文章编号: 1006－4729(2012)01－0019－04

基于MATLAB和PSASP的电力系统潮流分析与计算

陈 帅，王 勇，杨 恒
(上海电力学院 电力与自动化工程学院，上海 200090)

摘 要: 针对一个典型的9节点电力系统，用MATLAB软件编写了基于直角坐标的牛顿-拉夫逊法电力系统潮流计算程序，该程序具有计算精度高、收敛速度快等特点，并具有一定的灵活性和通用性. 最后用电力系统分析综合程序(PSASP)对潮流计算结果进行了验证，得到了报表输出和图示化输出，并在系统单线图上输出潮流计算的结果.

关键词: 电力系统; 潮流计算; MATLAB软件; 电力系统分析综合程序
中图分类号: TM744; TP319 **文献标志码:** A

Flow Analysis and Calculation of Power System Based on MATLAB and PSASP

CHEN Shuai，WANG Yong，YANG Heng
(*School of Electric Power and Automation Engineer*，*Shanghai University of Electric Power*，*Shanghai* 200090，*China*)

Abstract: For a typical power system of 9 nodes，the power flow calculation program which is based on the Newton-Raphson algorithm in the rectangular coordinates is composed with MATLAB software，and the program has the characteristics of high precision and fast convergence rate，as well as some flexibility and generality. Finally，the results of flow calculation is verified by the power system analysis software package (PSASP)，and the report and chart of the flow calculation results are obtained with the system single line diagram of the power flow calculation results output with good effect .

Key words: electric power system; flow calculation; MATLAB software; power system analysis software package

电力系统潮流计算是研究电力系统稳态运行状况的一种基本电气计算[1]，其任务是根据给定的运行条件和网络结构确定整个系统的运行状态，如各母线上的电压幅值和相位角，网络中的功

收稿日期: 2011－07－05
通讯作者简介: 王勇(1973－)，男，教授，河南确山人. 主要研究方向为电力信息安全. E-mail: wy616@126.com.
基金项目: 信息安全国家重点实验室(中国科学院软件研究所)开放式基金(04-02-1); 上海教委创新基金(11YZ192).

率分布和功率损耗等[2]. 潮流计算的结果对研究系统的运行方式以及确定电网规划阶段中的供电方案有着重要作用,它也是电力系统短路计算、静态和暂态稳定计算的基础. 此外,潮流计算对于安全监控和预想事故分析也有重要作用.

早期的电力系统潮流计算主要是通过手工计算或者是利用交流计算台模拟的方法进行的简单计算. 随着计算机技术的发展,以节点阻抗矩阵为基础的高斯迭代法应运而生. 高斯迭代法收敛性好,但是随着系统规模的不断扩大,因其占用内存大而使解题规模受到了限制. 牛顿法是求解非线性方程式的一种典型的数学方法,它在导纳矩阵的基础上求解电力系统的潮流计算问题,其核心是反复形成并求解修正方程式. 只要在迭代过程中尽可能保持方程式系数矩阵的稀疏性[3],就可以大大提高牛顿潮流程序的计算效率,而且其收敛性也很好. 实际电力系统的潮流技术主要采用牛顿-拉夫逊法.

1 用直角坐标表示的牛顿-拉夫逊法潮流计算的基本原理

目前,在电力系统潮流算法中比较常用的有高斯-赛德尔法、牛顿-拉夫逊法(包括直角坐标和极坐标两种形式)、快速解耦潮流算法(即 PQ 分解法)和直流潮流算法等,它们各有优缺点. 本文采用直角坐标形式下的牛顿-拉夫逊法,下面主要说明直角坐标下牛顿法的计算原理.

对于一个 n 节点电力系统,节点 i 的注入复功率 S_i 与节点注入电流 I_i 和电网的节点电压 U_i 的关系为[4]:

$$S_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i \overset{*}{I}_i = \dot{U}_i \sum_{i=1}^{n} \overset{*}{Y}_{ij} \overset{*}{U}_j \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

采用直角坐标时,可以把节点电压表示为: $\dot{U}_i = e_i + jf_i$,把导纳矩阵的元素表示成: $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$. 将它们代入式(1)的右端,并将实部和虚部分开,可得:

$$\left.\begin{aligned} P_i &= e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\ Q_i &= f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

现将系统中的第 $1, 2, \cdots, m$ 号节点设为 PQ 节点,第 i 个节点的原始给定功率设为 P_{is} 和 Q_{is},则针对此节点可以推导出的方程为:

$$\left.\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - Q_i = Q_{is} - f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \end{aligned}\right\} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{3}$$

再将系统中的第 $m+1, m+2, \cdots, n-1$ 号节点设成 PV 节点,则针对其中的每一个节点可导出的方程为:

$$\left.\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \\ \Delta U_i^2 &= U_{is}^2 - U_i^2 = U_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \end{aligned}\right\} \quad (i = m+1, m+2, \cdots, n-1) \tag{4}$$

将第 n 号节点设成平衡节点,其电压 $U_n = e_n + jf_n$ 是给定的,所以它不用参加迭代.

