

基于遗传算法的水火电混合电力系统短期发电计划优化

王亚娟, 熊信良

(华中理工大学电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在改进传统遗传算法的基础上,提出了水火电混合电力系统短期发电计划优化问题的数学模型和求解方法。模型计及了水电机组的发电流量、净水头和输出功率间的非线性关系,水电系统中多级水库的水流延迟等因素。算例表明本算法能更有效地达到或接近全局最优解,对编制大型水火电混合电力系统的日调度计划有实用价值。

关键词: 水火电混合电力系统; 短期发电计划; 遗传算法

中图分类号: TM715; TM61

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)10-0021-04

1 引言

现代电力系统中通常包含火电、水电、原子能和抽水蓄能等多种发电厂,由两种及以上发电厂组成的电力系统称为混合电力系统。电力系统发电计划优化是电力系统经济运行的一项任务,它是指在满足系统负荷需求和其他约束条件的前提下,合理安排各类机组的出力,使整个系统在未来计划周期内的总费用最小。在短期发电计划优化中,一般假设火电的开机方式已定,水库在计划时段末的水位根据水库的中期计划确定。目前,混合电力系统短期发电计划优化问题的求解方法有等微增率法、动态规划法、拉格朗日协调求解法等^[1]。这些方法不同程度地对问题进行了简化,以减少计算量。因此这些方法只能得到问题的局部最优解。为了得到全局最优解,可采用穷举法、模拟退火法和遗传算法。其中穷举法由于存在“维数灾”问题,未能得到实际应用。模拟退火法和遗传算法是利用随机化技术来指导全局最优解的高效搜索方法,已有一些研究者将其应用于机组优化组合、无功优化和电网规划等许多方面,但大部分仅限于纯火电系统。

本文在改进简单遗传算法和研究水火电混合电力系统短期运行特点的基础上,提出了一种水火电混合电力系统短期发电计划优化的遗传算法模型,并给出了具体求解方法。通过与常规算法比较,表明本文所提出的数学模型和算法是可行的。

2 简单遗传算法的改进

遗传算法的核心是选择、杂交和变异等遗传操作。以赌轮选择、随机配对、一点杂交、群体中允许有相同个体存在为特点的遗传算法称为标准遗传算法,也称为简单遗传算法^[2](SGA-Simple Genetic Algorithm)。文献^[2]已经证明SGA不能以概率“1”收敛至全局最优解。针对混合电力系统短期发电计划优化问题计算规模大、变量取值范围大的特点,本文对SGA进行了部分改进。

2.1 采用“起始权”编码法

在遗传算法中,将十进制数据转换为二进制数据称为编码。在实际问题中,整型变量很容易转换为二进制数据。对于实型变量,通常将变量的取值范围划分为 N 段,用 $0 \sim N-1$ 表示,再将各段序号转换为二进制数据。若 N 一定时,取值范围的大小将对转换精度影响较大。为了充分保证转换精度,本文采用一种称为“起始权”编码方法。

设某变量二进制串的长度为 N ,将二进制串的第一位规定为符号位,例如用 0 表示该数为正数, 1 表示该数为负数,剩余 $N-1$ 位表示该数绝对值的编码。若起始位的权因子为 2^X ,则从前到后各位的权因子依次为 $2^{X-1}, \dots, 2^{X-N+2}$ 。当 N 一定时,转换精度仅取决于 X 的大小,可以最大限度地保证转换精度,并且对变量取值范围无限制。 X 根据变量取值范围上下限的绝对值中较大者与 2 的整数倍确定。

Abstract: Based on the recursive principle, a new algorithm is presented in this paper to modify nodal impedance matrix in power systems with variable configurations. Complex matrix operations necessary for available algorithms are completely avoided. The recursive algorithm proposed has good calculation efficiency and it is easy to program.

