

改进遗传算法在电力系统无功优化中的应用

段金长

(国网南京自动化研究院,南京 210003)

Applications of the Modified Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization in Power System

DUAN Jin-chang

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

ABSTRACT: Reactive power optimization in power system can not only reduce power loss, but also improve voltage quality. So it is of great importance to security and economic operation of power system. Reactive optimization of power systems is a mixed optimizing question, which its operating variables include the continual and the separate, its solved process is quite complex, it is one component part of the optimal power flow problem. The paper discussed the modern artificial intelligent algorithms of reactive power optimization, summarized and analyzed the characteristics and usage situation of genetic algorithms. For improving the quality of the solutions and the calculation efficiency, the paper improved genetic algorithms, and applied to solve the reactive power optimization in power system.

KEY WORDS: power system; reactive power optimization; modified genetic algorithm

摘要: 电力系统的无功优化控制,不仅能有效地降低系统的有功功率损耗,而且还可以改善电网的电压质量,对系统的安全稳定、经济运行具有非常重要意义。无功优化问题是一个含有连续变量和离散变量的混合优化问题,求解过程相当复杂,电力系统无功优化问题属于最优潮流问题的一个组成部分。探讨了求解无功优化的现代人工智能算法,总结了遗传算法的特点及使用情况。为提高解的质量与计算效率,对遗传算法做了改进,并将其应用于电力系统无功优化中。

关键词: 电力系统;无功优化;改进遗传算法

0 引言

随着科学技术的进步和经济的不断发展,电力

系统不断向超高压、长距离、大容量方向发展。现代电网规模庞大、结构复杂、电压等级高,在运行中一旦发生事故,会给国民生产带来严重的损失。因此,电力系统的经济安全运行日益受到重视。降低网络损耗、提高供电质量、保证系统安全、提高经济效益已成为电力部门面临的实际问题,也是电力系统研究的主要课题之一。

电压是衡量电能质量的重要指标之一,电压质量对电力系统稳定运行、降低网络损耗、保证工业和农业生产安全、提高产品质量等都有直接影响。无功功率的平衡与合理分布是影响电压质量与系统经济性的重要因素。无功优化的目的就是保证系统无功功率平衡、控制系统电压和降低线损,是解决电力系统安全经济运行问题的重要手段之一^[1]。正是由于无功优化在电力系统运行中的重要作用,它一直得到电力工作者的高度重视,成为电力系统研究领域中的热点。

无功优化问题是一个含有连续变量和离散变量的混合优化问题,求解过程相当复杂。传统的非线性规划、线性规划、混合整数等优化算法依赖于精确的数学模型,一般要求所处理问题的目标函数连续、可导。算法所求最终解和选取的初始值密切相关,只有初始点离全局最优点较近时,才可能达到真正的最优。此外,不能实现对离散变量的精确处理,因而用于含有离散变量的无功优化问题时,其结果会有较大误差^[2]。为克服这些缺点,研究人员逐渐把人工智能方法运用于无功优化这一领域。在全面掌握当前电力系统无功优化研究进展的基础上,本文系统探讨了求解无功优化的经典算法和现

代人工智能算法,分析了它们各自的特点及使用情况。为提高解的质量与计算效率,本文对无功优化的数学模型、求解算法进行了较为深入研究,进而运用改进遗传算法对电力系统无功优化模型进行求解。

1 电力系统无功优化

1.1 电力系统的无功电压控制

系统无功电源不足,则会使电网处于低电压水平上的无功功率平衡,即依靠降低电压、减少负荷吸收的无功功率来弥补无功电源的不足。同样,如果由于电网缺乏调节手段使某段时间无功功率过剩,也会造成整个电网的运行电压过高。常用的实现无功控制手段有以下3种^[3]:

(1) 改变发电机机端电压;(2) 改变可调变压器分接头位置;(3) 投切无功补偿装置。

1.2 无功优化的数学模型

电力系统无功优化问题属于最优潮流问题的一个组成部分。最优潮流的数学模型可描述为:在系统的结构参数及负荷给定的情况下,通过控制变量的优选,找到能满足所有指定的约束条件,并使系统的某一性能指标或目标函数达到最优时的潮流分布。采用不同的目标函数并选择不同的控制变量,再和对应的约束条件相结合,就可以构成不同应用目的最优潮流问题。本文考虑在电力系统稳态运行中,无功功率的变化主要受母线电压幅值变化的影响下,电压无功最优潮流问题的数学模型。调控措施是通过采用合理的调节方案,改变变压器分接头档位、无功补偿设备的补偿容量以及发电机机端电压,调整无功潮流的分布,以此来降低系统的有功损耗并保证电压、发电机无功出力在规定的范围内,从而提高系统运行的经济性和安全性。

1.2.1 无功优化数学模型的约束方程

控制变量:

$$X=(V_{ck}, T_i, C_j) \quad (1)$$

状态变量:

$$U=(V_i, Q_G) \quad (2)$$

其中, V_{ck} 为可调发电机节点电压幅值; T_i 为可调变压器可调分接头档位; C_j 为无功补偿电容器投切组数; V_i 为 PQ 节点的电压; Q_G 为发电机的无功出力。

(1) 功率约束方程。

系统每一节点的注入有功功率和无功功率满足式(3)的等式约束方程:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_i, Q_i, V_i 分别为节点 i 处注入的有功、无功和电压; $G_{ij}, B_{ij}, \delta_{ij}$ 分别为 i, j 之间的电导、电纳和相角差; N_B 为节点总数。

系统有功功率损耗为:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_B} U_i \sum_{j \in h} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

式中, h 为与节点 j 相连的所有节点的集合。

(2) 变量约束条件。

控制变量的不等式约束:

$$\begin{cases} T_{imin} < T_i < T_{imax} & i \in N_T \\ C_{jmin} < C_j < C_{jmax} & j \in N_C \\ V_{Gkmin} < V_{Gk} < V_{Gkmax} & k \in N_G \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_{imin}, T_{imax} 为可调变压器分接头档位的上、下限; C_{jmin}, C_{jmax} 为补偿电容投切组数的上、下限; V_{Gkmin}, V_{Gkmax} 为可调发电机端电压的上、下限; N_T 为所有变压器的支路集合; N_C 为所有无功补偿节点集合; N_G 为所有可调发电机节点的集合。

状态变量的不等式约束:

$$\begin{cases} V_{imin} < V_i < V_{imax} & i \in N_{PQ} \\ Q_{Gjmin} < Q_{Gj} < Q_{Gjmax} & j \in (N_{PV}, m) \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_{imin}, V_{imax} 为 PQ 节点电压的上、下限; Q_{Gjmin}, Q_{Gjmax} 为发电机无功出力的上、下限; N_{PQ} 为 PQ 节点集合; N_{PV} 为 PV 发电机节点集合; m 为平衡节点。

1.2.2 无功优化的目标函数

电力系统无功优化的目标函数是多种多样的,一般来说,包括技术性能指标和经济指标2个方面,因优化侧重点不一样而存在差别,可以是:

(1) 电网有功功率损耗最小;(2) 电网无功补偿容量最小或变压器分接头、电容器投切次数最少;(3) 保证电压质量最优、稳定性最好、使电压与额定电压值相差最小;(4) 无功补偿装置投资成本最少;(5) 综合经济效益最佳等。

建立理想的目标函数在优化过程中有重要作用。由于在遗传算法中,待优化变量的取值是在其规定的定义域内,因此采用遗传算法进行无功优化运算时,其控制变量的约束条件,即公式(5)将自动得

