DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.1995.06.003
第 15 卷第 6 期 中 国 电 机 工 程 学 报 Vol. 15 No. 6
1995 年 11 月 Proceedings of the CSEE Nov. 1995

配电网络电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法

邓佑满 张伯明 相年德

（清华大学电机系 北京 100084）

提 要

并联补偿电容器组是配电网络无功优化的重要设备。本文从实时控制的角度研究电容器优化投切的台数问题，推导了其逐次线性整数规划模型，并提出了适合配电网电容器投切特点的对偶松弛解法和逐次归整解法。所得模型简洁，求解过程无振荡现象，收敛快，计算量小，且所得优化整数解不易偏离最优整数解。

关键词：配电系统 优化 线性规划 整数规划

1 引 言

为了适应人们对配电系统的可靠性、安全性和经济性越来越高的要求，八十年代末期兴起了研究配电管理系统(DMS)的热潮。DMS 的一项重要内容就是并联补偿电容器的实时优化投切。目前国内外从规划的角度来确定电容器的最优配置、类型和最大额定容量的文献很多，而从实时运行的角度来研究电容器投切的文献很少[1~4]。文献[1]以电容器的无功注入功率作控制量，构成非线性规划模型，再用可行方向法求解电容器的投运容量，但未考虑电容器台数的整数约束。文献[2]采用恒电流负荷模型，用动态规划法求解电容器的台数。文献[3]根据无功负荷水平确定电容器的多级控制策略，模型粗糙。文献[4]用与输电网相同的方法建立线性规划模型，先不考虑整数约束求出最优解，再用专家系统和混合整数规划(分支定界)法获得整数解。

本文将从配电网实时运行的角度来确定电容器的优化投切问题，因此假定电容器的优化配置已由配电网规划计算所确定，不再变动。另外，根据国内外大多数文献对输配电系统的划分方法，本文中的配电系统是指与高压输电网相连的降压变压器出口到低压配电变压器入口这一段系统。此段内的线路简称馈线。在我国，配电系统的电压等级主要是 10kV。在这样一个辐射状配电网中，变压器分接头调节的降损作用比较有限，因此，本文不考虑其 调节作用。这并不影响本文方法的实用性。

本文于 1994 年 8 月 19 日收到，1995 年元月 25 日改回。国家自然科学基金资助项目(批准号 59477013)

邓佑满 1966 年生，1995 年获清华大学博士学位，电机系讲师，主要从事 EMS 和 DMS 的研究与开发工作。
张伯明 1948 年生，1985 年获清华大学博士学位，电机系教授，博导。
相年德 1930 年生，清华电机系教授，博导。

2 电容器实时优化投切的线性整数规划模型

电容器的实时优化投切问题是一个无功优化问题。以网损最小为目标的电容器投切模型如下：

$$\begin{cases} \text{Obj.} \quad \min \quad f_P(Q) \\ \text{Sub.} \quad V_{\min} \leqslant V \leqslant V_{\max} \\ \qquad\quad Q_{\min} \leqslant Q \leqslant Q_{\max} \\ \qquad\quad Q = K \cdot STP \\ \qquad\quad f(Q) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中 Q 是投运电容器组的额定容量，$f_P(Q)$ 为网络有功损耗，$f(Q)$ 是潮流方程，STP 是单台电容器的容量矢量，K 为非负整数对角矩阵。上述模型是一个非线性整数规划模型，它的目标函数和约束条件都是控制量的非线性函数。这一模型的精确求解是很困难的，一般都采用近似模型来逐步逼近原模型的精确解。

