

基于辅助函数思想的城市高压电网无功优化

周晓娟¹, 王奎英¹, 张 将²

(1. 河南机电职业学院 电子工程系, 河南 郑州 451191; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 无功优化问题是一个多约束、多变量的混合整数规划问题, 它的变量有连续变量和离散变量, 从而导致优化问题的求解变得十分复杂. 鉴于补偿电容器组投切组数的离散特性, 采用了简单实用的处理方式. 构造一个表示电容器组投切状态的辅助函数, 将离散变量转化为连续变量. 最小化目标为由电能损耗和设备调节代价构成的综合费用. 对于最优问题的求解, 采用变尺度法. 所提算法在一个算例上进行了分析验证.

关键词: 无功优化; 离散变量; 辅助函数; 变尺度法

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.019

0 引言

电力系统的经济运行, 实质上是一个最优化问题. 从运筹学角度来讲, 就是在满足一定的约束条件下, 使得目标函数达到最优. 按照优化对象, 可分为发电机组的最佳开停、电源功率的最优分布和无功电源的最优补偿等. 优化的目标函数也因对象的不同而不同, 如发电费用最小、网损最小、无功补偿容量最小和综合经济效益最大等.

电力系统无功优化^[1]是通过改变无功潮流在网络中的分布来达到降低网损, 保证电压质量的目的. 无功优化的方法通常分为两种, 即经典式和现代启发式. 这些方法在计算速度、实用范围、收敛性和对初值要求等方面都各有特点. 如何实现优化问题中离散变量和连续变量的综合处理、保证算法收敛性和对非线性函数的处理是目前无功优化需要考虑的焦点问题^[2].

鉴于电容器组的离散特性, 笔者采用了一种简单实用的处理方式^[3]. 构造一个表示电容器组投切状态的辅助函数, 将离散变量转化为连续变量. 设定电容器状态初始值为 0.5, 一旦新计算的状态值偏离 0.5, 则把新计算出的值作为电容器组的当前投切状态值, 电容器组投切状态值最终以整数 0 (退出) 或者 1 (投入) 输出.

1 电容器的处理

电容器的投切具有离散的特性, 在传统最优化问题求解中, 混合整数规划方法对解决离散变量非常有效. 它为了逐渐逼近全局的最优解, 采用分支定界来不断地缩小可行域. 这种算法存在一定的缺陷性, 如果计算维数不断增加, 计算时间也会跟着急剧增加, 有时甚至是爆炸性的. 为了避免上述问题出现, 引入变量 K_m , K_m 的取值范围是 0 ~ 1 的一个实数, 用它表示电容器投切状态. 构造一个关于它的辅助函数 $y(K_m)$ 如图 1 所示.

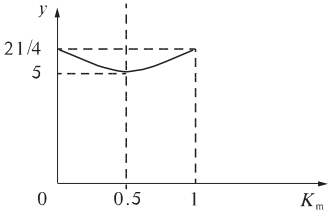


图 1 函数曲线
Fig. 1 Function curve

辅助函数 $y(K_m)$ 为

$$y = (K_m - 0.5)^2 + 5. \tag{1}$$
$$y_a = \max y = \max [(K_m - 0.5)^2 + 5]. \tag{2}$$

对于 y 取得最大值 y_a 时, K_m 值选取如下.

(1) 当 $0 \leq K_m < 0.5$ 时, K_m 值取 0, 表示退出该电容器.

收稿日期:2014-03-24; 修订日期:2014-05-13
基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A470222)
作者简介:周晓娟(1982-), 女, 河南新郑人, 河南机电职业学院讲师, 硕士, 研究方向为电力系统经济运行, E-mail: zhouxiaojuan0371@163.com.

(2) 当 $0.5 < K_m \leq 1$ 时, K_m 值取 1, 表示投入该电容器.

2 优化模型

无功优化的目标函数^[4] 我们可以用当前时刻的最小网损来表示. 所有发电机的有功出力在不考虑平衡节点的情况下, 可以认为是给定不变的. 对于一定的负荷来讲, 平衡节点的注入功率将会伴随着网络损耗的变化而发生变化, 因此系统总网损最小可以用平衡点有功注入最小来表示.

