

基于改进微分进化算法的电力系统无功优化

张炳才¹, 秦四娟², 乔世军¹, 卢志刚¹

(1. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 秦皇岛电力公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 针对传统无功优化模型对于大系统编程实现十分困难的缺点, 采用矩阵形式的数学模型进行优化。对标准微分进化算法提出了改进, 引入增强算子, 并采用模拟赌盘操作的方法有目的地使种群中的较差个体参与增强运算, 提高了算法的寻优能力。由于微分进化算法中, 初始种群的优劣对算法的收敛性有重要影响, 根据无功优化的本质, 依据初始潮流结果启发初始种群产生, 加快收敛速度。在 IEEE-14 系统上进行校验, 并与其他方法比较, 结果表明, 提出的改进算法具有收敛特性好、运行速度快的突出优点。

关键词: 电力系统; 无功优化; 微分进化算法; 增强算子; 初始种群

Reactive power optimization in power system based on modified differential evolution algorithm

ZHANG Bing-cai¹, QIN Si-juan², QIAO Shi-jun¹, LU Zhi-gang¹

(1. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Qinhuangdao Electric Power Company, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: In order to overcome the programming difficulty of traditional reactive power optimization model for large-scale systems, the model of reactive power optimization in the form of matrix is presented. The modified DE algorithm is improved by introducing enhanced operator and operating analog gambling site by purpose to make the poor individuals of population participate in enhancing operation and improving the method of optimizing capacity. The merits and demerits of initial population have a significant impact on the algorithm convergence. According to the nature of reactive power optimization, initial population based on results of the power flow. MPDE applied for optimal reactive power is evaluated on an IEEE-14 bus power system. It is shown that the proposed approach has better convergence and much faster than the earlier approaches.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2010001319).

Key words: power system; reactive power optimization; differential evolution algorithm; enhanced operator; initial population

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0091-04

0 引言

电力系统无功优化可以充分利用电网中的无功电源, 改善电压质量、减少网络损耗和提高电压稳定性。常用的控制设备有带负荷调压变压器、可投切电容器(电抗器)和可调压发电机^[1-3]。

无功优化问题是一个动态、多目标、多约束、不确定性的非线性整数规划问题。长期以来, 国内外专家学者对此进行了大量的研究, 提出了很多方法, 主要有试验误差法、非线性规划法、线性规划

法、动态规划法、遗传算法、粒子群算法等方法。近年来随着计算机技术及人工智能技术的发展, 产生了遗传算法、粒子群算法、人工神经网络优化算法、模拟退火算法、蚂蚁算法等一系列智能优化算法用以解决电力系统优化问题, 并且取得了很大的进步^[4-8]。

微分进化法(Differential Evolution, DE)是由 Storn和Price在1995年提出的一种高效率的智能优化计算方法。该算法源于遗传算法, 但由于不需进行编码和解码操作, 使用上大为简化, 被认为是一种极具潜力的跨学科优化算法。因此, 此算法一经提出, 马上得到了许多领域学者的密切关注^[9-12]。本文在标准DE算法中引入增强算子, 并采用模拟赌

基金项目: 河北自然科学基金(F2010001319); 河北省教育厅基金项目(20094831)

盘操作的方法来有目的地使种群中的较差个体参与增强运算,提高了算法的寻优能力,并依据无功优化的本质,根据初始潮流结果启发初始种群产生,加快收敛速度。

1 无功优化数学模型

1.1 无功优化模型的常规表示方法

无功优化指在给定运行方式下,改变发电机无功出力,以及有载调压变压器分接头位置和无功补偿设备的投入容量,在满足系统运行的各种约束条件下,使得系统在某时段内的目标函数最小。以有功功率损耗最小为目标函数,即

$$\min f_Q = \sum_{k \in N_E} P_{\Sigma \text{loss}} = \sum_{k \in N_E} g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

等式约束条件为有功、无功功率平衡,即:

$$\begin{aligned} \text{s.t. } 0 &= P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ 0 &= Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

不等式约束条件为节点无功电源,节点电压上下限等,即:

$$\begin{aligned} V_{i,\min} &\leq V_i \leq V_{i,\max} & i &\in N_B \\ Q_{Gi,\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} & i &\in N_G \\ T_{k,\min} &\leq T_k \leq T_{k,\max} & k &\in N_T \\ Q_{Ci,\min} &\leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\max} & i &\in N_C \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $P_{\Sigma \text{loss}}$ 为支路的有功功率损耗; g_k 为支路 k 的电导。 G_{ij} 和 B_{ij} 为节点导纳的系数; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功和无功注入; V_i 为节点 i 的电压幅值。 θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电压角度差; Q_{Gi} 为节点 i 的无功发电功率。