在实时控制中，每次调度的控制量不多，违限约束也较少，所以用线性整数规划算法可以非常有效地求得上述模型的满足工程精度要求的优化解。在配电网中，由于 r/x 相对较大，PQ 分解法效率很低，一般不宜采用。由于 PQ 不能分解，在极坐标下推出的公式就不如在直角坐标下的公式简洁。将复电压矢量以直角坐标形式表示为：

$$\dot{V} = E + jF \tag{2}$$

状态量 E、F 和控制量 Q 有如下的增量方程(详细推导见附录)：

$$\triangle E = \boldsymbol{C}_E \cdot \triangle Q \tag{3}$$

$$\triangle F = \boldsymbol{C}_F \cdot \triangle Q \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{C}_E$ 和 $\boldsymbol{C}_F$ 是 $n \times m$ 阶系数矩阵，n 是馈线中的独立节点数，m 是馈线中装有电容器的节点数。上述两式可以看成是潮流方式 $f(Q)=0$ 的线性化表达式。再将 V 线性化。由

$$V_i^2 = e_i^2 + f_i^2 \tag{5}$$

有

$$\triangle V_i = \left(\frac{e_i}{V_i}\right)\triangle e_i + \left(\frac{f_i}{V_i}\right)\triangle f_i \tag{6}$$

将上式用矢量和矩阵表示

$$\triangle V = \boldsymbol{D}_E \cdot \triangle E + \boldsymbol{D}_F \cdot \triangle F \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{D}_E$ 和 $\boldsymbol{D}_F$ 是 $n \times n$ 阶对角矩阵。将式(3)和(4)代入上式有：

$$\triangle V = (\boldsymbol{D}_E \cdot \boldsymbol{C}_E + \boldsymbol{D}_F \cdot \boldsymbol{C}_F) \cdot \triangle Q \triangleq \boldsymbol{C}_V \cdot \triangle Q \tag{8}$$

$\boldsymbol{C}_V$ 是 $n \times m$ 阶矩阵。上式即是电压 V 的线性化表达式。

网络的有功损耗 f_P 可以表示成状态量 e 和 f 的函数：

$$f_P = \sum_{l=1}^{n} (e_i^2 + f_i^2 + e_j^2 + f_j^2 - 2e_ie_j - 2f_if_j) \cdot g_{ij} \tag{9}$$

其中 i,j 是支路 l 的两端节点，g_{ij} 是支路电导。将 f_P 在某一初始运行点 Q_0 处 Taylor 展开，并忽略二次以上项，有：

$$\triangle f_P \approx \left(\frac{\partial f_P}{\partial Q}\right)^T \cdot \triangle Q \tag{10}$$

令

$$C_P^T = \left(\frac{\partial f_P}{\partial Q}\right)^T = \left(\frac{\partial f_P}{\partial E}\right)^T \frac{\partial E}{\partial Q} + \left(\frac{\partial f_P}{\partial F}\right)^T \frac{\partial F}{\partial Q} = \left(\frac{\partial f_P}{\partial E}\right)^T \boldsymbol{C}_E + \left(\frac{\partial f_P}{\partial F}\right)^T \boldsymbol{C}_F \tag{11}$$

C_P 是个费用矢量，它反映的是控制量的单位增量引起网损的改变量。

综上所述，可以用如下的线性整数规划模型来近似模型(1)。

$$\left.\begin{array}{ll}\text{Obj.} & \min \quad C_P^T \cdot \triangle Q \\ \text{Sub.} & \triangle Q_{\min} \leqslant \triangle Q \leqslant \triangle Q_{\max} \\ & \triangle V_{\min} \leqslant C_V \cdot \triangle Q \leqslant \triangle V_{\max}\end{array}\right\} \tag{12a}$$

$$\triangle Q = \boldsymbol{K} \cdot STP \tag{12b}$$

$$\left.\begin{array}{l}\triangle E = C_E \cdot \triangle Q \\ \triangle F = C_F \cdot \triangle Q\end{array}\right\} \tag{12c}$$

其中 $\boldsymbol{K}$ 是整数对角矩阵，Q 和 V 的限值增量可用下述公式求取

$$\begin{cases}\triangle Q_{\min} = \max(Q_{\min} - Q, -\text{step}) \\ \triangle Q_{\max} = \min(Q_{\max} - Q, \text{step})\end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases}\triangle V_{\min} = V_{\min} - V \\ \triangle V_{\max} = V_{\max} - V\end{cases} \tag{14}$$

step 是为保证线性化精度而给定的一次线性化所允许的最大调节步长。

模型(1)的精确解可以应用逐次线性整数规划解法求解模型(12)来获得，其过程如下：先由式(12a)和(12b)确定一个$\triangle Q$，将$\triangle Q$ 代入式(12c)求出$\triangle E$ 和$\triangle F$，修正 E，F 和 V，再修正 C_E，C_F，C_V 和 C_P，相应调整 Q 和 V 的限值增量，重新求解$\triangle Q$。如此循环迭代，直至满足最优性条件，算法收敛为止。因此，现在的关键问题是如何求出单次线性整数规划问题(12a)和(12b)的解。

