

独立发电企业水火协调优化运行研究综述

左 幸¹, 陶卫国¹, 马光文²

(1. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610021; 2. 四川大学能源发展研究中心, 四川 成都 610065)

摘要: 介绍了在电力市场环境中, 当独立发电企业同时拥有水电和火电的情况下, 国内外关于研究合理安排水火发电计划的理论和方法, 从而使发电企业运行总成本最少。同时, 详细阐述了各种方法取得的进展和以后的研究方向。

关键词: 电力市场; 发电企业; 水火协调; 优化

Review on methods of hydrothermal coordination scheduling of independent power producer

ZUO Xing¹, TAO Wei-guo¹, MA Guang-wen²

(1. Ertan Hydropower Development Co., Ltd, Chengdu 610021, China;

2. Center of Energy Development Research, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper presents a review on theories and methods of hydrothermal coordination scheduling while one independent power producer holds both hydroelectric plants and thermal generations under the circumstance of electric power market, which minimizes the total cost of electric power enterprise. And it also amply expounds the achievements of all kinds of methods and the future direction of the research.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50539140).

Key words: power market; independent power producer (IPP); hydrothermal coordination; optimization methods

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0075-07

0 引言

在电力市场环境下, 实施两部制电价是大多数区域电网公司电力体制改革试点的方向之一^[1]。独立发电企业将面对容量电价和电量电价两种不同的价格模式, 如何对企业下水火电的容量电价进行核算和上报, 并采用优化算法使企业的发电利润最大是其需要解决的主要问题^[2]。发电利润等于发电收入与发电成本之差。在发电收入一定的情况下, 当水火电成本最小时可以使得发电利润最大化。本文主要考虑的是在上述情况下独立发电企业的中长期和短期的水火电协调优化方法, 其是一个具有复杂约束的大型、动态、非凸、有滞时的非线性规划问题。长期以来各种各样的解决方法概括起来主要有两种: 基于确定性方法和基于随机性方法, 此外, 还有一些组合优化方法。虽然专业学者们一直在努力改进各种方法, 但是求解过程总还是存在一些缺陷, 从根本上解决这类问题还存在很大的难度, 本

文详细阐述了各种办法的特点和计算思路。

1 基于确定性的优化算法

基于确定性的优化方法是指在计算过程中不采用概率和统计理论来进行算法设计和参数变动的各种方法, 主要包括动态规划法、网络流规划法、逐步优化算法和人工神经网络。

1.1 动态规划

动态规划是解决多阶段决策优化问题的一种常用方法, 其在线性和非线性优化问题中应用非常普遍。在求解水火电系统最优运行计划时, 一般通过其他方法如大系统分解协调或拉格朗日将其分解成两个子问题, 再分别对火电系统或水电系统采用动态规划进行优化。比较常用的是对水电子系统进行动态规划优化, 通常对水库时段末水位进行离散, 在各离散点中搜索最优解。但是, 动态规划由于受离散点的制约, 不可能收敛到全局最优解, 要提高解的精度就必须增加离散点数, 但这又会带来“维数灾”的问题。

文献[3]利用多步动态规划求解了短期水火电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50539140)

站的运行方式,其提出先采用两阶段决策过程进行计算,然后在其优化结果作为初始解,并允许其在较小范围内扰动来进行四阶段决策,并以此循环直到相邻步骤优化结果相似为止。文献[4]将问题通过拉格朗日乘子将其转化为无约束问题,并采用非线性对偶原理更新乘子,在台湾省的水火电系统应用中,取得了较好的结果。

1.2 网络流规划法

网络流规划是针对网络问题的一类特殊算法,适合解高维数、多约束的线性和非线性优化问题。网络图由节点和将其连接起来的弧构成^[5]。采用网络流规划法时一般先将电站的弃水弧和发电弧合成耗水弧,考虑市场出清价,采用最小费用最大流的办法对其进行求解^[6]。网络流规划法的计算速度较快、处理约束方便,对初始解的要求不高。其算法的关键在于对最小费用最大流解法的设计,目前常用的是 OKA 法和逐次线性化方法。但是在多家发电厂商报价特性相同的情况下,容易存在多台机组之间功率分配振荡的现象,通过考虑机组爬坡率损耗可以消除这种现象。

