

(14) 69-73

供电网无功优化的“非增量”二次规划模型

A Quadratic Programming Model with "Non-Increment" Variables
for Solving Reactive Power Optimization in Power Supply Networks

冯祈善
Feng Qishan

王主丁
Wang Zhuding

周峰
Zhou Feng

(重庆大学)

蒲心懋
Pu Xinmao

黄则修
Huang Zexiu

(贵州省电力局)

TM714.3

摘要 基于解耦方法,将各支路无功潮流设置为规划变量,构造了能计入多种约束的供电网无功优化的“非增量”二次规划模型。该模型适用于35~110 kV供电网。经对四川省某县35 kV供电网的分析计算,表明该模型是有效的。

关键词 无功规划;无功补偿;电力系统;二次规划

中国图书资料分类法分类号 TM714.3

ABSTRACT Based on the decoupling principles, the article presents a Quadratic Programming model with "non-increment" variables which is used to evaluate the optimal scheme of reactive power compensation in power supply networks. In this model, the reactive power flowing through each line is regarded as the variables. The model fits for 35~110kV power supply network, which has been proved to be correct in the practical analysis for a county's power supply network of sichuan province.

KEYWORDS reactive planning; reactive compensation; power system; quadratic programming

0 引 言

电力系统无功优化一直是电力系统运行和规划领域的重要研究课题,是保证电力系统安全和经济运行的有效技术措施。它是以保证电力系统电压质量为前提,利用无功补偿改变全网的无功潮流,使系统有功损耗与无功补偿支出之和为最小。

几十年来,国内外在这方面做了许多工作,提出了不少方法^[1-6]。由于“增量”模型的求解存在的迭代收敛问题,以及非线性规划算法本身还不够成熟,使以上方法均难以在规划设计部门推广使用。因此,提出简捷且能利用相对成熟算法的实用模型是至关重要的。

* 收文日期 1992-12-05

基于解耦方法,笔者将各支路无功潮流设置为规划变量,成功地建立起了“非增量”二次规划模型。其中,目标函数为因无功补偿使有功网损减少获得的收益减去无功补偿费用后的年净收益现值为最大,等式约束计及了仅考虑电压降落纵分量的支路(回路)电压方程和节点无功平衡方程以及考虑了支路无功损耗的线路两端无功平衡方程;不等式约束有节点电压和变压器分接头的上下限,以及现有无功电源的出力限制。

模型的解算可根据具体条件采用二次规划算法或将目标函数(分段)线性化后用线性规划算法求解。

本文模型具有实用的诸多优点,经实例计算获得了满意的结果。

1 数学模型

1.1 规划变量的设置

模型取电网中各条支路流出端的无功潮流为规划变量,将流入端无功潮流由该规划变量的函数关系表达。

如图1所示的两端节点分别为*i*和*j*的任一支路*l*,其阻抗为 $R_l + jx_l$ 。若设流出的*j*端无功潮流 Q_l 为规划变量,则*i*端无功潮流 Q_i' 可表示为

$$Q_i' = Q_l + \Delta Q_l \quad (1)$$

式中 ΔQ_l 为支路*l*的无功损耗,可以式(2)表示如下:

$$\Delta Q_l = \frac{P_l^2 + Q_l^2}{V_j^2} x_l \quad (2)$$

根据解耦的思想,有功潮流 P_l 可取初始优化潮流时的值 P_{l0} ,另外,对供电网各节点电压 V_j 也可近似取其相应的初值 V_{j0} 。

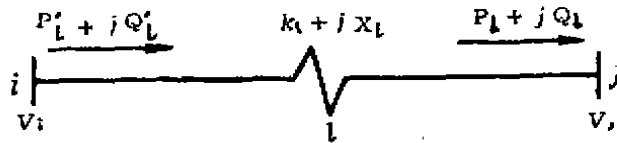


图1 支路*l*规划变量设置示意图

1.1.2 ΔQ_l 的近似处理

由(2)式知, ΔQ_l 为规划变量 Q_l 的二次函数,这对我们建立其线性规划或二次规划模型是不利的。结合电力系统的具体特点,可作适当的简化,即将 Q_l^2 项近似线性化。理由有:

- 1) 支路无功损耗相对于支路无功潮流较小。
- 2) 由无功潮流引起的无功损耗通常较由有功潮流引起的为小。
- 3) 采用经验数据和线性化处理的方法可近似考虑由无功潮流引起的无功损耗。

