

综合潮流技术在配电网综合自动化中的应用

李贵存¹, 黄一敏², 刘万顺¹

(1. 华北电力大学北京研究生部, 北京 100085; 2. 上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 针对配电网的实际情况和具体要求, 提出了一种综合潮流计算方法, 该方法充分考虑了配电网的实际情况, 在算法上确保计算的收敛性, 并应用到实际的配电网高级应用软件的设计中, 取得了良好的效果。

关键词: 潮流计算; 配电网综合自动化

中图分类号: TM711; TM72

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)04-0028-03

1 引言

配电网潮流算法是配电网综合自动化高级应用软件的基础, 一套性能优良的配电网潮流程序是开发 DMS 系统的关键, 因此, 潮流算法性能的好坏倍受人们的关注。

配电网的网络结构与输电网相比有着明显的差异: 配电网是闭环结构、开环运行, 在正常运行时呈辐射状, 但在倒换负荷或发生故障时, 可能出现短暂的环网运行情况; 由于配电线的线径比输电网细, 配电网的 R/X 比值较大, 导致许多应用于输电网潮流算法, 在配电网中发生收敛困难; 三相负荷不对称问题比较严重, 在一些情况下需要计算三相潮流; 另外, 在实际配电系统中, 实时数据存在时差、数据不全以及存在大量的坏数据也是潮流计算的障碍。因此, 衡量一种配电网潮流算法, 其基本要求可归纳为以下四个方面: (1) 算法的收敛可靠性; (2) 计算速度; (3) 程序设计的方便性以及算法扩充移植等的通用灵活性; (4) 算法处理分支能力和环网能力; (5) 计算机内存占用量。

本文针对配电网具体情况和潮流计算收敛困难的特点, 提出了一种综合潮流算法设计原则, 在软件设计中, 能够提供多种潮流算法, 针对不同的配电网, 构造不同的配电网模型, 采取不同的潮流计算方法, 以适应配电网的具体特点。

2 配电网潮流算法简介与比较

在配电网中潮流计算常用的方法主要有: (1) 追赶法(前推回代法); (2) 回路阻抗法; (3) Zbus 法; (4)

牛顿拉夫逊法; 在以上四种典型算法中, 又有许多变形算法, 本文仅以各种变形算法中最典型的算法为例加以说明。

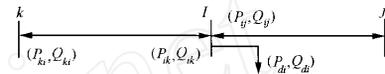


图1 辐射状配电系统

2.1 追赶法(前推回代法)

对于图1所示的辐射状配电馈线, 节点 i 的前推公式为:

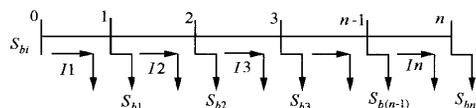
$$P_{ij}^{(k+1)} = P_{Di}^{(k)} + \sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(k+1)} + r_{ki} [(\sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(k+1)} + P_{Di}^{(k)})^2 + (\sum_{j \in C_i} Q_i^{(k+1)} + Q_i^{(k)})^2] / (V_i^{(k)})^2$$
$$Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{Di}^{(k)} + \sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(k+1)} + x_{ki} [(\sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(k+1)} + P_{Di}^{(k)})^2 + (\sum_{j \in C_i} Q_i^{(k+1)} + Q_i^{(k)})^2] / (V_i^{(k)})^2$$

其中, (r_{ki}, x_{ki}) 为 ki 支路的阻抗。

节点 i 的回代公式为:

$$V_i^{(k+1)} = V_k^{(k+1)} - I_{ki}^{(k+1)} (r_{ki} + jx_{ki})$$
$$I_{ki}^{(k+1)} = \frac{P_{ki}^{(k+1)} - jQ_{ki}^{(k+1)}}{V_k^{(k+1)}}$$

2.2 回路阻抗法



根据基尔霍夫定律, 可列出回路方程组。

收稿日期: 1999-10-05

作者简介: 李贵存(1972-), 男, 博士生, 主要从事变电站综合自动化与配网自动化研究。

$$\begin{cases} V_1 = Z_{(1,1)} I_1 + Z_{(1,2)} I_2 + \dots + Z_{(1,n)} I_n \\ \vdots \\ V_n = Z_{(n,1)} I_1 + Z_{(n,2)} I_2 + \dots + Z_{(n,n)} I_n \end{cases}$$

