

# 基于叠加原理和前代后代法的环状配电网潮流计算

刘伟良, 黄纯, 向为, 陈锐

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 提出了一种基于叠加原理和前代后代法的用于计算环状配电网潮流的改进算法。运用叠加原理, 将环状配电网的潮流计算转化为纯辐射状配电网的潮流计算。以支路功率为变量, 通过两层迭代来求解: 内层迭代计算纯辐射状网络潮流, 而用外层迭代来不断修正解环点支路功率达到整体收敛。针对该文的算法提出了一种基于节点邻接表的搜索方法, 用于搜索环网、形成环网阻抗矩阵而无需进行复杂的编码。利用 IEEE 标准节点系统进行了验算, 结果表明, 所提出的算法具有良好的收敛特性, 特别适合大规模多环状的配电网的潮流计算。

**关键词:** 环状配电网; 前代后代法; 潮流计算; 叠加原理

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)04-0017-05

## 0 引言

为了解决配电网的潮流计算问题, 许多学者进行了大量的研究, 提出了很多适合于配电网结构特点的算法<sup>[1,2]</sup>。基本上可分为 3 类<sup>[2]</sup>: 直接法<sup>[3,4]</sup>、基于牛顿-拉夫逊法算法<sup>[5~7]</sup>和前代后代法。直接法的计算量很大, 需要进行复杂编码, 当节点数较多时阻抗矩阵维数很高, 内存占用很大, 计算速度明显下降。基于牛-拉法的算法有较高的收敛性, 但每部迭代中需进行矩阵计算<sup>[2]</sup>, 且在  $R/X$  较大时收敛性降低。前代后代潮流算法是从高斯-塞德尔法发展而来的, 被认为是求解辐射状配电网潮流问题的最佳算法之一。该方法的主要优点是:

收敛特性接近线性, 迭代次数与网络规模基本无关; 不需要进行矩阵运算, 计算速度快; 存储量小, 不需要计算和存储网络的导纳矩阵, 适合大规模辐射状配电网的潮流计算。

配电网一般是环形设计, 开环运行, 但在配电网的实际运行和配电网优化(如: 网络重构、供电恢复等)计算中, 经常需要计算具有环状结构网络的潮流。对于环网的处理, 文献[8]提出了一种基于补偿法的负荷潮流算法, 并同时用于输电网和弱环配电网; 在此基础上, 文献[9]提出了“两阶段”法用于计算环状配电网的三相潮流, 但文献[8,9]是基于精确计算环网阻抗矩阵的基础上, 如果是恒功率负荷则必然存在较大误差; 文献[10]运用叠加原理计算少环辐射型配电网三相潮流, 内层迭代采用以支路电流为变量的前代后代法, 外层迭代通过不断修正回路电流达到整体收敛。

本文提出了以支路功率为变量的基于叠加原理和前代后代法的改进算法, 用于计算环状配电网潮流。提出了基于节点邻接表的搜索方法, 只要输入支路连接信息就可以自动解环、形成解环点简化等值阻抗矩阵和计算解环支路潮流。通过两层迭代来求解潮流问题: 内层迭代以支路潮流为变量用前代后代法计算纯辐射状网络潮流, 而用外层迭代来不断修正解环点支路功率达到整体收敛。利用 IEEE 标准的 33、69、123 节点系统进行了验算和比较, 结果表明, 所提出的算法具有良好的收敛特性, 具有很高的效率。

## 1 利用叠加原理分解环状配电网

开环点可以看作一对极性相反、大小相等电压源的叠加, 如图 1 所示。将所有的电压源短路, 求出节点  $i$ 、 $j$  间的等效阻抗  $Z_{ij}$ , 注意  $Z_{ij}$  不等于支路  $i$ 、 $j$  自阻抗,  $V_{ij0}$  为开环运行时的节点  $i$ 、 $j$  的电压差, 环路  $I_{ij0}$  通过下式求得:  $I_{ij0} = V_{ij0} / Z_{ij}$ ; 将  $I_{ij0}$  与开环运行的支路电流叠加, 所要叠加的支路是  $I_{ij0}$  流经的支路。



