

基于改进前推回代法的辐射配电网潮流计算方法

陈燕萍, 王 启, 赵彩虹, 魏甜甜

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京, 210042)

[摘要] 在分析现有配电网潮流计算方法的基础上, 通过对传统的前推回代法加以改进, 提出了一种适用于辐射配电网潮流计算方法, 具有实用性. 该方法充分利用辐射配电网的结构特点, 对分支、节点和支路编号进行优化, 它直接采用支路阻抗参数进行计算, 不需要形成节点导纳矩阵和进行三角矩阵变换, 简单的处理代数方程就可以计算节点电压和功率分布, 使得程序实现起来更加高效、准确. 根据提出的算法编制了配电网潮流程序, 用算例验证了算法和程序的可行性.

[关键词] 配电网, 潮流计算, 前推回代法

[中图分类号] TM 74.4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)01-0024-06

Reliable Distribution Power Flow Calculation Based on Advanced Forward and Backward Substitution Method

Chen Yanping Wang Qi Zhao Caihong Wei Tianian

(School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract On the basis of analyzing the current techniques for power flow calculations of distribution network, by improving the traditional forward and backward substitution method, a calculation applied for the reliable distribution network is presented, which has practicability. This method makes full use of the structural features of the reliable distribution network, optimizes the numbered branches, nodes and loads, uses directly branch impedance parameter to calculate, and doesn't need forming bus admittance matrix and converting triangular matrix. Simple dealing with algebra equations can calculate node voltage and power distribution, which makes the program more efficient and exact. A program of distribution network power flow is developed according to the proposed algorithm, and the feasibilities of the proposed algorithm and program are verified by the case.

Key words distribution network, power flow calculation, forward and backward substitution method

配电网潮流计算是配电网分析的基础^[1], DMS中几乎所有的分析和应用功能都要用到潮流计算的结果. 因此, 一套性能优良的潮流计算程序对于 DMS非常重要.

以前的潮流计算方法大都基于网状结构的输电网设计. 这些方法往往不能直接用于配电网的潮流计算. 这是因为配电网网络结构与输电网相比, 有明显的差异. 正常运行的配电网具有辐射状网络结构, 负荷节点数量很多, 线路 R/X 很高^[2,3]. 因此, 配电网潮流计算必须采用不同于输电网, 且适合配电网特点, 有效的、鲁棒性好的计算方法. 配电网潮流计算以放射状网络为研究对象, 其基本模型是: 已知量是首端电压和各负荷功率, 待求量是各线路潮流和各负荷点的电压. 针对配电网潮流收敛困难的特点, 人们进行了大量的研究, 提出了许多模型和算法^[4-7], 这些算法基本上可以分为 4 类: (1) 母线功率法; (2) 母线电流法; (3) 支路功率法; (4) 支路电流型. 目前, 用于配电网潮流计算的主要方法有前推回代法、基于回路电流法、改进牛顿法和改进快速解耦法等. 本文采用前推回代法来进行计算, 并对其做了部分的改进, 使该算法更具有实用价值. 本方法通过对分支、节点、和支路优化编号^[8], 直接运用支路阻抗参数进行电压和功率分布计算, 在计算过程中不需要形成节点导纳矩阵, 且用到的方程均为代数方程. 本方法除提供配网潮流数

收稿日期: 2007-04-02

作者简介: 陈燕萍(1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统及其自动化配电网无功优化. E-mail: wxyqcyp@163.com

通讯联系人: 赵彩虹(1956—), 女, 教授, 研究方向: 电力系统及其自动化等. E-mail: zhaoaihong@njnu.edu.cn

据外还可提供诸如馈线状况及系统中的各部分网损等信息,并在回代中考虑了节点分支间的线损.本方法具有所占内存小,计算速度快,收敛可靠性高,易于编程的特点.

1 优化分支、节点和支路编号方法

前推回代法是在对网络的分支、节点和支路编号的基础上形成,本文简单介绍其编号方法.考虑到配电网的辐射型结构,其一般是由一条主馈线带有数条分支,各分支又带有各自的子分支,依次类推.如图 1 所示,把电源母线或变电站母线作为根节点,编号为 1.选一主馈线作为第一层,编号为 [1];然后从根节点到末端节点依次对主馈线旁的分支进行编号.图 1 方括号 [] 中的序号就是分支序号.在对分支编号完成后对节点编号,由分支 [1] 开始依次对每一个分支的节点进行编号.同时对每一个分支从源节点到末端节点依次编号.如图 1 中的数字即为节点序号.同理,对支路的编号按分支序号进行,也是由分支 [1] 开始依次进行支路编号.一般情况下,支路编号为该支路右端节点号减 1 如图 1 小括号中的序号即为支路序号.

