

## 支路重载型潮流算法的研究

彭世康<sup>1</sup>, 黄伟<sup>1</sup>, 郭志忠<sup>2</sup>, 龚卫国<sup>3</sup>(1. 华北电力大学电力与电子工程学院, 北京 102206; 2. 许继电力科学研究院, 北京 100085;  
3. 许继变压器有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 在牛顿-拉夫逊法的基础上提出了一种支路重载型潮流算法。这种算法对于变压器和线路等支路采用统一的反映支路自身参数的对称电路模型, 可以直接用支路自导纳进行支路功率的计算和雅可比矩阵元素的求取, 不需要专门再构建节点导纳矩阵。这种算法可以用来计算变压器的变比, 特别适用于线路参数估计、变压器分接头估计。该算法对迭代过程中的修正方程式进行了大量的简化, 使计算过程变得简单快速。详细地阐述了这种算法的处理策略, 最后将它与牛顿-拉夫逊法进行了收敛程度和收敛速度的比较, 结果令人满意。

**关键词:** 支路重载; 潮流算法; 变比; 支路功率

## Research on branch congruency power flow algorithm

PENG Shi-kang<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, GUO Zhi-zhong<sup>2</sup>, GONG Wei-guo<sup>3</sup>(1. Electrical Power and Communication Engineering College, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. XJ Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China; 3. XJ Transformer Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** A branch-congruency power method is presented, based on improved Newton-Raphson power flow algorithm. Both transformer and branch line adopted to circuit symmetric model which reflect shunt in this algorithm, can use the branch self-admittance to calculate electrical power and current based on node power and elementary of Jacobion matrix. Much work is done in order to reduce iterative times. The method could also calculate the transformation ratio, in particular be true of line parameter and the transformer tap. Compared Newton-Raphson algorithm with the convergence and rate, the paper proposes calculation process in detail and obtain satisfied results.

**Key words:** branch-congruency; power flow algorithm; transformation ratio; branch power

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0013-03

## 0 引言

传统的牛顿-拉夫逊潮流算法是比较常见的潮流计算方法, 对于变压器的电路模型通常采用 $\Pi$ 型等效电路, 在此基础上形成节点导纳矩阵, 进而计算各节点的注入功率, 并以此为基础构建节点功率的修正方程式, 求解各节点的电压向量值<sup>[1]</sup>。

支路重载型潮流算法是在传统的牛顿-拉夫逊潮流算法的基础上改造而来的, 是一种新型的牛顿-拉夫逊潮流算法, 具有它自身的特点:

1) 对变压器的电路模型不作 $\Pi$ 型等效电路变换, 直接使用变压器自身的阻抗和变比作为支路模型, 因此线路和变压器等支路可以重载为一个反映支路自身参数的对称电路模型。

2) 直接调用支路自身的导纳和变比来计算功率和电流, 不需要专门构建节点导纳矩阵。

3) 基于支路功率来求取节点功率和雅可比阵元素, 每次迭代的计算量主要在于计算各支路的有功电压比值、无功电压比值以及解方程组上。

4) 对于迭代中的修正方程式作了大量的简化工作, 将普通PQ节点与特殊PQ节点的修正方程式进行重载, 大大提高了迭代速度。

文献[2]提出了一种计算变压器变比的有效方法, 但是该方法由于对变压器支路采用如图1所示的理论模型, 因而增加了网络模型的节点数, 使修正方程式的维数增大, 增加了解方程式的计算量。

支路重载型潮流算法在不增加节点数的情况下, 直接把变压器的变比当作状态量计算出来, 并且对于求解变比的修正方程式进行了化简, 使各修正方程式的雅可比阵元素计算式一致, 便于方程式的求解和PQ解耦处理。特别适用于进行线路参数估计和变压器分接头估计<sup>[2,3]</sup>。

