

# 三相不平衡配电网的潮流计算

孙振, 屈瑞谦, 唐巍, 中国农业大学信息与电气工程学院

**摘要:** 该文提出了一种适用于三相辐射状配电网潮流计算的方法。该方法根据辐射状配电网的结构特点, 在考虑了三相不平衡的情况下, 建立了配电系统潮流的计算模型, 算例结果证明了该算法具有输入格式简单、计算速度快、占用内存少和收敛性好等特点, 从而验证了该算法的有效性。

**关键词:** 三相不平衡; 辐射状配电网; 前推回代法

**中图分类号:** TM727.2

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1003-0867(2010)06-0014-02

潮流计算是电力系统分析与研究中最基本和最重要的一种电气计算, 目前, 绝大多数实用的潮流计算方法还仅能处理三相平衡条件下的电力系统, 即认为发电机、变压器、电力线路、并联电容器等元件都是三相对称的, 负荷也是三相平衡的, 这样就可以按照单相潮流来计算。然而, 配电网具有与输电系统明显不同的特点, 一般是环状结构、开式运行, 其支路参数比较大, 近年来配电系统中出现了不少的不对称负荷, 如单相整流设备、电弧炉等。因此, 就有必要研究电力系统三相不对称潮流计算的问题。

前推回代算法是从严格的网络方程出发而推导出来的适用于配电网的潮流算法, 过去一般将其用于单相潮流计算, 现将这种算法推广应用于10 kV三相负荷不对称的辐射状配电网。

## 1 配电系统潮流计算模型

### 1.1 配电线路模型

用于潮流计算的配电线路模型通常采用传统的 $\pi$ 型等效电路, 即包含了线路纵向电阻、电感效应等效成的串联阻抗和线路横向电容效应等效的并联阻抗。由于配电网线路的R/X比值性特点, 不能忽略线路的电阻。配变二次线路因电压很低且长度较短, 可忽略线路与线路、线路与大地之间的电容耦合效应, 故等效模型只为串联阻抗。

### 1.2 配电变压器模型

常规变压器模型中包含漏磁支路和励磁支路, 由于配电网中配变数量较多, 故配电网中不能忽略励磁支路。铁芯损耗是励磁支路电流中的磁滞和涡流分量在磁芯中所消耗的有功功率及磁化电流分量引起励磁支路吸收无功功率的总和。电压一定时, 励磁支路所产生的铁芯损耗与负载电流无关, 基本为恒定值, 并近似等于空载损耗, 建模时可用铁芯损耗代替励磁支路。从而可以把根据铁芯功率损耗的函数求得的有功功率和无功功率作为除变压器负荷外的额外功率需求, 并联在变压器等值电路的二次侧, 来表达变压器的铁芯损耗。

## 2 基于电流的前推回代法

前推回代类方法在前推过程中计算各负荷结点的注入电流或功率流, 从末梢结点开始, 通过对支路电流或功率流的求和计算, 获得各条支路始端的电流或功率流, 同时可能修正结点电压; 在回代过程中计算利用已设定的源结点电压作为边界条件及计算各支路电压降和末端电压, 同时可能修正支路电流或功率流; 如此不断重复前推和回代两个步骤, 直到收敛。

对一个有N个结点的配电系统, 通常已知量为根结点的电压 $U_0$ 、各结点负荷 $P_{Li} + jQ_{Li}$  (其中 $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$ ) 及配电系统拓扑结构和各支路阻抗。待求量为各结点电压 $U_i$ 和支路的潮流功率及网损。

节点i的负荷电流 $I_{Li}$ 可表示为:

$$I_{Li} = (P_{Li} - jQ_{Li})/U_i \quad (1)$$

式中  $P_{Li} - jQ_{Li}$ 为结点i的负荷功率共轭;  $U_i$ 为结点i的电压。

如果支路 $b_i$ 的末结点 $j$ 为末梢结点, 则该支路电流 $I_i$ 即为末梢结点的负荷电流 $I_{Li}$ ; 如果支路 $b_i$ 的末结点为非末梢结点, 则该支路电流 $I_i$ 应为末结点负荷电流和所有子支路电流之和, 即:

$$I_i = I_{Li} + \sum_{k \in d} I_k \quad (2)$$

式中  $d$ 为以上接支路的末结点为父结点的支路集合。

对于以结点 $i, j$ 作为首末结点的支路 $b_j$ 有:

$$U_j = U_i - I_i(R_i + jX_i) \quad (3)$$

根据式(1)、(2), 由末梢点向根结点递推, 就可以得到各支路电流, 然后根据式(3)从根结点向末梢结点回代, 可求得各结点电压。判断相邻两次迭代电压差模分量的最大值是否小于给定的收敛标准, 若迭代收敛, 停止计算, 否则转入(2)式继续迭代计算各结点的等值注入电流。

