

梯级水电站长期多目标模糊优化调度新模型

胡国强, 贺仁睦

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 梯级水电站不仅要满足电力系统运行要求, 还要考虑发电和用水之间的协调, 才能使综合效益最大化。提出一种兼顾年发电量和运行成本的梯级水电站长期多目标优化调度新模型。通过分别求解各个单目标优化问题和定义各单项目标的隶属度函数, 把多目标问题模糊化; 采用对各单项目标优化的目标值在一定范围内伸缩的方法来体现决策者的主观意愿; 利用模糊最大满意度方法把多目标优化问题转化为单目标非线性规划问题; 并构建了一种动态调整惯性因子的自适应粒子群算法。仿真计算验证了模型的正确性和求解方法的可行性, 多目标模型比单目标模型获得了更佳的综合效益, 模糊优化处理方法避免了目标权重选取的人为任意性, 同时自适应粒子群算法计算速度快、收敛精度高。

关键词: 梯级水电站; 多目标优化; 模糊最大满意度; 粒子群算法

中图分类号: TV 697.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0023-05

0 引言

梯级水电站的优化运行是电力系统中的重要内容, 数学上, 梯级水电站长期优化调度是一个大型、高维的复杂非线性规划问题, 求解时非常复杂。文献[1-2]建立的年发电量最大的模型会使水电站运行效率较高, 要么在高效率区运行, 要么就停机, 降低了整个电力系统的经济性, 影响了电力系统的安全稳定运行。文献[3]以整个梯级水电站耗水量最小为优化目标, 容易导致放空高水头水库, 造成无水可调的现象, 不利于充分发挥水电站的运行特点。文献[4-5]从能量的观点出发, 建立了以梯级水电站总蓄能最大的优化调度模型, 抓住了问题的本质, 具有一定的实用价值, 但存在容易放空末级水库的弊病。文献[6]建立了以保证出力和发电量为目标的多目标模型, 应用分层的方法求解, 本质上是以保证出力为强制约束条件的单目标模型, 没有真正体现多目标优化中各个目标的相互协调作用。文献[7]应用模糊多目标动态规划的方法, 在系统规模较大时, 存在维数灾的缺陷。

梯级水电站不仅要满足电力系统的运行要求, 而且要节约水力资源, 才能使综合效益最大化, 充分发挥梯级水电站的运行特点。提出一种兼顾年发电量和一级水电站水库耗水量要求的梯级水电站长期多目标优化调度模型。通过分别求解单目标模型和定义目标的隶属度函数, 得出多目标模糊满意度表达式; 利用模糊集理论中的最大最小准则, 把多目标模型转化为单目标模型行求解。并构建了一种动态

调整惯性因子的自适应粒子群算法 SAPSO(Self-Adaptive Particle Swarm Optimization)。算例计算结果表明了模型的合理性和求解方法的可行性, 多目标模型比单目标模型更能准确地反映梯级水电站的综合运行情况, 较好地协调了不同任务的要求。

1 梯级水电站长期多目标模糊优化调度模型

1.1 优化准则

梯级水电站既有电力联系又有水力联系, 其中的一级水电站水库水头高、库容大、调节性能好, 是整个梯级的龙头水电站和命脉。一级水电站水库的蓄放水过程, 将直接影响着整个梯级水电站的安全运行和经济性能。

从梯级水电站发电效益和运行成本考虑, 选取的优化准则为: 在满足梯级水电站安全和各种约束条件的前提下, 如何选择蓄放水策略, 使得整个梯级水电站在调度周期(1年)内发电量最大和一级水电站水库耗水量最少。

1.2 长期多目标优化调度模型

目标函数:

$$\max f_1 = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N A_i Q_i^t H_i^t M_t \quad (1)$$

