电流型牛顿法潮流

王宗义[1],郭志忠[1,2]
(1. 哈尔滨工业大学电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 许继电力科学研究院,北京 100085)

摘要: 提出了电流型牛顿法潮流的一般算法,该算法潮流方程基于节点电流平衡,雅可比矩阵与传统功率型牛顿法潮流相比,具有形式整齐、便于编程实现的特点。在处理 PV节点时,引入 PV节点无功注入功率作为状态变量,使得处理 PV节点与 PQ节点相互转化问题非常方便。算例表明,该方法与传统的功率型牛顿潮流具有相同的收敛性,是对牛顿法潮流理论的补充。

关键词: 电力系统; 潮流算法; 电流平衡方程

中图分类号: TM711 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)18-0027-03

0 引言

潮流计算作为电力网络分析的基本计算之一,其基本方法在二十世纪六、七十年代已经确立[1,2]。以后随着网络解算规模的扩大、各种控制手段的在线实施以及系统优化的要求,潮流计算方法得到了进一步发展[3]。在直角坐标系下,潮流方程的表达型式也出现了一些新的发展[4~6]。文献[6]根据电力系统潮流计算网络本身线性而节点注入非线性的特点,提出了一种电流注入型潮流算法,每次迭代形成雅可比矩阵时只修改对角元素,形式整齐、物理意义清晰,但在处理 PV节点时无法保留这种特点。

本文在文献[6]的基础上,提出了电流型牛顿法潮流算法的一般形式,并通过实例计算就收敛性与传统的功率型牛顿法潮流进行了对比,最后总结了本方法的特点。

1 修正方程式的推导

设电力网络节点数为 n,对于节点 i,节点注入电流

$$\Delta I_i(\mathrm{V}, P_i, Q_i) = \sum_{j=1}^{n} y_{ij}\mathrm{V}_j - \frac{P_i - jQ_i}{\hat{\mathrm{V}}_i} = 0 \quad (1)$$

其中:V为网络节点电压向量; P_i、Q_i 为节点 i的有功、无功注入功率; y_{ij}为节点导纳矩阵元素; ^表示共轭。在直角坐标下,式(1)写成实数形式,

$$\begin{bmatrix}\Delta I_{Xi}\\ \Delta I_{Yi}\end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n}\begin{bmatrix}G_{ij} & -B_{ij}\\ B_{ij} & G_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{Xj}\\ V_{Yj}\end{bmatrix} - \frac{1}{V_{Xi}^2+V_{Yi}^2}\begin{bmatrix}V_{Xi} & V_{Yi}\\ V_{Yi} & -V_{Xi}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_i\\ Q_i\end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)在(V, P_i, Q_i)处根据 Taylor公式展开,

$$\Delta I_i(\mathrm{V} - \Delta\mathrm{V}, P_i - \Delta P_i, Q_i - \Delta Q_i) = 0 \quad (3)$$

只保留一次项,得

$$\Delta I_i(\mathrm{V}, P_i, Q_i) = \sum_{j=1}^{n} y_{ij}\Delta\mathrm{V}_j - \frac{\Delta P_i - j\Delta Q_i}{\hat{\mathrm{V}}_i} + \frac{P_i - jQ_i}{\hat{\mathrm{V}}_i^2}\Delta\hat{\mathrm{V}}_i \quad (4)$$

在直角坐标系下,式(4)可写成下面的实数形式,

$$\begin{bmatrix}\Delta I_{Xi}\\ \Delta I_{Yi}\end{bmatrix} = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\begin{bmatrix}G_{ij} & -B_{ij}\\ B_{ij} & G_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta V_{Xj}\\ \Delta V_{Yj}\end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix}G_{ii} & -B_{ii}\\ B_{ii} & G_{ii}\end{bmatrix} + \mathrm{D}_{ii}\right)\begin{bmatrix}\Delta V_{Xi}\\ \Delta V_{Yi}\end{bmatrix} - \frac{1}{V_{Xi}^2+V_{Yi}^2}\begin{bmatrix}V_{Xi} & V_{Yi}\\ V_{Yi} & -V_{Xi}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta P_i\\ \Delta Q_i\end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$\mathrm{D}_{ii} = \frac{1}{(V_{Xi}^2+V_{Yi}^2)^2}\begin{bmatrix}V_{Xi} & -V_{Yi}\\ V_{Yi} & V_{Xi}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{Xi} & V_{Yi}\\ V_{Yi} & -V_{Xi}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}P_i & -Q_i\\ Q_i & P_i\end{bmatrix} \quad (6)$$

