含 UPFC 电力系统的潮流计算研究*

陈淮金　白　中
（河海大学电力系 · 210024 · 南京）

【摘　要】 提出一种含UPFC电力系统潮流计算的有效方法，该方法中的雅可比矩阵与传统的PQ分解法中的对应矩阵完全相同，此外，还给出一种网络中任一支路潮流可控范围的快速估算方法。

【关键词】 潮流　统一潮流控制器　线路潮流可控域

1　前言

在不含移相器的传统交流输电系统中，网络中各支路潮流服从简单的欧姆定律，与线路阻抗成反比分布，在各节点注入功率确定以后，潮流分布也随之确定。要想改变潮流分布，仅有的手段是改变负荷大小或调整各电源的负荷分配关系。

近年来电力电子技术的发展，各种各样的FACTS（灵活交流输电系统）元件的出现，正在使这一局面得以迅速的改观。利用可控硅控制的串联补偿（TCSC）、可控硅控制的移相器（TCPS）、统一潮流控制器（UPFC）等网络控制元件，使得对网络潮流分布进行方便、快速的控制成为可能。

在各种FACTS元件中，UPFC由于集串并联补偿、移相等功能为一体，正日益受到人们的普遍重视。系统包含UPFC以后，在进行潮流计算时需要对传统的潮流计算方法，如牛一拉法、PQ分解法进行修正，由于UPFC出现历史较短，这方面的文献还很少见。UPFC与电力网络的连接方式与移相器类似，因此在进行包含UPFC电力网络的潮流计算时，可以借鉴含移相器时的潮流计算方法[1]。其基本思路是将移相器中与线路串联的电压源等效为与线路并联的电流源，然后将此电流源转化为线路两端节点的注入功率，从而得出潮流的基本方程。该方法存在的问题是不能考虑移相器所在线路的对地电纳，在网络电压等级较高时，会产生较大的误差。

本文给出了一种含UPFC时网络潮流的计算方法，该方法可完整地计及UPFC所在线路的对地电纳，由于所采用的雅可比矩阵同无UPFC时的常规PQ分解法完全相同，不必反复进行三角分解，因而计算速度非常接近于不含UPFC时的常规PQ分解法。

系统包含UPFC以后，网络中任一线路有功、无功的可控范围，也是人们所关心的问题。本文对这一问题进行了探讨，提出了一种任一线路有功、无功可控域的快速估计方法，并与精确的非线性寻优方法进行了对比，证明该方法是行之有效的。