1.2 无功优化数学模型的矩阵表示方法

上述无功优化模型虽然表达清晰,但对于大系统的编程实现十分繁琐。为了方便模型的编程实现,本文采用矩阵形式^[13]表达这个数学模型。

对一个 n 节点、有 K 个可调变压器的系统,按照先 PQ 节点后 PV 节点,最后平衡节点的顺序对节点依次编号。 I_1 、 I_2 分别表示 PQ 节点和 PV 节点的个数, V_1 、 V_2 和 V_s 分别表示 PQ 节点、PV 节点的电压模值向量和平衡节点的电压模值。则 $V = [V_1^T, V_2^T, V_s^T]^T$ 表示所有节点的电压模值向量, θ 是平衡节点外所有节点的电压相角向量,是 $I_1 + I_2$ 行的列向量。

定义 n 阶方阵 M_P , M_Q 为:

$$M_P(i, j) = G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (4)$$

$$M_Q(i, j) = G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (5)$$

导纳矩阵 Y_n 是变比 K 的函数,从而 M_P 和 M_Q 都是 K 的函数。节点功率注入方程组可以用矩阵形式表示为:

$$P = \text{diag}(V) \cdot M_P \cdot V \quad (6)$$

$$Q = \text{diag}(V) \cdot M_Q \cdot V \quad (7)$$

控制变量为 $U = [V_2^T, V_s, K^T]^T$, 状态变量为 $X = [\theta^T, V_1^T]^T$, 将控制变量和状态变量组合作为决策变量,记为 $\hat{X} = [V_2^T, V_s, K^T, \theta^T, V_1^T]^T$ 。

这样无功优化控制模型就可以用矩阵形式表示如下^[15]:

$$\min P_L(\hat{X}) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } P_1(\hat{X}) + P_{L1} - P_{G1} = 0$$

$$P_2(\hat{X}) + P_{L2} - P_{G2} = 0 \quad (9)$$

$$Q_1(\hat{X}) + Q_{L1} - Q_{G1} = 0$$

$$Q_2(\hat{X}) + Q_{L1} - Q_{G1} = 0$$

2 微分进化算法及其改进

2.1 引入增强算子的微分进化算法

其基本思想如下:在按 DE 基本算法得到新种群后,以 MP ($0 < MP < 1$) 概率对新种群中的部分个体(不含当前最优个体)重新赋值,并使这部分个体分布在当前种群中的最优个体附近,以增强这部分个体的贪婪性,使算法加速收敛。为此,引入局部增强算子^[16],如式(10)所示:

$$C_{i,g+1} = X_{\text{best},g+1} + (X_{r1,g+1} - X_{r2,g+1}) / \text{gen} \quad (10)$$

其中: $X_{\text{best},g+1}$ 为新种群中当前最优个体; $C_{i,g+1}$ 为增强后的新个体,用于替换旧个体 $X_{i,g+1}$; $X_{r1,g+1}$ 、 $X_{r2,g+1}$ 从新种群中随机选取并且满足 $r1 \neq r2 \neq i$, gen 为算法迭代次数。

2.2 改进增强算子的微分进化算法

由于 MP 选取的随机性^[17],该算法有陷入局部最优的风险,本文对上述方法提出了两点改进:

1) 在原有算法基础上对式(10)作如下改进:

$$C_{i,g+1} = X_{\text{best},g+1} + (X_{\text{best},g+1} - X_{r1,g+1}) / \text{gen} + (X_{\text{best},g+1} - X_{r2,g+1}) / \text{gen} \quad (11)$$

当一定数量的个体被选中并按局部增强算子更新时,其效果相当于使这部分个体在当前种群中的最优个体附近随机扰动,收敛性更好。

2) 有目标的控制进行局部增强个体的数量, 在 MPDE 算法引入概率选择参数 P_i , 设群体大小为 n , 个体 i 的适应度为 F_i , 则个体 i 被选中增强的概率与其适应值的大小成反比, 即越接近最优解的个体其增强概率越小:

$$P_i = 1 - F_i / \sum_{i=1}^n F_i \quad (12)$$

首先计算群体中所有个体的适应度函数值; 然后利用比例选择算子的公式, 计算每个个体的增强概率; 最后采用模拟赌盘操作 (即生成 0~1 之间的随机数与每个个体微分进化到下一代群体的概率进行匹配) 来确定各个个体是否进行增强计算。