Key words: power system computation; nodal impedance matrix; recursive algorithm

2.2 设置保留算子

为了保证遗传算法能以概率“1”收敛至全局最优解,本文在SGA中引入了保留算子。即在遗传操作结束后,用父代中若干最优个体直接随机替代子代中的个体。数学上可以证明作此改进后遗传算法能以概率“1”收敛至全局最优解^[2]。

2.3 采用一点变异和交换变异相结合

在遗传算法中有一点、二点或多点变异^[3],但在遗传学中还存在染色体中任意二位,特别是相邻的二位互换遗传信息现象,本文称这种变异为“交换”变异。如将下列染色体左起第3位与第4位进行交换变异,得到新的染色体。

$$1001010 \Rightarrow 1010010$$

同自然界一样,发生交换变异的概率较小,本文取为 P_m/NN , P_m 为一点变异概率, NN 为染色体长度,向前或向后交换的概率均等。

2.4 采用自适应杂交和变异概率

为了提高遗传初期的繁殖效率和在后期防止收敛于局部最优解,文献^{[3][4]}都提出了采用可变的杂交和变异概率的方法。但前者的概率只能做线性变化,灵活性不高,而后者根据个体适应度的分散程度做自适应调整,计算量较大。本文根据染色体差异率使杂交和变异概率做自适应变化,以减少计算量,提高寻优速度。差异率是指每个个体与最优个体的二进制码链的差异,即

$$\text{差异率} = \frac{N}{i=1} D_i / (NN \times N)$$

式中, D_i 为每个个体二进制码链中与最优个体有差异的位数, N 为个体总数, NN 为染色体长度。

差异率越大,杂交概率越大,变异概率越小;反之,差异率越小,杂交概率越小,变异概率越大。杂交概率和变异概率分别用指数下降法和指数上升法来确定。

3 遗传算法用于水火电混合电力系统短期发电计划优化

3.1 水火电电力系统短期发电计划优化问题的数学描述

(1) 目标函数

要求系统在计划周期 T 内各火发电机组的总耗量为最小,目标函数可表达为

$$\min_{t, R_S} F_i(P_S(i, t)) \quad (1)$$

式中, $P_S(i, t)$ 为火电机组 i 在 t 时段的输出功率; $F_i(P_S(i, t))$ 为火电机组 i 的运行耗量, $F_i(P_S(i,$

$t)) = a_i P_S^2(i, t) + b_i P_S(i, t) + c_i$, a_i, b_i, c_i 为运行耗量特性参数; R_S 为混合电力系统中火电机组或等值火电机组集合;

(2) 功率平衡约束

在整个优化时段内,系统所有机组的输出功率必须与系统负荷和网损平衡,即

$$\sum_{i \in R_S} P_S(i, t) + \sum_{j \in R_h} P_h(j, t) = P_D(t) + P_L(t) \quad (2)$$

式中, R_h 为混合电力系统中水电机组或等值水电机组集合; $P_h(j, t)$ 为水电机组 j 在 t 时段的输出功率; $P_D(t)$ 为 t 时段系统负荷; $P_L(t)$ 为 t 时段系统网损。

(3) 发电机组输出功率的上、下限约束

$$\begin{aligned} P_S(i, t) & \in [P_S(i, t)^{\min}, P_S(i, t)^{\max}] \\ P_h(j, t) & \in [P_h(j, t)^{\min}, P_h(j, t)^{\max}] \end{aligned} \quad (3)$$

(4) 火电机组的响应约束

$$-r_{di} * 60 \leq (P_S(i, t) - P_S(i, t-1)) \leq r_{ri} * 60 \quad (4)$$

式中, r_{di}, r_{ri} 为火电机组 i 每分钟输出功率的允许的最大下降速度和最大上升速度。

(5) 水电系统约束

(a) 库容与发电流量约束

$$\begin{aligned} V_h(i, t) & \in [V_h(i, t)^{\min}, V_h(i, t)^{\max}] \\ Q_h(i, t) & \in [Q_h(i, t)^{\min}, Q_h(i, t)^{\max}] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $V_h(i, t)$ 为水库 i 在 t 个时段末的库容; $Q_h(i, t)$ 为水库 i 在 t 时段的发电流量。

(b) 优化周期开始、结束时库容约束

$$\begin{aligned} V_h(i, t) |_{t=0} &= V_i^{\text{Begin}} \\ V_h(i, t) |_{t=T} &= V_i^{\text{End}} \end{aligned} \quad (6)$$

(c) 有水力联系的水库库容递推方程

$$\begin{aligned} V_h(i, t) &= V_h(i, t-1) - Q_h(i, t) - S_h(i, t) + \\ & \sum_{m \in R_u} [Q_h(m, t-1) + S_h(m, t-1) - S_h(m, t)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中, (i, m) 为直接位于水库 i 上游的水库 m 的水流流达时间; $S_h(i, t)$ 为水库 i 在 t 时段的泄洪流量。 R_u 为直接位于水库 i 上游的水库集合。

