

信号流图在配电网潮流计算中的应用

熊志伟, 蔡金锭

(福州大学电气学院, 福建 福州 350002)

摘要: 为了解决采用传统方法进行配电网潮流计算所面临的实际困难, 提出了基于流图理论求解线性方程的配电网潮流计算新方法, 避免了繁琐的矩阵运算, 提高了计算精度, 克服了传统算法不适用的配电网特殊环境带来的影响, 且该方法不存在计算的收敛性问题及其多解问题, 避免了传统的潮流方法的纯“数值计算”所带来的各种误差。

关键词: 配电网潮流; Char-Mai流图; 迭代法

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)19-0018-04

0 引言

配电网潮流计算是网络分析的基础, 城网规划、网络重构等都需要配网潮流的数据。配电网的特点决定了配电网潮流计算算法的特殊性, 配电网与输电网结构上的不同造成雅可比矩阵元素对角优势遭到破坏, 条件数增大, 并容易造成病态网络, 不可避免地使经典潮流算法陷入困境, 比如配电网的高 R/X 比无法满足 PQ 解耦条件, 所以使快速解耦法在配网计算中难以收敛。因此, 寻求一种适合于配电网特殊结构的收敛可靠, 计算准确, 计算较快的配网潮流计算方法十分必要^[1-3]。

把流图理论应用于配电网的潮流计算, 为求解潮流计算方程提供了一个有效工具。简化了潮流计算的繁琐过程, 提高了计算速度, 同时可以在流图法中引入符号计算方法, 避免了传统的潮流方法的纯“数值计算”所带来的各种误差, 且该方法不存在计算的收敛性问题及其多解问题。本文采用 Char-Mai图分析原理, 相对于 Mason图和 Coates图原理, 改进了前两种方法的复杂的流图建立过程和分析过程^[4]。

该方法先通过建立电力网络的拓扑模型生成拓扑网络, 再利用流图的节点分析法, 生成 Char-Mai流图和相应子图, 求其分离积, 从而得到整个线性方程的解。这种方法避免了求解非线性方程, 不必进行行列式的展开和代数余子式的计算, 而且不需要写出行列式和代数余子式, 克服了传统数值计算的不足, 另外, 传统的潮流方法都是纯“数值计算”, 利用这些方法计算出来的结果是数字而不是函数, 它们的特点是逐点进行完整的数值计算, 因而不可避免地存在收敛性问题, 冗余项对消问题, 计算机有效

字长问题和相近数值求差时发生浮点运算误差问题, 采用流图的方法则很好地避免了这些问题。

1 信号流图求解方程

1.1 Char-Mai流图理论^[5]

定义 1-Char-Mai图 T_z : 设有一线性代数方程组

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

T_z 是方程组的一个有向图。常数 b_i 由常数节点 b_i 表示。变量 x_j 由变量节点 x_j 表示, 如果 $a_{ij} > 0$, 则必有一具有增益 a_{ij} 的有向线段从节点 x_j 到节点 b_i , 将所有常数节点 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 排在上行, 所有的变量节点排在下行, 形成 T_z 。

定义 2图 T_{z_j} : 图 T_{z_j} 是从图 T_z 获得的, 移去节点 x_j 的所有出支路, 然后加一条有向支路, 此支路具有增益 b_i (如果 $b_i > 0$), 方向从节点 x_j 到节点 b_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。

定义 3分离 F : 一个给定的图 (T_z 或 T_{z_j}) 的分离 F 是一个子图, 满足三个要求:

- 1) 包含图 (T_z 或 T_{z_j}) 的所有节点。
- 2) 每个变量节点 x_j , 正好有一条流出的支路。
- 3) 每个常数节点 b_i 恰好有一个流入的支路分离中的竖直支路和非竖直支路。

定义 4分离积 F_p : 分离积 F_p 是分离 F 中所有支路的乘积。

定义 5对称对: 对称对是分离 F 中的一对支路, 一条是从节点 x_i 到节点 b_j , 另一条是从节点 x_j 到节点 b_i ($i \neq j$)。

定义 6非对称支路: 它是分离 F 中非竖直的支路, 不属于 F 中的任何对称对。

定理 1 在具有 n 个未知数的 n 个独立代数方

程组中,

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, (i = 1, 2, \dots, n)$$

变量 x_j 的值,可由下式给定:

$$x_j = \frac{\sum_i (\text{sign} F_{pi}) F_{pi} (T_{zj})}{\sum_k (\text{sign} F_{pk}) F_{pk} (T_z)}$$

