

A Survey of Reactive Power Optimization Research in Electric Power Systems

Gongbao Wang¹, Songtao Zhang²

¹College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan

²Naval Petty Officer Academy, Bengbu

Email: wangongbao@126.com

Received: Mar. 4th, 2013; revised: Apr. 10th, 2013; accepted: Apr. 19th, 2013

Copyright © 2013 Gongbao Wang, Songtao Zhang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In this paper, the research of reactive power optimization in electric power systems is analyzed. The optimal models are divided into several types and the development trend is analyzed. Then, the shortage of traditional algorithms is pointed out. Also, the advantage and disadvantage of typical intelligent algorithms are compared together. The advantage of combined intelligent algorithms is pointed out. The development trend of reactive power optimization is indicated in the end of the paper.

Keywords: Electric Power Systems; Reactive Power Optimization; Traditional Algorithm; Intelligent Algorithm

电力系统无功优化研究概述

王公宝¹, 张松涛²

¹海军工程大学理学院, 武汉

²海军蚌埠士官学校, 蚌埠

Email: wangongbao@126.com

收稿日期: 2013年3月4日; 修回日期: 2013年4月10日; 录用日期: 2013年4月19日

摘要: 本文综合分析电力系统无功优化的研究现状, 对无功优化的数学模型进行了分类, 并分析了发展方向; 分析了传统无功优化算法的不足, 对无功优化常用的智能优化算法的优缺点进行了比较, 指出了组合智能算法的优势; 最后展望了电力系统无功优化研究的发展方向。

关键词: 电力系统; 无功优化; 传统算法; 智能算法

1. 引言

电力系统无功优化^[1]是指在电力系统的有功负荷、有功电源和有功潮流分布已经给定的情况下, 以发电机端电压幅值、无功补偿电源容量和可调变压器分接头位置作为控制变量, 以发电机无功出力、负荷节点电压幅值和支路输送功率作为状态变量, 采用优化技术, 在满足电力系统无功负荷需求的情况下, 谋求合理的无功补偿点和最佳的补偿容量, 使电力系统

安全、经济地向用户供电。由于无功优化对电力系统的安全和经济运行具有重要的意义, 许多专家对其进行了大量的研究, 建立了一些数学模型, 并采用不同的方法进行优化, 取得了很多研究成果。本文对电力系统无功优化模型和算法的研究现状进行了综合分析, 以期有助于下一步的研究工作。

2. 电力系统无功优化的数学模型

电力系统无功优化的数学模型一般可表示为以

下通用的数学模型^[2]:

$$\begin{cases} \min f(u, x) \\ \text{s.t. } g(u, x) = 0 \\ h(u, x) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $f(u, x)$ 为无功优化的目标函数, $g(u, x)$ 为等式约束条件(即节点潮流方程), $h(u, x)$ 为控制变量与状态变量必须满足的约束条件, u 表示控制变量, x 表示状态变量。

2.1. 目标函数

目标函数是无功优化需要达到的目标与控制变量和状态变量的函数关系, 通过控制变量与状态变量的改变使目标函数达到最优值。从不同的目标出发, 可以建立不同的目标函数, 目前主要从经济性、电压质量和安全性等方面来建立目标函数。

2.1.1. 经济性

1) 有功网损最小^[3,4]。主要从经济角度考虑, 以电力系统的有功网损最小作为目标函数:

$$\min f_1 = \min \sum_{k=1}^{n_1} G_{k(i,j)} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2)$$

其中: n_1 为网络总的支路数, $G_{k(i,j)}$ 为支路 $i-j$ 的电导, U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压, δ_i 、 δ_j 分别为节点 i 、 j 的相角。

2) 无功注入的总成本最小^[5]。

3) 发电总成本最小^[6]。在电力市场环境, 考虑无功成本, 以有功和无功发电的总成本最小作为目标函数:

$$C = \sum_{i \in N_G} [C_{gpi}(P_{Gi}) + C_{gqi}(Q_{Gi})] + \sum_{j \in N_C} C_{cj}(Q_{Cj}) \quad (3)$$