2.1 无功优化的目标函数

笔者以包括全网电能损耗和控制设备的调节代价的综合费用最小作为无功优化调度的目标函数. 在只考虑电容器的情况下, 目标函数表达式如下.

$$\min F(\mathbf{X}, \mathbf{K}) = \alpha [P_s(\mathbf{X}, \mathbf{K}) - P_{s0}] + R_c C_c \sum_{m=1}^{m=l} (K_m - K_{m0})^2 + R_y \sum_{m=1}^{m=l} (-y_a). \quad (3)$$

式中: 向量 \mathbf{X} 由直角坐标形式的节点电压的实部和虚部表示 ($X_i = e_i + jf_i$); α 为综合电价 (元/kWh), α 取值为 0.5 元/kWh; $P_s(\mathbf{X}, \mathbf{K})$, P_{s0} 分别是单一时段优化后和优化前全网的有功损耗 (用平衡点的有功功率来表达); C_c 为单位调节代价 (元/次), 根据现场人员提供的经验数据取值为 2 元/次; R_c 为权重系数, 它的取值范围为 0 ~ 1, 为了改善迭代收敛特性, R_c 在迭代刚开始时取较小值, 随着迭代次数的逐渐增加, R_c 也逐渐增加, 最后增加到 1; R_y 取值为 1 元; K_{m0} 为电容器组的初始状态值.

2.2 无功优化目标函数的约束条件

2.2.1 等式约束

等式约束条件为潮流计算中的节点功率平衡方程:

$$\begin{cases} P_{i0} = P_i(\mathbf{X}); \\ Q_{i0} = Q_i(\mathbf{X}); \\ (V_{i0}^2 = X_{2i-1}^2 + X_{2i}^2). \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (4)$$

式中: P_{i0} 、 Q_{i0} 、 V_{i0} 分别为节点有功功率、无功功率和电压的给定量; n 为系统的总节点数; X_{2i-1} 和 X_{2i} 为直角坐标形式下节点 i 电压的实部和虚部; 当为 PV 节点时, 可用式(4) 中的电压方程代替无功等式约束.

2.2.2 不等式约束

电容器状态 K_m 约束 $0 \leq K_m \leq 1 (m = 1, 2, \dots, l)$.

并联电容器组数约束 $0 \leq C_l \leq C_{ls} (l \in T)$.

(6)

支路功率约束 $P_{ij}(\mathbf{X}) \leq P_{ij\max}$.

(7)

节点电压约束 $V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax}, (i = 1, 2, \dots, n)$.

(8)

式中: K_m 为电容器的投切状态; C_l 为节点 l 处所安装的电容器组数; C_{ls} 为节点 l 安装的最大电容器组数; $P_{ij\max}$ 为 $i-j$ 支路有功功率的最大输送值; V_{imin} 、 V_{imax} 分别为节点 i 的电压上下界.

3 无功优化问题的最优求解

3.1 增广目标函数

根据最优潮流计算中的梯度法^[5], 将目标函数写成如下形式.

$$\begin{aligned} C^* = F(\mathbf{X}, \mathbf{K}) &+ \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i [P_{i0} - P_i(\mathbf{X}, \mathbf{K})] + \\ &\sum_{i=1}^{n-1} M_i [Q_{i0} - Q_i(\mathbf{X}, \mathbf{K})] + \sum_{u \in cox} r_{ux} (X_u - X_{ulim})^2 + \\ &\sum_{t \in cok} w_{tk} (K_t - K_{tlim})^2 + \sum_{g \in cop} r_{gp} [P_{ij}(\mathbf{X}) - P_{ijlim}]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

式中: λ_i , m_i 分别表示有功无功的拉格朗日乘子; w_{tk} , r_{gp} 分别是电容器状态约束和支路功率约束的罚因子; cox 表示越界负荷节点电压下标的集合; cop 表示越界支路功率下标的集合; cok 表示越界电容器投切状态下标的集合.

根据最优潮流可知, 目标函数极小值的必要条件为

$$\begin{cases} \alpha \frac{\partial P_s(\mathbf{X}, \mathbf{K})}{\partial k_j} + 2k_j (w_{jk} + R_c C_c - 1) - \\ \frac{\partial Q_j(\mathbf{X}, \mathbf{K})}{\partial K_j} - 2R_c C_c k_{j0} - 2k_{jlim} = 0; \\ \alpha \frac{\partial P_s(\mathbf{X}, \mathbf{K})}{\partial X_N} - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i \nabla_{X_N} h_i(\mathbf{X}, \mathbf{K}) - \\ 2r_{zv} (X_z - X_{zlim}) = 0; \\ \frac{\partial C^*}{\partial \lambda_i} = P_{i0} - P_i(\mathbf{X}) = 0; \\ \frac{\partial C^*}{\partial m_i} = Q_{i0} - Q_i(\mathbf{X}) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

为方便起见, 对于式(10) 中的节点功率约束, 可用 $h_i(\mathbf{X}, \mathbf{K}) = 0$ 来表示. 其中, $\partial P_s / \partial X_N$ 为将潮流计算中的雅可比矩阵扩展到包含平衡节点时有功功率对应行中的元素. $\frac{\partial Q_j(\mathbf{X}, \mathbf{K})}{\partial K_j} =$

$M_j U_j^2 B_{jic}$, 而 $\nabla_{X_N} h_i(X, K)$ 即是雅可比矩阵 J .