其中: $\text{sign} F_{pj} = (-1)^{n_{dj} + n_{jj} - 1}$, ($n_{jj} = 0, j = i$ 或 k)

$$\text{sign} F_{pj} = (-1)^{n_{dj}}, (n_{jj} = 0)$$

n_{di} 是 T_{zj} 中第 i 个分离中的“对称对”的数目, n_{ji} 是 T_{zj} 中第 i 个分离中的不对称的支路数, $F_{pi} (T_{zj})$ 是 T_{zj} 中第 i 个分离积, n_{dk} 是 T_z 中第 k 个分离中的对称对数, n_{pk} 是 T_z 中第 k 个分离中的不对称支路数, $F_{pk} (T_z)$ 是 T_z 中第 k 个分离积。分离积 $F_{pk} (T_z)$ 和 $F_{pi} (T_{zj})$ 的求和,是分别对所有的 T_z 或 T_{zj} 进行。

1.2 获取 CharMai 流图的方法

CharMai 流图可用多种方法获得,既可以从线性方程中直接获得,也可以利用节点分析法或回路分析法直接从电力网络的等值网络图中获得,下面简要介绍节点分析法。

1) 图 T_z 的获取:

a) 在网络中选一个参考节点,连同其他节点标以 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$, 节点的总数为 $n+1$ 。

b) 把常量 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ 放在上行, 变量 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 放在下行, 且 l_j 和 U_j 竖直对立。

c) 从 U_j 到 l_i , 置一有向支路, 有向支路增益等于所有导纳之和。

d) 在网络中, U_i 和 U_j (i, j 节点间连通的各个支路, 必有一对称对存在于 T_z 的节点 U_i 和 U_j 之间, 其支路增益等于网络 N 中连接于 U_i 和 U_j 间的导纳总和之负值。

2) 图 T_z 的获取:

a) 消去 T_z 中在 U_j 节点上所有出支路。

b) 如果有电源连接到网络 N 中的节点 i ($i = 1, 2, \dots, n$), 则在 T_{zj} 中从 U_j 到 l_i 有一条有向支路, 其支路增益等于连接到网络 N 中的节点 U_j 所有电流源之和 (正负号由电流源是进入或离开节点而定)。

2 用流图理论求解电力系统潮流计算方程

2.1 电力网络的数学模型

设一个电力网络由 n 个独立节点组成, 则其节点电压方程为

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = I_i$$

式中: y_{ii} 为节点 i 的自导; y_{ij} (i, j) 为节点 i 与节点 j 之间的互导; U_i 为各独立节点的电压; I_i 为与节点 i 相连的各支路电流源提供的电流代数和。

电力系统的节点一般分为 3 种类型: PQ 节点 (电力系统中的大多数节点都是 PQ 节点); PV 节点; 平衡节点^[1]。

2.2 流图理论应用于配网计算

由于 CharMai 流图理论的线性方程解法对 PQ 节点不能直接适用, 因而本人对此方法进行一定的修改, 采用迭代法对 PQ 节点进行逼近, 从而使 PQ 节点阻抗化, 实现潮流计算方程的线性化, 具体方法如下:

a) 对每个 PQ 节点的电压设定一个初值 $U_1^0, U_2^0, U_3^0, \dots$;

b) 由公式 $Y = S^* / U^2$ 求取 PQ 节点的等效导纳 Y_1, Y_2, Y_3, \dots ;

c) 利用 CharMai 流图理论求解线性方程 $YU = I$, 得到 $U_1^1, U_2^1, U_3^1, \dots$;

d) 求 PQ 节点的电压差值的最大值 $\max\{|U_1^1 - U_1^0|, |U_2^1 - U_2^0|, |U_3^1 - U_3^0|, \dots\}$, 与给定的差值进行比较。如果 \max 大于 ϵ , 则跳回第二步, 否则退出, 最后一次迭代的电压值作为最终的结果。

