

基于改进粒子群优化算法的电力系统无功电压综合控制

吴秀华, 朴在林, 徐静, 杨萍

(沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 在基本粒子群优化算法的基础上, 提出了一种改进的粒子群优化算法用于电力系统无功电压综合控制。该算法改进了随机初始化种群的方法, 采用均匀初始化, 引进了粒子的自身探索机制, 用多个位于可行域中的粒子个体引导粒子的更新, 以保证全局搜索的有效性, 同时采用混沌变异算子对陷入局部最优的粒子进行变异, 提高了算法的寻优性能。通过对 IEEE-30 节点标准系统模型的无功电压综合控制计算和分析, 证明了此改进的粒子群优化算法具有更高的全局寻优效率。

关键词: 粒子群优化算法 (PSO); 均匀初始化; 混沌变异; 无功电压综合控制

Reactive power and voltage control based on improved particle swarm optimization in power system

WU Xiu-hua, PIAO Zai-lin, XU Jing, YANG Ping

(Information and Electrical Engineering Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: An Improved Particle Swarm Optimization (IPSO) algorithm applied to the Reactive Power and Voltage Control of power system (RPVC) is proposed followed by the Basic Particle Swarm Optimization (BPSO). The algorithm changes the stochastic initialization with equality initialization and adopts a principle of particle searching by itself. Several particles in feasible solutions are used to lead swarm's motion and update. At the same time, the algorithm uses chaotic mutation factor to change positions of the particles which plunged in the local optimization. Simulation results of IEEE 30-bus power system show that the IPSO is more efficient than BPSO and some other optimization methods.

Key words: particle swarm optimization (PSO); equality initialization; chaotic mutation; RPVC

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0028-06

0 引言

无功电压综合控制 RPVC (Reactive Power and Voltage Control), 作为提高电能质量的重要途径在电力系统综合调控中占据着重要的地位, 目前在我国的各级电网中均安装了相当数量的无功补偿装置和不同调压方式的变压器等设备以确保供电质量和电网安全经济运行。但目前的实际情况并不是所有的无功和调压设备都发挥了应有的作用, 电网电压质量的提高和电能损耗的降低仍是亟待解决的一个问题。

无功电压综合控制是一个复杂的多变量、多约束的混合整数非线性优化问题, 对此问题的研究方法很多, 线性规划、非线性规划、二次规划、梯度法、牛顿法、内点法以及近年来发展起来的智能优化算法, 如遗传算法 (GA)、模糊控制、禁忌搜索 (TS)、模拟退火 (SA)、混沌方法等等, 大大改进了电力系统从前电压质量不稳、电能损耗大的状况。但随着电力系统用户对电网电压、电能质量的要求不断提

高, 现有方法还不能达到理想的调控效果, 所以运用更多的新的优化方法进行电力系统无功电压的综合优化控制还值得做深入而广泛的研究。

1 粒子群优化算法

1.1 基本粒子群优化算法 (BPSO)

粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 最初源于对鸟群捕食行为的研究, 是 1995 年由 Kennedy 博士和 Eberhart 博士^[1]提出的一种新的进化计算方法 (Evolutionary Computation), 也是一种群智能优化算法 (Swarm Intelligent Optimization)。十年多来, 此算法及其在相关领域的应用已引起各国学者的广泛关注, 被越来越多地应用于智能优化、模式识别、神经网络的训练等诸多领域。该算法采用位置-速度搜索模型, 优化问题的每个可能解都是 N 维搜索空间中的一只“鸟”, 算法中称之为“粒子”。每个粒子的优劣 (即解的优劣) 都由适应值 (Fitness Value) 决定, 每个粒子有一个速度决定它们飞行的方向和距离。粒子在搜索最优解的过程中通过跟踪两个最优解来调整自己当

