

一种配电网潮流计算的新方法

杨仪松¹,王宽²,周玲²,沈茂亚²,邱婕³

(1. 国电自动化研究院,江苏 南京 210003; 2. 河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098;

3. 福建省超高压输变电局,福建 厦门 361006)

摘要: 针对辐射状配电网的结构特点,应用前推回代法进行潮流计算,以广度优先搜索策略为理论基础,通过广度优先搜索遍历并借用 ADT 栈形成网络层次结构,来确定前推回代的节点顺序,形成一种实用的配电网潮流计算方法。该方法可以处理多分支辐射网,无需复杂的网络编号、不用形成导纳矩阵,而且迭代次数少、结果精确。该算法已在实际城区配电网应用,运行良好。

关键词: 潮流计算; 配电网; 广度优先; 前推回代

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)13-0046-04

0 引言

我国城乡基本上采用 10 kV 配电网供电方式,它有很多不同于输电网的特点,主要体现在下面几个方面:具有闭环结构、开环运行的特性,稳态运行时网络结构呈树形、多分支的单向辐射状,只有在发生故障或倒换负荷时才有可能出现短时环网运行情况;线路 R/X 值较高^[1],多数情况大于 1;网络中基本上都是 PQ 节点;通常以三相不对称状态运行等等。这些特点造成雅克比矩阵元素对角优势遭到破坏,使得广泛应用于输电网潮流计算的牛顿-拉夫逊和快速解耦法不易收敛。

针对配电网的特点,学者们做了很多的工作,已经研究出一些比较适合配电网潮流的算法,如牛顿法^[2,3]、改进 PQ 解耦法^[4]、回路阻抗法^[5]和前推回代法^[6-10]等。但牛顿法需要形成导纳矩阵,并且雅克比矩阵的对角优势不复存在,很难收敛;改进 PQ 解耦法对 R/X 值大的线路引入补偿技术,这使算法复杂化,丧失了快速解耦原有计算量小、收敛可靠的优点;回路阻抗法需要复杂的节点和支路编号,比较耗时;前推回代法中,像文献[6]每次前推时都计算支路的功率损耗,影响了潮流的计算速度,还有像文献[7]得要形成网络层次矩阵和支路关联矩阵,占用空间比较大又比较费时。上述方法存在的问题限制了在实际电网的应用。

本文以广度优先搜索策略为理论基础,介绍了一种基于支路电流的配电网潮流前推回代法,用广度优先搜索形成层次结构,再按层直接进行电流前推和电压回代,层次比较分明,可以处理多分支辐射网,具有收敛可靠、速度较快且程序实现简单等优点。最后经实际应用证明了本算法是一种实用的潮

流算法。

1 形成层次结构

为确定前推回代的顺序,从根节点开始按广度优先搜索并对配电网进行分层。广度优先搜索^[11]就是在搜索过程中总是首先搜索下面一步的所有可能状态,然后再进一步考虑更后面的各种情况。实现广度优先搜索,采用 ADT 栈作为辅助结构,由于栈的操作遵循先进后出的原则,先从头节点开始,逐层搜索把所有的节点都列举出来,以数组的形式放在栈中;搜索到最后,从栈顶取出来分别进行电流前推计算,处理过后再把它的状态放在另一栈里,以便进行电压回代计算。

辐射状配电网的分层,是将根节点作为第一层;从根节点开始搜索,将搜索到的所有子节点作为第二层放入栈;再以第二层各节点作为父节点并开始搜索,将其所有子节点作为第三层放入栈;依此顺序搜索直至遍历全部节点。

如图 1 所示的配电网,利用广度优先搜索方法将其分层,各层的节点编号如下:第一层:0;第二层:1,2;第三层:3,4,5,6;第四层:7,8,9,10;第五层:11,12;第六层:13,14。

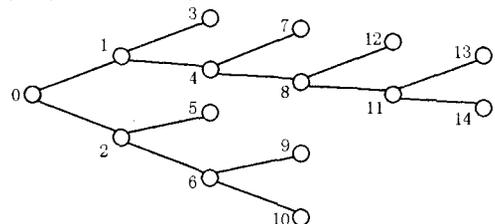


图 1 配电网前推回代潮流算法网络分层

Fig 1 Layer-by-layer network of back/forward sweep method for distribution network load flow