文献[7]将其应用在有功动态优化调度中取得了成功。文献[8]研究了华中电网水火协调下的水电站日经济调度,分别对网多年调节、年调节、不完全年调节、季调节和径流式水电站典型运行方式进行了计算,得出了经济合理的结果。

1.3 逐步优化算法

逐步优化算法(POA)是动态规划的一个推论,其依据是“最优策略具有这样的特性,每两阶段的决策相对其始端决策和终端决策是最优的”思想,以两阶段寻优为基础的逐步优化方法。该方法对状态变量不需要离散,因而不仅可获得较精确解,也可以克服动态规划求解多状态变量问题时出现的“维数灾”障碍^[9]。POA 算法通过一系列两阶段决策,即固定首尾两点,让中间一点进行变化,寻找出最优解,再后移一个时段寻出下一个两阶段的最优解,这样一直计算到时段末便完成一次循环,当前后两次循环的相对误差满足要求或是达到规定的循环次数就结束循环,所得的解就是最优解^[10]。但是其存在对初始解依赖较为严重的现象。

文献[9]认为初始状态轨迹的选择对最优解收敛性存在较大的影响,同时提出在进行优化时,有必要多选择几组初始解进行迭代比较,或者在做多库优化时,可以先将单库优化的结果作为多库优化的初始轨迹。至于如何选择初始状态轨迹才能确保获得全局最优解,仍然需要从理论上作进一步深入讨论。文献[11]提出在逐步优化过程中结合考虑局

部变分法,可以解决梯级水电站优化调度的问题。

1.4 人工神经网络

人工神经网络(ANN)几乎是解决优化问题最常用的工具。ANN 的参数估计一般是基于数据库中的历史资料样本通过学习获得。其计算思路为:首先选取样本点,再用样本点对网络进行训练,当完成训练后,进行在线计算。ANN 解决问题的优点在于只要网络训练完毕,其在线计算速度是非常快的。但其主要问题在于优化大型系统时所需训练时间较长甚至无法完成训练,其次是模型结构如隐层数或节点数较难确定,同时 ANN 存在过拟合现象。

文献[12]将样本分成几组进行分别训练,当进行在线计算时,先判定非样本集属于哪个类别,再调用相应的模型进行计算,该法有效避免了网络收敛速度缓慢的问题。在文献[13]中,通过模糊聚类的方法进行样本分类,采用 ANN 进行训练,训练出来的初次成果再通过专家系统进行规则判别最终得到最优解,将该法用在机组启停安排上取得了满意的结果。文献[14]认为机组启停安排和负荷分配优化是一种随机过程,其将机组出力作为独立的马尔可夫过程,负荷需求作为普通的高斯随机变量进行了优化计算。文献[15]提出一种新的两阶段神经网络模型,第一阶段先通过网络的反馈作用把部分不可行解向可行域边界移动;第二阶段将不可行解转换为可行解并通过能量函数减少逐渐寻找问题的最优解,该法的优点在于计算的复杂性仅仅随问题的规模呈线性增长,故在水火电短期发电计划中得到较好地应用。

2 基于随机性的优化算法

基于随机性的优化方法主要是指通过各种随机手段来进行解的搜索、摄动、交叉和变异等的优化方法,归纳起来有粒子群算法、进化规划、遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索和蚁群算法。

2.1 粒子群算法

美国的 Kennedy 和 Eberhar 受鸟群觅食行为的启发,于 1995 年提出了粒子群优化算法(PSO)。粒子群优化算法是基于群体智能理论的优化算法,通过群体中粒子间的合作与竞争产生的群体智能指导优化搜索。与进化算法比较,PSO 保留了基于种群的全局搜索策略,其采用的速度——位移模型操作简单,避免了复杂的遗传操作。它特有的记忆使其可以动态跟踪当前的搜索情况调整其搜索策略。与进化算法比较,粒子群优化算法是一种更高效的并行搜索算法^[16]。但是,当 PSO 应用到多阶段、多决策变量的复杂问题中,其优化结果往往不能收敛