3　线性整数规划模型的解法

在模型(12a)中，控制量$\triangle Q$ 为 m 维，不等式约束数为 $2(n+m)$个。由于总有 $n \geqslant m$，所以约束条件的个数远大于控制量的维数，非常适合采用对偶松弛法来求解。对于求得的$\triangle Q$ 应用适当的整数规划方法，以使$\triangle Q$ 满足条件(12b)。

3.1　对偶松弛法

对偶松弛法[5,6]特别适合于处理双边不等式约束。其主要计算包括：

①从不等式约束中选取 m 行构成基底矩阵 $\boldsymbol{B}$；

②计算 Lagrange 乘子 λ，$\lambda = \boldsymbol{B}^{-T} C_P$；

③由 λ 的值确定基本方程的右端项[7]：

$$\begin{cases}\text{若 } \lambda_i > 0, & b_i = \max\{-\alpha\lambda_i, b_{i\min}\} \\ \text{若 } \lambda_i < 0, & b_i = \min\{-\alpha\lambda_i, b_{i\max}\}\end{cases}$$

其中 α 是搜索步长，$-\lambda$ 是目标函数的最速下降方向。给 b 赋值后，求解方程$\triangle Q = B^{-1} b$。

④不等式约束检查及换基操作，直至获得最优解或无解。

详细计算步骤可参见文献[5,6]，本文结合配电网络电容器实时优化投切的特点就上述 4 项内容以及整数解的求取问题作一些深入的研究。

3.2　基底矩阵 B 的选择

从实际运行经验及潮流计算得知：辐射网容易出现同一分支上各节点电压同时越下限或上限的情况，也就是说同一分支上各节点电压存在较强的相关性。因此，如果把同一分支上的所有电压越限约束都确定为起作用不等式约束，构成的 B 矩阵奇异或接近奇异，求解含 B^{-1}的方程无解或者迭代过程严重振荡。有鉴于此，在选择起作用不等式约束构成 $\boldsymbol{B}$ 阵的时候，若有电压越限，则最多

只选择两个不同类型的电压越限约束，其它起作用约束都是控制量限值约束。一般来说，在相关性较强的两个节点上不可能出现不同方向上的电压越界。因此，上述方法可以保证 $\boldsymbol{B}$ 阵非奇异。

起作用不等式约束集确定后，将对应电压约束的 m_2 个系数行向量放在 $\boldsymbol{B}$ 阵的最后 m_2 行，对应控制量限值约束的系数行向量置于 $\boldsymbol{B}$ 阵的前 m_1 行，$m_1=m-m_2$。将达界的控制量称为非基变量 $\triangle Q_N$（m_1 维），其它控制量称为基变量 $\triangle Q_B$（m_2 维），$\boldsymbol{B}$ 阵可以写成

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{B}_N & \boldsymbol{B}_B\end{bmatrix}_{m\times m} \tag{15}$$

其中 $\boldsymbol{I}$ 是 $m_1\times m_1$ 阶单位阵，O 是 $m_1\times m_2$ 阶零矩阵，$\boldsymbol{B}_N$ 是对应 $\triangle Q_N$ 的 $m_2\times m_1$ 阶矩阵，$\boldsymbol{B}_B$ 是对应 $\triangle Q_B$ 的 $m_2\times m_2$ 阶矩阵。

3.3 λ 及△Q 的求取

$\boldsymbol{B}^T\cdot\lambda=C_P$ 可以写成分块形式：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{B}_N^T\\ \boldsymbol{O}^T & \boldsymbol{B}_B^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\lambda_N\\ \lambda_B\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{PN}\\ C_{PB}\end{bmatrix} \tag{16}$$

