

文章编号:1671-6833(2010)05-0095-04

基于单纯形法思想的城市高压电网非线性无功优化

王克文¹, 赵晓铎¹, 刘晓峰²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省平顶山供电公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 针对城市高压电网的无功优化问题, 采用拟牛顿法优化潮流, 计算补偿节点的无功需求, 确定电容器组的投切状态, 并作为进一步优化的初值. 将电容器组补偿节点的无功灵敏度大小作为选择“进基”、“出基”变量的依据, 借鉴单纯形法基点转换的基本思想优化电容器组投切状态, 减小有功损耗. 最终进行以综合费用为目标的综合无功优化, 确定当前时刻往后 24 h 内的电容器组和变压器分接头状态. 通过实际算例验证了该方法的有效性.

关键词: 城市高压电网; 单纯形法; 无功优化; 拟牛顿法

中图分类号: TM715

文献标识码: A

0 引言

无功优化是一个复杂的多变量、多约束的混合非线性规划问题. 当将离散变量按连续变量处理时, 非线性规划算法具有计算速度快, 收敛性好的特点; 但除对初值选择比较严格外, 优化计算结束后的变量归整将影响结果的最优性或可信度^[1]. 人工智能方法, 具有全局寻优的优势^[2-3], 但计算代价较高. 文献[4-5]分别提出了电容器优化投切的作用范围和最优匹配注入流两个新概念, 力求实现就地补偿. 文献[6]按照补偿节点无功注入的灵敏度大小排序, 通过准确的潮流计算, 确定电容器组的投切状态. 文献[7]利用电力系统分区思想, 将城市高压电网划分为小的子系统, 大大减少了在线计算的需求.

单纯形法通过选择进基、出基变量进行基点变换^[8], 具有速度快、算法可靠的明显优势. 笔者将单纯形法选择进基、出基变量的基本思想引入非线性无功优化, 先采用拟牛顿法优化潮流确定电容器组投切状态, 作为初值, 再借鉴单纯形法基点转换求解的基本思想优化电容器组的投切状态, 并按调压要求确定变压器分接头的可选范围; 再对各时段进行整体上协调, 最终确定未来 24 h 内的电容器组状态和变压器分接头档位, 实现计及调节次数与有功损耗费用的综合无功优化.

1 单纯形法与电容器组状态调节

单纯形法是求解线性规划问题的有效方法. 对于二维线性规划问题, 结合图 1 说明.

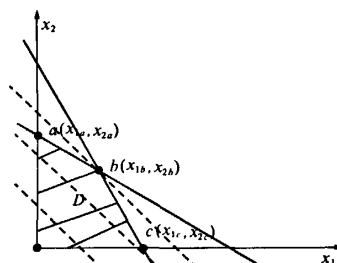


图 1 二维线性规划问题的可行域

Fig. 1 The feasible region of a two-dimensional linear programming problem

根据单纯形法的基本理论, 如果该问题存在最优解, 则一定存在于可行域 D 的顶点: $a(x_{1a}, x_{2a})$, $b(x_{1b}, x_{2b})$, $c(x_{1c}, x_{2c})$ 和坐标原点之中. 同时, 通过选择对目标函数值影响最大的因子, 作为确定进基、出基变量的依据, 在可行域 D 的 4 个顶点之间, 进行基点变换能够快速求得最优解.

假设某电网需要优化两个电容器组的状态, 使网络损耗最小. 由于电容器组的状态 (0 或 1) 均为离散变量, 因此, 其最优投切状态必存在于

收稿日期: 2010-03-23; 修订日期: 2008-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50177028)

作者简介: 王克文 (1964-), 男, 山西运城人, 郑州大学教授, 博士, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, E-mail: kwang@zzu.edu.cn.

