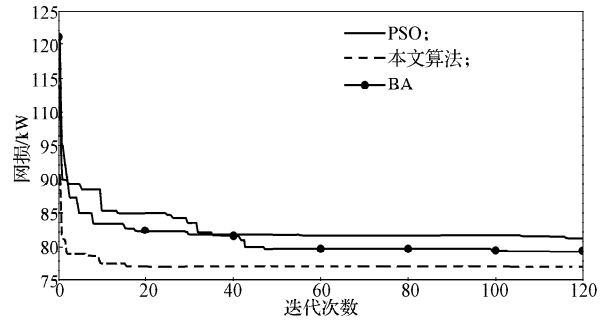


图5 3种算法收敛曲线图比较

Fig. 5 The convergence curve comparison for three algorithms

图5 是进行独立20次的最优情况下的收敛曲线, 分析可得, PSO及BA收敛速度较慢, 并且容易陷入局部最小值。融入混沌策略丰富了蝙蝠个体的行为, 并能够调高种群利用率, 使得算法能避免陷入局部最优值, 减少了无效迭代。另外, 自适应调整策略, 相对延长了算法探索和开发的过度过程, 能够在寻优前期调高算法全局搜索能力, 在后期提高算法的局部搜索能力。

5 结语

本文在分析了分布式电源特性的基础上, 结合传统无功补偿设备, 建立了含有分布式电源的有功网损最小和电压稳定裕度最大的无功优化数学模型。对于原始的蝙蝠算法, 引入混沌理论提高算法的初始种群利用率, 然后利用自适应调整策略对于控制参数进行调整, 能显著提高算法寻优的速度。

参考文献:

- [1] 万立勇, 谭兴, 肖辉, 等. 计及分布式电源的配电网无功潮流优化研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(8): 10-14.
Wan Liyong, Tan Xing, Xiao Hui, et al. Study on Distributed Power Distribution Network Optimization of Reactive Power Flow[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(8): 10-14.
- [2] 孙岩, 马大为, 魏辉. 计及DG的配电网网络重构研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(7): 58-62.
Sun Yan, Ma Dawei, Wei Hui. Research on Distribution Network Reconfiguration with DG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(7): 58-62.
- [3] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
Zhang Li, Xu Yuqin, Wang Zengping, et al. Reactive Power Optimization for Distribution System with Distributed Generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-173.
- [4] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 84-88.
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of Distributed Generation on Power System Voltage Stability[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 84-88.
- [5] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配电网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40-45.
Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Reactive Power Optimization in Distribution System with Wind Power Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 40-45.
- [6] 袁松贵, 吴敏, 彭赋, 等. 改进PSO算法用于电力系统无功优化的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 159-162.
Yuan Songgui, Wu Min, Peng Fu, et al. Reactive Power Optimization of Power System Using the Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 159-162.
- [7] 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, 5(31): 54-59.
Zhou Yong, Chen Jiajun, Jiang Fei, et al. Research on Optimized Distributed Generations Locating Based on Modified Firefly Algorithm[J]. Modern Electric Power, 2014, 5(31): 54-59.
- [8] 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, 23(2): 103-108.
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, 23(2): 103-108.
- [9] 肖辉辉, 段艳明. 基于DE算法改进的蝙蝠算法的研究及应用[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 32-38.
Xiao Huihui, Duan Yanming. Research and Application of Improved Bat Algorithm Based on DE Algorithm[J]. Computer Simulation, 2014, 31(1): 32-38.
- [10] 贺兴时, 丁文静, 杨新社. 基于模拟退火高斯扰动的蝙蝠优化算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 31(2): 1001-3695.
He Xingshi, Ding Wenjing, Yang Xinshe. Bat Algorithm Based on Simulated Annealing and Gaussian Perturbations[J]. Application Research of Computers, 2013, 31(2): 1001-3695.
- [11] 何禹清, 彭建春, 毛丽林, 等. 含多个风电机组的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 37-41.
He Yuqing, Peng Jianchun, Mao Lilin, et al. Reactive Power Optimization in Distribution System with Multiple Wind Power Generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 37-41.
- [12] 李枝勇, 马良, 张惠珍. 遗传变异蝙蝠算法在0-1背包问题上的应用[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(11): 49-52.
Li Zhiyong, Ma Liang, Zhang Huizhen. Genetic Mutation Bat Algorithm for 0-1 Knapsack Problem[J]. Computer Engineering Applications, 2014, 50(11): 49-52.

(责任编辑: 申剑)