则

$$\boldsymbol{B}_B^T\cdot\lambda_B=C_{PB} \tag{17}$$

$$\lambda_N=C_{PN}-\boldsymbol{B}_N^T\cdot\lambda_B \tag{18}$$

由式(17)前代回代求出 λ_B，再代入式(18)求出 λ_N 就得到了 Lagrange 乘子 λ。再有：

$$\boldsymbol{B}\cdot\triangle Q=b \tag{19}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{B}_N & \boldsymbol{B}_B\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\triangle Q_N\\ \triangle Q_B\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_N\\ b_B\end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\triangle Q_N=b_N \tag{21}$$

$$\boldsymbol{B}_B\cdot\triangle Q_B=b_B-\boldsymbol{B}_N\triangle Q_N \tag{22}$$

由式(21)和(22)可以方便地求出 $\triangle Q$。由上述公式看到，λ 和 $\triangle Q$ 的求取，主要是 λ_B 和 $\triangle Q_B$ 的求取。而由 $\boldsymbol{B}$ 阵特性可知，$\boldsymbol{B}_B$ 是个 0～2 阶的矩阵，2 阶以下线性方程组的求取是极为简单的。

3.4 换基操作

求得 $\triangle Q$ 以后，要把 $\triangle Q$ 代入被松弛了的不等式约束中，检查是否有越限存在。若有，则要进行换基操作。越限有两种类型：一种是基变量越限，另一种是电压越限。

若是基变量越限，那么说明在现有非基变量取值下，无力校正起作用的电压约束越限。因此，首先应该选越限最严重的基变量约束作为换入约束，基变量变为非基变量，再从起作用约束集中选出一合格的换出约束。这一换出约束可能是非基变量约束，也可能是电压约束。若为电压约束，那么要减少一个基变量，增加一个非基变量。若为非基变量约束，那么只是基与非基变量的互换。

若无基变量越限，那么现有的起作用电压约束都得以满足。此时将 $\triangle Q$ 归整。修正电压 V、e、f，检查是否有电压越限存在。若存在，则选越限最严重的电压越限作为换入约束，而从起作用约束集中选出一合格的换出约束。同样，基与非基变量的个数可能发生变化。

上述换基方式与众不同，首先在确定换入约束时对不同的越限区别对待；其次基与非基变量的个数在换基前后可能有变化。基变量优先换入是为了优先满足起作用电压约束。不起作用的电压约束越限，可能原本就存在，一般来讲，它会随着起作用电压约束的满足而有所缓解或满足，在起作用电压约束满足之前可以先不考虑。基变量的个数与起作用电压约束的个数相等，随电压约束的换入换出而变化。

确定换入换出约束后,可用修正算法修正 $\boldsymbol{B}_B$ 和 $\boldsymbol{B}_N$ 阵以及 b 矢量。但不必采用稀疏技术,因为 $\boldsymbol{B}_B$ 和 $\boldsymbol{B}_N$ 是低阶满阵。

3.5 校正能力检查

本文算法中增加了校正能力检查功能,其目的是为了尽早判断有无可行解,减少换基操作次数,缩短计算时间。若有电压约束进入起作用约束集,那么就要检查在满足式(12a)中$\triangle Q$限值约束的情况下,投切电容器能否校正这些电压越限。可分两种情况来考虑:

①若　$V_i > V_{i\max}$,　则置$\triangle Q_j = \triangle Q_{j\min}$;

②若　$V_i < V_{i\min}$,　则置$\triangle Q_j = \triangle Q_{j\max}$;

其中电容器 j 与节点 i 相关。尝试能否清除电压越限。若不能,则以$\triangle Q$ 投切电容器,修正 V、e、f 以及$\triangle Q_{\min}$和$\triangle Q_{\max}$,重新检查校正能力,直至出现下列情况之一时为止:①有能力校正越限,返回成功标志;②当所有相关电容器都达上、下界还不能消除电压越下、上限,返回无校正能力标志,此时系统无可行解,需作约束松弛处理。

3.6 逐次归整法

在求解有整数约束的规划问题时,大都采用先求得系统的最优浮点解再归整的方案。这就可能使最优浮点解与最优整数解相差甚远。此时要么归整计算量大,要么得到次优整数解。

本文提出的方案是在每一步线性逼近过程中都保持解是整数。由于本文算法有诸多独特之处,实现这一方案与获得浮点解相比只增加很少的一点计算量,却克服了上述常规方案的缺点。