$a(0,1), b(1,1), c(1,0)$ 和 $d(0,0)$ 组合之中。虽然单纯形法的求解是线性问题,而优化电容器组状态的无功优化是非线性的,不完全具备线性规划中运用单纯形法求解的条件;但是,单纯形法中选择对目标函数值影响最大的因子,也可以通过计算目标函数的无功灵敏度^[9]代替,进而选择“进基”、“出基”变量。无功灵敏度值的大小,反应了补偿节点无功注入量的变化对平衡点有功大小的影响程度。无功优化中确定电容器组的状态,实质就是确定所有电容器组的状态“1”、“0”的一个组合,能够使整个系统的无功需求达到平衡,减小有功损耗。

在实际系统中,电容器组有很多,投切状态组合数会更大,通过枚举法求最优解难以实现。因此,笔者考虑将单纯形法进行基点转换的基本思想引入到非线性无功优化中,调节电容器组投切状态。

2 综合无功优化模型

无功优化中的目标函数,有的是求取系统有功损耗最少^[10],有的是同时实现有功损耗最小化和电压稳定裕度最大化^[11]。本文目标函数为时段内计及控制设备调节代价的综合费用^[6]。

2.1 目标函数

$$\min F = \alpha \Delta t \sum_{i=1}^{24} (\Delta P_i - \Delta P_{i0}) + R_T N_T C_T + R_C N_C C_C \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{i0}, \Delta P_i$ 分别为第 i 个 Δt 内优化前、后全网的有功损耗, kWh; Δt 为时段,本文中为 1 h; α 是综合电价,元/kWh; N_T 和 N_C 分别为 24 h 内对变压器分接头的调节档位次数和对电容器组的调节次数; C_T 和 C_C 为单位调节代价,元/次, C_T 取值为 20 元/次, C_C 取值为 2 元/次^[9]; R_T 和 R_C 为改善迭代收敛特性的权重系数,开始时取较小值,随迭代次数逐渐增加到 1。

2.2 约束条件

优化模型的约束条件包括等式约束和不等式约束。等式约束为常规潮流计算的节点功率平衡。对 PV 节点用电压方程代替无功方程。不等式约束包括节点电压、支路功率、并联电容器组数、可调分接头档位数约束。其中,用拟牛顿法优化潮流计算补偿节点无功容量时,去掉电容器组补偿节点的无功功率等式约束。

3 基于单纯形法思想的电容器组投切状态优化

对一天的各个时段,首先通过拟牛顿法优化潮流,确定电容器组的投切状态,作为电容器组的状态初值,再借鉴单纯形法思想进一步优化。确定初值后,就将电容器组分为投入和未投入的两部分。已投入电容器组的状态作为“基”变量,其值为 1,未投入电容器组的状态作为“非基”变量,其值为 0。具体计算步骤如下:

(1) 计算电容器组补偿节点的无功灵敏度;

(2) 确定“出基”变量。找出已投入电容器组的最大灵敏度值,将其所对应的电容器组切除,进行潮流计算,若能够使有功损耗减小,则该电容器组的状态由 1 变为 0;

(3) 确定“入基”变量。找出未投电容器组的灵敏度最小值,将其所对应的电容器组投入电网,进行潮流计算,若能够使网损减小,则该电容器组的状态由 0 变为 1;

(4) 若经过(2)和(3)后,有电容器组的状态发生改变,则转(1),否则,根据每一变压器低、中压侧的运行要求确定其高、中压侧的分接头档位范围。

算法改进包括两个方面,一方面,调节电容器组状态的无功优化是非线性的,鉴于电容器组容量大小的不同,调节最大和最小灵敏度所对应的电容器组状态,不一定使有功损耗减小,对于这种情况,可以调节下一灵敏度所对应的电容器组状态;另一方面,在选择“进基、出基”变量时,一次分别可以选择两个或者多个,加快电容器组调节的速度。

4 综合无功优化的实现

结合城市高压电网的实际,具体实现上将作以下处理:一是将调整电容器组的状态和变压器分接头档位分别处理,不计两者之间的耦合;二是整个优化过程分为静态无功优化和综合无功优化^[6]两个阶段进行。静态优化是处理每个时段电容器组的投切状态,得出所有电容器组的投切状态和可调变压器分接头的可调范围,作为综合优化的初值,从整体上进行协调。综合优化的结果直接提供了未来 24 h 电容器组和分接头的操作次数和时刻,其中,在采用拟牛顿法优化潮流确定电容器的投切状态初值时,所有电容器组的补偿容量近似取其额定容量。