式中 f_1 是年发电量; t 是时段变量; T 是调度周期的时段数, $T=12$; i 是水电站编号变量; N 是水电站数目; A_i 是 i 电站的综合出力系数; Q_i^t 是 i 电站在 t 时段的平均发电流量; H_i^t 是 i 电站在 t 时段的平均发电净水头; M_t 是 t 时段的小时数。

$$\min f_2 = \min \sum_{t=1}^T (Q_i^t - q_i^t) \Delta t \quad (2)$$

式中 f_2 是一级水电站水库耗水量; Q_t^1 是一级水电站在 t 时段的平均发电流量; q_t^1 是一级水电站在 t 时段的来水流量; Δt 是计算时段长度。

约束条件:

a. 水量平衡约束

$$\begin{aligned} V_t^1 &= V_{(t-1)}^1 + (q_t^1 - Q_t^1 - S_t^1) \Delta t \\ V_t^i &= V_{(t-1)}^i + (q_t^i + Q_{(t-1)}^{(i-1)} + S_{(t-1)}^{(i-1)} - Q_t^i - S_t^i) \Delta t \quad (3) \\ \forall t \in T, i \geq 2 \end{aligned}$$

式中 V_t^1 、 V_t^i 分别是一级水电站、 i 电站在 t 时段末的水库蓄水量; q_t^i 是 i 电站在 t 时段的区间来水; S_t^1 、 S_t^i 分别是一级水电站、 i 电站 t 时段的弃水量。

b. 防洪限制约束

$$V_t^i \leq VM_t^i, \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中 在汛期, VM_t^i 是 i 电站的防洪限制水位对应的水库蓄水量; 非汛期, VM_t^i 是 i 电站正常蓄水位对应的水库蓄水量。

c. 水电站出力约束

$$N_{\min}^i \leq A_i \cdot Q_t^i \cdot H_t^i \leq N_{\max}^i, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中 $N_{\min}^i$ 、 $N_{\max}^i$ 分别是 i 电站的最小、最大出力。

d. 水库流量约束

$$Q_{t\min}^i \leq Q_t^i \leq Q_{t\max}^i, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中 $Q_{t\min}^i$ 、 $Q_{t\max}^i$ 分别是 i 电站在 t 时段的允许下泄流量的最小、最大值。

e. 水库蓄水量约束

$$V_{t\min}^i \leq V_t^i \leq V_{t\max}^i, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中 $V_{t\min}^i$ 、 $V_{t\max}^i$ 分别是 i 电站水库在 t 时段的允许蓄水量的最小、最大值。

f. 调度周期始、末蓄水量约束

$$V_0^i = V_{\text{begin}}^i, \quad V_T^i = V_{\text{end}}^i \quad (8)$$

式中 V_{begin}^i 、 V_{end}^i 分别是 i 电站已知的调度期初始蓄水量、调度期末蓄水量。

1.3 目标函数的模糊化处理

为建立多目标模糊优化调度模型,需对每个目标定义其相应的隶属度函数^[8]。对 1.2 节建立的多目标模型,期望在满足所有约束条件前提下,整个梯级水电站年发电量越大越好;同时一级水电站耗水量越少越好。因此,选用升半直线形函数为年发电量的隶属度函数;降半直线形函数为一级水电站耗水量的隶属度函数。目标的隶属度函数分别如图 1、图 2 所示,相应的数学表达式分别由式(9)(10)表示。

式(9)(10)中, $\mathbf{x}$ 是决策向量; W_{c01} 、 B_{c02} 分别是年发电量最大、一级水电站耗水量最小为目标的目标值; $W_{\delta01}$ 是梯级水电站可接受的年发电量的减少值; $B_{\delta02}$ 是梯级水电站可接受的一级水电站耗水量的增加值。上述各值由专家或决策者根据实际情况指定,在多目标优化时认为是已知量,因此,在此基础上可确定各目标的论域。

