

# 复杂配电网三相实用潮流算法

廖怀庆<sup>1</sup>, 单渊达<sup>2</sup>, 莫铭培<sup>1</sup>, 吴杰<sup>2</sup>

(1. 上海市电力公司调度通信中心, 上海 200025; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 基于配电网放射状结构、网络拓扑约束特点和戴维南多端口等值电路、高斯-赛德尔 PV 节点迭代等补偿技术, 并结合拓扑扩展和矩阵增广的数值方法提出一种解决复杂配电网的实用潮流计算方法。实验表明, 本文算法是有效的。

**关键词:** 配电网; 三相潮流; 弱环; PV 节点

**中图分类号:** TM74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)05-0013-04

## 1 引言

潮流计算是现代电力系统分析、运行和规划的基础。潮流算法的研究也历经了 40 多年的历史, 但发展成熟并普遍使用的却主要集中在对高压输电网的分析研究领域。由于配电网与输电网在网络结构(通常为放射状)、元件参数(大  $R/X$  比值和网络元件参数三相不对称)以及负荷特性(负荷三相不对称)等方面的差异, 使得输电网潮流计算方法很难应用于配电网<sup>[3]</sup>。随着电力市场和配网自动化(DA/DMS)的进一步深入, 电力用户(绝大多数在配电侧)对连续、可靠、优质供电的要求也越来越高。因此, 亟需寻求一种精确、稳定、实用的复杂配电网三相潮流算法, 使之不但能用于实时解算并监视配电网在线运行时的馈线潮流和母线电压, 而且也能够快速分析网络拓扑发生变化时的网络状态, 以便快速有效地进行负荷转移和故障恢复, 减少停电时间和故障范围。

在现有的配电网潮流算法<sup>[1]~[6]</sup>中, 有些仅能解决辐射型网络结构问题<sup>[1,2]</sup>; 有的也只能解算单相潮流<sup>[1,2,3]</sup>; 有的基于牛顿-拉夫逊算法, 其算法的稳定性较差<sup>[4]</sup>(因配电网大  $R/X$  比值特性而导致的雅可比矩阵主对角元不占优); 还有一些算法(如 YBus 法或 Implicit ZBus 法等)难以快速、实时地解算大型、复杂的配电网三相潮流<sup>[5]</sup>。因此, 研究和探索一种快速、全面和实用的配电网潮流算法就显得尤为重要。

## 2 本文算法推导

针对配电网的上述复杂特性, 本文利用“节点—支路关联矩阵” $A_{n+1}$ (设研究系统为  $n+1$  节点)来描绘具有辐射结构的单相配电网系统, 其节点、支路采用分层编号的方法<sup>[1,3]</sup>。若在矩阵  $A_{n+1}$  中去掉

平衡节点的相关项, 就可得到一个  $n \times n$  阶的“降阶的节点—支路关联矩阵” $A_n$ 。根据上述的编号方法,  $A_n$  为一稀疏且主对角元为 1 的上三角矩阵; 当网络拓扑扩展成三相系统后,  $A_n$  就扩展为  $3n \times 3n$  的三相矩阵  $A_{3n}$ , 并仍具有上述特性, 这样的数值特性使得矩阵运算相当地快速和高效。2.1~2.5 便是基于这样的数值特性而展开的讨论。

### 2.1 辐射网络算法

如果将配电网中所有的并联支路都置换成功率或电流的注入模型, 那么辐射网络就变成了一棵“树”其特性是节点数等于支路数加一。此外, 在进行电力系统静态分析时, 配电网可以等效成一个含交流正弦电压源的线性时不变 RLC 回路, 因而应该满足网络的两种基本约束关系, 即元件约束关系和拓扑约束关系。如下图 1 所示的  $n+1$  节点配电辐射网络, 上述两种约束方程为:

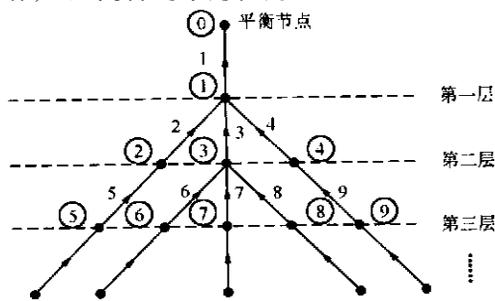


图 1

$$\text{元件约束} \quad \dot{I}_b = Y_b \dot{V}_b \quad (1)$$

$$\text{拓扑约束} \quad \begin{cases} A_{n+1} \dot{I}_b = \dot{I}_{n+1} & (2) \\ \dot{V}_b = A_{n+1}^T \dot{V}_{n+1} & (3) \end{cases}$$