图 1 合环点处应用叠加原理

Fig. 1 Applying the superposition principle on loop joint point

开环点的电压可以通过解环后运用前代后代法求出, 关键是求节点阻抗, 以一个简单的 4 节点系统为例, 如图 2 所示。图 2(a) 为原网络, 负荷已经用等值阻抗代替; 图 2(b) 为图 2(a) 在节点 2 处开环后待叠加电压源及其等值电路; 图 2(c) 为图 2(b) 忽略对

地导纳的等值电路;图 2(d) 进一步简化,忽略等值负荷。与输电网比较而言,在中低压配电网中  $Z_{load}/Z_{branch}$  较小,所以采用图 2(c) 来简化带来的误差相对输电网来说比较大,一般为  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  pu,重负荷时更大。而图 2(b)和图 2(c)的计算比较繁琐,所以本文采用图 2(d)为简化等值电路,而简化带来的偏差通过迭代来消除。

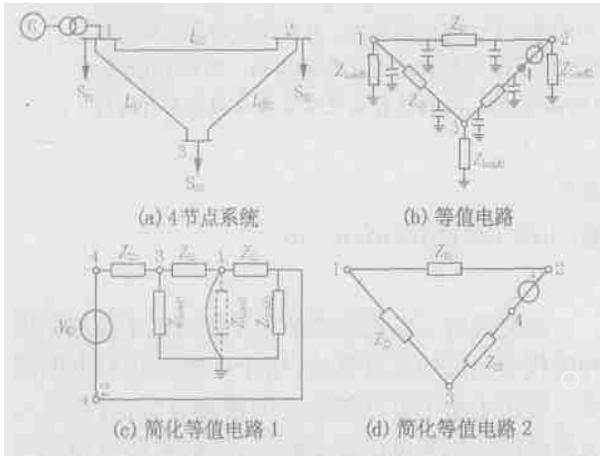


图 2 4 节点系统等值电路

Fig. 2 Equivalent circuits of a four-node system

辐射型多环网配电系统的解环与叠加以图 3 系统为例来说明。按前面介绍的方法可以把原系统分解为两个网络。所有的环解开形成纯辐射型网络,如图 3(a),用前代后代法求解;另一个是纯环状网络,如图 3(b),移去了电源(根节点)、所有负荷和所有不在环中的支路,只保留包含在环中的支路和合环点处附加的电压源,用回路电流法求解,即解方程  $V = Z \cdot I$ ,  $Z$  为方阵,维数与环网的个数相同。

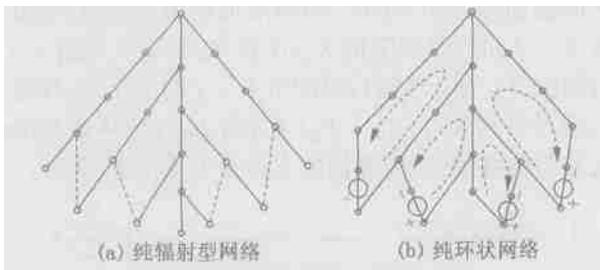


图 3 简单环状配电网络的分解

Fig. 3 Decomposition of the simple meshed distribution network

## 2 基于节点邻接表的搜索方法

对于前代后代法的节点编码方式,许多算法<sup>[2,6,7,8,9]</sup>采用分层的方法对节点重新编号,计算完

毕后还须“反编码”,且节点增减时要重新编号,比较繁琐。文献[11]中提出了用节点邻接表的存储方法和二叉树理论对节点编号,不过仅用于回路电流法求解配电网潮流。本文将节点邻接表应用到前代后代法,先运用广度优先搜索形成节点邻接表,然后找出环路和形成环路阻抗矩阵,无须对节点重新编码,且易于程序实现。所谓“节点邻接表”就是每行包含一个父节点和若干子节点的表,以如图 4 的 22 节点系统为例说明。