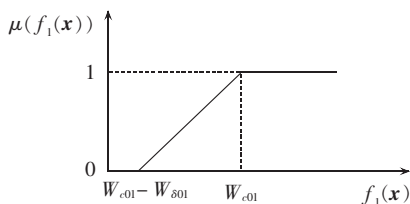


图 1 年发电量目标对应的隶属度函数

Fig.1 Membership function of annual power generation

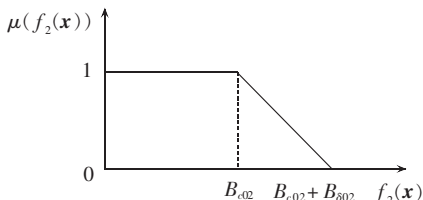


图 2 一级水电站耗水量目标对应的隶属度函数

Fig.2 Membership function of water consumption of primary station

$$\mu(f_1(\mathbf{x})) = \begin{cases} 1 & f_1(\mathbf{x}) > W_{c01} \\ \frac{f_1(\mathbf{x}) - W_{c01} + W_{\delta01}}{W_{\delta01}} & W_{c01} - W_{\delta01} < f_1(\mathbf{x}) \leq W_{c01} \\ 0 & f_1(\mathbf{x}) < W_{c01} - W_{\delta01} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu(f_2(\mathbf{x})) = \begin{cases} 1 & f_2(\mathbf{x}) \leq B_{c02} \\ \frac{B_{c02} + B_{\delta02} - f_2(\mathbf{x})}{B_{\delta02}} & B_{c02} < f_2(\mathbf{x}) \leq B_{c02} + B_{\delta02} \\ 0 & f_2(\mathbf{x}) > B_{c02} + B_{\delta02} \end{cases} \quad (10)$$

1.4 长期多目标模糊优化调度模型

当多目标优化模型中的至少一个目标函数或约束条件存在模糊性时,称此模型为多目标模糊优化模型^[9]。对于 1.3 节定义的 2 个目标函数隶属度函数 $\mu(f_1(\mathbf{x}))$ 和 $\mu(f_2(\mathbf{x}))$,定义满意度 λ 为

$$\lambda = \min \{ \mu(f_1(\mathbf{x})), \mu(f_2(\mathbf{x})) \} \quad (11)$$

依据模糊优化中的最小、最大化准则,对于决策向量 $\mathbf{x}$,有 $\mu(f_1(\mathbf{x})) \geq \lambda$, $\mu(f_2(\mathbf{x})) \geq \lambda$, $0 \leq \lambda \leq 1$,将它们分别代入式(9)和式(10)中可行域内,1.2 节建立的模型就转化为满足约束条件的满意度 λ 最大化的单目标非线性规划问题,下式连同式(3)~(8)共同构成其数学模型:

$$\max \lambda \quad (12)$$

$$\text{s.t. } f_1(\mathbf{x}) - \lambda W_{\delta01} \geq W_{c01} - W_{\delta01} \quad (13)$$

$$f_2(\mathbf{x}) + \lambda B_{\delta02} \leq B_{c02} + B_{\delta02} \quad (14)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad (15)$$

2 自适应粒子群算法

2.1 粒子群算法

粒子群算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是一种启发式随机群体智能算法,与进化算法相比,PSO 保留了基于种群的全局搜索策略,采用的速度——位移搜索模型操作简单,避免了复杂的进化操

作,在解决非线性函数优化^[10]、电力系统无功优化^[11]、经济调度^[12]、机组组合^[13]、发电计划^[14]、电机控制^[15-17]等问题中得到了较好的应用。

PSO 采用式(16)(17)更新粒子的状态。

$$\mathbf{v}_j(k+1) = w\mathbf{v}_j(k) + c_1r_1(\mathbf{p}_j - \mathbf{x}_j(k)) + c_2r_2(\mathbf{p}_g - \mathbf{x}_j(k)) \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_j(k+1) = \mathbf{x}_j(k) + \mathbf{v}_j(k+1) \quad (17)$$

式中 $\mathbf{v}_j(k)$ 、 $\mathbf{v}_j(k+1)$ 分别是第 j 个粒子第 k 次、 $k+1$ 次迭代时的速度向量; $\mathbf{x}_j(k)$ 、 $\mathbf{x}_j(k+1)$ 分别是第 j 个粒子第 k 次、 $k+1$ 次迭代时的位置向量; j 是粒子编号变量; k 是迭代次数变量; w 是惯性因子; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 是 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数; $\mathbf{p}_j$ 是第 j 个粒子所经历过的最优位置向量, $\mathbf{p}_g$ 是所有粒子经历过的最优位置向量。

