

基于改进回路电流法的配电网潮流通用算法

汪宇霆¹, 张焰¹, 张益波²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 针对传统的回路电流潮流算法在进行节点编号时需要添加虚拟支路形成二叉树的缺点, 提出一种新的节点编号方法, 简化编号过程并提高算法效率; 针对回路阻抗矩阵分解算法的优化问题, 在原有的只对其中部分元素优化计算的基础上, 提出了所有元素均参与优化的回路阻抗矩阵 LU 分解算法; 基于该改进的回路电流法, 提出可以计算含有 PV 节点和弱环网的配电网潮流通用算法, 并用 PG&E 的 69 节点配电网对算法的有效性进行了验证。

关键词: 配电网潮流; 回路电流法; 节点编号; 优化 LU 分解; 通用算法

A general load flow method for distribution systems based on improved loop-current method

WANG Yu-ting¹, ZHANG Yan¹, ZHANG Yi-bo²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: A disadvantage of the traditional loop-current method for load flow calculation is that it inserts dummy lines to form an equivalent binary tree. This paper first presents a novel node numbering scheme that does not modify the original network to simplify and accelerate the node numbering process. An improved LU decomposition algorithm is proposed to optimize the calculation for all elements contrary to the traditional partial optimization. Based on the improved loop-current method, a general load flow method for distribution systems with PV buses and mesh networks is presented. The validity and performance of the proposed method are verified on PG&E's 69-bus distribution system.

Key words: load flow for distribution systems; loop-current method; node numbering; optimized LU decomposition; general method

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0057-05

0 引言

配电网具有与输电网不同的特点, 如结构呈辐射状、有时含有少量环网(弱环网), 以及支路参数的 r/x 值较大等^[1]。这些特点使得配电网潮流计算对算法的收敛性要求较高, 而且在算法中需要充分利用辐射状及弱环网的结构特点来提高计算效率。回路电流法是各种配电网潮流算法中收敛性较好的算法之一, 它根据电源、负荷、线路电容等对地支路形成的回路列出回路电压方程组, 对形成的回路阻抗矩阵进行 LU 分解, 然后迭代计算各回路的电流及各节点电压。通过一定的节点编号优化方法, 可以利用稀疏技术简化回路阻抗矩阵的 LU 分解。文献[2]提出的“直接潮流算法”是最早的回路电流法, 文献[3]对文献[2]中的节点编号方法进行了改进, 提出了对对角线元素和相邻元素进行优化的计算方法, 但是这些方法还存在如下缺点:

(1) 在节点编号过程中需要向配电网插入零阻

抗的虚拟支路形成等价的二叉树网络, 以确定负荷节点的编号^[2-4], 在加大算法复杂度的同时改变了原有的网络结构;

(2) 对回路阻抗矩阵进行 LU 分解时只有部分元素利用了优化算法, 而且没有进一步利用同一行元素的不同因子进行优化计算;

(3) 计算有弱环网的配网潮流时需要修改回路阻抗矩阵, 使得受修改影响的部分元素不能利用优化算法, 而且环网的解裂节点必须含有负荷^[2], 限制了回路电流法在环网潮流计算中的应用。

本文在传统的回路电流法基础上, 首先针对辐射状配电网提出一种新的节点编号方法, 不需要添加额外的虚拟支路就能形成优化的节点编号, 不仅降低了编号的复杂性, 而且还可以保持编号后的辐射状网络与原有网络结构相同, 方便了通用潮流算法的设计。其次, 充分利用根据优化编号形成的回路阻抗矩阵的稀疏性质, 将优化的 LU 分解算法扩展到 U 矩阵的所有元素, 并通过预先计算行元素分

解需要使用的相同系数，进一步加快了 LU 分解速度。

传统回路电流法只能处理含有弱环的配电网，无法计算含有 PV 节点的配电网。文献[5]虽然提出了可以计算含有环网和 PV 节点的配电网潮流算法，但它采用的前推回代计算方法收敛性有时较差^[6]，而若以传统的回路电流法来替代前推回代算法，则插入的虚拟支路会在由文献[5]方法形成的节点导纳矩阵中产生无穷大导纳元素，使得利用传统回路电流法难以形成配电网潮流通用算法。本文在改进回路电流法的基础上，结合文献[5]中将环网和 PV 节点解裂形成辐射状网络的方法，形成配电网潮流的通用算法。

