

基于改进的 Tabu 搜索算法的配电网 电容器优化配置策略

卢鸿宇¹, 秦毓毅¹, 刘俊勇²

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 配电网电容器优化配置能有效降低系统网损, 改善电压质量, 提高系统安全性。对配电网电容器进行合理配置是配电管理系统的重要功能。本文基于改进的 TS 算法, 根据电力系统规划是一个动态过程采用了两级优化来解决配电网电容器的优化配置问题, 大大提高了最终结果的准确性和可信度, 达到了工程实用水平。

关键词: 配电网; 电容器优化配置; Tabu Search

Abstract: Optimal capacitor placement of distribution system is an important function for reduce transmission line loss of power system and improve voltage quality and security of power system. Based on the improved TS algorithm, this paper presents two dynamic programming for optimal capacitor placement of distribution system and improves the results veracity and credibility, which is practical on engineering.

Key words: distribution system; Optimal capacitor placement; TS

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)04-0092-03

配电网电容器的优化配置能有效降低系统网损, 改善电压质量, 提高系统安全性。配电网电容器的优化配置通过正确选择配电网中并联电容器的安装地点、安装容量和电容器的类型来达到配电系统无功优化的目的。

配电网电容器的优化配置是一个目标函数不可微的复杂的非线性混合整数规划的问题。采用传统的数学规划方法, 因为变量数目多, 约束条件复杂, 常常陷入“组合爆炸”。因此需要对该问题做近似处理, 但易导致最优解丢失。

现代启发式算法包括模拟退火法 (SA)、遗传算法 (GA) 和 Tabu Search (TS) 算法。这三种算法主要用来解决组合优化问题。遗传算法是 Holland 在 20 世纪 70 年代初期首先提出^[1], 在 20 世纪 80 年代末开始投入实际应用^[2]。遗传算法具备并行计算特性及自适应搜索能力, 已大量应用在电力系统中^{[3]~[6]}。

Tabu Search 方法的基本思想是 F. Glover 在 20 世纪 70 年代末首先提出来的, 是一种高效率的现代启发式方法。Tabu Search 算法被应用在电力系统无功优化、配电网网架优化规划、输电系统最优规划等方面, 取得了较大的成果。

配电网电容器最优配置约束条件复杂且整数变

量多, 对优化的结果提出了较高的要求。下面将基于 Tabu Search 方法来确定配电网电容器的优化配置策略。为了提高解的精度, 采用了两级动态优化法来解决配置问题。算例结果表明该算法能有效处理变量众多、约束复杂的混合整数规划问题。

1 电容器配置问题的数学模型

给出的配电网电容器优化配置是以降低整个系统的网损和配置电容器的投资费用的总和为目的。其中, 系统的网损与电容器的运行状态密切相关。采用两级优化法来解决配电网电容器的优化配置问题: 第一级优化用 TS 方法搜索出并联电容器的预安装位置, 每台预安装电容器的容量大小以及该台电容器的型号; 第二级优化在基于第一级优化搜索出的预配置电容器的基础上, 用 TS 方法搜索出电容器的最优投运计划, 较为精确地求出系统的网损量, 从而提高了目标函数的计算结果的可信度。

文中将求出配电网电容器的安装位置、容量大小、类型以及台数。年负荷分为若干时段, 在每一时段中, 负荷量看作是常量。在规划水平年的负荷预报和电源、网络结构已知的情况下, 优化配置将确定出满足约束条件 (潮流约束、节点电压上下限约束、无

功容量约束、最大投资费用约束)并使目标函数最优的电容器配置方案。

配电网并联电容器的优化配置将以电容器的投资费用和系统网损的总和最小为目的。基于上述目的的目标函数如下:

目标函数:

$$\min(\sum_{i=1}^{nc} C_i + k \cdot \min \sum_{i=1}^{Tn} f_{i1}(x^i, e^i)) \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^{nc} C_i \leq \text{Sum} \quad (2)$$

$$F_i(x^i, e^i) = 0 \text{ (潮流约束)} \quad i=1, \dots, Tn \quad (3)$$

$$V_{k \min} \leq V_k \leq V_{k \max} \quad k=1, \dots, n \quad (4)$$

$$Q_{k \min} \leq Q_k \leq Q_{k \max} \quad k=1, \dots, nc \quad (5)$$

1.1 目标函数

目标函数中, f_{i1} 为第 i 时段系统的网损; C_i 为第 i 台试装电容器的费用; k 为电量电价; x^i 为第 i 时段的控制变量。 $x^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i]^T$ 式中 $x_j^i = [p_j^i, q_j^i, v_j^i, \theta_j^i]$ ($j = 1, \dots, n$) n 为系统节点数, nc 为试装电容器的台数。 $e^i = [e_1^i, e_2^i, \dots, e_{nc}^i]^T$ 为网络中所有试装电容器的状态, 其中

$$e_j^i = \begin{cases} 1 & \text{第 } j \text{ 台电容器投入时} \quad (j = 1, \dots, nc) \\ 0 & \text{第 } j \text{ 台电容器退出时} \quad (j = 1, \dots, nc) \end{cases}$$

1.2 潮流公式

$$F_P = \sum_{i=1}^b \sum_{j=0}^{m_i-1} r_{i,j+1} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) / V_{ij}^2$$

1.3 约束条件

Sum 为允许的电容器总投资费用; V_k 为系统节点电压, $V_{k \min}$ 和 $V_{k \max}$ 为节点电压下(上)限值。 Q_k 为第 k 个试装电容器节点投入的无功功率。 $Q_{k \min}$ 和 $Q_{k \max}$ 为该试装电容器的无功下(上)限值。

1.4 灵敏度分析

配电网节点数繁多, 为提高效率, 这里通过对配网进行灵敏度分析, 选择出并联电容器的候选安装位置, 有效地减小 TS 的搜索空间, 降低了计算量。灵敏度分析的对象为系统网损对节点无功注入的灵敏度, 公式如下:

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_{ij}} = \sum_{i=0}^b \sum_{j=0}^n r_{i,j+1} \left\{ (2P_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_{ij}} + 2Q_{ij}) / V_{ij}^2 - 2 \frac{\partial V_{ij}}{\partial Q_{ij}} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) / V_{ij}^3 \right\} \quad (6)$$

2 应用 TS 解决配置问题

本文根据配电网电容器优化配置问题的特点, 构造出解决该问题的 TS 算法的三要素: “移动”、“Tabu 表”和“期望水平”。

移动

特提出一种新的移动来解决配电网电容器的优化配置问题, 定义如下:

$$e^{\text{trial}} = e^{\text{current}} + u_i \quad (i = 1, 2, \dots, nc) \quad (7)$$

这里, u_i 是一个 n 维向量, 当 e^{current} 的第 i 个和第 j 个元素同为 0 或 1, u_i 的第 i 或第 j 个元素分别取 1 或 -1 (其余元素为 0)。若 e^{current} 的第 i 个和第 j 个元素不同, u_i 的第 i 个和第 j 个元素分别取 1 或 -1 (其余元素为 0)。实践表明, 该移动较常用的单步移动和交换移动的联合移动更加简洁、有效。

Tabu 表 (Tabu List)

采用动态链接表作为 Tabu 表, Tabu 表的长度为 30。

期望水平

采用的期望水平为: 假如一个 tabu 移动 (tabu_move) 作用于当前试验解 (e^{current}), 产生的解比 Tabu List 外所有搜索到的移动 (S^*) 都好, 即:

$$f_i(e^{\text{current}} + \text{tabu_move}) < f_i(S^*)$$

则该 tabu 移动被释放。

3 求解步骤

基于 TS 算法的电容器配置问题求解步骤如下:

1) 输入配电网的数据。包括网络参数数据、节点电压限值、配置电容器的无功限值、Tabu 表的最大规模及迭代步数、允许的电容器总投资费用等。

2) 对配电网进行灵敏度分析。选择出灵敏度最大的几个 (如 10) 节点作为安装电容器的候选位置。

3) 在解空间中将任一解向量代入 e^{current} 中作为初值, 算出网络网损。

4) 如已到达预先设定的最大迭代步数, 结束搜索并将计算的结果输出。

5) 用 TS 方法进行第一级优化搜索出电容器的预安装位置, 预安装电容器的容量大小以及该台电容器的型号, 产生一组试验解向量。用约束条件式 (2)

