一种快速的定雅可比潮流算法

魏 燕, 顾 峰, 彭世康, 周逢权

（许继电气股份有限公司，河南 许昌 461000）

摘要： 完美地组合了电流注入型潮流算法和保留二阶项的快速潮流算法的优点，弥补了二者的不足之处，提出了一种快速的定雅可比潮流算法。该算法修正方程式的雅可比矩阵是通过对电流注入型潮流算法 PQ 节点的雅可比矩阵进行改造而得来的，是一个对称的常数雅可比矩阵。修正方程式的常数项是在保留潮流方程式非线性项的基础上进行简化改进而获得的，是一个非常简单的修正公式，在迭代过程中完全不需要进行节点电压的修正和节点功率的计算。这些处理，既保证了算法的收敛性，又大大提高了计算速度。详细论述了该算法的原理及用法。最后将它与牛顿法、定雅可比牛顿算法、PQ 分解法、快速解耦法（FDLF）等潮流算法在多个算例上进行了收敛性能和收敛速度的比较，结果证明该算法收敛速度远大于牛顿法和定雅可比牛顿算法，收敛能力与定雅可比牛顿算法相当，算法适用能力比 PQ 分解法和快速解耦法强。

关键词： 快速；定雅可比；非线性项；潮流

An exact fast load flow method with constant Jacobian matrix

WEI Yan，GU Feng，PENG Shi-kang, ZHOU Feng-quan

(XJ Electric Co.Ltd ,Xuchang 461000,China)

Abstract: By combining advantages of the current-injecting power flow algorithm and the exact fast load flow method including second order terms, an exact fast load flow method with constant Jacobian matrix is proposed. The Jacobian matrix in this algorithm is a symmetrical constant matrix derived from transforming the Jacobian matrix of P-Q-node based on the current-injecting power flow algorithm. The constant items of the amendment equations are derived from the load flow method reserving nonlinearity items, which are very simple amendment formulas. There is no need to calculate the voltage amending and nodal power in iteration. These measures ensure the convergence and speed of the algorithm. The detailed principle is discussed in this paper. Comparison is made with Newton method, Newton method with constant Jacobian matrix, P-Q decoupled method and FDLF method. Simulation results show this method has much faster convergent speed than Newton method and Newton method with constant Jacobian matrix.

Key words: fast; constant Jacobian; nonlinearity item; load flow

中图分类号： TM71　　文献标识码：A　　文章编号： 1674-3415(2009)18-0011-06

0 引言

牛顿-拉夫逊法(Newton-Raphson，简称牛顿法）是求解大型非线性方程组的最有效方法，其优点是收敛能力极强，并具有二次收敛特性。但是它同时具有计算过程复杂、计算量大、计算速度慢等缺点[1]。

为了提高潮流计算的速度，对牛顿潮流算法的研究沿着两个方向进展：一是将有功和无功解耦后分别进行迭代计算（即 PQ 分解法），二是对迭代计算中的雅可比矩阵采取常数化措施（即定雅可比牛顿算法）[2]。单独的解耦和单独的定雅可比矩阵，均能够提高潮流计算的速度，但是增加了较多的迭代次数，甚至使迭代过程发散。

1974 年，B.Scott 将这两者结合起来试验却得到了意外的好效果，迭代次数增加不多而节约计算时间很多，这就是快速解耦潮流（FDLF）算法[3]。但是快速解耦法对于某些病态系统会出现收敛困难的问题。

1978 年岩本伸一及田村康男提出了保留非线性项的潮流算法——Iwamoto-Tamura 法[4]，把人们的目光再次引向了雅可比矩阵常数化的道路。Nagendra Rao 等提出了直角坐标形式的保留二阶项的快速潮流算法[5]，王宪荣等在岩本伸一的基础上提出了拓广的 Iwamoto-Tamura 法[6]。所有这些算法相对于定雅可比牛顿算法，其收敛速度和收敛能力并没有得到实质性的提高。