2.3 系统生成图及子图

对于一个大配电网系统而言, 系统生成树是个繁琐复杂的过程, 随着节点数个支路数的增加, 树的数目成几何倍数增长。国内外已有大量文章讨论此问题。而相对而言采用 CharMai 流图方法所需形成的图很少, 节约了不少时间。本文采用文献 [4] 所提的广义树法来生成图和子图, 详情请参阅文献 [4, 6, 7]。

2.4 举例说明

本文引用四节点算例为例计算各节点电压^[8], 同时将发电机支路用电流源与导纳并联的形式表示, 将节点负荷作为节点的接地支路并用恒定导纳表示 (略去线路电容), 其等效电路模型如图 1 和图 2。

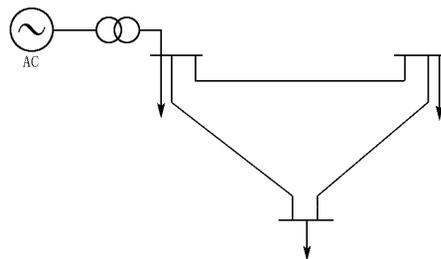


图 1 四节点系统

Fig 1 A four-node system

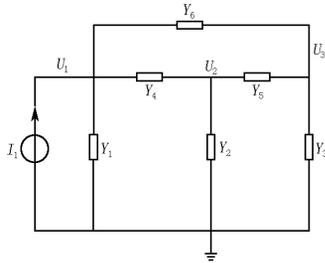


图 2 等效电路

Fig 2 Equivalent circuits

首先形成 CharMai流图 T_z , 由于节点电压的计算过程类似, 故只选其中一个节点作为计算范例, 选择第二个节点, 形成该 CharMai流图 T_z 的第二个节点的子图 T_{z2} 如右图:

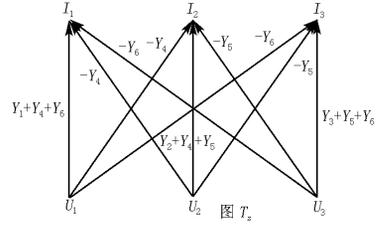


图 T_z

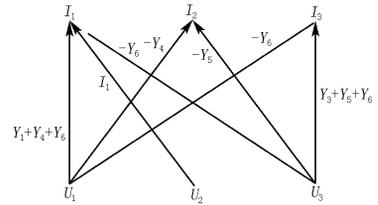


图 T_{z2}

图 T_2

其 T_z 的所有分离如图:

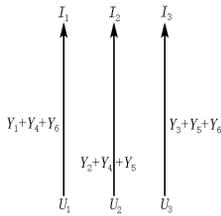


图 $F_1(T_z)$

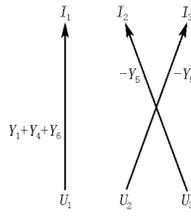


图 $F_2(T_z)$

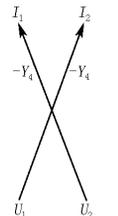


图 $F_3(T_z)$

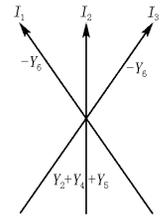


图 $F_4(T_z)$

T_{z2} 的所有分离如图:

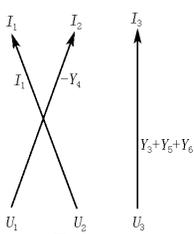


图 $F_1(T_{z2})$

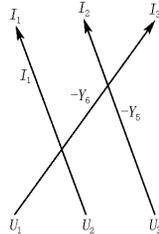


图 $F_2(T_{z2})$

其它节点电压表达式可类推, 在此不再一一罗列。

4 算例分析

本文引用一简单 9 节点的辐射配电网为例进行分析。如图 3。

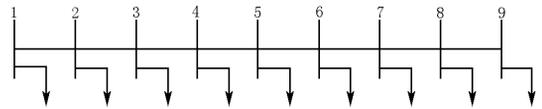


图 3 辐射配电网

Fig 3 Radiating distribution network

其线路参数如表 1, 负荷参数如表 2。

表 1 线路参数

Tab 1 Line parameter

支路号	流出端号	流入端号	R/	X/
1	1	2	0.933	0.655
2	2	3	1.203	0.453
3	3	4	1.079	0.521
4	4	5	2.145	0.964
5	5	6	3.022	1.477
6	6	7	4.5	1.223
7	7	8	2.89	0.818
8	8	9	1.249	0.384