对于 PQ节点,由于节点有功、无功注入功率保持不变,所以有

$$\begin{cases}\Delta P_i = 0\\ \Delta Q_i = 0\end{cases} \quad (7)$$

式(7)相当于在传统牛顿法潮流中节点给定功率 $\Delta P_{is} = 0$和 $\Delta Q_{is} = 0$。

$$\begin{bmatrix}\Delta I_{Xi}\\ \Delta I_{Yi}\end{bmatrix} = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\begin{bmatrix}G_{ij} & -B_{ij}\\ B_{ij} & G_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta V_{Xj}\\ \Delta V_{Yj}\end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix}G_{ii} & -B_{ii}\\ B_{ii} & G_{ii}\end{bmatrix} + \mathrm{D}_{ii}\right)\begin{bmatrix}\Delta V_{Xi}\\ \Delta V_{Yi}\end{bmatrix} \quad (8)$$

对于 PV 节点,只有节点有功注入功率保持不变,所以有

$$\begin{cases}\Delta P_i = 0\\ \Delta Q_i \neq 0\end{cases} \tag{9}$$

$$\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij}\\ B_{ij} & G_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta V_{Xj}\\ \Delta V_{Yj}\end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} G_{ii} & -B_{ii}\\ B_{ii} & G_{ii}\end{bmatrix} + \mathrm{D}_{ii}\right)\cdot \begin{bmatrix}\Delta V_{Xi}\\ \Delta V_{Yi}\end{bmatrix} - \frac{1}{V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2}\begin{bmatrix} V_{Yi}\\ -V_{Xi}\end{bmatrix}\Delta Q_i = \begin{bmatrix}\Delta I_{Xi}\\ \Delta I_{Yi}\end{bmatrix} \tag{10}$$

故考虑引入 PV 节点的无功注入功率 Q 作为状态变量。

对于 PV 节点电压幅值的约束,有

$$\Delta|\mathrm{V}_i|^2 = (V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2) - V_{is}^2 \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{11}$$

其牛顿法修正方程形式为:

$$\Delta|\mathrm{V}_i|^2 = 2V_{Xi}\Delta V_{Xi} + 2V_{Yi}\Delta V_{Yi} \tag{12}$$

设系统节点数为 n,不失一般性,n 为松弛节点,1 至 m 为 PV 节点,$m+1$ 至 $n-1$ 为 PQ 节点,电流型潮流修正方程式的一般形式为:

$$\begin{bmatrix} (\mathrm{Y}+\mathrm{D})_{2(n-1)\times 2(n-1)} & N_{2(n-1)\times m}\\ M_{m\times 2(n-1)} & O_{m\times m}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta V_{X1}\\ \Delta V_{Y1}\\ \cdots\\ \Delta V_{Xn-1}\\ \Delta V_{Yn-1}\\ \Delta Q_1\\ \cdots\\ \Delta Q_m\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\Delta I_{X1}\\ \Delta I_{Y1}\\ \cdots\\ \Delta I_{Xn-1}\\ \Delta I_{Yn-1}\\ \Delta|V_1|^2\\ \cdots\\ \Delta|V_m|^2\end{bmatrix} \tag{13}$$

其中:对于对角块 $(\mathrm{Y}+\mathrm{D})_{2(n-1)\times 2(n-1)}$,Y 为导纳矩阵的实数形式,

$$\mathrm{Y} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11}\\ B_{11} & G_{11}\end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1(n-1)} & -B_{1(n-1)}\\ B_{1(n-1)} & G_{1(n-1)}\end{bmatrix}\\ \cdots & & \cdots\\ \begin{bmatrix} G_{(n-1)1} & -B_{(n-1)1}\\ B_{(n-1)1} & G_{(n-1)1}\end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{(n-1)(n-1)} & -B_{(n-1)(n-1)}\\ B_{(n-1)(n-1)} & G_{(n-1)(n-1)}\end{bmatrix}\end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\mathrm{D} = \mathrm{Diag}(D_{11}, D_{22}, \cdots, D_{(n-1)(n-1)}) \tag{15}$$

其中:D_{ii} 的定义见式(6),其中 P_i 取节点给定有功功率,Q_i 对于 PQ 节点取节点给定无功功率,对于 PV 节点取最新计算值。这样每次迭代形成雅可比矩阵时,(Y+D)块中只有 D 发生变化,并且 D_{ii} 只与 i 节点的 P_i、Q_i、V_{Xi} 和 V_{Yi} 有关。$O_{m\times m}$ 元素全为零。

$M_{m\times 2(n-1)}$ 每行只有两个非零元素,

$$\begin{cases} M(i, 2i-1) = 2V_{Xi}\\ M(i, 2i) = 2V_{Yi}\end{cases} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{16}$$

$N_{2m\times m}$ 块每列只有两个非零元素,

$$\begin{cases} N(2i-1, i) = -\dfrac{V_{Yi}}{V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2}\\ N(2i, i) = \dfrac{V_{Xi}}{V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2}\end{cases} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{17}$$