本人在前人对潮流算法的研究成果基础上作

了进一步的推进，提出了一种全新的保留非线性项的快速的定雅可比潮流算法。该算法具有以下几个特点：

1）优化了电流注入型潮流计算[7,8]的雅可比矩阵，使它成为一个对称的、稀疏的常数雅可比矩阵。因此可以采用三角分解法求解修正方程式，这样降低了系数矩阵所需的存储量，同时也减少了求解修正方程式的计算量，大大提高了计算速度。

2）在保留潮流方程式非线性项的基础上，改进了潮流计算迭代过程中修正方程式常数项的计算公式，并加进了对于 PV 节点的完美处理，使得常数项的修正值更加接近于真值，并且其计算过程得到了极大的简化。因此既保证了算法的收敛性能，又进一步减少了潮流计算的计算量。

3）相对于 Nagendra Rao 等提出的直角坐标形式保留二阶项的快速潮流算法[5]而言，本算法的雅可比矩阵更加完美，并且对于节点电压可以取一个更加合理的初值，因此它具有更高的收敛性和更强的算法适用性。

1 计算过程

定雅可比牛顿算法的计算方式同牛顿法类似，即通过迭代方式的反复多次求解线性方程组，来使电网系统中各个节点的电压向量值逼近于真实值，从而达到求解整个系统的潮流分布情况的目的。二者的不同之处在于：定雅可比牛顿算法的雅可比矩阵只取牛顿法第一次迭代计算的雅可比矩阵，在迭代过程中不再变更。因此定雅可比牛顿算法可以采用三角分解法求解修正方程式，这样使得潮流计算的速度比牛顿法有了较大的提高，但是它的收敛次数比牛顿法要增加很多。

本文算法的计算方式与定雅可比牛顿算法相似，但是本文算法因其迭代处理过程很简单而使得计算速度比定雅可比牛顿法有了很大的提高。下面介绍本文算法的具体计算过程。

在迭代计算前，设定各个节点的初始电压相角均取为平衡节点的电压相角，用 $U_i^{(0)}$ 表示节点 i 的初始电压幅值，它的取值应该接近于真值，一般来说，平衡节点、PV 节点取给定电压值，而 PQ 节点取节点所在的基准电压值。用 $P_i^{(\mathrm{sp})}$、$Q_i^{(\mathrm{sp})}$ 分别代表节点 i 的给定注入有功、无功功率。则可按照下式计算每一个节点 i 的 cP_i、cQ_i、dP_i、dQ_i、C_i 和 D_i 等量，这些数据量在迭代计算过程中不再改变，属于常量。式中 $P_i^{(0)}$、$Q_i^{(0)}$ 代表节点 i 的初始计算的有功、无功功率。

$$\begin{cases} cP_i = \dfrac{P_i^{(0)}}{U_i^{(0)}} = \sum\limits_{j=1}^{n} G_{ij} U_j^{(0)} \\ cQ_i = \dfrac{-Q_i^{(0)}}{U_i^{(0)}} = \sum\limits_{j=1}^{n} B_{ij} U_j^{(0)} \\ dP_i = \dfrac{P_i^{(\mathrm{sp})}}{U_i^{(0)}} - cP_i \\ dQ_i = \dfrac{-Q_i^{(\mathrm{sp})}}{U_i^{(0)}} - cQ_i \\ C_i = \dfrac{P_i^{(0)}}{U_i^{(0)2}} = \dfrac{cP_i}{U_i^{(0)}} \\ D_i = \dfrac{-Q_i^{(0)}}{U_i^{(0)2}} = \dfrac{cQ_i}{U_i^{(0)}} \end{cases} \tag{1}$$

在迭代计算中，采用如下的修正方程式进行求解：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D} - \boldsymbol{B} & \boldsymbol{G} \\ \boldsymbol{G} & \boldsymbol{D} + \boldsymbol{B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta E^{(PQ)} \end{bmatrix} \tag{2}$$

修正方程式的常数矩阵中，$\boldsymbol{X}$ 矩阵与节点的 dP_i 相关，其元素个数为 PQ、PV 节点的个数之和；$\boldsymbol{Y}$ 矩阵与节点的 dQ_i 相关，其元素个数为 PQ 节点个数。

