

基于自适应粒子群算法的负荷最优分配

苏 鹏¹, 刘天琪¹, 黄 健²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 峨眉山供电局, 四川 峨眉山 614000)

摘 要: 在传统经济负荷分配模型的基础上, 结合节能调度的宗旨, 建立了综合考虑系统有功网损最小和机组发电耗煤量最小的多目标负荷分配模型, 该模型能对系统进行整体节能优化。引入了自适应权重和因子的概念, 采用了一种用于多目标负荷最优分配的自适应粒子群算法, 并对 IEEE 57 节点系统进行了仿真计算。结果表明, 该方法能降低系统网损和减少机组煤耗, 从而有效地节约能源, 同时满足系统的安全约束。

关键词: 经济负荷分配; 自适应粒子群算法; 混沌优化; 多目标优化

Abstract: Based on the traditional model of economic load dispatch (ELD), and combined with the purpose of energy conservation dispatching, a model of multi-objective load dispatch is established where the active power loss minimization and coal consumption minimization are taken into account, and this model can optimize the energy-saving from the whole power system. Based on the factor of self-adaptive weight sum, a self-adaptive particle swarm algorithm is proposed and applied to solve load dispatch problem for IEEE 57 bus system. The simulation results show that the model is able to save energy sources effectively, and the validity of the established model and the effectiveness of the proposed algorithm are verified.

Key words: economic load dispatch; self-adaptive particle swarm algorithm; chaos optimization; multi-objective optimization

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2009)04-0032-04

0 引 言

经济负荷分配^[1~5] (economic load dispatch, ELD) 是电力系统中一类典型的优化问题, 其目的是在满足负荷和运行约束的条件下, 最小化发电成本(煤耗量)。研究 ELD 问题对于提高系统运行的经济性和可靠性都具有重要的意义。2007 年国务院下发了节能调度的试行办法, 并在四川、江苏等地试运行。节能调度对火电机组影响比较大, 因其核心思想是通过火电机组按照煤耗水平从大到小排序, 让排在前面的机组尽量多发。这样既能节省一次能源, 又能减少对环境的污染。实施节能调度排序后, 小火电机组必然面临着关停, 进而采用“上大压小”的替代方案^[6]。这对局部电网的供电能力、网架结构和网损会产生一定影响, 特别是在电源结构不合理时, 关停小机组, 极大可能会增大网损, 造成线路超载或者节点电压越限情况。然而, 目前的负荷分配方法^[3~5]都是在发电侧进行出力的有效分配, 并没有考虑到由此是否会导致网损的增大和是否满足系统的安全运行约束, 网损本质上也是对能源的损耗。因此, 在传统

负荷分配模型的基础上, 提出了多目标的负荷分配模型, 以煤耗和网损最小为目标函数, 同时考虑网络约束条件, 对机组出力进行优化, 从而实现整个电力系统的节能。

处理多目标优化模型的方法通常是采用某些方法将多目标问题转化为单目标问题, 如基于权重的加权方法^[7,8]、基于模糊集理论的隶属度算法^[9,10]等, 然后结合各类优化方法进行寻优。文献[8]采用加权的方法把多目标问题转化为单目标问题, 虽然兼顾了快速性和经济性, 但对于不同的目标函数, 其物理本质不同, 量纲也不同, 权重因子的取值也十分困难。文献[9]提出模糊多目标优化模型, 通过对每个目标进行隶属度函数的归一化计算, 实现到单目标的转换, 但惩罚因子的取值往往根据经验得到, 容易受主观因素的影响, 最优隶属函数的确定也比较复杂。现将自适应权重和法与粒子群算法相结合, 将多目标优化问题组合为单一目标问题。每代种群中的多目标权重因子均利用当前种群中的一些有用信息重新调整, 使搜索方向朝着整个搜索空间的最优解方向发展。采用混沌寻优方法来克服粒子群算法陷入早熟缺陷, 将其应用到电力系统多目标负荷最优分配问