到满足;同时,通过潮流方程求解适应度函数保证了潮流约束方程式(3)也能得到满足,所以,在基于遗传算法的无功优化中,只需要考虑状态变量的不等式约束条件,即公式(6),本文对状态变量的约束条件采用罚函数的方式进行处理,构造适合于遗传算法的无功优化目标函数如下:

$$F_{\min} = P_L + \lambda_V F_V + \lambda_Q F_Q \quad (7)$$

式中, P_L 为式(4)所表示的系统有功功率损耗, F_V 为状态变量节点电压的越限罚函数。

$$F_V = \sum \left(\frac{V_i - V_{\lim}}{V_{\max} - V_{\min}} \right)^2 \quad (8)$$

V_{\lim} 为状态变量 V_i 的上限或者下限。

$$V_{\lim} = \begin{cases} V_{\max} & V_i > V_{\max} \\ V_i & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ V_{\min} & V_i < V_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

F_Q 是发电机输出的无功功率 Q_G 的越限罚函数。

$$F_Q = \sum \left(\frac{Q_G - Q_{G\lim}}{Q_{G\max} - Q_{G\min}} \right)^2 \quad (10)$$

式中, $Q_{G\lim}$ 为变量 Q_G 的上限或者下限。

$$Q_{G\lim} = \begin{cases} Q_{G\max} & Q_G > Q_{G\max} \\ Q_G & Q_{G\min} \leq Q_G \leq Q_{G\max} \\ Q_{G\min} & Q_G < Q_{G\min} \end{cases} \quad (11)$$

1.2.3 罚因子

在目标函数中,惩罚项前的系数(λ_V 和 λ_Q)称为罚因子。用遗传算法求解无功优化问题时,选择一个有助于算法收敛及提高求解速度的罚因子非常关键。目前常用的罚因子有3种取值方式,分别是定值、线性动态取值及按指数规律动态取值。在传统的优化方法中,罚因子都取定值。

2 遗传算法在无功优化应用中的改进

近些年来,遗传算法用于无功优化已成为电力工作者研究的热点之一,并已取得了许多显著成果。遗传算法的无功优化可理解为:在电力系统环境下,一组受到各种约束条件约束的初始潮流,通过目标函数来评价它们的优劣,评价价值低的被淘汰,评价价值高的有机会将其特征遗传至下一代,最后趋向于优化。简单遗传算法在解决无功优化问题时,首先随机产生一组初始潮流解,然后对其编码,通过选择、杂交和变异等操作,使其重新组合,最后这串码对应的解将趋向最优。简单遗传算法原理如图1所示^[4]。

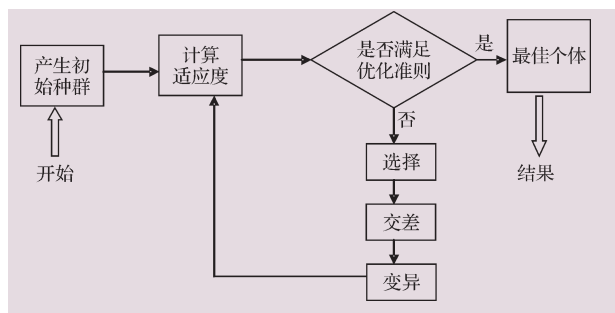


图1 简单遗传算法流程

简单遗传算法在实际应用过程中存在收敛速度慢,易早熟等缺陷,故相继有许多改进遗传算法被提出并用于求解无功优化问题。本文在深入研究简单遗传算法的基础上,结合电力系统电压无功优化的实际特点,从初始种群的产生、控制变量的编码方案、选择、交叉、变异3个遗传算子及收敛判据等方面对简单遗传算法进行改进。

2.1 初始种群

对于初始种群的获取,简单遗传算法是利用随机数随机产生的,考虑到当前电网实时潮流已是近似最优个体,所以选取电网实时潮流作为潮流初始种群,可以极大地提高遗传算法的效率。

2.2 混合编码方式

依据控制变量连续离散兼有的特点,引入混合编码的方式:用整数表示变压器分接头档位和无功补偿装置投入的组数;用实数表示发电机机端电压的实际值。2类取值均在其规定的变化范围之内。