修正方程式的系数矩阵（即雅可比矩阵）中，$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{B}$ 代表节点导纳矩阵中的电导矩阵块与电纳矩阵块，$\boldsymbol{D}$ 为对角线矩阵块，有 $\boldsymbol{D}_{ii} = \boldsymbol{D}_i$，$\boldsymbol{D}_{ij} = 0$ $(j \neq i)$。因此，该雅可比矩阵为对称的常数稀疏矩阵，可以采用三角分解法求解修正方程式。具体的计算过程为：

第一步：按照式(1)计算 PQ、PV 节点的 cP_i、dP_i 和 $\boldsymbol{D}_i$，以及 PQ 节点的 dQ_i。

第二步：对式(2)的雅可比矩阵进行三角因子分解，存储分解后的上三角非零元素。

第三步：初始化迭代次数 $k=1$，取 $\Delta F_i^{(0)} = 0$，$\Delta E_i^{(0)} = 0$，$\boldsymbol{X}_i^{(1)} = dP_i$，$\boldsymbol{Y}_i^{(1)} = dQ_i$。

第四步：采用三角分解法求解式(2)，获得本次迭代中 PQ、PV 节点的 $\Delta F_i^{(k)}$ 和 PQ 节点的 $\Delta E_i^{(k)}$。

第五步：按照下式修正 PV 节点的 $\Delta E_i^{(k)}$。

$$\Delta E_i = \sqrt{{U_i^{(0)}}^2 - \Delta F_i^2} - U_i^{(0)} \approx \frac{-\Delta F_i^2}{2U_i^{(0)}} \tag{3}$$

第六步：判断是否收敛。收敛判据为

$$\begin{cases}\max\left|\Delta F_i^{(k)}-\Delta F_i^{(k-1)}\right|<\varepsilon\\ \max\left|\Delta E_i^{(k)}-\Delta E_i^{(k-1)}\right|<\varepsilon\end{cases}\tag{4}$$

若收敛，则按式(5)求出各节点的电压向量（其中$\theta_1^{(0)}$为平衡节点电压相角），进而计算整个系统的潮流信息，并结束潮流计算。否则，执行第七步。

$$\begin{cases}U_i=\sqrt{(U_i^{(0)}+\Delta E_i^{(k)})^2+\Delta F_i^{(k)2}}\\ \theta_i=\theta_1^{(0)}+\mathrm{tg}^{-1}\dfrac{\Delta F_i^{(k)}}{U_i^{(0)}+\Delta E_i^{(k)}}\end{cases}\tag{5}$$

第七步：按照式(6)修正各节点的$\boldsymbol{X}_i$和PQ节点的$\boldsymbol{Y}_i$。

$$\begin{cases}K_i=\sum_{j=2}^{m}G_{ij}\Delta E_j^{(k)}\\ L_i=\sum_{j=2}^{m}B_{ij}\Delta E_j^{(k)}\\ V_i=\boldsymbol{X}_i^{(k)}+K_i-D_i\Delta F_i^{(k)}+cP_i\\ W_i=\begin{cases}\boldsymbol{Y}_i^{(k)}+L_i-D_i\Delta E_i^{(k)},\quad \text{PQ节点}\\ \sum_{j=2}^{n}(G_{ij}\Delta F_j^{(k)}+B_{ij}\Delta E_j^{(k)}),\quad \text{PV节点}\end{cases}\\ \boldsymbol{X}_i^{(k+1)}=dP_i-K_i-\dfrac{V_i\cdot\Delta E_i^{(k)}+W_i\cdot\Delta F_i^{(k)}}{U_i^{(0)}}\\ \boldsymbol{Y}_i^{(k+1)}=dQ_i-L_i+\dfrac{V_i\cdot\Delta F_i^{(k)}-W_i\cdot\Delta E_i^{(k)}}{U_i^{(0)}}\end{cases}\tag{6}$$