5 算例分析

上街 110 kV 电力系统的结构如图 2 所示. 系统中有 7 台电容器组、6 台三绕组变压器,11 台双绕组变压器,在系统当前的运行方式下,按照电源点(实际系统为高压母线),城市高压电网分为 3 个子系统. 第 1 个系统为该系统的主要运行方式,含有 5 台三绕组变压器,10 台双绕组变压器,6 台电容器组,共 30 个节点. 电容器组: C_1 为樊容 1, C_2 为樊容 2, C_3 为崔容 18, C_4 为崔容 18 外, C_5 为孝容 2, C_6 为孝容 1. 其中 C_4 没有投入运行. 第 2 个子系统没有负荷. 第 3 个子系统含有 1 台双绕组变压器,1 台电容器组(卫容 1),共 3 个节点. 部分变压器编号为 T_1 为崔 2 主变, T_2 为孝 2 主变, T_3 为振 1 主变, T_4 为永 1 主变.

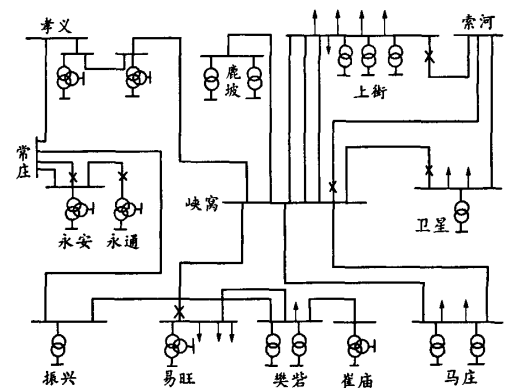


图 2 上街 110 kV 算例系统
Fig. 2 Testing 110 kV power system of Shangjie

先用拟牛顿法确定各时刻电容器组补偿容量的初值,再借鉴单纯形法思想进行各时刻的静态优化,最后进行综合无功优化. 拟牛顿法计算执行 4 次,其收敛精度为 10^{-3} ,各时刻静态优化需迭代 3~4 次. 综合优化后各个时段的部分电容器组和变压器分接头状态如表 1 所示. 其中,时段“0”为设备的当前状态,2~7 列中,“1”表示运行,“0”表示退出,后 4 列为优化后的部分变压器分接头档位值.

表 1 中电容器组 C_1 、 C_3 的状态在各时刻没有变化,电容器组 C_5 在第三时刻投运. 由于静态无功优化后,电容器组的状态均比较合理,因此,综合无功优化中电容器组的状态未发生进一步变化,同时确定了变压器分接头档位.

表 1 算例系统部分优化结果
Tab. 1 Part optimization results of the testing system

时段	静态无功优化			综合无功优化							
	C_1	C_3	C_5	C_1	C_3	C_5	T_1	T_2	T_3	T_4	
0	1	0	0	1	0	0	4	4	2	5	
1	1	0	0	1	0	0	3	2	2	3	
2	1	0	0	1	0	0	3	2	2	3	
3	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
4	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
5	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
6	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
7	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
8	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
9	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
10	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
11	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
12	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
13	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
14	1	0	1	1	0	1	3	1	2	3	
15	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
16	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
17	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
18	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
19	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
20	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
21	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
22	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
23	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	
24	1	0	1	1	0	1	2	1	2	2	

表 2 中给出了对上街 110 kV 算例系统采用不同方法进行综合无功优化的结果,其中第 1 行数据是为进行无功优化时实际系统运行的估算值,并与本文的优化结果与文献[6]的优化结果进行了比较.