式中, V_n 为根节点电压, I_i 为第 i 条回路上的回路电流(等于负节点 i 的负荷电流), $Z(i, i)$ 为第 i 条回路的自阻抗(等于节点 i 与根节点之间的支路阻抗和, 加上节点的负荷阻抗), $Z(i, j)$ 为第 i 条回路和第 j 条回路的互阻抗。采用 LU 分解方法对上式进行求解, 可求出回路电流, 也就得到各个负荷节点电流。然后可求出各个支路上的电压降, 进而可求出各个节点的电压和负荷节点的功率, 反复迭代, 直到求得的负荷节点功率与给定负荷的差值满足一定的精度要求为止。

2.3 Zbus 法

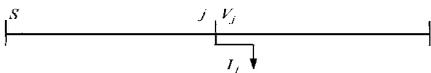


图2 简单配电网

Zbus 法的求解过程如下:

(1) 计算当松弛节点独立作用于整个配电网且所有的等值注入都断开的情况下各母线的电压。

$$V_{js} = \frac{V_s}{Z_{\Sigma}} Z_{oj} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中 V_s 为松弛节点电压, Z_{Σ} 为网络的等值阻抗, Z_{oj} 为节点的等值阻抗;

(2) 计算各母线的等值注入电流 I_j ;

(3) 计算只有等值注入电流作用(没有松弛节点)时母线电压:

$$I = YV$$

(4) 应用迭加原理

$$V_{\text{new}} = V + V'$$

$$\text{式中 } V' = [V'_{1s}, V'_{2s}, \dots, V'_{ms}]^T$$

(5) 检验迭代条件是否满足, 满足停止, 不满足转(1)。

2.4 牛顿拉夫逊法

牛顿拉夫逊法的修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix}$$

牛顿拉夫逊法的求解步骤: (1) 给定各节点电压初值; (2) 将电压初值代入残差形式的牛顿极坐标方程, 求出 P, Q , 判断是否满足收敛条件, 若满足, 停止计算, 否则, 进行下一步计算; (3) 将初值代入牛顿拉夫

逊法的修正方程式中, 求出雅可比矩阵; (4) 解算修正方程式的残差方程, 求出节点电压的修正量; (5) 用节点电压的修正量修正节点电压; (6) 返回(2), 继续进行迭代。

用 C 语言编制了上述四种典型的算法, 对 33 节点和 90 节点算例系统作了比较, 部分结果如下。

表 1

	收敛性		迭代次数		收敛速度		处理环网能力		
	33	90	33	90	33	90	单网	双网	三网
追赶法	收敛	收敛	4	6	0.102	0.302	4	13	发散
回路阻抗法	收敛	收敛	5	4	0.097	0.221	5	5	5
Zbus	收敛	收敛	3	6	0.082	0.237	4	5	7
牛顿法	收敛	发散	3	---	0.216	---	3	4	3

注: (收敛精度以 10^{-5} 为例, 处理环网能力以 33 节点为例)

通过以上算例可以看出: 对于 33 节点系统, 以上四种算法都具有较好的收敛特性, 但对于 90 节点的系统, 牛顿拉夫逊法不能收敛; 追赶法(前推回代法)不需要矩阵运算, 占用计算机资源较少, 但处理网孔能力较弱, 随着分支层数的增加迭代次数显著增加, 在多环网情况下, 会发生收敛困难; Zbus 法、回路阻抗法和牛顿法处理网孔能力较强。回路阻抗法的迭代次数不随系统节点数或环路数增加而发生较大的变化, 具有良好的收敛稳定性, 但占用系统内存较大; Zbus 法是一种面向母线的求解方法, 可以看作是一种隐式的高斯-塞德尔迭代算法, 在迭代过程中须使用加速因子, 在配电网节点数目不大时, 具有接近牛顿法的收敛速度和优于牛顿拉夫逊法的收敛特性; 牛顿法具有二阶收敛特性, 对于环状的输电网, 迭代次数较少, 但对于简单的配电网, 其性能并不一定最优, 且对初值要求较高, 解的稳定性不如上述三种算法, 若用于配电网中需要进行适当的改进, 提高其处理病态能力。

由此可看出, 在配电网中, 由于其网络结构不同于输电网, 输电网网络结构呈环状, 而配电网结构呈辐射状, 配电网的实际情况和网络参数比输电网复杂的多, 因此, 对于某一种特定的算法, 并非对于所有的网架结构和网络参数, 性能都是最优, 只是对于某一类或某几类特定的网架结构和网络参数, 其性能最优, 本文基于上述研究的基础上, 提出了一种综合潮流计算方法, 并应用于实际的配电网开发设计中。