式（6）中，假设节点1为平衡节点，节点2～m为PV节点，节点m+1～n为PQ节点。

第八步：令迭代次数$k=k+1$，转入第四步，开始下一次迭代计算。

迭代过程中，只需要按照式(2)、(3)、(6)进行反复计算，直至收敛为止。节点电压的修正、节点及支路功率的计算均在迭代收敛之后进行。

根据式(6)可知，一次迭代过程中，计算所有的K_i、L_i需要进行的乘法次数，为3倍带PV节点的支路数加1倍PV节点个数。修正$\boldsymbol{X}_i$、$\boldsymbol{Y}_i$时，对每一个PQ节点，只需要进行8次乘除运算和11次加减运算；对每一个PV节点,只需要进行（9+2l_i）次乘除运算和（10+l_i）次加减运算（l_i为该节点连接的支路数）。因此迭代速度非常快。

2　计算原理

2.1 PQ节点的处理

PQ节点给定了节点注入功率$P_{(\mathrm{sp})}$和$Q_{(\mathrm{sp})}$。在直角坐标系下，节点注入功率的计算式为[1,2]：

$$\begin{cases}P_i(E,F)=\sum_{j=1}^{n}[E_i(G_{ij}E_j-B_{ij}F_j)+\\ \qquad F_i(G_{ij}F_j+B_{ij}E_j)]\\ Q_i(E,F)=\sum_{j=1}^{n}[F_i(G_{ij}E_j-B_{ij}F_j)-\\ \qquad E_i(G_{ij}F_j+B_{ij}E_j)]\end{cases}\tag{7}$$

把$E+\Delta E$、$F+\Delta F$作为状态量代入式(7)后，展开并化简计算式，可得

$$\begin{cases}P_i(E+\Delta E,F+\Delta F)=P_i(E,F)+\\ \qquad\sum_{j=1}^{n}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial P_i}{\partial E_j} & \dfrac{\partial P_i}{\partial F_j}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta E_j\\ \Delta F_j\end{bmatrix}+sP_i\\ Q_i(E+\Delta E,F+\Delta F)=Q_i(E,F)+\\ \qquad\sum_{j=1}^{n}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial Q_i}{\partial E_j} & \dfrac{\partial Q_i}{\partial F_j}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta E_j\\ \Delta F_j\end{bmatrix}+sQ_i\end{cases}\tag{8}$$

其中：sP、sQ为节点注入功率计算式的非线性项，有[1]

$$\begin{cases}sP_i=\Delta E_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}\Delta E_j-B_{ij}\Delta F_j)+\\ \qquad\Delta F_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}\Delta F_j+B_{ij}\Delta E_j)\\ sQ_i=\Delta F_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}\Delta E_j-B_{ij}\Delta F_j)-\\ \qquad\Delta E_i\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}\Delta F_j+B_{ij}\Delta E_j)\end{cases}\tag{9}$$

用x表示状态量E、F，$f(x)$表示节点注入功率的计算式，$f^{(\mathrm{sp})}=f(x+\Delta x)$表示节点给定的注入功率值，$f(\Delta x)$表示节点注入功率计算式的非线性项，则式(8)可以简化表示为[1]

$$f^{(\mathrm{sp})}=f(x)+J\cdot\Delta x+f(\Delta x)\tag{10}$$

因此当考虑潮流计算的非线性项时，潮流计算的修正方程式应该为

$$\Delta f(x)=f^{(\mathrm{sp})}-f(x)-f(\Delta x)=J\cdot\Delta x\tag{11}$$

另一方面，对牛顿法潮流方程式进行等价变换，可以推导出电流注入型潮流算法[7,8]。直角坐标形式的电流注入型潮流算法[7]的修正方程式为

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\Delta P_iE_i+\Delta Q_iF_i}{E_i^2+F_i^2}\\ \dfrac{\Delta P_iF_i-\Delta Q_iE_i}{E_i^2+F_i^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}D_i-B_{ii} & C_i+G_{ii}\\ -C_i+G_{ii} & D_i+B_{ii}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta F_i\\ \Delta E_i\end{bmatrix}+$$

$$\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\begin{bmatrix}-B_{ij} & G_{ij}\\ G_{ij} & B_{ij}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta F_j\\ \Delta E_j\end{bmatrix} \tag{12}$$