我们先假定 Q 的初值及其上下限值都满足整数约束。因此,若每次线性逼近时$\triangle Q$ 都满足整数约束,那么最终的优化控制量 Q 一定满足整数约束。$\triangle Q$ 分为$\triangle Q_N$ 和$\triangle Q_B$ 两部分,迭代时,$\triangle Q_N$ 的值是根据相应乘子 λ 的值而定的,在给它赋值时就可使其满足整数约束。因此,现在的关键是使$\triangle Q_B$ 满足整数约束。

前已述及,本文算法可以保证$\triangle Q_B$ 的维数在 0～2 之间。因此,可以用简单实用的凑紧法在满足不等式约束的情况下获得$\triangle Q_B$ 的整数解,归整计算量是很少的。归整过程如下:

设式(21)中的$\triangle Q_N$ 已满足整数约束条件,在$\triangle Q_B$ 的归整过程中保持不变。式(22)可重写为:

$$\boldsymbol{B}_B \triangle Q_B = \bar{b}_B \tag{23}$$

其中 $\bar{b}_B$ 是常数矢量,$\boldsymbol{B}_B$ 是 0～2 阶的小矩阵。可分三种情况讨论:

(1) $\boldsymbol{B}_B$ 为零阶,$\triangle Q = \triangle Q_N$,此时不用考虑$\triangle Q_B$ 的归整问题。

(2) $\boldsymbol{B}_B$ 为一阶,式(23)是一元一次方程。为使$\triangle Q_B$ 满足整数约束,对求得的浮点解要上靠或下靠一档,同时松弛 $\bar{b}_B$。究竟是上靠还是下靠,要视电压约束的情况而定。若上靠和下靠都能使电压约束得到满足,则进一步视 λ 乘子的符号而定:若 $\lambda > 0$,则降低$\triangle Q_B$ 更经济,宜下靠;反之,上靠。

(3) $\boldsymbol{B}_B$ 为二阶,式(23)为二元二次方程。两个变量各上、下归靠一档,以满足整数约束,共有 4 种取值组合。对于每种取值组合,检查其是否满足电压不等式约束,从而挑出合格的取值组合。从合格的取值组合中选出使 $C_{PB}^T \cdot \triangle Q_B$ 最小的$\triangle Q_B$ 作为优化整数解。

归整过程被纳入逐次线性化过程中,某次归整若非最优,可以被后续的线性化逼近过程所校正。因为每次迭代中都要计算 C_V 矩阵和 C_P 矢量,并修正目标函数的最速下降方向$-\lambda$,每次解的搜索方向基本上是最速下降方向。因此,单次归整质量的高低对最终的优化整数解不会有太大的影响,正因如此,我们认为逐次归整法会比一次性归整法获得更优的整数解。

4 算法实现及算例分析

本文根据上述算法用 C 语言编制了电容器实时优化投切的程序,其简略框图如图 1 所示。本

文利用该程序对文献[7]中的4个配电网络进行了优化计算,优化概况如表1所示。

表1　电容器投切计算概况

Table 1　Overview of capacitor switching calculations

系统	有功损耗(kW)		损耗下降(kW)	下降百分量(%)	无功补偿度(%)		最低电压(p.u.)		迭代次数	CPU时间(s)
	投切前	投切后			投切前	投切后	投切前	投切后		
A	514.0	495.3	18.7	3.6	63.6	82.4	0.968	0.971	8/9/4	0.025
C^A	697.8	696.4	1.4	0.2	71.2	72.9	0.865	0.865	3	0.017
C^B	697.8	696.6	1.2	0.2	71.2	152.6	0.865	0.900	4	0.020
D	1170.4	1028.7	141.7	12.1	20.7	85.1	0.937	0.956	2/3/6 9/4/1	0.053
E'	225.0	148.3	76.7	34.1	0.0	57.3	0.909	0.930	6	0.073
E	152.8	148.2	4.6	3.0	44.3	56.2	0.926	0.930	8	0.096