2　UPFC 模型

UPFC由2个换流器、直流连接线以及并联电容组成，如图1所示。由于采用了可关断可控硅技术，使换流器1、换流器2的输出电压可单独控制。

---

*　1995－10－17收稿；国家攀登计划B资助课题。

陈淮金，男，1954年生，博士，副教授，从事电力系统分析、电力系统控制的研究。
白　中，男，1971年生，硕士研究生。

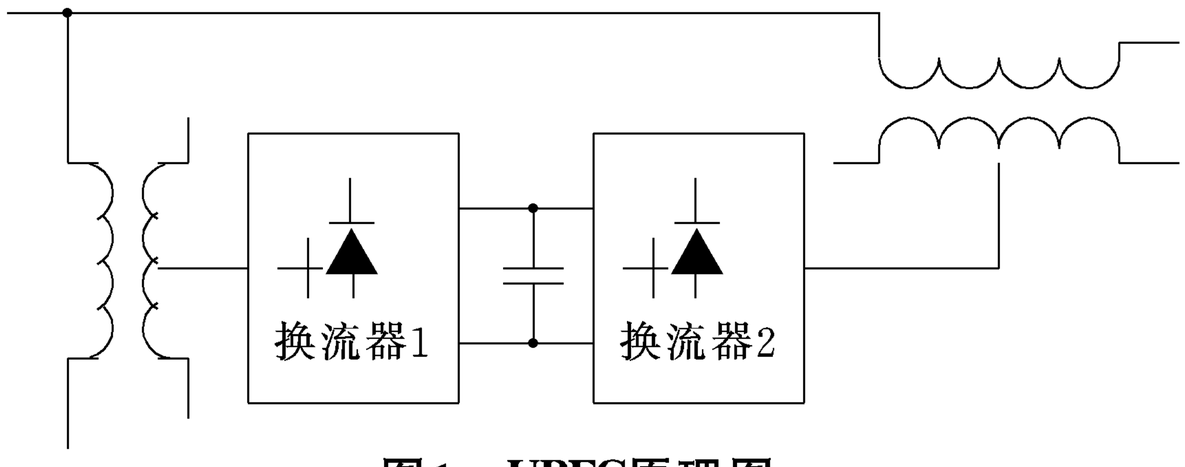

图1 UPFC原理图
Fig. 1 Circuit diagram of a UPFC

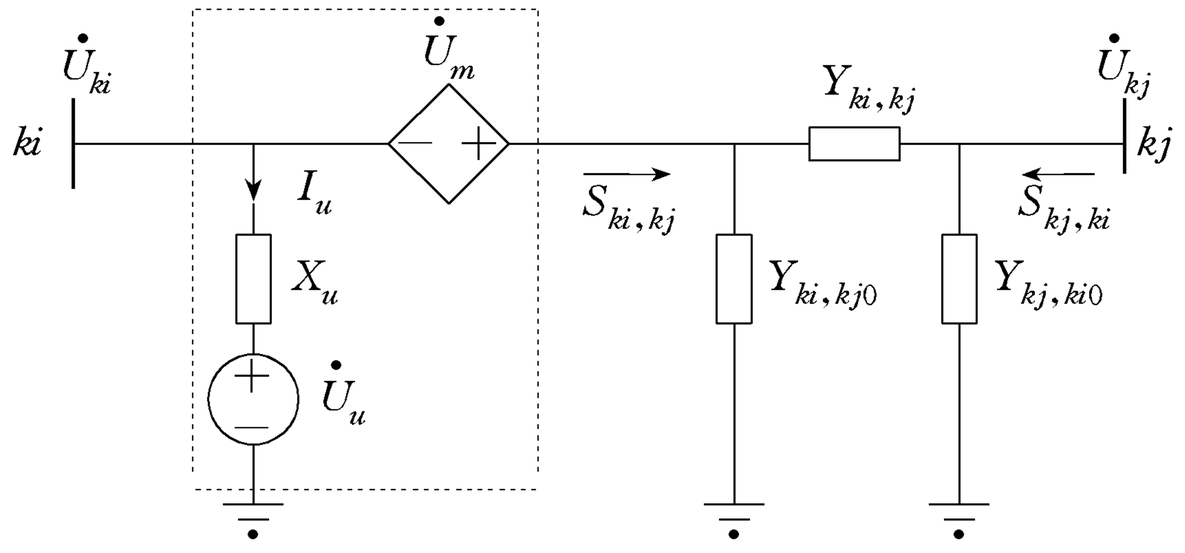

图2 UPFC的等效电路图
Fig. 2 One line diagram of UPFC

当UPFC装设于节点 ki 处、线路 $ki\ kj$ 上时，其等效电路如图2虚框内所示，换流器2对应于电压源 $\dot{U}_m$，换流器1对应于电压源 $\dot{U}_u$。

设换流器1到节点 ki 的电抗为 X_u，电压源 $\dot{U}_m$ 中流过的电流为 $\dot{I}_{ki,kj}$，$\dot{U}_{ki}$ 超前于 $\dot{U}_u$ 角 α_1，$\dot{U}_m$ 和 $\dot{I}_{ki,kj}$ 的夹角为 α_2，则换流器1所吸收的复功率为：

$$\dot{U}_{ki}\,\bar{\dot{I}}_u = \dot{U}_{ki}\,\overline{(\dot{U}_{ki}-\dot{U}_u)/\mathrm{j}X_u} = -\,\mathrm{j}(U_{ki}U_u\cos\alpha_1 - U_{ki}^2)/X_u + U_uU_{ki}\sin\alpha_1/X_u \tag{1}$$