2 配电网前推回代潮流算法的原理

对于如图 2 所示的辐射状配电线, k, i 分别为父、子节点, i, j 分别为父、子节点, c_i 为由节点 i 的子节点构成的节点集。

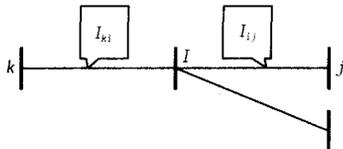


图 2 辐射状配电馈线例图

Fig 2 Diagram of radial distribution feeder

配电网前推回代潮流算法第 n 次的迭代公式如下:
节点 i 的电流前推公式

$$I_{ki}^n = \sum_{j \in C_i} I_{ij}^n \quad (1)$$

式 (1) 中: I_{ki}^n 为第 n 次迭代时流经支路 ki 的电流向量。

节点 i 电压回代计算公式

$$u_i^n = u_k^n - I_{ki}^n (r_{ki} + jx_{ki}) \quad (2)$$

式 (2) 中: u_i^n 为第 n 次迭代时节点 i 处的电压向量; $(r_{ki} + jx_{ki})$ 为支路 ki 的阻抗。

为了提高算法收敛速度,引入高斯 - 赛德尔的迭代思想,在电压迭代过程中引入加速因子,即取

$$u_i^n = \alpha u_i^{n-1} + (1 - \alpha) u_i^n \quad (3)$$

式中: u_i^n 是通过式 (2) 求得的节点 i 电压的第 n 次迭代值; u_i^{n-1} 是引入加速因子后节点 i 的电压值; α 为加速因子,一般取 $1 < \alpha < 2$ 。

配电网前推回代潮流算法的步骤:

(1) 初始化:给定配电线跟节点电压 u_r , 并为其他节点赋初值 $u_i^0 = 1 + j0, i = 1, 2, \dots, n, n$ 为跟节点以外的所有节点。

(2) 从最低层一级负荷节点开始,根据节点功率 $P_j + jQ_j$, 计算注入该节点的支路电流 $I_{ij}, I_{ij} = \frac{P_j - jQ_j}{u_j^*}$, * 表示共轭。

(3) 从倒数第二层开始,利用前推公式 (1), 先子节点后父节点,逐层计算支路的电流;

(4) 根据所求出的支路电流,从第一层节点出发,利用公式 (2),先父节点后子节点,逐层回代计算求各节点的电压分布。

(5) 计算各个负荷节点相邻两次迭代电压幅值差的最大值 $\max |u_i^n - u_i^{n-1}|$, 是否小于预先给定的收敛条件, 即 $\max |u_i^{n+1} - u_i^n| < \epsilon$, 若是,则停止计算;否

则, $n = n + 1$, 转步骤 (2)。

(6) 得到各个节点的电压和支路电流后,计算线路潮流 S_i 和网损 P_{loss} ,

$$S_i = u_i I_{ij}^*, \quad P_{loss} = \sum |I_{ij}|^2 r_{ij}$$

前推回代算法流程图如图 3 所示。

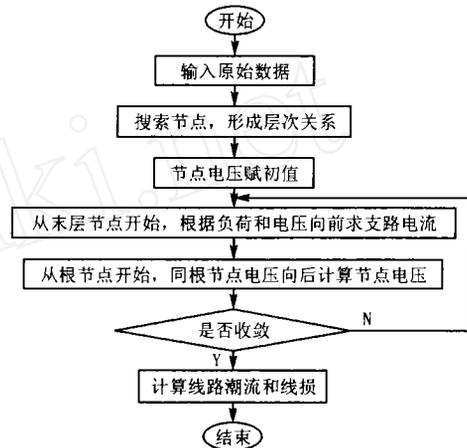


图 3 基于支路电流前推回代潮流计算流程图

Fig 3 Flow chart of back/forward sweep method for load flow based on branch current