上表中,迭代次数栏中的"8/9/4"依次指网络中的三条馈线优化计算的线性逼近次数。C^A和C^B是系统C的两个算例。C^A中电压下限给定为0.8p.u.,相当于是无约束优化问题。C^B中电压下限定为0.9p.u.,为满足电压约束,不得不对系统进行过补偿。C^A和C^B的迭代过程如图2和图3所示。图3表明,由于C^B的初始最低电压越下限较多,计算时先作电压校正,Q_1、Q_5和Q_6的容量由初值300、800和2200kvar分别调到810、1320和3240kvar;然后才作迭代计算。表1中的E'和E是系统E的两个算例,其差别仅在于E'的电容器容量初值为零而E非零。可以看出,E'和E的目标函数(网损)非常接近。E'和E的迭代过程如图4和图5所示。图2~5表明,本文算法在求解过程中无振荡现象,收敛速度快。

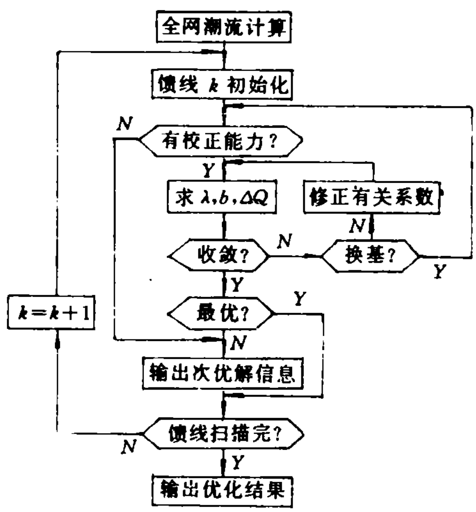

图1　电容器实时优化投切简略框图

Fig.1　Brief block diagram of capacitor switching calculation

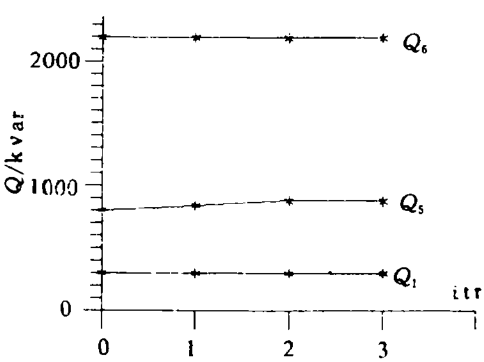

图2　C^A的迭代过程

Fig.2　Iteration procedure of C^A

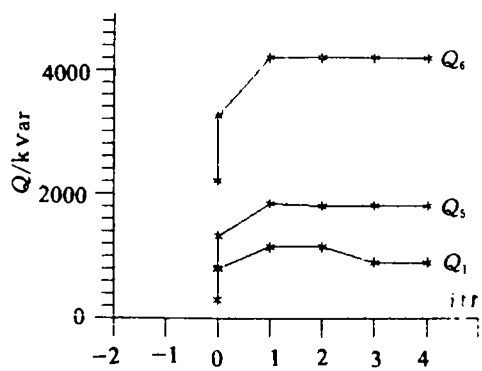

图3　C^B的迭代过程

Fig.3　Iteration procedure of C^B

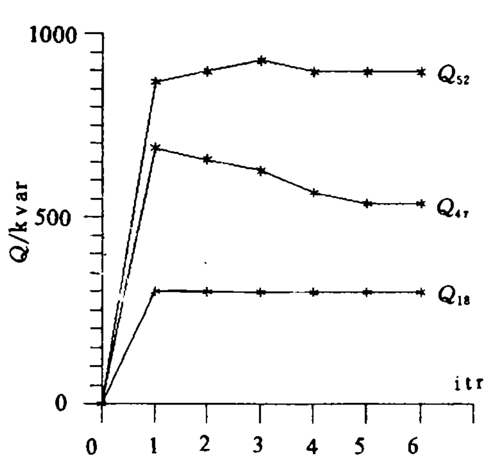

图 4　E'的迭代过程

Fig. 4　Iteration procedure of E'