由(1)式，UPFC向节点 ki 注入的无功功率为

$$Q_m = (U_{ki}U_u\cos\alpha_1 - U_{ki}^2)/X_u \tag{2}$$

将UPFC看成一无损耗元件，有：

$$U_m I_{ki,kj}\cos\alpha_2 = U_uU_{ki}\sin\alpha_1/X_u \tag{3}$$

由于换流器1所吸收的有功功率在UPFC内部转换，当把UPFC出口的传输功率 $S_{ki,kj}$ 作为节点 ki 在线路 $ki\ kj$ 上的传输功率时，UPFC的等效电路可以简化为图3中虚框内部分。

图中各量服从以下约束条件：

$$\left.\begin{aligned} &-Q_{\max} \leqslant Q_m \leqslant Q_{\max} \\ &0 \leqslant |\dot{U}_m| \leqslant U_{\max} \\ &0 \leqslant \theta_m < 2\pi \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

上式可简记为

$$C \in \Omega \tag{5}$$

其中 C 为控制变量 $\dot{U}_m$、Q_m；θ_m 为 $\dot{U}_m$ 与 $\dot{U}_{ki}$ 的夹角。

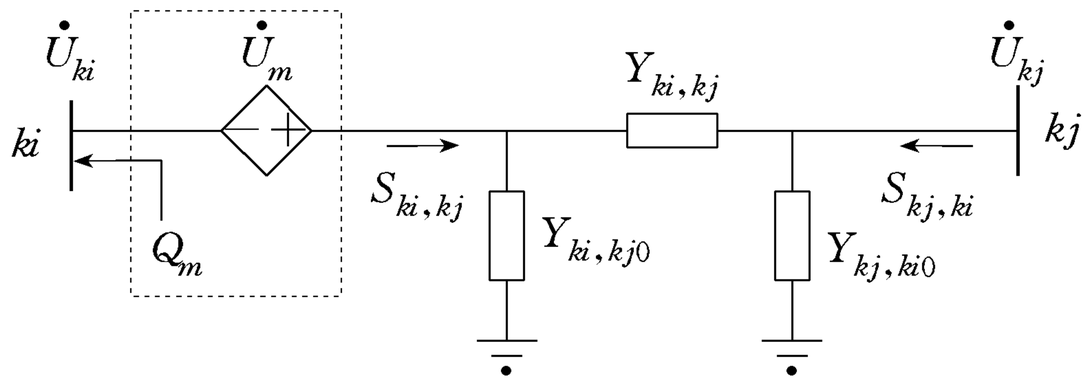

图3 UPFC的等效电路图
Fig. 3 One line diagram of UPFC

3 包括UPFC时的潮流计算

如图3所示，由于UPFC的装入使得节点 ki 的注入无功发生了变化。按照 Q_m 的不同调节方式，节点 ki 可以作如下处理：

第1种情况：Q_m 恒定，则节点 ki 仍为一 PQ 节点，有：

$$Q_{ki} = Q_{ki0} + Q_m \tag{6}$$

其中 Q_{ki0} 是未装UPFC时节点 ki 的注入无功功率。

第2种情况：Q_m 变化，以保证 U_{ki} 维持在给定值上，此时节点 ki 已由一 PQ 节点转变为一 PV 节点。

以平衡节点电压为参考轴，第 i 台UPFC中的 $\dot{U}_{mi}$ 可按下式分解：

$$\dot{U}_{mi} = U_{mxi}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{ki}} + \mathrm{j}U_{myi}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{ki}} \tag{7}$$

其中 θ_{ki} 为 $\dot{U}_{ki}$ 的幅角。

$$\left.\begin{aligned} U_{mxi} &= U_{mi}\cos\theta_{mi} \\ U_{myi} &= U_{mi}\sin\theta_{mi} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

线路 i、j 上不含UPFC时，

$$S_{i,j} = \dot{U}_i\,\overline{(\dot{U}_i - \dot{U}_j)\,(-G_{i,j} - \mathrm{j}B_{i,j})} - \mathrm{j}U_i^2\,Y_{i,j0} \triangleq P_{i,j} + \mathrm{j}Q_{i,j} \tag{9}$$

