

10

文章编号: 1000-582x(1999)03-0058-05

58-62

进化规划在优化无功调度中的应用

张金奎¹, 颜伟¹, 徐国禹¹, 黄永铭²

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆市电力工业局干部处, 重庆 400015)

TM 714.3
TM 731

摘要: 利用进化规划(Evolutionary Programming-EP)求解最优潮流问题, 在变异尺度、适应度函数值、群体规模等方面进行了研究。在求解最优潮流这个具有多局部极小值的寻优方面, 把进化规划所求的结果和传统的基于梯度寻优的BFGS法所求的结果进行比较, 指出了进化规划在处理非连续的和非平滑的函数寻优方面优于传统的寻优方法。

关键词: 调度 / 进化规划; 最优潮流; 无功优化

中图分类号: TM 731

文献标识码: A

电力系统

无功功率, 补偿 最佳化

在电力系统中需要保证无功功率平衡以控制电压水平和降低有功损耗。常用的控制手段有带负荷调压变压器、补偿电容和可调压发电机等。在系统无功补偿和调压手段已知的情况下, 如何确定相应方案, 以使在满足电压要求的同时, 网损达到最小, 这便是无功优化运行问题, 国内外已做了大量工作。常规解决方案主要有线性规划、非线性规划等, 这些算法需假设各控制变量是连续的, 而且要求目标函数可微, 同时只能保证局部最优。

笔者提出使用进化规划(EP)求解无功优化问题, 对算法进行了改进, 用 IEEE-30 节点系统验证了改进算法的有效性。

1 无功优化问题的数学模型

1.1 系统潮流约束式

无功优化中的变量分为控制变量和状态变量, 控制变量为各节点补偿容量 Q_c 、带负荷调压变压器变比 T 、可调发电机端电压 V_g ; 状态变量为节点电压 V 和发电机注入无功 Q_g 。因此潮流方程可写为控制变量和状态变量表示的简洁形式^[1]:

$$F(V, Q_c, Q_g, T, V_g) = 0 \quad (1)$$

1.2 变量约束条件

变量约束条件为控制变量约束和状态变量约束:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i \in N_B$$

• 收稿日期: 1998-01-14

作者简介: 张金奎(1970-), 男, 四川资阳人, 硕士, 现在重庆杨家坪供电局工作, 从事电力系统运行与控制研究。

$$\begin{aligned}
 T_{\min} &\leq T_k \leq T_{\max} & k \in N_T \\
 Q_{G\min} &\leq Q_k \leq Q_{G\max} & i \in \{N_{PV}, N\} \\
 |Q_k| &\leq Q_{\max} & i \in N_k \\
 V_{\min} &\leq V_k \leq V_{\max} & i \in N_R
 \end{aligned} \tag{2}$$

1.3 增广目标函数

无功优化的目的是在满足各种约束条件的情况下降低有功损耗,对于控制变量约束可以适当的编码方式解决,但对于状态变量约束,须写成罚函数形式。于是增广目标函数为:

$$\min \Delta P + P_V + P_Q \tag{3}$$

其中 $P_V + P_Q$ 为电压越限、无功越限惩罚项:

$$P_V + P_Q = \sum_{i \in N_V} \lambda_{Vi} (V_i - \text{Sat}(V_i))^2 + \sum_{i \in N_Q} \lambda_{Qi} (Q_{Gi} - \text{Sat}(Q_{Gi}))^2 \tag{4}$$

上式中 λ_{Vi} 、 λ_{Qi} 是惩罚系数,将 V_i 、 Q_{Gi} 统一为变量 x , (5) 式中 $\text{Sat}(x)$ 定义为饱和函数:

$$\text{Sat}(x) = \begin{cases} x^{\min} & \text{if } x < x^{\min} \\ x & \text{if } x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \\ x^{\max} & \text{if } x > x^{\max} \end{cases} \tag{5}$$

增广目标函数中:
$$\Delta P = \sum_{k \in N_k} P_{k\text{loss}} = \sum g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \tag{6}$$

以上各式中: N_k 、 N_{PV} 、 N_R 分别为支路总数、PV节点总数、节点总数; N_k 为可调发电机节点总数; N_T 为可调变压器支路总数; $P_{k\text{loss}}$ 为支路 k 的有功损耗; Q_k 为补偿容量。