1 回路电流法的改进

1.1 基本回路电流法

在辐射状配电网中，如果把负荷表示为恒定阻抗，则馈线根节点和各个负荷节点之间可以形成一系列回路，根据基尔霍夫电压定律列出 n 个回路的电压方程：

$$\begin{cases} V_S = Z_{(0,0)}I_0 + Z_{(0,1)}I_1 + \dots + Z_{(0,n-1)}I_{n-1} \\ \vdots \\ V_S = Z_{(n-1,0)}I_0 + Z_{(n-1,1)}I_1 + \dots + Z_{(n-1,n-1)}I_{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中： V_S 为根节点电压；对角线元素 $Z_{(k,k)}$ 为回路 k 的回路阻抗；非对角元素 $Z_{(i,j)}$ 为回路 i 和回路 j 的互阻抗； I_k 为回路 k 的电流。将式 (1) 写为矩阵形式：

$$V_S = ZI \quad (2)$$

其中的对称矩阵 Z 称为回路阻抗矩阵。对 Z 进行 LU 分解后，通过求解上述方程(2)得到各回路电流，进而求出各负荷节点电压。根据求出的节点电压重新计算负荷的等值阻抗，然后修改回路阻抗矩阵中的对角元素值，再次求解式(2)，如此反复迭代，直至负荷节点电压的两次计算结果之差小于收敛精度为止。

1.2 节点编号方法的改进

虽然式(2)中的回路阻抗矩阵是一个满阵，但由于回路互阻抗总数量不可能超过分支节点数，因此矩阵中含有很多相同元素。采用一定的节点编号优化方法，可以生成具有“稀疏”性质的回路阻抗矩阵，即相同的元素尽量聚集在一起^[4]，这样，LU 分解时可以跳过部分相同元素，减少需要计算的元素数量。文献[2]向辐射状的配电网中插入零阻抗的虚拟支路形成二叉树，然后对二叉树上的各负荷节点编号。文献[3]虽然对文献[2]的编号方法进行了简

化，但本质上还是需要向配电网加入虚拟支路形成等价的二叉树网络。

本文提出新的节点编号方法，无须增加虚拟支路就可以形成优化的节点编号。该方法只需要对与回路对应的负荷节点进行编号，同时为每个节点记录如下的信息：

1) 从某节点向辐射网末端搜索得到的负荷节点数目，记为 $nLoad$ 。

2) 某节点下的起始负荷编号(sId)和结束负荷编号(eId)。sId 等于该节点下负荷节点的最小编号，eId 等于该节点下负荷节点最大编号加 1，区间[sId, eId)为其下负荷节点编号的范围。

本文提出的负荷节点编号方法具体如下：设负荷节点数目为 n ，则根节点的 sId 为 0，eId 为 n ，得到各节点的 $nLoad$ 值后，从根节点开始向末端进行搜索。假设当前搜索节点为 m ，如果 m 为负荷节点，则将该负荷节点编号为 $sId[m]$ ，并按 $nLoad$ 值对 m 的子节点升序排序为 $m_{S_0}, m_{S_1}, m_{S_2}, \dots, m_{S_c}$ ，子节点 m_{S_i} 的 sId 和 eId 按式(3) 计算，如果 m 为负荷节点则式中的 $sIndex=sId[m]+1$ ，否则 $sIndex = sId[m]$ 。

$$\begin{cases} sId[m_{S_i}] = sIndex + \sum_{k=0}^{i-1} nLoad[m_{S_k}] \\ eId[m_{S_i}] = sId[m_{S_i}] + nLoad[m_{S_i}] \end{cases} \quad (3)$$

继续搜索子节点 $m_{S_0}, m_{S_1}, m_{S_2}, \dots, m_{S_c}$ ，根据上述方法确定各负荷节点的编号，直至辐射网的末端。

以图 1 的 9 节点辐射状配电网为例， m_0 为根节点，共有 $m_2, m_3, m_4, m_6, m_7, m_8$ 6 个负荷节点。根据本文提出的负荷节点编号方法，各个节点的 $nLoad$ ，sId，eId 值如表 1 所示，负荷节点编号如表 2。

