

基于改进模拟退火算法的电网无功优化

贾德香¹, 唐国庆¹, 韩净²

(1. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096; 2. 马鞍山供电局, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 无功运行优化问题的关键在于获得最优解或较好的次优解。传统的线性规划法和非线性规划法不能很好地处理整型变量问题, 而常规模拟退火算法(SA)的鲁棒性不高。结合高中压配电网的特点, 对SA进行了改进: 采用记忆指导搜索方法, 并采用模式法修正局部最优解。数值对比试验表明, 本方法是合理的和可行的, 具有一定的实用意义。

关键词: 电网; 无功优化; 记忆搜索; 模式法; 改进模拟退火算法

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)04-0032-04

0 引言

无功运行优化(RPOP)问题一直受到人们的重视, 因为我国的线损率历来居高不下。例如, 2001年安徽省总发电量约为400亿kwh, 电网的实际统计线损率约为20%, 即线损电量约为80亿kwh, 其中可变线损电量约为60亿kwh^[1]。农网损耗甚至高达28%^[2]。网损的严重性由此可见一斑。在现有电网结构的基础上, 通过合理调节无功潮流可以降低网损、提高电压质量和电网运行的经济性。无功运行优化问题是一个大规模非线性整数规划问题。其目标通常为网损最小, 也有的采用偏移量最小, 控制设备调节量最小或操作设备次数最少等作为目标函数。其等约束条件一般为各节点功率平衡, 不等约束条件包括节点电压、线路功率和各控制量调节范围的限制^[3]。其算法主要有线性规划法、非线性规划法、混合整数规划法、动态规划法、人工智能法等, 目前还没有一种方法能保证求出无功优化问题的最优解^[4]。

对于35~110kV中高压配电网, 其调节无功潮流的主要手段是改变有载调压变压器的分接头位置和并联电容器的投切组数, 这些控制变量一般为整型。传统的线性规划法和非线性规划法等先将这些整型控制量视为连续变量, 待求出最优解后再取近似的整数值, 误差较大; 或者采用分支定界求解, 计算时间过长。近年来, 许多学者采用人工智能法求解RPOP问题。文献[5]采用遗传算法结合神经网络预算电网潮流, 减少了大规模电网遗传算法的整体计算时间。文献[6]采用记忆指导的模拟退火方案, 较好地实现了配电网电容器的三相分相优化投切问题。

模拟退火法(Simulated Annealing, 简称SA)具有随机寻优的特点, 能较好地避免局部极值点的束缚。但是SA求解速度慢, 鲁棒性不强。因此, 本文采用改进模拟退火算法(ISA)求解RPOP问题。主要改进点如下: 采用记忆指导搜索方法, 加快了搜索速度; 采用模式法局部寻优, 增加了获得全局最优解的可能性。数值对比试验表明, 上述改进方法是合理的和可行的。

1 数学模型

高中压配电网无功运行优化的主要目的就是在满足各种约束条件下, 通过改变有载调压变压器的分接头位置和并联电容器的投切组数, 使有功网损最小。其数学模型为:

$$\begin{aligned} \min P_s(u, x) & \quad \text{目标函数, 即有功网损} \\ \text{s. t.} \quad g(u, x) &= 0 & \quad \text{等约束条件} \\ h(u, x) & \leq 0 & \quad \text{不等约束条件} \end{aligned}$$

其中, 控制量 u 包括电网中发电机或可连续调整无功补偿设备的无功出力、有载调压变压器的分接头档位和并联电容器投入运行的组数; 状态量 x 包括各节点的电压模值和相角。

等约束条件为基本潮流方程组, 即各节点有功功率和无功功率平衡, 包括负荷功率与网损之和等于发电功率。

不等约束条件数量较多, 主要包括: 节点电压模值的上下限约束, 线路和变压器通过的最大功率约束, 有载调压变压器变比调整范围的约束, 有功电源出力上下限的约束, 可调无功电源出力上下限的约束^[3]。其中, 有载调压变压器的分接头档位和并联电容器投切的组数均取整数。

在SA中, 不等约束条件通常作为惩罚项附加

在目标函数上。本文采用的目标函数为： $P_s(u, x) + cK$ 。其中， $P_s(u, x)$ 为有功网损， K 为违反不等约束条件的次数， c 为惩罚因子。对于不同类型的约束条件，惩罚因子 c 可取不同数值。当约束条件比较重要时，如电压越上限（大于 1.1 倍的额定电压）和线路功率越限等， c 可取 1；当约束条件不太重要时，如电压越下限（小于 0.95 倍但是大于 0.9 倍的额定电压）等， c 可取 0.5。

