

进化策略方法在电力系统无功优化中的应用

董 峰 , 鞠 平

(河海大学电气工程学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 将进化策略方法应用于电力系统无功优化 , 通过对不同类型的变量采用不同的变异方法 , 解决了模拟进化法中同时处理整型变量和连续变量的混合优化问题 . 算例表明 , 该方法具有全局收敛性好、适应性强的优点 , 并能提高优化的可行性 , 其结果优于常规方法 .

关键词 电力系统 无功优化 进化策略法

中图分类号 : TM743 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-198X(2000)05-0030-04

近 20 年来 , 电力工作者从单独优化无功功率的角度提出了一系列算法^[1] . 传统方法主要有 线性规划方法、非线性规划方法、混合整数规划方法 . 电力系统无功优化是一个非线性混合整数优化问题 , 采用线性及非线性优化方法时 , 必须对整型变量进行连续化处理 , 这样可能导致所得解不可行 . 同时 , 传统方法本身也存在一些缺陷 , 如易收敛于局部最优点等 .

模拟进化方法是一类优化方法^[2~4] , 主要包括遗传算法(Genetic Algorithm——GA)、遗传编程法(Genetic Programming——GP)、进化规划法(Evolutionary Programming——EP)、进化策略法(Evolution Strategies——ES)和模拟淬火法(Simulated Annealing——SA) , 其运算过程与生物进化过程相仿 . 由于其对优化问题无可微性和连续性要求 , 且具有全局收敛性、固有的并行处理特性、通用性及鲁棒性强等优点 , 被广泛应用于电力系统 . 目前无功优化中应用最多的是遗传算法^[5~6] . 但 GA 法在应用中不仅存在网格问题 , 而且存在早熟收敛问题^[7] . ES 法不需进行二进制编码 , 可以直接进行实数运算 , 因而不存在网格误差 . 参数辨识应用结果^[8]表明 , ES 法的计算精度高于 GA 法 .

本文提出了无功优化的进化策略方法 , 给出了不同类型变量的变异方法 , 算例表明 , 进化策略法的结果优于传统方法 , 并且优化后的解具有较高的可行性 .

1 无功优化的数学模型

无功优化是一多目标优化问题 , 通常其子问题包括系统电压水平最好、无功补偿容量最小、系统有功损耗最小等 . 约束条件包括等式约束条件及不等式约束条件 . 等式约束条件实质上就是系统的潮流约束方程 , 不等式约束包括控制变量和状态变量不等式约束 . 控制变量即为待优化变量 , 状态变量约束是保证所得到的最优解落在可行域内 , 一般有负荷节点电压约束、支路功率约束等 . 对各个具体的无功优化模型 , 虽然其考虑的目标、控制变量和状态变量约束可能有所不同 , 但它们实质上没有多大差别 .

1.1 目标函数

$$\min F = \sum \bar{\omega}_i f_i(P, Q, V, \theta) \tag{1}$$

式中 : f_i ——第 i 项函数指标 ; $\bar{\omega}_i$ ——第 i 项函数指标的权值 .

1.2 约束条件

1.2.1 潮流方程约束

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}] \qquad i \in n_{PQ} + n_{PV} \tag{2}$$

收稿日期 : 1999-09-28
基金项目 教育部优秀青年教师基金资助项目(教育部教人司[1996]486 号文)
作者简介 董峰(1973 —) , 男 , 河南安阳人 , 工程师 , 硕士 , 主要从事电力系统应用软件的研究和开发 .

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in n_{PQ} \tag{3}$$

式中： P_i, Q_i ——节点 i 的注入功率； n_{PQ}, n_{PV} —— PQ 节点集和 PV 节点集。

1.2.2 控制变量不等式约束

$$T_{\min} < T_{ij} < T_{\max} \quad C_{\min} < C_i < C_{\max} \quad U_{gimin} < U_{gi} < U_{gimax} \tag{4}$$

也可以选发电机节点的无功出力作为控制变量，即

$$Q_{gimin} < Q_{gi} < Q_{gimax}$$

式中： T_{ij} ——有载调压变压器的变比； C_i ——节点 i 的并联电容器组数； U_{gi} ——发电机节点的电压；带下标 max 和 min 的量分别为这些量的上、下限，以下各式中意义均相同。