式(3)和式(4)共由 $2(n-1)$ 个方程组成,待求的变量有 $e_1, f_1, e_2, f_2, \cdots, e_{n-1}, f_{n-1}$,也有 $2(n-1)$ 个. 因此,可给出的线性修正方程式为:

$$\Delta W = -J \Delta U \tag{5}$$

式中: $\Delta W = [\Delta P_1 \quad \Delta Q_1 \cdots \Delta P_{n-1} \quad \Delta U_{n-1}^2]^{\mathrm{T}}$

$\Delta U = [\Delta e_1 \quad \Delta f_1 \cdots \Delta e_{n-1} \quad \Delta f_{n-1}]^{\mathrm{T}}$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta U_{n-1}^2}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix}$$

上述方程中雅可比矩阵中的各元素,可以对式(3)和式(4)求偏导数得到.

当 $i \neq j$ 时:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} &= -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = -(G_{ij}e_i + B_{ij}f_i) \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = B_{ij}e_i - G_{ij}f_i \\ \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_j} &= \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_j} = 0 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

当 $i = j$ 时:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} &= -\sum_{k=1}^{n}(G_{ik}e_k - B_{ik}f_k) - G_{ii}e_i - B_{ii}f_i \\
\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i} &= -\sum_{k=1}^{n}(G_{ik}f_k + B_{ik}e_k) + B_{ii}e_i - G_{ii}f_i \\
\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i} &= \sum_{k=1}^{n}(G_{ik}f_k + B_{ik}e_k) + B_{ii}e_i - G_{ii}f_i \\
\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i} &= -\sum_{k=1}^{n}(G_{ik}e_k - B_{ik}f_k) + G_{ii}e_i + B_{ii}f_i \\
\frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_i} &= -2e_i \\
\frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_i} &= -2f_i
\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

2　用 MATLAB 语言编写牛顿迭代法潮流计算程序

2.1　用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算的步骤

具体步骤如下:

(1) 给出各节点电压的初始值 $e^{(0)}$ 和 $f^{(0)}$;

(2) 将给定的电压初始值代入式(3)和式(4),从而解出修正方程式的常数向量 $\Delta P^{(0)}$,$\Delta Q^{(0)}$,$(\Delta U^2)^{(0)}$;

(3) 将电压初始值代入式(6)和式(7),可以求出修正方程式中雅可比矩阵的各元素;

(4) 求解修正方程式(5),把修正量 $\Delta e^{(0)}$ 和 $\Delta f^{(0)}$ 求解出来,进而可以修正各节点电压 $e^{(1)} = e^{(0)} + \Delta e^{(0)}$,$f^{(1)} = f^{(0)} + \Delta f^{(0)}$;

(5) 再将 $e^{(1)}$ 和 $f^{(1)}$ 代入式(3)和式(4),求出 $\Delta P^{(1)}$,$\Delta Q^{(1)}$,$(\Delta U^2)^{(1)}$;

(6) 校验是否收敛,即是否满足条件 $\max\{|\Delta P_i^{(k)}, \Delta Q_i^{(k)}|\} < \varepsilon$.

若收敛,到此迭代过程便可以结束,从而可以计算各线路的潮流情况以及平衡节点的功率. 若不收敛,则回到步骤(3)进行下一次迭代计算,直至收敛为止.

2.2　用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算的源程序清单及计算结果

根据牛顿-拉夫逊法潮流计算的基本步骤,再结合其基本原理,通过 MATLAB 软件可以编写出用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算的程序. 通过 MATLAB 软件运行牛顿-拉夫逊法潮流计算的程序,并结合系统接线图以及原始参数输入所需的数据,最终可以求得该系统的潮流计算结果,主要包括各节点的电压值和相位角,以及各支路的功率. 图 1 为每次迭代后各节点的电压标幺值.

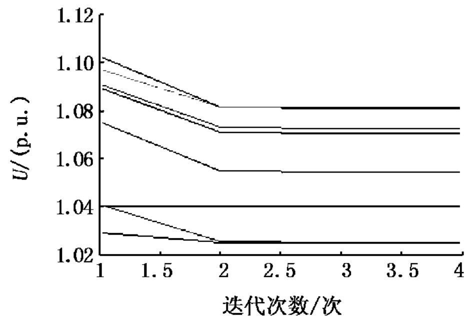

图 1　每次迭代后各节点的电压标幺值

由图 1 可以看出,经过 4 次迭代后,各节点电压都分别保持在一个恒定值,说明潮流计算是收敛的.