题的求解中,通过对 IEEE 57 节点系统的仿真计算表明,该算法有较好的全局寻优能力。

1 多目标负荷最优分配数学模型

1.1 目标函数

多目标负荷最优分配的数学模型是在满足系统运行约束和发电机运行约束的条件下,以系统总发电成本最小和有功网损最小为目标。其目标函数为

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_i) \\ \min f_2 = P_{\text{loss}} = f(P_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_i 为第 i 台发电机的有功功率; N_G 为系统内发电机总数; $F_i(P_i)$ 为第 i 台发电机的耗量特性; P_{loss} 为系统总网损。 $F_i(P_i)$ 一般可以用二次函数近似表示为

$$F_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \quad (2)$$

式中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为第 i 台发电机的耗量特性常数。

1.2 约束条件

发电机运行约束:

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (3)$$

式中, $P_{i \min}, P_{i \max}$ 为发电机有功功率的上限和下限。

电力平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_i = P_L + P_{\text{loss}} \quad (4)$$

网损一般采用潮流计算或 B 系数法求得,这里采用 matpower 计算潮流得到网损,因此还需计及一些潮流计算中的约束条件。

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in \mathcal{F}_i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j \in \mathcal{F}_i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max} \quad (\mathcal{F} \text{ 无功电源集}) \quad (6)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (i=1, 2, N) \quad (7)$$

$$P_l \leq P_{l \max} \quad (l=1, 2, N_l) \quad (8)$$

式中, $Q_{i \min}, Q_{i \max}$ 为无功电源输出功率的上限和下限; $V_{i \min}, V_{i \max}$ 为负荷节点电压幅值上限和下限; $P_{l \max}$ 为线路容量上限; V_i 为第 i 个负荷节点电压幅值; N, N_l 为系统节点数和线路数。

2 自适应粒子群算法及其改进

2.1 基本粒子群算法

在 D 维搜索空间中有 n 个粒子,其中第 i 个微粒的位置表示为 X_i ,速度用 V_i 表示。它经历过的最好位置记为 P_{id} ,整个群体经历过的最好位置用 P_{gd} 表示。各粒子按如下公式更新自己的速度和位置^[11]。

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} &= w \times v_{id}^t + c_1 \times \text{rand}() \times (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 \times \\ &\text{rand}() \times (p_{gd}^t - x_{id}^t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, t 为迭代次数; d 表示 D 维搜索空间中的第 d 维变量; c_1 和 c_2 为权重因子; $\text{rand}()$ 为 $[0, 1]$ 区间内产生的随机数; w 为惯性权重系数。由下式进行自适应调整。

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) / \text{iter}_{\max} \times \text{iter} \quad (10)$$

式中, iter_{\max} 是迭代最大值; iter 是当前迭代次数。

粒子群算法一般采用实数编码,由于没有选择、交叉与变异等操作,算法结构相对简单,运行速度很快。但容易陷入局部最优,即早熟收敛现象。这种情况下,应进行早熟处理。

2.2 混沌寻优方法

混沌状态广泛存在于自然想象和社会现象中,是一种非线性现象,其行为复杂且类似随机,但看似一片混乱的混沌变化过程并不完全混乱,而是存在着精细的内在规律。混沌运动能在一定范围内按其自身的“规律”不重复遍历所有状态。混沌优化算法就是利用这些混沌变量的遍历性、随机性和规律性等特点在解空间内进行优化搜索,易于跳出局部最优解,无需优化问题具有连续性和可微性。

目前混沌优化方法主要是将混沌变量线性化映射到优化变量取值空间,在搜索空间较小时效果显著,但搜索空间较大时,效果却不能令人满意。因为传统的线性载波,使得混沌运动在整个大的搜索空间中容易集中在边界寻优,影响寻优效果。针对这个问题,采用改进的二次载波混沌优化方法^[12],它在第一次载波得到的最优解双侧领域内变换尺度寻优,能逐步缩小搜索范围,加快收敛速度,从而有较高的效率。将混沌搜索空间由粒子群迄今为止搜索到的最优位置决定,以它为基础产生混沌序列。通过逆映射返回到原解空间,在原解空间对混沌变量经历的每一个可行解计算其适应值,保留性能最好的可行解,并随机取代当前群体中的某个粒子。