~(5)对试验解进行校验,剔除不满足约束条件的解,形成可行解空间。

6)用 Tabu Search方法进行第二级优化算出在可行解空间中符合条件的每个试验解的网损。

7)对可行解空间的每一组解用目标函数进行测试。如果某一个解不在 Tabu表中或者该解虽然在 Tabu表中但是已经到了 Tabu表的释放水平并且使目标函数最优,则该试验解作为下一步寻优方向。

8)迭代步数加一,转到步骤 4。

4 算例及其分析

用上述 TS算法对 16 节点的配电系统进行研究,其馈线参数、负荷数据等见参考文献 [7],各点电压限值为 $V_{min}=0.9$, $V_{max}=1.05$,灵敏度设为 5。计算程序用 C语言编制,共用去 CPU 时间 1.59 s。通过灵敏度分析,选择出灵敏度较大的五个节点作为电容器安装的候选位置:12,9,11,8和 10。计算结果表明电容器的最优配置是在节点 8 装入一台容量为 0.3 MW、固定类型的电容器和在节点 9 装入一台容量为 0.3 MW、固定类型的电容器。现将配置前和配置后的系统费用列表如下:

表 1 配置前后系统费用

	网损 (万元)	电容器费用 (万元)	系统总费用 (万元)
配置前	1734.0227	0	1734.0227
配置后	1411.4216	90	1501.4216

配置前后在负荷最重情况下的电压曲线见图 1。

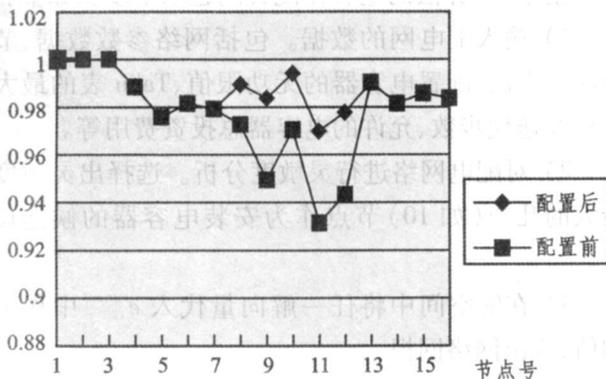


图 1 负荷最重情况下的电压曲线

从表 1和图 1可知,该配电系统在用基于 Tabu

Search算法的两级动态优化法进行配置后,整个系统的总费用降低 232 601.1 万元,下降率为 13.414%。配置后,系统的最低电压点,节点 11 的电压由原来的 0.931 479 上升到 0.969 838,上升率为 4.12%。

5 结论

研究了配电网并联电容器的优化配置问题。在基于 Tabu Search算法,并根据电力系统规划是一个动态过程采用了两级优化来解决配电网电容器的优化配置问题,大大提高了最终结果的准确性和可信度。该算法计算速度快,收敛性好,并具有全局寻优的能力,达到了工程上可以实用的水平。

参考文献

- [1] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search Optimization Machine Learning Addison-Wesley Publishing Company Inc. 1989.
- [2] Boone G, Chiang H D. Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems by Genetic Algorithm. Electrical Power & Energy Systems 1993, 15(6): 155~162.
- [3] Wu Q H, Ma Jin Tao. Genetic Search for Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems. Proc of IEE International Conference on Control Coventry UK. 1994, 3(1): 717~722.
- [4] Iba K. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm. IEEE PWRS 1994, 9(2): 685~692.
- [5] Sheble G B, Brittig K. Refined Genetic Algorithm: Economic Dispatch Example. IEEE PES 94 Winter Meeting 1990 PWRS
- [6] F Glover. Tabu Search—Part I. ORSA Journal on Computing 1989, 1(3): 190~206.
- [7] Yann-Chang Huang, Hong-Tzer Yang, Ching-Lien Huang. Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach. IEEE Transactions on Power Systems 1996, 11(4): 1868~1873.

作者简介:

卢鸿宇 (1975—),男,福建省永定县,哈尔滨工业大学硕士研究生,2000年起于四川省电力公司调度中心从事调度工作。

(收稿日期:2008-04-15)