

基于混沌优化算法的电力系统无功优化

赵涛, 熊信银, 吴耀武

(华中科技大学电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 混沌优化利用混沌变量的特定内在随机性和遍历性来跳出局部最优点, 而线性搜索可以提高局部空间的搜索速度和精度。本文将基于线性搜索的混沌优化算法用于电力系统无功优化。应用该算法对 IEEE6、14、30 节点系统进行了无功优化计算, 结果表明该算法是正确可行的。

关键词: 电力系统; 无功优化; 混沌优化; 线性搜索

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)03-0020-03

1 概述

电力系统无功优化是电力系统的重要研究内容。无功优化以保证电力系统电压质量为前提, 利用无功补偿来改变全网潮流, 使系统的有功损失和无功补偿费用最小。无功优化配置是一个复杂的非线性、非连续性约束优化问题, 其目标函数不能表达成控制变量的显式函数。

近期出现了一种新型的直接搜索优化算法—混沌优化算法。它直接采用混沌变量在允许解空间进行搜索, 搜索过程按混沌运动自身规律进行。与按某种规律接受“劣解”跳出局部最优解的优化算法(如 SA)相比, 混沌优化更容易跳出局部最优解, 且搜索效率高, 适合完成全局优化搜索。

文[2]将混沌优化应用到水电站厂内经济运行中, 文[3]将混沌优化应用到电力系统经济负荷分配中, 都取得了良好的效果。

本文将混沌优化算法应用到电力系统无功优化中来, 对 IEEE6、14、30 节点系统进行了无功优化计算, 结果表明该算法是正确可靠的。

2 混沌优化算法^[7,8]

混沌优化作为一种直接搜索算法, 其缺点是局部优化效果不理想。自然的想法是把混沌优化的全局搜索能力与一般的局部搜索算法相结合。鉴于混沌优化方法的一个重要特点是不要求优化问题具有连续性和可微性, 若采用一般的局部优化算法, 如最速下降法等梯度寻优算法, 则会降低混沌优化的特点。为此, 提出一种改进的混沌优化方法, 利用在混沌搜索中得到的先验知识, 通过线性搜索在局部搜索空间加速最优解的收敛解的收敛速度, 提高解的精度。

2.1 问题描述

无功优化为一类非线性约束优化问题, 可描述为:

$$\begin{cases} \min f(X) \\ \text{s. t.} & g_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, m_a \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X \in R^n$ 和 $f(X)$ 是目标函数, m_a 为等式约束个数, m_b 为不等式约束个数, 优化问题(1)的可行域是有界的。对于约束优化问题, 需要先对变量取值范围有一个合理估计 $[a, b]$ 。对于实际问题而言, 通常是可以做到的。

对于约束处理, 一般采用罚函数法, 把原问题转换为以罚函数为目标函数的新的无约束优化问题。混沌优化不要求优化问题可微、连续。

2.2 基于线性搜索的混沌优化算法

混沌变量的产生, 常用如下的 Logistic 模型:

$$x^{k+1} = x^k(1 - x^k), x^k \in [0, 1] \quad (2)$$

其中 μ 是控制参数, 当 $\mu = 4.0$ 时, 上式进入混沌状态, 具有混沌的一般特性。对于 n 维优化问题, 任意设定 $(0, 1)$ 区间的 n 个相异的初值, 但不能为 0.25, 0.5 和 0.75。

在基于线性搜索的混沌优化算法中, 利用前 N_1 次搜索到的局部最优点 X_{old}^* , 与再做 N_1 次搜索找到的局部最优点 X^* 进行比较, 若 $|X_{old}^* - X^*| > \epsilon$, 则沿方向 $P = X^* - X_{old}^*$, 从 X^* 出发作线性搜索求出 X^0 , 用 X^0 代替 X^* 。由于利用了下降法, 所以可加快算法的收敛速度, 并可提高解的精度。

3 无功优化数学模型

无功优化的目标函数包括技术性能指标和经济指标, 可以是: (1) 无功补偿容量最小; (2) 有功网损

最小;(3)电压质量最好;(4)系统总的费用最省等。

考虑上述情况,无功优化数学模型的目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_c} Q_{Ci} + P_L + \sum_{j=1}^{N_d} \left[\frac{U_j}{U_{j,\max} - U_{j,\min}} \right]^2 + \sum_{k=1}^{N_g} \left[\frac{Q_k}{Q_{k,\max} - Q_{k,\min}} \right]^2 \quad (3)$$