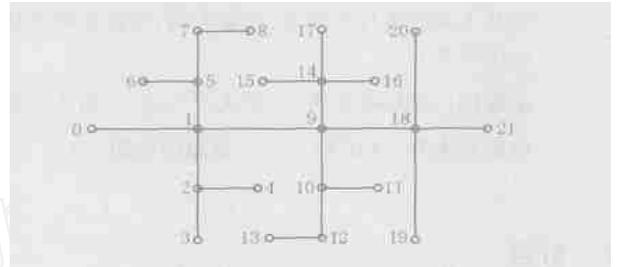


图 4 22 节点系统图

Fig. 4 A twenty-two-node network

表 1 节点邻接表

Tab. 1 Adjacent nodes

父节点	子节点	父节点	子节点
0	1	9	10, 14, 18
1	2, 5, 9	10	11, 12
2	3, 4	12	13
5	6, 7	14	15, 16, 17
7	8	18	19, 20, 21

首先以根节点为父节点,找出与根节点相连的节点,这些节点为子节点;如果子节点有支路相连(除去与其父节点相连的支路),那么子节点就成为下一条记录的父节点;以此类推得到表 1 所示的节点邻接表。采用上述编号方式,算法程序的实现非常方便。前代时,首先将指针指向表 1 的最后一条记录,由节点 18、19、20、21 的负荷和电压(由前一次迭代计算所得)得到节点 18 注入功率或注入电流;指针减 1,一直往前计算,如计算节点 9 时,节点 10、14、18 的注入功率或注入电流已经在前面计算好,所以节点 9 的注入功率或注入电流也可以计算出来;以此类推,所有节点的注入功率或注入电流在一次迭代中重新计算了一次。回代时,从表 1 的第一条记录开始往后计算,所有节点(除根节点以外)的电压也可以重新计算一次。

但是,原始数据一般是支路连接信息,且节点和支路多时直接写出节点邻接表容易出错,所以首先应由支路连接表形成节点邻接表。本文运用广度优

先算法的搜索方法来进行。具体步骤: 首先将所有的支路置白色; 指针指向第一条支路,首节点和末节点分别送到父节点数组和子节点数组,支路置黑色; 从下一条支路搜索到最后一条支路,判断支路的首节点与指针指向的支路的首节点是否相同,如有,支路置黑色,子节点数组下标加1,将此支路的末节点送到子节点数组; 转到,指针下移,子节点数组下标加1,直到所有的支路为黑色为止。

当系统中有环路时,首先解环,增加节点,设定环流方向为新增节点流向原节点,从解环点两端向根节点方向搜索,与环流方向相同,该支路的方向标志为1,否则为-1,所有的环路都搜索完毕就形成了带方向标志的环路表,方向标志主要用来形成阻抗矩阵。接下来形成阻抗矩阵: 从环路表的第一行开始,自阻抗为行中所有支路的阻抗之和并记录在阻抗矩阵相应位置; 从下一行搜索到最后一行,判断是否有与第一行相同的支路,支路方向标志相同则互阻抗为正,否则为负,并记录在阻抗矩阵相应位置; 转到,下移一行,直到环路表的最后一行。

### 3 基于支路功率为变量的前代后代法

首先设电源点(根节点)为松弛节点,其电压大小已知,电压相角为零,从节点邻接表中最后一行开始向前推算,设*i*为*j*的父节点,*k*=1时除根节点外节点电压均为额定值,算法的迭代过程如下,*k*+1次迭代时节点*i*的前推(前代)公式为:

$$P_i^{(k+1)} = P_{Di}^{(k)} + \sum_j P_{Lj}^{(k+1)} + \sum_c P_j^{(k+1)} \quad (1)$$

$$Q_i^{(k+1)} = Q_{Di}^{(k)} + \sum_j Q_{Lj}^{(k+1)} + \sum_c Q_j^{(k+1)} \quad (2)$$

$$P_{Li}^{(k+1)} = r_j \left[ (P_j^{(k+1)})^2 + (Q_j^{(k+1)})^2 \right] / (V_j^{(k)})^2 \quad (3)$$

$$Q_{Li}^{(k+1)} = x_j \left[ (P_j^{(k+1)})^2 + (Q_j^{(k+1)})^2 \right] / (V_j^{(k)})^2 \quad (4)$$

