

适用于配电网潮流计算的改进回路电流法

祁晓枫¹, 王承民¹, 孙伟卿¹, 段建民², 金义雄²

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240;

2. 上海电力学院 电力与自动化学院, 上海市 杨浦区 200090)

An Improved Loop Current Analysis Suitable to Power Flow Calculation of Distribution Network

QI Xiaofeng¹, WANG Chengmin¹, SUN Weiqing¹, DUAN Jianmin², JIN Yixiong²

(1. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

ABSTRACT: To make loop current analysis suitable to power flow analysis for distribution network, on the basis of π -equivalent electrical components a loop current analysis model for distribution network, in which impedance branch are taken as chain branches and the grounded branch as the tree branches and the earth admittances of transmission lines as well as earth branches of transformer are neglected, is built. Substituting constant power load models by constant impedance load model, the loop current equations are simplified as linear equations and solved, and the processing method for generated nodes is given. Besides, the similarities and differences between loop current analysis and loop impedance analysis are analyzed. Simulation results show that the proposed method is effective.

KEY WORDS: distribution network; loop current analysis; loop impedance analysis; power flow calculation; node degeneration

摘要: 为使回路电流法适于配电网潮流分析, 在 π 型等值电气元件的基础上, 以阻抗支路为链支、接地支路为树支, 忽略了线路对地导纳和变压器对地支路, 建立了配电网回路电流分析模型。采用恒阻抗负荷模型替代恒功率负荷模型, 将回路电流方程简化为线性方程组进行求解, 给出了对退化节点的处理方法, 分析了回路电流法和回路阻抗法的异同。算例结果验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 回路电流法; 回路阻抗法; 潮流计算; 节点退化

0 引言

潮流计算是配电网管理系统的重要组成部分,

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2009AA05Z213); 国家自然科学基金项目(50907039)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2009AA05Z213); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50907039)。

也是配电网自动化研究和分析计算的基础。由于配电网具有线路阻抗比较大、网络 PQ 节点较多、PV 节点较少等特点, 则高压输电网上行行之有效的潮流算法不能完全适用于配电网潮流计算^[1]。为此, 广大学者对低压配电网潮流算法进行了大量研究。

传统的配电网潮流计算方法包括前推回代法^[2]、回路阻抗法^[3]、改进牛顿法^[4]、改进快速解耦法^[5]、Zbus 法^[6]、Ybus 法^[7]等, 以上方法由于简单有效、物理意义直观, 被广泛应用于电力系统分析计算中, 并出现了许多改进算法^[8-13], 如由 S. K. Goswami 等提出的回路阻抗法, 其将负荷作为恒阻抗模型, 具有良好的收敛特性和网孔处理能力, 而回路阻抗法是回路电流分析的一种特殊情况。

由于网络节点与大地之间存在发电机、负荷、对地电纳等对地支路, 而节点间存在输电线路和变压器支路, 因而电力网络中的节点方程数量少于回路方程数量, 节点电压方程更适于电力系统分析计算。但对配电系统来说, 由于可以忽略线路对地电纳的影响, 并且可进一步忽略变压器对地支路, 因而采用回路电流法进行配电系统分析成为可能^[14]。为此, 本文在电气元件 π 型等值模型的基础上, 以阻抗支路为链支、接地支路为树支, 建立配电网的回路电流分析模型, 使其适于配电网潮流计算。