$$U_j = \begin{cases} U_j - U_{j,\max} & U_j > U_{j,\max} \\ 0 & U_{j,\min} < U_j < U_{j,\max} \\ U_{j,\min} - U_j & U_j < U_{j,\min} \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_k = \begin{cases} Q_k - Q_{k,\max} & Q_k > Q_{k,\max} \\ 0 & Q_{k,\min} < Q_k < Q_{k,\max} \\ Q_{k,\min} - Q_k & Q_k < Q_{k,\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: i 为节点 i 无功补偿年费用系数; N_c 、 N_d 、 N_g 分别为补偿节点总数、负荷节点总数、发电机节点总数; Q_{Ci} 为节点 i 无功补偿容量; P_L 为系统有功损耗; U_j 、 $U_{j,\max}$ 、 $U_{j,\min}$ 分别为节点电压、电压上限值和下限值; Q_k 、 $Q_{k,\max}$ 、 $Q_{k,\min}$ 分别为发电机节点 k 的无功出力、无功出力的上限值和下限值; λ_1 为负荷节点电压越界惩罚系数; λ_2 为发电机无功出力越界惩罚系数。

在目标函数中:第一项为无功补偿费用;第二项为有功损耗费用;第三项为对负荷节点电压越界的罚函数;第四项为对发电机无功出力越界的罚函数。

功率约束方程,即潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^N U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), & i = 1, \dots, N \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = \sum_{j=1}^N U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机节点的有功功率和无功功率出力; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为负荷节点的有功和无功负荷功率; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳和电压相角差; N 为总节点数。

变量约束可分为控制变量约束和状态变量约束。选取发电机端电压 U_G 、无功补偿节点补偿容量 Q_C 、变压器分接头 T_t 为控制变量,发电机无功出力 Q_G 、负荷节点电压 U_D 和线路无功功率 q_b 作为状态变量。

控制变量的约束:

$$\begin{cases} U_{Gi,\min} & U_{Gi} & U_{Gi,\max} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ Q_{Cj,\min} & Q_{Cj} & Q_{Cj,\max} & j = 1, 2, \dots, N_c \\ T_{tk,\min} & T_{tk} & T_{tk,\max} & k = 1, 2, \dots, N_t \end{cases} \quad (7)$$

状态变量的约束:

$$\begin{cases} Q_{Gi,\min} & Q_{Gi} & Q_{Gi,\max} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ U_{Dj,\min} & U_{Dj} & U_{Dj,\max} & j = 1, 2, \dots, N_d \\ q_{bl,\min} & q_{bl} & q_{bl,\max} & l = 1, 2, \dots, N_b \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{Gi} 、 $U_{Gi,\max}$ 、 $U_{Gi,\min}$ 分别为发电机节点的端电压、端电压上限值和下限值; Q_{Cj} 、 $Q_{Cj,\max}$ 、 $Q_{Cj,\min}$ 分别为无功补偿节点补偿容量、补偿容量的上限值和下限值; T_{tk} 、 $T_{tk,\max}$ 、 $T_{tk,\min}$ 分别为变压器可调分接头、分接头上限值和下限值; Q_{Gi} 、 $Q_{Gi,\max}$ 、 $Q_{Gi,\min}$ 分别为发电机节点无功出力、无功出力上限值和下限值; U_{Dj} 、 $U_{Dj,\max}$ 、 $U_{Dj,\min}$ 分别为负荷节点的电压、电压上限值和下限值; q_{bl} 、 $q_{bl,\max}$ 、 $q_{bl,\min}$ 分别为支路无功潮流、无功潮流的上限值和下限值; N_t 、 N_b 分别为变压器可调分接头数、网络支路数。

4 程序优化过程

(1) 读取原始数据,获得节点信息和支路信息,获得控制变量的个数 n 及其各自的取值范围;

(2) 混沌变量初始化:取 n 个 $(0, 1)$ 之间,有微小差异的初值(不能为 0.25, 0.5 和 0.75)。用式(2)的 Logistic 模型生成 n 个 $(0, 1)$ 分布的混沌变量序列 x_j , $j = 1, 2, \dots, n$ 。并取 N_1 和 N_2 为较大的整数。

(3) 用混沌变量进行迭代搜索:

将混沌变量变换到无功优化问题的允许解空间 $X_j^k = a_j + x_j^k (b_j - a_j)$, 其中 a_j 、 b_j 分别为相应控制变量的上下限;

如果当前的目标函数值小于已有的最优值,即 $f(X^k) < f^*$, 则保留已有最优点、当前点及相应的最优目标函数值 $X_{old}^* = X^*$, $X^* = X^k$, $f^* = f(X^k)$;