### 1 支路模型

潮流计算中, 变压器支路的理论模型<sup>[1,2]</sup>是由理想变压器和支路阻抗串联构成的。如图 1 所示。

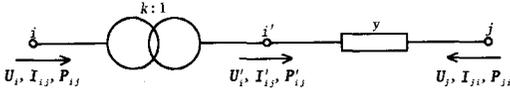


图 1 变压器支路的理论模型

Fig.1 Ideal branch model of transformer

把理想变压器两端的节点  $i$  和  $i'$  进行压缩, 就得到支路重载法的变压器支路模型, 如图 2 所示。

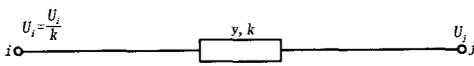


图 2 支路重载法的变压器支路模型

Fig.2 Congruent branch model of transformer

将线路模型与图 2 的变压器支路模型进行叠合, 就得到了重载的支路模型, 如图 3 所示。

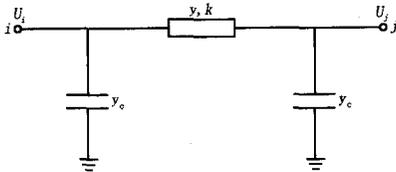


图 3 支路重载法的支路模型

Fig.3 Congruent branch model

图 3 中, 对于线路及无功补偿装置支路,  $k=1.0$ ; 对于变压器支路,  $y_c=0$ 。

可见, 支路重载法的支路模型是一个对称的电路模型, 表征该模型的参数有  $y, y_c, k$ , 也就是  $g, b, b_c, k$  四个参数。它真实地反映了支路的功率分配。而传统的变压器支路模型存在非对称的接地支路分支, 是不对称的。

### 2 节点模型

支路重载法对节点电压状态的处理与传统潮流算法的处理也不同。传统的潮流算法中, 每一个节点的电压状态是唯一的, 它对于任意一条支路来说, 有唯一的电压幅值和电压相角。

而在支路重载法中: 当节点在支路中作为变压器非标准变比侧节点时, 该节点的电压幅值要除以该变压器变比, 然后再去计算该支路的功率值; 当节点作为变压器标准变比侧节点, 或作为线路及无功补偿装置一端的节点时, 该节点本身的电压幅值直接用于计算该支路的功率值。即一个节点对于不同的支路可能拥有不同的电压幅值。

$$U_i' = U_{i \rightarrow ij} = U_i / k_{ij}' \quad (1)$$

上式中, 把  $k_{ij}'$  称为支路  $(i, j)$  相对于  $i$  侧的变比, 简称相对变比。把  $k_{ij}$  称为支路  $(i, j)$  的绝对变比, 有  $k_{ij} = k_{ji}$ 。当  $i$  侧为变压器的非标准变比侧时,  $k_{ij}' = k_{ij}$ ; 否则  $k_{ij}' = 1$ 。对于线路,  $k_{ij}' = k_{ji}' = k_{ij} = 1$ 。

### 3 功率计算

支路重载法的功率计算以支路功率为基础。设

支路  $(i, j)$  的复功率为  $S_{ij}^{[1]}$ , 则有:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ij} &= \dot{U}_{i \rightarrow ij} \dot{I}_{ij}' = \dot{U}_{i \rightarrow ij} [\mathbf{U}_{i \rightarrow ij} \mathbf{y}_{cij} + (\mathbf{U}_{i \rightarrow ij} - \mathbf{U}_{j \rightarrow ji}) \mathbf{y}_{ij}] = \\ &= \frac{U_i^2}{k_{ij}'^2} [g_{ij} + j(b_{ij} + b_{cij})] - \frac{U_i U_j}{k_{ij}'} \cdot (\cos \theta_{ij} - j \sin \theta_{ij}) (g_{ij} + j b_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

因此, 支路的有、无功功率计算式如下:

$$\begin{cases} P_{ij} = \frac{U_i^2}{k_{ij}'^2} g_{ij} - \frac{U_i U_j}{k_{ij}'} (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{ij} = \frac{-U_i^2}{k_{ij}'^2} (b_{ij} + b_{cij}) - \frac{U_i U_j}{k_{ij}'} (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

定义支路  $(i, j)$  的雅可比元素  $H_{ij}$ 、 $N_{ij}$  和有功电压比值  $C_{ij}$ 、无功电压比值  $D_{ij}$  的计算式为:

$$\begin{cases} H_{ij} = (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) / k_{ij}' \\ N_{ij} = (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) / k_{ij}' \\ C_{ij} = U_i g_{ij} / k_{ij}'^2 - U_j N_{ij} \\ D_{ij} = -U_i (b_{ij} + b_{cij}) / k_{ij}'^2 - U_j H_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

