

粒子群优化算法在电力系统中的应用综述

陈建华, 李先允, 邓东华, 廖德利

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 粒子群优化(PSO)算法是一种新兴的群体智能优化技术,其思想来源于人工生命和演化计算理论,PSO通过粒子追随自己找到的最优解和整个群的最优解来完成优化。该算法简单易实现,可调参数少,已得到广泛研究和应用。在大量参阅国内外相关文献的基础上,简要介绍了PSO算法的工作原理,较为全面地详述了粒子群优化方法在电力系统中的应用,如电网规划、检修计划、短期发电计划、机组组合、负荷频率控制、最优潮流、无功优化、谐波分析与电容器配置、参数辨识、状态估计、优化设计等方面,并对今后可能的应用指出了研究方向。

关键词: 粒子群优化; 群体智能; 状态估计; 参数辨识

A review on application of particle swarm optimization in electric power systems

CHEN Jian-hua, LI Xian-yun, DENG Dong-hua, LIAO De-li

(Dept of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Particle swarm optimization (PSO) is a new swarm intelligence optimization technique originating from artificial life and evolutionary computation. The algorithm completes the optimization through following the personal best solution of each particle and the global best value of the whole swarm. PSO can be implemented with ease and few parameters need to be tuned. It has been successfully applied in many areas. Based on the inspection of a large number of domestic and foreign literature, the basic principles of PSO are presented, the main research results of applying PSO in following aspects relevant to electric power systems, such as power system expansion planning, maintenance scheduling, short-term generation scheduling, unit commitment, load frequency control, optimal power flow, reactive power optimization, harmonic analysis and capacitor configuration, parameter identification, state estimation and optimal design, are overall presented in detail in this paper. The research trends towards the application in the future is predicated.

Key words: particle swarm optimization; swarm intelligence; state estimation; parameter identification

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)23-0077-08

0 引言

在当前随着电力系统的日益复杂化和系统规模日益扩大化的背景下,如何保证电力系统运行控制目标的实现,如何考虑日趋复杂的安全和经济因素,如何解决电力系统中的各种优化问题,比如最优潮流计算和无功优化问题、机组优化组合问题、机组检修计划优化问题等,是摆在电力工作者面前的一系列课题。近几年随着人工智能的出现,尤其是现代启发式算法的出现,在解决电力系统相关问题中取得了大量的研究成果,文献[1]中作者介绍了蚁群优化算法、粒子群优化算法和人口的免疫算法等

几种现代启发式算法在电力系统经济调度、机组启停、无功优化、扩展规划等领域的研究现状和应用。粒子群优化算法作为现代启发式算法的一个成员,最近几年在电力系统领域中的应用研究逐渐显示出其优越性和广阔的应用前景,粒子群优化算法是一种基于群体智能的新型演化技术,在解决经典优化算法难以求解的诸如不连续、不可微的非线性病态优化问题和组合优化问题时显示出了强大的优势,从而引起了国际学术界和工程界的普遍关注。本文在简要介绍 PSO 算法工作原理的基础上,较为全面地总结了 PSO 算法在电力系统规划、运行和控制等领域的应用现状,但目前的很多工作还处于起步研究阶段,有很多问题值得进一步研究,相信随着研究的进一步深入,PSO 算法将在电力系统中得到更

基金项目:南京工程学院科研基金项目(KXJ06-028)

广泛的应用。

1 粒子群优化算法工作原理

粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization)^[2,3] 算法是一种基于集群智能的随机优化算法,最早由 Kennedy 和 Eberhart 于 20 世纪 90 年代提出。粒子群算法的基本思想是^[4]: 优化问题的每一个解称为一个粒子。定义一个符合度函数来衡量每个粒子解的优越程度。每个粒子根据自己和其它粒子的“飞行经验”群游,从而达到从全空间搜索最优解的目的。具体搜索过程如下:

每个粒子在解空间中同时向两个点接近,第一个点是整个粒子群中所有粒子在历代搜索过程中所达到的最优解,被称为全局最优解 $gbest$; 另一个点则是每个粒子在历代搜索过程中自身所达到的最优解,这个解被称为个体最优解 $pbest$ 。每个粒子表示在 n 维空间中的一个点,用 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ 表示第 i 个粒子,第 i 个粒子的个体最优解(第 i 个粒子最小适应值所对应的解)表示为 $pbest_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}]$; 全局最优解(整个粒子群在历代搜索过程中最小适应值所对应的解)表示为 $gbest_i = [pbest_1, pbest_2, \dots, pbest_n]$; 而 x_i 的第 k 次迭代的修正量(粒子移动的速度)表示为:

$$V_i^k = [V_{i1}^k, V_{i2}^k, \dots, V_{in}^k] \quad (1)$$

其计算公式如下:

$$V_{id}^k = \omega V_{id}^{k-1} + c_1 \times rand_1 \times (pbest_i - x_{id}^{k-1}) + c_2 \times rand_2 \times (gbest_i - x_{id}^{k-1}) \quad (2)$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + V_{id}^k \quad (3)$$

式(2)中, $i=1, 2, \dots, m$; $d=1, 2, \dots, n$, 其中 m 为粒子群中粒子的个数; n 是解向量的维数。 c_1 和 c_2 为大于 0 的学习因子,分别表示两个优化解的权重; $rand_1$ 和 $rand_2$ 是两个独立的、介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; ω 是惯性权重系数,调整其大小可以改变搜索能力的强弱。试验表明权值 ω 将影响 PSO 的全局和局部搜优能力^[5]。 ω 值较大,全局搜优能力强,局部搜优能力弱,反之,则局部搜优能力强,而全局搜优能力减弱。

粒子群优化算法步骤如下^[6]。

①随机给出 n 维空间初始化粒子向量的粒子 x_i^0 和速度 V_i^0 , 设定迭代次数;

②计算每个粒子在当前状态下的适应函数值 p_i ;

③将②中计算的适应函数值 p_i 与自身的优化解 $pbest_i$ 进行比较,如果 $p_i < pbest_i$, 则用新的适应函

数值取代前一轮的优化解,用新的粒子取代前一轮粒子,即 $pbest_i = p_i$, $xbest_i = x_i$;

④将每个粒子的最好适应值 $pbest_i$ 与所有粒子最好适应值 $gbest_i$ 进行比较,如果 $pbest_i < gbest_i$, 则用每个粒子的最好适应值取代原所有粒子的适应值,同时保存粒子的当前状态,即 $gbest_i = pbest_i$, $xbest = xbest_i$;

⑤完成以上的计算后,再进行新一轮的计算,按式(3)将粒子进行移动,从而产生新的粒子(即新解),返回步骤②。直至完成设定的迭代次数或满足事先给定的精度要求为止。

粒子群优化算法流程图如图 1 所示。

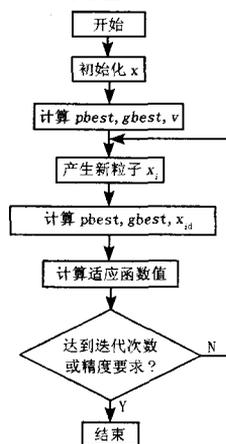


图 1 粒子群优化算法流程图

Fig.1 Particle swarm optimization algorithm flow chart

2 粒子群优化算法在电力系统中的应用现状

粒子群优化算法是近年来提出的一种新型优化算法,它是通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为提出的一种基于群体智能的演化计算技术。该算法具有并行处理、鲁棒性好等特点,能以较大概率找到问题的全局最优解,且计算效率比传统随机方法高。其最大的优势在于简单易实现、收敛速度快,而且有深刻的智能背景,既适合科学研究,又适合工程应用。PSO 算法在电力系统中的应用研究起步较晚,最近几年它在电力系统领域中应用的研究逐渐显示出广阔的应用前景,已开始引起电力科学工作者的关注和研究兴趣^[7~13]。本文在参阅大量国内外文献的基础上,从电力系统规划、运行与控制等领域总结了该算法在电力系统中的应用。

2.1 电力网络规划

电网规划的目的^[14]是寻找一个满足目标用户对负荷的要求,并保证在正常及合理事故下正常供电的经济性最好的网络,实际的电网规划是一个

极为复杂的工程问题, 需要考虑的因素极多。其中许多因素又难以量化、确定化, 具有多目标性、不确定性、非线性性、整数性和多阶段性等特点。其中经济性一直受到高度重视, 专家学者们对于节省投资的规划方法做了深入的研究。但随着经济的发展, 社会对电力的需求和可靠性要求不断提高, 并且电力行业逐渐走向市场化, 人们对可靠性的认识得到了提高。提高电网的可靠性虽然增加了电网的资金投入, 但可靠性的提高却可以带来隐含的经济效益^[15], 如停电损失的减少等。当可靠性投资与可靠性效益得到平衡时, 从社会效益的角度, 电网扩展规划达到最优。因此在复杂的电网扩展规划中, 处理好经济性和可靠性的关系是一个艰巨且意义重大的课题。