此编号方法简便、有效,利于编程,对于任何复杂的辐射状配电网的网络编号都适用,具体编号方法如图 1 所示.

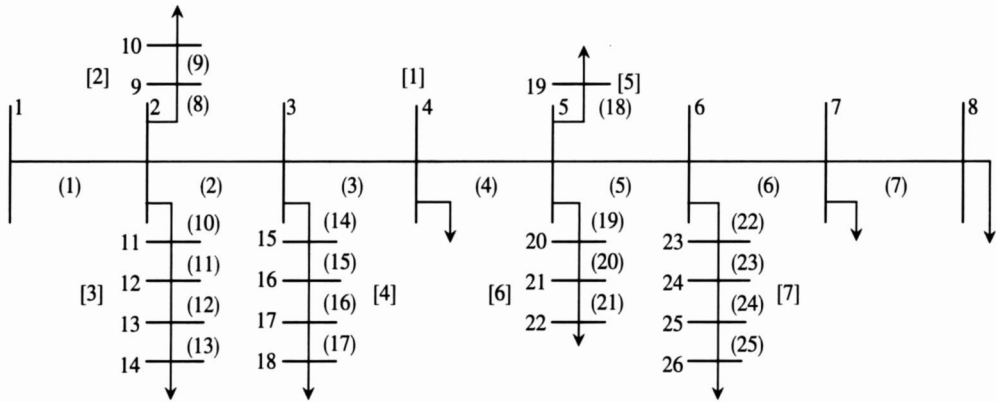


图 1 复杂辐射配电网
Fig.1 Complicated reliable distribution network

2 辐射状配电网潮流计算

复杂的辐射网由一条或几条馈线组成,而每一条馈线是由众多的馈线段所组成的.本文先通过对简单辐射网深入的研究,将适用于简单辐射网的潮流算法推广到复杂辐射网,针对辐射状配电网的特点,以支路网损量为状态量,首先给定首端节点电压,再进行前推回代来求解各节点电压和各馈线段的功率损耗.在这里我们假设三相平衡辐射状网可以用单相等值模型来代替并且接地并联电容忽略不计.

2.1 简单辐射网潮流计算

对于潮流算法的分析要从简单辐射网入手.简单辐射网可以理解为整个网络只有一条馈线,而馈线的每个节点上只有一个注入电流,两个输出电流.图 2 表示标准的简单配电网络,配电网有 NB 个节点, $NB - 1$ 条支路.在根节点电压和节点负荷功率已知的情况下可以求出全网节点电压和功率分布.

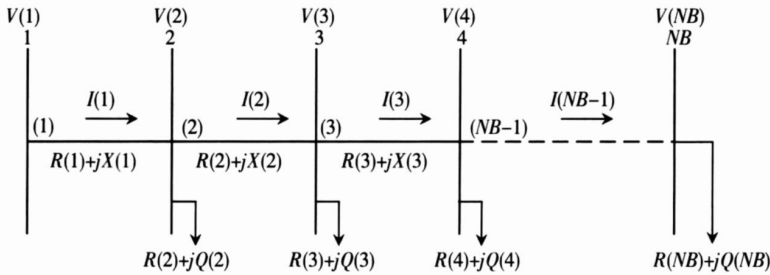


图 2 简单辐射网
Fig.2 Simple reliable distribution network

2.1.1 节点功率计算

由图 1 可知节点 $i+1$ 的注入有功功率和无功功率分别为:

$$\left. \begin{aligned} P(i+1) &= \sum_{j=i+1}^{NB} PL(j) + \sum_{j=i+1}^{NB-1} LP(j) \\ Q(i+1) &= \sum_{j=i+1}^{NB} QL(j) + \sum_{j=i+1}^{NB-1} LQ(j) \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

其中, $i=1, 2, \dots, NB-1$, NB 为节点数, $PL(i)$ 为第 i 节点所带负荷有功功率; $QL(i)$ 为第 i 节点所带负荷无功功率; $LP(i)$ 为第 i 条线段上的有功功率损耗; $LQ(i)$ 为第 i 条线段上的无功功率损耗.