前的速度和位置:一个是粒子个体所找到的最优解,称为个体最优解;一个是整个种群所找到的最优解,称为群体最优解。算法开始时,将系统初始化为一组随机粒子,在 M 维解空间中随机分布,通常用矢量 x_i 表示第 i 个粒子在 d 维($d=1, 2, \dots, N$)空间中的位置, $x_i=(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N})$, x_i 在 d 维空间中的速度值则表示为 $v_i=(v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,N})$,第 i 个粒子的个体最优解表示为矢量 $p_{besti}=(p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,N})$,群体最优解用矢量 $g_{best}=(g_{best,1}, g_{best,2}, \dots, g_{best,N})$ 表示,则第 t 次迭代后第 i 个粒子第 d 维状态的更新公式为:

$$v_{i,d}(t+1) = \omega v_{i,d}(t) + c_1 r_1(0,1)[p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + c_2 r_2(0,1)[g_{best,d}(t) - x_{i,d}(t)] \quad (1)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \quad (2)$$

式中: t 为迭代次数; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子(也称加速因子),分别表示两个最优解的权重; ω , c_1 和 c_2 均为非负常数。 $r_1(0,1)$ 和 $r_2(0,1)$ 为由两个相互独立的随机函数产生的 $[0, 1]$ 内的随机数; $v_{i,d}(t) \in [-v_{max}, v_{max}]$, $x_{i,d} \in [-x_{max}, x_{max}]$, v_{max} , x_{max} 为常数,一般根据问题的性质由用户设定。上述算法被称为基本粒子群优化算法(BPSO)。

粒子群优化算法与GA有相似之处,都源自对自然界生物行为的模拟,是一种基于迭代的多点随机搜索算法。但粒子群算法比GA的实现过程简单,没有复杂的交叉变异操作,控制变量少,收敛速度快,更易收敛于全局最优解。粒子群优化算法前期搜索速度很快,但在搜索的后期粒子不断向两个“最优值”靠近,粒子趋于同一,甚至停滞,使算法的搜索速度减慢,若此时只是系统的局优,则很难跳出,降低了算法最终的收敛精度。所以现在更多的学者致力于粒子群优化算法的改进应用,本文提出一种新的改进的粒子群优化算法(Improved PSO)并把它应用于电网的无功电压综合控制中。

1.2 改进的粒子群优化算法IPSO

1.2.1 初始化的改进

基本粒子群优化算法一般粒子种群的初始化均采用随机方法产生,文献[2]指出均匀设计的方法产生的点集所构成的初始群体比随机的初始群体更能从统计意义上反映出目标函数的特性。本文拟采用符合均匀分布的随机数来初始化粒子种群的位置,以使全局寻优效果更好。

1.2.2 粒子的自身探索机制和可行解保留策略

在BPSO算法中,粒子速度的更新仅受到两个

“最优值”,即粒子个体最优和群体最优的影响,粒子在迭代过程中,始终向这两个最优值靠近,很易趋于同一化,粒子的多样性迅速减少,若此时粒子不是收敛于全局最优解,而是一个局部最优,则系统很难跳出局优。在实际的生物界,某个个体的行为往往不仅受到自身历史经验和群体最好经验的影响,同时也会受到其他个体非最好经验的影响,尤其在学习行为的初期,往往广泛向其周围个体学习,即粒子的自身探索机制,最终经过本身的总结归纳找出真正的值得学习的群体最优。本文即采用抽取多个粒子个体共同指导粒子的运动的方式,增加粒子向其它非最优个体学习的范围,以便在更大的范围内搜索全局最优解,并且在进化的不同时期采用不同的权重平衡个体最优与群体最优的关系。进化过程的前期重在自身探索,后期以群体最优为主要引导因素。前者权重系数采用(4)式的自适应的线性递减惯性权重,随着迭代次数的增加而权重线性衰减,搜索尽可能大的区域,广泛地向其它粒子的“经验”学习,以利于寻找到全局最优解所在区域;后者权重系数采用(5)式的随机任意值,在全局最优区域内进行细致搜索,以提高后期的收敛速度和精度。同时,本文对指导粒子运动的群体最优和个体最优采用可行解保留策略^[3],即根据粒子适应值的高低,取适应值最优且各维变量均是问题的可行解的多个个体对粒子运动速度的更新产生影响,非可行解的粒子即使适应值最优也不参与粒子下一代速度的更新。速度更新公式为:

$$v_{i,d}(t+1) = \omega_0 v_{i,d}(t) + \omega_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{1i}(0,1)[P_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + \omega_2 r_2(0,1)[g_{best,d}(t) - x_{i,d}(t)] \quad (3)$$

$$\text{其中: } \omega_1 = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot t / t_{max} \quad (4)$$

$$\omega_2 = 0.5 + \text{Rand}(0,1) / 2.0 \dots \dots \quad (5)$$

$\omega_0 = 0.7298$ ^[4], $\text{Rand}(0,1)$ 是 $[0, 1]$ 上的随机数, n 是包含本粒子在内的多个可行解个体粒子的数目。

1.2.3 混沌变异

对经过上述改进仍可能陷入局部最优的粒子采用混沌变异方法来改变粒子的运动轨迹,使之跳出局优重新开始全局搜索。混沌优化算法即系统由某个初始状态开始按照自身的运动规律,经过足够长时间后,不重复地遍历相空间中的所有状态进行寻优的过程。混沌搜索具有遍历性、随机性、规律性和不重复性。把IPSO算法中连续若干代适应值保持不变且劣于群体最优值的粒子,运用Logistic方程 $x_{t+1} = ux_t(1-x_t)$ 产生混沌序列。因为 $u = [3.25, 4]$ ^[5]时系统处于完全混沌区域,所以参数 u 取4。

2 无功电压综合控制的数学模型

无功电压综合控制通常是采用调整有载调压变压器变比、无功补偿电容器容量和发电机端电压等控制变量降低有功网损,改善功率因数,保证电压在规定范围之内。本文采用有功网损最小为控制优化目标函数,以发电机无功出力 and 节点电压为状态变量,以有载调压变压器变比、无功补偿电容器容量和发电机端电压为控制变量,数学模型如下:

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_E} P_{\text{loss}k} = \sum_{\substack{i \in N_G \\ j \in N_l}} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

等式约束即潮流计算方程为:

$$P_i - V_i \sum_{j=1}^{N_l} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0, \quad (7)$$

$$i \in N_l, i \neq s$$

$$Q_i - V_i \sum_{j=1}^{N_l} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0, \quad (8)$$

$$i \in N_{PQ}$$

控制变量不等式约束:

$$V_{G_i, \min} \leq V_{G_i} \leq V_{G_i, \max}, i \in N_G \quad (9)$$

$$T_{k, \min} \leq T_k \leq T_{k, \max}, k \in N_T \quad (10)$$

$$Q_{C_i, \min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i, \max}, i \in N_C \quad (11)$$

状态变量不等式约束:

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max}, i \in N_B \quad (12)$$

$$Q_{G_i, \min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i, \max}, i \in N_G \quad (13)$$

其中: N_E 为支路号集合, N_l 为与节点 i 有联络的节点号集合(包括 i 本身), N_{PQ} 为 P - Q 节点号集合, N_B 为总的节点号集合, N_G 为发电机节点号集合, N_T 为变压器支路集合, N_C 为补偿电容器节点集合; s 为平衡节点; $P_{\text{loss}k}$ 为支路 k 的有功功率损耗; G_{ij} 为支路 ij 的电导; B_{ij} 为支路 ij 的电纳; P_i , Q_i 为节点 i 的注入有功、无功功率; V_i , V_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差; Q_{G_i} 为节点 i 的发电机无功功率; Q_{C_i} 为节点 i 的无功补偿容量。

等式约束用于潮流计算,控制变量的不等式约束在算法中即可满足,状态变量的不等式约束采用罚函数引入目标函数,如公式(14)所示。其中, λ_1 , λ_2 分别为节点电压和发电机无功功率越限的惩罚因子。

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_E} P_{\text{loss}k} = \sum_{\substack{i \in N_G \\ j \in N_l}} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) + \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{V_i - V_{i, \lim}}{V_{i, \max} - V_{i, \min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_G} \left(\frac{Q_{G_i} - Q_{G_i, \lim}}{Q_{G_i, \max} - Q_{G_i, \min}} \right)^2 \quad (14)$$