令

$$J = \begin{bmatrix} H' & N' \\ J' & L' \end{bmatrix}.$$

(3)

式中: $H' = \frac{\partial P}{\partial f}$; $N' = \frac{\partial P}{\partial e}$; $J' = \frac{\partial P}{\partial f}$; $L' = \frac{\partial Q}{\partial e}$; e, f 分别为节点直角坐标形式下电压的实部和虚部.

3.2 一维搜索

用黄金分割搜索法^[6](即 0.618 法), 对目标函数进行一维搜索. 直到收敛条件满足才停止搜索. 否则, 就要建立 \bar{H}_k 到 \bar{H}_{k+1} 的迭代关系, 其中 \bar{H}_k 的初值取单位矩阵.

3.3 \bar{H}_k 到 \bar{H}_{k+1} 的迭代关系

对于目标函数, 可以简化为

$$C(f, e, K, \lambda) = F(f, e, K) + \sum_{i=1}^{2n} \lambda_i h_i(f,$$

$$\theta_k = \begin{cases} 1, \\ \frac{0.8 (\Delta x_k)^T \bar{H}_k \Delta x_k}{(\Delta g_k)^T \Delta x_k \geq 0.2 (\Delta x_k)^T \bar{H}_k \Delta x_k}, \end{cases}$$

在已知 $\eta_k, \Delta G_k, \theta, \Delta X_k$ 的前提下, 即可得到变尺度矩阵 \bar{H}^{k+1} 的迭代关系式.

$$\bar{H}_{k+1} = \bar{H}_k + \frac{\eta_k \eta_k^T}{\eta_k^T \Delta x_k} - \frac{\bar{H}_k \Delta x_k (\Delta x_k)^T \bar{H}_k}{(\Delta x_k)^T \bar{H}_k \Delta x_k}.$$

(17)

得到 \bar{H}^{k+1} 的迭代关系后, 将重新进行新一轮的迭代, 最终即可得到最优解.

4 算例分析

算例为试运行系统, 我们用系统 I 来表示, 如图 2 所示. 系统 I 在文中所用的当前系统运行方式下, 经过节点的压缩等过程, 共得到 3 个子系

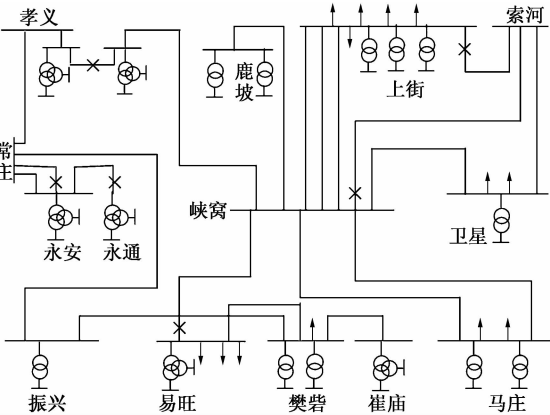


图 2 110 kV 系统 I
Fig. 2 110 kV power system I

$$e, K) + W(Z, V).$$

(11)

其中, $W(Z, V)$ 表示所有不等式约束.

由变尺度法可知

$$\Delta g_k = [\nabla_X C(X_{k+1}, K_{k+1}, \lambda_{k+1}) - \nabla_X C(X_k, K_k, \lambda_k)] + [\nabla_K C(X_{k+1}, K_{k+1}, \lambda_{k+1}) - \nabla_K C(X_k, K_k, \lambda_{k+1})].$$

(12)

经化简可得

$$\Delta g_k = 2r_{uX}(X_{k+1} - X_k) + 2(K_{k+1} - K_k)(w_K + R_C C_C - 1) + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i [J'_{k+1} - J'_k].$$

(13)

变量的增量表达式如下:

$$\Delta x = [X_{k+1} - X_k, K_{k+1} - K_k].$$

(14)

$$\eta_k = \theta \Delta g_k + (1 - \theta) \bar{H}_k \Delta x_k (0 < \theta < 1).$$

(15)

同时, 对 θ_k 的选择应该遵循下式:

$$(\Delta x_k)^T \bar{H}_k \Delta x_k - (\Delta g_k)^T \Delta x_k;$$

否.