第 i 条馈线段的有功、无功损耗计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} LP(i) &= \frac{R(i) \times (P^2(i+1) + Q^2(i+1))}{V^2(i+1)} \\ LQ(i) &= \frac{X(i) \times (P^2(i+1) + Q^2(i+1))}{V^2(i+1)} \end{aligned} \right\}, \tag{2}$$

其中, $i=1, 2, \dots, B$, B 为支路数.

2.1.2 节点电压计算

从图 1 可以得到以下计算公式

$$V(i) - V(i+1) = I(i) [R(i) + jX(i)], \tag{3}$$

$$P(i+1) - jQ(i+1) = I(i)V(i+1). \tag{4}$$

由式 (3)、(4) 可得两点间电压降落的纵分量和横分量分别为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta V(i+1) &= \frac{P(i+1)R(i) + Q(i+1)X(i)}{V(i+1)} \\ \delta V(i+1) &= \frac{P(i+1)X(i) + Q(i+1)R(i)}{V(i+1)} \end{aligned} \right\}. \tag{5}$$

在此暂时忽略两点间电压降落的横分量的影响, 则节点电压幅值计算如下:

$$V(i+1) = V(i) - \Delta V = V(i) - \frac{P(i+1)R(i) + Q(i+1)X(i)}{V(i+1)}.$$

由上式可以得到:

$$V(i+1) = \sqrt{\frac{1}{4}V^2(i) - P(i+1)R(i) - Q(i+1)X(i)} + \frac{1}{2}V(i). \tag{6}$$

将式 (6) 计算代入式 (5) 中, 计算出电压降落横分量, 并由下式计算两节点间相角偏差:

$$\alpha(i+1) = \arctan \frac{\delta V(i+1)}{V(i+1)}. \tag{7}$$

2.1.3 收敛条件

以前后两次迭代的电压偏差作为迭代收敛条件, (8) 式表明节点电压幅值最大偏差小于设定阈值, 即认为迭代收敛, 则迭代过程结束.

$$\max\{|V^k(i) - V^{k-1}(i)|\} < \varepsilon \tag{8}$$

在开始计算的时候先把各节点上的 $LP(i)$ 、 $LQ(i)$ 分别设为零, 利用式 (1) 计算出 $P(i+1)$ 、 $Q(i+1)$, 分别代入式 (6) 计算各节点电压幅值, 作为初始化的节点电压值. 然后把此电压值代入公式 (2) 来修正线路的损耗 $LP(i)$ 、 $LQ(i)$, 用经过修正的线路损耗求新的节点注入功率, 再根据节点注入功率求新的节点电压, 根据前后两次迭代的电压偏差是否小于设定阈值判断是否收敛, 如果满足, 则输出结果, 如果不满足, 必须重复上述过程直到满足收敛条件为止.

2.2 复杂辐射网潮流计算

复杂辐射网的潮流计算是可以由简单辐射网推广得出. 在进行计算之前, 要先用上面所提出的方法对复杂辐射网的节点、支路、分支进行编号, 而且为了能够很好地描述分支情况, 定义了 3 个数组:

$SN[i]$: 用于存放第 i 层馈线的起始节点;

$FN[i]$: 用于存放第 i 层馈线起始节点后面的那个节点;
 $EN[i]$: 用于存放第 i 层馈线的末端节点.
 $i = 1, 2, \dots, NL, NL$ 为分支数.

2.2.1 计算节点功率

对于复杂辐射网, 要从分支序号大的分支回推来计算节点功率. 先计算分支 (除主馈线), 最后才计算主馈线.

对于分支 $i(i \neq 1)$ 其上所有节点功率计算如下: 若令 $m = FN[i], n = EN[i]$ 则计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} P(m) &= \sum_m^n PL(j) + \sum_m^{n-1} LP(j) \\ Q(m) &= \sum_m^n QL(j) + \sum_m^{n-1} LQ(j) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

为了求分支 $[1]$ 上的各个节点功率, 从主馈线的末端节点回推来计算功率. 先判断节点是否连接分支线, 没有分支线用式 (1) 来计算功率, 若有分支线则用式 (9) 来计算功率.

$$\left. \begin{aligned} P(i) &= P(i+1) + PL(i) + LP(i) + \sum_{j \in M} (P(FN[j]) + LP(FN[j])) \\ Q(i) &= Q(i+1) + QL(i) + LQ(i) + \sum_{j \in M} (Q(FN[j]) + LQ(FN[j])) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

其中, M 表示有分支线的节点所联接的分支集合.

