1995 年 1 月 重庆大学学报 (自然科学版) Vol. 18, №. 1
第 18 卷第 1 期 Journal of Chongqing University (Natural Science Edition) Jan. 1995

(9) 51-54

# 一种线性规划模型与安全校正相结合的无功优化方法*

# A Reactive Power Optimization Method by Linear Programming with Secure Correction

赵尤新 刘龙瑞
Zhao Youxin Liu Longrui
(重庆大学电气工程系,重庆,630044)

TM761.1

A **摘 要** 提出了一种无功线性规划模型与安全校正相结合的无功优化方法。在校正过程中,用准状态变量违界约束搜索控制变量的方法以优化可行控制域。

**关键词** 无功功率;线性规划;校正;优化
**中国图书资料分类法分类号** TM761.1

**ABSTRACT** This paper presents a reactive power optimization method which combines the linear programming model with secure correction. In correction, this model presents a new idea in which the feasible control region of control variables is resolved by over constrained state variables. This method is quick and reliable and overcomes oscillation of a general linear programming model.

**KEYWORDS** reactive power; linear programming; correction; optimization

## 0 引 言

随着线性规划这门数学分支的日益完善和发展,线性的无功优化模型在电力系统无功优化领域中得到了广泛的应用。由于无功和电压的非线性函数关系,采用分段的线性优化常常导致收敛振荡以及无功优化后状态变量越界难以处理的问题[1,2]。文献[3]提出了用控制变量对目标函数的敏感度来搜索优化方向的方法,才比较有效地解决了收敛振荡的缺点。并采用松驰技术处理多约束的线性规划,用有效约束的概念[4],即只选择违界的状态变量进入约束集以减少约束方程数。由于每次线性校正只引入了部分约束,不能保证每次线性校正后由于控制变量的变化不出现新的状态变量越界,从而增加校正次数,增大计算工作量。

笔者提出了一种无功线性规划模型与安全校正相结合的无功优化方法。在分段无功优化过程中,提出了用状态变量准违界约束搜索控制变量的优化可行控制域的新思想,既保留了线性规划的快速、可靠,又克服了无功线性模型求解中的收敛振荡,经过算例和实际电力系统的验证,所提方法是有效可行的。

* 收文日期 1993-12-29

## 1　数学模型

在有功优化基础上、无功线性优化模型可表为：

$$
\mathrm{M1}=\begin{cases}\min & \triangle C=S_{cu}\triangle U\\ \mathrm{s.t} & \underline{\triangle V_D}\leqslant S_{vu}\triangle U\leqslant\overline{\triangle V_D}\\ & \underline{\triangle Q_G}\leqslant S_{Qu}\triangle u\leqslant\overline{\triangle Q_G}\\ & \underline{\triangle Q_e}\leqslant S_{eu}\triangle u\leqslant\overline{\triangle Q_e}\\ & \underline{\triangle U}\leqslant\triangle U\leqslant\overline{\triangle U}\end{cases}
$$

模型 M1 中，目标函数 $\triangle C$ 在无功和电压控制中一般采用全网有功网损，在规划中采用综合效益函数[3,5]，$\triangle u$ 为控制变量增量，在无功优化中，控制变量一般计及系统中主要影响无功潮流分布的发电机端电压、可调变压器抽头以及无功补偿点无功。$\triangle V_D$ 为负荷节点电压增量；$\triangle Q_G$ 为发电机无功增量；$\triangle Q_e$ 为线路无功增量；$S_{cu}$ 为控制变量对目标函数的敏感度；$S_{vu}$ 为控制变量对负荷点电压的敏感度；$S_{Qu}$ 为控制变量对发电机无功敏感度；$S$eu 为控制变量对线路无功敏感度。系统的潮流平衡方程隐含于各敏感度之中[3].