(d) 水电机组发电特性

水电机组的出力与水库特性和发电流量有关,一般表示为净水头 H 、库容 V 和发电流量 Q 的函数,若用库容 V 表达净水头 H ,其特性可表示为:

$$P_h(i, t) = C_{1,i} V_h^2(i, t) + C_{2,i} Q_h^2(i, t) + C_{3,i} V_h(i, t) \cdot Q_h(i, t) + C_{4,i} V_h(i, t) + C_{5,i} Q_h(i, t) + C_{6,i} R_h \quad (8)$$

式中, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为水电机组发电特性系数。

因此,水火电混合电力系统短期优化问题在数学上讲就是在约束条件(2)~(8)下求目标函数(1)的极小值。这是一个有多个连续变量的非线性规划问题,也是一个多时段决策的全局优化问题。在优化过程中,不仅要考虑机组运行的经济特性(包括运行耗量、水电系统的运行特点),还要考虑运行技术上的各种限制。

3.2 求解方法

(1) 编码方法

本文以水库的发电流量 $Q_h(i, t)$ 为状态变量,二进制长度取 32 位,采用“起始权”编码法。

(2) 对约束条件的处理

对水电机组发电流量的限制,处理方法是在产生初始群体时,按照各水库的上下限产生随机解;在迭代过程中,产生新个体后,对发电流量上下限进行检查,不满足约束条件时,认为该解无效,重新进行遗传操作,直到产生可行解,以提高搜索的效率和解的质量。对其它约束条件,采用罚函数与目标函数构成增广函数:

$$AF = \sum_i F_i [P_S(i, t) + (P_S(i, t)) + (P_S(i, t))] + \sum_i R_h [(V_h(i, t)) + (V_h(i, t = T)) + (P_h(i, t))]$$

式中, $(V_h(i, t))$ 为水库 i 在 t 时段库容越上下限的罚函数; $(V_h(i, t = T))$ 为水库 i 在优化周期末库容与计划值的偏差的罚函数; $(P_h(i, t))$ 为水电机组输出功率超越上下限的罚函数; $(P_S(i, t))$ 为火电机组输出功率越上下限的罚函数; $(P_S(i, t))$ 为火电机组在相邻时段输出功率变化值越上下限的罚函数。

(3) 适应函数取为增广函数的倒数,即 $F = 1/AF$ 。

3.3 计算流程

(1) 产生初始群体,即随机产生一组水火电混合电力系统中所有水电机组在各时段的发电流量;

(2) 根据各机组的发电流量和水电机组的出力特性,计算各机组在各时段的输出功率;

(3) 根据功率平衡方程,计算火电厂的总出力;

(4) 优化各火电机组的输出功率;

(5) 计算系统火电厂的总耗量;

(6) 计算各时段末各水库库容;

(7) 检查各种约束条件,计算惩罚费用;

(8) 计算每个个体的增广函数值;

(9) 计算每个个体的适应值,评价各个体;

(10) 若满足收敛条件,则计算结束;

(11) 进行遗传操作,形成下一代个体;

(12) 重复第(2)~(11)步;