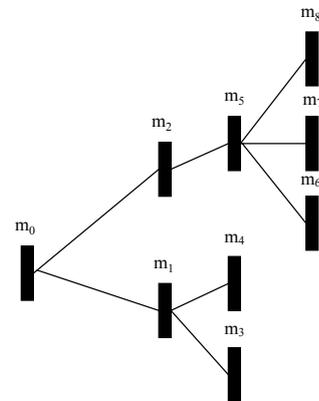


图 1 9 节点辐射状配电网

Fig.1 A 9-bus radial distribution network

表 1 节点 $nLoad, sId, eId$ 表

节点	$nLoad$	sId	eId
m_0	6	0	6
m_1	2	0	2
m_2	4	2	6
m_3	1	0	1
m_4	1	1	2
m_5	3	3	6
m_6	1	3	4
m_7	1	4	5
m_8	1	5	6

表 2 负荷节点编号表

负荷节点	编号
m_2	2
m_3	0
m_4	1
m_6	3
m_7	4
m_8	5

按负荷节点编号列出回路电压方程式(1) (编号为 i 的负荷节点对应第 i 条回路), 并对回路阻抗矩阵 Z 进行 LU 分解得到上三角矩阵 U 。如果 Z 中第 k 行的第 i 列到第 j 列元素相同, 则从第 0 行到第 $k-1$ 行的第 i 列到第 j 列元素相同, 因此在分解得到的 U 矩阵中, 第 k 行第 i 列到第 j 列的元素也相同。这样, 在 U 和 Z 中各行有相同的元素排列, 计算 U 的行元素时只需要计算相邻相同元素的第一个元素, 然后通过查询节点的 eId 值, 跳过其他相同元素, 找到下一个不同元素。LU 分解算法流程图如图 2 所示。

1.3 U 矩阵元素计算方法的改进

在对回路阻抗矩阵 Z 进行 LU 分解时, 本文把对其中部分元素的优化算法扩展到整个 U 矩阵元素的计算中, 减少了不必要的重复计算。

根据 $U_{ij} = Z_{ij} - \sum_{k=0}^{i-1} \frac{U_{ki}}{U_{kk}} U_{kj}$ 得到:

$$U_{ij} = Z_{ij} - Z_{i-1,j} + U_{i-1,j} \left(1 - \frac{U_{i-1,i}}{U_{i-1,i-1}}\right) - \sum_{k=0}^{i-2} \frac{U_{ki} - U_{k,i-1}}{U_{kk}} U_{kj} \quad (4)$$

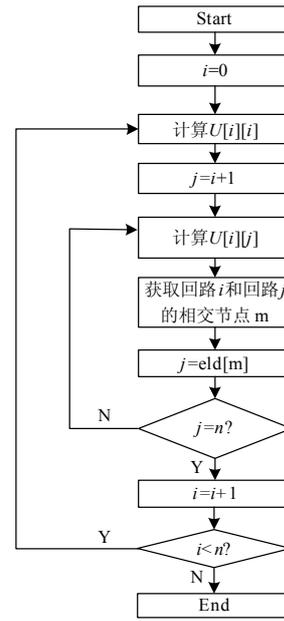


图 2 LU 分解算法流程图

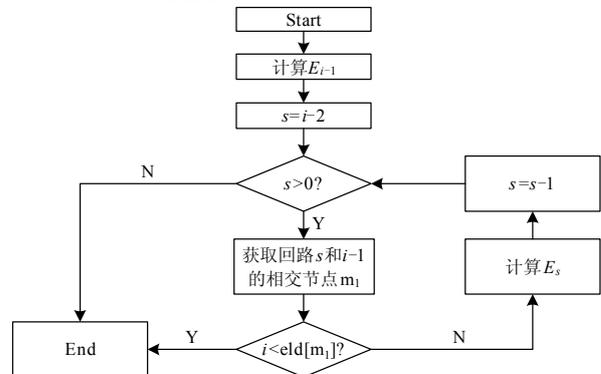
Fig.2 Flowchart for the LU decomposition