式中: $P_i^{(k+1)}$ 、 $Q_i^{(k+1)}$ 表示支路*i*(支路的标号与其末节点号相同)注入到节点*i*的功率;下标*Di*表示节点*i*的负荷功率;*C*表示与节点*i*相连的子节点集合;下标*Lj*表示支路*j*上损耗的功率,可由式(3)、(4)求得;其中( $r_j$ ,  $x_j$ )为支路*j*的阻抗。因为是从节点邻接表的最后一行往前推算,当计算节点*i*时 $P_i^{(k+1)}$ 、 $Q_i^{(k+1)}$ 已经计算出来。

回推(后代)节点*j*的电压时,节点*i*作为节点*j*的父节点其电压已经在本次迭代中算出,节点*j*的

回代公式为:

$$U_j^{(k+1)} = U_i^{(k+1)} - I_j^{(k+1)} \cdot (r_j + jx_j) \quad (5)$$

$$I_j^{(k+1)} = (P_j^{(k+1)} - jQ_j^{(k+1)}) / \text{conj}(U_j^{(k)}) \quad (6)$$

conj表示取共扼值,迭代终止判据为:

$$\max_i |U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)}| < \epsilon \quad (7)$$

### 4 环状配电网潮流计算

如果网络中有环路,首先解环,设原解环点集合为*I*,新增节点集合为*J*。潮流计算分两层迭代,内层迭代按式(1)~(7)计算纯辐射型网络潮流,外层迭代实际上是环路电流的叠加的修正,由于以支路功率为变量进行计算,所以按下面的式(8)~(12)修正解环点负荷功率:

$$S_{DI}^{(m+1)} = S_{DI}^{(m)} - U^{(m)} \cdot \text{conj}(I_{\text{loop}}^{(m)}) \quad (8)$$

$$S_{DJ}^{(m+1)} = S_{DJ}^{(m+1)} + U^{(m)} \cdot \text{conj}(I_{\text{loop}}^{(m)}) \quad (9)$$

$$U^{(m)} = (U_I^{(m)} + U_J^{(m)}) / 2 \quad (10)$$

$$I_{\text{loop}}^{(m)} = (Z_{\text{loop}})^{-1} \cdot U_{\text{loop}}^{(m)} \quad (11)$$

$$\max |U_I^{(m+1)} - U_J^{(m+1)}| < \epsilon \quad (12)$$

初始时 $S_{DI}^{(0)}$ 等于原节点负荷, $S_{DI}^{(0)} = 0$ ,由于 $I_{\text{loop}}^{(m)}$ 的方向设定为*J*→*I*,对节点集合*I*来说相当于注入功率,所以式(8)负荷修正量取负号,在整个计算过程中 $S_{DI}^{(m)} + S_{DJ}^{(m)}$ 始终等于原节点负荷,这样保持功率的平衡。下标loop表示与环路相关的向量。式(8)中 $U^{(k)}$ 按式(9)计算有利于加快收敛,因为开环点两端电压的平均值比开环点两端电压中任何一个更靠近真实值。对 $I_{\text{loop}}^{(m)}$ 的求解可以采用LU分解方法对式(11)进行求解。式(12)为迭代终止判据,即所有解环点两端电压差中的最大值小于某一很小的正数。

在以上内容的基础上,环状配电网潮流计算方法及步骤如下:

- 1) 读入网络原始参数,判断是否有环路。
- 2) 形成节点邻接表,如果有环路,则解环并形成环路表和环路阻抗矩阵。
- 3) 按式(1)~(7)计算纯辐射网络潮流(内层迭代)。
- 4) 按式(8)~(11)修正解环点负荷功率。
- 5) 检查迭代终止判据式(12),若不满足则转到3)。

步骤3)中,第一次平启动;后面则以上一次的收敛值启动,因为对大多数节点的电压来说,叠加了环网后,电压变化不是很大,这样将减少步骤3)的迭代次数。

5 算例

为了验证本文提出的算法的有效性,在 Matlab 环境下进行了相应算法的程序编制,并以 69 节点系统<sup>[5]</sup>对所提出的算法进行了验证。表 2 为系统加入环路时的迭代次数,分别以下面两个收敛判据(包括内外层)进行计算: 电压有名值  $\times 10^{-5}$ ; 电压有名值  $\times 10^{-6}$ 。表 3 为系统加入 10 个环路时的各解环点支路的功率修正量,内外层迭代的收敛判据为:电压有名值  $\times 10^{-6}$ 。