1.2.3 支路潮流限制，保证各条支路不过负荷

$$0 < S_l(U, \theta, T) < S_{lmax} \quad l \in M \tag{5}$$

式中 $S_l(\cdot)$ 为支路 l 传输的视在功率。

1.2.4 节点电压限制

$$U_{imin} < U_i < U_{imax} \quad i \in n_{PQ} \tag{6}$$

式中 U_i 为负荷节点 i 的电压幅值。

2 无功优化的 ES 法

ES 法是由德国科学家 Rechenberg I 及 Schwefel H-P 于 20 世纪 60 年代提出的，用于解决多参数优化问题，详见文献 [9]。下面结合无功优化给出基本步骤。

2.1 将待优化变量进行初始化

待优化变量即为无功控制变量，在 ES 法中称为个体。

$$X = [T, C, U_G]$$

式中： T, C ——变压器分接头和电容器组数，是整型变量； U_G ——发电机机端电压，是连续变量。

开始时，必须给出包含 μ 个个体的一代。本文采用随机方法给出，但其取值应在各自的范围之内，均值取某运行方式下的潮流解。

2.2 按父代个体中不同的遗传因子类型对其进行变异，形成子代

每个父体平均产生 λ/μ 个后代，得到 λ 个新个体组成的子代，子代与其父代稍有不同。 T, C 按照式 (7) 变异， U_G 按式 (8) 变异。

$$X^{(g+1)} = X^{(g)} + I^{(g)} \tag{7}$$

$$X^{(g+1)} = X^{(g)} + Z^{(g)} \tag{8}$$

式中： $I^{(g)} = I_{pr} - \lambda$ ， I_{pr} 是服从期望值为 λ (应为整数) 的泊松分布整型随机向量； $Z^{(g)}$ 一般为正态分布的随机向量。

2.3 计算父代及子代的适应性，选择优良个体

进化策略法中个体的适应性以其适应函数值的大小判别，适应函数值越小，则该个体的适应性越强。其适应函数为

$$f = \Delta P_l + p_e \sum P(x) \tag{9}$$

式中： ΔP_l ——有功网损； $P(x)$ ——罚函数； p_e ——罚因子。根据适应性的在父代 μ 个个体与子代 λ 个个体中选择 μ 个个体进入下一代。

2.4 收敛判别

收敛判据可以使计算达到一定的精度时停止，也可对计算时间进行控制，如果计算时间超过某一限制，则停止计算。判断未收敛，则转第二步。

3 算 例

为方便比较，选择 Ward & Hale 6 节点作为算例系统。该系统接线图、结构参数和运行参数见文献 [10]。

系统为 2 机 6 节点系统,其中 2 号机为 PV 节点.系统中有 2 台有载调压变压器,补偿节点选为 4、6 号节点.

表 1 中列出了用进化策略法优化 6 节点系统的结果.从表中可以看出,优化后系统有功网损值较优化前下降 32.6%,系统电压水平有明显改善.优化前节点 3、5、6 的电压均低于下限 0.95,过低的电压将对系统的电压稳定造成威胁.优化后,除平衡节点和 PV 节点机端电压高于 1.05 外,其余各节点电压值均在限值内.

为比较进化方法与常规方法,表 2 给出用逐次线性规划法和改进内点法优化 6 节点系统的结果.可见,用 ES 法可以直接得到混合整数优化解,其网损比常规方法要低.

表 1 模拟进化法优化 Ward & Hale 6 节点系统结果
Table 1 Results of Ward & Hale 6 node system with ES method

变	量	控制变量上限	控制变量下限	初始状态	优化结果
控制变量	U_{G1}	1.100	1.000	1.05	1.069
	U_{G2}	1.150	1.100	1.10	1.108
	C_4	20(组)	0(组)	0(组)	2(组)
	C_6	20(组)	0(组)	0(组)	5(组)
	T_{43}	5(级)	-5(级)	0(级)	-1(级)
	T_{56}	5(级)	-5(级)	0(级)	-2(级)
状态变量	Q_{G1}	1.000	-0.200	0.3707	0.232
	Q_{G2}	1.000	-0.300	0.3428	0.076
	U_{D3}	1.000	0.900	0.858	0.999
	U_{D4}	1.000	0.900	0.955	0.995
	U_{D5}	1.000	0.900	0.902	0.999
	U_{D6}	1.000	0.900	0.935	0.996
有功网损				0.1145	0.0852