到全局最优解。

文献[17]将离子群算法应用到水火电协调调度中, 其以时段数作为粒子的维数, 各时段流量大小用粒子位置来表示, 粒子的速度可以表示为本时段到下一时段流量变化的速率。通过分群与灾变的思想来考虑位置和速率的变化并跳出局部最优, 从而寻得全局最优解。将其应用到由4座梯级水电站和2座火电厂构成的水火电系统中获得了满意解。

2.2 进化规划

进化规划算法不需要常规梯度法所要求的搜索空间为线性、光滑、凸性等性质, 也不需要遗传算法所需要的编码和解码的环节。其父代和子代间的高斯关系确保了求解域内控制变量状态组合得以产生, 迭代过程中候选解得以保留, 这些解随机地繁殖成子代, EP 因此能够找到全局最优解^[18]。算法开始的初始解一般设计为一个服从指定区间均一分布的随机变量, 由父代通过增加一个服从高斯分布的随机变量而产生子代, 最后在由父代和子代共同存在的竞争池中按照个体权重高低选择种群规模大小的下一代进行循环。在应用进化规划时需要同时注意的是, 进化规划对于初始种群的选取、自然选择方法和变异方式比较敏感, 适当组合这些方法, 可以得到较好的寻优性能。

文献[19]将进化规划应用在火电机组的最优负荷分配中, 并考虑到非光滑的燃料耗量函数, 经过分析计算认为其可以考虑更为复杂的水火电系统中。文献[20]考虑了对传统 EP 的改进提出了 SAEP, 主要涉及2个重要部分: 其一采用倒指数形式来描述均方差与适应度之间的关系; 其二是在寻优过程中, 变异量自适应发生改变, 并结合模糊集理论应用于求解具有可伸缩约束的电网多目标模糊优化运行问题。通过改进的 EP 优化结果看出, 一方面, 将节点电压由硬约束变为可伸缩约束后, 系统的发电费用、有功网损及污染放射量 NO_x 、 SO_x 得到了进一步的降低, 且满意度增加; 另一方面, SAEP 在获得全局最优解、减小计算复杂度、提高计算、收敛效率等方面显示了一定的优越性。文献[21]考虑将高斯及 Cauchy 变异引入进化规划中来解决短期水火协调问题, 在每一代中分别计算两种变异后的适应度, 取两种变异适应度较好者, 计算表明该种算法较单独采用高斯变异或 Cauchy 变异的进化规划^[22]更快地收敛到全局最优解, 同时, 其对初始解的依赖程度也低于其他两种方法。

2.3 遗传算法

遗传算法是70年代初期 John Holland 从试图解释自然系统中生物的复杂适应过程入手, 模拟生物

进化的机制来构造人工系统的模型。遗传算法是从代表问题可能潜在解集的一个种群开始的, 而一个种群则由经过基因编码的一定数目的个体组成^[23]。父代个体经过选择算子、交叉算子和变异算子操作得到子代。当两代间最优个体的适应度相对误差小于指定值或达到规定的循环代数, 算法中止。遗传算法的交叉和变异算子随着进化代数的增加, 其寻优能力逐渐减弱, 往往收敛于局部最优解, 同时, 在进行后期遗传算法的搜索效率往往显著降低。

文献[24]提出简单遗传算法 (SGA) 不能以概率“1”收敛到全局最优解, 因此在文中对 SGA 进行改进, 采用了“初始权”的编码方法, 同时设置了“保留算子”, 将算法的杂交和变异概率设置为自适应。文中最后对由一个等值火电厂和四个水电站构成的水火电系统进行了分析计算, 认为该算法可以提高电网经济运行水平, 但对水电系统中的抽水蓄能电站和梯级调度的水电站群等问题还要进一步研究。针对遗传算法的个体编码会影响算法的收敛速度, 各种文献提出了特有的编码方法。文献[25]提出一种双链态编码的遗传算法, 文献[26]对标准遗传算法进行了改进, 其通过对大型电力系统的考虑, 将系统费用增量作为唯一决策变量编码进入染色体计算, 其优点是计算时间只随机组数的递增呈近似线性增长。