2.2.2 计算节点电压

节点电压的计算和计算节点功率相反, 要从分支 $[1]$ 开始前推来计算节点电压.

对于分支 $[1]$ 可以用式 (6) 来求节点电压, 对于其他分支上的节点, 首先要考虑该分支上的节点 $FN[i]$ 电压. 计算如下:

令 $m = FN[i], h = SN[i]$, 则:

$$V(m) = \sqrt{\frac{1}{4}V^2(h) - P(m)R(m-1) - Q(m)X(m-1) + \frac{1}{2}V(h)}. \quad (11)$$

然后此分支上的其余节点的电压用式 (6) 来求得即可.

2.2.3 各支路功率损耗计算

根据支路编号原则, 支路序号为该支路右端节点减 1, 因此复杂辐射网支路功率损耗可以用式 (2) 来计算.

重复进行以上 3 个步骤知道满足收敛条件为止.

3 程序流程图

程序流程如图 3 所示.

4 算例分析

利用上面提出的辐射网潮流计算方法, 对图 1 所示配电网进行潮流计算, 该网络含有 26 个节点、25 条支路和 7 条分支, 该网络的节点、支路、分支的编号如图 1 所示, 其中 3 个数组分别为: $SN[i] = [1, 2, 2, 3, 5, 5, 6]$; $FN[i] = [2, 9, 11, 15, 19, 20, 23]$; $EN[i] = [8, 10, 14, 18, 19, 22, 26]$. $i = 1 \sim 7$ 图 1 的网络支路参数和节点负荷功率分别见表 1、表 2, 通过 3 次迭代收敛, 表 3 给出了计算结果.

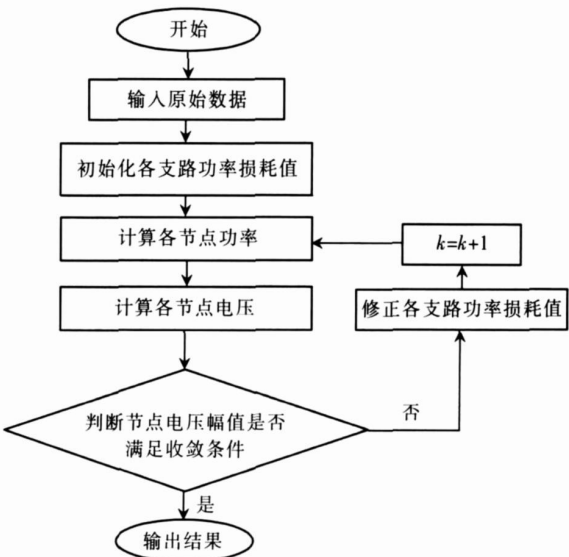


图 3 辐射配电网潮流计算流程图

Fig.3 Reliable distribution power flow calculation flow chart

表 1 支路参数

Table 1 Load parameter

支路序号	R / Ω	X / Ω	支路序号	R / Ω	X / Ω
1	1. 297	0. 920	14	0. 646	0. 327
2	1. 896	1. 331	15	2. 650	1. 158
3	1. 406	0. 995	16	1. 466	0. 667
4	1. 951	1. 368	17	0. 919	0. 440
5	1. 624	1. 144	18	1. 648	0. 742
6	2. 005	1. 405	19	1. 466	0. 667
7	1. 297	0. 920	20	3. 652	1. 547
8	0. 753	0. 547	21	1. 648	0. 742
9	1. 243	0. 883	22	1. 192	0. 553
10	2. 923	1. 272	23	1. 010	0. 478
11	1. 284	0. 591	24	0. 555	0. 289
12	1. 102	0. 516	25	0. 464	0. 251
13	0. 555	0. 289			

表 2 节点负荷功率

Table 2 Node lode power

节点序号	有功负荷 /kW	无功负荷 /Kvar	节点序号	有功负荷 /kW	无功负荷 /K var
1	0. 000	0. 000	14	16	16. 283
2	37. 28	37. 993	15	37. 28	37. 993
3	16	16. 283	16	37. 28	37. 993
4	37. 28	37. 993	17	10. 96	11. 141
5	16	16. 283	18	10. 96	11. 141
6	37. 28	37. 993	19	37. 28	37. 993
7	37. 28	37. 993	20	37. 28	37. 993
8	37. 28	37. 993	21	16	16. 283
9	16	16. 283	22	37. 28	37. 993
10	16	16. 283	23	10. 96	11. 141
11	58	59. 131	24	58	59. 131
12	37. 28	37. 993	25	10. 96	11. 141
13	37. 28	37. 993	26	37. 28	37. 993

