

# 基于改进禁忌搜索算法的配电网电压无功优化控制

朱向阳

(苏州供电公司,江苏 苏州 215400)

摘要:建立了综合考虑配电网电压质量和网络损耗两方面因素的电压无功优化控制数学模型,运用改进禁忌搜索算法(MTS)求解该模型。算法中采用的记忆指导搜索策略重点搜索了各记忆段的局部最优值,避免了全局搜索的盲目性;采用的禁忌频率限制信息避免了大范围的迂回搜索,提高了新区域的搜索效率。禁忌频率的信息压缩技术节约了大量存储空间。数值对比试验表明,该文方法是合理的和可行的,具有一定的实用意义。

关键词:配电网;电压无功控制;记忆搜索;禁忌频率;信息压缩;改进禁忌搜索算法

中图分类号:TM76 文献标识码:A 文章编号:1003-4897(2006)14-0035-03

## 0 引言

电压质量和网络损耗是配电网运行的两个主要关注点。配电网提高电压质量和降低网络损耗的主要手段是调节有载调压变压器分接头和投切并联电容器组,因为这两种电压无功调节设备投资具有较高的性能价格比,运行操作简单易行。国内外针对有载调压变压器的运行点和电容器组的投切问题已经作了大量研究,但它们各有优缺点。文献[1]利用控制变量对损耗的灵敏度建立了线性化的无功功率综合优化模型,其缺点是精度差,误差大。文献[2]结合灵敏度分析和禁忌搜索(TS(Tabu Search))算法解决配电电容器组的优化投切问题,减少了计算量,但是对电容器组投切次数的处理比较粗糙。文献[3]将分接头调节和电容器组投切解耦为两个子问题进行求解,从而降低了整体求解的复杂度,但是做了较多的近似处理。电压无功优化算法主要分为经典优化法(如线性规划法,非线性规划法,混合整数规划法,动态规划法等)和人工智能法(如遗传算法<sup>[4]</sup>、模拟退火算法<sup>[5]</sup>、TS算法<sup>[2,6]</sup>等)。由于配电网电压无功优化问题在本质上是一个大规模非线性混合整数规划问题,目前还没有一种算法能保证求出该问题的最优解,因此有许多专家学者仍在进行算法研究。人工智能法由于其灵活的求解策略而成为目前的研究热点之一。

许多文献验证,在同样求解精度条件下,与其它人工智能法相比,TS算法可节约20%的求解时间<sup>[7]</sup>。但是常规TS算法对初始解具有较强的依赖性,并且可能在大范围(超出禁忌表长)内迂回搜

索。因此,本文采用改进TS算法(MTS)求解配电网电压无功优化问题。主要改进点如下:采用记忆指导搜索方法,以便尽可能获得全局最优解;充分利用禁忌频率信息来避免大范围的迂回搜索。采用信息压缩技术减少了存储禁忌频率信息的内存需求量。数值试验表明了上述改进方法是合理的和有效的。

## 1 数学模型

目标函数是以各节点电压偏差百分比为修正系数的全网有功损耗最小,该目标函数综合考虑了配电网运行对于电压质量和网络损耗两方面的要求。设全网节点数为 $n$ ,全天预测负荷曲线的分段数为 $m$ ,则具体数学模型如下:

$$\min F = \sum_{i=1}^m \left[ 1 + \sum_{j=1}^n \left| \frac{V_{ij} - V_{iN}}{V_{iN}} \right| \right] P_i(C_{ki}, T_{li}; V_i) \quad (1)$$

$k = 1, \dots, K; \quad l = 1, \dots, L$

$$\text{s t} \quad g(C_{ki}, T_{li}; V) = 0 \quad (2)$$

$$h(C_{ki}, T_{li}; V) = 0 \quad (3)$$

其中: $C_{ki}$ 为第 $i$ 段负荷曲线时第 $k$ 组电容器投入的组数; $T_{li}$ 为第 $i$ 段负荷曲线时第 $l$ 台变压器分接头的档位; $V_i$ 为第 $i$ 段负荷曲线时各节点电压列向量; $v_{ij}$ 为第 $i$ 段负荷曲线时节点 $j$ 电压; $v_{iN}$ 为第 $i$ 段负荷曲线时节点 $j$ 电压额定值或期望值; $P_i(C_{ki}, T_{li}; V_i)$ 为第 $i$ 段负荷曲线时全网的有功网损; $\omega$ 为电压偏差的权重系数; $K$ 为电容器组的组数; $L$ 为有载调压变压器的台数。