其中C_i、D_i的计算式为

$$\begin{cases}C_i=\dfrac{P_i\cdot(E_i^2-F_i^2)+2Q_i\cdot E_iF_i}{(E_i^2+F_i^2)^2}\\ D_i=\dfrac{2P_i\cdot E_iF_i-Q_i\cdot(E_i^2-F_i^2)}{(E_i^2+F_i^2)^2}\end{cases} \tag{13}$$

考虑潮流计算的非线性项时，根据式(11)可知，式(12)中的功率偏差项计算公式为

$$\begin{cases}\Delta P_i=P_i^{(\mathrm{sp})}-P_i-sP_i\\ \Delta Q_i=Q_i^{(\mathrm{sp})}-Q_i-sQ_i\end{cases} \tag{14}$$

采用式(14)计算功率偏差时，对于任意的节点电压值$E_i+\mathrm{j}F_i$，式(12)都是精确的等式。若令$E_i=U_i^{(0)}$，$F_i=0$，则C_i和D_i的计算式简化为式(1)所示；同时式(12)可以简化为

$$\begin{bmatrix}(P_i^{(\mathrm{sp})}-P_i^{(0)}-sP_i)/U_i^{(0)}\\ (Q_i^{(0)}-Q_i^{(\mathrm{sp})}+sQ_i)/U_i^{(0)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}D_i-B_{ii} & C_i+G_{ii}\\ -C_i+G_{ii} & D_i+B_{ii}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta F_i\\ \Delta E_i\end{bmatrix}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\begin{bmatrix}-B_{ij} & G_{ij}\\ G_{ij} & B_{ij}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta F_j\\ \Delta E_j\end{bmatrix} \tag{15}$$

将式(15)展开，可得

$$\begin{cases}V_i=dP_i-\dfrac{sP_i}{U_i^{(0)}}-C_i\Delta E_i-D_i\Delta F_i=\displaystyle\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}\Delta E_j-B_{ij}\Delta F_j)\\ W_i=dQ_i+\dfrac{sQ_i}{U_i^{(0)}}+C_i\Delta F_i-D_i\Delta E_i=\displaystyle\sum_{j=1}^{n}(G_{ij}\Delta F_j+B_{ij}\Delta E_j)\end{cases} \tag{16}$$

将式(16)代入式(9)，可得

$$\begin{cases}sP_i=V_i\cdot\Delta E_i+W_i\cdot\Delta F_i\\ sQ_i=V_i\cdot\Delta F_i-W_i\cdot\Delta E_i\end{cases} \tag{17}$$

2.2 PV 节点的处理

PV 节点给定的量测量为$P^{(\mathrm{sp})}$和$U^{(\mathrm{sp})}$。对于$U^{(\mathrm{sp})}$，有

$$U_i^{(\mathrm{sp})2}=(U_i^{(0)}+\Delta E_i)^2+\Delta F_i^2=U_i^{(0)2}+2U_i^{(0)}\Delta E_i+\Delta E_i^2+\Delta F_i^2 \tag{18}$$

式(18)可转化为

$$Z_i=\frac{U_i^{(\mathrm{sp})2}-U_i^{(0)2}-\Delta E_i^2-\Delta F_i^2}{2U_i^{(0)}}=\Delta E_i \tag{19}$$

假设节点 1 为平衡节点，节点 2 ～m为 PV 节点，节点m+1～n为 PQ 节点。根据式(16)和式(19)有：

$$\begin{bmatrix}V\\ W\\ Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-B_{(n-1)\cdot(n-1)} & G_{(n-1)\cdot(n-m)} & G_{(n-1)\cdot(m-1)}\\ G_{(n-m)\cdot(n-1)} & B_{(n-m)\cdot(n-m)} & B_{(n-m)\cdot(m-1)}\\ 0 & 0 & I_{(m-1)\cdot(m-1)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta F\\ \Delta E^{(PQ)}\\ \Delta E^{(PV)}\end{bmatrix} \tag{20}$$

对式(20)进行等价转换，可得

$$\begin{bmatrix}V_{(n-1)\times1}\\ W_{(n-m)\times1}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}G_{(n-1)\times(m-1)}\\ B_{(n-m)\times(m-1)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta E_{(m-1)\times1}^{(PV)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-B_{(n-1)\times(n-1)} & G_{(n-1)\times(n-m)}\\ G_{(n-m)\times(n-1)} & B_{(n-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta F_{(n-1)\times1}\\ \Delta E_{(n-m)\times1}^{(PQ)}\end{bmatrix} \tag{21}$$