文献[16]研究了PSO算法在输电网络扩展规划中的应用, 以投资回收效益、设备成本(包括传输线、铁塔、变电站、开关设备、变压器、补偿设备等)和电能损耗费用之和最小为目标函数, 建立了扩展输电网络的最小费用模型, 设计了基于PSO的求解算法。并以IEEE 7节点系统为例进行测试, 测试结果表明应用PSO方法求解电网扩展规划问题是可行的。但该文只是PSO算法在电网扩展规划中应用的开始, 还有许多问题有待深入研究。文献[17]研究了基于电力市场阻塞管理技术, 采取了综合调整网络架线及发电计划和安装潮流控制设备等措施, 并计及网络剩余容量经济指标, 建立了新的电力网络规划模型。在分析该模型特点的基础上, 提出了对变量进行分类, 使用并行粒子群算法PSO(Particle Swarm Optimization)对其进行求解的方法, 该方法具有灵活性和可扩展性, 适于解决多因素、多变量电网规划问题。并以IEEE Garver-6系统为例, 算例表明, 该模型可显著提高规划方案的经济性; 并行PSO可有效地提高算法的计算速度和收敛性能。

2.2 短期发电计划

电力系统短期发电计划是在满足系统安全和质量的条件下确定一定调度周期内各时段系统机组的运行状态, 并相应地确定各机组的运行出力。短期发电计划问题是一个规模很大的多阶段、多约束的非线性混合整数规划问题。

文献[18]针对短期发电计划中的优化问题提出了一种改进PSO算法, 将表示机组开停机状态的离散变量转换为0~1范围内的连续变量, 与机组出力一起进行PSO优化搜索, 然后再利用就近取整函数“round”将其转换成整数变量。详细描述了应用改进PSO算法求解机组优化启停问题的具体步骤。将该方法应用于10机系统, 实验结果表明该改进PSO

算法用于短期发电计划是可行的。文献[19]中将粒子群优化算法用于求解水火电力系统短期发电计划。实例研究表明, 该方法优化能力高于遗传算法和进化规划。同时对全局搜索粒子群优化算法和局部搜索粒子群优化算法在求解水火电力系统短期发电计划时的动态收敛特性和计算效率等进行了对比研究, 结果显示, 局部搜索粒子群优化算法更适合求解水火电力系统短期发电计划的复杂问题。

2.3 发电机组检修计划

发电机组检修计划是电力系统运行中的重要内容, 对电力系统的安全、经济、可靠运行有着直接的影响。在传统的垂直一体化的电力工业中, 发电、输电和配电环节隶属于同一家电力公司, 发电机组检修计划由系统运行人员统一安排, 只需考虑相关的运行与技术约束和整个系统运行的经济性, 很少能够顾及到单个电厂的利益。随着电力工业的商业化运营, 厂网分离, 竞价上网, 电厂成为一个独立的经济实体, 电厂在制定检修计划时, 必然会以自身收益最大化为目标。发电机组检修计划实际上是一个多目标、多约束的优化问题。由于该问题的复杂性, 一般难以建立统一的数学模型和优化算法。在发电机组检修计划问题中通常有2类目标函数: 可靠性目标函数和经济费用目标函数, 也有将两类目标函数综合考虑的^[20~23]。虽然这些方法对于不同的情况行之有效, 但都不是从单个发电厂的利益出发来安排机组检修的。

文献[8]提出了一种将进化算法的繁殖选择操作算子引入PSO中的改进方法, 用以确定发电机组的检修计划, 在具体建模时, 取周为计算时段, 以生产运行费用和检修费用总和最小为优化目标, 并对印度尼西亚两个工业园的电力系统的机组检修计划进行了计算, 在合理的计算时间内得到了较好的结果。