由上述分析,所有控制变量的编码可表示如下:
 $X = [C|T|V_G] = [C_1, C_2, \dots, C_i|T_1, T_2, \dots, T_j|V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{Gk}]$ (12)
 式中, C_i , T_j 分别表示电容器的投切组数、变压器分接头档位; V_{Gk} 表示发电机机端电压实际值; i, j, k 相应为无功补偿节点数、可调变压器数和发电机节点数。

引入整数和实数混合编码方式,使得编码串的长度和控制变量的个数一致。此编码方式与单一的二进制编码和单一实数编码相比,克服了二进制编码在处理连续变量离散化问题时的误差,以及解的精度依赖于编码串的长短缺点;保留了单一实数编码求解精度高、便于较大空间搜索的优点;更精确地反映了无功优化控制变量的特点,提高了遗传算法在无功优化应用中的针对性、实用性。

2.3 选择操作

简单遗传算法的选择操作常采用单一的轮盘

赌、锦标赛等方式。本文在初始种群的选择上已经做了很大改进,遗传算法产生的个体都在最优值附近,对选择操作不必进行很大的改动。进化后期采用基于赌轮盘的非线性排名选择方法。排名选择是根据个体适应度值的大小进行降序排列,按排列的次序分配选择概率。各个体的相对适应度:

$$sp_i = f_i / \sum_{i=1}^m f_i \quad (13)$$

其中, m 为个体的总数目; f_i 是各个体的适应度,即适应度函数值。对个体按照相对适应度进行排序,取所有个体中相对适应度最大值 q ,生成各个体非线性选择的概率:

$$q_i = q / [1 - (1 - q)^m] \times (1 - q)^i \quad (14)$$

式中, i 是个体的排序序号。

2.4 交叉算子

影响交叉算子产生新个体的主要因素包括交叉方式和交叉率,从群体进化过程来看,交叉率应该是一个逐渐变小最后趋于稳定的数,交叉率对计算结果和迭代次数的影响都比较大。如果 p_c 较大,可增强遗传算法开辟新的搜索区域的能力,但是,在很大程度上,这也可能导致高适应度值个体的某些基因遭到破坏,产生较大的代沟,从而使搜索走向随机化;若 p_c 太小,就会使较多的个体直接复制到下一代,使遗传算法陷入迟钝状态。简单遗传算法固定不变的交叉率不能很好的体现进化的特点。因此本文采用一种与进化代数相关的兼顾全局搜索能力和计算效率的变交叉率算法:

$$\begin{cases} p_c = p_{c0} - p_{cstep} \times t \\ p_c = p_{cmin} \end{cases} \quad p_c < p_{cmin} \quad (15)$$

式中, p_c 为交叉初始概率; p_{cstep} 为交叉率减小的步长; t 是遗传进化代数; p_{cmin} 是预先设定的最小交叉率。

2.5 变异算子

变异是针对适应函数值较小的个体或整体素质趋于一致时的个体而言的,对维持种群的多样性和抑制早熟起到重要作用。同交叉率,变异率的大小对变异操作很重要。为防止适应度值大的个体变异,一般而言,变异率取值过大将会使群体中原本有希望趋向最优的个体未被保留下来就破坏掉了,增大了进化的随机性,不容易得到稳定解;变异概率过小则会减弱算法产生新个体、抑制早熟的能力,容易陷入局部最优。

本文采用逐步增加的而不能超过预先设定的最

大变异率算法。

$$\begin{cases} p_m = p_{m0} + p_{mstep} \times t \\ p_m = p_{max} \end{cases} \quad p_m > p_{max} \quad (16)$$

式中, p_{m0} 是变异率初始值; p_{mstep} 是变异率步进量; t 是遗传进化代数; p_{max} 是预先设定的最大变异率。

控制变量的实际操作是在原有基础上逐档调节,因此变异操作应尽可能使变量编码在当前取值的较小范围内变化。依据这点,本文采用小变异方法,首先由变异概率随机产生变异个体,然后确定变异个体的变异点,同交叉点的选择,最后生成变异量 p_i 。

$$p_i = (X_{imax} - X_{imin}) \times R_{rand}, \quad R_{rand} < p_m \quad (17)$$

其中, p_i 是变异量; X_{imax} , X_{imin} 是变量的上下限; R_{rand} 是小于变异概率的随机数。同交叉操作一样,根据变异点处变量类型进行对应的整型和实型的变异操作。