$V_{i, \lim}$, $Q_{G_i, \lim}$ 可表示为:

$$V_{i, \lim} = \begin{cases} V_{i, \max}, V_i > V_{i, \max} \\ V_{i, \min}, V_i < V_{i, \min} \\ V_i, \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

$$Q_{G_i, \lim} = \begin{cases} Q_{G_i, \max}, Q_{G_i} > Q_{G_i, \max} \\ Q_{G_i, \min}, Q_{G_i} < Q_{G_i, \min} \\ Q_{G_i}, \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

3 改进PSO用于无功电压综合控制

采用IPSO进行无功电压控制,粒子在搜索空间中的位置矢量 X 的各维变量对应于优化问题中的控制变量 V_{G_i} , T_k , Q_{C_i} , 每个粒子的搜索空间(维数)就是控制变量的总个数,即:

$$X_i = [V_{G_i1}, V_{G_i2}, \dots, V_{G_iN_G} | T_1, T_2, \dots, T_{N_T} |$$

$$Q_{C_i1}, Q_{C_i2}, \dots, Q_{C_iN_C}]^T$$

各参数意义同上文。

采用连续变量和离散变量混合的实数编码,求解步骤如下:

步骤1: 读入原始数据: 输入控制变量的维数 N 和上下限 $X_{i, \max} = [X_{i,1, \max}, X_{i,2, \max}, \dots]$, 设定状态变量 (V_i , Q_{G_i}) 的限值; 设置粒子的群体规模 $M=30$,

最大迭代次数 $t_{\max}=100$, 惯性权重的取值区间 $[0.4, 0.9]$; 速度限值根据文献[6]采用 $30\% X_{i, \max}$ 。

步骤2: 均匀初始化: 置迭代代数 $t=0$, 计数次数为零; 在控制矢量各维变量的取值区间 $[-X_{i, \max}, X_{i, \max}]$ 内按均匀分布函数分别取出30个变量, 组成30个初始矢量, 即30个初始粒子。各粒子的初始速度设为零; 惩罚因子 $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = 5^{[7]}$; 运用(14)式计算各粒子的适应值, 并按适应值由低到高排序, 最小适应值的粒子为此时的群体最优粒子, 再找出除本身粒子外的 $n=4$ 个^[8]最优粒子, 作为本粒子的学习对象, 每个粒子当前位置为其个体最优值。

步骤3: 更新速度和位置: 按公式(4)、(5)计算 ω_1 、 ω_2 , 再按照公式(3)和(2)计算各粒子更新后的速度和位置, 判断粒子位置是否越限,

若某一变量越限,按(15)、(16)式取值。

步骤4: 计算适应值判断可行解: 运用(14)式计算各粒子的适应值,并验证是否是问题的可行解,是可行解的粒子按适应值由小到大排序,分类记录迭代结果。

步骤5: 更新最优值: 若粒子是问题的可行解且适应值优于历史群体最优值,则更新群体最优值;取历次迭代中除本粒子外的是问题可行解的前4个最好粒子替代历史其余粒子的最好解进行速度更新,本粒子的个体最优解的选取同BPSO,不验证其可行性。

步骤6: 混沌变异: 若粒子相邻三代适应值无变化或变化率小于某一极小值,且此粒子的适应值不是群体最优值,则判定此粒子陷入局优,按照Logistic方程对每维变量进行变异。

步骤7: 判断终止条件: 若达到最大迭代次数或群体最优值小于某一值,停止优化,输出结果,否则迭代次数加1,计数次数加1,重复执行步骤3-7。

4 算例仿真分析

运用Matlab7.0在PIV 2.4G计算机上对IEEE-30节点系统作无功电压的综合控制仿真。该系统中有41条支路、6个发电机节点和22个负荷节点。6个发电机节点为1、2、5、8、11、13,节点1作为平衡节点,其余5个为PV节点。系统中其它节点为PQ节点;可调变压器支路为6~9、6~10、4~12、27~28;并联电容器节点为3、10、24。基准值取视在功率100 MVA,发电机的机端电压和变压器的变比均取为