2.4 电力系统机组优化组合

电力系统机组组合问题是一个大规模混合整数的非线性优化问题。近几十年来, 诸多研究人员对机组组合问题做了大量的研究工作并提出了许多解决方法^[24~29]。

文献[12]中提出了一种新颖的混合粒子群优化算法(HPSO算法), 该算法在标准的粒子群优化算法中引入启发式变异过程, 并在算法迭代过程中并行优化松弛后的机组启停状态变量与机组有功出力变量, 将两层优化问题转化为单层优化问题, 降低了算法的时间复杂度, 有效地提高了粒子群优化算法搜索全局最优解的能力和解决机组组合问题的收敛效率。对2个算例的仿真试验表明了该算法具

有优良的全局收敛性。文献[30]中应用粒子群优化算法对电力系统的机组优化组合问题进行研究,分析了算法中各个参数的不同取值对算法搜索能力和收敛速度的影响,并以常用的测试函数进行验证,建立了相应的数学模型,并以IEEE3机6节点电力系统为实例进行研究。分析结果表明,PSO算法较之常用的遗传算法和混沌优化等算法,在算法结构、计算时间、搜索区间控制以及收敛速度等方面具有较好的特性,验证了该方法的有效性。

2.5 自动发电控制和经济调度

自动发电控制(AGC)是在电厂生产过程监视控制的基础上,实现最佳负荷—频率控制(LFC),使全系统的发电出力与全系统的负荷相匹配,同时将电力系统的频率误差调节到零,保持系统频率在额定值附近轻微波动,并在区域电源之间实现在线的负荷经济分配(EDC)。

文献[31]针对自动发电控制中的负荷频率控制提出了一种能有效地协调粒子群算法优化精度和优化速度的方法,即动态改变粒子的数目,并针对单区域和两区域互连电力系统的不同指标要求,给出了用改进的粒子群优化算法优化PI控制器参数的方法,分别进行优化设计。仿真结果显示,其性能明显优于遗传算法优化的PI控制器。

在文献[32]中Gallad等人首次将PSO应用于电力系统经济调度问题的求解中,但他们只是用PSO算法来解决简单电力系统的单时段机组负荷经济分配问题,而且考虑的约束也很简单。文献[33]进一步考虑了发电机组成本函数为非光滑分段二次曲线时的情形,通过松弛机组的方法严格满足系统负荷的等式约束。文献[34]则综合考虑了诸如发电机组的爬坡率限制、禁止运行区域和系统网络损失等更多的非线性约束条件,使应用PSO算法解决的负荷经济分配问题更接近于实际电力系统的运行情况。同样,文献[35]把具有收缩因子的自适应PSO算法引入电力系统的经济运行中,将重点放在通过惩罚函数处理电网的电压和电流等安全约束上,却忽略了发电机组本身的技术约束,故也有不足之处。

2.6 最优潮流和无功电压优化控制

电力系统无功最优潮流问题是一个复杂的多目标、多约束、非线性、非连续、混合整数优化问题,其控制变量既有连续变量(如节点电压),又有离散变量(如有载调压分接头档位、补偿电容器的投切组数),使得优化过程十分复杂。无功电压优化是最优潮流计算中的一项重要内容,实现无功优化与控制,可以改善电压分布、减少网损。随着电力系统的日益复杂和电力市场制度的实施,安全

稳定运行计算越来越受到电力部门的关注。PSO算法的出现,为最优潮流和无功优化计算提供了一条新途径。

文献[36]中提出应用粒子群优化算法求解最优潮流问题,并结合动态调整罚函数法将最优潮流问题转化成无约束求极值问题,有效提高了PSO算法的全局收敛能力和计算精度。应用此算法对标准IEEE 30节点系统进行了潮流计算,并与线性规划算法和遗传算法进行了比较,结果表明,该算法能够更好地获得全局最优解,具有实用意义。文献[37]中针对电力系统无功最优潮流问题,提出了一种混沌粒子群优化算法(CPSO),以克服粒子群优化算法容易早熟而陷入局部最优解的缺点。该方法结合混沌变量良好的遍历特性及混沌优化的特点,对即将重合而引起搜索能力下降的粒子赋予混沌状态搜索,其余粒子仍以常规PSO方法搜索,从而提高PSO方法的寻优性能。通过对IEEE 6、IEEE 14、IEEE 30和IEEE 118测试系统无功最优潮流问题的计算及分析,表明CPSO方法具有很高的搜索效率。