整型变量的变异:

$$X_i = \text{round}(X_i + p_i) \quad (18)$$

实型变量的变异:

$$X_i = X_i + p_i \quad (19)$$

变异后如果个体 X_i 的某个变量值超出其上下限,则变量值等于其上下限。

基于改进遗传算法无功优化流程图如图2所示。

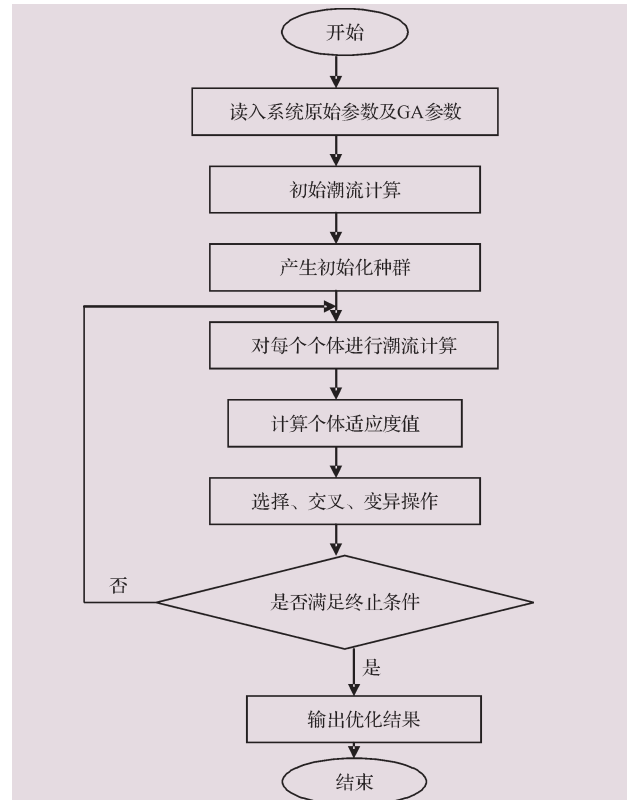


图2 基于改进遗传算法无功优化流程

2.6 收敛判据

终止进化准则也是遗传方法中需要研究的关键技术。若仅以遗传代数作为终止进化准则,那么当最优解出现于最大遗传代数之前时,若程序不能尽快从迭代过程中跳出,则会浪费计算时间。本文针对这种情况采用了最大遗传代数脚与最优个体的适应度值连续保持不变的最小保留代数 n 相结合的终止迭代准则,在最大遗传代数限定范围内来搜索最优解,并确定最优个体经过后面的多次迭代后仍为最优,则退出进化,否则继续搜索,直到满足最优个体最小保留代数为止。如果在最大遗传代数 m 限定范围内没有满足最优个体最小保留代数的解,则输出当前得到的最优解。2种判断准则的结合避免了单因素控制准则的缺陷。

3 实例分析

3.1 IEEE 14节点测试系统无功优化的控制变量和状态变量参数

IEEE 14节点标准测试系统包含5台发电机、3台可调变压器和1个无功补偿节点。取节点1为平衡节点,节点2,3,6,8为PV节点,节点4,5,7,9,10,11,12,13,14为PQ节点;节点9为无功补偿设备安装地点;支路4-7,4-9,5-6为可调变压器支路。IEEE 14节点标准测试系统接线图如图3所示,该系统的节点参数和支路参数见表1~2。发电机机端电压的上下限分别为1.10,0.95(标么值,下同);有载调压变压器变比的上下限为0.91,1.10,假设其有16个分接头,即调节步长为1.25%;无功补偿装置其上限为0.50电纳,步长为0.1。由控制变量 X 编码推导出对应的机端电压、变压器变比、补偿的电纳分别为:

$$X_1=[V_{G1}, V_{G2}, V_{G3}, V_{G6}, V_{G8}, K_{4-7}, K_{4-9}, K_{5-6}, B_9]$$

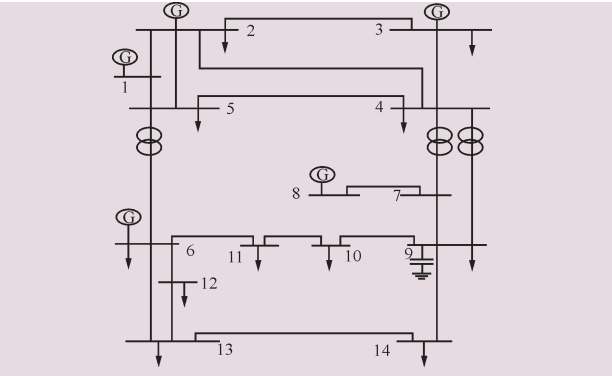


图3 IEEE 14节点系统接线图

表1 IEEE 14节点参数(标么值)

节点编号	有功负荷	无功负荷	节点编号	有功负荷	无功负荷
1	0.0	0.0	8	0.0	0.0
2	21.7	12.7	9	29.5	16.6
3	94.2	19.0	10	9.0	5.8
4	47.8	-3.9	11	3.5	1.8
5	7.6	1.6	12	6.1	1.6
6	11.2	7.5	13	13.5	5.8
7	0.0	0.0	14	14.9	5.0

表2 IEEE 14节点系数支路参数(标么值)

支路编号	首末节点	R	X	B	变压器 (变比为K)
1	1-2	0.019	0.059	0.053	
2	1-5	0.054	0.223	0.049	
3	2-3	0.047	0.198	0.044	
4	2-4	0.058	0.176	0.034	
5	2-5	0.057	0.173	0.035	
6	3-4	0.067	0.171	0.013	
7	4-5	0.013	0.042	0.000	
8	4-7	0.000	0.209	0.000	0.978
9	4-9	0.000	0.562	0.000	0.969
10	5-6	0.000	0.252	0.000	0.932
11	6-11	0.095	0.199	0.000	
12	6-12	0.123	0.256	0.000	
13	6-13	0.066	0.131	0.000	
14	7-8	0.000	0.176	0.000	
15	7-9	0.000	0.110	0.000	
16	9-10	0.032	0.08	0.000	
17	9-14	0.127	0.270	0.000	
18	10-11	0.082	0.192	0.000	
19	12-13	0.221	0.200	0.000	
20	13-14	0.179	0.348	0.000	

3.2 简单遗传算法和改进遗传算法的参数

2种算法的种群规模 $P_{popsize}=50$,最大遗传代数 $t=100$ 。简单遗传算法(SGA)采用二进制编码方式、赌轮盘选择、单点交叉、基本位变异,其交叉率 $p_c=0.6$,变异率 $p_m=0.1$,改进遗传算法(MGA)按照文中提出的思想,交叉率初始值 $p_{c0}=0.8$,交叉率递减步长 $p_{cstep}=0.001$, $p_{cmin}=0.06$;变异率初始值 $p_{m0}=0.1$,变异率递增步长 $p_{mstep}=0.001$, $p_{max}=0.2$;电压越限罚系数 $\lambda_v=1.032$,发电机无功出力罚系数 $\lambda_Q=1.025$,最优个体保留代数 $n_p=10$ 。由于遗传算法的随机性,因此对2种算法分别进行10次运算。取其中的最佳结果对比分析。

3.3 2种算法的无功优化仿真结果分析

简单遗传算法和改进遗传算法无功优化仿真结果如表3~4所示。

表3 无功优化后控制变量对应实际参数值对比(标么值)