式(2)为等约束条件,它表示了系统的潮流约束。式(3)为不等约束条件,具体包括:节点电压的上下限约束,线路通过的最大功率约束,变压器档位

数和电容器组的最大投入数约束。其中,变压器档位数和电容器组的投入数均取整数。在优化计算中,通常以变压器档位和电容器组数的约束范围作为基本解域,先进行潮流计算,使得等约束条件(2)自动满足;然后检查式(3)里的其它不等约束条件是否满足。不能满足的不等约束条件通常作为较大的惩罚项附加在目标函数上,以迫使最终计算结果尽可能满足所有约束条件。

## 2 算法

TS是 Glover于 1986年提出的一种人工智能算法。它是由局部邻域搜索算法推广为全局逐步寻优算法。其核心思想是通过设置禁忌表暂时禁止一些已经历的区域搜索,同时采用藐视准则来奖励优良状态。其中,邻域结构、禁忌长度、藐视准则和终止准则等对于算法性能的影响较大<sup>[7]</sup>。

为了提高常规 TS算法的计算性能,本文采用记忆指导搜索的 MTS方法,结合禁忌频率信息,来求解配电网的电压无功控制问题。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。由于常规 TS算法仅沿单一主要方向进行随机搜索和选择,随着迭代次数的增加,其全局搜索(diversification search)的能力越来越弱,因而常规 TS算法表现出对初始解具有较强的依赖性。而 MTS算法采用了记忆指导搜索策略,在寻优过程中,能够较早地有选择地改变主要搜索方向,因而减少了对于初始解的依赖性。

当某个禁忌对象频繁出现,则可以推断算法可能陷入某种大范围的迂回搜索状态,因此,对于超过一定频率限度的禁忌对象,采用附加惩罚项的方法来避免大范围(超出禁忌表长)迂回搜索。由于禁忌频率的信息量较大,这将占用较多的内存空间,其最大内存需求量与所有经历的试验解所需内存之和是同一数量级,因此有必要采用信息压缩技术来减少存储禁忌频率信息的内存需求量。具体做法是:频率表中存储试验解的 2范数,而不是试验解本身。为了避免二进制码的码串过长、数据转换误差和空码问题,本文采用十进制整型编码方式。邻域内的试验解是随机产生的。终止判据取最大迭代次数和最优值保留次数相结合的方式。

MTS的具体求解步骤如下:

1)输入原始数据,包括网络参数、运行数据、各不等约束条件的限值以及 MTS算法的参数等。

2)随机产生初始解( $C_{k0}; T_{D}$ ),计算其目标函数值  $F_0$ ,同时将禁忌表和频率表置零。

3)判断记忆长度是否满足要求:如是,则将本段记忆长度内获得的局部最优解与记录的全局最优解作比较以更新全局最优解,然后从局部最优解集中挑出未超出频率限度的最佳次优解作为当前解;否则转 4)。

4)判断算法是否终止:是则中止计算,并输出优化结果;否则转 5)。

5)以当前解( $C_{ki}; T_{li}$ )为起点,随机产生若干邻域解,计算各个邻域解的目标函数值,并从中选出若干候选解。

6)判断候选解是否满足藐视准则:若成立,则用最佳候选解代替( $C_{ki}; T_{li}$ )成为新的当前解,并用与该候选解对应的禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象,同时在频率表中记录该解的 2范数所经历的次数,然后将与之对应的目标函数值存入本记忆段局部最优解集中,最后转 8)。否则转 7)。

7)判断候选解对应的各对象的禁忌属性,选出候选解集中既未超出频率限度,其 2范数又非禁忌对象对应的最佳状态作为新的当前解,同时更新禁忌表和频率表,然后转 8)。

8)转 2)。

## 3 算例

本文利用 TS算法和 MTS算法分别对 IEEE-30节点系统的电压无功控制问题进行了优化计算。IEEE-30节点系统的网络参数及运行数据详见文献[8]。有载调压变压器和并联电容器组的设置同文献[5]。该算例相当于式(1)中的  $m=1$ 。MTS的邻域解和候选解均取 8个,禁忌表长为 6,记忆长度为 100,频率限度取 40,局部最优解集长度取 4,终止判据取最大迭代次数 1 000或最优值保留次数 400。