1.0,计算值均为标么值(pu)。系统总的负荷 $P_{load}=2.834$ pu, $Q_{load}=1.262$ pu。系统参数参考文献[9],各变量的上下限值如表1~3所示;潮流计算采用Matlab7.0运行环境下Newton-Raphson方法。

表1 发电机电压和无功出力限值

Tab.1 Limits of voltage and reactive power of generators

节点号	$V_{i,max}/pu$	$V_{i,min}/pu$	$Q_{i,max}/pu$	$Q_{i,min}/pu$
1	1.1	0.9	0.596	-0.298
2	1.1	0.9	0.480	-0.240
5	1.1	0.9	0.600	-0.300
8	1.1	0.9	0.530	-0.265
11	1.1	0.9	0.150	-0.075
13	1.1	0.9	0.155	-0.078

表2 PQ节点电压和变压器变比限值

Tab.2 Voltage limits of PQ nodes and ratio limits of transformer taps

$V_{load,max}/pu$	$V_{load,min}/pu$	$T_{k,max}/pu$	$T_{k,min}/pu$
1.05	0.95	1.05	0.95

表3 无功补偿电容器容量和电压限值

Tab.3 Limits of capacity and voltage of reactive power sources

$Q_{c,max}/pu$	$Q_{c,min}/pu$	$V_{c,max}/pu$	$V_{c,min}/pu$
0.36	-0.12	1.05	0.95

运用IPSO算法对此系统进行仿真计算,并与几种常见的智能优化方法计算数据^[10]比较,结果见表4、表5所示,计算结果均是运行30次后取的平均值。

由计算结果数据可以看出,改进算法使系统的潮流分布更合理了,优化前有三个节点电压越限,

表4 潮流计算结果比较

Tab.4 Comparison of the results of power flow

项 目	$\Sigma P_i/pu$	$\Sigma Q_i/pu$	P_{loss}/pu	越限节点电压			无功越限容量
				V_{26}	V_{29}	V_{30}	Q_b
初始计算结果	2.904 9	0.969 5	0.059 879	0.932	0.94	0.928	0.569 0
IPSO计算结果	2.883 1	0.818 6	0.048 899	0.967	0.961	0.958	0.412 9

表5 与几种智能优化方法比较

Tab.5 Comparison of the intelligent algorithms

优化方法	$\Sigma P_i/pu$	$\Sigma Q_i/pu$	P_{loss}/pu	Q_{loss}/pu	P_{save}/pu	$\eta_{save}/\%$
Broyden	2.889 86	0.938 96	0.055 860	-0.323 04	0.004 02	6.71
IPM	2.826 49	0.481 67	0.049 951	-0.151 40	0.009 93	16.58
SGA	2.883 80	1.027 74	0.049 800	-0.234 26	0.010 08	16.84
AGA	2.883 26	0.660 49	0.049 260	-0.601 51	0.010 62	17.74
EP	2.883 62	0.873 46	0.049 630	-0.385 27	0.010 25	17.12
BPSO	2.883 30	0.825 00	0.049 262	-0.229 20	0.010 62	17.62
IPSO	2.883 12	0.818 67	0.048 899	-0.227 21	0.010 98	18.33

注: SGA: 标准遗传算法; AGA: 自适应遗传算法; EP: 进化算法; Broyden: 非线性规划; IPM: 内点法; BPSO: 基本粒子群优化

一个发电机无功越限,优化后各节点电压和发电机无功均没有越限,有功功率损耗有所下降,比非线性规划、内点法、遗传算法、进化算法和基本粒子群优化方法有更高的网损降低率,充分显示了本改进方法的有效性。图1显示了IPM,SGA,BPSO和IPSO四种优化方法网损-迭代代数曲线。从图中可以看出,IPSO方法初始下降速度很快,几乎与连续优化中以速度快见长的内点法相当,这是线性权重初期取值大形成的,使得算法的收敛速度加快,中期虽然权重逐渐减小,但可行最优解的引导也使收敛过程迅速向全局最优解靠近,所以算法在30次左右即趋于收敛,且收敛精度要好于其它方法。计算统计也表明,本改进方法的总体计算时间(运行30次)平均值在50 s以内,要好于BPSO的60.12 s和SGA的119.79 s^[10],内点法^[26]由于采用的是目标函数的梯度下降原则,所以初期迭代速度更快些,但内点法不适于处理离散变量,且最终的收敛精度略逊于IPSO。优化后各控制变量的值如表6所示。