联立方程 (1) ~ (3) 可得:

$$A_{n+1} Y_b A_{n+1}^T \dot{V}_{n+1} = \dot{I}_{n+1} \quad (4)$$

上式中  $\dot{V}_{n+1}$  ( $\dot{I}_{n+1}$ ) 和  $\dot{V}_b$  ( $\dot{I}_b$ ) 分别是  $n+1$  阶的节点电压(电流)和  $n$  阶的支路电压(电流)向量;  $Y_b$  为  $n$

$\times n$  阶的支路导纳矩阵,且是一个对角阵; $A_{n+1}^T$  是  $A_{n+1}$  转置矩阵。若消去与平衡节点有关的电压、电流项(下标为“ $r$ ”的项表示为与平衡节点有关的项),可得:

$$A_n Y_b [A_r^T \quad A_n^T] \begin{bmatrix} \dot{V}_r \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} = \dot{I}_n \quad (5)$$

进一步可化为(下式中的  $e_n$  为  $n$  维单位向量):

$$A_n Y_b A_n^T (\dot{V}_n - e_n \dot{V}_r) = \dot{I}_n \quad (6)$$

求解公式(6)中  $\dot{V}_n$  可通过以下三步计算得到:

$$\text{令 } \dot{I}_L = Y_b A_n^T (\dot{V}_n - e_n \dot{V}_r) \quad (7)$$

$$\text{并先计算 } A_n \dot{I}_L = \dot{I}_n \quad (8)$$

此步相当于矩阵回代运算。

计算方程式(7),即

$$A_n^T \dot{V}_n = Z_b \dot{I}_L - A_r^T \dot{V}_r \quad (9)$$

上式中  $\dot{V}_r$  是平衡节点电压; $Z_b$  是  $Y_b$  的逆阵,因而是一个对角阵; $A_n^T$  为下三角矩阵。故此步相当于前推运算。

收敛判别与循环迭代。

### 2.2 弱环网络的矩阵增广算法

对于如图 2 所示的弱环网络(以一环系统为例),我们先将此解环成开环电路,然后在解环处(断点)补偿电压和电流的边界等值条件,则前述的方程式(6)可变为:

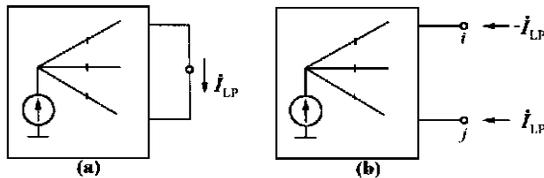


图 2

$$\begin{cases} B_{nb}^T \dot{V}_n = 0 & (10) \\ A_n Y_b A_n^T (\dot{V}_n - e_n \dot{V}_r) + B_{nb} \dot{I}_{LP} = \dot{I}_n & (11) \end{cases}$$

公式(10)中的  $B_{nb}$  本文称之为“降阶的断点——支路关联矩阵”,是  $n \times b$  的常数矩阵,其中  $b$  为环数(或断点数),其列号与断点号相对应,本文规定该矩阵任何一列元素产生的规则是以该断点解环后的两个分点经分层编号后,以编号小的分点为行号的元素为 1,编号大的则取为 -1,其余元素都为 0;该矩阵特点是每一列元素之和为 0,即  $B_{nb}^T e_n = 0$ 。

令  $\dot{U}_n = \dot{V}_n - \dot{V}_r e_n$ ,可得如下的网络拓扑增广矩阵方程式:

$$\begin{bmatrix} 0 & B_{nb}^T \\ B_{nb} & A_n Y_b A_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{LP} \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

上式进一步分解,可得( $E$  为单位矩阵):

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -E \\ Y_b A_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{temp} \\ \dot{U}_{temp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} L_{11}^T & \\ A_n^T & L_{12}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{LP} \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{temp} \\ \dot{U}_{temp} \end{bmatrix} \quad (14)$$

重组方程式(13)~(14),可得:

$$\begin{cases} A_n Y_b A_n^T \dot{U}_{temp} = \dot{I}_n & (15) \\ L_{11} L_{11}^T \dot{I}_{LP} = B_{nb}^T \dot{U}_{temp} & (16) \\ A_n Y_b A_n^T (\dot{U}_{temp} - \dot{U}_n) = B_{nb} \dot{I}_{LP} & (17) \end{cases}$$