2.2 粒子群的进化速度和粒子的聚集度

PSO 的全局最优值取决于个体最优值的变化,反映了粒子群的所有粒子的运动效果。在迭代过程中,当前迭代的全局最优值总是要优于或至少等于上一次迭代的全局最优值。

定义进化速度因子 h 为

$$h = \frac{\min[F(\mathbf{p}_g(k-1)), F(\mathbf{p}_g(k))]}{\max[F(\mathbf{p}_g(k-1)), F(\mathbf{p}_g(k))]} \quad (18)$$

式中 $F(\cdot)$ 为适应度函数值; $0 < h \leq 1$ 。

进化速度因子考虑了算法运行的历史,反映了粒子群进化速度,即 h 值越小,进化速度越快。当经过一定的迭代次数后, h 值保持为 1,则可断定算法停滞或找到了最优解。

影响算法性能的另一个因素是粒子的聚集度。在算法中,全局最优值总是优于所有个体的当前的适应度值。如果 F_k 为所有粒子当前适应度值的平均值,则 $F_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F(\mathbf{x}_j(k))$, $\mathbf{x}_j(k)$ 是粒子 j 在迭代次数为 k 时的位置, M 是粒子群的规模数。

定义粒子聚集度因子 s 为

$$s = \frac{\min[F(\mathbf{p}_g(k)), F_k]}{\max[F(\mathbf{p}_g(k)), F_k]} \quad (19)$$

显然 $0 < s \leq 1$, 它反映了所有粒子当前的聚集程度,同时也在一定程度上也反映出粒子的多样性。 s 值越大,粒子群聚集程度也越大,粒子多样性越小。当 $s=1$ 时,粒子群中的所有粒子具有同一性,若此时算法陷入局部最优,则结果不易跳出该局部最优值。

2.3 自适应粒子群算法

PSO 具有收敛速度快、可调参数少、易于实现等优点,但却有“早熟”和易陷入局部最优的缺点。

惯性因子 w 较大时, PSO 具有较强的全局搜索能力; w 较小, PSO 倾向于局部搜索。惯性权值线性递减策略在优化方程性能上有明显效果,但 w 变化只与迭代次数线性相关,不能适应算法运行中非线性变化特性。

w 的大小应该随着粒子群进化速度和粒子的逐渐聚集程度而改变,即 w 可表示为 h 和 s 的函数。如果粒子群进化速度较快,算法可以在较大的搜索

空间内持续搜索,粒子就可以保持大范围的寻优,当粒子群进化速度减慢时,可以减小 w 的值,使得粒子群在小空间内搜索,以便更快地找到最优解。若粒子较分散,粒子群就不易陷入局部最优解。随着粒子群的聚集程度的提高,算法容易陷入局部最优,此时应增大粒子群的搜索空间,提高粒子群的全局寻优能力。

基于以上论述, w 应随着粒子聚集度的增大而增大,随着进化速度的降低而减小,数学表示为

$$w = w_{\text{ini}} - hw_h + sw_s \quad (20)$$

式中 w_{ini} 为 w 的初始值,一般 $w_{\text{ini}} = 1$; w_h 为进化速度惯性因子; w_s 为聚集度惯性因子; 较大的 w_s 易使算法陷入振荡状态,较大的 w_h 易使算法陷入局部最优。

研究表明: w_h 在 0.4~0.6 之间, w_s 在 0.05~0.2 之间时,算法的性能较好。

基于上述动态调整惯性因子改进策略的粒子群算法,称之为自适应粒子群算法(SAPSO)。SAPSO 在运行过程中根据 h 和 s 的值动态调整 w ,从而改进算法的运行性能。初始状态下,置 $h=s=0$ 。