$\begin{bmatrix}\Delta I_{Xi}\\ \Delta I_{Yi}\end{bmatrix}$ 的计算见式(2),式中 P_i 取节点给定有功功率,Q_i 对于 PQ 节点取节点给定无功功率,对于 PV 节点取最新计算值。$\Delta|\mathrm{V}_i|^2$ 的计算见式(11)。

2 电流型牛顿法潮流计算步骤

1)原始数据处理,形成导纳矩阵。

2)状态变量赋初值。

对于 PV 节点,$V_{Xi} = |\mathrm{V}_{is}|$,$V_{Yi} = 0.0$,$i = 1, 2, \cdots, m$。

对于 PQ 节点,$V_{Xi} = 1.0$,$V_{Yi} = 0.0$,$i = m+1, \cdots, n-1$。

对于 PV 节点的无功注入功率,$Q_i = 0.0$。

置迭代次数 $k = 0$。

3)计算 ΔI_{Xi}、ΔI_{Yi} $(i = 1, 2, \cdots, n-1)$ 和 $\Delta|\mathrm{V}_i|^2$ $(i = 1, 2, \cdots, m)$,若各项的绝对值均小于 ε,则迭代收敛,输出计算结果,计算结束。否则,转 4)。

4)解修正方程式(13),利用式(18)、(19)修正状态变量,

$$\begin{cases} V_{Xi}^{(k+1)} = V_{Xi}^{(k)} - \Delta V_{Xi}^{(k)}\\ V_{Yi}^{(k+1)} = V_{Yi}^{(k)} - \Delta V_{Yi}^{(k)}\end{cases} \quad (i = 1, 2, \cdots, n-1) \tag{18}$$

$$Q_i^{(k+1)} = Q_i^{(k)} - \Delta Q_i^{(k)} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{19}$$

$k \leftarrow k+1$,转 3)。

3 与传统的功率型牛顿法潮流的比较

本文提出的电流型潮流算法的潮流方程式基于节点电流平衡,由式(4)可以看出,引起节点注入电流变化的因素有两种:一是节点注入功率,二是节点电压。D_{ii} 的物理意义在于当节点注入功率不变而

仅仅由于节点电压变化而引起的注入电流变化在导纳矩阵中的附加项。

传统的功率型潮流方程式是基于节点功率平衡,对于相同的节点,与电流型潮流方程是一致的,因此两者的计算结果应该完全相同。对于式(8),两边乘以$\begin{bmatrix} V_{Xi} & V_{Yi} \\ V_{Yi} & -V_{Xi} \end{bmatrix}$,并且 D_{ii}中节点注入功率 P_i 和 Q_i 取计算功率值 P_{ie}和 Q_{ie},即

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ie} \\ Q_{ie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Xi} & V_{Yi} \\ V_{Yi} & -V_{Xi} \end{bmatrix} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left\{ \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & V_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Xj} \\ V_{Yj} \end{bmatrix} \right\} \tag{20}$$

可以得到与传统牛顿法修正方程式完全相同的形式。因为 P_i、Q_i 和 P_{ie}、Q_{ie}只有在迭代结束后才相等,所以两种方法在迭代中间结果是有差别的。

传统牛顿法潮流的雅可比矩阵所有非零元素在迭代过程中不断变化,而本文提出的算法之($Y+D$)部分只有对角元(块)发生变化,其余为导纳矩阵元素,形式整齐,便于编程实现。PV 节点无功功率 Q 作为状态变量的引入,虽然修正方程式维数增加,由于系数矩阵增加的部分高度稀疏,采用稀疏技术后,增加的存贮量和计算量并不明显,在处理 PV 节点与 PQ 节点相互转换时非常方便。

4　算例分析

本文提出的方法经 IEEE14、30、57、118 节点系统测试,计算结果和收敛速度与常规的功率型牛顿法方法完全相同,每次迭代最大残差见表 1至表 4 ($\varepsilon=0.001$)。

表 1　IEEE14节点系统测试结果

Tab. 1　Results for IEEE14 bus system

迭代次数	最大残差 /p. u	
k	功率型潮流	电流型潮流
0	- 0. 921 935	- 0. 924 345
1	0. 227 793	0. 070 612
2	0. 006 869	- 0. 003 985
3	- 0. 000 005	0. 000 001

表 2　IEEE30节点系统测试结果

Tab. 2　Results for IEEE30 bus system

迭代次数	最大残差 /p. u	
k	功率型潮流	电流型潮流
0	- 0. 933 974	0. 924 727
1	- 0. 207 049	0. 074 574
2	- 0. 006 770 9	- 0. 005 282
3	- 0. 000 009	0. 000 001