下面具体推导 Q_l^2 的线性化处理后的近似计算公式。

首先将 Q_l^2 在其初始潮流值 Q_{l0} 处按下式展开:

$$Q_l^2 = Q_{l0}^2 + 2Q_{l0}(Q_l - Q_{l0}) + (Q_l - Q_{l0})^2 \quad (3)$$

由于(3)式中 $(Q_l - Q_{l0})^2$ 项一般相对较小,经省略后且再为该式第二项中的 $(2Q_{l0})$ 根据经验修正为 $(2Q_{l0}')$ 后得修正后的计算公式

$$Q_i^2 = Q_{i0}^2 + 2Q_{i0}'(Q_i - Q_{i0}) \quad (4)$$

(4) 式中的 Q_{i0}' 可按下列式取值：

$$Q_{i0}' = \frac{Q_{i0} + P_{i0} \operatorname{tg} \varphi'}{2} \quad (5)$$

式中 φ' 为根据经验确定的传输功率因数的功率角。

将(5)式代入(4)式得：

$$Q_i^2 = A' Q_i + B' \quad (6)$$

式中： $A' = Q_{i0} + P_{i0} \operatorname{tg} \varphi'$ ； $B' = -P_{i0} Q_{i0} \operatorname{tg} \varphi'$ 。

将(6)式代入(2)式，再将得到的(2)式代入(1)式得：

$$Q_i = A Q_i + B \quad (7)$$

式中： $A = (A' X_i + V_{j0}^2) / V_{j0}^2$ ； $B = (P_{i0} + B') / V_{j0}^2$ 。

1.2 目标函数

本文模型的目标函数为因无功补偿使有功网损减少获得的收益扣除无功补偿费用后的年净收益现值最大，即：

$$\operatorname{Max} C = (F_r C_r \tau_{\max} + F_p C_p) (\Delta P_{\Sigma 0} - \Delta P_{\Sigma}) - (\alpha + \beta) \sum_{i \in N_i^*} C_{i0} Q_{i0} \quad (8)$$

式中： $\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i \in N_i^*} \left(\frac{P_{i0}^2 + Q_i^2}{V_{j0}^2} R_i \right)$ 为无功补偿后全网最大负荷时的有功网损；

$\Delta P_{\Sigma 0}$ 为无功补偿前最大负荷时的最小网损；

F_r, F_p 分别为考虑到偿还年限内负荷增长，成本提高使功率和能量损耗的减少而引入的修正系数；

C_r, C_p 分别为系统最大负荷时电力需求量和电能损耗边际值；

τ_{\max} 为全网最大负荷损耗小时数；

α, β 分别为无功补偿装置的折旧维护率和投资回收率；

Q_{i0}, C_{i0} 分别为节点 i 无功补偿设备新添容量及其单位容量的投资；

N_i^*, K_i 分别为新添补偿设备所设置的节点集合及电网各支路集合。

1.3 约束条件

本文模型有两个等式约束和四个不等式约束。

1.3.1 两个等式约束为：

1) 仅考虑电压降落纵分量的各支路电压方程：

$$V_i - V_j = \alpha_l \frac{P_{l0} R_l + Q_l X_l}{V_{j0}} + \beta_l (K_l - 1) V_s \quad (9)$$

式中： V_s 为电网基本级的基准电压；

α_l 为 1 或 -1。当支路 l 电压降正方向与回路电压正方向一致时取值 1；

反之，取值 -1；

β_l 为 1 或 -1。当支路 l 变压器的非标准变比侧指向标准变化侧的方向与支路电压正方向一致时取值 1；反之，取值 -1；

K_l 为支路 l 变压器的标么值变比。

2) 各节点 i 的无功功率平衡方程

$$Q_{ci} = f_i(Q_i) \quad (10)$$

式中 f_i 由(7)式可知可表示为规划变量 Q_i 的线性函数。若 i 为非规划补偿节点, 可令 $Q_{ci} = 0$; 若 i 为无功电源节点, 可取消节点 i 的(10)式等式约束, 或令 Q_{ci} 取值为该节点无功电源的极限出力 Q_{im} (最大或最小)。