2.3 自适应权重和法

多目标优化问题的求解方法很多,大多数传统方法采用固定权重的加权法将多个目标变为单目标,然后采用数学规划工具处理。固定的权重值一般根据

决策者的偏好确定,但对于量纲不同的各优化子目标,决策者有时很难确定到底采用多大的权重,而且一组固定的权重因子在搜索空间中只能沿一个固定方向搜索。研究人员对此做了很多工作,提出了一些有效的改进方法。其中,Gen和 Cheng提出了一种自适应权重方法,并证明了该方法能根据当前种群在各方面的性能进行适应性调整以获得朝向正理想点(各方面性能的综合最优点)的搜索压力^[13,14]。

为不失一般性,考虑带有 q 个目标的最小化问题:

$$\min \{ z = f(x), z = f(x), \dots, z_q = f_q(x) \} \quad (11)$$

$$\text{s t } h_i(x) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$g_i(x) - b_i < 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

对于给定个体 x 权重和目标函数为

$$z(x) = \sum_{k=1}^q \frac{z_k^{\max} - f_k(x)}{z_k^{\max} - z_k^{\min}} \quad (13)$$

在式(13)确定的目标函数中,分式是为了将个体对应的单一目标函数归一化到 $[0, 1]$ 区间内,从而使加权后目标函数归一化到 $[0, q]$ 区间内。

应用上述方法,基于自适应权重和的多目标负荷最优分配目标函数为

$$f(x) = \frac{f_1^{\max} - f_1(x)}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \frac{f_2^{\max} - f_2(x)}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (14)$$

2.4 约束条件的处理

若潮流计算收敛,则等式约束中的功率平衡条件式(5)可满足;若潮流不收敛,则将此个体对目标函数的适应值都指定为一较大值,使其在寻优过程中无法占优。控制变量在初始化和每次更新时均被限制在其允许范围内,因此不等式约束(3)也能满足。真正需要考虑的约束条件是式(6)~(8)。文中将其转化为一个罚函数,并作为一个最小化目标加入到目标函数中。

$$\min f = \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_D} \left(\frac{V_i - V_{lim}}{V_{max} - V_{min}} \right) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_G} \left(\frac{Q_i - Q_{lim}}{Q_{max} - Q_{min}} \right) + \lambda_3 \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{P_1 - P_{lim}}{P_{max}} \right) \quad (15)$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为罚因子。

V_{lim} 、 Q_{lim} 、 P_{lim} 的定义为

$$V_{lim} = \begin{cases} V_{max} & V_i > V_{max} \\ V_{min} & V_i < V_{min} \\ V_i & \text{其他} \end{cases}$$

$$Q_{lim} = \begin{cases} Q_{max} & Q_i > Q_{max} \\ Q_{min} & Q_i < Q_{min} \\ Q_i & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{lim} = \begin{cases} P_{max} & P_1 > P_{max} \\ P_1 & P_1 < P_{max} \end{cases}$$

3 求解步骤

运用基于 Pareto 解集的改进粒子群算法解决多目标经济负荷分配的具体计算步骤如下。

1)初始化。读入原始数据,包括电力系统数据和算法参数数据;

2)迭代次数 $Iter=1$,在控制变量的变化范围内随机生成 N 个解,每个粒子的个体极值和全局极值均为初始位置;

3)根据粒子编码的控制变量值,对整个系统进行潮流计算,并由此计算每个粒子所代表的优化方案下系统的有功网损、机组耗煤量和惩罚项;

4)计算每个粒子的适应值,即目标函数值,并更新个体最优值和全局最优值;

5)按式(9)更新粒子的速度和位置,并按一定概率对当前粒子群进行混沌寻优;

6)判断是否满足结束准则,达到最大允许迭代次数或最优解对应的目标函数值在给定的迭代步数内改变量小于给定值时,停止优化并输出结果,否则迭代次数 $Iter=Iter+1$,返回步骤 3)。

4 算例分析

以 IEEE 57 节点系统为算例进行分析,该系统共有 57 个节点,80 条支路,50 个负荷节点,7 台发电机,1 号机组为系统平衡机组,假设其为水电机组。算法参数设置如下:粒子种群大小为 30,最大迭代次数为 100,粒子群算法中常数 c_1 和 c_2 均为 2.05,惯性常数 $W_{max}=0.9$, $W_{min}=0.4$,最大混沌搜索次数为 40。