文献[38]中针对无功优化控制提出了一种全新的优化算法——多智能体粒子群优化算法来求解此类优化问题。该算法结合multi-agent系统和粒子群优化技术,构造了一个格子环境,所有Agent都固定在格子环境中。每一个Agent相当于粒子群优化算法中的一个粒子,它们通过与其邻居的竞争、合作和自学习操作,并且吸收了粒子群优化算法的进化机理,能够更快地、更精确地收敛到全局最优解。在IEEE 30节点系统上进行校验,并与其它方法比较,结果表明,提出的算法具有质量高的解、收敛特性好、运行速度快的突出优点。文献[39]则在考虑电压安全评估的前提下,将无功电压控制问题视为混合整数非线性优化问题加以处理,并扩展PSO算法使其能解决连续和离散变量混合并存的无功电压控制问题。该文通过确定发电机自动电压调节器的运行值、变压器负荷抽头位置改变量和无功补偿器的数量等控制变量来决定实时无功电压控制策略,同时将该方法应用于日本某实际电力系统的无功电压控制中,并与Tabu Search(TS)和枚举方法的结果进行了对比分析,取得了较好的效果。

2.7 谐波分析和电容器配置

配电网中补偿电容器的优化配置问题涉及如何最优地确定电容器的安装位置、容量及类型等方面。合理的电容器配置,能够有效改善电网的电压水平,降低系统的有功网损,并同时避免谐波谐振或电流放大。电容器的配置优化问题是一个非线性

整数优化问题,其目标函数和约束条件都是离散控制量的非线性函数,因而难以用传统规划方法进行问题的精确求解。

文献[9]以系统有功网损费用和电容器运行费用最小为目标函数,建立了考虑谐波影响的电容器优化配置问题的非线性整数规划模型,并应用粒子群优化算法进行求解。针对问题中的离散控制量对算法作了离散化处理,解决了PSO算法用于整数优化或混合整数优化的问题。对IEEE 9节点系统和IEEE 69节点系统分别进行了计算,结果表明算法是正确和有效的。

2.8 同步发电机参数辨识

同步发电机的参数辨识是电力系统安全稳定计算的重要环节,参数取值的正确与否直接影响安全稳定计算的准确性和可靠性。同步发电机中存在着饱和、涡流等复杂的非线性因素,使其参数辨识问题在数学上表现为复杂的非线性优化问题。

文献[40]提出了一种直接利用稳定计算程序进行复杂发电机参数辨识的PSO计算框架,通过稳定计算程序中使用的发电机模型参数组,在优化过程中利用PSO算法进行更新迭代来实现对同步发电机的参数辨识,该算法简单实用。同样,文献[41]在标准PSO算法中引入变异操作,提出了根据粒子的适应度确定算法控制参数的扩展EPSO算法,并将其应用于同步发电机的参数辨识。仿真结果表明,在系统受到较大干扰时,EPSO算法较PSO算法具有更精确的参数综合辨识能力。

2.9 电力系统状态估计

状态估计在电网调度自动化系统高级应用软件中占据重要的地位,有时被誉为应用软件的“心脏”,主要起到正常状态估计、检测和辨识不良数据和系统结构辨识的作用,而经典的加权最小二乘状态估计算法存在不足。近年来,PSO算法引起了人们的兴趣。

S. Naka等人^[42]率先将其应用于配电系统的状态估计中,可更方便地考虑配电网中设备的非线性特性和实际测量值,并通过使状态变量的测量值与计算值之间的偏差最小来估计每个节点的发电量和负荷,同时将遗传算法中的选择算子引入PSO中,对其加以改进,得到了较标准PSO算法更好的结果。文献[43]则进一步将采用收缩因子的自适应PSO算法应用于配电网的状态估计中,提高了量测冗余度和状态估计的可观性及准确性,并缩短了计算时间。

2.10 电力系统稳定器优化设计

为抑制电力系统因负阻尼而产生低频振荡问

题,提高电力系统动态稳定性的重要措施之一是应用电力系统稳定器(PSS)。PSS的设计涉及许多参数值的选择问题,而参数值的选择对PSS的总体性能有很大影响,传统设计方法往往不能保证获得最优参数值。