3 基于改进微分进化算法的无功优化

3.1 初始种群的产生

DE 算法最优解的质量取决于初始群体是否能够包含解空间的全部可能的解的取值, 并在进化的过程中不失去其中优良的性状。初始种群应尽量散布在解空间中, 而且在最有希望获得最优解的区域, 应该适当增加搜索的力度。因此, 如何产生初始群体对微分进化算法的应用效果影响很大。DE 算法一般采用对每个控制变量在其取值范围内取随机数的方法获得初始解群体。

在电力系统无功优化中, 随着控制变量的取值不同, 运行状态变化很大, 而其中许多控制变量取值代表的运行方式对寻找最优解是没有意义的。因此, 本文提出了针对具体运行方式特点采用倾斜分布方式产生初始解群方案。

首先, 进行初始潮流计算, 根据潮流计算的结果判断该方式属于下面的哪种类型, 然后据此给出初始解的参考取值范围。

1) 较多节点电压越下限, 此时为系统处于严重无功状态, 应投入容性无功补偿设备或提高发电机的机端电压。

2) 少量节点电压越下限或越上限, 其余大部分节点电压合格, 此时系统无功基本平衡。

3) 较多节点电压越上限, 此时系统处于无功大量过剩状态, 应切除容性无功补偿设备、投入感性无功补偿设备或降低发电机的机端电压。

这里以情况 1) 为例进行发电机机端电压初始化的说明。假设发电机机端电压的当前值为 1.00, 将电压分为 A-E 五个区域。其中区域 A 包括 [1.06, 1.10], 区域 B 包括 [1.02, 1.06], 区域 C 为 [0.98, 1.02], 区域 D 包括 [0.94, 0.98], 区域 E 为 [0.90, 0.94]。当然, 具体的区域划分应根据所计算电网的实际情况确定。初始种群按 A 区域 15%, B 区域 40%, C 区域

30%, D 区域 15%, E 区域 0% 生成。

上面的分配比例说明, 应该在略高于当前值的范围内分布大多数点。发电机端电压应尽可能充分发挥其无功发电能力, 但电压过高容易导致发电机无功越限, 所以取接近上限的值的比例也相对较小。低于当前值的机端电压以较小的比例考虑, 更低的电压则基本不予考虑。与发电机端电压的分布原则相似, 电容 (电抗) 器投运容量、变压器分接头档位亦按倾斜分布方式产生。

3.2 电力系统无功优化步骤

基于改进 DE 算法求解无功优化问题的流程图如图 1 所示。

1) 确定群体规模、最大迭代代数、交叉概率、变异概率等微分进化算法的运行参数。

2) 进行初始潮流计算, 根据无功优化的本质, 倾斜分布式启发初始种群产生。

3) 计算种群适应度, 且对所有个体进行变异和交叉操作, 以获得候选个体。

4) 计算候选个体的适应度进行选择操作, 更新种群。

5) 采用模拟赌盘方法使种群中较差个体参与增强运算。

6) 如果满足收敛条件或达到最大迭代次数, 则停止计算, 否则返回步骤 (3)。

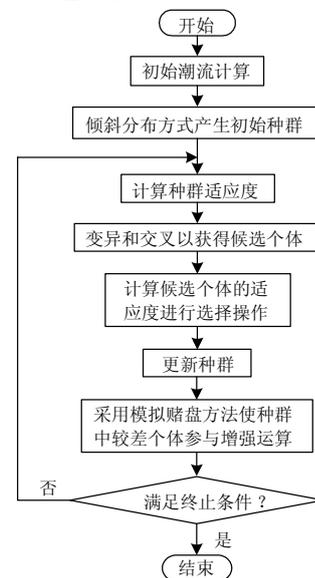


图1 改进DE算法求解无功优化流程

Fig.1 Flow chart of reactive power optimization with improved DE algorithm

改进 DE 算法仅比基本算法增加一个步骤: 按 DE 算法得到新种群后以概率选择参数 p_i 对较差个体参与增强计算。改进算法在迭代过程中没有增加对

目标函数的评价次数，因此对整体计算量影响很小。

4 仿真算例和分析

本文采用 IEEE-14 节点标准系统测试改进 DE 算法的有效性。算法用 Matlab 语言实现。

IEEE-14 节点系统包含 5 台发电机、3 台有载调压变压器、1 个电容器组。其中变压器上下限取 0.9、1.1，步长为 0.012 5。电容器上下限取 0、0.4，步长为 0.05。表 1 为初始潮流的电压情况，优化前有功损失为 13.456 MW。