重复实验 50 次,得到全局最优解,各机组优化后出力见表 1。

从表 1 结果中可以看出:8 号机组和 12 号机组的煤耗率较低,发电量大,分别占自身容量的 65% 和 87% (大容量机组煤耗率低);而其他机组由于煤耗率高,发电量低,甚至存在不发电的情况。这和节能

调度核心思想是一致的,即充分利用煤耗率低的机组发电。并且该结果代入潮流计算后,各节点电压、各支路是不存在越限情况,能满足系统运行要求。

表 1 优化后的控制变量

机组序号	机组容量	优化结果
1	575.88	462.57
2	100.00	0
3	140.00	34.98
6	100.00	40.27
8	550.00	353.91
9	100.00	0.02
12	410.00	359.03

根据优化迭代结果,绘制了自适应粒子群算法的收敛特性曲线,见图 1。可以看出,自适应粒子群算法在大约 30 次的时候就已经非常接近最优解,表现很高的优化效率。

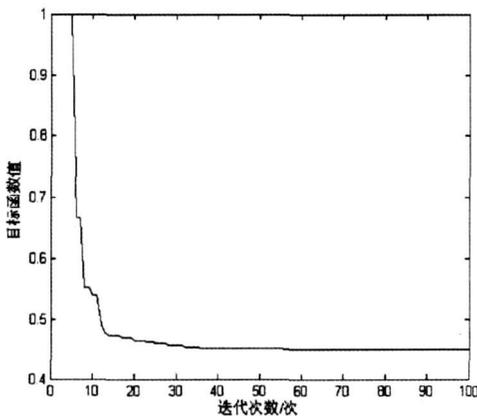


图 1 粒子群算法收敛特性曲线

传统经济负荷分配模型只是以煤耗量为目标函数进行优化求解,而忽略了该优化方案是否会导致网损的增加。表 2 给出了传统模型与本模型分别优化求解后的比较。可以看出,传统模型的煤耗是比较小,但网损却比较大;在本模型中,煤耗比传统模型多 165 t,增加了 10%,而网损比传统模型减少了 7.8 MW,减少了 23%。如果系统规模扩大,网损减少的比例会更多。足以说明,本模型是优于传统经济负荷分配模型,能够实现整个系统的节能。

表 2 IEEE57 节点系统负荷分配优化前后的结果

	网损 (MW)	煤耗 (t)
传统模型	34.0	1 503
本模型	26.2	1 668

5 结 论

研究电力系统负荷分配时,加入其对网损的影响,同时兼顾电网的约束条件,这对于电力系统总体的节能具有现实意义。用 IEEE 57 节点系统作为算例,采用自适应粒子群算法求解。计算结果表明,基于本模型的负荷分配结果可以同时降低网损,减少机组能耗,并且满足系统的安全约束。同时所提出的优化方法在求解多目标优化方面具有普遍的适用性,因此可应用于其他领域的多目标优化问题的求解。

参考文献

- [1] 本刘自发,张建华.一种求解电力经济负荷分配问题的改进微分进化算法[J].中国电机工程学报,2008,28(10):100-105.
- [2] 本初壮,于继来.一种计及网络约束和禁止运转区影响的经济负荷分配算法[J].电网技术,2006,30(11):21-25.
- [3] 本张雪雯,李艳君.基于自调节粒子群算法的电力系统经济负荷分配[J].电网技术,2006,30(18):8-13.
- [4] 蒙文川,邱家驹,卞晓猛.电力系统经济负荷分配的人工免疫混沌优化算法[J].电网技术,2006,30(23):41-44.
- [5] 毛亚林,张国忠,朱斌,等.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):65-70.
- [6] 杨卫红,郭利杰,单葆国.关停小火电机组对“十一五”规划电网的影响分析[J].电力技术经济,2007,19(4):10-13.
- [7] 张武军,叶剑锋,梁伟杰,等.基于改进遗传算法的多目标无功优化[J].电网技术,2004,28(11):67-71.
- [8] 王治国,刘吉臻,谭文,等.基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):86-92.
- [9] Dhillon J S, Parti S C, Kothari D P. Fuzzy decision-making in stochastic multiobjective short-term hydrothermal scheduling[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 191-200.
- [10] Basu M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multiobjective short-term hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2-3): 277-285.
- [11] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer

(下转第 84 页)

式中, P_n ——有功功率损失;