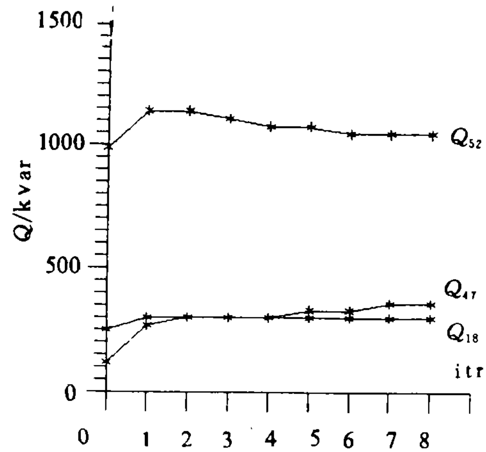

图 5　E 的迭代过程

Fig. 5　Iteration procedure of E

5　结论

本文旨在研究配电网中电容器的实时优化投切问题，构造了其逐次线性整数规划模型及其解法。总结全文，可以得出如下结论：

（1）本文所构造的模型简洁，容易编程。

（2）本文充分利用了辐射状配电网络的特性，并将其用于模型和算法中，避免了求解过程中的振荡现象，大大节省了计算量，提高了算法的收敛性和鲁棒性。

（3）用逐次线性规划类算法速度快，在实时环境中能获得满足工程精度要求的最优解。

（4）用逐次归整法降低了归整计算量，所得整数解不易偏离最优整数解。

6　参　考　文　献

1　Baran Mesut E and Wu Felix F. Optimal Sizing of Capacitors Placed on A Radial Distribution System. IEEE Trans. on Power Delivery，1989，4(1)：735～743

2　Hsu Y Y，Kuo H C. Dispatch of Capacitors on Distribution System Using Dynamic Programming. IEE Proce. of Part C，1993，140(6)：433～438

3　Grainger J J，Lee S H，El-Kib A A. Design of a Real-time Switching Control Scheme for Capacitive Compensation of Distribution Feeders. IEEE Trans. on PAS，1982，101(8)：2420～2428

4　Fan Mingtian，Zhang Zuping，Lin Chin E. Discrete Var Optimization in a Distribution System Using Mixed-Integer Programming with an Expert System，Electric Power System Research，1993，27：191～201

5　郑熙明，于尔铿. 电力系统线性规划的稀疏与优化技术. 中国电机工程学报，1986，6(1)：67～71

6　严正. 最优潮流新算法的研究——交叉逼近法的理论与实践，[博士学位论文]，北京：清华大学电机系，1991 年

7　邓佑满. 配电网络优化的理论与算法.［博士学位论文］，北京：清华大学电机系，1994 年

附录　C_E 与 C_F 的求法

辐射状配电网中常以馈作为作计算单位。设馈线根节点电压恒定，作参考节点，馈线中的独立节点数为 n，电容器组数为 m。额定容量为 Q_i，电压为 V_i(p. u.)下的无功为 Q_{V_i}的电容器 i，其电容电流 I_{ci}为：

$$\dot{I}_{ci} = (jQ_{V_i})^* / \dot{V}_i = (jV_i^2 \cdot Q_i)^* / \dot{V}_i = -j\dot{V}_i \cdot Q_i \tag{A1}$$

复电压 $\dot V$ 对 Q 的偏导数为：

$$\frac{\partial\dot V}{\partial Q}=\frac{\partial\dot V}{\partial\dot I}\cdot\frac{\partial\dot I}{\partial Q}\approx\frac{\partial\dot V}{\partial\dot I_c}\cdot\frac{\partial\dot I_c}{\partial Q}=(R_C+jX_C)\cdot\left(-j\dot V_D-jQ_D\cdot\frac{\partial\dot V_C}{\partial Q}\right) \quad (A2)$$