2.4 模拟退火算法

模拟退火算法源于对固体退火过程的模拟, 用一组称为冷却进度表的参数控制算法的进程, 使算法在控制参数 t 徐徐“降温”并趋于零时, 最终求得组合优化问题的相对全局最优解。其中优化问题的一个解及其目标函数 $f(i)$ 分别与固体的一个微观状态 i 及其能量 E_i 相对应。令随算法进程递减的控制参数担当固体退火过程中温度 T 的角色, 则对于 t 的每一取值, 算法采用 Metropolis 接受准则, 持续进行“产生新解—判断—接受/舍弃”的迭代过程而达到该“温度”下的“平衡点”。其算法由于简单, 使用灵活, 执行效率高而被引入许多优化领域。但是其冷却表的参数率定却是一件较为繁琐的事情。

文献[27]在进行水火电优化时, 将机组负荷分配和火电经济排放两个目标通过全局优化方法综合为单目标问题采用模拟退火算法进行优化。通过计算认为: SA 具有搜索全局最优解的能力, 其优点在于优化时不需要对机组增加一些凸性的约束条件, 同时结果认为其唯一的缺点是计算时间太长。文献[28]、[29]和[30]采用了模拟退火与遗传算法相结合的算法, 综合考虑了系统中的等式约束和不等式约束, 并且每个火电站都单独考虑这些约束条件,

算法最后提出考虑采用计算机并行处理可以显著提高算法性能。

2.5 禁忌搜索

禁忌搜索 TS (Tabu Search) 技术是一种亚启发式搜索技术, 由 Glover 在 1986 年首次提出, 进而形成一套完整算法。所谓禁忌就是禁止重复前面的工作。为了回避局部邻域搜索陷入局部最优的主要不足, 禁忌搜索算法用一个禁忌表记录已经到达过的局部最优点, 在下一轮的搜索中, 利用禁忌表中的信息不再或有选择地搜索这些点, 以此来跳出局部最优点, 最终达到全局优化之目的^[31]。TS 的优点在于能够有效避免陷入局部最优解, 同时, 禁忌搜索能够灵活使用内存, 减少系统内存占用, 提高执行效率。于进化规划一样, 禁忌搜索对初始解的要求较高, 且不容易收敛到全局最优解。

文献[32]考虑了随时间变化的非线性启停成本的混合水火电系统, 算法从传统解开始, 通过邻域搜索方法逐步提高解的精度, 以此来达到搜索全局最优解的目的。但是, 禁忌算法较难克服的问题是系统初始解的确定。

2.6 蚁群算法

蚁群算法是最近几年由意大利学者 M. Dorigo 等人首先提出的一种新型的模拟进化算法, 称为蚁群系统 (ant colony system), 是一种很有发展前景的方法。蚁群算法通过候选解组成的群体的进化过程来寻求最优解, 该过程包含两个基本阶段: 适应阶段和协同工作阶段。在适应阶段, 各候选解根据积累的信息不断调整自身结构; 在协同工作阶段, 候选解之间通过信息交流, 以期产生性能更好的解。蚁群算法具有很强的发现较好解的能力, 由于算法本身采用了正反馈原理, 加快了进化过程, 且不易陷入局部最优解^[33]。蚁群算法的重点在于设计路径局部寻优算法。其缺点是理论基础不够充分, 同时计算时间比较长。

文献[34]将蚁群算法应用到水库优化调度中, 通过对 S 个求解时段离散水库库容, 采用 3-Opt 局部优化技术对库容离散点进行变异, 计算结果表明蚁群算法计算速度较动态规划提高较快、求解精度满足系统运行要求, 并且求解时间随问题规模增加呈近线性增长。文献[35]采用蚁群算法对火电厂短期发电计划进行优化, 文中的火电系统规模较小, 结果表明对复杂大型的火电系统还需要进一步研究。