其中: NG 为发电机总节点数, NC 为具有无功补偿器的节点总数, $C_{gpi}(P_{Gi})$ 为节点 i 的有功发电成本函数, $C_{gqi}(Q_{Gi})$ 为节点 i 的无功发电成本函数, $C_{cj}(Q_{Cj})$ 为节点 j 的无功补偿器运行成本函数。

2.1.2. 电压质量

节点电压值是电压质量的重要指标, 为此, 可选取节点电压偏离额定值最小^[7,8]作为目标函数, 选定节点的电压值与给定电压值偏差的平方作为目标函数, 其值最小。这也是电力系统安全性能的指标之一。

2.1.3. 安全性

1) 电压稳定裕度最大^[9-11]。电压稳定是电力系统安全运行的重要保证, 电压不稳曾经导致多起国内外的大面积停电事故, 为了保证电力系统的安全运行, 选取电压稳定裕度最大作为目标函数。

2) 动态模型^[12]。电力系统进行无功优化, 需要反复操作和切换控制设备, 比如, 变压器的分接头和电容器的投切开关可能会频繁地动作, 会影响到电气设备的绝缘和使用寿命, 甚至造成安全事故。因此, 在动态模型中把分接头和投切开关动作次数的限制作为约束条件, 能够提高电力系统的可靠性和安全性, 但同时也牺牲了部分经济性能。

2.1.4. 多目标函数

为了兼顾以上 3 个方面的性能指标, 也可以建立多目标函数, 综合考虑电力系统的经济性、安全性和电能质量等性能, 把有功网损最小、节点电压偏离额定值最小及电压稳定裕度最大等多个指标同时作为无功优化的多目标函数^[9-11,13,14], 可以在多个性能指标之间取得平衡。

单目标模型只考虑经济性、电压质量和安全性等单个指标, 而其每项指标都是电力系统的一个重要参数, 仅考虑单个指标显然不够全面。因此, 能够兼顾到各个方面性能的多目标函数, 受到越来越多的重视, 是无功优化目标函数发展的重要方向。

2.2. 约束条件

约束条件分为功率约束和变量约束, 功率约束要求变量满足潮流方程, 变量约束用来设定控制变量和状态变量的范围。

功率约束方程为:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_b} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_b} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

其中: P_i 为节点 i 的注入有功, Q_i 为节点 i 的注入无功; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的电导、电纳和电压相角差; N_b 表示所有与节点 i 直接相连的节点集合编排。

控制变量的约束方程为:

$$\begin{cases} U_{gi \min} \leq U_{gi} \leq U_{gi \max} \\ Q_{ci \min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci \max} \\ T_{ti \min} \leq T_{ti} \leq T_{ti \max} \end{cases} \quad (5)$$

其中： $U_{gi \max}$ 、 $U_{gi \min}$ 为发电机机端电压上、下限值； $Q_{ci \max}$ 、 $Q_{ci \min}$ 为容性无功补偿上、下限值； $T_{ti \max}$ 、 $T_{ti \min}$ 为可调变压器分接头位置的上、下限值。

状态变量约束方程为：

$$\begin{cases} Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \\ U_{ci \min} \leq U_{ci} \leq U_{ci \max} \end{cases} \quad (6)$$

其中： $Q_{gi \max}$ 、 $Q_{gi \min}$ 为发电机无功出力上、下限值， $U_{ci \max}$ 、 $U_{ci \min}$ 为节点电压上、下限值。

3. 无功优化的传统算法

传统算法最早应用于电力系统无功优化的求解，常用的传统方法有非线性规划法、混合整数规划法、动态规划法、线性规划法等，其基本思路都是从一初始点出发，沿着一定轨迹不断地改进当前解，最终收敛于最优解。