2.4 SAPSO 的运行步骤

a. 根据问题的具体要求,随机形成一定规模的粒子群。

b. 计算粒子群的进化速度和聚集度,依据式(20)计算出当前迭代次数对应的惯性因子。

c. 根据式(16)~(17)更新粒子位置和速度向量。

d. 终止条件判断,若达到最大迭代次数,则结束算法运行;否则,转向步骤 b。

3 长期多目标模糊优化调度模型求解步骤

对于 1.4 节建立的梯级水电站长期多目标模糊优化调度模型,有下面的处理方法和求解步骤。

选取梯级水电站发电引用流量为决策变量,决策变量序列为 $[Q_1^1, Q_2^1, \dots, Q_T^1, \dots, Q_1^i, Q_2^i, \dots, Q_T^i]^T$ 。应用 SAPSO 算法求解模型时,一个粒子就是梯级水电站的一种运行方案,粒子位置向量 $\mathbf{X}$ 的元素为各水库各时段的发电引用流量,速度向量 $\mathbf{v}$ 的元素为水库各时段末发电引用流量的变化速度。模型求解有 6 个步骤。

a. 输入原始数据,应用 SAPSO 算法求解以年发电量最大为目标的单目标模型,得到年发电量 W_{c01} 和耗水量 B'_{c02} 。

b. 输入原始数据,应用 SAPSO 算法求解以一级水电站耗水量最少为目标的单目标模型,得到各时段一级水电站耗水量 B_{c02} 和年发电量 W'_{c01} 。

c. 在 a、b 的基础上,将各单目标值进行一定程度的伸缩,就可以确定出 W_{c01} 、 $B_{\delta02}$ 的值,将确定性问题模糊化。 $W_{\delta01}$ 、 $B_{\delta02}$ 的确定方法是 $0 < W_{\delta01} < (W_{c01} - W'_{c01})$, $0 < B_{\delta02} < (B'_{c02} - B_{c02})$ 。

$W_{\delta01}$ 、 $B_{\delta02}$ 的确定方法体现了梯级水电站的不同

运行情况,决策人员或专家可以根据实际情况灵活地调整目标的伸缩值,从而体现人的主观愿望。理论上, $W_{\delta 01}$ 、 $B_{\delta 02}$ 越小越好,但求解难度会增大。

d. 将 W_{c01} 、 $W_{\delta 01}$ 、 B_{c02} 、 $B_{\delta 02}$ 分别代入式(9)~(10),得到隶属度函数表达式。

e. 采用 1.4 节中的方法,将多目标问题转化为单目标非线性规划问题。

f. 应用 SAPSO 算法求解此单目标非线性规划问题,求得各时段的满意度,各水电站发电量和耗水量等结果。

4 算例仿真

以一具有两级电站的梯级水电系统为研究对象,一级电站是年调节水库,二级电站为日调节水库。对该梯级水库 25 年的旬径流资料进行了计算,主汛期是 6~7 月份,在 10~12 月、1~3 月可维持高水位运行,为系统调峰和参与电网辅助服务。

应用所提出的 SAPSO 算法对该梯级水电站进行调度计算,水能计算和调度计算的初始、终止条件已知。求解过程中,水能计算以旬为计算单位, $c_1=c_2=2$, $w_h=0.5$, $w_s=0.1$,种群规模为 50,迭代次数为 200,计算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 单目标优化的目标值和目标伸缩值及最大满意度

Tab.1 Single objective values, adjustments and fuzzy satisfaction-maximization

时段/月	λ	W_{c01} /(MW·h)	$W_{\delta 01}$ /(MW·h)	B_{c02} /m ³	$B_{\delta 02}$ /m ³
1	0.512	201 540	770	17676×10^4	10×10^4
2	0.543	215 320	800	16845×10^4	10×10^4
3	0.607	224 670	900	18583×10^4	10×10^4
4	0.619	234 780	1 000	18671×10^4	10×10^4
5	0.714	258 970	1 500	18896×10^4	20×10^4
6	0.858	277 960	2 000	19987×10^4	30×10^4
7	0.898	286 750	2 500	20132×10^4	40×10^4
8	0.965	307 860	3 000	21145×10^4	50×10^4
9	0.996	316 570	3 500	20147×10^4	55×10^4
10	0.725	260 370	2 000	19967×10^4	35×10^4
11	0.657	248 760	1 000	18787×10^4	20×10^4
12	0.584	214 350	800	17024×10^4	10×10^4