当线路 ki kj 上含 UPFC 时，以　　$\dot{U}_{ki}' = \dot{U}_{ki} + \dot{U}_{mi}$　　(10)

替代 $\dot{U}_{ki}$ 即可求得该线路的传输功率：

$$S_{ki,kj} = (\dot{U}_{ki} + \dot{U}_{mi})\ \overline{(\dot{U}_{ki} + \dot{U}_{mi} - \dot{U}_{kj})(-G_{ki,kj} - \mathrm{j}B_{ki,kj})} - \mathrm{j}|\dot{U}_{ki} + \dot{U}_{mi}|^2 Y_{ki,kj0}$$

$$\triangleq P_{ki,kj} + \mathrm{j}Q_{ki,kj} \tag{11}$$

$$S_{kj,ki} = \dot{U}_{kj}\ \overline{(\dot{U}_{kj} - \dot{U}_{ki} - \dot{U}_{mi})\ (-G_{kj,ki} - \mathrm{j}B_{kj,ki})} - \mathrm{j}|\dot{U}_{kj}|^2\, Y_{kj,ki0}$$

$$\triangleq P_{kj,ki} + \mathrm{j}Q_{kj,ki} \tag{12}$$

其中　$G_{i,j}$、$B_{i,j}$ 为互导纳，各节点功率为：　$P_i = \sum_j P_{i,j}$　(13)

$$Q_i = \sum_j Q_{i,j} \tag{14}$$

将(9)、(11)、(12)式代入(13)、(14)式后，展开式如下：

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j(G_{i,j}\cos\theta_{i,j} + B_{i,j}\sin\theta_{i,j}) \tag{15}$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j(G_{i,j}\sin\theta_{i,j} + B_{i,j}\cos\theta_{i,j}) \tag{16}$$

$$\begin{aligned} P_{ki} =& U_{ki}\sum_{j=1}^{n} U_j(G_{ki,j}\cos\theta_{ki,j} + B_{ki,j}\sin\theta_{ki,j}) \\ &- (2U_{mxi}U_{ki} + U_{mxi}^2 + U_{myi}^2 - U_{mxi}U_{kj}\cos\theta_{ki,kj} + U_{myi}U_{kj}\sin\theta_{ki,kj})G_{ki,kj} \\ &+ (U_{mxi}U_{kj}\sin\theta_{ki,kj} + U_{myi}U_{kj}\cos\theta_{ki,kj})B_{ki,kj} + (2U_{mxi}U_{ki} + U_{mxi}^2 + U_{myi}^2)G_{ki,kj0} \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} Q_{ki} =& U_{ki}\sum_{j=1}^{n} U_j(G_{ki,j}\sin\theta_{ki,j} - B_{ki,j}\cos\theta_{ki,j}) \\ &- (2U_{mxi}U_{ki} + U_{mxi}^2 + U_{myi}^2 - U_{mxi}U_{kj}\cos\theta_{ki,kj} + U_{myi}U_{kj}\sin\theta_{ki,kj})(-B_{ki,kj}) \\ &+ (U_{mxi}U_{kj}\sin\theta_{ki,kj} + U_{myi}U_{kj}\cos\theta_{ki,kj})G_{ki,kj} \\ &+ (2U_{mxi}U_{ki} + U_{mxi}^2 + U_{myi}^2)(-B_{ki,kj0}) \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} P_{kj} =& U_{kj}\sum_{j=1}^{n} U_j(G_{kj,j}\cos\theta_{kj,j} + B_{kj,j}\sin\theta_{kj,j}) \\ &+ U_{kj}[(U_{mxi}\cos\theta_{kj,ki} + U_{myi}\sin\theta_{kj,ki})G_{kj,ki} - (U_{myi}\cos\theta_{kj,ki} - U_{mxi}\sin\theta_{kj,ki})B_{kj,ki}] \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} Q_{kj} =& U_{kj}\sum_{j=1}^{n} U_j(G_{kj,j}\sin\theta_{kj,j} - B_{kj,j}\cos\theta_{kj,j}) \\ &- U_{kj}[(U_{mxi}\cos\theta_{kj,ki} + U_{myi}\sin\theta_{kj,ki})B_{kj,ki} + (U_{myi}\cos\theta_{kj,ki} - U_{mxi}\sin\theta_{kj,ki})G_{kj,ki}] \end{aligned} \tag{20}$$