3.1. 非线性规划法(Nonlinear Programming)

无功优化问题是非线性的，因此，非线性规划法较早地应用到无功优化中，典型的有简化梯度法、牛顿法和二次规划法等。

3.1.1. 简化梯度法

由 H. W. Dommel 和 W. F. Tinney^[15]于 1968 年提出，以极坐标形式的牛顿 - 拉夫逊潮流计算为基础，对等式约束和不等式约束分别采用拉格朗日乘数法和 Kuhn-Tucker 罚函数进行处理，沿着控制变量的负梯度方向寻优，具有一阶收敛性。

3.1.2. 牛顿法

由 David I. Sun^[16]等人于 1984 年提出，是一种具有二阶收敛性的算法，利用等式约束的一阶导数和目标函数的二阶导数进行求解，搜索方向比简化梯度法好，收敛速度明显加快。

3.1.3. 二次规划法

由于无功优化的目标函数和约束条件中常有二次函数，故可以采用二次规划法进行求解，把目标函数作二阶泰勒展开，非线性约束转化为线性约束，从

而构成二次规划模型，用二次规划法进行求解。

3.2. 混合整数规划法 (Mixed Integer Programming)

混合整数规划法通过分支定界的方法，把可行域分成子区域，不断减小可行域的下界、增大上界，逐步逼近最优解，其原理是先确定整数变量，再与线性规划方法协调处理连续变量，能够有效解决无功优化离散性的问题。

3.3. 动态规划法(Dynamic Programming)

动态规划法按时间或空间顺序把多阶段问题分解为若干相互联系的单阶段问题，依次对每一阶段做出决策，最后获得最优解。文献[17]采用动态规划法进行电力系统的无功优化，把复杂的动态负荷曲线分解成多阶段的静态优化问题，从而求得最优解。

3.4. 线性规划法(Linear Programming)

目无功优化虽然是非线性问题，但是可以采用局部线性化的方法，把目标函数和约束条件逐次线性化。其基本思路是把目标函数和约束条件进行泰勒展开，略去高次项，使非线性问题在初值点附近转化为线性规划问题，用逐次线性逼近的方法进行求解。常用的线性规划法有灵敏度分析法和内点法

3.4.1. 灵敏度分析法^[18]

利用牛顿 - 拉夫逊潮流计算中的雅克比矩阵，获得状态变量对控制变量的灵敏度，进而进行优化求解。

3.4.2. 内点法

由 1984 年，Karmarkar 提出了用于线性规划的内点法，其建立在单纯形法的基础上，从初始内点出发，沿着最初下降方向，在可行域内直接逼近最优解，具有计算速度快、收敛性能好的特点，各种改进的内点法^[19,20]被广泛地应用于无功优化中。

传统算法在早期的电力系统无功优化中取得了广泛的应用，后来又出现很多改进的传统算法，算法的性能得到了进一步的提高。但是，传统算法存在数学模型复杂、难于求得最优解等缺陷，可能会导致求得的结果与实际值误差过大，其在无功优化中的应用越来越少。

4. 无功优化的智能算法

为了弥补传统算法的缺陷,各种智能优化算法被应用到电力系统的无功优化求解中,智能算法在解的质量和求解速度上较传统算法均具有明显优势,在电力系统无功优化求解中应用比较多的智能算法有模拟退火算法、禁忌搜索算法、遗传算法和蚁群算法等。

4.1. 模拟退火算法

(Simulated Annealing Algorithm)

模拟退火算法是基于热力学退火原理建立的启发式全局搜索算法,由 Metropolis 提出,它能以概率 1 搜索到全局最优解,但也存在收敛速度慢的缺点。文献[21]采用改进的模拟退火算法进行无功优化,利用记忆指导进行搜索,收敛速度大大提高,采用模式法局部寻优,提高了寻优能力。