将式(21)展开，就是

$$\begin{cases}dP_i-\dfrac{sP_i}{U_i^{(0)}}-C_i\Delta E_i-D_i\Delta F_i-\displaystyle\sum_{j=2}^{m}G_{ij}\Delta E_j=-\sum_{j=2}^{n}B_{ij}\Delta F_j+\sum_{j=m+1}^{n}G_{ij}\Delta E_j\\ dQ_i+\dfrac{sQ_i}{U_i^{(0)}}+C_i\Delta F_i-D_i\Delta E_i-\displaystyle\sum_{j=2}^{m}B_{ij}\Delta E_j=\sum_{j=2}^{n}G_{ij}\Delta F_j+\sum_{j=m+1}^{n}B_{ij}\Delta E_j\end{cases} \tag{22}$$

式(22)作为修正方程式时，它没有求取 PV 节点的ΔE_i。对于 PV 节点i，可令$U_i^{(0)}=U_i^{(\mathrm{sp})}$，代入式(19)可解得它的$\Delta E_i$计算式，即式(3)。

2.3 迭代过程的处理

根据式(1)可知，

$$C_i=G_{i0}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}G_{ij}(U_j^{(0)}-K_{ij}'U_i^{(0)})/U_i^{(0)}\approx G_{i0}\approx 0$$

（其中K_{ij}'对非变压器支路为 1.0，对变压器非标准变比侧节点为$1/K_{ij}$，对变压器标准变比侧节点为K_{ij}），因此C_i对式(15)的雅可比矩阵元素值的影响很小。将式(22)按照式(15)的结构转化为

$$\begin{bmatrix}dP_i-\dfrac{sP_i^{(k)}}{U_i^{(0)}}-C_i\Delta E_i^{(k)}-\displaystyle\sum_{j=2}^{m}G_{ij}\Delta E_j^{(k)}\\ dQ_i+\dfrac{sQ_i^{(k)}}{U_i^{(0)}}+C_i\Delta F_i^{(k)}-\displaystyle\sum_{j=2}^{m}B_{ij}\Delta E_j^{(k)}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} D_i - B_{ii} & G_{ii} \\ G_{ii} & D_i + B_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_i^{(k+1)} \\ \Delta E_i^{(k+1)} \end{bmatrix} + \sum_{j=1, j\neq i}^{n} \begin{bmatrix} -B_{ij} & G_{ij} \\ G_{ij} & B_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_j^{(k+1)} \\ \Delta E_j^{(k+1)} \end{bmatrix} \tag{23}$$

令

$$\begin{cases} X_i^{(k+1)} = dP_i - \dfrac{sP_i^{(k)}}{U_i^{(0)}} - C_i \Delta E_i^{(k)} - \sum\limits_{j=2}^{m} G_{ij} \Delta E_j^{(k)} \\ Y_i^{(k+1)} = dQ_i + \dfrac{sQ_i^{(k)}}{U_i^{(0)}} + C_i \Delta F_i^{(k)} - \sum\limits_{j=2}^{m} B_{ij} \Delta E_j^{(k)} \end{cases} \tag{24}$$

则式(23)的矩阵形式就是式(2)所示。

根据式(16)、(17)、(24)，可得 X_i、Y_i 的修正公式即为式(6)所示。

3　算法的另一种方案

当保留电流注入型潮流算法的雅可比矩阵形式时，则 式(2)变为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D-B & G+C \\ G-C & D+B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta E^{(PQ)} \end{bmatrix} \tag{25}$$

采用式(25)作为修正方程式时，只需要对式(6)中 V_i 的计算式稍作变动就可以了，即

$$V_i = X_i^{(k)} + K_i^{(k)} - D_i \Delta F_i^{(k)} \tag{26}$$

其它计算公式及计算流程均不需要变动。

此处介绍的解决方案就是本文算法的另一种方案。因为其雅可比矩阵中同时含有 C 和 D，故称为 CD 方案。而把前面介绍的解决方案称为 D 方案。

4　算例

为了验证本文方法，将其分别应用于 4 节点[9]、14 节点[10]、22 节点[11]等多个算例系统。并与牛顿-拉夫逊算法、定雅可比牛顿算法、快速解耦算法相比较，现将计算比较结果列于表 1。