1.3.2 四个不等式约束

1) 各节点 i 无功补偿容量非负的条件

$$Q_{ci} \geq 0 \quad (11)$$

2) 各节点 i 电压上下限

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (12)$$

式中 V_{\min}, V_{\max} 为节点 i 的电压允许的下限、上限

3) 各无功电源出力 Q_i 的限制

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (13)$$

式中 Q_{\min}, Q_{\max} 分别为无功电源节点 i 的最小、最大无功出力。

4) 各变压器变化 K_K 的上下限

$$K_{K\min} \leq K_K \leq K_{K\max} \quad (14)$$

式中 $K_{K\min}, K_{K\max}$ 为变压器 K 变比的下限, 上限。

2 算 例

采用上述模型, 并将目标函数采用式(4)的公式线性化后, 用线性规划算法对四川省某县35 kV实际供电系统在VAX超小型机上进行了编程计算, 结果如下。

该县35 kV电网节点数为21, 支路数为23, 总无功负荷为25 MW, 主要经济计算参数按实际情况取值: $r_{\max} = 3200$ 小时, $C_i = 0.3$ 元/kWh, $C_{ji} = 115$ 元/kW, $a = 0.08$, $\beta = 0.10$ 。计算结果总无功补偿容量为2.368 kW, 分别补偿在三个负荷节点, 网损由1.26 MW下降至1.14 MW, 年净收益为8.7968万元。无功规划潮流与精确的无功交流潮流的误差小于5%。

由以上算例可知, 本文模型是有效、实用的, 算法也是成熟的。

3 结论及讨论

1) 本模型概念清楚, 直观易懂, 精度满意, 求解方法简单, 快速, 不存在迭代收敛问题。除此之外, 该模型还能自动计及现有无功电源和变压器的调节作用, 可用于电力系统无功补偿的规划优化和运行优化。

2) 本模型及算法适用于35~110 kV电压等级的电力网。对220 kV的输电网, 考虑到电压幅值无功补偿前后的变化及电压降落横分量对电压损耗的影响而对电压降落纵分量的计算公式稍作修改后, 可望适用。另外, 还能计及各节点电压因无功补偿变化后对输电线路充电功率的影响, 即将(10)式修正为

$$Q_{ci} + \Delta Q_{ci} = f_i(Q_i) \quad (17)$$

式中 ΔQ_{ci} 为因节点电压变化引起的注入该节点充电功率的增量。

$$\Delta Q_{ci} = 2V_{i0}B_{ii}(V_i - V_{i0}) \quad (18)$$

其中 B_{ii} 为与节点 i 相联线路导纳之和的一半。

3) 本模型若用拉格朗日乘子法和“违限取限”处理不等式约束的方法,可解决用解析法求解具有环网的电力系统无功补偿问题。

4) 对于无功补偿前后系统状态(如 V_i)变化较大的某些 220 kV 电力网,本模型精度会受到影响,此时可采用分阶段逐次小量补偿的方法与交流潮流配合使用加以解决。这与前述的利用灵敏度矩阵的逐次线性迭代过程相似但有不同,其优势为:(i) 无收敛问题,能保证算出优化结果;(ii) 与交流潮流交替计算的次数较少(≤ 3),故仍能做到计算快速。

综上所述,本模型及其相对可靠的算法构筑了电力系统无功优化的有效、实用、独具特色的“非增量”二次规划模型的框架。工作是初步的,值得进一步研究。

参 考 文 献

- 1 K. R. C. Mamardar and R. D. Chenoweth, Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization. IEEE Trans, 1981, Vol. PAS-100, 3185~3194
- 2 I. Hano, Y. Tamura, S. Narita and K. Natsumoto, Real Time Control of System Voltage and Reactive Power. IEEE Trans, 1969, Vol. PAS-88, 1544~1559
- 3 R. R. Shoults and M. S. Chen, Reactive Power Control by Least Squares Minimization. IEEE Trans, 1971, Vol. 90, 2495~2508
- 4 S. Narita and M. S. A. A. Hammam, A Computational Algorithm for Real-Time Control of System Voltage and Reactive Power, Parts I & II. IEEE Trans, 1971, Vol. 90, 2495~2508
- 5 M. O. Mansour and T. M. Abde-Rahman, Non-Linear Var Optimization Using Decomposition and Coordination. IEEE Trans, 1984, Vol. PAS-103, 246~255
- 6 George Opolu, Optimal Power System Var Planning. IEEE Trans, 1990, Vol. 5, 53~60