对于节点  $i$  的接地支路 (如无功补偿装置), 定义支路导纳为  $y_{ii} = g_{ii} + j b_{ii}$ , 对地电纳  $b_{cii} = 0$ , 相对变比  $k_{ii}' = 1.0$ , 则可求得  $C_{ii}$ 、 $D_{ii}$  为:

$$\begin{cases} C_{ii} = U_i g_{ii} \\ D_{ii} = -U_i b_{ii} \end{cases} \quad (5)$$

因此, 支路  $(i, j)$  的有、无功功率计算式为:

$$\begin{cases} P_{ij} = U_i C_{ij} \\ Q_{ij} = U_i D_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

节点注入功率为与该节点相连的各支路流出功率之和。因此对于节点  $i$  有:

$$\begin{cases} C_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \\ D_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_i = U_i C_i \\ Q_i = U_i D_i \end{cases} \quad (8)$$

#### 4 修正方程式

支路重载法可以用来计算变压器的变比。把待求变比的变压器非标准侧节点称为特殊 PQ 节点, 它的 P、Q 方程式分别用于计算  $\theta$  和  $k$ 。因此支路重载法的节点类型有普通 PQ 节点、特殊 PQ 节点、PV 节点、平衡节点。对于特殊 PQ 节点, 必须给定其电压幅值、节点注入有功、无功功率。对于其他节点的要求跟传统的潮流算法一样。

为了便于计算修正方程式系数阵的元素, 先求取各节点的自导纳, 其计算式如下:

$$\begin{cases} g_i = \sum_{j=1}^n g_{ij} / k_{ij}^2 \\ b_i = \sum_{j=1}^n (b_{ij} + b_{cij}) / k_{ij}^2 \end{cases} \quad (9)$$

上式中, 当  $j=i$  时, 代表节点  $i$  的接地支路。当节点  $i$  不存在接地支路时,  $g_{ii}=b_{ii}=0$ 。对于待求变比的变压器非标准侧节点, 每次迭代计算过程中都要计算其自导纳。

定义修正方程式中量测量偏差  $\Delta C_i$ 、 $\Delta D_i$  为:

$$\begin{cases} \Delta C_i = C_i - P_{is} / U_i \\ \Delta D_i = D_i - Q_{is} / U_i \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$  为节点  $i$  给定的注入有、无功功率。

取方程式的状态量为  $U_i \Delta \theta_i$ 、 $\Delta U_i$ 、 $-U_i \Delta k_{i1} / k_{i1}$ , 则 PQ 节点的修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_i \\ \Delta D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_i + \frac{D_i}{U_i} & -g_i' - \frac{C_i'}{U_i} \\ g_i - \frac{C_i}{U_i} & b_i' - \frac{D_i'}{U_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \Delta \theta_i \\ \Delta U_i' \end{bmatrix} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left( \begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ -N_{ij} & H_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_j \Delta \theta_j \\ \Delta U_j' \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

对于上式, 当节点  $i$  为待求变比的变压器支路

( $i, 1$ ) 的非标准变比侧节点 (即特殊 PQ 节点) 时,

$$\begin{cases} g_i' = g_{i1} / k_{i1}^2 \\ b_i' = (b_{i1} + b_{c1}) / k_{i1}^2 \\ C_i' = C_{i1} \\ D_i' = D_{i1} \\ \Delta U_i' = -U_i \Delta k_{i1} / k_{i1} \end{cases} \quad (12)$$

当节点  $i$  为其它情况 (即普通 PQ 节点) 时,

$$\begin{cases} g_i' = g_i \\ b_i' = b_i \\ C_i' = C_i \\ D_i' = D_i \\ \Delta U_i' = \Delta U_i \end{cases} \quad (13)$$

PV 节点的修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_i \end{bmatrix} = (b_i + \frac{D_i}{U_i}) \cdot U_i \Delta \theta_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left( \begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_j \Delta \theta_j \\ \Delta U_j' \end{bmatrix} \right) \quad (14)$$