3 组合优化算法

组合优化算法主要是指将各种确定性或随机

性优化算法、模型进行耦合或者模型本身就存在分解情况, 该类算法主要有模糊优化方法、大系统分解协调方法、混沌优化算法、灰色系统理论和专家系统。

3.1 模糊优化方法

模糊优化方法起源于模糊决策概念和模糊环境下的决策模型, 其优势在于能够将不同的目标进行协调, 通过确定相应目标的“隶属度”可以最终得出大规模、多阶段和多目标的优化问题较优解。在采用模糊优化方法求解问题时, 一般先将决策变量或是目标函数进行模糊化处理, 处理后通过各种其他优化算法如动态规划、遗传算法、蚁群算法等来对模糊目标进行优化。

文献[36]建立了电力市场下以全网煤耗最小并成本节约最大为双目标的水火电力系统有功经济负荷分配模型。采用降半梯形隶属度函数对各目标函数进行模糊化, 协调了各目标间的冲突。文献[37]研究了在模糊来水量和模糊负荷的情况下短期水火电调度方式, 文中对来水和负荷的不确定性采用三角模糊数描述, 同时用模糊机会约束描述水库蓄水量约束和线路安全约束, 文中最后采用线性规划松弛技术及修正单纯形法对问题求解, 求解结果满足电网安全性第一, 经济性其次的运行策略。

3.2 大系统分解协调方法

大系统分解协调方法的理论基础是强对偶定理, 其原理是将“大问题”分解成若干个“子问题”。由于“子问题”的变量及约束条件相对较少, 因此求解也较为容易, 然后在此基础上再综合考虑各个“子问题”之间的关联。这样可以减少所需内存并大大缩短计算时间, 从而避免所谓的“维数灾”问题。分解协调算法是大系统设计和优化中一种很自然也是很有效的方法, 其中最常用的两级结构: 第一级是下级子系统, 解决各子问题的优化; 第二级是上级协调器, 解决各子系统的相互耦合, 实现大系统的优化^[38]。

文献[39]提出了一种解耦算法, 该算法优点在于能够在系统目前存在的火电系统上随意添加水电子系统, 算法首先找出从总负荷中减去一个假定水电总负荷得到火电子系统的负荷并进行火电子系统的优化, 同时对水电子系统的设定负荷进行优化。算法初始随机生成很多假定负荷进行优化计算, 从而从中寻优使得系统期望费用最小化。文献[40]提出水火电力系统同时实现有功、无功经济负荷分配的数学模型。在采用分解协调算法求解过程中, 对火电子系统的有功经济负荷分配提出一种新的算法——区间寻优法。其分解协调部分采用了常用的“拉

格朗日”松弛法,分别构造了水火电厂间有功经济负荷分配的协调方程式和各无功电源间无功经济负荷分配的协调方程式。文中对包括6个火电厂、4个水电厂、4个无功电源点和19个负荷点的水火电系统进行优化,结果表明综合经济调度比经典的有功调度方式在火电厂燃煤和电网网损上更优。

3.3 混沌优化算法

1961年, Lorenz 提出了著名的“蝴蝶效应”,认为大气系统存在混沌性,即确定性非线性系统的内在随机性,或称为确定性中的混乱。混沌的特性体现在两个方面:其一是对初值非常敏感;其二是具有奇怪吸引子,即运动轨迹在一定的相空间内无重复,并且同时体现出运动的随机性,具有一定的规律和范围。基于混沌的优化算法一般利用了混沌运动独特的遍历性找到优化解,但同时当搜索空间较大或优化问题具有多个决策变量时,直接混沌优化很难取得最优解。

文献[41]在传统混沌神经网络模型的基础上,提出了一种具有衰减混沌噪声的混沌模拟退火神经网络模型(CSA-DCN)。该模型结合了Hopfield神经网络与模拟退火算法的优点,并引入通过Logistic映射迭代函数产生的衰减混沌噪声,从而使该模型可以有效地解决高维、离散、非凸的非线性约束电力系统经济负荷分配优化问题。其综合考虑了网损、汽轮机调点效应等前提,计算结果表明CSA-DCN模型是一种适用性很强的优化模型,因此也可以应用于电力系统或其它行业的优化问题中。文献[42]将决策变量转换为混沌变量,利用混沌的相空间遍历性直接搜索目标函数的最优解。