4.2. 禁忌搜索算法(Tabu Search Algorithm)

禁忌搜索算法把人工智能同局部邻域搜索算法结合起来,采用禁忌技术,有效地避免了重复搜索,搜索效率得到了提高,其不足之处是全局搜索能力弱,初始解的质量对收敛速度和最终解的质量有很大的影响。文献[22]采用改进的禁忌搜索算法求解多目标无功优化问题,在对初值没有特别要求的基础上,得到了高质量的解,且避免了大量的搜索与计算,缩短了运算时间。

4.3. 遗传算法(Genetic Algorithm)

遗传算法是模仿自然界自然选择和生物进化机制发展起来的随机全局搜索的启发式优化算法,由美国的 John Holland 教授提出。其基本思想是从一随机初始种群出发,经过选择、交叉和变异等遗传操作,产生一群适应度更佳的个体,逐代进行进化,逐次逼近最优解。遗传算法实现简单,对目标函数无特殊要求,适用于处理离散变量,在无功优化中取得了非常广泛的应用,其不足是易陷入局部最优。文献[7]和[10]使用了遗传算法进行电力系统的无功优化,文献[9]、[11]和[13]对遗传算法进行了改进,收敛速度和全局寻优能力进一步提高。

4.4. 蚁群算法(Ant Colony Algorithm)

蚁群算法是一种分布式智能模拟算法,其基本思

想是模仿蚂蚁依赖信息素进行通信而显示出的社会性行为。由于该算法的大部分时间被用于解的构造,较易出现停滞现象,这样就有可能陷入局部最优解,所以蚁群算法在无功优化中的应用不多,目前只处于初始阶段^[23],但是其全局收敛性和寻优能力强,经过改进或与其他算法结合就可发挥其优势。文献[23]根据蚂蚁在搜索过程中所得到解的质量和分布状况,调节选择概率和各条路径上的信息量更新策略,较好地解决了加速收敛和早熟、停滞之间的矛盾,使蚁群算法有更好的收敛性、稳定性和更快的收敛速度,同时使解更具有多样性、全局性,适用于规模比较大的优化问题。

以上四种智能优化算法的优缺点见表 1。除了上述算法之外,在电力系统无功优化中应用较多的人工智能算法还有:人工神经网络、专家系统、粒子群算法、模糊理论、免疫算法^[13]、人工鱼群算法、ALOPEX 算法和 Box 算法等。

4.5. 组合智能算法

忌智能算法在一定程度上弥补了传统运筹学方法的不足,但各种单一的智能算法也存在自身的缺点,有的智能算法全局搜索能力强、局部搜索能力弱,有的算法全局搜索能力弱而局部搜索能力强,如果能把多种智能算法结合起来进行无功优化的求解,就能够优势互补,克服不足。文献[8]把遗传算法和 ALOPEX 算法相结合,发挥了遗传算法全局寻优能力强的优势和 ALOPEX 算法的“爬山”能力强的特点,混合算法具有很强的全局寻优能力和局部搜索能力;文献[24]把遗传算法、模拟退火算法和牛顿下山法相结合,利用模拟退火算法局部搜索能力强的特点进行个体更新,以便增加群的多样性,避免陷入局部

Table 1. Comparison of the characteristics of different intelligent algorithms

表1. 不同智能优化算法的特点比较

智能算法	优点	缺点
模拟退火算法	能以概率1搜索到全局最优解。	收敛速度慢。
禁忌搜索算法	“爬山”能力强,搜索效率高。	全局搜索能力弱,初始的质量对结果影响大。
遗传算法	并行搜索,全局搜索能力强。	收敛速度慢,局部搜索能力弱。
蚁群算法	鲁棒性能好,寻优能力强。	易出现停滞现象,可能陷入局部最优解。