验证程序用 C语言编写,所用微机 CPU为 1.5 GHz,内存为 256 MB,系统为 Windows XP,编译环境为 VC++6.0。每种方法分别计算了 20次,统计结果如表 1所示。

表 1说明,MTS算法的各项指标均优于 TS算法。虽然 MTS算法的平均网损只比 TS算法降低了 0.027%,但是日积月累,其经济效益也是可观的。由文献[5]知,该算例的最优网损是 7.050 1 MW。表 1突出表明了 MTS算法获取全局最优解的可能性远大于 TS算法。因此,无论从求解速度,还是从

求解质量来看,MTS算法都具有较为明显的优势。

表 1 TS算法与 MTS算法的性能比较

Tab 1 Comparison of computation performance between TS and MTS

	TS算法	MTS算法
平均计算时间 /s	15.2	13.9
平均网损 /MW	7.052 1	7.050 2
最小网损 /MW	7.050 1	7.050 1
最小网损获取次数	3	17
最大电压偏差	4.8%	4.1%

## 4 结论

本文首先建立了配电网电压无功优化控制的数学模型,该模型综合考虑了电压质量和网络损耗两方面因素。然后运用改进禁忌搜索算法(MTS)对该模型进行求解。算法中采用的记忆指导搜索策略重点搜索了各记忆段的局部最优值,避免了全局搜索的盲目性,加大了获取全局最优解的可能性;采用的禁忌频率限制信息避免了大范围的迂回搜索,提高了新区域的搜索效率。采用信息压缩技术减少了存储禁忌频率信息的内存需求量。与常规禁忌搜索算法的对比试验验证,MTS算法的求解速度快,求解质量高,算法的鲁棒性也较好。因此,本文所建的电压无功优化控制模型是合理的,采用的MTS算法是可行的和有效的。

## 参考文献:

- [1] Mamandur K 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.
- [2] 张学松,柳焯,于尔铿. 基于 Tabu搜索的配电电容器投切策略 [J]. 电网技术, 1998, 22(2): 33-36  
ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng The Strategy

- of Distribution Capacitor Scheme Based on Tabu Search [J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 33-36
- [3] Borozan V, Baran M E, Novosel D. Integrated Volt/Var Control in Distribution Systems [A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Columbus (USA): 2001.
- [4] Hu Z, Wang X, Chen H, et al Volt/Var Control in Distribution Systems Using a Time-interval Based Approach [J]. IEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 2003, 150(5): 548-554.
- [5] 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.  
JIA De-xiang, TANG Guo-qing, HAN Jing Reactive Power Optimization of Power System Based on Modified Simulated Annealing Algorithm [J]. Relay, 2004, 32(4): 32-35.
- [6] 张芙蓉,孟昭勇,李剑. 基于 TS和 GA算法的配电电容器优化投切 [J]. 继电器, 2004, 32(14): 29-31, 48  
ZHANG Fu-rong, MENG Zhao-yong, LI Jian Optimization of Distribution Capacitor Scheme Based on TS and GA [J]. Relay, 2004, 32(14): 29-31, 48
- [7] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京:清华大学出版, 2001.  
WANG Ling Intelligent Optimization Algorithms and Its Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [8] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 1996  
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun Advanced Electric Power Network Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996

收稿日期: 2006-01-03; 修回日期: 2006-03-05

作者简介:

朱向阳(1977-),男,工程师,从事电力系统运行、规划等方面的研究工作。E-mail: xiangyangzhu@sina.com

## Volt/var control in distribution systems based on the modified tabu search

ZHU Xiang-yang

(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215400, China)

**Abstract:** A volt/var control model of distribution system is put forward, allowing for voltage quality and power loss, which is solved by Modified Tabu Search (MTS). The adoption of remembrance-guided search method emphasizes local optimum value in each remembrance segment, which avoids the blindness of global search. The using of tabu frequency enhances the efficiency of search in new scope. The information compression of tabu frequency reduces plenty of memory demand. Numerical experiment demonstrates that the proposed method is reasonable, feasible, and practical to some extent.

**Key words:** distribution system; volt/var control; remembrance-guided search; tabu frequency; information compression; modified Tabu search algorithm