综合方程式(15)、(17),可得:

$$A_n Y_b A_n^T (\dot{V}_n - e_n \dot{V}_r) = \dot{I}_n - B_{nb} \dot{I}_{LP} \quad (18)$$

显然,方程式(15)相当于(6)式中的辐射网络方程;此外,(16)式中的  $B_{nb}^T \dot{U}_{temp}$  是断点处的电压差,即戴维南等值电路的开路电压,而  $\dot{I}_{LP}$  是维数为  $b$ (即环的个数)的断点电流向量,故(16)式等式左边的  $L_{11} L_{11}^T$  即为断点阻抗矩阵  $Z_{BP}$ <sup>[3]</sup>。综上所述,弱环潮流求解步骤如下:

计算断点阻抗矩阵  $Z_{BP}$  (详见文献<sup>[3]</sup>);

计算节点注入电流  $\dot{I}_n$ ;

计算方程式(15)以便得到  $\dot{U}_{temp}$ ;

计算方程式(16)以得  $\dot{I}_{LP}$ ;

计算方程式(18)可得节点电压  $\dot{V}_n$ ;

迭代收敛判别与循环迭代。

### 2.3 PV 节点的处理方法

在配电网中,通常将无功电源和小发电系统作为 PV 节点来处理,其迭代步骤为:

计算各节点注入电流的初始值;

PV 节点电压幅值校正;

无功越界判别,若无功越界则将 PV 节点转化为 PQ 节点来处理。

### 2.4 三相扩展规则

电力网络通常用图 3(a)所示的单线图表示,其实际的三相接线图为 3(b)。据图 3 可分别得到单相和三相“降阶”节点一支路关联矩阵,单相矩阵为:

$$A_4 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

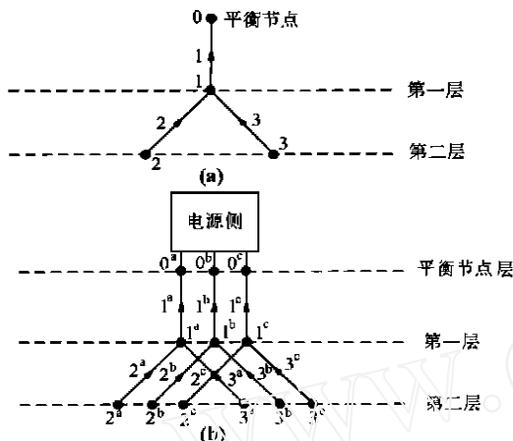


图3

上图的三相矩阵为:

$$A_{12} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

方程式(21)的分块矩阵表示为:

$$A_{12} = \begin{bmatrix} -E & 0 & 0 \\ E & -E & -E \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} E & -E & -E \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \quad (23)$$

在(22)~(23)式中, E是3×3阶的单位矩阵, 纵观(19)~(23)式, 可发现三相矩阵的分块形式与单相矩阵一一对应, 类似地可以得到如下“三相扩展”规则:

原单相系统的电流(或电压、功率等)向量中的每一个元素都变成了3维向量, 故原n维的电流(或电压、功率等)向量都扩展成了3n维; 任一阻抗(或导纳)矩阵中的元素都变成了3×3阶的子矩阵, 因而原n×n阶矩阵就扩展成了3n×3n阶, 原为对

角阵的支路阻抗(或导纳)矩阵也都变成了3n×3n阶的分块对角阵。

n×n阶的“降阶节点—支路关联矩阵”A<sub>n</sub>经三相扩展成了3n×3n阶的A<sub>3n</sub>, 单相矩阵A<sub>n</sub>中的元素-1, 0, 1也分别变成了3×3阶正负单位(或零)矩阵-E, 0, E, 其它矩阵, 如A<sub>r</sub>、B<sub>nb</sub>的扩展如同上述的A<sub>n</sub>。