表 3 计算结果

Table 3 Result

节点序号	电压幅值 /KV	节点有功 /KW	节点无功 /Kvar
1	10. 000000	782. 777437	780. 566236
2	9. 833745	768. 093147	769. 373570
3	9. 653846	537. 740479	538. 812204
4	9. 548322	419. 274409	420. 177140
5	9. 415569	375. 757761	377. 811134
6	9. 347513	229. 819274	229. 825167
7	9. 320605	74. 616415	72. 026295
8	9. 311853	37. 296250	36. 004805
9	9. 827346	48. 013400	48. 858525
10	9. 823858	16. 000000	16. 283000
11	9. 659687	398. 624917	405. 787619
12	9. 615780	223. 852259	228. 038980
13	9. 596800	111. 846126	113. 982190
14	9. 595393	16. 000000	16. 283000
15	9. 627696	257. 265128	261. 689680
16	9. 569776	144. 744281	147. 413463
17	9. 562403	32. 884859	33. 425326
18	9. 560837	10. 960000	11. 141000
19	9. 406040	37. 280000	37. 993000
20	9. 378964	160. 054450	162. 922469
21	9. 351949	48. 106109	48. 896775
22	9. 342355	37. 280000	37. 993000
23	9. 302176	240. 363772	244. 527170
24	9. 268775	206. 918167	210. 836488
25	9. 265741	32. 910320	33. 439406
26	9. 262844	37. 280000	37. 993000

5 结论

本文在分析现有配电网潮流计算方法的基础上,对传统的前推回代法加以改进,使其更具有实用性.充分利用配电网的结构特点,对分支、节点和支路进行编号,直接采用支路参数进行计算,不需要形成导纳矩阵和进行三角矩阵,简单处理代数方程就可以计算节点电压和功率分布,采用一维数组就可以对数据进行存储,节省了大量存储空间.经实践证明该算法在计算速度、收敛性等方面具有较好的效果,迭代次数少、准确性高、速度快.

[参考文献] (References)

[1] 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 Pengxiang, Dong Hai peng. The Complex Distribution Network Simplifies the Analysis and the Optionization [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002 (in Chinese)
[2] 陈海荣, 邱家驹, 包应时. 配电网潮流计算算法的研究 [J]. 金华职业技术学院学报, 2002, 7(2): 3- 4
Chen Hai rong, Qiu Jia ju, Bao Ying shi. Research on the flow solution of distribution networks [J]. Proceedings of Jinhua College of Profession and Technology, 2002, 7(2): 3- 4 (in Chinese)
[3] 孙宏宾, 张伯明. 配电潮流前推回代法的收敛性研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26- 29.
Sun Hong bin, Zhang Bo ming. Study on convergence of back / forward sweep distribution power flow [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26- 29 (in Chinese)
[4] 曹亮, 孔峰, 陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法 [J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58- 60
Cao Liang, Kong Feng, Chen Kunwei. A practical algorithm of load flow calculation for distribution networks [J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 58- 60 (in Chinese)
[5] 马莉, 刘健, 韦力. 一种配电网潮流简化算法及其实现 [J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 503- 506
Ma Li, Liu Jian, Wei Li. Simplified arithmetic of large scale distribution networks and its realization [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2004, 24(4): 503- 506 (in Chinese)
[6] 刘洋, 牛慧, 鲁全吉. 前推回代法计算理论线损研究 [J]. 黑龙江电力, 2005, 27(4): 275- 277.
Liu Yang, Niu Hui, Lu Quanji. Study on calculating theoretically line loss using forward and backward substitution method [J]. Hei Long Jiang Electric Power, 2005, 27(4): 275- 277 (in Chinese)
[7] 王淳. 一种实用的辐射网潮流算法 [J]. 继电器, 2005, 33(12): 13- 16
Wang Chun. A practical algorithm of power flow calculation for radial networks [J]. Relay, 2005, 33(12): 13- 16 (in Chinese)
[8] 汪卫华, 杨期余, 蓝信军. 配电网潮流计算中简单编号方法 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 40- 41.
Wang Wei hua, Yang Qi yu, Lan Xin jun. Easy numbering used in distribution power flow calculation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 40- 41. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]