模型 M1 可简化为：

$$
\mathrm{M2}=\begin{cases}\min & \triangle C=S_{cu}\triangle U\\ \mathrm{s.t} & \underline{\triangle X}\leqslant S_{xu}\triangle U\leqslant\overline{\triangle X}\\ & \underline{\triangle U}\leqslant\triangle U\leqslant\overline{\triangle U}\end{cases}
$$

式中 $\triangle X$ 表状态变量；$S_{xu}$ 为控制变量对状态变量的敏感度。

## 2　控制变量的优化可行控制域

无功优化模型 M1 是一线性规划模型。模型 M1 的求解可采用一般的或带上界的线性规划方法。模型 M1 中的约束方程若考虑线路的安全约束条件共有 $N+N_u+N_e$ 个（$N$ 为节点数，$N_u$ 为控制变量数，$N_e$ 为支路数）。大型电力系统，约束方程可达数千个。这样大的线性规划问题，其计算量非常之大。文献[4] 提出了有效约束的概念，即只把违界的状态变量引入约束集中，利用反复求解线性规划，使违界的状态变量回到约束范围内，较大地节约求解 M1 的时间。但在线性规划校正中、由于只引入了违界的状态变量，虽然引入约束集中的状态变量被校正了，又会因控制变量的变化而出现新的违界点，使线性校正的次数增加、影响优化的收敛性。

本文提出一种用接近边界的状态变量来搜索控制变量以优化可行控制域的方法，以克服收敛过程中的振荡，减少线性校正次数、加快计算速度。

在求解 M1 中，同样采用文献[4] 提出的有效约束概念，只引入已违界的状态变量进入约束集，而接近边界的状态变量称之为状态变量的准起作用约束。在分段线性规划中、每次线性规划校正，由于只取已违界的状态变量组成该次线性规划的约束集以提高计算速度、因而

每次校正后，可能出现新违界状态变量，这些违界状态变量通常是在上一次迭代中那些已很接近边界的状态变量。为了使分段线性校正中不出现新的违界状态变量，在线性校正之前，根据状态变量的准起作用约束搜寻出控制变量的优化可行控制域，即控制变量在该控制域中变化，不会出现新的违界状态变量。

$\varepsilon$ 为准起作用状态变量的约束区域，把落入 $\varepsilon$ 区域的状态变量选出建立线性方程组：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial x_i}{\partial U}\triangle U = \triangle x_i\\&x_i \in \{x_i > \overline{x_i} - \varepsilon, x_i < \underline{x_i} + \varepsilon\}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

(1) 式中，$\triangle U$ 为模型 M2 中的控制变量增量；$X$ 为状态变量。

$\triangle x_i$ 的取值为：

1) 当 $x_i$ 接近上限 $\overline{x_i}$ 时，$\triangle x_i = \overline{x_i} - xi > 0$

2) 当 $x_i$ 接近下限 $\underline{x_i}$ 时，$\triangle x_i = \underline{x_i} - x_i < 0$

利用线性方程组(1) 可解出控制变量的修正量 $\triangle U$，并用以校正已越界的状态变量。

为了对方程组(1) 进一步分析，该式可写为如下矢量形式：

$$A_K^N \triangle U = \triangle X \tag{2}$$

其中 $A_K^N$ 为敏感度阵，即式(1) 中的 $\frac{\partial x_i}{\partial U}$；$A_K^N$ 表示 $A$ 阵为 $K$ 行 $N$ 列，也即线性方程组有 $K$ 个方程，$N$ 个变量。方程个数 $K$ 与 $\varepsilon$ 取值相关，$\varepsilon$ 值越大，方程个数越多。计算表明，一般 $\varepsilon$ 在 10% ～ 20% 为好。式(2) 有以下三种情况：