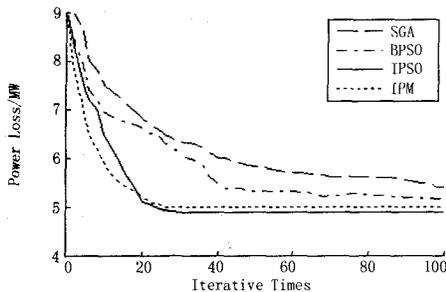


图1 IPM、SGA、BPSO、IPSO优化过程曲线
Fig.1 Optimizing curves of IPM,SGA,BPSO and IPSO algorithms

表6 控制变量优化值比较

Tab.6 Comparison of optimized values of control variables

控制变量	节点号	SGA	BPSO	IPSO
V_1	1	1.075 1	1.072 5	1.079 0
V_2	2	1.064 6	1.063 3	1.070 1
V_5	5	1.042 2	1.041 0	1.049 2
V_8	8	1.045 4	1.041 0	1.049 0
V_{13}	11	1.033 7	1.064 8	1.066 3
V_{13}	13	1.054 8	1.059 7	1.060 5
T_1	6-9	0.94	1.03	1.04
T_2	6-10	1.04	0.95	0.97
T_3	4-12	1.04	0.99	1.02
T_4	28-27	1.02	0.97	0.98
Q_3	3	0.00	0.00	0.10
Q_{10}	10	0.37	0.16	0.22
Q_{24}	24	0.06	0.12	0.20

5 结论

本文提出了一种改进的粒子群优化算法,采用符合均匀分布规律的粒子作为初始粒子种群,为确保更好地在全局范围搜索,在粒子速度和位置更新时不仅仅考虑粒子的个体最优和群体最优两个极值,而是提出了粒子自身的探索机制,在进化初期更多地向周围的多个粒子的运动经验学习,以保证在全局范围内搜索,避免陷入早熟;后期则更多地以群体最优来指导粒子的运动更新。同时,只有位于问题可行域中的可行解粒子才可以指导粒子的运动和更新,缩短寻优时间,加快收敛速度。对于仍可能陷入局优的粒子采用混沌变异的方法产生新的个体,保证寻优过程中的粒子的多样性。经过IEEE-30节点系统的计算分析,此改进PSO方法具有优越的计算效率和良好的收敛性,非常适用于求解电力系统无功电压的综合控制问题,具有较强的实用价值。

参考文献

- [1] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm optimization[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia):1995.1942-1948.
- [2] 高飞,童恒庆.基于改进粒子群优化算法的混沌系统参数估计方法[J].物理学报,2006,55(2):577-582.
GAO Fei, TONG Heng-qing. Parameter Estimation for Chaotic System Based on Particle Swarm Optimization[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(2): 577-582.
- [3] 杨波,赵遵廉,等.一种求解最优潮流问题的改进粒子群优化算法[J].电网技术,2006,30(11):6-10.
YANG Bo, ZHAO Zun-lian, et al. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Power Flow Problem[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 6-10.
- [4] 赵波,曹一家.电力系统机组组合问题的改进粒子群优化算法[J].电网技术,2004,28(21):6-10.
ZHAO Bo, CAO Yi-jia. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Power System Unit Commitment[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 6-10.
- [5] 刘自发,葛少云,等.基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J].电力系统自动化,2005,29(4):53-57.
LIU Zi-fa, GE Shao-yun, et al. Optimal Reactive Power Dispatch Using Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 53-57.
- [6] EL-Gallad A, EL-Hawary M, Sallam A, et al. Enhancing the Particle Swarm Optimizer via Proper Parameters Selection[A]. In: Proceedings of IEEE Canadian

- Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. Canada:2002. 792- 797.
- [7] Kenji Iba. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm[J].IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(2): 685-692.
- [8] 赵波,郭创新等.基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J].中国电机工程学报,2005, 25(21):1-7.
ZHAO Bo, GUO Chuang-xin, et al. Distributed Cooperative Particle Swarm Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization[J].Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21):1-7.
- [9] 张伯明, 陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Analyzis on Advanced Power Network[M].Beijing: Qinghua University Press,2004.
- [10] 赵波,曹一家.电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J].中国电机工程学报,2005,25(5):1-7.
ZHAO Bo, CAO Yi-jia.A Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(5):1-7.
- [11] 周晖,周任军.用于无功电压综合控制的改进粒子群优化算法[J].电网技术,2004, 28 (13) :45-49.
ZHOU Hui, ZHOU Ren-jun. Application of Improved Particle Swarm Optimization to Integrated Control of Voltage and Reactive Power[J].Power System Technology, 2004, 28 (13) :45-49.
- [12] 丁玉凤,文劲宇.基于改进PSO算法的电力系统无功优化研究[J].继电器,2005,33(6):20-24.
DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO Algorithm of Reactive Power Optimization in Power System[J]. Relay, 2005,33 (6) : 20-24.
- [13] Clerc M, Kennedy J. The Particle Swam Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space[J].IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002; 6(1): 58-73.
- [14] SHI Y,Eberhart R.Parameter Selection in Particle Swarm Optimization[A]. In:Proc of the 7th Annual Conf on Evolutionary Programming[C].Washington D C:1998. 591-600.
- [15] SHI Y, Eberhart R.Empirical Study of Particle Swarm Optimization[A] . In: Proc of the Congress on Evolutionary Computation[C].Washington D C:1999. 1945-1950.
- [16] 胡建秀,曾建潮.具有随机惯性权重的PSO算法[J].计算机仿真,2006,23(8):164-166.
HU Jian-xiu , CENG Jian-chao. A Particle Swarm Optimization Model with Stochastic Inertia Weight[J]. Computer Simulation, 2006,23(8):164-166.
- [17] 吴强,滕欢.改进PSO算法在无功优化中的应用[J].湖北电力,2006,30(2):1-3.
WU Qiang, TENG Huan. Application of Modified PSO Algorithm in the Optimization of Reactive Power[J]. Hubei Electric Power, 2006,30(2):1-3.
- [18] 张选平,杜玉平,等.一种动态改变惯性权的自适应粒子群算法[J].西安交通大学学报,2005, 39(10):1039-1042.
ZHANG Xuan-ping,DU Yu-ping,et al. Adaptive Particle Swarm Algorithm with Dynamically Changing Inertia Weight[J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2005, 39(10):1039-1042.
- [19] 张江维,王翠茹,等.基于改进粒子群算法的电力系统无功优化[J].中国电力,2006,39(2):14-18.
ZHANG Jiang-wei, WANG Cui-ru,et al.Reactive Power Optimization of Power System Based on Modified Particle Swarm Optimization Algorithm[J].Electric Power, 2006,39(2):14-18.
- [20] 侯云鹤,鲁丽娟,等.改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(7): 95-100.
HOU Yun-he, LU Li-juan,et al. Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application on Economic Dispatch of Power Systems[J].Proceedings of CSEE,2004, 24(7) :95-100.
- [21] 金义雄,程浩忠,等.改进粒子群算法及其在输电网规划中的应用[J].中国电机工程学报,2005,25(4):46-50.
JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong,et al. Improved Particle Swarm Optimization Method and Its Application in Power Transission Network Planning[J].Proceedings of CSEE,2005, 25(4):46-50.
- [22] 杜欢,赵波.邻域拓扑粒子群优化算法在电力系统无功优化中的应用[J].继电器,2006,34(14):20-23.
DU Huan,ZHAO Bo. Application of Neighbourhood Topology Based PSO to Reactive Power Optimization[J].Relay, 2006, 34(14):20-23.
- [23] 陈海焱,等.基于改进粒子群优化算法的输电系统多阶段协调规划[J].继电器,2005,33(23):36-40.
CHEN Hai-yan,et al. Particle Swarm Optimization for Transmission Systems Multi-stage and Coordinated Planning[J]. Relay, 2005,33(23):36-40.
- [24] 彭磊,张建平等.基于 GA、PSO 结合算法的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术,2006, 32(4):78-81.
PENG Lei, ZHANG Jian-ping,et al. Reactive Power Optimization of Hybrid AC / HVDC Power System Based on Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4):78-81.