文献[10]将多机电力系统的PSS设计转化为约束优化问题处理,以电机模型的两个特征值函数为优化目标,建立起一个双目标约束优化问题,采用PSO算法优化求解,以确定PSS的最佳参数取值。同时,该文针对不同的扰动、负荷和系统配置情况对不同的多机电力系统进行了测试和检验,仿真结果表明,应用PSO算法设计PSS提高了多参数寻优的效率,具有很强的鲁棒性,能有效提高系统稳定性,使其具有更大的实用范围。文献[44]提出了根据迭代次数决定PSO中惯性权重因子取值的改进PSO算法,并以直线感应电机的功率因数与效率的乘积为优化目标函数,将扁平非磁性次级双边直线感应电机的设计建模为一个非线性约束优化问题,然后利用改进的PSO算法加以求解。计算结果显示,电机功率因数和同步效率较原始方案都有明显提高,取得了较为满意的效果。

3 粒子群优化算法在电力系统中的应用前景

粒子群优化算法出现的时间并不长,其作为一种新兴的有潜力的群体智能演化算法,在电力系统优化中的应用才刚刚起步。其研究远没有像遗传算法和模拟退火法那样形成系统的分析方法和一定的数学基础。无论从算法的理论还是工程实际的应用上都有很多问题值得进一步研究,其应用前景将是十分的广阔。具体地说:

1) 在算法的基础理论研究方面,与其他比较成熟的优化算法相比,PSO算法的数学基础还比较薄弱。例如,PSO算法的收敛性和全局最优性尚需要理论上的严格证明,算法中的一些参数如学习因子 c_1 和 c_2 ,惯性权重 ω 以及粒子个数的确定还没有通用的有指导意义的原则。

2) 根据电力系统本身的结构和特点,建立使用PSO及其改进算法的模型,使问题的解决更加确实有效。

3) 由于电力系统实际问题的多样性,需要研究者提出更多有效的PSO改进算法,有根据地设置各种参数,保证解的收敛并有效地避免局部最优。

4) 从在电力系统的应用领域和现状看,PSO算法在解决电力系统实际问题中,尤其在多变量非线性约束规划问题方面,表现出比其他算法更快的收敛速度和更大概率找到全局最优解。而电力系统

很多问题都是复杂的多目标、多约束、多阶段、非线性、非连续、混合整数优化问题,因此 PSO 算法在电力系统中的应用才刚刚开始。

5) 值得注意的一个研究趋势是,发展 PSO 混合智能计算系统,充分融合 PSO 算法与人工智能及传统优化算法各自的优点以提高算法的性能,从而更有效地解决电力系统中一些复杂的问题,尤其是随着电力市场的建立和完善,如何应用 PSO 算法解决电力市场中的有关问题,将是有待深入研究的重要课题。

我们相信,随着 PSO 算法在电力系统领域进行广度和深度的应用拓展,并与神经网络、遗传算法和模糊理论相结合必将带动电力系统优化理论和方法的进步和发展。

参考文献

- [1] BAI Hua, ZHAO Bo. A Survey on Application of Swarm Intelligence Computation to Electric Power System[A]. In: Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)[C]. 7587-7591.
- [2] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. In: IEEE Int'l Conf. on Neural Networks[C]. Perth (Australia): 1995. 1942-1948.
- [3] Eberhart R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [A]. In: Proc. of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Nagoya (Japan): 1995. 39-43.
- [4] 杨维,李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
YANG Wei, LI Qi-qiang. Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 87-94.
- [5] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer [A]. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation[C]. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998. 303-308.
- [6] 袁晓辉,王乘,张勇传,等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.
YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chuan, etc. A Survey on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.
- [7] Mamanurk R C, Chenoweth R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvement in Voltage Profiles and for Real Power loss Minimization [J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(7) : 3185-3194.
- [8] CHIN AIK KOAY, DIPTI SRINIVASAN. Particle Swarm Optimization-based Approach for Generator Maint-Enance Scheduling[A]. In: Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium 2003[C]. Indiana(USA): 2003. 167-173.
- [9] 余欣梅,李研,熊信银,等. 基于 PSO 考虑谐波影响的补偿电容器优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 26-31
YU Xin-mei, LI Yan, XIONG Xin-yin, et al. Optimal Shunt Capacitor Placement Using Particle Swarm Optimization Algorithm with Harmonic Distortion Consideration[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 26-31.
- [10] ABIDO M A. Optimal Design of Power System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17 (3): 406-413.
- [11] Gaing Z L. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (3): 1187- 1195 .
- [12] 胡家声,郭创新,曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 25-29.
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. A Hybrid Particle Swarm Optimization Method for Unit Commitment Problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 25-29.
- [13] 闻朝中,李智. 粒子群算法在配电网络无功补偿优化中的应用[J]. 武汉工业学院学报, 2004, 23(1): 18-21.
WEN Chao-zhong, LI Zhi. Application of Particle Swarm Algorithm in Reactive Power Compensation of Distribution Network[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2004, 23(1): 18-21.
- [14] 萧国泉,徐生均. 电力规划[M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
XIAO Guo-quan, XU Sheng-jun. Electric Power Planning[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.
- [15] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36.
ZHANG Yan. Research on Cost-Benefit Analysis of Electric Power Network Reliability Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 33-36.
- [16] Sensarma P S, Rahmani M. A Comprehensive Method for Optimal Expansion Planning Using Particle Swarm