R ——每项输电线路的电阻 (含输电线路及变压器), Ω 。

输电线路电阻: $R=KL/A$

式中, K ——电阻系数;

A ——导线截面积;

L ——导线长度, m 。

变压器电阻: $R=Y_k U^2/S_n$

式中, Y_k ——变压器短路阻抗, Ω ;

U ——系统电压, V ;

S_n ——变压器额定容量, kVA 。

增加变压器及输电线路的利用率。

所增加的利用率为:

$$(P_2 - P_1) / P_1 = [(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) - 1] \times 100\%$$

式中, $\cos\varphi_1$ ——改善前的功率因数;

$\cos\varphi_2$ ——改善后的功率因数。

提高系统的端电压减少系统的电压降:

$$du(\%) = Q_c / S_n \times X_k(\%)$$

式中, $du(\%)$ ——电压提高百分比;

Q_c ——补偿电容器的容量, $kvar$;

S_n ——变压器容量, kVA ;

$X_k(\%)$ ——变压器阻抗百分比。

在低压用户侧进行就地无功补偿, 可以改善用户侧功率因数, 减少配电网传送的无功功率, 降低线路损耗。如表 2 功率因数提高后, 线损将大幅度降低。

表 2 功率因数由 1.0 下降时损耗增加情况

功率因数 λ	可变损耗 $\Delta P/\%$	功率因数 λ	可变损耗 $\Delta P/\%$
1.00	0	0.75	78
0.95	11	0.70	104
0.90	23	0.65	136
0.85	38	0.60	178
0.80	56		

在无功补偿方式上, 主要采用电容分散补偿 (在用户侧) 和集中补偿 (在变电站内) 相结合、高压补偿和低压补偿相结合的方法。同时, 对用户实行无功功

率考核和力率奖惩制度, 可以有效地改善用户侧和线路的功率因数, 减少无功损耗。但在实际工作中, 依然存在一些问题。一是由于部分用户仍然使用单向计量的无功表计, 不能计量反向无功, 无法对其功率因数进行准确的考核。为了达到考核标准, 用户人为加大了电容器的投入数量, 导致无功功率倒送回电网, 造成电压升高, 损耗增加。二是用户侧缺乏管理。由于无功电量是随着负荷变化不断改变的, 但有些用户仍然使用手动投切装置, 自动化程度低, 总体投运率不高, 功率因数不稳定。对于以上两种情况, 建议一是进行计量改造, 安装多功能电子表, 能双向记录无功电量, 同时加大考核力度, 使用户对功率因数引起足够的重视。二是加强无功补偿管理, 在配电变压器低压侧安装无功自动补偿柜, 使其可根据负荷的实际情况自动投切电容器组, 达到提高变压器功率因数、减少配电损耗的目的。

3 结 语

线损管理的好坏直接反映了供电所的管理水平。在管理上, 要做到有目标、有考核、有计划; 在技术上, 要做到有标准、有分析、有总结, 逐步形成一套较为完善的闭环管理模式, 建立常态管理, 努力降损节能, 为供电企业的进步和发展做出更大的贡献。

参考文献

[1] 鹿忠民. 小议降低农村电网线损的管理措施与技术手段 [J]. 中国科技财富, 2008, (7): 101.

[2] 高岩涛, 喻波, 郎宇宁. 农网无功就地平衡和降损的实践与探讨 [J]. 黑龙江电力, 2006, 28(5): 367-369.

[3] 李毅. 降低低压线损的技术措施 [J]. 农村电工, 2007, 15(3): 6.

[4] 王泽勇. 低压电网降损节能的几点技术措施 [J]. 农村电工, 2007, 15(3): 7.

(收稿日期: 2009-02-15)

(上接第 35 页)

[C]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation IEEE World Congress on Computational Intelligence Anchorage USA, 1998: 69-73.

[12] 郭燕, 史丽萍, 赵学华, 史治水. 一种改进的混沌优化方法研究 [J]. 平原大学学报, 2008, 25(2): 142-143.

[13] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[14] Jamshidi M, Fathi M, Pierrot F. Intelligent automation and control [M]. Albuquerque NM: TSI press 1996.

作者简介:

苏 鹏 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、人工智能在电力系统中应用。

刘天琪 (1962-), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

(收稿日期: 2009-03-01)