DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2008.s1.068

文章编号:1001-7445(2008)增-0182-03

完全矩阵形式的牛顿潮流计算

柳 影

(广西电力工业勘察设计研究院,广西 南宁 530023)

摘要:在极坐标形式的潮流方程的基础上,推导出该潮流方程的矩阵形式,并给出了牛顿法潮流计算的修正方程式以及支路功率计算公式的矩阵形式.这组公式可以简化利用Matlab编写潮流计算的程序.并且通过算例证明,提出的矩阵形式潮流计算公式是正确的.

关键词:潮流计算;极坐标公式;牛顿法;Matlab
中图分类号:O151 **文献标识码**:A

The newton power flow computation of complete matrix version

LIU Ying
(Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute,Nanning 530023,China)

Abstract: In this paper, on the basis of polar power flow equations, presents the matrix versions of the power flow equations, and given the matrix versions of revised equation and power of branches for Newton power flow calculation. These formulas can make the flow algorithm easier by means of Matlab. And prove the correctness and usefulness by casus.

Key words: power flow computation; polar power flow equations; newton's method; Matlab

在电力系统的规划设计和现有电力系统运行方式的研究中,都需要利用潮流计算来定量地分析比较供电方案或运行方式的合理性、可靠性和经济性.虽然有一些相关的软件可以进行潮流计算,但对于工程人员和研究人员往往还需要编写自己的潮流计算程序.

Matlab是集数值计算、符号运算及图形处理等强大功能于一体的科学计算语言.现已成为工程计算中普遍采用的工具.它是一种解释性语言,它采用了工程技术的计算语言,而且几乎与数学表达式相同,语言中基本元素是矩阵,强大的矩阵处理功能越来越受到世人的关注,可提供各种矩阵的运算和操作[1].

潮流计算中都含有大量矩阵,如节点导纳矩阵、雅可比矩阵等.Matlab的这一强大的矩阵处理功能能给电力系统的分析、计算带来许多方便[2].可实现潮流计算中的矩阵求积、求转置、稀疏矩阵形成、直接求解线性方程组以及初等数学运算等.因此我们试图将这一语言全面引入电力系统分析与计算.这就要求我们将电力系统的计算公式推导成矩阵形式.

1 潮流计算问题的数学模型

电力系统潮流计算是研究电力系统稳态运行情况的一种计算,它根据给定的运行条件及系统接线情况确定整个电力系统各部分的运行状态[4].

在工程实际中,潮流计算可归结为已知各节点的注入功率,求解各节点的电压向量.其极坐标形式的节点功率方程[5]为:

收稿日期:2008-01-21;修订日期:2008-03-17
作者简介:柳 影(1981-),女,重庆垫江人,广西电力工业勘察设计研究院助理工程师.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\left.\begin{aligned}P_i - U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) = 0\\ Q_i - U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) = 0\end{aligned}\right\},$$

$$i = 1,2,\cdots,n. \tag{1}$$

下面对公式(1)的第一部分(即有功功率方程)进行如下变换:

$$U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) =$$

$$\begin{bmatrix} U_1U_1(G_{11}\cos\theta_{11} + B_{11}\sin\theta_{11}) + \cdots + \\ U_1U_n(G_{1n}\cos\theta_{1n} + B_{1n}\sin\theta_{1n}) \\ U_2U_1(G_{21}\cos\theta_{21} + B_{21}\sin\theta_{21}) + \cdots + \\ U_2U_n(G_{2n}\cos\theta_{2n} + B_{2n}\sin\theta_{2n}) \\ \vdots \\ U_nU_1(G_1\cos\theta_{n1} + B_{n1}\sin\theta_{n1}) + \cdots + \\ U_nU_n(G_{nn}\cos\theta_{nn} + B_{nn}\sin\theta_{nn}) \end{bmatrix} =$$

$$\mathrm{diag}[U][G\cos\theta + B\sin\theta][U].$$

同理无功功率方程也可以进行相应的变换得矩阵形式.则(1)式可以表示为:

$$\left.\begin{aligned}P - \mathrm{diag}[U][G\cos\theta + B\sin\theta][U] = 0\\ Q - \mathrm{diag}[U][G\sin\theta - B\cos\theta][U] = 0\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

上式中,P,Q和U为n维列向量,分别为各节点的注入有功、注入无功、电压模值;$\mathrm{diag}[U]$表示以U的元素为对角元数的对角矩阵;G,B,θ为n维的方阵,分别为节点导纳矩阵的实部和虚部以及各节点的电压相位差,$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$. 注意$\cos\theta$表示$\theta$中的元素都取余弦值,$G\cos\theta$表示两个矩阵中的对应元素相乘.

2　牛顿潮流计算

电力系统的潮流计算问题在数学上是一组多元非线性方程式的求解问题.牛顿法是数学中解决非线性方程式的经典方法,有较好的收敛性.实践表明牛顿法是目前解决潮流问题时使用最为广泛、效果最好的一种方法.应用牛顿法求解非线性方程式的迭代格式如下:

$$f'(x^{(k)})\Delta x^{(k)} = -f(x^{(k)}),$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}.$$

上两式中,$f'(x)$是对于变量x的一阶偏导矩阵,即雅可比矩阵$\boldsymbol{J}$;k为迭代次数;其中第一个式子也称为修正方程式.