- Optimization[A].In:Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. New York(USA): 2002.1317-1322.
- [17] 金义雄,程浩忠,严健勇,等.计及阻塞管理及剩余容量的并行粒子群电网规划方法[J].电网技术,2005,29(13):18-23.
- JIN Yi-xiong,CHENG Hao-zhong,YAN Jian-yong,et al.Parallel Particle Swarm Optimization on Power Transmission Network Planning Taking Account of Congestion Management and Residual Capacity[J]. Power System Technology,2005,29 (13):18-23.
- [18] 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.
- JIANG Xiu-jie, XIONG Xin-yin,WU Yao-wu.Improved PSO Algorithm and its Application in Short-term Generation Scheduling[J].Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):34-37.
- [19] 余炳辉,王金文,全先璋,等.求解水火电力系统短期发电计划的粒子群优化算法研究[J].水电能源科学,2005,23(6):84-87.
- YU Bing-hui,WANG Jin-wen,QUAN Xian-zhang,et al. Study on Short-Term Dispatching of Hydro-Thermal System Using Particle Swarm Optimization[J].Water Resources and Power, 2005, 23(6):84-87.
- [20] 吴龙,黄民翔.电力系统机组计划检修新模型[J].电力系统自动化,1998,22(2):26-29.
- WU Long,HUANG Min-xiang. A New Model for Generator Maintenance Scheduling of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems,1998, 22(2):26-29.
- [21] Marwali M K C, Shahidehpour S M. Integrated Generation and Transmission Maintenance Scheduling with Network Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (3).
- [22] 陈少华,杨澎,周永旺,等.遗传和模拟退火算法在发电机组检修计划中的应用[J].电力系统自动化,1998, 22 (7):44-46.
- CHEN Shao-hua,YANG Peng,ZHOU Yong-wang,et al. Method Combining Genetic Algorithm with Simulated Annealing Approach for Thermal Unit Maintenance Scheduling[J].Automation of Electric Power Systems, 1998,22(7):44-46.
- [23] 冯永青,张伯明,吴文传,等.电力市场发电机组检修计划的快速算法[J].电力系统自动化,2004,28(16):41-44.
- FENG Yong-qing,ZHANG Bo-ming,WU Wen-chuan, et al. Fast Algorithm of Generator Maintenance Scheduling In Electricity Market[J].Automation of Electric Power Systems, 2004,28(16):41-44.
- [24] 李文沅.电力系统安全经济运行一模型与方法[M].重庆:重庆大学出版社,1989.
- LI Wen-yuan.Safe and Economical Operation of Power System Model and Solution[M].Chongqing: Chongqing University Press,1989.
- [25] 陈皓勇,张靠社,王锡凡.电力系统机组组合问题的系统进化算法[J].中国电机工程学报,1999, 19(12):10-13.
- CHEN Hao-yong,ZHANG Kao-she,WANG Xi-fan. Evolution- ary Optimization Method of Power System Unit Commitment Problem[J]. Proceedings of the CSEE,1999, 19(12):10-13.
- [26] Virmani S, Adrian E C, Imhof K, et al. Implementation of a Lagrangian Relaxation Based Unit Commitment Problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(4):1373-1380.
- [27] 韦柳涛,曾庆川,姜铁兵,等.启发式遗传基因算法及其在电力系统机组组合优化中的应用[J].中国电机工程学报,1994,14(2):67-72.
- WEI Liu-tao,ZENG Qing-chuan,JIANG Tie-bing, et al. A New Heuristic Genetic Algorithm and Its Application in Solution of the Unit Commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 1994,14(2): 67-72.
- [28] HOU Yun-he, WU Yao-wu, LU Li-juan, et al. Generalized Ant Colony Optimization for Economic Dispatch of Power Systems[A]. IEEE Power System Technology Power Con[C]. 2002.225-229.
- [29] 韩学山,柳焯.考虑发电机组输出功率速度限制的最优机组组合[J].电网技术,1994,18(6):11-15.
- HAN Xue-shan,LIU Zhuo.Optimal Unit Commitment Considering Unit's Ramp-rate Limits[J]. Power System Technology, 1994, 18(6):11-15.
- [30] 张振宇,葛少云,刘自发.粒子群优化算法及其在机组优化组合中应用[J].电力自动化设备,2006,26(5):28-31.
- ZHANG Zhen-yu, GE Shao-yun, LIU Zi-fa.Particle Swarm Optimization Algorithm and its Application In Unit Commitment[J].Electric Power Automation Equipment, 2006,26(5):28-31.
- [31] 马飞,陈雪波,李小华.改进的粒子群算法在电力系统 AGC 中应用[J].控制工程,2005,12(S1):52-55.
- MA Fei,CHEN Xue-bo,LI Xiao-hua.Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm to AGC of Power Systems[J].Control Engineering of China, 2005,12(S1):52-55.
- [32] El-Gallad A, El-Hawary M. Particle Swarm Optimizer for