1 改进回路电流法

对于一般电力网络, 当电气元件采用 π 型等值模型时, 以接地支路作为树支、阻抗支路作为链支, 可形成基本回路单元^[15], 如图 1 所示。

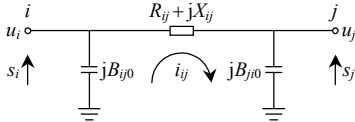


图1 基本回路
Fig. 1 Basic loop

图1中,节点*i,j*的净注入功率分别为 $s_i=p_i+jq_i$ 、 $s_j=p_j+jq_j$,节点净注入功率是节点发电机注入功率与负荷功率之差; $p_i(p_j)$ 、 $q_i(q_j)$ 分别为节点*i(j)*的净注入有功功率和无功功率;节点*i,j*的电压分别为 $u_i=e_i+jf_i$ 、 $u_j=e_j+jf_j$ (e,f 分别为电压的实部、虚部);基本回路电流为 $i_{ij}=i_{ij}^a+ji_{ij}^r$ (i_{ij}^a 、 i_{ij}^r 分别为电流的实部、虚部);支路电阻和电抗分别为 R_{ij} 、 X_{ij} ;节点*i,j*的对地电纳分别为 B_{ij0} 、 B_{j0} 。

图1基本回路的回路电流方程为

$$i_{ij}(R_{ij}+jX_{ij})=u_i-u_j \quad (1)$$

按实部虚部展开可得

$$\begin{cases} i_{ij}^a R_{ij} - i_{ij}^r X_{ij} - e_i + e_j = 0 \\ i_{ij}^a X_{ij} + i_{ij}^r R_{ij} - f_i + f_j = 0 \end{cases} \quad (2)$$

将节点净注入功率等值为电压源,接地支路认为其与电压源并联,则接地支路可由图2表示, i_i 为电压源净注入电流, $i_{B_{ij0}}$ 为流过 B_{ij0} 的电流。

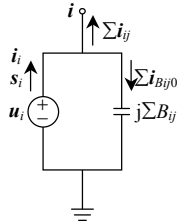


图2 接地支路
Fig. 2 Grounding branch

由图2可知

$$s_i^* = u_i^* i_i = u_i^* (\sum_{i,j \in l} i_{ij} + ju_i \sum_{j \in l} B_{ij0}) = p_i - jq_i \quad (3)$$

式中: l 为链支集合; l 为与节点*i*关联的节点集合。

将式(3)展开可得

$$\begin{cases} e_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a + f_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r = p_i \\ e_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r - f_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a + (e_i^2 + f_i^2) \sum_{j \in l} B_{ij0} = -q_i \end{cases} \quad (4)$$

忽略配电网中线路对地电纳及变压器对地支路,并将并联电容器电纳利用节点电压转换为节点注入功率的形式,则 $\sum_{j \in l} B_{ij0}$ 可忽略不计,因而式(4)

可转化为

$$\begin{cases} e_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a + f_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r = p_i \\ e_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r - f_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a = -q_i \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得

$$\begin{cases} e_i = (p_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a - q_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r) / [(\sum_{i,j \in l} i_{ij}^a)^2 + (\sum_{i,j \in l} i_{ij}^r)^2] \\ f_i = (p_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r + q_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a) / [(\sum_{i,j \in l} i_{ij}^a)^2 + (\sum_{i,j \in l} i_{ij}^r)^2] \end{cases} \quad (6)$$

则式(2)可变为

$$\begin{cases} i_{ij}^a R_{ij} - i_{ij}^r X_{ij} = \frac{p_i \sum_{i,k \in l} i_{ik}^a - q_i \sum_{i,k \in l} i_{ik}^r}{(\sum_{i,k \in l} i_{ik}^a)^2 + (\sum_{i,k \in l} i_{ik}^r)^2} - \frac{p_j \sum_{j,k \in l} i_{jk}^a - q_j \sum_{j,k \in l} i_{jk}^r}{(\sum_{j,k \in l} i_{jk}^a)^2 + (\sum_{j,k \in l} i_{jk}^r)^2} \\ i_{ij}^a X_{ij} + i_{ij}^r R_{ij} = \frac{p_i \sum_{i,k \in l} i_{ik}^r + q_i \sum_{i,k \in l} i_{ik}^a}{(\sum_{i,k \in l} i_{ik}^a)^2 + (\sum_{i,k \in l} i_{ik}^r)^2} - \frac{p_j \sum_{j,k \in l} i_{jk}^r + q_j \sum_{j,k \in l} i_{jk}^a}{(\sum_{j,k \in l} i_{jk}^a)^2 + (\sum_{j,k \in l} i_{jk}^r)^2} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)的回路电流方程仍具有很强的非线性,为此将发电机出力作为负荷进行处理,并以恒阻抗负荷代替恒功率负荷,则式(5)可变为