使用牛顿法解电力系统潮流计算的核心是反复建立并求解修正方程式,根据(2)式可得潮流计算的修正方程式的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} -\dfrac{\partial\Delta P}{\partial\theta} & -\dfrac{\partial\Delta P}{\partial U} \\ -\dfrac{\partial\Delta Q}{\partial\theta} & -\dfrac{\partial\Delta Q}{\partial U}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\Delta\theta \\ \Delta U\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\Delta P \\ -\Delta Q\end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$\Delta P = P - \mathrm{diag}[U][G\cos\theta + B\sin\theta][U],$$

$$\Delta Q = Q - \mathrm{diag}[U][G\sin\theta - B\cos\theta][U],$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta\theta} = \mathrm{diag}[U]\mathrm{diag}([-G\sin\theta + B\cos\theta][U]) + \mathrm{diag}[U][G\sin\theta - B\cos\theta]\mathrm{diag}[U],$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta U} = \mathrm{diag}([G\cos\theta + B\sin\theta][U]) + \mathrm{diag}[U][G\cos\theta + B\sin\theta],$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta\theta} = \mathrm{diag}[U]\mathrm{diag}([G\cos\theta + B\sin\theta][U]) - \mathrm{diag}[U][G\cos\theta + B\sin\theta]\mathrm{diag}[U],$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta U} = \mathrm{diag}([G\cos\theta - B\sin\theta][U]) + \mathrm{diag}[U][G\cos\theta - B\sin\theta].$$

(3)式中等式左边的第一个矩阵为雅可比矩阵,它是一个$2n$维的方阵.

雅可比矩阵的处理:应该注意到,平衡节点的有功功率、无功功率及PV节点的无功功率都没有预先给定,则相应的ΔP,ΔQ也就失去了约束作用,因此(3)式中的平衡节点以及PV节点的无功不平衡量(即分量ΔQ)所对应的行和列应该置为零(主对角元素除外).

3　网络的功率分布

用牛顿法迭代完成后,还要算出网络中的功率分布.支路功率的计算公式[5]如下.

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{U}_i\dot{I}_{ij} = U_i^2\dot{y}_{ij0} + \dot{U}_i(\dot{U}_i - \dot{U}_j)\dot{y}_{ij}. \tag{4}$$

上式中,P_{ij},Q_{ij}为支路$i \to j$从节点i流向节点j的有功和无功,y_{ij0}为支路$i \to j$在i侧的对地等效导纳;y_{ij}支路导纳,与节点导纳矩阵的对应元素符号相反.(4)式还可以进行以下变形:

$$S' = P' + jQ' = \mathrm{diag}[U^2][G_0 - jB_0] + \mathrm{diag}[U^2][-G' + jB'] - \mathrm{diag}[U][(-G' + jB')\mathrm{e}^{j\theta}]\mathrm{diag}[U],$$

$$P' = \mathrm{diag}[U^2][G_0] - \mathrm{diag}[U^2][G'] + \mathrm{diag}[U][G'\cos\theta + B'\sin\theta]\mathrm{diag}[U]. \tag{5}$$

$$Q' = -\mathrm{diag}[U^2][B_0] + \mathrm{diag}[U^2][B'] + \mathrm{diag}[U][G'\sin\theta - B'\cos\theta]\mathrm{diag}[U]. \tag{6}$$

上三式中,G',B'为对角元素置为零后的节点导纳矩阵的实部和虚部;G_0,B_0为支路对地等效导纳矩阵的实部和虚部;S',P'和Q'均为n维的方阵.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用上面的矩阵形式的支路功率计算公式，可以一步直接算出网络中功率分布情况，节点 i 到节点 j 的支路功率对应方阵 S' 中的 S_{ij}.

4 算 例

采用本文提出矩阵形式的潮流计算公式，对文献[5]中的例11－5 的简单电力系统进行计算. 取收敛判据 $\epsilon=10^{-5}$. 经过3 次迭代后收敛，得到节点电压向量如表1，平衡节点的注入功率为0.3679＋j0.2647，按(5)式和(6)式计算网络中支路功率分布如表2.

表1 迭代后的节点电压向量

Tab.1 Vector of node-voltage after iteration

节点号	电压模值	电压相位
1	0.9847	－0.0087rad
2	0.9648	－0.1126rad
3	1.1000	0.1175rad
4	1.0500	0.0000rad

表2 迭代后计算的全部支路功率

Tab.2 All power of branches

支路 $i \to j$	支路功率
(2→1)	－0.2400＋j0.0106
(3→1)	0.5000＋j0.0934
(4→1)	0.0482＋j0.1045
(1→2)	0.2462－j0.0146
(4→2)	0.3197＋j0.1602
(1→3)	－0.5000－j0.0293
(1→4)	－0.0462－j0.1361
(2→4)	－0.3100－j0.1406

上面的计算结果跟文献[5]中的结果是一致的. 为了进一步说明公式的通用性，对IEEE-14 节点系统及IEEE-30 节点系统进行了潮流计算，均能正确计算出结果.

5 结 论

本文提出了完全矩阵形式的潮流计算公式，包括节点功率方程、牛顿法潮流计算的修正方程式以及支路功率计算公式，并且在支路功率的计算中充分利用了功率方程中的节点导纳矩阵. 极大地方便了工程人员及研究人员利用Matlab 编写潮流计算的程序. 通过算例说明了公式推导的正确性.

这种矩阵形式的思想在直角坐标的潮流计算中同样是适用的.

参考文献：

[1] 连小洲，焦 洁. Matlab 在电力系统计算中的应用[J]. 江西电力职业技术学院学报，2005，18(4)：10-11.

[2] 刘 军，刘学军. Matlab 在电力系统分析中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报，2000，12(2)：23-25，31.

[3] 张 宁，张 渭，韩 勇. 基于Matlab 的电力系统的潮流计算[J]. 西北水电. 2004，2004(4)：63-65.

[4] 西安交通大学，清华大学等. 电力系统计算[M]. 北京：水利电力出版社，1978.

[5] 何仰赞，温增银. 电力系统分析(下册)(第3版)[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2002.

(责任编辑 梁碧芬)

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net