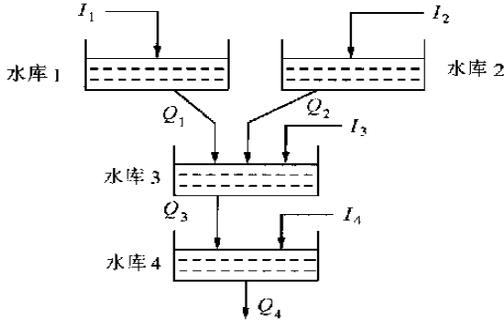
4 算例

本文以文献^[5]的系统为算例,系统中有 1 个等值火电厂和 4 个水电厂,火电厂的等值机组的运行

表 1: 基于遗传算法的日调度计划

小时	水电机组(MW)				火电(MW)	小时	水电机组(MW)				火电(MW)
	1	2	3	4			1	2	3	4	
1	85.8	65.4	49.3	228.6	940.8	13	100.6	81.8	0	182.4	1865.1
2	57.6	81.3	50.3	233.1	967.7	14	81.8	57.1	52.0	216.2	1793.0
3	85.1	61.4	0	203	1010.5	15	92.6	61.5	45.3	228.1	1702.5
4	96.6	47.8	50.1	164.1	931.4	16	55.0	49.3	57.7	236.5	1671.5
5	86.7	59.9	50.1	176.0	917.4	17	54.5	65.7	46.4	251.7	1711.7
6	64.9	65.7	57.5	195.2	1026.8	18	78.8	69.5	0	245.2	1746.5
7	81.0	64.4	54.8	191.6	1258.2	19	75.8	60.4	55.8	272.9	1778.8
8	67.4	61.5	57.1	214.2	1599.9	20	63.1	71.0	52.1	224.6	1869.2
9	70.8	62.6	59.9	214.2	1832.4	21	80.7	53.3	52.3	223.6	1830.1
10	58.9	44.8	39.0	201.1	1976.2	22	75.0	62.9	53.9	259.4	1668.7
11	75.3	49.6	29.8	206.3	1869.1	23	61.9	43.5	56.6	263.3	1424.7
12	67.2	47.8	0	214.4	1980.6	24	102.6	75.5	18.7	296.2	1097.1

耗量由 $F(P_S(i, t)) = 0.002 P_S^2(i, t) + 19.2 P_S(i, t) + 5000$ 确定, 4 个水电厂之间的水力联系如图 1 所示。限于篇幅, 算例中系统的负荷预计、水电机组发电特性系数、水库自然入库流量、水库库容限制见文献^[5]。



I_i 为水库 i 的自然入库流量;

Q_i 为水库 i 的发电流量。

水电厂	1	2	3	4
直接位于上游的水库数	0	0	2	1
水流流达时间(h)	2	3	4	0

图 1 水电系统示意图

该水电系统有如下特点:

(1) 水电厂之间有水力联系, 所有自然水流量最后都汇集到一条河流;

(2) 上游水库的水流流达时间各不相同;

(3) 各水库的水头变化较大, 水库的调节能力各不相同。

采用个体数为 100, 经过 100 次迭代, 应用本方法得到的系统各机组出力曲线如表 1 所示, 系统的运行费用为 937479。若采用常规的动态规划法, 以

4 个水库的发电流量为状态变量, 以运行费用为决策变量, 得到最小运行费用为 948865。由此可见, 采用本文的遗传算法, 可以减少运行费用约 1.2%。

5 结论

本文对水火电混合电力系统短期发电计划优化问题进行了研究, 建立了相应的遗传算法数学模型, 模型中考虑了水电系统的多种特性, 并提出了具体的求解方法。该方法能可靠、快速地搜索到全局最优解, 使遗传算法能运用于电力系统日发电计划的编制, 有助于提高电网经济运行水平。但对水电系统中抽水蓄能电站、梯级调度的水电站群等问题, 还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张勇传, 等. 水电系统最优控制. 华中理工大学出版社, 1999, 11.
- [2] 刘勇, 等. 非数值并行算法—遗传算法. 科学出版社, 1995, 8.
- [3] 蔡超豪, 等. 机组优化组合的遗传算法. 电网技术, 1997, (12).
- [4] 刘青松. 改进遗传算法确定发电机组的优化组合. 电网技术, 1997, (1).
- [5] Wang, C., Shahidehpour, S M. Power generation scheduling for multi-area hydrothermal power systems with tie-line constraints, cascaded reservoirs and uncertain data. IEEE Trans PWRs, 1993, 8(3).

收稿日期: 2000-03-24

作者简介: 王亚娟(1974-), 女, 在职硕士研究生, 研究方向为电力系统经济运行; 熊信良(1945-), 男, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化、电力系统最优规划。

A genetic algorithm on short term optimal scheduling for a hydrothermal system

WANG Yrjuan, XIONG Xin-yin

(Huazhong University of Science and Technology, 430074 Wuhan)

Abstract: Based on improvement in the Simple Genetic Algorithm, a genetic algorithm model and solution technique on optimization of short term generation schedule in a hydrothermal power system is presented in the paper. Hydro generator with a nonlinear relationship between water discharge rate, net head and power generation is considered. The water transport delay between connected reservoirs in a multi-reservoir cascaded hydro-electric system is also taken into account. It is shown the model can find optimal solution more efficiently. It is worth considering in application to determine the daily generation schedule in a large-scale hydrothermal power system.

Key words: hydrothermal power system; short term generation schedule; genetic algorithm