3 实际应用

本算法已经在实际城区配电网应用,图 4 为应用本算法的 10 kV 变电所框图。

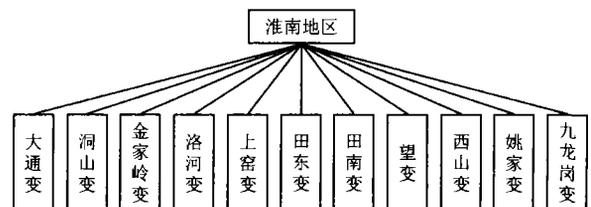


图 4 10 kV 变电所框图

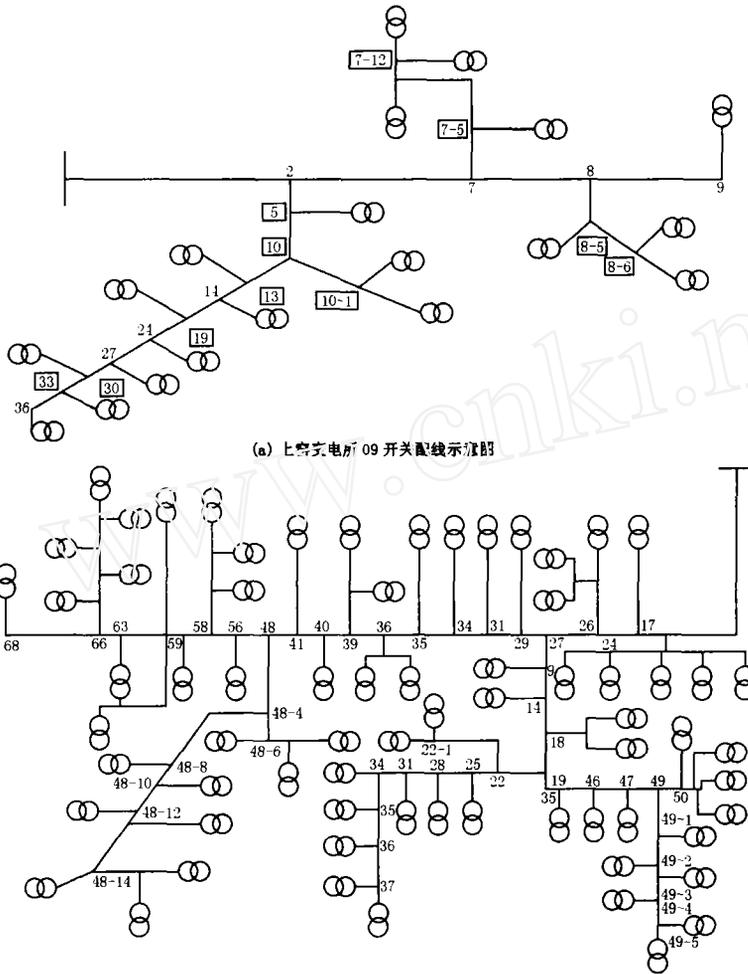
Fig 4 Diagram of 10 kV substation

由于 10 kV 母线的配电线比较多,因篇幅所限没有全部画出,只列举了上窑变电所 09 开关和大通变电所 12 开关两个配线的情况来说明本算法,如图 5 所示,收敛精度取为 10^{-6} , 加速因子取为 1.6。所有配线上配电变参数、线路参数和负荷均为已知,迭代次数和计算时间依网络的规模有所不同,它们的情形见表 1。

表 1 两配线的特征和使用本算法的情况

Tab 1 Characters of distribution circuits and application of the proposed algorithm for two substations

名称	节点数	层数	迭代次数	所用时间 / s
上窑变电所 09 开关配线系统	37	11	3	0.023
大通变 12 开关配线系统	130	23	5	0.12