变量	V_{G1}	V_{G2}	V_{G3}	V_{G6}	V_{G8}	B_9	K_{4-7}	K_{4-9}	K_{5-6}
初始值	1.060	1.045	1.010	1.070	1.090	0.19	0.978	0.969	0.932
SGA	1.096	1.070	1.005	1.035	1.046	0.43	1.052	0.956	1.063
MGA	1.099	1.075	1.062	1.030	1.055	0.30	1.025	1.087	0.975

表4 无功优化后状态变量结果(标么值)

状态变量	下限	上限	初始值	SGA	MGA
Q_{G1}	-0.30	2.0	-0.169	0.007	0.033
Q_{G2}	-0.20	1.0	0.424	0.424	0.094
Q_{G3}	-0.15	0.8	0.234	-0.042	0.456
Q_{G6}	-0.15	0.6	0.122	0.162	0.002
Q_{G8}	-0.10	0.5	0.174	-0.046	0.108
V_4	0.95	1.1	1.019	1.035	1.053
V_5	0.95	1.1	1.019	1.035	1.053
V_7	0.95	1.1	1.020	1.046	1.052
V_9	0.95	1.1	1.062	1.008	1.032
V_{10}	0.95	1.1	1.056	1.027	1.024
V_{11}	0.95	1.1	1.051	1.015	1.017
V_{12}	0.95	1.1	1.057	1.004	1.020
V_{13}	0.95	1.1	1.055	0.987	1.015
V_{14}	0.95	1.1	1.050	0.985	1.011

由上结果可知,与简单遗传算法相比,改进遗传算法在计算效率方面有很大提升。改进遗传算法无功优化后有功网损由初始的0.138 40降至0.126 49;从表5可以看出,改进后的算法收敛速度比较快,寻优结果也比简单遗传算法好。

表5 无功优化后网损及计算时间

	初始潮流	SGA	MGA
有功损耗(标么值)	0.138 40	0.131 15	0.126 49
有功损耗降低率/%		5.23	8.61
计算时间/s		46.9	21.4

4 结论

无功优化问题是一个含有连续变量和离散变量的混合优化问题,求解过程相当复杂,寻找高效的求解方法是研究热点,本文介绍了遗传算法,并做了相应的算法改进以提高计算速度和寻优结果。由表5数据可知,采用2种算法优化后,均无出现节点电压越限和无功越限的情况,系统满足所有的运行约束条件。同时改进遗传算法提高了计算效率,改进了计算结果的精度。

参考文献

[1] 蒲永红.改进遗传算法在无功优化中的应用研究[D].山东:山东大学,2007.
[2] 李林川,王建勇,陈礼义,宋文南.电力系统无功补偿优化规划[J].中国电机工程学报,1999, 19(2):66-69.
[3] 朱太秀.电力系统优化潮流与无功优化[J].电网技术,1990 (4):13-16.
[4] 张粒子,舒隼,林宪枢,等.基于遗传算法的无功规划优化[J].中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.

收稿日期:2007-01-28。

作者简介:

段金长(1983—),在读研究生,研究方向为智能算法在电力系统中的应用。

(编辑 冯 露)

动态资讯

国网首条10 kV OPPC光缆在鹰潭成功投运

2008年6月15日,国网首条10 kV配网OPPC光缆在江西鹰潭供电公司安装调试成功,正式投入运行。

OPPC光缆具有传输电能和进行通信的双重功能。此次施工的10 kV梅开线长1 894 m,是从220 kV月湖变电站出线到鹰潭供电公司调度大楼10 kV 开闭所的主供电电源线。施工人员采取老线带新线的方式,仅用2 d时间更换B相导线为OPPC光缆。这条OPPC光缆成功投运意味着鹰潭供电公司调度中心将通过10 kV梅开线的导线与220 kV月湖变建立第二条通信通道,江西省电力系统通信线路架设方式也将进入新的阶段。

据江西省电力信通公司专家介绍,OPPC光缆在配电网络推广,将节省大量通信线路走廊和建设资金,为创建环保节约型社会做出积极贡献。

(信息来源 国际能源网)