设 s 为 0 到 $i-2$ 之间使得 $Z_{si} = Z_{s,i-1}$ 的最大值。根据上节设计的节点编号方法可知 $U_{ti} = U_{t,i-1}$ ($t = s-1, s-2, \dots, 0$), 因此式(4)可简化为:

$$U_{ij} = Z_{ij} - Z_{i-1,j} + U_{i-1,j} \left(1 - \frac{U_{i-1,i}}{U_{i-1,i-1}}\right) - \sum_{k=s+1}^{i-2} \frac{U_{ki} - U_{k,i-1}}{U_{kk}} U_{kj} \quad (5)$$

令 $E_k = \frac{U_{ki} - U_{k,i-1}}{U_{kk}}$ ($k = s+1, \dots, i-1$), E_k 的值只

与行序号 i 相关, 因此在进行行元素计算时可以预先计算 s 以及 E_k ($k = s+1, \dots, i-1$), 计算流程如图 3 所示。元素 $U[i][j]$ 的计算流程如图 4 所示。

图 3 计算 s 以及 E_k Fig.3 Calculation of s and E_k

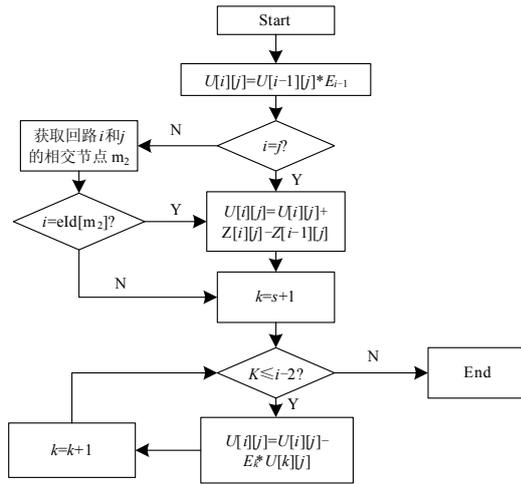


图4 计算元素 $U[i][j]$
Fig.4 Calculation of $U[i][j]$

上述算法可以应用于 U 矩阵所有元素的计算中，而且在进行行元素计算时可以预先计算行相关系数，大大减少了不必要的计算量，进一步加快了回路电流法的计算速度。

2 配电网潮流通用算法设计

热电联产机组的投运为配电网引入了 PV 节点，而有些配电网还可能含有少量的环网（弱环网）^[5,7]。因此需要有既可以求解辐射状配电网潮流，又可以求解含有弱环网甚至有 PV 节点的配电网潮流的通用算法。文献[2]提出把环网上的负荷节点解环，并采取修改回路阻抗矩阵的方法来解决环网问题，但是修改后的矩阵“稀疏”性质遭到破坏，对部分元素无法利用优化算法，而且文献[2]也没有提出如何解决含有 PV 节点的配电网潮流计算问题。本文根据文献[5]中的基于前推回代法的潮流算法，提出应用改进的回路电流法计算含有 PV 节点和弱环的配电网潮流通用算法。

配电网中电压为 $|V_h|$ 、功率为 P_h 的 PV 节点，可以转换为具有 $-P_h + j0$ 的负荷以及 $0 + jQ_h$ 的注入功率的 PQ 节点^[5,7]（如图 5）。环网可以在解裂节点处分解为具有符号相反的两个注入功率 $P_r + jQ_r$ 和 $-(P_r + jQ_r)$ 的节点^[5,7-8]（如图 6）。

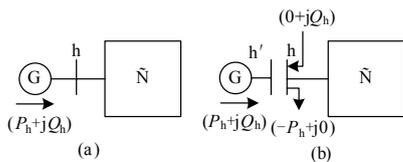


图5 PV 节点转换为 PQ 节点
Fig.5 Transforming a PV bus into a PQ bus

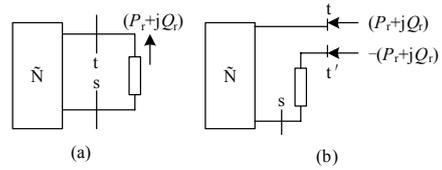


图6 环网解裂
Fig.6 Breaking a mesh network

转换和解裂后的网络为一个辐射状网络，节点分为三类：1)PV 节点转换得到的 PQ 节点；2)环网解裂节点；3)其他节点。根据叠加原理，辐射状网络的潮流将由负荷产生的潮流和注入功率产生的潮流叠加得到，前者可以通过改进回路电流法计算得到，后者可以通过求解节点电压方程式(6)得到：

$$I = YV \quad (6)$$

由于第 3)类节点的注入功率为 0，根据 Kron 变换^[5]，可以得到式 (7)：

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中： V_a 和 I_a 为转换后的 PQ 节点的电压和注入电流； V_b 和 I_b 对应注入功率为 $P_r + jQ_r$ 的环网解裂点的电压和注入电流； V_c 与 I_c 对应注入功率为 $-(P_r + jQ_r)$ 的环网解裂点的电压和注入电流，且 $I_c = -I_b$ 。由式(7)得到式(8)：