2 进化规划

与常规优化方法相比,EP 不需要目标函数和约束条件可微,它使用概率准则在群体中选择个体以产生新一代,上一代的个体和变异后的个体形成组合群,其中一个个体和其它个体竞争,产生和上一代个体数目相同的优胜者形成子代。EP 主要通过变异、竞争和繁殖进行操作,其过程如下^[2]。

step1: 初始化

初始控制变量群体 p_i 通过随机方法选择, $p_i = [V_i^r, Q_i, T]$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, 其中 m 是群体规模, $V_i^r \in [V^{\min}, V^{\max}]$, $Q_i = [Q_i^{\min}, Q_i^{\max}]$, $T \in [T^{\min}, T^{\max}]$, 计算适应函数值 f_i 。

step2: 统计

这一步骤包括计算每一代的最大适应函数值、最小适应函数值、适应函数值总和、平均适应函数值。

step3: 外循环开始

step4: 内循环开始

step5: 变异

对当前群中的每个串进行变异操作,操作是对串中的每个码加上一个变异量,变异量的大小采用高斯分布,计算公式如下:

$$p_{i+m,j} = p_{i,j} + \delta, \delta \sim N\left(0, \beta(x_j^{\max} - x_j^{\min}) \frac{f_i}{f_{\max}}\right) \quad j = 1, 2, 3 \tag{7}$$

$p_{i,j}$ 代表第 i 个个体的第 j 个元素; $N(\mu, \sigma^2)$ 表示均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯随机变量;

x_j^{\max} 和 x_j^{\min} 是第 j 个变量的上、下限; f_{\max} 是旧个体中适应值的最大值; f_i 为该个体的适应值; β 是变异尺度, $0 < \beta \leq 1$; $p_{i+m,j}$ 表示由第 i 个个体变异出第 $i+m$ 个个体的第 j 个元素值。

这样, 变异后的 m 个个体加上原来旧群中的 m 个个体形成 $2m$ 个个体组成的组和群 (combined population)。

step6: 竞争

组合群中的每一个个体跟其它个体竞争, 以有机会进入下一代群体中。

首先给每个个体一个权重:
$$w_i = \sum_{r=1}^q w_{ir} \quad (8)$$

其中, q 是竞争数目; w_{ir} 取 0 或 1, 表示个体 i 跟随机选取的个体 r 竞争, 1 表示赢, 0 表示输, 它表示为:

$$w_{ir} = \begin{cases} 1 & \left(u < \frac{f_r}{f_r + f_i} \right) \\ 0 & \left(u \geq \frac{f_r}{f_r + f_i} \right) \end{cases} \quad (9)$$

其中, u 是 0 到 1 之间的随机数; f_r 和 f_i 分别为个体 r 和个体 i 的适应值; 其次按权重的大小, 对所有个体进行排序。最后, 选取权重大的 m 个个体进入新群体。

step7: 内循环收敛准则

当最大适应函数值收敛到最小, 或者迭代达到最大迭代次数, 则整个过程转入下一步, 否则返回步骤 4。

step8: 外循环收敛准则

当所有的状态变量如 PQ 节点电压, 无功发电功率在给定的限值内, 或者外循环达到最大迭代次数, 则整个程序结束, 如果一个或者更多的状态变量越限, 则增加这些变量的惩罚系数, 程序返回 3。

2.1 算法改进

为了使 EP 实际可行, 在算法上做了如下改进:

2.1.1 自适应变异尺度

一般的 EP 变异概率在整个搜索过程中保持不变, 但在实际计算中, 变异概率过小将导致“早熟”; 变异概率过大将导致发散, 本文以如下方式引入自适应概率:

$$\beta(k+1) = \begin{cases} \beta(k) - \beta_{\text{step}}, & \text{if } f_{\text{min}}(k) \text{ 保持不变} \\ \beta(k), & \text{if } f_{\text{min}}(k) \text{ 减小} \\ \beta_{\text{final}}, & \text{if } \beta(k) - \beta_{\text{step}} < \beta_{\text{final}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta(0) = \beta_{\text{init}}$$

其中 k 指代数; β_{init} , β_{final} 和 β_{step} 分别为变异尺度初始值、终值及步长常数, β_{init} 约等于 1, β_{final} 为 0.05, β_{step} 为 0.001 ~ 0.01 之间, 变异尺度的下降取决于适应函数值, 也就是说, 适应函数值越小, 变异尺度下降的越快, 这样的自适应变异尺度不仅可以避免“早熟”, 而且能产生平滑收敛。

2.1.2 相对适应函数值

在实际问题中, 个体的适应函数值 (尤其是在无功优化中) 和其它个体的适应函数值并

无太大的差别,在极小点和原始运行点的差别很小,在确定性转移规则中并无大碍,但在概率转移规则中,由于不确定性的增加,这样的差别将消失。基于上述考虑,笔者拟对适应函数值和最大适应函数值进行如下修正:

$$\begin{aligned} f_{\text{brm}} &= f_i - \epsilon f_{\text{max}} \quad i = 1, 2, \dots, m \\ f_{\text{brmmax}} &= f_{\text{max}} - \epsilon f_{\text{min}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $0.95 \leq \epsilon < 1$, f_i 、 f_{max} 、 f_{min} 分别为不前群中的第 i 个体的适应函数值、最大适应函数值、最小适应函数值; f_{brm} 、 f_{brmmax} 分别为个体 i 的适应函数值的修正值、最大适应函数值的修正值,这样,修正后的 f_{brm} 和 f_{brmmax} 总是大于零,适应函数值差别不大的个体其相对适应函数值呈现明显的差异。优秀个体具有更强的竞争性。