表 3　IEEE57节点系统测试结果

Tab. 3　Results for IEEE57 bus system

迭代次数	最大残差 /p. u	
k	功率型潮流	电流型潮流
0	2. 865 397	- 2. 851 141
1	- 0. 331 269	0. 194 943
2	- 0. 009 580	- 0. 004 139
3	- 0. 000 030	0. 000 000

表 4　IEEE118节点系统测试结果

Tab. 4　Results for IEEE118 bus system

迭代次数	最大残差 /p. u	
k	功率型潮流	电流型潮流
0	15. 088 481	- 15. 088 481
1	- 9. 643 848	- 1. 365 498
2	- 1. 029 035	- 0. 614 866
3	- 0. 010 258	- 0. 061 662
4	0. 000 007	- 0. 000 956

5　结论

本文提出的电流型牛顿潮流算法与传统的功率型方法具有相同的收敛性。虽然电流型方法修正方程式维数增加,由于系数矩阵增加的部分高度稀疏,采用稀疏技术后,增加的存贮量和计算量并不明显。

电流型方法的主要优点有: 1) 雅可比矩阵($Y+D$)部分在每次迭代过程中只有对角块发生变化,形式整齐,便于编程实现; 2) PV 节点无功功率 Q 作为状态变量的引入,使得处理 PV 节点与 PQ 节点相互转换非常方便。

参考文献:

[1]　Tinney W F, Hart C E. Power Flow Solution by Newton's Method[J]. IEEE Trans on PAS, 1967, 86(11): 1449-1460.

[2]　Scott B. Review of Load Flow Calculation Methods[J]. Proceedings of IEEE, 1974, 62(7): 916-929.

[3]　Arrillaga J, Watson N R. Computer Modelling of Electrical Power Systems, Second Edition[M]. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

[4]　程浩忠. 电力系统直角坐标潮流二次方程新的表达型式[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 211-213.
CHENG Hao-zhong. A Novel Quadratic Formulation of Load Flow Equations in Rectangular Coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 211-213.

[5]　Sun W K, Mellopoulos A P. Contingency Selection via Quadratized Power Flow Sensitivity Analysis[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2002. 1494-1499.

(下转第 48页　continued on page 48)

GUO Shang-hua, HUANG Chun, et al. Detection and Suppression Methods for Voltage Fluctuation and Flicker [J]. Relay, 2004, 32 (3): 45-48.

[2] Jewell W. Power Quality Laboratory Testing [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002: 13-15.

[3] 张香真,张建成. 一种电能质量干扰发生器的研究及仿真 [J]. 供用电, 2004, 21 (1): 27-29.
ZHANG Xiang-zhen, ZHANG Jian-cheng. Research and Simulation on Power Quality Disturbances Generator Testing Facility [J]. Distribution & Utilization, 2004, 21 (1): 27-29.

[4] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

收稿日期: 2005-01-26; 修回日期: 2005-05-29

作者简介:

钟 云 (1976 -),女,硕士研究生,从事电力电子技术在电力系统中的应用,电能质量控制技术的研究; E - mail: powerquality@163.com

张建成 (1965 -),男,副教授,博士后,从事电力系统分析与控制、新型电能储存技术和电能质量控制技术的研究;

刘爱国 (1965 -),男,副教授,从事电力系统分析与控制和电能质量控制技术的研究。

Research on the new-style power quality disturbance source

ZHONG Yun[1,2], ZHANG Jian-cheng[1], LIU Ai-guo[2]

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: This paper introduces two types of the traditional disturbance source. Compared with their deficiencies, a new-style power quality disturbance source that adopts the DSP technology and double loop control strategy is presented. MATLAB simulation and test results show that the new-style power quality disturbance source can generate many types of power quality disturbance, such as symmetry or asymmetry abnormal waveform and voltage sags, etc. And the simple structure is easily realized, which verify its validity.

Key words: power quality; disturbance; inverter

(上接第 29页 continued from page 29)

[6] 牛辉,郭志忠. 电流注入模型的电力系统潮流计算 [J]. 电网技术, 1998, 22 (11): 39-41.
NIU Hui, GUO Zhi-zhong. Power Flow Algorithm Based on Current-influx Model [J]. Power System Technology, 1998, 22 (11): 39-41.

收稿日期: 2004-12-07

作者简介:

王宗义 (1971 -),男,博士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: zongyiw@bjxj - xjgc.com

郭志忠 (1961 -),男,博士,教授,博士生导师,当前主要研究方向为电力系统分析与控制、光学电流互感器等。

Newton load flow algorithm based on current balance equations

WANG Zong-yi[1], GUO Zhi-zhong[1,2]

(1. Dept of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. XJ Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: A novel Newton load flow algorithm based on current balance equations is presented. Comparative study shows this method is the same as traditional Newton load flow based on power balance equations in convergence. In the simplicity of forming Jacob matrix and processing the transition of PV to PQ, this method has its advantages.

Key words: power system; load flow algorithm; current balance equation