断点阻抗矩阵Z<sub>BP</sub>经三相扩展成了3b×3b, 具体的求解详见文献<sup>[3,6]</sup>, 此处不再赘述。

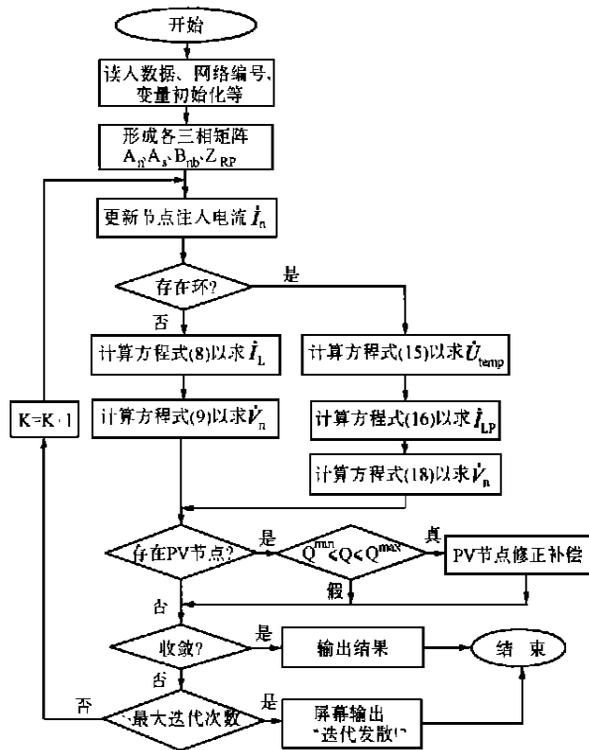


图4 本文算法程序的综合流程图

### 2.5 算法流程图及编程技巧

本文算法程序的综合流程图如图4所示, 为进一步提高计算效率, 编制程序时采用了如下方法: 1) 为避免缓慢的复数运算, 将各变量的实部和虚部分开计算, 由于本文算法的关联矩阵A<sub>n</sub>是常数矩阵, 这一点很容易做到。2) 因为A<sub>n</sub>、A<sub>r</sub>和B<sub>nb</sub>等矩阵当节点越多时就越稀疏, 所以可采用稀疏技术进行排零存贮及排零运算。

### 3 算例分析

本文算法对12和36节点系统<sup>[7,8]</sup>的测试均用C++语言在Pentium/300微机的VC6.0环境下实现的, 测试结果如表1~6所示。

表1 三相辐射网络的潮流计算结果比较

节点数	本文算法		前推回代法 <sup>[6]</sup>	
	No.	Time	No.	Time
12	4	0.05	4	0.05
36	3	0.06	3	0.05

表2 36节点三相弱环系统测算结果比较

环数	本文算法		前推回代法 <sup>[6]</sup>	
	No.	Time	No.	Time
1	3	0.05	6	0.06
2	3	0.05	6	0.06
5	3	0.05	6	0.06

表3 本文算法对PV节点的测算结果

PV节点数	12节点系统		36节点系统	
	No.	Time	No.	Time
1	4	0.05	3	0.05
2	4	0.05	3	0.06
5	8	0.06	52	0.11

表4 本文算法对复杂三相网络的测算结果

节点数	环数	PV数	No.	Time
12	1	1	4	0.05
	2	2	22	0.06
36	1	1	3	0.05
	3	2	3	0.06
	5	4	45	0.22

表5 本文算法对36节点系统R/X的测试

R/X范围	环数	PV数	No.	Time
0	1	1	3	0.05
	3	2	3	0.06
	5	4	49	0.22
0.9~5.7	1	1	4	0.05
	3	2	4	0.06
	5	4	15	0.11
1.8~11.4	1	1	6	0.05
	3	2	6	0.06
	5	4	16	0.11

表6 本文算法对36节点系统电压初值测试

电压幅值	环数	PV数	No.	Time
100.0 (p.u.)	1	1	4	0.05
	3	2	4	0.06
	5	4	59	0.22
0.01 (p.u.)	1	1	6	0.05
	3	2	6	0.06
	5	4	68	0.27

说明:表1~6中,“No.”代表迭代次数,“Time”代表收敛时间,时间单位为s。

## 4 结论

由表1~2可知,本文算法和前推回代算法相

比,辐射系统潮流的解算速度相当;对于弱环系统,随着系统规模和弱环数的加大,本文算法在计算速度上将逐步占上风。此外,在计算机内存和计算技术日臻进步的今天,评价一个潮流算法好坏的标准主要应从精确性、快速性、稳定性和实用性等四个方面来考虑。通过上述算例测试可得如下结论:

1) 精确性:本文算法的推导满足配电系统各种网络拓扑约束(如欧姆定律、KCL、KVL等),采用迭代进行求解,收敛精度为0.00001,完全满足配电网分析、运行和规划等各种决策计算的精度需要。

2) 快速性:由于本文算法充分利用配电网络的辐射结构特性、拓扑约束理论及数值方法,因而具有很高的计算效率。纵观表1~6可知,本文算法的解算速度足以胜任DA/DMS各种实时计算任务的需要。