- Constrained Economic Dispatch With Prohibited Operating Zones[A]. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. Manitoba(Canada): 2002.78-81.
- [33] park Jong-Bae, Lee Ki-Song. Economic Load Dispatch for Non-Smooth Cost Functions Using Particle Swarm Optimization[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Ontario(Canada): 2003.938-943.
- [34] Gaing Zwe-Lee. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3):1187-1195.
- [35] Pancholi R K, Swarup K S. Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Line Flow and Voltage Constraints[A]. In: Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region[C]. Bangalore(India):2003.450-455.
- [36] 俞俊霞,赵波.基于改进粒子群优化算法的最优潮流计算[J].电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 83-88.
YU Jun-xia, ZHAO Bo. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Power Flow Problems[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2005, 17(4): 83-88.
- [37] 刘自发,葛少云,余贻鑫.基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J].电力系统自动化,2005,29(7): 53-57.
LIU Zi-fa, GE Shao-yun, YU Yi-xin. Optimal Reactive Power Dispatch Using Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 53-57.
- [38] 赵波,曹一家.电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J].中国电机工程学报,2005,25(5): 1-7.
ZHAO Bo, CAO Yi-jia. A Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 1-7.
- [39] Hirota Y, Yoshida, Kenichi Kawata. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [40] 龙云,王建全.基于粒子群优化算法的同步发电机参数辨识[J].大电机技术,2003,(1):8-11.
- LONG Yun, WANG Jian-quan. Parameters Identification of Synchronous Generator Based on Particle Swarm Optimization Theory[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003,(1):8-11.
- [41] 胡家声,郭创新,曹一家.基于扩展粒子群优化算法的同步发电机参数辨识[J].电力系统自动化,2004, 28(6): 32-35.
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. Generator Parameter Identification Using Extended Particle Swarm Optimization Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 32-35.
- [42] Shigenori Naka, Yoshikazu Fukuyama. Practical Distribution State Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization[A]. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C]. Ohio(USA): 2001. 815-820.
- [43] Shigenori Naka, Takamu Genji. A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 60-68.
- [44] 夏永明,付子义,袁世鹰等.粒子群优化算法在直线感应电机优化设计中的应用[J].中小型电机,2002,29(6): 14-16.
XIA Yong-ming, FU Zi-yi, YUAN Shi-ying. Application of Particle Swarm Optimism in Optimistic Design for Linear Induction Motor[J]. Small & Medium Electric Machines, 2002, 29(6): 14-16.

收稿日期: 2007-05-09; 修回日期: 2007-08-01

作者简介:

陈建华(1976-),男,研究生,讲师,当前研究课题为基于粒子群优化算法的电力系统无功最优潮流的研究,主要研究方向为智能计算方法在电力系统中的应用; E-mail: farzia1976@sina.com

李先允(1964-),男,研究生,副教授,当前研究课题为电力电子技术在电力系统中的应用,主要研究方向为智能控制系统与决策、参数辨识、风力发电技术;

邓东华(1965-),男,研究生,副教授,主要研究方向为电力系统优化运行研究。