3.4 灰色系统理论及专家系统

灰色系统最大的优点是对信息量要求不高,只要具有几个数据就可以建立GM(1,N)模型进行预测,将灰色理论应用于优化问题中一般是采用了灰色理论中灰色关联分析技术,即通过已知数据分析哪些决策变量和目标函数值关联度最大,最终确定决策变量个数,简化优化函数约束条件的目的。同时,需要注意辨别其是否存在假相关。

专家系统(ES)是发展最早,也是比较成熟的一种人工智能技术。一个专家系统就是为了解决具有专家级的适当规模的问题,采取一定的策略,具有相当丰富和权威感性知识,具有学习机制,对知识库进行改进,以增进解题能力的计算机程序系统。其基本思想是让计算机能够存贮某一领域的专门知识,并能像人类专家那样有效利用这些知识去解决该领域的复杂问题^[43]。文献[44]提出一种基于专家系统的火电厂负荷优化方法,其采用供电煤耗等微

增率的方法进行负荷分配并应用到襄樊火电厂取得了实用性和可行性。本文作者尝试将专家系统和数据挖掘相结合并应用于水电厂的机组负荷分配中,采用耗水量最小为准则,挖掘数据库中存在的规则,该算法应用到二滩电厂的优化运行中,取得了明显的降低日耗水量的效果。

4 结论

本文全面介绍了各种优化算法在水火电系统协调调度中的应用,文中的参考文献体现了该领域的研究现状和最新情况。随着电力市场改革的步伐,发电侧完全竞争会逐渐成为现实。在发电侧完全竞争的情况下,独立发电企业的水火电如何协调优化,并使得整个企业火电燃料成本最小和总收入最大化并不仅仅是一个单独的优化问题,其还牵连到发电企业的报价和竞争策略,所有一切综合起来考虑形成一个巨大的不完全信息多方博弈问题。该类问题就目前的研究水平来看还不能够完美地解决,有待领域内的专家学者进一步深入研究。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 上网电价管理暂行办法[Z]. 2005.
National Development and Reform Commission. The Temporal Method of Grid Power Price Management[Z]. 2005.
- [2] 马光文,王黎,等. 水电竞价上网优化运行[M]. 成都:四川科学技术出版社,2003.30-34.
MA Guang-wen, WANG Li, et al. The Optimization of Hydropower Bidding and Scheduling[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.30-34.
- [3] YANG Jin-Skyr, CHEN Nan-ming. Short Term Hydrothermal Coordination Using Multi-pass Dynamic Programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989,4(3).
- [4] CHANG Shi-chung, CHEN Chun-hung. Hydroelectric Generation Scheduling with an Effective Differential Dynamic Programming Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(3).
- [5] 周京阳,吴玉生,王功涛,等. 发电竞价算法(四)——网络流规划法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25: 23-27.
ZHOU Jing-yang, WU Yu-sheng, WANG Gong-tao, et al. Generation Bidding Algorithm Tutorials Part Four, The Network Flow Programming Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25: 23-27.
- [6] 于尔铿,白晓民. 网络规划法及其在电力系统经济调度的应用[J]. 电力系统自动化, 1987, 11(5).
YU Er-keng, BAI Xiao-min. Network Flow Programming and Its Applications to Power System