如果 f^* 经 N_1 步搜索后保持不变,且 $X_{old}^* - X^* > \epsilon$, 则转步骤(4), 否则继续迭代搜索。

(4) 求 $P = X^* - X_{old}^*$, 记容许集合为 R , 做线性搜索:

$$\begin{aligned} f(X) &= \min\{f(X^* + P) \mid X^* + P \in R\} \\ X_{old}^* &= X^*, X^* = X, f^* = f(X) \end{aligned}$$

(5) $m = m + 1$, 如果 $m > N_2$, 则终止搜索, 此时 X^* 即为全局最优点, f^* 为得到的最优解; 否则转步骤(3)。

5 算例及结果分析

图 1 为 IEEE6 节点系统接线图, 线路参数均在图上标注, 具体数据详见文献[6]。参数的基准容量

为 100 MVA。为比较起见,以网损最小为目标,进行无功优化计算。节点 4 和节点 6 为无功补偿点。

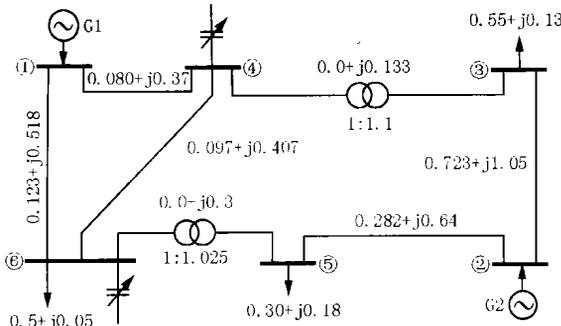


图 1 IEEE6 节点系统接线图

Fig. 1 IEEE6 system connection diagram

该系统初始潮流及优化结果如表 1 所示。

表 1 初始潮流及优化计算结果

Tab. 1 Original load flow and optimization result

变量名称	初始潮流	Box 优化 ^[4]	MISA 优化 ^[6]	混沌优化	
变压器变比	T_{56}	1.025	0.9539	0.9493	0.9530
	T_{43}	1.100	0.9841	0.9834	0.9865
发电机电压	U_{G1}	1.05	1.0935	1.1000	1.1000
	U_{G2}	1.10	1.1452	1.1417	1.1413
无功补偿容量	Q_{C4}	0.00	0.050	0.050	0.050
	Q_{C6}	0.00	0.055	0.055	0.055
发电机无功出力	Q_{G1}	0.3707	0.3284	0.392	0.388
	Q_{G2}	0.3428	0.1736	0.165	0.169
负荷节点电压	U_{D3}	0.8580	1.0029	1.002	1.000
	U_{D4}	0.9550	1.0047	1.004	1.004
	U_{D5}	0.9020	1.0023	1.002	1.000
	U_{D6}	0.9350	0.9875	0.984	0.986
有功网损		0.1145	0.0880	0.0886	0.0885

IEEE14、30 节点系统的数据见文献[4,5],应用本文的方法,IEEE14 节点系统优化后的有功网损为 12.44 MW,IEEE30 节点系统优化后的网损为 4.90 MW,与文献[4]的结果是一致的。由此可以看出,混沌优化用来求解电力系统的无功优化问题是实际有效的。

6 结论

混沌优化算法不要求优化问题具有连续性和可微性,而且有良好的全局寻优能力,线性搜索的运用使得该算法的局部寻优能力得到了改善。将该算法应用于电力系统的无功优化计算,取得了很好的效果。用混沌优化算法求得的优化结果令人满意,但是需要花费比较长的计算时间,在计算 IEEE30 节点系统的时候表现得尤为明显。其原因主要是:

(1) 随着系统规模的增大,每次潮流计算所需

的时间也在增加;

(2) 混沌优化算法从本质上来讲还是属于随机搜索算法,虽然加入了线性搜索以改进其局部搜索能力,但要使算法收敛仍需要比较长的时间。

原因(2)其实也是所有全局优化算法面临的问题,即只能在性能和时间之间取一个折衷。

本文只是对混沌优化算法在电力系统无功优化领域的应用做了一点尝试。实际上,利用混沌优化良好的全局寻优能力,结合如 GA、SA 等智能算法,将使混沌优化技术在优化领域的应用前景更加广阔。

参考文献:

- [1] 侯煦光,等. 电力系统最优规划[M]. 华中理工大学出版社,1991.
- [2] 蒋传文,权先璋,张勇传. 水电站厂内经济运行中的一种混沌优化算法[J]. 华中理工大学学报,1999,27(12): 39 - 40.
- [3] 唐巍,李殿璞. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10): 36 - 40.
- [4] 黄华,熊信良,吴耀武,等. 基于 Box 算法的无功优化配置[J]. 电力系统自动化,2000,24(20): 32 - 36.
- [5] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(5): 1147 - 1153.
- [6] 王洪章,熊信良,吴耀武,等. 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术,2002,26(1): 15 - 18.
- [7] 张春慨,等. 基于线性搜索的混沌优化及其在非线性约束优化问题中的应用[J]. 控制与决策,2001,16(1): 123 - 126.
- [8] 张春慨,等. 改进混沌优化及其在非线性约束优化问题中的应用[J]. 上海交通大学学报,2000,34(5): 593 - 599.

收稿日期: 2002-08-29

作者简介:

赵涛(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划方法及其应用;

熊信银(1945-),男,教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划及电力系统谐波分析;

吴耀武(1963-),男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划。

(下转第 25 页)

当所有相的电流降低到正常电流的 5 % 的时间大于预先设定的“冷备用负荷启动前的停运时间”时,启动冷备用状态并调整过电流的整定值。冷备用状态的触发可以采用设置逻辑输入“Cold Load Pickup”。在有一相的电流恢复到大于正常电流的 10 % 后,过电流的整定值回到正常值;并且,等于“冷备用启动闭锁时间”的延时计时器停止计时。

可以设定两个继电器,一个为低电流继电器,当电流值低于额定电流的 5 % 时,继电器动作,表明进入冷备用状态;另一个继电器为时间继电器,低电流继电器一旦动作,则马上启动时间继电器进行计时,一旦计时器的时间大于预先设定的冷备用负荷启动前的停运时间,则表明该线路进入冷备用状态,按照上述曲线,自动调整过电流保护的整定值。低电流继电器的返回电流设定为额定电流的 10 %,即一旦检测到的电流值大于额定电流的 10 %,则说明线路回到正常运行状态,电流保护的整定值恢复到原有的线路的整定值。

6 结论

本文所提的方案已研制成样机,理论分析与实验表明,该方案具有高精度、高可靠性等优点,由于

采用 DSP 技术,软硬件设计先进,保护装置具有体积小、功能全、抗干扰能力强等特点,适用于中低压输电线路,完全可作为综合自动化系统的一部分。

参考文献:

- [1] 姚致清. 集成电路馈线保护装置[J]. 继电器, 1993, 21(1): 25-30.
- [2] 杨仪松. 具有最小定时限特性的反时限过流保护[J]. 电力系统自动化, 1992, 16(4): 27-32.
- [3] 伍叶凯, 邹东霞. 适用于输电线路的单片机反时限过电流保护[J]. 继电器, 1996, 24(4): 21-25.

收稿日期: 2002-06-17

作者简介:

刘为(1971-),男,讲师,从事电力系统及其自动化的研究及教学工作;

范春菊(1967-),女,副教授,博士研究生,从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作;

张兆宁(1964-),男,副教授,研究方向为小波分析、神经网络及其应用;

郁惟镛(1940-),男,教授,博士生导师,从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作。

Discussion of inverse overcurrent protection for transmission line in distribution system

LIU Wei¹, FAN Chun-ju¹, ZHANG Zhao-ning², YU Wei-yong¹

(1. Dep. of electrical engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Air traffic management college, Civil aviation university of china, Tianjin 300300, China)

Abstract: The traditional implementation methods of inverse overcurrent protection such as zonal table-lookup method, interpolation method and their error characteristic are discussed. On this basis, Cold pick up scheme of the inverse overcurrent protection suitable for the distribution system was proposed. We make full use of DSP technology to implement the inverse curve and propose a new method to calculate the operation time of the protection on the base of DSP. This method can in real time calculate the operation time of the overcurrent protection according to the fault current. The EPROM needed is small; calculation is fast and accurate. This scheme is very practicable in automation technology of distribution system.

Key words: inverse overcurrent protection; zonal table-lookup; error characteristic; calculation of time

(上接第 22 页)

Reactive power optimization of power system based on chaos optimization algorithm

ZHAO Tao, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The chaos optimization algorithm takes advantage of the intrinsic stochastic property and ergodicity of chaos movement to escape from the local minima. The local search ability of linear search can speed up the rate of convergence. Chaos optimization algorithm based on linear search is applied to the reactive power optimization problem in this paper. Optimization result of IEEE6, 14, 30 system show that the algorithm is correct and reliable to solve the reactive power optimization problem.

Key words: power system; reactive power optimization; chaos optimization; linear search