*a*) $K < N$　这时(2) 为不定方程组，为得一个可解线性方程组，利用敏感度大小，将 $\frac{\partial x_i}{\partial U_j}$ 值小的去掉，相应的 $\triangle u_j$ 上下限不被修正，计算 $N$ 个敏感度和值

$$\begin{cases}N_{si} = \sum_{j=1}^{K} |a_{ji}| & i = 1,2,\cdots,N\\ a_{ji} \in A_K^N\end{cases}$$

取前 $K$ 个 $N_{si}$ 值大者对应变量构成 $K$ 阶 $K$ 元线性方程组(3)，相应的控制变量下标 $i$ 记入集合 $N1$，否则记入集合 $N2$，由(3) 式解得 $\triangle U$，修正控制变量上下限。

$$A_K^K \triangle U = \triangle V \tag{3}$$

对于 $j \in N1$　若 $\triangle uj \geqslant 0$　则 $\overline{\triangle u_j} = \min\{\overline{\triangle u_j}, \triangle u_j]$

$\underline{\triangle u_j} = \underline{\triangle u_j}$

若 $\triangle u_j \leqslant 0$　则 $\overline{\triangle u_j} = \overline{\triangle u_j}$

$\underline{\triangle u_j} = \max[\underline{\triangle u_j}, \triangle u_j]$

对于 $j \in N2$，$\overline{\triangle u_j}$，$\underline{\triangle u_j}$ 不变。

*b*) $K = N$　直接求解方程组(2)，其控制变量修正值参见 *a*) 中 $j \in N1$ 的情况。

c) $K > N$ 这时式(2)是一超定方程组,选取 $N$ 个 $|\triangle Vi|$ 小的,即在线性规划校正中越界可能性较大的组成方程组 $A_X^*\triangle U = \triangle V$,求出 $\triangle X$ 后,按 a) 中 $j \in N1$ 的情况修正控制变量。

## 3 算例

为了验证本文方法的有效性,我们采用文献[2]中6节点系统进行计算,并将结果与文献[2]、[3]进行比较,并对西北某电力系统160节点规划网以及595节点的现行电网进行无功规划和电压最优控制的优化计算,其优化结果分别见表1和表2.

表1 IEEE6节点结果比较表

| 方法 | 有功网损(标么值) | 迭代次数 | 电压越界点数 | 电压越界量(标么值) |
|---|---|---|---|---|
| 文献[2] | 0.891 | 12 | / | / |
| 文献[3] | 0.882 | 5 | 1 | 0.003 |
| 本文 | 0.884 | 3 | / | / |

表2 西北某电网160节点无功规划优化结果

| 项目 | 有功网损率下降(%) | 因网损下降节约电量(GW·h) | 优化迭代次数 | 计算时间(mim) | 电压合格率 | 优化年净效益(亿元) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 西北某电网 | 3.3 | 891 | 3 | 1 | 100 | 0.622 |
| 备注 | 无功单价为50元/Kvar;电价为为0.07元/kW·h;机型为micro-VAX-Ⅱ | | | | | |

## 4 结论

笔者提出的一种无功线性规划模型与安全校正相结合的无功优化方法由于利用了状态变量准起作用约束搜索控制变量优化可行控制域,克服了一般线性模型中的收敛振荡问题,使无功优化具有快速,收敛性好的特点,这种方法适用于一般分段线性优化问题。

## 参考文献


1 Shibimi M A El. Reactive Power Optimization Using Modified Linear Programming Approach. IEEE, 1975, PAS-100(6): 1544~1556

2 Mamendur K R C. Optimal Control of Reactive Power Flow For Improvement in Voltage Profiles and Real Power Loss Minimization. IEEE, 1981, PAS-100(7): 3185~3194

3 赵尤新,徐国禹. 用敏感度方法计算电力系统无功和电压最优控制问题. 重庆大学学报, 1985, 8(4): 1~11

4 吴际舜. 电力系统静态安全分析. 上海:上海交通大学出版社, 1985. 85~106

5 赵尤新. 敏感法无功最优潮流. 重庆大学学报, 1988, 11(4): 45~49