表1 IEEE-14节点初始潮流的电压情况

Tab.1 Optimization result of IEEE-14

节点号	1	2	3	4	5	6	7
电压幅值	1.06	1.045	1.01	1.016	1.018	1.07	1.056
节点号	8	9	10	11	12	13	14
电压幅值	1.09	1.044	1.041	1.052	1.054	1.049	1.028

由表1可以看出，所有节点电压合格，系统无功基本平衡。因此根据倾斜分布式启发初始种群产生。发电机机端电压分布：A区域0%，B区域30%，C区域40%，D区域30%，E区域0%。电容器投运容量为 0，变压器分接头位置在控制范围内随机生成。

表2是IEEE-14节点控制变量的优化结果；表3为不同算法的网损优化结果及收敛时间对比。

表2 IEEE-14节点控制变量优化结果

Tab.2 Optimization result of IEEE-14

控制变	GA 优化结	DE 优化结	改进 DE 优化结
Vg2	1.091	1.046	1.051
Vg3	1.083	1.017	1.039
Vg6	1.072	1.100	1.073
Vg8	1.090	1.100	1.097
T4-7	1.071	0.975	1.025 0
T4-9	1.062 3	0.962 5	0.987 5
T5-6	1.053 9	1.00	1.012 5
Qc9	0.18	0.20	0.25

表3 不同算法优化结果的比较

Tab.3 Comparison of different algorithms

算法种类	优化后损失/MW	降损率	时间/s
GA	13.19	1.98%	327
DE	12.96	3.69%	289
DE (随机)	12.64	6.06%	182
DE (启发)	12.64	6.06%	136

如表3所示，在损失方面，改进DE算法优化后有功损失降为12.64 MW，比优化前降低了6.06%，降损效果最明显。与GA算法和DE算法相比较，改进DE算法不但降低了系统有功损失，且具有更好的

寻优效果和全局收敛能力。另外，利用倾斜分布式启发初始种群产生算法比随机产生初始种群收敛速度更快，这是由于减少了不可行解的数目，加快了收敛速度。

6 结论

本文采用矩阵形式的数学模型进行无功优化，降低了编程的难度。针对微分进化算法在计算的后期易陷入局部最优解的缺点，本文引入改进增强算子，使新一代种群中部分个体分布在当前种群中的最优个体附近，增强了这部分个体的贪婪性，使算法加速收敛。根据倾斜分布式启发初始种群产生极大地减少了这些不可行解的数目，加快了收敛速度。IEEE-14 节点系统的仿真结果表明改进算法有良好的全局收敛性和收敛速度。

参考文献

- [1] Bridenbarugh C J, DiMascio D A, Aquila R D. Voltage control improvement through capacitor and transformer tap optimization[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7 (2) : 222-227.
- [2] Lu F C, Hsu Y Y. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (2) : 681-688.
- [3] Venkatesh B, Sadasivam G, Bduallah Khan M A. A new optimal reactive power scheduling method for loss minimization and voltage stability margin maximization using successive multi-objective fuzzy LP technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (2) : 844-851.
- [4] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 基于混沌 PSO 的电力系统无功最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2005, 25 (7) : 53-57.
LIU Zi-fa, GE Shao-yun, YU Yi-xin. Optimal reactive power dispatch using chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 25 (7) : 53-57.
- [5] Fukuyama Y, Yoshida H A. Particle swarm optimization for reactive power and voltage control in electric power systems[C]. //Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation. Seoul (South Korea) : 2001.
- [6] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 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, YAN Jian-yong, et al. Improved particle swarm optimization method and its application in power transmission network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4) : 46-50.
- [7] Price S R. Minimizing the real functions of the ICEC'96 Contest by Differential Evolution[C]. //1996 IEEE Evolutionary Computation Conference. Nagoya(Japan): 1996.