表 2 其它方法优化 Ward & Hale 6 节点系统结果
Table 2 Results of Ward & Hale 6 node system with other methods

变	量	控制变量上限	控制变量下限	初始状态	优化结果	
					逐次线性规划	内点法
控制变量	U_{G1}	1.100	1.000	1.050	1.100	1.100
	U_{G2}	1.150	1.100	1.100	1.150	1.134
	Q_{C4}	0.050	0.000	0.000	0.050	0.050
	Q_{C6}	0.055	0.000	0.000	0.055	0.055
	T_{43}	1.100	0.900	1.025	0.973	0.982
	T_{56}	1.100	0.900	1.100	0.986	0.946
状态变量	Q_{G1}	1.000	-0.200	0.3707	0.356	0.413
	Q_{G2}	1.000	-0.300	0.3428	0.195	0.146
	U_{D3}	1.000	0.900	0.858	1.000	1.000
	U_{D4}	1.000	0.900	0.955	1.000	1.000
	U_{D5}	1.000	0.900	0.902	0.996	1.000
	U_{D6}	1.000	0.900	0.935	0.994	0.979
有功网损				0.1145	0.0882	0.0888

4 结 论

- a. 进化策略方法可以处理混合整数规划问题 , 适合无功优化问题 , 同时 , 按照变量的类型处理也保证了优化后所得解的可行性.
- b. 进化策略方法全局收敛性好 , 其结果优于常规方法.
- c. 进化策略方法的不足在于计算的时间较长 , 优化 6 节点系统线性规划方法需迭代 6 次 , 而进化策略法需迭代 600 次.

参考文献 :

[1] 李文沅 . 电力系统安全经济运行——模型与方法 [M]. 重庆 : 重庆大学出版社 , 1989.

[2] 文福栓 , 韩祯祥 . 模拟进化优化方法在电力系统中的应用综述(上) [J]. 电力系统自动化 , 1996 , 10 (1) : 59 ~ 63 .

[3] 文福栓 , 韩祯祥 . 模拟进化优化方法在电力系统中的应用综述(中) [J]. 电力系统自动化 , 1996 , 10 (2) : 60 ~ 64 .

[4] 文福栓 , 韩祯祥 . 模拟进化优化方法在电力系统中的应用综述(下) [J]. 电力系统自动化 , 1996 , 10 (3) : 72 ~ 75 .

[5] 周双喜 , 杨彬 . 影响遗传算法性能的因素及改进措施 [J]. 电力系统自动化 , 1996 , 10 (7) : 24 ~ 26 .

[6] Swarap K S . Optimization methods using genetic algorithms for reactive power planning in power system [A]. Proceeding of PSCC'96 [C]. Dresden : University Dresden Press , 1996 . 483 ~ 491 .

[7] Goldberg D E . Genetic algorithms in search , optimization and machine learning [M]. Berlin : Addison-Wesley , 1989 .

[8] 鞠平 . 电力系统非线性辨识 [M]. 南京 : 河海大学出版社 , 1999 .

[9] Hans-Paul Schwefel . Evolution and optimum seeking [M]. Berlin : A Wiley-inter Science Publication JOHN WILEY & SONS INC . , 1994 .

[10] 刘明波 , 陈学军 . 电力系统无功优化的改进内点算法 [J]. 电力系统自动化 , 1998 , 22 (5) : 33 ~ 36 .

Application of Evolution Strategy Methods to
Reactive Power Optimization of Power Systems

DONG Feng , JU Ping

(College of Electrical Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Evolution strategy(ES) methods , which have many advantages , are applied to optimization of reactive power in power systems . The integer and continuous variables are dealt with different mutation approaches . Application results of show that the methods have good convergence and strong adaptation and facilitate the optimal solution .

Key words : power systems ; optimization of reactive power ; evolution strategy