(b) 大温变电站 12 开关配线示意图

图 5 配电系统接线图

Fig 5 Connection of distribution system

为了说明本算法的优点,与牛顿法和传统前推回代法进行了比较,结果见表 2。

表 2 三种算法计算结果的比较

Tab 2 Comparison of results from three algorithms

算法	上穿变电站 09 开关配线系统			大温变 12 开关配线系统		
	初值	迭代次数	所用时间 /s	初值	迭代次数	所用时间 /s
牛顿法	1.000	3	0.140	1.000	6	0.380
	0.500	10	1.203	0.551	14	2.732
	0.432	发散		0.540	发散	
传统前推回代法	1.000	4	0.060	1.000	8	0.280
	0.300	6	0.110	0.380	13	0.570
	0.200	发散		0.271	发散	
本文算法	1.000	3	0.023	1.000	5	0.12
	0.300	6	0.078	0.320	9	0.391
	0.200	发散		0.256	发散	

4 结论

本算法提出了一种新型的分层方式,针对配电网呈辐射状的特点,用广度优先搜索进行分层,以

ADT 栈作辅助手段,不需要形成导纳矩阵,也无需对网络节点进行复杂编号,结构分明,用 Delphi 语言开发实现,程序简单清晰,计算效率高。

在处理多分支辐射网时,同层节点的前推和回

代计算相当于并行处理,另在迭代过程中引入了加速因子,提高了计算速度,并且要求的初值也不高,迭代次数和收敛时间明显高于其他算法,实际运行表明了本算法的可行性和优越性,是一种实用的配电网潮流计算方法。

参考文献:

- [1] 张学松,柳焯,于尔铿,等.配电网潮流算法比较研究[J].电网技术,1998,22(4):45-49.
ZHANG Xue-song, LU Zhuo, YU Er-keng, et al Study on Comparison of Algorithms for Distribution Network Power Flow [J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 45-49.
- [2] 孙宏斌,张伯明,相年德.配电网潮流前推回推法的收敛性研究[J].中国电机工程学报,1999,19(7):26-29.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de Study on Convergence of Back/forward Sweep Distribution Power Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [3] 蔡中勤,郭志忠.基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J].中国电机工程学报,2000,20(6):13-16
CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong Newton Load Flow for Radial Distribution Network Based on Upstream Labeling Technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 13-16
- [4] 于继来,王江,柳焯.电力系统潮流算法的几点改进[J].中国电机工程学报,2001,21(9):88-93
YU Ji-lai, WANG Jiang, LU Zhuo Improvements on Usual Load Flow Algorithms of Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 88-93.
- [5] 刘耀年,岂小梅,李国鹏,等.基于回路阻抗法的配电网潮流计算[J].继电器,2000,21(12):82-83.
LU Yao-nian, QI Xiao-mei, LI Guo-peng, et al A Load Flow Algorithm for Distribution Network Based on Circuit Resistance Method [J]. Relay, 2000, 21(12): 82-83.
- [6] 臧睿,杨丽徙,娄和恭,等.前推回代潮流算法在城网规划中的应用[J].郑州工业大学学报,2002,21(12):1-3.
ZANG Rui, YANG Li-xi, LOU He-gong, et al Application of Back/forward Sweep Method for Load Flow in the Program of City [J]. Proceedings of Zhengzhou Industrial University, 2002, 21(12): 1-3.
- [7] 颜伟,刘方,王官洁,等.辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J].中国电机工程学报,2003,23(8):15-19.
YAN Wei, LU Fang, WANG Guan-jie, et al Layer-by-layer Back/forward Sweep Method for Radial Distribution Load Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 15-19.
- [8] 戴雯霞,吴捷.基于支路电流的配电网潮流前推回代法[J].继电器,2002,30(5):6-8
DAI Wen-xia, WU Jie Back/forward Sweep Method for Distribution Network Load Flow Based on the Current of Side-road [J]. Relay, 2002, 30(5): 6-8
- [9] 张尧,王琴.树状网的潮流算法[J].中国电机工程学报,1998,18(3):217-220.
ZHANG Yao, WANG Qin A Load Flow Algorithm for Radial Distribution Power Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-220.
- [10] 谢开贵,周家启.树状网络潮流计算的新算法[J].中国电机工程学报,2001,21(9):116-120.
XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi A New Load Flow Algorithm for Radial Distribution Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 116-120.
- [11] 傅清祥,王晓东.算法与数据结构[M].北京:电子工业出版社,1998.
FU Qing-xiang, WANG Xiao-dong Algorithm and Data Structure [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.