2 算法

SA 是 1953 年 Metropolis 等人提出的。它模拟物理学中固体物质（如金属）的退火过程来求解组合优化问题。在物理退火过程中，通常先将金属加热至熔化，使其中的粒子可以自由移动，即处于高能态。然后逐渐降低温度，使粒子形成低能态的晶格。只要在凝固点附近温度下降得足够慢，物质就能摆脱局部应力的束缚，形成最低能量的基态 - 晶体^[7]。将晶体与最优值、冷却过程与寻优过程对应起来，从而形成 SA 算法。SA 求解步骤如下^[8]：

- 1) 从可行解空间中任选一初始状态 x_0 ，计算其目标函数值 $f(x_0)$ ，并选择初始控制温度 T_0 和马尔可夫链 (Markov Chain) 的长度；
- 2) 在可行解空间中产生一个随机扰动，得到新状态 x_1 ，计算其目标函数值 $f(x_1)$ ；
- 3) 判断是否接收：如果 $f(x_1) < f(x_0)$ ，则接受新状态 x_1 为当前状态；否则按 Metropolis 准则判决是否接受 x_1 ，若接受，则令当前状态等于 x_1 ；若不接受，则令当前状态等于 x_0 ；
- 4) 根据某个收敛准则，判断抽样过程是否终止，是则转 5，否则转 2；
- 5) 按照某个温度冷却方案降低控制温度 T ；
- 6) 根据某个收敛准则，判断退火过程是否终止，是则转 7，否则转 2；
- 7) 以当前解作为最优解输出。

SA 能以足够高的概率（接近 1）收敛于全局最优解，其前提是：初始温度足够高，温度下降足够慢和终止温度足够低。实际应用中很难满足这些要求，因而其求解结果不太理想。另外 SA 搜索效率较低，最后输出的结果可能比中间结果差。多年来，SA 的主要改进之处在于初始温度的选择、降温策略和终止判据上。初始温度一般取与目标函数同一数量级的某个数值。在邻域搜索过程中，当解的质量变差的概率呈 Boltzmann 分布时，S. Geman 和 D. Geman 证明了按 $T = T_0 / \log(1 + t)$ 降温策略可使 SA 搜

索到全局最优，其中 t 为降温次数^[9]。在搜索后期，当解的质量变差的概率呈 Cauchy 分布时，H. Szu 和 R. Hartley 提出了按 $T = T_0 / (1 + t)$ 的快速降温策略可使 SA 搜索到全局最优^[10]，从而尽量避免了搜索在全局最优解的邻域内波动。终止判据也有多种取法，例如取控制温度下降到某一设定的最低温度、当前最优值经历的 Markov Chain 个数等。

考虑到计算的复杂度以及可编程性，本文采用记忆指导搜索方法结合模式法局部寻优，来求解 RPOP 问题。所谓记忆指导，是指取前一阶段（即记忆长度）搜索结果中的最优值作为下一阶段搜索的起点，这种方法在一定程度上避免了搜索的盲目性。局部寻优能力较差几乎是所有随机搜索方法的通病，而模式法 (Pattern Search, 简称 PS) 比较适合局部寻优，因此本文采用模式法对每个链中的最优值进行局部寻优，并采用整个搜索结果中的最优值作为输出结果，从而增加了获得全局最优解的可能性。终止判据取最低控制温度和最优值保留链数相结合的方式。

PS 是 1961 年 Hooke 和 Jeeves 提出的一种直接求解优化问题的方法。PS 的长处在于能够追寻谷线（脊线）加速移向最优解^[11]。本文运用 PS 对 SA 的每个链中的最优值进行局部寻优，具体步骤是：取每个链中的最优点作为初始基点 B_1 ；确定各独立控制变量 U_i 的步长；依次对 U_i 的两个方向进行扰动，并按目标函数值优化的方向移动矢点；当所有变量都被扰动后，即可得到新基点 B_2 ；从 $B_1 + 2(B_2 - B_1)$ 点开始进行类似的扰动，就得到了新基点 B_3 ；再从 $B_2 + 2(B_3 - B_2)$ 点开始重复上述步骤进行探索和加速，直到目标函数值不再下降，局部寻优迭代终止。PS 提高了 SA 的局部寻优能力。