3 综合潮流技术在配电网中的应用

所谓的“综合潮流技术”是在实际的配电网中,

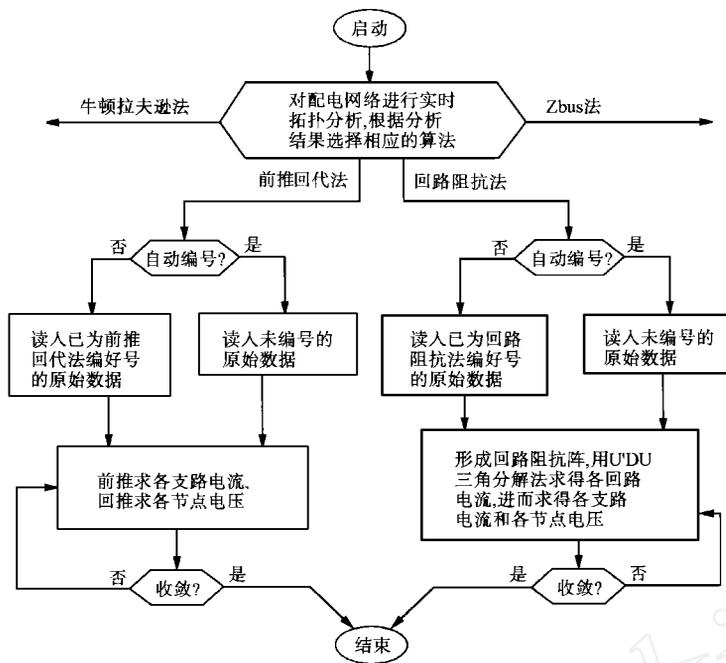


图3 配电网潮流计算软件的程序框图

由于配电网的实际情况和网络参数比输电网复杂,对于某一种特定的算法,并非对于所有的网架结构和网络参数,性能都是最优,只是对于某一类或某几类特定的网架结构和网络参数,其性能最优;因此,在实际的配电网潮流计算中,为了保证潮流算法的收敛性和整个软件系统性能的最优,先对系统的网络结构(特别是对于某些特定操作后的网络结构)进行快速、实时拓扑分析和参数分析,然后针对网络分析和参数分析的结果,确定在这一特定情况下,性能最优的潮流算法,并选用该种算法来进行潮流计算。

本文以 Visual C++ 6.0 作为开发工具,开发了可运行在 Windows 98 或 Windows NT 4.0 操作环境下的配电网潮流计算应用模块,该模块具有实时和研究两种方式,驱动方式可以任意选择为:定时、按事件或调度员请求等方式;软件充分考虑了配电网三相不平衡、 R/X 值大、辐射结构等特点,在算法上确保计算的收敛性;软件既能处理三相平衡系统,也能处理三相不平衡系统;允许用户手动选择计算模型和计算方法,也可由软件根据系统网络拓扑分析结果,自动选择最优的计算方法。在具体的软件编程中,充分利用了可视化设计原则和面向对象的编程技术,采用了动态内存、矩阵的稀疏存储、网络拓扑的链式存储等编程技术,实现了节点和支路的自动编号,三相潮流计算,负荷数据修正等功能,并且密

切结合工程实践的特点,建立了直观方便的 Windows 界面。并与配电网实时数据库连接,实现了配电网潮流的实时计算。(由于篇幅所限,仅以前推回代法和回路阻抗法为例)。

在本文开发的配电网潮流计算应用软件中,前推回代潮流算法采用层次编号方案,而回路阻抗算法采用先根顺序的前序遍历编号方案。所谓层次编号方案是指按照层次遍历二叉树时访问到的各节点顺序,来由小到大给各个节点编号。二叉树的层次遍历是指从二叉树的第一层(根节点)开始,从上至下逐层遍历,在同一层中,则按从左到右的顺序对节点逐个访问。前序编号方案如前所述。程序中实现了自动编号功能。配电网的原始输入数据中各个节点可以随意编号,也可以不编号而只把配电系统中具有实际意义的节点名称输入,程序执行时自动为其编号。潮流计算的输出结果中,可以只输出各个结果对应的节点名称。这样,整个编号过程对操作员是不可见的,无需操作员进行干预和处理。这同时增加了潮流计算的透明度,方便了操作员的操作。