- Economic Dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 1987, 11(5).
- [7] 赵建国, 韩学山, 程时杰. 网络流和内点法结合的有功动态优化调度[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23). ZHAO Jian-guo, HAN Xue-shan, CHENG Shi-jie. Optimal Active Power Dispatching Combining Network Flow And Interior Point Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23).
- [8] 孙时春, 朱翠兰, 等. 华中电网水火电协调下的水电站日经济调度[J]. 华中电力, 1995, 8(2). SUN Shi-chun, ZHU Cui-lan, et al. Daily Optimal Scheduling of Hydro plants Under the Hyazhong Grid Hydrothermal Systems[J]. Central China Electric Power, 1995, 8(2).
- [9] 方红远, 王浩, 程吉林. 初始轨迹对逐步优化算法收敛性的影响[J]. 水利学报, 2002, (11). FANG Hong-yuan, WANG Hao, CHENG Ji-lin. Effect of Original State Locus on Convergence of Progressive Optimization Algorithm[J]. Journal of Hydraulic Power, 2002, (11).
- [10] MA Guang-wen, WANG Li. The Scheduling of a Hydrothermal System with a Progressive Optimal Genetic Algorithm[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000, 18(2).
- [11] Nanda J, Bijwe, PR. Optimal Hydrothermal Scheduling with Cascaded Plant Using Progressive Optimality algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1981, PAS10(3).
- [12] 朱敏, 王定一. 基于人工神经网络的梯级水电厂日优化运行[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10). ZHU Min, WANG Ding-yi. Daily Optimal Operation of Cascade Hydroelectric Power Stations Based on Artificial Neural Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10).
- [13] Padhy N P, Paranjothi S R, Ramachandran V. A Hybrid Fuzzy Neural Network-expert System for a Short Term Unit Commitment Problem[J]. Microelectron Reliab, 1996, 37(5).
- [14] Kasangaki V B A, Sendaula H M, Biswas S K. Stochastic Hopfield Artificial Neural Network for Electric Power Duction Costing[J]. IEEE Trans Power Systems, 1995, 10(3).
- [15] Naresh R, Sharma J. Two-phase Neural Network Based Solution Technique for Short-term Hydrothermal Scheduling[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 199, 146(6).
- [16] 周驰, 高海兵, 高亮, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2003, (12). ZHOU Chi, GAO Hai-bing, GAO Liang, et al. Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm[J]. Application Research of Computers, 2003, (12).
- [17] 汪新星, 张明. 基于改进微粒群算法的水火电力系统短期发电计划优化[J]. 电网技术, 2004, 28(12). WANG Xin-xing, ZHANG Ming. Short-term Scheduling Optimization of Hydro-thermal Power Systems Based on Refined Particle Swarm Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(12).
- [18] 张金奎, 林荫宇, 徐国禹. 基于进化规划的短期水火电调度[J]. 电力情报, 1999, (1). ZHANG Jin-kui, LIN Yin-yu, XU Guo-yu. The Short Term Hydrothermal Scheduling Based on Evolutionary Programming[J]. Information on Electric Power, 1999, (1).
- [19] Yang H T, Yang P C, Huang C L. Evolutionary Programming Based Economic Dispatch for Units with Non-smooth Fuel Cost Functions[J]. IEEE Trans Power Systems, 1996, 11(1).
- [20] 石立宝, 徐国禹. 一种求解电网多目标模糊优化运行的自适应进化规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3). SHI Li-bao, XU Guo-yu. A Self-adaptive Evolutionary Programming Algorithm of Multi-objective Fuzzy Optimal Operation[J]. Proceedings of the CEEE, 2001, 21(3).
- [21] Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Fast Evolutionary Programming Techniques for Short-term Hydrothermal Scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66, 97-103.
- [22] Hota P K, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Short-term Hydrothermal Scheduling Through Evolutionary Programming Technique[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 52, 189-196.
- [23] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.1-7. WANG Xiao-pin, CAO Li-ming. Genetic Algorithm - Theory, Application and Software Implement[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.1-7.
- [24] 王亚娟, 熊信良. 基于遗传算法的水火电混合电力系统短期发电计划优化[J]. 继电器, 2000, 28(10). WANG Ya-juan, XIONG Xin-yin. A Genetic Algorithm on Short Term Optimal Scheduling for A Hydrothermal System [J]. Relay, 2000, 28(10).
- [25] WU Yong-gang, HO Chun-Ying, WANG Ding-yi. A Diploid Genetic Approach to Short-term Scheduling of Hydro-thermal System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4).
- [26] Chen Po hung, Chang Hong Chan. Large-scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4).
- [27] Basu M. A Simulated Annealing-based Goal-attainment