表 1 中的算例采用 C++语言编程。运行环境为：PC 机的处理器为 Intel Pentium III，主频为 868 MHz，内存为 512 MB。迭代精度为：ε=0.000 001。

表 1 中的定雅可比法指定雅可比牛顿算法，本文算法 C、CD 分别指本文算法的 D 方案、CD 方案，FDLF 算法 XB、BX 分别指快速解耦算法的 XB 方案、BX 方案[1]。PQ 分解法，指在迭代过程中 P 迭代、Q 迭代的雅可比矩阵分别取牛顿-拉夫逊法第一次迭代计算雅可比矩阵的 $\boldsymbol{H}$（左上角）块和 $\boldsymbol{L}$（右下角）块，并且采用三角分解法求解修正方程式。电网系统中，26 节点[12]系统为含有 10 kV、110 kV、500 kV 三个电压等级的有名制系统，它是 22 节点系统的扩展；其它系统是标幺制系统，为 IEEE 算例或国内常用的标准算例。计算时间为纯粹的潮流计算时间，不包含对数据库或磁盘数据文件进行数据读写操作的附属操作时间。表中计算时间值是采用反复多次重复计算的时间取平均值得来的。

表 1　几种潮流算法的比较

Tab.1　Results for several power flow algorithms

电网系统		牛顿法		定雅可比法		本文算法 D	
总节点数	PV 节点数	计算时间/ms	收敛次数	计算时间/ms	收敛次数	计算时间/ms	收敛次数
4	1	0.12	4	0.18	10	0.08	8
14	4	1.35	4	0.85	8	0.68	13
22	2	5.29	5	4.02	34	2.16	27
26	3	6.82	5	3.84	23	2.16	28
30	5	9.42	4	3.56	8	2.61	8
50	0	40	5	12.6	14	6.56	11
57	6	56	5	16.5	11	11.5	11
0.08	8	0.12	7	0.12	7	0.12	7
0.65	10	∞	∞	0.43	6	0.58	9
2.22	27	1.72	12	1.20	12	11.0	152
2.14	28	1.82	12	∞	∞	∞	∞
2.66	8	6.38	49	1.38	6	1.60	8
6.3	11	∞	∞	3.8	8	4.6	11
11.7	11	10.8	21	4.7	8	4.8	8

从算例结果可知，本文算法的收敛次数与定雅可比牛顿算法相当，比 PQ 分解法和快速解耦法收敛性能要稳定（即适应性更广）；在计算速度方面，本文算法比定雅可比牛顿算法快，定量地说，它的计算速度约为牛顿法的 2～6 倍，为定雅可比牛顿算法的 1.5～2 倍，与 PQ 分解算法相当，约为快速解耦法的 0.7 倍。

5　结论

1) 本算法的雅可比矩阵是一个对称而稀疏的常数矩阵，修正方程式的常数项计算简单，在迭代过程中不需要进行节点电压的修正以及节点功率的反复计算，因此迭代速度非常快。实践证明，它的计算速度远大于牛顿-拉夫逊法和定雅可比牛顿算法。

2) 收敛能力方面，本算法对于各个算例均能很好地达到收敛，比 PQ 分解法和快速解耦法收敛性能要稳定，与定雅可比牛顿算法相当。

3) 本算法适用于各种应用场合。节点电压初值可以取一个接近于真值的标幺值或有名值，因此可

以用于求解标幺值系统和有名值系统。节点电压的修正和节点功率的计算均在收敛结束后实施，因此可以用于直角坐标系统和极坐标系统。

4) 对于电力系统状态估计、静态安全分析和最优潮流计算等算法，可以借鉴本算法进行改造，能较大地提高这些算法的计算速度和实时性能。

5) 假如能够进一步改造本算法的雅可比矩阵，使它在收敛次数上达到或接近于正常收敛的 FDLF 算法，则它将是一种非常完美的潮流算法。

参考文献

[1] 西安交通大学,等.电力系统计算[M].北京:水利电力出版社,1978.