其中　$Y_{ki,kj0} = G_{ki,kj0} + \mathrm{j}B_{ki,kj0}$　(21)

(15) ～ (20) 式可简记为：　$P = P_f(X, C, D)$　(22)

$$Q = Q_f(X, C, D) \tag{23}$$

其中　X 为状态变量，如：非平衡节点电压的幅角，PQ 节点电压的幅值；C 为控制变量，如 U_m、θ_m、Q_m；D 为系统中的常量，如平衡节点电压的幅值与幅角，PV 节点电压的幅值。

将(22)、(23)式线性展开，可以得到：

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}H & N\\ J & L\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta U\end{bmatrix} \tag{24}$$

其中　$\begin{bmatrix}H & N\\ J & L\end{bmatrix}$ 为雅可比矩阵。

对(24)式进行以下化简：

(1) 由于$|U_{mi}|$较$|U_{ki}|$小得多，略去雅可比矩阵中各U_{mxi}、U_{myi}。此时的雅可比矩阵与牛顿—拉夫逊法中的雅可比矩阵完全相同。

(2) 在化简(1)的基础上，等同于从牛顿—拉夫逊法到PQ分解法的化简，再令$N=0$，$J=0$，$H=B_1$，$L=B_2$。

通过以上化简，式(24)成为：

$$\begin{cases} \Delta P = B_1 \Delta\theta \\ \Delta Q = B_2 \Delta U \end{cases} \tag{25}$$

式中 B_1、B_2矩阵与PQ分解法中的相应矩阵完全相同，当节点ki由PQ节点转变为PV节点时，B_2的阶数随PQ节点的减少而降低。

由于经过了以上两步简化，使得含有UPFC时的潮流求解速度接近于无UPFC时常规PQ分解法的计算速度。以图4所示系统为例，当线路4－2含有UPFC时，用本文方法在AST4/33上求解潮流，计算时间为18 ms；而用PQ分解法解不包括UPFC时的同一系统，耗时15 ms。