- Method for Economic Emission Load Dispatch of Fixed Head Hydrothermal Power Systems[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2005, 27: 147-153.
- [28] Wong K P, Wong Y W. Short-term Hydrothermal Generations Part I: Simulated Annealing Approach[J]. *IEE Proceeding-Gener, Transm and Distrib*, 1994, 141 (5): 497-501.
- [29] Wong K P, Wong Y W. Short-term Hydrothermal Generations Part II: Simulated Annealing Approach[J]. *IEE Proceeding-Gener, Transm and Distrib*, 1994, 141 (5): 502-506.
- [30] Yin Suzannah, Wong Wa. Hybrid Simulated Annealing/genetic Algorithm Approach to Short-term Hydrothermal Scheduling with Multiple Thermal Plants[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2001, 23: 565-575.
- [31] Glover F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence[J]. *Coputers and Operations Research*, 1986, 13: 533-549.
- [32] Bai X, Shahidehpour S M. Hydro-thermal, Scheduling by Tabu Search and Decomposition Method[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1998, 145 (1).
- [33] 徐宁, 李春光, 张健, 等. 几种现代优化算法的比较研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2002, 24 (12).
XU Ning, LI Chun-guang, ZHANG Jian, et al. Studies on Some Modern Optimization Algorithms[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24 (12).
- [34] 徐刚, 马光文, 等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. *水科学进展*, 2005, (3).
XU Gang, MA Guang-wen, et al. Application of Ant Colony Algorithm to Reservoir Optimal Operation[J]. *Advance in Water Science*, 2005, (3).
- [35] Yu J K, Song Y H. A Novel Short-term Generation Scheduling Technique of Thermal Units Using ant Colony Search Algorithms[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2001, 23 (4).
- [36] 江辉, 彭建春, 杨期余. 基于模糊算法的水火系统双目标经济负荷分配的研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2000, 12 (5).
JIANG Hui, PENG Jian-chun, YANG Qi-yu. Study of Optimal Bi-objective Real Power Dispatch for Power Markets[J]. *Proceedings of the EPSA*, 2000, 12 (5).
- [37] 谢永胜, 孙洪波, 徐国禹. 基于模糊来水量、模糊负荷的短期水火电调度[J]. *中国电机工程学报*, 1996, 16 (6).
XIE Yong-sheng, SUN Hong-bo, XU Guo-yu. A Short Term Hydrothermal Scheduling with Fuzzy Inflows and Loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1996, 16 (6).
- [38] 李爱玲. 水电站水库群系统优化调度的大系统分解协调方法研究[J]. *水电能源科学*, 1997, 15 (4).
LI Ailing. A Study on the Large-scale System Decomposition-coordination Method Used in Optimal Operation of the Hydroelectric Station System[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 1997, 15 (4).
- [39] Eriksen P B, Jorgensen C, Ravn H F. Hydro and Thermal Scheduling by the Decoupling Method[J]. *Electric Power Systems Research*, 1996, 38:43-49.
- [40] 杨毅刚, 彭建春, 周意诚, 等. 水火电力系统有功无功经济调度的研究[J]. *中国电机工程学报*, 1994, 14 (4).
YANG Yi-gang, PENG Jian-chun, ZHOU Yi-cheng, et al. The Research of Real and Reactive Power Economic Dispatch in Hydro-thermal Power Systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1994, 14 (4).
- [41] 毛亚林, 张国忠, 朱斌, 周明. 基于混沌模拟退火神经网络模型的电力系统经济负荷分配[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25 (3).
MAO Ya-lin, ZHANG Guo-zhong, ZHU Bin, et al. Economic Load Dispatch of Power Systems Based on Chaotic Simulated Annealing Neural Network Model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25 (3).
- [42] 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).
TANG Wei, LI Dian-pu. Chaotic Optimization for Economic Dispatch of Power Systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20 (10).
- [43] 江浩. 电厂运行优化决策支持系统设计方案[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28 (5).
JIANG Hao. Design of Operation Optimization Decision Support System for Power Plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28 (5).
- [44] 李学明, 窦文龙, 李志军, 等. 电厂负荷优化分配的专家系统[J]. *中国动力工程学报*, 2005, 25 (1).
LI Xue-ming, DOU Wen-long, LI Zhi-jun, et al. Expert System for Optimized Load Distribution in Power Plants[J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2005, 25 (1).

收稿日期: 2007-01-18

作者简介:

左幸 (1980-), 男, 博士, 从事水电经济管理及电力市场研究. E-mail: drowzy@163.com