(16)

统, 第 1 个子系统中含有 30 个节点, 5 台电容器组, 2 台双绕组变压器, 4 台三绕组变压器. 第 3 个子系统含有 3 个节点, 1 台电容器组, 1 台双绕组变压器. 其中只有第 1 个子系统代表系统 I 主运行方式. 电容器编号依次为 C_1 - 卫 1, C_2 - 孝 1, C_3 - 孝 2, C_4 - 崔容 18 外, C_5 - 崔容 18, C_6 - 樊 2, C_7 - 樊 1.

表 1 系统 I 电容器优化结果

Tab. 1 Capacitor optimization results in power system I

设备 ID	设备名称	是否可控	原状态	K 的初值	优化后 K 值
40136	卫 1#电容器	可控	合	0.5	1
41242	孝 1#电容器	可控	合	0.5	1
41243	孝 2#电容器	可控	开	0.5	1
41267	崔容 18	可控	开	0.5	0
40440	樊 2#电容器	可控	开	0.5	0
40439	樊 1#电容器	可控	合	0.5	1

在 110 kV 系统 I 的子系统 1 中, 一共有五台电容器组, 分别为 C_2, C_4, C_5, C_6, C_7 , 其中 C_4 没有投入运行. 运用 Fortran 语言进行编程, 程序运行结果给出了优化后各电容器组的投切状态. 表 1 列出了电容器组状态; 表 2 给出了优化前后的有功损耗. 通过程序计算我们得出了优化前的有功损耗为 11.512 07 MW, 优化后的有功网损为 11.503 96 MW; 优化前的综合费用为 0.601 7 万元, 优化后的费用为 0.598 6 万元, 可节省 0.003 1 万元.

表 2 系统 I 优化结果
Tab.2 Results of power system I

状态	有功网损/MW	综合费用/万元
优化前(估算值)	11.512 07	0.601 7
优化后	11.503 96	0.598 6

5 结论

鉴于电容器组投切的离散特性,笔者提出了一种简单实用的处理方法,构造一个辅助函数来表示电容器组投切状态,从而将离散变量转化为连续变量进行处理。

根据无功优化问题复杂的特点,笔者采用了变尺度法对最优潮流进行求解。最后通过一个算例对文中所述方法进行分析论证,运行结果提供了部分电容器组的投切状态以及无功优化前后的网损。试算表明该方法简单并且实用,计算速度快,能够提高系统运行的综合经济性。可以给调度

人员提供在线指导作用。

参考文献:

[1] 王克文,赵晓铎,刘晓峰.基于单纯形法思想的城市高压电网非线性无功优化[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(5):95—98.

[2] 马丽丽.城市高压电网无功优化[D].郑州:郑州大学电气工程学院,2008.

[3] 周晓娟.城市高压电网无功优化[D].郑州:郑州大学电气工程学院,2009.

[4] 杨晨,宗晓萍.基于蜜蜂进化型遗传算法的电力系统无功优化[J].河北大学学报:自然科学版,2013,33(2):198—203.

[5] 张勇军,任震.电力系统动态无功优化调度的调节代价[J].电力系统自动化,2005,29(2):34—38.

[6] 陈宝林.最优化理论与算法[M].北京:清华大学出版社 2005:125—127.

Reactive Power Optimization based on Auxiliary
Function Approach for Urban High Voltage Power Systems

ZHOU Xiao-juan¹, WANG Kui-ying¹, ZHANG Jiang²

(1. Department of Electronic Engineering, Henan institute Of Mechanical Technology, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Reactive power optimization problem is a multi-bound, multi-variable mixed integer programming problem, and the operating variables include continuous and discrete variables, so the optimization problem becomes complex. In view of the discrete characteristics of and compensation capacitor sets, this paper adopts a simple and practical approach, an auxiliary function is structured to express the input or withdrawal of capacitor sets. This method transforms discrete variables into continuous variables. The optimal objective is to minimize the competitive expenses of power loss and the cost of equipment regulation. Variable metric algorithm is adopted to solve the optimal problem. Proposed approach is examined on one system; computed results provide the active power losses and capacitor states. The proposed approach is examined in one testing system.

Key words: reactive power optimization; discrete variable; auxiliary function; variable metric algorithm