根据公式 1, 那么上面的数学模型中 U_2 的解如下:

$$U_2 = \frac{\sum_i (\text{sign}F_{pi}) F_{pi} (T_{z2})}{\sum_k (\text{sign}F_{pk}) F_{pk} (T_z)} = [(-1)^{1+1-1} I_1 (Y_3 + Y_5 + Y_6) (-Y_4) + (-1)^{0+3-1} I_1 (-Y_5) (-Y_6)] / [(-1)^{0+3-1} (Y_1 + Y_4 + Y_6) (Y_2 + Y_4 + Y_5) (Y_3 + Y_5 + Y_6) + (-1)^{1+1-1} Y_5^2 (Y_1 + Y_4 + Y_6) + (-1)^{1+1-1} Y_4^2 (Y_3 + Y_5 + Y_6) + (-1)^{1+1-1} Y_6^2 (Y_2 + Y_4 + Y_5)] = [Y_3 Y_4 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_6 + Y_5 Y_6] I_1 / [(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_4) (Y_3 + Y_5 + Y_6) + Y_5 (Y_1 + Y_4) (Y_3 + Y_6) + Y_6 (Y_2 + Y_4) (Y_3 + Y_5) + Y_3 Y_5 Y_6]$$

表 2 负荷参数

节点号	P_L /kW	Q_L /kvar
1	0	0
2	98	98
3	70	60
4	85	80
5	55	55
6	40	30
7	50	50
8	40	30
9	20	15

依据本文的给出算法,本文用 MATLAB 7.0 编制相应的程序对其进行仿真运算,迭代的收敛条件为迭代前后两次的电压差 0.00001 ,一共进行了三次迭代运算,其潮流计算结果如表 3。

然后采用传统的 P-Q 分解法对算例进行分析计算,收敛条件相同。计算一共迭代七次,结果见表 3。

表 3 潮流计算结果

节点号	Charmai 流图法		P-Q 分解法	
	电压幅值 /P.U	相角 /($^{\circ}$)	电压幅值 /P.U	相角 /($^{\circ}$)
1	1.0	0.0	1.0	0.0
2	0.992 872	0.001 000 771	0.992 866	0.001 001 2
3	0.986 967	0.003 409 08	0.986 961	0.003 411 3
4	0.975 365	0.005 424 41	0.975 345	0.005 424 5
5	0.968 625	0.007 631 19	0.968 634	0.007 640 1
6	0.962 269	0.009 618 21	0.962 251	0.009 612 5
7	0.960 079	0.012 782 3	0.960 062	0.012 785 7
8	0.959 759	0.013 660 7	0.959 801	0.013 660 6
9	0.959 727	0.013 780	0.959 715	0.013 785 3

从计算结果可以分析得到:流图法产生的图及子图较少,计算结果相对精确,且无须考虑修正系数问题,因而计算时间相对较短;而 P-Q 分解法要考虑修正问题,因而收敛速度相对较慢,故迭代次数要多,计算时间较长。

4 总结

基于 CharMai 流图理论的配网潮流计算方法在每一步的求解过程和牛顿-拉夫逊等潮流计算方法不一样,计算过程没有任何的近似的过程,因而只要选取合适的收敛条件,就能得到精确的结果。因此满足配电网高阻抗比、线路长和负荷率大的环境,可以作为配电网潮流计算的一种可靠收敛的方法。

参考文献:

- [1] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Electric Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] Goswami S K, Basu S K. Direct Solution of Distribution Systems[J]. IEE Proc C, 1991, 138(1): 78-88.
- [3] Shimohammadi D, Hong H W, et al. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 3(2): 753-762.
- [4] 罗日成,李卫国.电力系统潮流计算的符号分析方法[J].电网技术,2005,29(10):25-29.
LUO Ri-cheng, LI Wei-guo. Symbolic Analysis Method for Load Flow Calculation of Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 25-29.
- [5] 陈惠开,范定松,张玲玲.应用图论[M].北京:人民邮电出版社,1990.
CHEN Hui-kai, FAN Ding-song, ZHANG Ling-ling. Applied Graphics[M]. Beijing: People's Posts and Communications Press, 1990.
- [6] 刘健,毕鹏翔,董海鹏.复杂配电网简化分析与优化[M].北京:中国电力出版社,2002.
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Complicated Distribution Network Simplified Analysis and Optimization[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [7] TENG J H. A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solution[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [8] 刘伟良,黄纯,向为,等.基于叠加原理和前代后代法的环状配电网潮流计算[J].继电器,2005,33(4):17-21.
LIU Wei-liang, HUANG Chun, XIANG Wei, et al. An Improved Power Flow Algorithm for Meshed Distribution Networks Based on Superposition Principle and Forward/backward Sweep Method[J]. Relay, 2005, 33(4): 17-21.