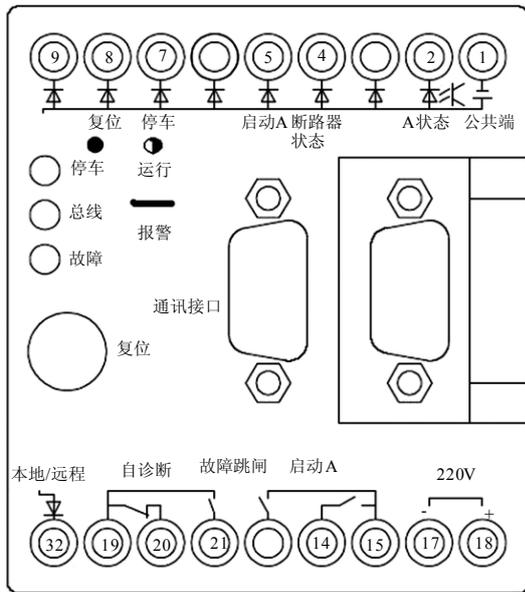


图 6 保护控制器实物图

Fig.6 Physical map of motor protection controller

3 结束语

本设计采用 ARM 控制器，充分利用了内部硬件资源，通过预设保护参数，系统能按指定的保护程序对电机进行保护，记录保护参数，掌握电机运行情况，保证了安全运行与生产，大大节约了电机更换成本。

参考文献

[1] 佟为民, 李中伟, 倪文利. 基于PIC16F876 单片机的智能低压电动机综合保护器的研究[J]. 继电器, 2005, 33 (3) : 43-46.
TONG Wei-min, LI Zhong-wei, NI Wen-li. Study of an intelligent low-voltage integrative motor protector based on PIC16F876 single chip[J]. Relay, 2005, 33(3): 43-46.

[2] 夏天伟, 郑祥, 王士荣. 电动机智能型保护监控装置的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2004(4): 399-402.
XIA Tian-wei, ZHENG Xiang, WANG Shi-rong. Research of intelligent motor protector and monitor[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2004 (4) : 399-402.

[3] GB /Z 19582 222004 基于Modbus协议的工业自动化网络规范, 第2部分: Modbus协议在串行链路上的实现指南[S].
GB /Z 19582 222004 Modbus industrial automation network specification, part II : modbus protocol implementation guide over serial link[S].

[4] 张楠, 黄益庄, 李璇华. 综合保护装置中的多任务处理[J]. 继电器, 2003, 31 (3) : 31-32.
ZHANG Nan, HUANG Yi-zhuang, LI Xuan-hua. Multitask processing in the integrated protection device [J]. Relay, 2003, 31 (3) : 31-32.

收稿日期: 2009-10-18; 修回日期: 2010-03-04

作者简介:

唐颖 (1978-), 女, 讲师, 硕士研究生, 主要从事电动机保护研究; E-mail: tangy06@uestc.edu.cn

李玉林 (1975-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为控制工程。

(上接第 94 页 continued from page 94)

[8] Le K Y, Bal X M, Young M P. Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (4) : 1843-1850.

[9] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. //IEEE International Conference on Neural Networks. Perth (Australia) : 1995.

[10] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization, 1997, 11 (4) : 341-359.

[11] Qing A Y. Dynamic differential evolution strategy and applications in electromagnetic inverse scanning problems[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44 (1) : 116-125.

[12] Chiou J, Chang Ch, Su C Z. Ant direction hybrid differential evolution for solving large capacitor placement problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (4) : 1794-1800.

[13] Storn R, Price K. Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous Space[R]. Berkley: Berkley International Computer Science Institute, 1995.

[14] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11 (4) : 341-359.

[15] Rainer Storn. Designing nonstandard filters with differential evolution[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22 (1) : 103-106.

[16] 赵光权, 彭喜元, 等. 带局部增强算子的微分进化算法[J]. 电子学报, 2005 (5) : 850-853.
ZHAO Guang-quan, PENG Xi-yuan, et al. A modified differential evolution algorithm with local enhanced operator[J]. Acta Electronica Sinica, 2005 (5) : 850-853.

[17] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization, 1997, 11 (4) : 343-358.

收稿日期: 2009-09-10; 修回日期: 2009-11-14

作者简介:

张炳才 (1955-), 男, 高级实验师, 主要从事电力系统分析的相关实验和研究; E-mail: xiansun@ysu.edu.cn

秦海娟 (1983-), 女, 硕士, 从事电网无功优化和优化算法研究。