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_a - j\Delta Q_a \\ \Delta P_b - j\Delta Q_b \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中： $\Delta V_{bc} = \Delta V_b - \Delta V_c$ ； $Z_{11} = Z_{aa}$ ； $Z_{12} = Z_{21} = Z_{ab} - Z_{ac}$ ； $Z_{22} = Z_{bb} + Z_{cc} - Z_{bc} - Z_{cb}$ 。通过式(8)可以计算得到注入功率差值 ΔQ 、 ΔP 。

通用潮流算法的主要步骤如下：

1) 将 PV 节点转换为 PQ 节点并解裂环网，转换和解裂后的节点注入功率初始值设为 0。将所有负荷等价于标么电压值 1.0 pu 下的导纳，并将松弛节点接地，生成式(6)，进而得到方程式(8)。

2) 不考虑只含有注入功率的负荷节点，应用前述的改进节点编号方法对负荷节点进行编号，生成回路电压方程(2)。

3) 采用改进的回路电流法计算解裂后形成的辐射网潮流，得到各支路电流，进而由根节点向末端推算各节点电压。

4) 计算转换后的 PQ 节点电压与标准电压的差值 ΔV_a 以及环网解裂点电压与标准电压的差值

ΔV_{bc} , 根据式(8)计算得到 ΔQ 、 ΔP , 与原有注入功率叠加得到 $Q^{(k+1)} = Q^{(k)} + \Delta Q$, $P^{(k+1)} = P^{(k)} + \Delta P$ 。

5) 考虑只含有注入功率的负荷节点, 采用改进的节点编号法对负荷节点重新进行编号, 并再次生成回路电压方程(2)。

6) 重复步骤 2)与 3)。如果重新计算出的 PQ 节点(转换后的)和环网解裂点电压与标准电压差值满足收敛精度要求, 则计算终止。

由于回路电流法将负荷功率为 0 的节点的电压始终锁定为 0, 因此上述算法在初次计算辐射网潮流时不考虑只含有注入功率的负荷节点。在初次计算后, 注入功率变为非 0 值, 再考虑只含有注入功率的负荷节点。

3 算例分析

本文以 PG&E 的 69 节点辐射状配电网^[5,9]以及对其修改后的网络为例进行验算, 基准电压为 12.66 kV。三个测试网络如下:

(1) PG&E 的 69 节点辐射网, 如图 7 中实线连

接而成的网络所示。

(2) 在(1)的基础上添加图 7 中虚线所示的支路, 形成弱环网。

(3) 在(2)基础上, 于节点 10, 20, 50, 90 上添加 200 kW 的发电机, 电压为 1.0 pu。

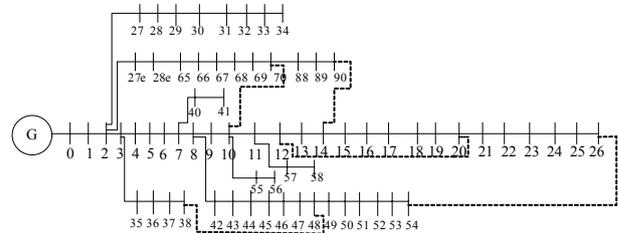


图 7 69 节点测试网络

Fig.7 A 69-bus test network

分别采用文献[2]的传统回路电流法和文献[5]基于前推回代的配网潮流算法以及本文提出的基于改进回路电流法的配网潮流通用算法, 对三个测试网进行潮流计算, 收敛精度取为 0.000 1。迭代次数与计算时间的比较如表 3 所示。