收稿日期: 2005-08-29; 修回日期: 2005-10-14

作者简介:

杨仪松(1963-),男,高级工程师,主要从事电力系统继电保护和综合自动化的研究;

王宽(1981-),男,硕士研究生,主要从事电力系统规划与运行控制的研究; E-mail: wangkuan00052222@sohu.com

周玲(1956-),女,副教授,主要从事人工智能在电力系统中的应用及继电保护的教学和科研工作。

A new method for load flow calculation in distribution systems

YANG Yi-song¹, WANG Kuan², ZHOU Ling², SHEN Mao-ya², QU Jie³

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Fujian Provincial Ultra-high Voltage Power Transmission Bureau, Xiamen 361006, China)

Abstract: According to the structural character of radial distribution networks, the back/forward sweep method is applied to compute

(下转第 76 页 continued on page 76)

- [7] Bhattacharya K, Bollen M H J, Daalder J E. Real Time Optimal Interruptible Tariff Mechanism Incorporating Utility-customer Interactions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (2): 700-706
- [8] Sanghvi A P. Flexible Strategies for Load/demand Management Using Dynamic Pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (1): 83-93.
- [9] Fabrioglu M, Alvarado F L. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16 (2): 317-322
- [10] 李保平. 云南实行错峰让峰优惠电价成效显著 [J]. 电力需求侧管理, 2002, 4 (5): 14-16, 29.
LI Bao-ping. Electricity Price Policies Implemented in Yunan Gotten Evident Effect on Avoiding Peak and Staggering Peak [J]. Power Demand Side Management, 2002, 4 (5): 14-16, 29.
- [11] 蒋斌. 南京市错峰限电方法分析与研究 [J]. 电力需求侧管理, 2005, 7 (2): 25-27.
JIANG Bin. Analysis and Research of Peak Load Shifting in Nanjing City [J]. Power Demand Side Management, 2005, 7 (2): 25-27.
- [12] 唐为民, 王蓓蓓, 刘福斌, 等. 需求侧管理成本效益最优化分析 [J]. 电网技术, 2002, 26 (12): 49-52
TANG Wei-min, WANG Bei-bei, LIU Fu-bin, et al. Optimal Analysis of Cost-benefit of Demand Side Management [J]. Power System Technology, 2002, 26 (12): 49-52

收稿日期: 2005-12-10; 修回日期: 2006-03-10

作者简介:

董博 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场、销售电价、需求侧管理; E-mail: wangwei_tl@sohu.com

张粒子 (1963-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统规划与运行优化等领域的研究;

程瑜 (1977-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力市场、销售电价。

Research on the plan and optimization of peak shifting and averting based on modified genetic algorithm in the electricity market

DONG Bo, ZHANG Li-zi, CHENG Yu, WANG Wei
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Nowadays, the electric power companies implements different plans of peak shifting and averting which mainly considers the aspects of safety and experience. An optimal model for the plans of peak shifting and averting is proposed in this paper. The goal of this model is to minimize the losing profit of electric power companies according to the safe grades of the consumers, practical situations of the consumers who default the charge, different load rates of consumers and so on. This model is based on modified genetic algorithm to partly manage the consecutive variables by primary genetic algorithm and exert genetic algorithm's ability of seeking the optimal goal when all comes to all. The proposed measure is effective according to the calculative illustration.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50577022).

Key words: peak shifting plan; peak averting plan; genetic algorithm; electricity market

(上接第 49 页 continued from page 49)

the power flow. Based on breadth-first search, through the Breadth-First search and the ADT stack, the layer structure and the node order of back/forward sweep are formed. Then a practical power flow algorithm has come into being completely. The new algorithm can process radial network with multiple branches, without complex network labeling or admittance matrix calculating. Furthermore, its loop is few and its result is precise. The algorithm has been applied in the distribution network of the city zone and run in good conditions up to now.

Key words: power flow computation; distribution network; breadth-first; backward/forward sweep method