收稿日期: 2006-03-31; 修回日期: 2006-06-19

作者简介:

熊志伟(1979),男,硕士研究生,从事高等电网运行及故障智能诊断研究;E-mail: arsenal517@163.com

蔡金锭(1954-),男,博士,教授,主要从事人工智能技术在电力系统中的应用、电力系统故障诊断研究。

(下转第 50 页 continued on page 50)

- Weights[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112: 397-404.
- [10] Herrera F, Herrera V E. Linguistic Decision Analysis: Steps for Solving Decision Problems Under Linguistic Information[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115: 67-82.
- [11] Herrera F, Herrera V E. Choice Functions and Mechanisms for Linguistic Preference Relations[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120: 223-239.
- [12] Mamol A M, Puerto J, Femandez F R. The Use of Partial Information on Weights in Multi-attribute Decision Problem[J]. Journal of Multi-attribute Decision Analysis, 1998, 7: 322-329.
- [13] Ahmed S. Seasonal Models of Peak Electric Load Demand [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2005, 72 (5) : 609-622.
- [14] Al-Shakrchi M R G, Ghulain M M. Short Term Load Forecasting for Baghdad Electricity Region [J]. Electr Mach Power Syst, 2000, 28 (3) : 355-371.
- [15] Senjyu T, Sakihara H, Tamaki Y, et al. Next Day Peak Load Forecasting Using Neural Network with Adaptive Learning Algorithm Based on Similarity [J]. Electr Mach Power Syst, 2000, 28 (6) : 613-624.
- [16] Krunic M, Slavisa K I, Rajakovic N. An Improved Neural Network Application for Short Term Load Forecasting in Power Systems [J]. Electr Mach Power Syst, 2000, 28 (7) : 703-721.
- [17] Huang H C, Hwang R C, Hsieh J G. A New Artificial Intelligent Peak Power Load Forecaster Based on Non-Fixed Neural Networks [J]. Electr Power Energy Syst, 2002, 24 (2) : 245-250.

收稿日期: 2006-02-16; 修回日期: 2006-04-22

作者简介:

李扬 (1980 -), 男, 博士研究生, 研究方向为复杂系统建模与智能优化; E-mail: holy_blood@163.com

高立群 (1949 -), 男, 教授、博士生导师, 研究方向为复杂系统建模与智能优化、模式识别与图像处理等;

于宏涛 (1978 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统建模与优化。

Power limiting distribution research based on expert knowledge structure in peak load shifting control

LI Yang, YU Hong-tao, GAO Li-qun, WANG Hong-xia
(Northeast University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Combining Analytical Hierarchy Process and fuzzy set theory and based on different expert knowledge structures, this paper studies power limiting distribution on power peak time between multi-zones. First, it establishes allocation of investment indicator system and hierarchical structure, constructs and determines indicator's relative degree of membership function. Then it adopts fuzzy integrated decision method to calculate optimized distribution decision of multi-zones multi-objective power limiting time distribution, and at last, a fuzzy comprehensive group decision model for multi-objective and multi-zones power limiting distribution in peak load shifting is built up. The performance of experiment of actual example is satisfactory.

Key words: knowledge structure; multi-objective; fuzzy sets; group decision; power limiting planning

(上接第 21 页 continued from page 21)

Application of graph theory in distribution network flow calculation

X DNG Zhi-wei, CA IJ in-ding
(Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to solve the problems using traditional methods to calculate distribution network flow, this paper puts forward a new method to calculate distribution network flow based on graph theory. This new method avoids complicated process of matrix calculation, improves the precision of distribution network flow and gets over the problem that traditional methods can not be used in special circumstances of distribution network. The new method doesn't have convergence problems and many calculation results. And there is no calculational error that exists in traditional flow calculation methods.

Key words: distribution network flow; Char-Mai graph theory; iterative method