$$\begin{cases} e_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a + f_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r + (e_i^2 + f_i^2) G_{Li} = 0 \\ e_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r - f_i \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a + (e_i^2 + f_i^2) B_{Li} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 G_{Li} 、 B_{Li} 分别为节点*i*的负荷等值电导、电纳。

$$\begin{cases} (e_i^2 + f_i^2) G_{Li} = -p_i \\ (e_i^2 + f_i^2) B_{Li} = q_i \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)(9)可得

$$\begin{cases} e_i = -(G_{Li} \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a + B_{Li} \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r) / (G_{Li}^2 + B_{Li}^2) \\ f_i = -(G_{Li} \sum_{i,j \in l} i_{ij}^r - B_{Li} \sum_{i,j \in l} i_{ij}^a) / (G_{Li}^2 + B_{Li}^2) \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2)可得

$$\begin{cases} i_{ij}^a R_{ij} - i_{ij}^r X_{ij} = -(G_{Li} \sum_{i,k \in l} i_{ik}^a + B_{Li} \sum_{i,k \in l} i_{ik}^r) / (G_{Li}^2 + B_{Li}^2) + (G_{Lj} \sum_{j,k \in l} i_{jk}^a + B_{Lj} \sum_{j,k \in l} i_{jk}^r) / (G_{Lj}^2 + B_{Lj}^2) \\ i_{ij}^a X_{ij} + i_{ij}^r R_{ij} = -(G_{Li} \sum_{i,k \in l} i_{ik}^r - B_{Li} \sum_{i,k \in l} i_{ik}^a) / (G_{Li}^2 + B_{Li}^2) + (G_{Lj} \sum_{j,k \in l} i_{jk}^r - B_{Lj} \sum_{j,k \in l} i_{jk}^a) / (G_{Lj}^2 + B_{Lj}^2) \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,采用恒阻抗模型后,回路电流方程为线性方程。

2 求解方法

对于由1个平衡节点、 $N-1$ 个负荷节点、 L 条链支组成的配电系统,未知变量为 $N-1$ 个负荷节点的电压实部与虚部、 L 条回路电流的实部与虚部及平衡节点的注入功率,未知变量共计 $2N+2L$ 个。根据该配电系统可列写出的方程包括 L 组式(11)与 N 组式(10),即 $2N+2L$ 组方程,其中,负荷节点负荷与平衡节点电压为已知量。

假设负荷节点初始电压 $e_i^{(0)} = 1$, $f_i^{(0)} = 0$, 由式(9)求出负荷初始等值导纳($G_{Li}^{(0)} + jB_{Li}^{(0)}$).

式(11)可列写为

$$\mathbf{A}^{(t)} \mathbf{I}^{(t)} = \mathbf{b} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{I}^{(t)}$ 为待求回路电流向量, t 为迭代次数; $\mathbf{A}^{(t)}$ 为电流系数矩阵; \mathbf{b} 为常数向量。平衡节点电压已知, 则 \mathbf{b} 中除平衡节点对应元素(平衡节点电压)为已知常数外, 其他元素均为 0。求解式(12)可得到 $2L$ 个回路电流。

同理, 式(10)可列写为

$$\mathbf{U}^{(t)} = \mathbf{C}^{(t)} \mathbf{I}^{(t)} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{U}^{(t)}$ 为待求负荷节点电压向量; $\mathbf{C}^{(t)}$ 为电压系数矩阵。将求得的回路电流向量 $\mathbf{I}^{(t)}$ 带入式(13)可求得 $2(N-1)$ 个节点电压。