[2] 诸骏伟. 电力系统分析(上册)[M]. 北京:中国电力出版社,1998.

[3] Stott B. Fast Decoupled Load Flow[J]. IEEE Trans PWRS, 1974,93(3): 743-752.

[4] Iwamoto S, Tamura Y. A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity[J]. IEEE Trans on PAS, 1978,97(5): 1586-1599.

[5] Nagendra R P S, Prakasa R K S, Nanda J. An Exact Fast Load Flow Method Including Second Order Terms in Rectangular Coordinates[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(9): 3261-3268.

[6] 王宪荣,柳焯,张伯明. 非线性总项与保留非线性潮流算法的拓广[J]. 哈尔滨工业大学学报， 1990,(6): 60-66.
WANG Xian-rong, LIU Zhuo, ZHANG Bo-ming. The Sum Total of Nonlinear Terms and the Development of Load Flow Algorithm Retaiming Nonlinearity[J].Journal of Harbin Institute of Technology，1990,(6)：60-66.

[7] 牛辉,郭志忠.广义特勒根潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 1998,22(10): 14-16.
NIU hui,GUO Zhi-zhong. Power Flow Algorithm of the General Tellegen's Theorem[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998,22(10): 14-16.

[8] 彭世康,王永刚,于志文,等.极坐标形式的电流注入型潮流算法[J].继电器,2000,28(3):1-4.
PENG Shi-kang, WANG Yong-gang, YU Zhi-wen, et al. Polar Current-injecting Power Flow Algorithm[J]. Relay, 2000,28(3):1-4.

[9] 于尔铿.电力系统状态估计[M].北京:水利电力出版社,1985.48-50.

[10] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.

[11] 王祖佑.电力系统稳态运行计算机分析[M]. 北京:水利电力出版社,1987.

[12] 彭世康.输配电网高级分析软件总体设计与实现(硕士学位论文)[D].北京:华北电力大学, 2007.
PENG Shi-kang. A Perfect Design and Realization of Advanced Analysis Software for Transmission and Distribution Network[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.

收稿日期：2009-06-17；　　修回日期：2009-07-27

作者简介：

魏　燕（1975-），女，工程师，从事继电保护研究与开发工作; E-mail: yanw@xjgc.com

顾　峰(1973-)，男，工程师，从事继电保护开发及项目管理工作;

彭世康(1972-)，男，硕士，从事电力网络分析软件的研究工作。

许继和广东省电力试验研究院开展科技合作

为了进一步促进许继公司和南方电网的合作，推动公司智能变电站项目的发展，打开数字化产品在广东市场的新局面。2009 年 2 月，电网销售公司和技术中心基础软件部派出相关人员，积极策划准备和广东省电力试验研究院进行科技项目合作的相关工作。在广东电力试验研究院 6 月份举行的重大科技项目招标中，许继公司顺利中标《智能变电站间隔层/过程层测试系统开发》项目，进而确定了和广东用户的合作关系。该项目由技术中心基础软件部承担，项目已经全面启动，目前进展顺利。

近年来，随着 IEC 61850 系列标准的推广和应用，一个个数字化变电站的建成，各电力保护设备制造厂家产品科研测试和产品出厂检测需要专用的测试设备，电力用户对数字化产品验收及维护所采用的测试设备及测试解决方案的需求也越来越迫切。该项目正是在这样的背景下诞生的，项目研究及开发内容包括：电子式互感器校验系统、智能开关测试系统、光数字保护测试系统、IEC 61850 报文监视分析系统、光纤通道测试技术研究、过程层网络模拟系统等测试系统。该项目实施后，将开发出适用于 IEC 61850 标准智能变电站的过程层、间隔层专用测试设备，为用户提供科学规范的测试环境及完善的测试解决方案。

目前该项目正按照实施计划有条不紊的进行，预计明年能够按期完成开发及研究内容。通过本科技项目合作，将会进一步促进许继和广东用户的友好关系，为公司数字化产品进入广东市场打下良好的基础。