图3为本文开发的配电网潮流计算软件的程序框图。

4 结论

本文针对配电网的具体实际情况,提出了一种综合潮流设计方法,并应用于实际的 DMS 的开发中,达到了预期的设计目的,使潮流计算作为 DMS 的高级应用软件的基础,具有较好的收敛特性和一定的灵活性、可移植性。

参考文献:

- [1] Chen T S, Chen M S et al. Distribution system power flow analysis a rigid approach. IEEE Trans PWD, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [2] Luo G X, Semlyer A. Efficient load flow for large weakly meshed networks. IEEE Trans, 1990, 5(4): 1309-1316.
- [3] Lin C E, Huang Y U, Huang C L. Distribution system load flow calculation with microcomputer implementation. EPSR, 1987, 13: 139-145.

(下转第34页)

的培训、考核,具有完善的考核管理功能;

4) 采用关系型数据库作为知识的表示方法,用以存储和管理所编辑的全部信息,使得知识的表示与应用灵活、方便,为建立开放式的知识库系统提供了条件;

5) 实现了系统的通用性和可维护性,为系统的推广创造了有利条件。

参考文献:

[1] 荆铭. 多媒体变电站仿真培训系统的开发与应用. 电网技术, 1997, (2).

- [2] 韩喜峰, 马晓光. 计算机在变电所仿真系统中的应用. 东北电力技术, 1996, (10).
- [3] 刘蔚, 杨宛辉, 谢琦. 计算机变电站仿真培训专家系统的图形管理系统. 继电器, 1999, (4).
- [4] 杨宛辉, 许珉, 谢琦. 变电站计算机仿真培训专家系统开发与应用. 继电器, 1999, (2).
- [5] 王勇, 杨宛辉, 谢琦, 海德伦. 一种可视化的电气二次屏图形编辑系统. 全国高等学校电力系统及自动化专业第十五届学术年会论文集, 1999, 10.
- [6] Mike Mckelvy, Bonald Martinsen. Visual Basic 5 开发使用手册. 机械工业出版社, 1997, 12.

Research on fault compilation system of general fault simulation and training system for substation

WANG Yong, YANG Wan-hui, XIE Qi, XU Min

(Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The Fault Compilation System in the Simulation and Training Expert System for Substation is presented in this paper. This system is an open system, all training contents can be compiled and enacted by users themselves. Connecting with the graphical compilation system in the simulation system, it can draw conveniently the graphical interface of the control centre room in substation, realize the compilation and display of the simulative fault phenomena in the whole software simulation, and realize the compilation examination content.

Key words: substation; expert system; the fault compilation system; the graphical compilation system

(上接第 30 页)

- [4] Fan Zhang, Carols Cheng. A modified newton method for radial distribution system power flow analysis. IEEE Trans, 1997, 12(1): 389-397.
- [5] Haque H M. Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration. IEE Proc.-Gener

Transmission Distribution, 1996, 143(1): 33-38.

- [6] Carol S Cheng, Shirmohammadi D. A Three-Phase power flow method for real-time distribution system analysis. IEEE Trans On Power Systems, 1995, 10(2): 671-678.

A compromise power flow technique for distribution management system

LI Gui-cun¹, HUANG Yi-min², LIU Wan-shun¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 100085 China; 2. Shanghai Electric Power Institute, Shanghai 200090 China)

Abstract: On the basis of the technology challenges of the distribution network, one new method for distribution power flow calculation is proposed. This method with high convergence speed and good robustness is used in our Distribution Management System(DMS).

Key words: power flow calculation; distribution management system

全国高校电力系统及其自动化专业 第 16 届学术年会将在吉林召开

全国高等院校电力系统及其自动化专业第 16 届学术年会预定于 2000 年 9 月在东北电力学院(吉林市)召开。年会征文的范围包括:电力系统规划、设计与可靠性;电力系统稳态运行分析与计算;电力系统继电保护;电力系统自动化及远动技术;电力系统暂态过程、稳定性、安全性分析及控制;高压直流输电及灵活交流输电(FACTS)技术;能量管理系统(EMS)及配电网自动化,电力设备监测与故障诊断;人工智能在电力系统中的应用;电力市场;理论电工;教学研究及其它。

年会论文截稿日期为 2000 年 6 月 15 日(以邮戳为准)。

大会秘书处通信地址: 132012 东北电力学院电力工程系

会议联系人: 陆达 王克英 崔实 鲁志伟 贾清泉 周军

联系电话: 0432-4806691, 4806558