3) 稳定性:理论上认为算法的收敛阶数与稳定性成反比;并且算法的稳定性越高,计算收敛受初始迭代变量的影响就越小。本文算法采用线性公式进行推导,具有一阶收敛阶数,理论上可证明具有较高的收敛稳定性。实验表明(表6),电压幅值初值在0.01~100(p.u.)之间变化对计算结果和收敛性能的影响也是微乎其微。

4) 实用性:由上述各表表明,本文算法能够充分解决配电网三相不平衡(包括网络参数和负荷的三相不平衡)、大R/X比值范围(表5)、辐射或弱环结构和PV节点等其它潮流算法不能同时解决的问题,因而,使得该算法能够很好地运用于配电网的在线潮流和故障恢复计算。表5的测试结果还表明(见R/X=0一栏),该算法也能快速、精确解算辐射或弱环结构地区的高压输电网络潮流(如,在未来几年内,上海将建六、七个500kV变电站,并且500kV主网架闭环运行;220kV网架则将分别以这几个500kV变电站为根节点,分区分层开环运行)。

## 参考文献:

- [1] Fan Zhang, Carols S Cheng. A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1):389-397.
- [2] Ray D Zimmerman, Hsiao-Dong Chiang. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4):2045-2052.
- [3] Dariush Shirmohammadi, H W Hong, Semlyen, A Luo G X. A Compensation-based Power Flow for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. IEEE Transactions on Power systems, 1988, 3(2):753-762. (下转第54页)

统通信软件稍作修改还可用于电网调度自动化、变电站无人值班等不同领域。

#### 参考文献:

- [1] 李瑞生,等. 电力系统自动化 GPS 精确对时的解决方案. 继电器, 1999, (5).
- [2] 苗世洪,等. 电力系统故障录波装置的远程通信问题研

究. 电力系统自动化, 1995, (7).

收稿日期: 2000-08-22

作者简介: 李阳春(1977-),男,硕士,研究方向为电力系统继电保护; 王慧芳(1974-),女,硕士,讲师,研究方向为电力系统继电保护。

### Integrated fault information processing system of power system

LI Yang-chun<sup>1</sup>, WANG Hui-fang<sup>1</sup>, ZHENG Jin-hui<sup>2</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Taizhou Power Supply Bureau, Taizhou 317000, China)

**Abstract:** On the basis of the characteristic and problems of network for microprocessor based relay and fault recorder in our country, a design scheme on a layered internetting mode is proposed and some problems on remote communication of fault data and GPS time setting in power system are described as well.

**Key words:** layered netting mode; remote communication; GPS

(上接第 16 页)

- [4] Garcia, A V, Zago M G. Three-phase Fast Decoupled Power Flow for Distribution Systems. IEE Proc Gen Transm Distrib, 1996, 143(2):188-192.
- [5] Mo-Shing Chen, Tsai-Hsing Chen. Application of Three-phase Load Flow to Power System Distribution Automation. IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong, pp. 472-478.
- [6] Carol S Cheng, Dariush Shirmohammadi, A Three-phase Power Flow method for Real-time Distribution System Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2):671-679.
- [7] 廖怀庆. 配电网三相不平衡系统的数学模型与计算

方法. 东南大学硕士学位论文, 2000 南京.

- [8] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial Distribution Test Feeders. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3):975-985.

收稿日期: 2000-10-23

作者简介: 廖怀庆(1975-),男,硕士,从事 EMS/SCADA、电力市场技术支持系统等方面的研究、开发和维护工作; 单渊达(1930-),男,教授,博士生导师,IEEE&CEEE 高级会员,研究方向为电力系统规划、EMS、DMS 和电力系统稳定控制; 莫铭培(1933-),男,教授级高工,原上海电力工业局中心调度所总工程师; 吴杰(1946-),男,副教授,研究方向为电力系统稳定控制、配电网自动化/馈线自动化(FTU)等。

### A three-phase load flow method for real-time calculation in complicated distribution networks

LIAO Hui-qing<sup>1</sup>, SHAN Yuan-da<sup>2</sup>, MO Ming-pei<sup>1</sup>, WU Jie<sup>2</sup>

(1. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200025, China;  
2. Southeast China University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** This paper presents a three-phase load flow method for solving the complicated distribution networks. Due to the applications of various techniques in the paper, the proposed method can effectively solve the problems of high R/X ratios, radial or weakly looped structure, PV nodes and unbalanced conditions. Test results illustrate that this method possesses an excellent quality of robustness, efficiency and accommodation.

**Key words:** distribution networks; three-phase load flow; weakly looped; PV nodes