表 2 单目标优化与多目标模糊优化的结果比较

Tab.2 Comparison between single- and multi-objective optimizations

项目	单目标优化		多目标模糊优化
	年发电量最大	耗水量最小	
年发电量/(MW·h)	3582×10^3	3496×10^3	3524×10^3
耗水量/m ³	2246×10^6	2188×10^6	2218×10^6

从表 2 可以看出,多目标模糊优化时,年发电量比年发电量单目标优化减少了 0.58×10^8 kW·h,减少 1.62 %,但比耗水量单目标优化增加了 0.28×10^8 kW·h,增加 0.8 %;同时,一级水电站耗水量比耗水量单目标优化增加了 0.30×10^8 m³,增加 1.37 %,但比年发电量单目标优化减少了 0.28×10^8 m³,减少 1.25 %。兼顾年发电量和一级水电站耗水量的多目标优化模

型,虽然年发电量和耗水量没有单目标模型时理想,但从综合效益的角度看,多目标模型比单目标模型具有明显的优势,在满足电力系统运行要求的前提下,合理地避免了放空水电站水库的现象,较好地协调了发电和用水的不同要求,提高了梯级水电站的综合效益,节约了水力资源,有利于电力系统的安全稳定运行。

5 结论

考虑年发电量和一级水电站耗水量的梯级水电站长期多目标模糊优化调度模型较好地兼顾了发电和用水之间的不同要求,避免了放空水库无水可调的现象,节约了水力资源,提高了梯级水电站的综合效益,有利于充分发挥梯级水电站的运行特点,适应了电力系统经济运行的要求。根据实际运行任务的不同,此模型易于扩展和增添目标,具有一定的灵活性和通用性。模糊优化的处理方法避免了多目标向单目标转化时目标权重选取的人为主观性,有效地解决了梯级水电站多目标优化调度中不同量纲、相互冲突的目标之间的协调问题。算例计算表明了自适应粒子群算法能求解具有复杂约束条件的非线性规划问题,为梯级水电站优化调度提供了一种新颖有效的方法。

参考文献:

[1] 徐刚,马光文. 基于蚁群算法的梯级水电站优化调度[J]. 水力发电学报,2005,24(5):7-10.
XU Gang,MA Guang-wen. Optimal operation of cascade hydro-power station based on ant colony algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2005,24(5):7-10.

[2] 王金文,袁晓辉,张勇传. 随机动态规划在三峡梯级长期发电优化调度中的应用[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):54-56.
WANG Jin-wen,YUAN Xiao-hui,ZHANG Yong-chuan. Long term generation optimization of Three-Gorge cascade using stochastic dynamic programming[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(8):54-56.

[3] YU Z W,SPARROW F T,BOWEN B H. A new long-term hydro production scheduling method for maximizing the profit of hydroelectric systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(1):66-71.

[4] NACCARINO J,CHEUNG R,BRIGGS W,et al. Real-time monitoring,optimization and control of a hydroelectric generation complex[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1988,3(4):1769-1783.

[5] 裴哲义,王益民,舒印彪,等. 三峡电力系统大型水电站群与三峡电站联合运行优化补偿调度运行方式研究[J]. 电网技术,2004,28(10):66-70.
PEI Zhe-yi,WANG Yi-min,SHU Yin-biao,et al. Study on optimum compensating dispatching cooperating mode of Three Gorges hydropower station and step hydropower station group in Three Gorges power systems[J]. Power System Technology,2004,28(10):66-70.