应当指出，本文提出的算法虽然对雅可比矩阵进行了两步简化，但最后计算功率误差和判断收敛条件都是严格按照精确公式进行的，因此不影响计算结果的正确性。

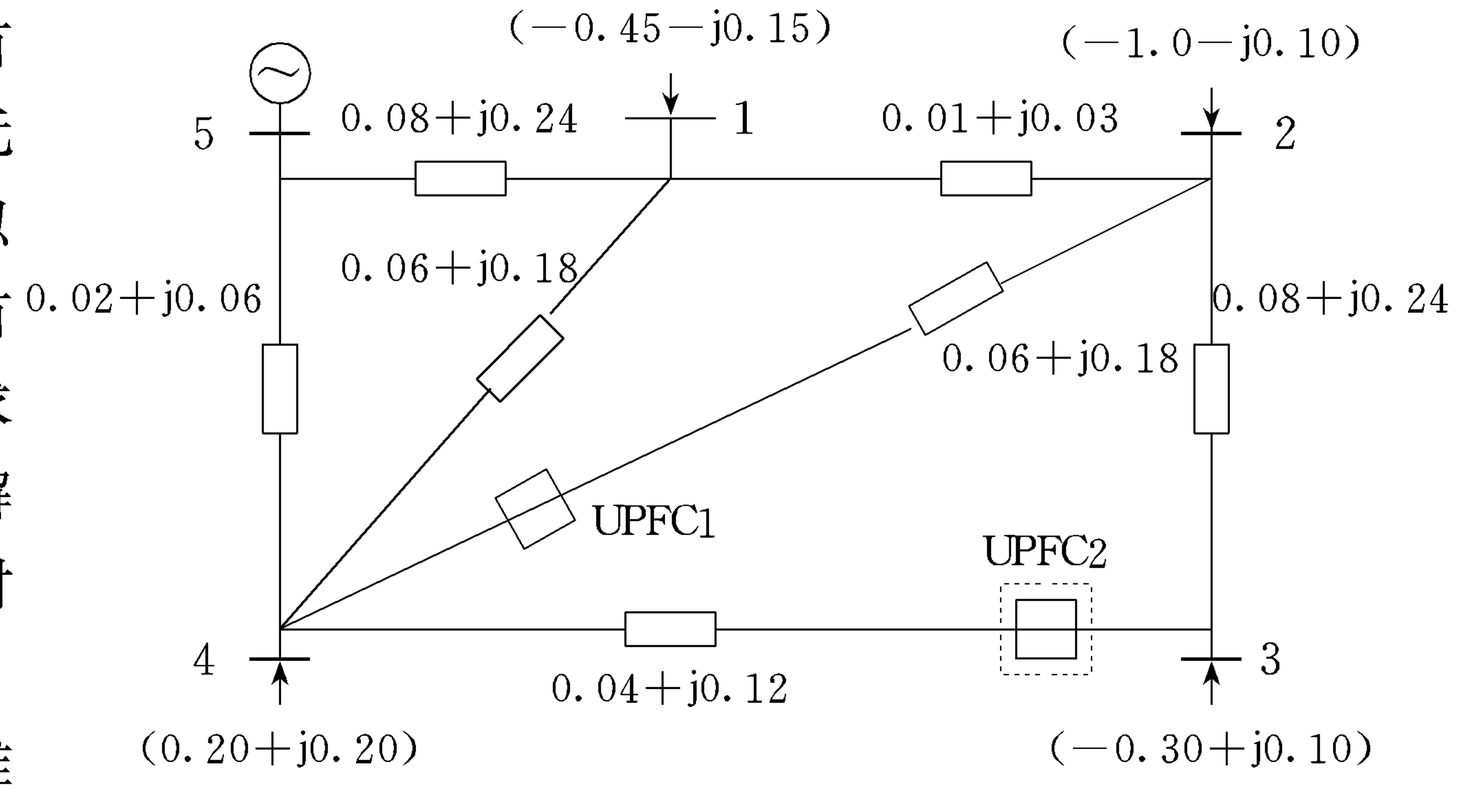

图4 系统网络图

Fig. 4 Power network with UPFC

4 任一线路有功功率可控范围的快速估计方法

将(22)、(23)式合记为：

$$F(X, C, D) = 0 \tag{26}$$

线性展开，有：

$$F(X_0, C_0, D) + \frac{\partial F}{\partial X}\Delta X + \frac{\partial F}{\partial C}\Delta C = 0 \tag{27}$$

由上式得：

$$\Delta X = -\left[\frac{\partial F}{\partial X}\right]^{-1}\frac{\partial F}{\partial C}\Delta C \tag{28}$$

任一线路的有功功率h可以表示为：

$$h = H(X, C, D) \tag{29}$$

将上式在控制量为零处线性展开，并将(28)式代入，有：

$$h = H(X_0, C_0, D) + \left(\frac{\partial H}{\partial C} - \frac{\partial H}{\partial X}\left[\frac{\partial F}{\partial X}\right]^{-1}\frac{\partial F}{\partial C}\right)\Delta C \triangleq h_0 + K_{mx}\Delta U_{mx} + K_{my}\Delta U_{my} \tag{30}$$

其中 K_{mx}、K_{my}为灵敏度矩阵。

计算表明，当$|\dot{U}_{mi}| \leqslant U_{\max i}(i = 1、2、\cdots、kn$，$kn$为总共装设UPFC的台数)时，通常$K_{mx}$、$K_{my}$近似不变，因此在定义域内，可用$U_{mx}$、$U_{my}$替代(30)式中的$\Delta U_{mx}$、$\Delta U_{my}$。