表 2 综合无功优化前后的经济成本
Tab. 2 Economic costs before and after synthetic reactive power optimization

状态	电容器组 调节/次数	分接头 /档	日损耗 /kWh	综合费 用/元
优化前	10	20	14 071	6 048
文献[6]优化后	2	4	14 341	5 820
本文算法优化法	1	7	14 047	5 753

从表 2 可以看出,本文综合无功优化后,减少了电容器组的调节次数,降低了有功损耗,并且优化结果与文献[6]结果相比,虽然增多了变压器分接头档位的调节次数,但最终综合无功优化后的经济成本有所降低. 其中,文献[6]的优化方法是通过计算电容器组补偿节点的无功灵敏度大

小,进行试算来调节电容器组的投切状态.

优化方法采用 FORTRAN 语言实现,在 2G CPU 速度微机上运行 1 685 ms.

6 结论

将单纯形法通过选择进基、出基变量进行基点变换的基本思想引入非线性无功优化.由于采用拟牛顿法确定电容器组的投切状态时引入归整误差,而采用单纯形法基点转换的基本思想优化电容器组的投切状态,有效减小了归整误差对优化结果的影响,减少了系统的有功损耗,同时也避免了采用动态规划等方法时计算量过大的问题.最后计及设备的调节次数费用,进行 24 h 整体协调,确定当前时刻往后 24 h 内的电容器组和变压器分接头状态.该方法简单,易于实现,具有较强的实用性.

参考文献:

- [1] 邓佑,张伯明,相年德.配电网电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法[J].中国电机工程学报,1995,15(6):375-383.
- [2] SANTOSO N I, TAN O T. Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems[J]. Trans on Power Delivery, 1990, 5(1): 266-272.
- [3] 张学松,柳倬,于尔铿.基于 Tabu 方法的配电电容器投切策略[J].电网技术,1998,22(2):33-36.
- [4] 王威,韩学山,王勇,等.配电网电容器优化投切的作用范围法[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(6):36-40.
- [5] 吴文传,张伯明.电容器实时优化投切的最优匹配注入流法[J].中国电机工程学报,2004,24(1):35-39.
- [6] 刘思青,王克文.城市高压电网在线综合无功优化模型的建立与实现[J].河南科技大学学报:自然科学版,2006,27(2):101-104.
- [7] 马丽丽,王克文.基于分区思想的城市高压电网无功优化[J].电力系统保护与控制,2008,36(13):43-47.
- [8] 陈宝林.最优化理论与算法[M].2版.北京:清华大学出版社,2005:37-43.
- [9] 王克文,张建芬,杨海晶,等.用灵敏度法确定变电站电容器组的在线投切[J].继电器,2003,31(9):15-19.
- [10] 杨丽徙,王锴,黄训诚,等.应用模拟树木生长算法求解无功规划问题[J].郑州大学学报:工学版,2008,29(2):69-72.
- [11] VENKATESH B, SADASIVAM G M, K. A new optimal reactive power scheduling method for loss minimization and voltage stability margin maximization using successive multi-objective fuzzy LP technique [J]. IEEE Trans Power Syst, 2001, 15(1): 844-851.

Nonlinear Reactive Power Optimization Based on Idea of the Simplex Method for Urban High Voltage Power Systems

WANG Ke-wen¹, ZHAO Xiao-duo¹, LIU Xiao-feng²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Pingdingshan Power Supply Company, Pingdingshan 467001, China)

Abstract: For the reactive power optimization problem in urban high voltage power systems, the quasi Newton optimal power flow is applied to compute the reactive power demand in compensation nodes, and to determine the switching on/out states of capacitor banks. The obtained result is regarded as the initial value for further computation. 'Call in' and 'call out' variables are selected referring to the reactive power sensitivities. By using the idea of base transformation in the simplex method, the switching on/out states of capacitor banks are optimized to reduce the total active power loss. Finally, the compositive cost is used as the objective for optimization to determine the capacitor bank states and tap changers in the next 24 hours. The effectiveness of the proposed approach is examined in an actual testing system.

Key words: urban high voltage power system; simplex method; reactive power optimization; quasi Newton method