算法的配电网网架优化规划方法是可行和有效的。

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
GUO Yong-ji . The Theory and Application of Reliability in Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986 .
- [2] Miranda V, Ranito J V, Proenca L M. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(4): 1927-1933.
- [3] 张宪, 苑津莎, 杨薛明, 等. 基于粒子群算法的配电网网架规划[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33 (3): 14-17.
ZHANG Xian, YUAN Jin-sha, YANG Xue-ming, et al. Distribution Network Planning Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33 (3) :14-17.
- [4] WEN Fu-shuan, Chang C S. Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search Method[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 42(2): 153-163.
- [5] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22: 32-38.
LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, Qian Ji-xin. An Optimizing Method Based on Autonomous Animals: Fish-swarm Algorithm [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22: 32-38.
- [6] 李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8 (1): 1-6.
LI Xiao-lei, Qian Ji-xin. Studies on Artificial Fish-swarm Optimization Algorithm Based on Decomposition and Coordination Techniques[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(1): 1-6.
- [7] Aleksandra B D. Elite Genetic Algorithms with Adaptive Mutations for Solving Continuous Optimization Problems: Application to Modeling of the Optical Constants of Solids[J]. Optics Communications, 1998, 151: 147-159.
- [8] 陈华根, 李丽华, 许惠平, 等. 改进的非常快速模拟退火算法[J]. 同济大学学报, 2006, 34 (8): 1121-1125.
CHEN Hua-gen, LI Li-hua, HU Hui-ping, et al. Modified Very Fast Simulated Annealing Algorithm[J]. Journal of Tongji University, 2006, 34 (8): 1121-1125.
- [9] 张梅凤, 邵诚, 甘勇, 等. 基于变异算子与模拟退火混合的人工鱼群优化算法[J]. 电子学报, 2006, (8): 1381-1385.
ZHANG Mei-feng, SHAO Cheng, GAN Yong, et al. Hybrid Artificial Fish Swarm Optimization Algorithm Based on Mutation Operator and Simulated Annealing[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, (8): 1381-1385.
- [10] 周玲, 王兴念, 丁晓群, 等. 基因禁忌组合算法在配电网网架优化规划中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23 (9): 35-42.
ZHANG Ling, WANG Xing-nian, DING Xiao-qun, et al. Application of Genetic Algorithm/Tabu Search Combination Algorithm in Distribution Network Structure Planning[J]. Power System Technology, 1999, 23 (9) : 35-42.

收稿日期: 2007-05-09; 修回日期: 2007-07-05

作者简介:

程晓荣 (1963-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力线通信和计算机网络的研究与教学工作;

张秋亮 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机网络; E-mail: wisdom306@163.com

王智慧 (1980-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图形图像处理与网络安全。

(上接第 33 页 continued from page 33)

- [25] YANG Ya-hong, ZHAO Fu-qing, YAO Yun-ping, et al. A PSO and Simulated Annealing Hybrid algorithm to Task Allocation Problem for Harmonic Manufacturing system[A]. In: Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation[C]. Dalian(China) :2006.67- 71.
- [26] 许诺, 黄民翔. 原对偶内点法与定界法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(3): 26-30.
XU Nuo, HUANG Min-xiang. Application of Primal-dual Interior Point Method and Branch-bound Method Inreactive Power Optimization[J]. Proceedings of the

EPSCA, 2000, 12(3): 26-30.

收稿日期: 2007-03-27; 修回日期: 2007-05-22

作者简介:

吴秀华 (1970-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化节能控制, 多媒体仿真技术的应用; E-mail: wuxih70@126.com

朴在林 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力网络规划及其自动化、电网节能控制等。