上述线性化过程忽略了负荷电流随 Q 的变化。式($A2$)中的 $\partial\dot V/\partial Q$ 包含了 $\partial\dot V_C/\partial Q$ 的所有元素，理论上要用迭代法求解。考虑到在配电网中，一般有 $\|Q_D\cdot\frac{\partial\dot V_C}{\partial Q}\|\ll\|\dot V_D\|\approx 1$，所以先忽略 $Q_D\cdot\partial\dot V_C/\partial Q$ 项，求得 $\partial\dot V/\partial Q$ 的很好的初值，再取出其相应元素构成 $\partial\dot V_C/\partial Q$ 代入式($A2$)，求出 $\partial\dot V/\partial Q$。实验证明，经过一次这样的迭代，已经具有足够好的精度。令：

$$\dot V_D=E_D+jF_D \quad (A3)$$

先求 $\partial\dot V/\partial Q$ 的初值：

$$\left.\frac{\partial\dot V}{\partial Q}\right|_0=(R_C+jX_C)\cdot(F_D-jE_D)$$

$$\left.\left(\frac{\partial E}{\partial Q}+j\frac{\partial F}{\partial Q}\right)\right|_0=R_CF_D+X_CE_D+j(X_CF_D-R_CE_D)$$

即：

$$\left.\frac{\partial E}{\partial Q}\right|_0=R_CF_D+X_CE_D\triangleq C_{E0} \quad (A4)$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial Q}\right|_0=X_CF_D-R_CE_D\triangleq C_{F0} \quad (A5)$$

从 C_{E0}和 C_{F0}中划去无电容器对应的行得到 C_{E0C}和 C_{F0C}，则 $\partial\dot V_C/\partial Q=C_{E0C}+jC_{F0C}$，代入式($A2$)，有：

$$\frac{\partial\dot V}{\partial Q}=\frac{\partial E}{\partial Q}+j\frac{\partial F}{\partial Q}\approx C_{E0}+jC_{F0}-j(R_C+jX_C)\cdot Q_D\cdot(C_{E0C}+jC_{F0C})$$

即：

$$\frac{\partial E}{\partial Q}=X_C(Q_DC_{E0C}+E_D)+R_C(Q_DC_{F0C}+F_D)\triangleq C_E \quad (A6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial Q}=X_C(Q_DC_{F0C}+F_D)-R_C(Q_DC_{E0C}+E_D)\triangleq C_F \quad (A7)$$

其中的 R_C 和 X_C 在配电网中是不难得到的。以馈线为优化单位，从馈线根节点出发进行一次深度优先搜索 DFS，按 DFS 的逆序给节点重新编号。此时写出的节点阻抗阵 $Z(=R+jX)$有如下规律：

$Z_{ii}=i$ 节点与根节点之间的支路阻抗和；

$Z_{ik}=$节点 i 与 k 到根节点的共同支路阻抗和。

因此，R_C 和 X_C 可以直接写出，计算量几乎可以忽略不计。求取 C_E 和 C_F 的公式($A6$)和($A7$)具有简洁，易求的优点。

A Successive Linear Integer Programming Methodology for Capacitor Switching on Distribution Systems

Deng Youman *Zhang Boming* *Xiang Niande*

(Tsinghua University 100084 Beijing China)

Abstract

A Successive Linear Integer Programming (SLIP) methodology for capacitor switching on distribution systems is presented in this paper. Capacitor switching is formulated by a SLIP model. The whole capacitor switching problem is dealt with as a series of subproblems of linear integer programming. Dual relaxation method is used to solve each relevant linear programming subproblem. To prevent the solving process from oscillation, some special techniques are adopted. Integralization is carried out in each subproblem to deal with integer constraints and finally to find out an optimal integer solution. Digital tests are carried out and results show that the proposed algorithm is practical and efficient for distribution systems loss minimization and can be used to optimize real distribution system operation.

Key Words: distribution automation　optimization　linear programming　integer programming

电机及其应用国际会议
征 文 通 知

由哈尔滨电工学院和俄罗斯科学院电力基础研究所组织的电机及其应用国际会议(ICEMA'96),订于1996年9月1～3日在哈尔滨召开,其主题为:

1) 理论与分析;
2) 电机控制与应用;
3) 电机性能;
4) 新型和特种电机的设计和应用;
5) 测试、监察、诊断和维护;
6) 改善电机性能的新材料。

会议语言英语

文摘截止日期:1995年11月30日;全文截止日期:1996年4月30日。

详情可与会议秘书处联系,设在哈尔滨电工学院[150040]。