3　用 PSASP 软件进行调试

根据任务设计的要求,要对一个 9 节点的典型系统进行潮流计算,计算其在正常运行方式下的潮流. 针对本系统的特点,采用 PSASP 软件进行调试,最终求得该系统的潮流计算结果,并对其潮流计算结果进行报表的输出、图示化的输出[5],以及在运行模式下系统单线图的输出. 潮流计算结果的图示化输出如图 2 所示.

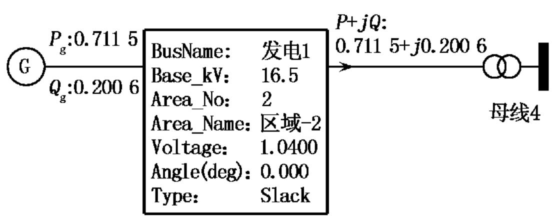

图 2　发电 1 母线结果示意

由图 2 可以直接读出发电 1 的有功功率标幺值为 0.711 5,无功功率的标幺值为 0.200 6,节点电压的标幺值为 1.040 等结果. 通过其他的图示化输出也可以方便地获得潮流计算结果的其他信息.

单线图上的潮流计算结果如图 3 所示.

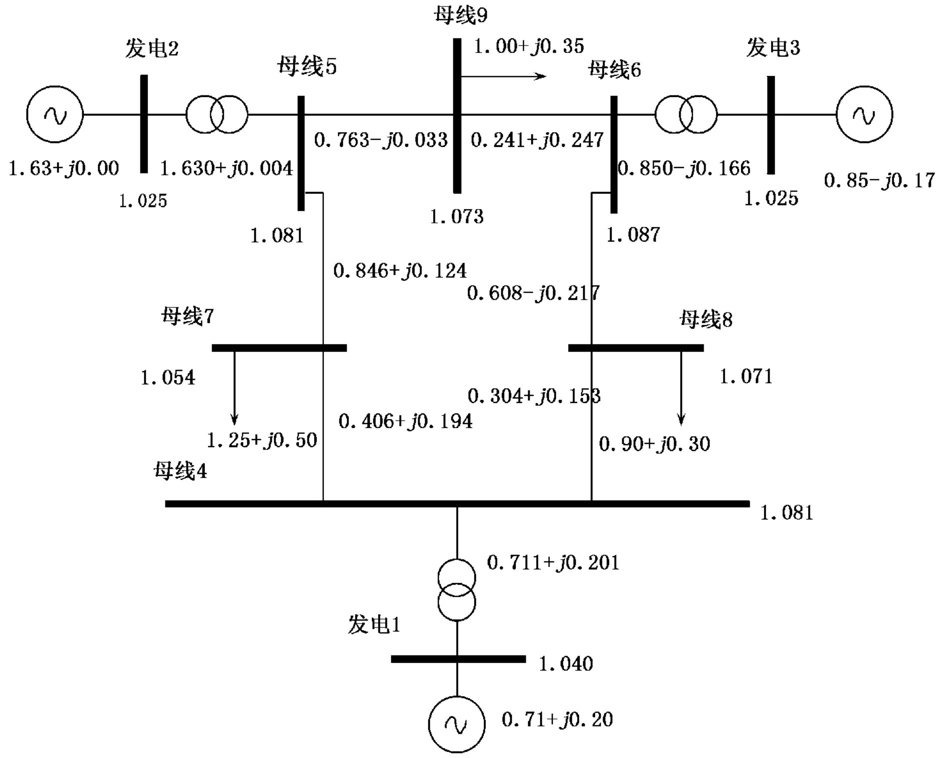

图 3　单线图潮流计算结果

4　结　论

(1) 潮流计算是电力系统分析与规划中的一种最基本、最重要的电气计算，是电力系统安全运行和规划，以及可靠性分析和优化的基础;

(2) 将 PSASP 软件报表输出中的计算结果与 MATLAB 程序得出的潮流计算结果对比后发现，二者的潮流计算结果基本一致，这就进一步验证了用 MATLAB 程序实现潮流计算的可行性;

(3) 利用 MATLAB 程序可以方便地求出其他任何节点数的系统潮流结果，而 PSASP 软件提供的牛顿-拉夫逊法等 5 种计算方法，保证了系统潮流结果良好的收敛性，还实现了灵活多样的潮流计算结果报表和图示化的输出，以便分析研究.

参考文献:

[1] 郗忠梅. 基于 MATLAB 的电力系统潮流计算[J]. 山东农业大学学报，2010，41(2): 291-294.

[2] 杨清，高雁. 基于 PSASP 的潮流计算及其应用[J]. 电测与仪表，2010，47(7A): 78-81.

[3] 周卫星，张颖. 基于 MATLAB 的电力系统潮流计算[J]. 科技咨询导报，2007(10): 70-71.

[4] 何仰赞，温增银. 电力系统分析: 下册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社，2002: 57-61.

[5] 张伟，郭伟. 基于 PSASP 的电力系统潮流计算研究[J]. 中国现代教育装备，2010(7): 74-75.

（编辑　胡小萍）