## 3 算例分析

现推出的潮流算法的拓扑结构采用“金字塔形分层编号法”。如图1所示是一个按结点、支路编号的典型辐

射型网络系统。平衡结点编号为0（简称为0结点），以0结点为“金字塔尖”，先由上而下分层，由第一层开始，同层内由左向右编号，先编上一层再编下一层。每条树枝

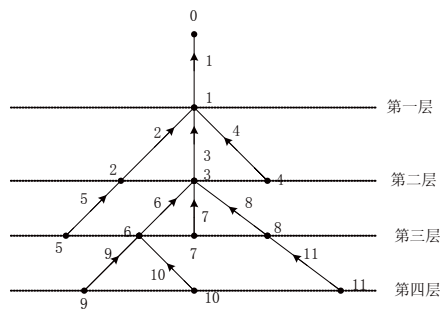


图1 12结点系统

（支路）的正方向为指向“金字塔尖”的方向，以上编号过程与支路编号同时进行。由拓扑分析结果可以看出第一层包含支路1，第二层包含支路2、3和4，第三层包含支路5、6、7和8，第四层包含支路9、10和11。

对图1所示网络在拓扑结构建立完成的基础上运用Delphi编制程序，仿真实验实现本文提出的潮流算法。利用12结点网络系统的原始数据生成线路三相串联阻抗矩阵、变压器的结点-支路关联矩阵C和变压器的结点导纳矩阵，且所有的并联支路将转变为带电流注入模型。最大迭代次数设为30，迭代收敛精度设为0.00001。当迭代满足收敛条件数据时且迭代次数小于，则潮流结果读入文件中，否则迭代发散中止程序。编程时采用标么值进行计算，电压的标么基准值10 kV，容量标么基准值为1 MVA；电源电压（平衡结点）ABC三相电压幅值都为1（p.u.）。

运行程序得到潮流计算结果，幅值一般稳定在额定值附近，比较合理。收敛迭代次数为5次，收敛时间为 $10^{-4}$  s。

此算例中的三相串联阻抗参数都是采用的文献三相不对称系统潮流计算的数学模型及计算方法中的线路原始数据生成的，其R/X比值在0.3~0.9之间。因为电网的实际的R/X比值范围很大，所以一个好的配电网潮流计算程序应该能快速精确计算各种不同R/X比值的配电网。下面分别取一组系数去乘串联阻抗参数，将R/X比值的范围扩大，然后代入算法程序得到计算结果如表1所示。

表1 不同R/X比值的算例结果

R/X	0	0.003~0.019	0.18~1.14	0.6~3.8	2.4~15.2	6~38
指标	( $\gamma=0.00$ )	( $\gamma=0.01$ )	( $\gamma=0.60$ )	( $\gamma=1.8$ )	( $\gamma=8$ )	( $\gamma=20$ )
收敛迭代次数	4	4	4	5	8	10
收敛时间/s	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	0.06

配电网运行时还可能会出现三相负荷严重不平衡的情况（包括重负荷甚至断电运行等），调整结点3的三相负荷注入功率，计算结果如表2所示。

表2 不同注入功率的算例结果

	A相重负荷	AB相重负荷	ABC相	A相断	AB相断
	BC相轻负荷	C相轻负荷	重负荷	线运行	线运行
收敛迭代次数	5	5	5	5	5
收敛时间/s	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$

一般认为算法的稳定性越好，受迭代变量初值的影响就越小。以上计算的电压幅值均为

表3 不同电压初值的算例结果

电压初值	迭代次数	收敛时间
100.00 (p.u.)	4	$10^{-4}$
10.00 (p.u.)	4	$10^{-4}$
0.500 (p.u.)	5	$10^{-4}$

1（p.u.），相角为0，若调整电压幅值的初值，计算结果如表3所示。

以上三种情况算例结果的迭代次数少，收敛时间短，满足收敛精度要求，从而证明该算法可以完成配电网的三相不平衡（包括单相潮流计算或三相负荷极度不平衡）、大R/X比值（范围可达0~38之间）、辐射结构等其他算法解决不了的问题，具有很好的精确性和稳定性，可以普遍适用于中低压配电网的潮流分析与计算。

## 4 结论

文章着重讲述了一种配电网潮流计算的算法。该方法充分利用辐射配电网的特点，对网络按“金字塔形”分层编号，在此基础上，利用前推回代法实现潮流计算。所提算法简洁明了，编程方便易行。算例结果说明了算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M],高等教育出版社,2007.
- [2] 郭志清. 辐射型配电网前推回代潮流算法的改进[J]. 内蒙古科技与经济,2008,24.
- [3] 廖怀庆. 配电网三相不对称系统潮流计算的数学模型与计算方法[D]. 南京:东南大学,2000.
- [4] 刘雅静. 配电网三相潮流计算和状态估计算法的研究与软件开发[D]. 北京:中国农业大学,2002.
- [5] 王帮灿. 10 kV配电网无功优化研究[D]. 北京:中国农业大学,2008.
- [6] 费焯. 配电网潮流的分析与研究[D]. 华北电力大学,2007.
- [7] 周震,陈星莺. 不对称配电网潮流计算的研究[J]. 江苏电机工程,2001,1.
- [8] 杨建华,徐鹤立. 配电系统不对称潮流计算的实用算法研究[J],东北电力技术,1999,4.
- [9] 廖怀庆,单渊达,莫铭培,吴杰. 复杂配电网三相实用潮流算法,继电器[J],2001,5.
- [10] 游广增,徐政. 一种不对称配电网三相潮流快速算法[J]. 继电器,2006,19.
- [11] 吴文传,张伯明. 三相不平衡配电网的潮流故障统一分析方法[J]. 电力系统自动化,2002,20.

（责任编辑：陈淑芳）