表 2 不同环数的迭代次数

Tab. 2 Iteration numbers with different loops

环路数	合环点	外层迭代次数		内层迭代次数		总迭代次数	
		判据 1	判据 2	判据 1	判据 2	判据 1	判据 2
1	(27,9)	4	4	5	6	14	17
3	(54,26),(39,90)	4	5	5	6	14	20
5	(34,56),(41,17)	4	5	5	6	16	20
10	(13,51),(48,90),(58,22),(36,66),(6,45)	4	5	5	6	14	19
15	(27,5),(4,37),(31,20),(49,16),(20,89)	4	5	5	6	14	21

表 3 10 个环路时的迭代过程中的功率修正量

Tab. 3 Correction terms of power during iterative process with ten loops

环路号	第 1 迭代/kW	第 2 迭代/kW	第 3 迭代/kW	第 4 迭代/kW	第 5 迭代/kW
1	1 758.6 + 920.96i	- 67.663 - 19.841i	- 0.740 27 - 0.691 97i	- 0.007 08 + 0.000 286i	5.78e - 006 + 2.87e - 005i
2	- 265.3 - 91.23i	4.2787 + 4.660 8i	0.116 68 + 0.026 54i	- 3.25e - 006 + 0.000 478i	- 5.36e - 008 - 9.73e - 006i
3	- 24.454 + 484.83i	- 39.72 - 40.325i	0.645 8 + 0.382 96i	- 0.001 75 - 0.001 55i	7.04e - 006 - 1.38e - 005i
4	21.727 + 7.932 5i	- 2.250 4 - 0.783 92i	0.037 72 + 0.036 86i	5.94e - 006 - 6.29e - 005i	7.94e - 007 + 1.22e - 006i
5	786.39 + 510.7i	- 29.794 - 13.425i	0.019 17 + 0.066 9i	- 0.001 2 - 0.001 35i	1.51e - 005 + 8.04e - 006i
6	832.95 + 354.84i	- 12.39 - 7.347 2i	- 0.079 29 - 0.109 7i	- 0.002 25 - 0.000 877i	9.70e - 006 + 1.31e - 005i
7	- 364.04 - 788.22i	46.946 + 28.703i	- 0.898 25 - 0.364 89i	0.002 02 + 0.001 007i	- 1.57e - 007 + 2.72e - 005i
8	295.25 + 158.94i	- 9.218 3 - 2.991 2i	- 0.264 95 - 0.147 47i	- 0.000 354 + 4.63e - 006i	- 1.73e - 006 + 7.05e - 006i
9	- 36.481 - 95.111i	0.838 86 + 3.765 9i	- 0.023 4 - 0.007 06i	0.000 161 - 0.000 310i	- 9.03e - 006 - 7.25e - 006i
10	210.28 + 75.161i	- 1.568 9 - 0.030 111i	- 0.228 12 - 0.293 01i	0.000 799 + 0.002 90i	- 3.36e - 005 + 2.00e - 007i

从表 2 中可知所加的环路多少对总迭代次数影响不大,总迭代次数稳定在 20 次左右,而迭代精度较高时,总迭代次数有所增加;在表 3 中,各解环点功率修正量经几次迭代后几乎接近于零,收敛迅速。从以上计算结果看出,本文提出的算法具有较好的收敛特性。

本文还针对文献[10]提出的算法编制了另外一个程序(未考虑三相潮流),对 3 个 IEEE 标准系统: 33 节点系统<sup>[12]</sup>、123 节点系统<sup>[13]</sup>和上述系统,分别用两个程序进行计算比较,内层迭代精度为电压有名值  $\times 10^{-5}$ ,外层迭代精度为电压有名值  $\times 10^{-4}$ ,3 个算例用两个程序计算出的结果显示相应节点电压

之差最大值仅为 2 V,本文这里只列出了迭代次数的比较结果,如表 4 所示。从表 4 可以看到,随着网络节点的增加,两种算法的迭代次数没有太大的变化,特别适合大规模多环网的配电网的潮流计算,而本文的算法的迭代次数较少,更具有优势。