3 算例

本文以 IEEE - 30 节点系统的无功优化问题为例，对所提的算法进行验证。IEEE - 30 节点系统的数据见文献 [12]。该系统包括 6 台发电机、4 台变压器和 2 套并联电容器。设控制变量为 4 台变压器、2 套并联电容器。为了突出高中压配电网的特点，便于分析和比较，发电机的无功发电量未作控制量。设线路变压器变比可调，变比上下限分别为 1.1 和 0.9，其分级步长为 2.5%，分接头档位变量设为整型，其取值范围是 $[-4, 4]$ 。设节点 24 的电容器分为 2 组，投切组数变量设为整型，其取值范围是 $[0, 2]$ 。节点 10 的电容器分为大小相等的 4 组，投

切组数变量设为整型,其取值范围是 $[0, 4]$ 。功率基准值为 100 MVA。SA 的初始温度 T_0 取 10,降温策略采用 $T = kT_0$ 的简化方式,其中温度衰减系数 k 取较大值(0.95),这样虽然导致迭代次数的增加,但能搜索更大范围的解空间,有利于获取全局最优解。马尔可夫链取得较短(50),以减少算法时间。扰动量的产生方法是:在每一个整型控制分量的取值序列中分别按 $1/3$ 概率上下移动一位或不作移动。对于恶化解点 x ,按概率 $\exp((f(x) - f(x))/T)$ 进行接受,其中 x 为前次解点, $f(x)$ 和 $f(x)$ 为相应解点的目标函数值。PS 局部寻优的初始步长取 1。终止判据取最小控制温度 0.05 或最优值保留链数 40。记忆寻优的长度取 10。由于 PS 与初始值的选取关

系密切,且易于陷入局部极值点,而 SA 初期的目标函数值一般偏大,为了加快计算速度,当温度下降到 1 以下才开始对每个链中的最优个体进行局部寻优。

考虑到无功优化的计算时耗主要在于求解潮流方程组上,随着电网规模的扩大,SA 本身所耗时间相差不大,所以本文仅从求解潮流方程组的次数和最优值的分布两方面进行比较。在上述假设条件下,无功优化的精确解为 7.05014 MW,为了求得此解,共需要对 $9^4 \times 5 \times 3 = 98415$ 个潮流方程组进行计算。表 1 为几种 SA 改进方法的对比试验数据,每种方法共进行了 20 次试验,表中按序号所列的每种方法都是在前一种方法基础上增加的改进点。

表 1 IEEE-30 节点系统仿真结果

Tab. 1 Simulation results of IEEE-30 bus system

序号	对 SA 进行的改进点	平均求解次数	最大求解次数	最小求解次数	次优解平均值	次优解最大值	次优解最小值	获得最优次数
1	未改进	5200	5200	5200	7.4512	7.7811	7.1794	0
2	记忆最优值	5200	5200	5200	7.0616	7.0836	7.0501	1
3	组合终止判据	3854	5200	2027	7.0631	7.0847	7.0504	0
4	记忆指导搜索	3618	5200	2151	7.0587	7.0646	7.0501	2
5	PS 局部寻优	3997	6035	2739	7.0503	7.0504	7.0501	11

表 1 说明,每增加一种改进措施,都改善解点的质量以及收敛的稳定性。其中,记忆最优值方式明显缩短了了解点与全局最优点之间的距离。而组合终止判据显著减少了迭代求解潮流方程组的次数,加快了计算速度,其缺点是解点的质量稍有恶化。记忆指导搜索进一步加快了计算速度,并提高了解点的质量。PS 局部寻优对于获得高质量的解点特别有效,在 PS 局部寻优的 20 次试验中,有 11 次收敛于全局最优点,另外 9 次收敛点略次于全局最优点,其缺点是求解潮流方程组的次数增加了 10.5%,但试验效果还是令人满意的。

4 结论

本文运用改进模拟退火算法 (ISA) 求解高中压配电网的无功优化问题,能够以较大概率获得全局最优解,收敛的稳定性较好。仿真试验验证了本文所述方法是合理的和可行的。试验发现,ISA 求解 RPOP 问题,还存在着如下问题:

1) 降温策略的确定。虽然都是依据大范围粗略搜索、小范围精确搜索的原则,但是不同的降温策略对于整体计算速度和最终解的质量影响较大。对于不同的优化问题,往往需要经过多次试验才能找到较为合适的降温策略。

2) 局部寻优方法的改进。本文所做的试验中,局部寻优平均要解 782 次潮流方程组,占总次数的 19.56%,这也是影响求解速度的主要因素之一。

这些问题将是本文的后续研究点,欢迎各位专家和学者给予指导。

参考文献:

- [1] 顾承宏 (GU Cheng-hong). 城市电力网无功优化的研究与实践 (Study and Application of Reactive Power Optimization in Urban Electric Power System) [J]. 安徽电力职工大学学报 (Journal of Anhui Electric Power University for Staff), 2002, 7(3): 44 - 50.
- [2] 戴晓亮 (DAI Xiao-liang). 无功补偿技术在配电网中的应用 (Application of Reactive Compensation Technology for Distribution System) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1999, 23(6): 11 - 14.
- [3] 诸骏伟 (ZHU Jun-wei). 电力系统分析 (上册) (Analysis of Electric Power System, Book One) [M]. 北京: 水力电力出版社 (Beijing: Hydroelectric Press), 1995.
- [4] 李丽英, 等 (LI Li-ying, et al). 电力系统无功优化问题研究综述 (Research on VAR Optimization in Power Systems) [J]. 电力情报 (Information on Electric Power), 2003, 3: 68 - 74.
- [5] 周竹, 等 (ZHOU Zhu, et al). 基于改进的遗传算法实现

- 电网电压无功实时控制(Improved Genetic Algorithms Applying to Real-time Control of Voltage and Reactive Power) [J]. 计算机测量与控制(Computer Measurement & Control), 2002, 10(4): 230 - 231.
- [6] 王守相等(WANG Shou-xiang, et al). 配电电容器三相分相优化投切(Optimal Capacitor Switching Phase by Phase in Distribution Systems) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2002, 26(8): 16 - 20.
- [7] 杨建刚(YANG Jian-gang). 人工神经网络实用教程(Practical Tutorial of Artificial Neural Networks) [M]. 杭州: 浙江大学出版社(Hangzhou: Zhejiang University Press), 2001.
- [8] Rutenbar R A. Simulated Annealing Algorithms: An Overview [J]. IEEE Circuit and Devices Magazine, 1989, 1, 19-26.
- [9] Geman S, Geman D. Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution, and the Bayesian Restoration of Images [J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, 1984, PAMF6, 721-741.
- [10] Szu H, Hartley R. Fast Simulated Annealing [J]. Physics Letters A, 1987, 122, 162-167.
- [11] 钱颂迪(QIAN Song-di). 运筹学(Operational Research) [M]. 北京: 清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1990.
- [12] 张伯明, 陈寿孙(ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun). 高等电力网络分析(Advanced Electric Power Network Analysis) [M]. 北京: 清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1996.

收稿日期: 2003-05-14; 修回日期: 2003-09-01

作者简介:

贾德香(1971 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网无功优化;

唐国庆(1937 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电力电子在配电网中的应用、配网自动化、人工智能在电力系统中的应用;

韩净(1973 -), 女, 工程师, 从事电力系统运行与控制工作。

Reactive power optimization of power system based on modified simulated annealing algorithm

JIA De-xiang¹, TANG Guo-qing¹, HAN Jing²

(1. Dept. of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Ma anshan Electric Power Supply Bureau, Ma anshan 243000, China)

Abstract: The key to the optimization of reactive power operation is to get optimum value or satisfactory quasioptimum value. Traditional methods of linear programming and nonlinear programming cannot deal with the problem of integral variable successfully, and the simulated annealing algorithm(SA) is not very robust. Concerning the characteristics of high/medium voltage distribution system, the SA is modified as follows: using remembrance-guided search method, and modifying the quasioptimum value with pattern search method. Numerical experiment demonstrates that the above method is reasonable, feasible, and practical to some extent.

Key words: power system; reactive power optimization; remembrance-guided search; pattern search method; modified simulated annealing algorithm

(上接第 27 页 continued from page 27)

Optimal allocation of harmonic filters in distribution network based on improved adaptive genetic algorithm

YANG Wen-yu¹, LIU Jian^{1,2}, YU Jian-ming¹, GAO Xin¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Yinhe Automation Research Institute,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710075, China)

Abstract: Taking the minima of the total cost of passive power filters and active power filters as an objective function, and harmonic voltage and secure operation as constraint conditions, this paper describes the optimal allocation of the locating and sizing of filters. The improved adaptive genetic algorithm is also proposed. Test results on a 18-bus distribution network are presented to demonstrate the effectiveness of the whole algorithm.

This project is supported by National Fund for Authors of Excellent Doctoral Thesis(No. 200137).

Key words: harmonics; passive power filter; active power filters; harmonic restraint