2.1.3 自适应群体规模

群体规模通常应随着控制变量的增加而增加,但不必按线性增加,笔者通过反复计算认为群体规模在 20 ~ 100 间较合适,并拟合了控制变量和群体规模的如下经验公式:

$$\text{POP}_{\text{size}} = 20 \times \text{Int}(5 - 4e^{-\frac{k}{40}})$$

其中 k 表示控制变量数目;Int 表示取整。

3 基于 IEEE30 节点的优化比较

IEEE30 节点系统数据见文献[3],该网络有 43 条支路,21 个负荷节点。节点 1 为平衡节点;2、5、8、11、13 为 PV 节点;其它节点为 PQ 节点。总的负荷为 $P_{\text{load}} = 2.834$, $Q_{\text{load}} = 1.262$ 。PV 节点和平衡节点的电压上、下限设置为 $V_{\text{PVmin}} = 0.9$, $V_{\text{PVmax}} = 1.1$, PQ 节点的电压上、下限设置为 $V_{\text{PQmin}} = 0.95$, $V_{\text{PQmax}} = 1.05$ 。PV 节点的有功发电功率及平衡节点和 PV 的无功发电功率上、下限见表 1,表 1 ~ 表 3 的所有变量单位均为标么值。

这里给出进化规划和非线性规划中的 BFGS 方法所得到的结果以作为比较,见表 2,表 3。

表 1 PV 节点的有功功率及平衡节点的无功功率上、下限

节点号	1	2	5	8	11	13
P_k		0.8	0.5	0.2	0.2	0.2
Q_{min}	-0.298	-0.24	-0.3	-0.265	-0.075	-0.077 5
Q_{max}	0.595	0.48	0.6	0.53	0.15	0.155

表 2 PV 节点和平衡节点的电压

	V_1	V_2	V_5	V_8	V_{11}	V_{13}
初始条件	1	1	1	1	1	1
进化规划法	1.070	1.061	1.031 9	1.041	1.072	1.062
BFGS 法	1.044	1.046	1.049	1.037	1.084	1.062

表 3 总的发电功率和电网损耗

P_g	Q_g	P_{loss}	Q_{loss}	P_{loss}	$P_{\text{loss}}(\%)$
初始条件	2.893 88	0.980 20	0.059 88	-0.281 8	
进化规划法	2.884 146	0.876 552	0.050 159	-0.139 324	0.009 72
BFGS 法	2.888 121	0.901 599	0.054 122	-0.114 644	0.005 757

P_g 、 Q_g ——总的发电有功、无功功率; P_{loss} 、 Q_{loss} ——有功、无功网损

4 结 论

笔者主要论述了进化规划在无功优化调度中的应用。无功优化调度是一个非线性、非连续的函数优化问题,常规梯度优化法做了许多数学假设,并没有充分有力地解决这个问题。笔者在分析基于梯度优化方法的基础上,指出其局限性,同时提出使用进化规划法,然后在常规进化规划的基础上做了三个方面的改进,应用改进进化规划法和常规 BFGS 法对 IEEE30 节点系统进行仿真研究。表明 EP 能够以较快的速度进行全局搜索,具有固有的并行处理特性和鲁棒性强等特点。对电力系统的无功优化问题,大大减少了有功损耗,具有巨大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 陈浩勇,王锡凡. 电力系统无功优化的退火选择遗传算法[J]. 中国电力, 1995, 31(2): 3~6
- [2] MA J T, LAI L L. Power system optimal reactive dispatch using evolutionary programming[J]. IEEE Transactions on Power System, 1996, 10(3): 243~1 249
- [3] LEE K Y, PARK Y M, ORTIZ J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power apparatus and system, 1982, 104: 1 147~1 153

Application of Evolutionary Programming in Optimal Reactive Power Dispatch

ZHANG Jin-kui¹, YAN Wei¹, XU Guo-yu¹, HUANG Yong-ming²

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Cadre Section of Chongqing Electric Power Bureau, Chongqing 400015, China)

ABSTRACT: This paper describes an application of evolutionary programming (EP) to reactive power optimization and voltage control of power systems. Some technical problems which conclude mutation scale, fitness value and population size have been solved to make EP practical for solving the optimal power flow problems. The computational results with EP have been compared with those obtained from a conventional gradient-based optimization method. The comparison shows that EP are better than conventional methods in dealing with the optimization of noncontinuous and nonsmooth functions. The EP show the ability to search for the global optimum in reactive optimization that has multiple optima.

KEYWORDS: dispatching / evolutionary programming; optimal power flow; reactive power optimization

(责任编辑 李胜春)