表 3 潮流计算迭代次数和时间比较

Tab.3 Comparison of load flow iterations and calculating time

	传统回路电流法		补偿注入 功率次数	前推回代法		补偿注入 功率次数	改进回路电流法	
	潮流迭代 次数	计算时间/ s		潮流迭代 次数	计算时间/ s		潮流迭代 次数	计算时间/ s
网络 1	3	0.332	无	2	0.015	无	3	0.015
网络 2	4	2.38	3	2/2/2	0.094	3	3/3/2	0.11
网络 3	无法计算	无法计算	3	2/2/2	0.094	3	3/3/2	0.109

由表 3 结果可以看出, 传统的回路电流法计算速度比前推回代法慢一个数量级, 当配电网中存在弱环网时, 计算速度会进一步下降, 并且传统的回路电流法无法计算含有多个 PV 节点的配电网潮流。本文提出的改进回路电流法的计算速度接近前推回代法, 不仅能计算含有弱环和 PV 节点的配电网潮流, 而且保持了回路电流法收敛性好的特点。

4 总结

本文提出的改进回路电流法解决了原有回路电流法编号复杂的问题, 提高了计算效率; 在对回路阻抗矩阵进行 LU 分解时, 可以对所有元素进行优化计算, 并通过预先计算行元素分解时使用的系数, 进一步加快回路方程的求解过程。通过改进回路电流法形成了可以计算含有 PV 节点和环网的配电网潮流通用算法, 该算法可以完全利用回路阻抗矩阵的稀疏性质优化计算, 而且环网的解裂点不须是负

荷节点, 便于环网解裂算法的实现。算例分析表明, 该算法不仅保持了回路电流法良好的收敛性, 而且比传统回路电流法的计算效率有大幅度提高。

参考文献

- [1] 张学松, 柳焯, 于尔铿, 等. 配电网潮流算法比较研究[J]. 电网技术, 1998, 22(4): 45-49.
ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng, et al. A comparison of power flow calculation methods for distribution network[J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 45-49.
- [2] Goswami S K, Basu S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEE Proceedings Part C, 1991, 138(1):78-88.
- [3] Wang Shou-xiang, Liu Yu-tian, Ruan Tong-jun. Distribution power flow based on loop-impedance equations[J]. Energy Management and Power Delivery, 1998, 2(2): 728-731.

(下转第 68 页 continued on page 68)

2001.

[3] 刘杨华, 吴政球, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (15): 71-76.
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32 (15): 71-76.

[4] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (1): 31-33.
LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (1): 31-33.

[5] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (24): 45-47.
WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (24): 45-47.

[6] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 50-56.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 50-56.

[7] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23 (11): 1-8.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23 (11): 1-8.

[8] 丛伟, 潘贞存, 赵建国, 等. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. 电网技术, 2006, 30 (5): 91-95.
CONG Wei, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo, et al. A wide area protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30 (5): 91-95.

[9] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (21): 8-14.
CONG Wei, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo. A wide-area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (21): 8-14.

[10] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (5): 190-196.
WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault Location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (5): 190-196.

[11] 张艳霞, 代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (12): 71-74.
ZHANG Yan-xia, DAI Feng-xian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (12): 71-74.

收稿日期: 2009-11-07; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

唐 斐 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电系统保护及控制; E-mail: tangfei316@163.com

陆于平 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及分布式发电系统保护及控制。

(上接第 61 页 continued from page 61)

[4] 王守相, 王成山. 配电系统节点优化编号方案比较[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 54-58.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Comparative study of optimal node indexing schemes for distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 54-58.

[5] Haque M H. A general load flow method for distribution systems[J]. Electrical Power System Research, 2000, 54(1): 47-54.

[6] 吴文传, 张伯明. 配网潮流回路分析法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 67-71.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Study on loop analysis theorem of distribution system power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 67-71.

[7] Luo G X, Semlyen A. Efficient load flow for large weakly meshed networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1309-1316.

[8] Haque M H. Efficient load flow method for distribution

systems with radial or mesh configuration[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1):33-38.

[9] Hsiao Dong Chiang, Rene Jean Jumeau. Optimal network reconfiguration in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3):1568-1574.

收稿日期: 2009-10-10

作者简介:

汪宇霆 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网潮流分析及经济运行研究;

张 焰 (1958-), 女, 教授, 博士, 主要从事电力系统规划及电力系统可靠性等方面的研究工作; E-mail: zhang_yan@sytu.edu.cn

张益波 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统分析研究工作。