#### 5 算例

为了验证本文方法, 将其分别应用于 5 节点、22 节点等多个算例系统。并与牛顿-拉夫逊潮流算法相比较, 现将计算比较结果列于表 1。从算例结果可知, 支路重载法的收敛性能与牛顿-拉夫逊算法相同, 但是计算速度明显比牛顿-拉夫逊算法要快 (计算时间节省了 20%~30%)。

根据支路重载法的迭代步骤可知, 每次迭代的主要计算量集中于计算各支路的  $H_{ij}$ 、 $N_{ij}$ 、 $C_{ij}$ 、 $D_{ij}$  和解方程组上, 因此迭代速度快。

表 1 两种潮流算法的比较

电网系统	牛顿-拉夫逊算法		支路重载算法	
	计算时间	收敛次数	计算时间	收敛次数
5 节点系统	60 ms	5 次	40 ms	5 次
22 节点系统	70 ms	5 次	50 ms	5 次
30 节点系统	70 ms	4 次	50 ms	4 次
107 节点系统	260 ms	6 次	200 ms	6 次

表 1 中的算例采用 C++ 语言编程, 在 PentiumIII-667 机型的 PC 机上运行通过, 迭代精度为:  $\epsilon = 10^{-5}$ 。

#### 6 结论

本文提出了一种可以计算变压器变比的支路 (下转第 25 页 continued on page 25)

- [6] 柳焯. 电压稳定问题中重负荷节点的阻抗解析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (4).  
LIU Zhuo. The Impedance Analysis of Heavy Load Node in Voltage Stability Studies[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (4).
- [7] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点确定[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (6).  
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13 (6).
- [8] 葛维春. 电力系统电压稳定性与电压崩溃的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.  
GE Weichun. The Studies of Voltage Stability and Collapse for Power System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1992.
- [9] Vu K, Begovic M M, Novsel D, et al. Use of Local Measurement to Estimate Voltage Stability Margin[A]. In: PICA[C]. Columbus:1997.
- [10] 柳焯. 弱节点紧急无功补偿模式[A]. 97 全国电力系统自动化学术研究会论文集[C]. 1997.  
LIU Zhuo. Urgent Reactive-load Compensation Models on Weak Buses[A]. In: Power System Automatic Academic Seminar Symposium[C]. 1997.
- [11] 吴际舜, 侯志俭, 等. 电力系统潮流计算的计算方法 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.  
WU Ji-shun, HOU Zhi-jian, et al. The Algorithms of Load Flow Solution for Power System[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2002.
- [12] 周双喜, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
ZHOU Shuang-xi, et al. Power System Voltage Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

收稿日期: 2006-08-11; 修回日期: 2007-04-04

作者简介:

王冰 (1968-), 男, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化及计算机技术;

游振华 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定及其自动化控制; E-mail: yzh-301@163.com

韩学军 (1953-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统自动化及其计算机控制等。

(上接第 15 页 continued from page 15)

重载型潮流算法, 这种方法有以下特点:

- 1) 线路和变压器支路重载为一个反映支路自身参数的对称电路模型。
- 2) 功率和电流的计算式直接调用支路自导纳和变比来处理。
- 3) 可以对未知的变压器变比进行计算。
- 4) 收敛性能与牛顿-拉夫逊算法相同, 但收敛速度比牛顿-拉夫逊算法要快。

通过对牛顿-拉夫逊潮流算法的改进, 并进行了比较测试, 在收敛程度接近的前提下, 本文提出的方法收敛速度有较大的提高。

#### 参考文献

- [1] 陈衍. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
CHEN Yan. Power System Stability Analysis[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.

- [2] 顾全, 陆杏全. 电力系统实用状态估计中两个问题的处理[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (1): 26-29.

GU Quan, LU Xing-quan. Estimation of Transformer Tap Setting And Zero-Impedance Branches Power Flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(1): 26-29.

- [3] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

YU Er-keng. Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2006-11-09; 修回日期: 2007-03-16

作者简介:

彭世康 (1972-), 男, 硕士生, 软件设计师, 研究方向为电力系统高级分析、电力系统 MIS、电力系统实时监控; E-mail: Pengshikang@xjgc.com

黄伟 (1962-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统规划和可靠性。