根据线性规划理论可知，线性函数的极值一定在其定义域的边界上，即：

$$U_{mxi}^2 + U_{myi}^2 = U_{\max i}^2 \qquad (i = 1、2、\cdots、kn) \tag{31}$$

将(30)、(31)式两边对U_{mxi}求偏导，并注意到在极值处，

$$\frac{\partial h}{\partial U_{mxi}} = 0, \qquad \frac{\partial U_{\max i}^2}{\partial U_{mxi}} = 0, \qquad \frac{\partial U_{mxj}}{\partial U_{mxi}} = \frac{\partial U_{myj}}{\partial U_{mxi}} = 0 \qquad (i \neq j)$$

可得：

$$\left.\begin{aligned} U_{mxi}+U_{myi}\frac{\partial U_{myi}}{\partial U_{mxi}}=0 \\ K_{mxi}+K_{myi}\frac{\partial U_{myi}}{\partial U_{mxi}}=0 \end{aligned}\right\} \tag{32}$$

联立(31)、(32)式，可得 $\dot{U}_{mi}=\pm\dfrac{U_{\max i}}{\sqrt{K_{mxi}^2+K_{myi}^2}}(K_{mxi}+\mathrm{j}K_{myi})$　　$(i=1、2、\cdots、kn)$　　(33)

当各 $\dot{U}_{mi}$ 满足式(33)，指定线路的有功功率 h 即可达极值。

系统网络如图4所示，节点5为平衡节点，各量以标幺值表示(下同)。装设一台 UPFC 于节点4处和线路4－2上。

UPFC 满足约束条件：

$$\left.\begin{aligned} &|\dot{U}_m|\leqslant 0.2 \\ &0\leqslant\theta_m<2\pi \\ &Q_m\equiv 0.1 \end{aligned}\right\} \tag{34}$$

求 $P_{1,2}$的极值。

表1　UPFC 的控制效果

Table 1　Control effects of UPFC

范　围	1台 UPFC			2台 UPFC		
	估算值	精确值	误差 ε	估算值	精确值	误差 ε
$P_{\min}$	－0.030 21	－0.030 23	0.000 03	－0.271 88	－0.275 78	0.004
$P_{\max}$	0.907 77	0.907 78	0.000 02	1.131 24	1.134 83	0.004

表1给出了安装1台 UPFC(UPFC1)和安装2台 UPFC(加 UPFC2)的控制效果。可见，估算方法的结果是令人满意的。

以上方法同样适用于任一线路无功可控范围的计算，计算结果表明，该方法也可精确地求出无功可控范围。

5　结论

(1) 本文提出的含 UPFC 时的潮流求解方法可完整地计及 UPFC 所在线路的对地电纳，所采用的雅可比矩阵同无 UPFC 时常规的 PQ 分解法完全相同，在迭代过程中保持对称、定常，不必反复进行三角分解。因而求解速度非常接近于无 UPFC 时的常规潮流计算。

(2) 本文提出了一种网络中任一线路有功、无功可控范围的快速估计方法，与精确的非线性寻优方法相比，误差很小。

参　考　文　献

1　Han Z X. Phase Shifter and Power Flow Control. IEEE Vol PAS101, 1982, (10): 3790～3795

2　Gyugyi L, Rietman T R. The Unified Power Flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control. IEEE Vol PD10, 1995, (2): 1085～1093

3　陈淮金. 灵活交流输电系统技术及其应用(一). 电力系统自动化，1994，18(3)

4　陈淮金. 灵活交流输电系统技术及其应用(二). 电力系统自动化，1994，18(4)

LOAD FLOW STUDIES FOR POWER SYSTEMS EQUIPPED WITH UPFC

Chen Huaijin, Bai Zhong (Hohai University, 210024, Nanjing, China)

Abstract　This paper presents an efficient load flow solution for power system equipped with Unified Power Flow Controllers (UPFC). The Jacobian matrix of the proposed method is the same as that of conventional PQ decoupling approach. Besides, a rapid estimation method for the feasible line flow region of arbitrary lines is also proposed.

Keywords　load flow　UPFC　feasible line flow region