6 结论

本文提出的以支路功率为变量环状配电网潮流算法具有简单、实用、效率高等特点。运用叠加原理,使整个复杂的大规模环状配电网分解为两个容易求解的网络,节省了计算时间和内存需求量。

表 4 迭代次数比较

Tab. 4 Comparison of the iteration numbers

算 法	系 数 环 路 数	33 节点系统			69 节点系统				123 节点系统			
		1	3	5	2	5	10	15	5	10	15	20
文献[10]算法	外层	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	内层	6	6	5	6	6	6	6	6	6	7	7
	总次数	24	30	22	28	30	29	30	30	30	32	33
本文算法	外层	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	内层	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	总次数	17	18	18	18	18	17	16	16	18	17	17

针对本文的算法提出的基于节点邻接表的搜索方法无需进行复杂的编码,且易于编程实现。利用3个IEEE标准系统进行了验算和比较,结果表明,所提出的算法具有良好的收敛特性,特别适合大规模多环状的配电网的潮流计算。

#### 参考文献:

- [1] Ghosh S, Das D. Method for Load Solution of Radial Distribution Networks[J]. IEE Proc — Gener, Trans and Distrib, 1999, 146(6): 641-648.
- [2] Losi A, Russo M. Object-oriented Load Flow for Radial and Weakly Meshed Distribution Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1265-1274.
- [3] Gswami S K, Basu S K. Direct Solution of Distribution Systems[J]. IEE Proc C, 1991, 138(1): 78-88.
- [4] TENGJ H. A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solution[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [5] Baran M E, Wu F F. Optimal Capacitors Placement on Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [6] Chiang H D A. Decoupled Load Flow Method for Distribution Power Network, Algorithms Analysis and Convergence Study [J]. Electric Power Energy System, 1991, 13(3): 130-138.
- [7] Zimmerman R D, Chiang H D. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 2045-2052.
- [8] Shirmomadi D, Hong H W, Semlyen A, et al. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 753-762.
- [9] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 一种求解环状配电网潮流的有效算法——两阶段法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(5): 5-9.
- CHEN Gen-jun, WANG Lei, TANG Guo-qing. An Efficient Two-state Load Flow Method for Meshed Distribution Network [J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(5): 5-9.
- [10] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 74-79.
- CHE Ren-fei, LI Ren-jun. A New Three-phase Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 74-79.
- [11] 王丹, 常宝立. 一种用于配网潮流计算的节点编号新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 22-26.
- WANG Dan, CHANG Bao-li. A Novel Method of Node Numbering Scheme on Distribution System Power Flow Calculation[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(1): 22-26.
- [12] Baran M, Wu F F. Network Reconfiguration Distribution System for Reduction and Load Balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [13] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial Distribution Test Feeders [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.

收稿日期: 2004-06-11; 修回日期: 2004-11-08

#### 作者简介:

刘伟良(1974-),男,硕士研究生,从事电力系统自动化、无功优化与控制等方面的研究工作; E-mail: lwl200305@163.com

黄纯(1966-),男,博士,副教授,从事电力系统自动化、谐波分析与抑制、微机保护等方面的教学与科研工作;

向为(1978-),男,硕士研究生,从事电力系统自动化、无功优化与控制等方面的研究工作。

### An improved power flow algorithm for meshed distribution networks based on superposition principle and forward/backward sweep method

LIU Wei-liang, HUAN Chun, XIANG Wei, CHEN Rui

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Based on the superposition principle and the forward/backward sweep method, an improved power flow algorithm for meshed distribution networks is proposed. First, the meshed network is converted into pure radial networks by applying the superposition principle. Then, considering branch power as variable, the power flow problem is solved by two-layer iterations. The internal iteration calculates the power flow of pure radial network, the outside one corrects the power flow of broken branch to achieve global convergence. Moreover, a searching method based on the adjacent nodes table is presented to search the loops and obtain its impedance matrix. The proposed algorithm is tested by IEEE systems, and the results indicate that it has a good convergence performance, and is specially fit for the large scale meshed distribution networks.

**Key words:** meshed distribution network; forward/backward sweep method; power flow; superposition principle