最优, 然后采用牛顿下山法加快模拟退火部分的求解过程, 改善了遗传算法的进化过程, 优化性能和鲁棒性方面均有大幅度提高; 文献[25]把遗传算法产生的最优解作为禁忌算法的初始解, 算法的收敛性和解的质量比单一算法有了很大的改善。

每种智能优化算法都具有自己的优势和不足, 把具有优势互补的智能优化算法相互结合, 可以充分发挥各自的优势, 克服不足, 能显著提高解的质量, 是未来的发展趋势。

5. 结束语

本文对电力系统无功优化的数学模型和算法进行了综合分析, 无功优化的数学模型正逐渐从单一目标模型向多目标模型转换, 求解的算法也从传统的运筹学方法向人工智能优化算法转变, 多种智能算法的组合可以优势互补, 正取得越来越广泛的应用。多目标数学模型的建立和组合智能算法的应用将是电力系统无功优化重要的研究方向。

参考文献 (References)

- [1] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [2] 诸骏伟. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [3] B. Cova, N. Losignore, P. Marannino, et al. Contingency constrained optimal reactive power flow procedures for voltage control in planning and operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(2): 602-608.
- [4] M. B. Liu, S. K. Tso and Y. Cheng. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(4): 982-991.
- [5] S. Granville. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(1): 136-146.
- [6] 黄志刚, 李林川, 杨理等. 电力市场环境下的无功优化模型及其求解方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(12): 79-83.
- [7] 宋军英, 刘涤尘, 陈允平. 电力系统模糊无功优化的建模及算法[J]. *电网技术*, 2001, 25(3): 22-25.
- [8] L. D. B. Terra, M. J. Short. Security-constrained reactive power dispatch. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1991, 6(1): 109-117.
- [9] 姜素华, 李研, 吴耀武等. 多目标电网无功优化的量子遗传算法[J]. *高电压技术*, 2005, 31(9): 69-71, 83.
- [10] 胡彩娥, 杨仁刚. 考虑电压稳定的电力系统无功优化规划[J]. *继电器*, 2005, 33(4): 22-25, 30.
- [11] 冯士刚, 艾芊. 利用强度 Pareto 进化算法的多目标无功优化[J]. *高电压技术*, 2007, 33(9): 115-119.
- [12] 刘明波, 朱春明, 钱康龄等. 计及设备动作次数约束的动态无功优化算法[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(3): 34-40.
- [13] 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.
- [14] 熊虎岗, 程浩忠, 李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(11): 102-108.
- [15] H. W. Dommel, W. F. Tinney. Optimal power flow solution. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968, 87(10): 1866-1876.
- [16] D. I. Sun, B. Ashley, B. Brewer, et al. Optimal power flow by newton approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, 103(10): 2864-2880.
- [17] A. A. A. Esmin, G. Lambert-Tortes and Z. de Souza. A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(2): 859-866.
- [18] K. R. C. Mamandur, R. D. Chenoweth. Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profiles and for real power loss minimization. *IEEE Transactions on Power Engineering Review*, 1981, 1(7): 29-30.
- [19] 刘明波, 陈学军. 电力系统无功优化的改进内点算法[J]. *电力系统自动化*, 1998, 22(5): 33-36.
- [20] K. N. Reddy, V. Agarwal. Utility-interactive hybrid distributed generation scheme with compensation feature. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(3): 666-673.
- [21] 贾德香, 唐国庆, 韩净. 基于改进模拟退火算法的电网无功优化[J]. *继电器*, 2004, 32(4): 32-35.
- [22] 熊宁, 陈恳, 戴伟华. 基于禁忌算法的多目标无功优化[J]. *继电器*, 2006, 34(24): 21-25, 32.
- [23] 贾孟丹. 基于改进蚁群算法的电网无功补偿装置优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [24] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. *电网技术*, 2007, 31(3): 13-18.
- [25] 谭涛亮, 张尧. 基于遗传禁忌混合算法的电力系统无功优化[J]. *电网技术*, 2003, 28(11): 57-61.