[6] 陈洋波,胡嘉琪. 隔河岩和高坝洲梯级水电站水库联合调度方案研究[J]. 水利学报,2004,35(3):47-52,59.
CHEN Yang-bo,HU Jia-qi. Study on integrated operation of cascaded hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineer-

- ring, 2004, 35(3): 47-52, 59.
- [7] 邹进, 张勇传. 三峡梯级电站短期优化调度的模糊多目标动态规划[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 925-931.
- ZOU Jin, ZHANG Yong-chuan. Short term optimal scheduling of cascade hydropower stations using fuzzy multiobjective dynamic programming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 925-931.
- [8] 马瑞. 电力市场中兼顾环境保护和经济效益的双目标模糊优化短期交易计划新模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 104-108.
- MA Rui. A novel bi-objective fuzzy optimal model of short-term trade planning considering environment protection and economic profit in deregulated power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 104-108.
- [9] 李士勇. 工程模糊数学及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [10] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE Intelligence Conference on Neural Networks. Perth Australia: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [11] 唐剑东, 熊信良, 吴耀武, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 81-84.
- TANG Jian-dong, XIONG Xin-gen, WU Yao-wu, et al. Power system reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 81-84.
- [12] 蒋秀洁, 熊信良, 吴耀武. 基于改进 PSO 算法的短期发电计划研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 34-37, 40.
- JIANG Xiu-jie, XIONG Xin-gen, WU Yao-wu. Improved PSO algorithm and its application in short term generation scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3): 34-37, 40.
- [13] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的改进粒子群优化算法[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 44-48, 65.
- SUN Li-yong, ZHANG Yan, JIANG Chuan-wen. An improved particle swarm optimization algorithm embedded with greedy search for solution of unit commitment[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 44-48, 65.
- [14] 董根源, 温步瀛, 江岳文. 考虑发电机电价曲线的发电计划偏差的 β -PSO 优化方法研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 18-21, 25.
- DONG Gen-yuan, WEN Bu-ying, JIANG Yue-wen. β -PSO considering generation bidding prices for optimization of generation scheduling error[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 18-21, 25.
- [15] 祁春清, 宋正强. 基于粒子群优化模糊控制器永磁同步电机控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 158-162.
- QI Chun-qing, SONG Zheng-qiang. Controlling of permanent-magnet synchronous machine based on particle swarm optimization fuzzy logical controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 158-162.
- [16] 杨燕, 靳蕃, KAMEL M. 微粒群优化算法研究现状及其进展[J]. 计算机工程, 2004, 30(21): 3-9.
- YANG Yan, JIN Fan, KAMEL M. Research and development of particle swarm optimization[J]. Computer Engineering, 2004, 30(21): 3-9.
- [17] 张喆, 薛任. 微粒群算法在非线性约束优化中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004(25): 91-92.
- ZHANG Zhe, XUE Ren. To solve nonlinear constrained optimization problems with particle swarm algorithm[J]. Computer Engineering and Practice, 2004(25): 91-92.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

胡国强(1974-), 男, 山西文水人, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行调度、电力系统稳定分析与控制(E-mail: hu_eagle@126.com 或 hu_eagle@163.com);

贺仁睦(1944-), 女, 北京人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事电力系统负荷建模、电力系统稳定分析与控制等方面的研究。

Long-term multi-objective fuzzy optimization scheduling model of cascaded hydroelectric stations

HU Guo-qiang, HE Ren-mu

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The cascaded hydroelectric stations should not only satisfy the demand of power systems but also consider the coordination of generation and water consumption to maximize the comprehensive profits. A novel long-term multi-objective optimization scheduling model of cascaded hydroelectric stations is proposed, which comprehensively takes the annual power generation and water consumption as optimal objectives. The multi-objective problem is fuzzed by defining the membership degree function of each objective and solving every single objective model. The decision maker may slightly adjust the objective value of each single objective. The multi-objective problem is changed into single objective nonlinear programming problem by using the fuzzy satisfaction-maximizing method. A SAPSO (Self-Adaptive Particle Swarm Optimization) algorithm which can dynamically adjust the inertia factor is built up. Simulation results show that the multi-objective model is correct and the proposal approach is feasible. The multi-objective model can achieve better comprehensive profits than the single-objective model, and the fuzzy optimal method avoids the contrived randomness in objective weight selection. SAPSO has rapid computational speed and higher convergence accuracy.

Key words: cascaded hydroelectric stations; multi-objective optimization; fuzzy satisfaction-maximizing; particle swarm optimization