根据 $\mathbf{U}^{(t)}$ 、 $G_{Li}^{(t)}$ 、 $B_{Li}^{(t)}$ 、式(9)计算节点净注入功率, 如果节点净注入功率与给定功率偏差满足要求, 则算法终止; 否则重新计算 $G_{Li}^{(t)}$ 、 $B_{Li}^{(t)}$, 令 $t=t+1$, 重复迭代直至满足收敛条件。最后根据平衡节点电压与节点流出电流计算平衡节点的注入功率。

3 退化节点处理方法

配电网回路电流法存在节点退化现象。当 $p_i=0$ 、 $q_i=0$, 即节点 i 既无负荷又无发电机出力时, 式(8)退化为

$$\begin{cases} e_i \sum_{ij \in l} i_{ij}^a + f_i \sum_{ij \in l} i_{ij}^r = 0 \\ e_i \sum_{ij \in l} i_{ij}^r - f_i \sum_{ij \in l} i_{ij}^a = 0 \end{cases} \quad (14)$$

由于节点 i 没有等值电压源支路, 则由基尔霍夫电流定律(Kirchoff's current law, KCL)可得

$$\begin{cases} \sum_{ij \in l} i_{ij}^a = 0 \\ \sum_{ij \in l} i_{ij}^r = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)(15)可知, 退化节点的电压无法确定, 关联回路的电流亦不能直接采用式(12)求取。

图 3 为含有退化节点 m 的配电网。图中,

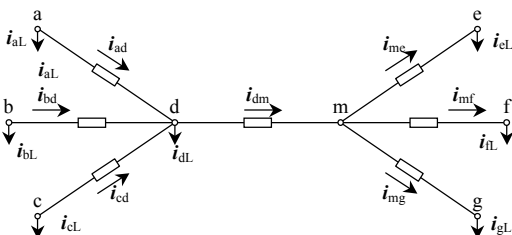


图 3 含有退化节点的配电网

Fig. 3 Distribution network contains degenerative node

$i_{pq}(p, q = a, b, c, d, e, f, g, m)$ 为 pq 支路电流, $i_{jL}(j = a, b, c, d, e, f, g)$ 为节点 j 的负荷电流。对于含有退化节点 m 的回路, 与节点 m 相连回路 l_{dm} 、 l_{me} 、 l_{mf} 、 l_{mg} 的回路电流方程分别用相关联未退化负荷节点的 KCL 方程替换。以回路 l_{dm} 为例, 其回路电流方程可替换为

$$\begin{cases} \sum i_d^a = i_{ad}^a + i_{bd}^a + i_{cd}^a - i_{dL}^a - i_{dm}^a = 0 \\ \sum i_d^r = i_{ad}^r + i_{bd}^r + i_{cd}^r - i_{dL}^r - i_{dm}^r = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中 i_{dL}^a 、 i_{dL}^r 分别为节点 d 负荷电流 i_{dL} 的实部、虚部。

$$\begin{cases} i_{dL}^a = e_d G_{Ld} - f_d B_{Ld} \\ i_{dL}^r = e_d B_{Ld} + f_d G_{Ld} \end{cases} \quad (17)$$

式中: e_d 、 f_d 分别为节点 d 电压的实部、虚部; G_{Ld} 、 B_{Ld} 分别为节点 d 的负荷等值电导、电纳。以上各值均为第 t 次迭代值。用式(16)替换式(12)中相应的回路电流方程后, 可求得 $2L$ 个回路电流。

从式(2)中选取 1 个与退化节点 m 相关联的回路方程, 用未退化节点的电压推导退化节点电压。以图 3 中回路 l_{dm} 为例, 节点 d 是与 m 关联的未退化节点, 则

$$\begin{cases} e_m = i_{dm}^a R_{dm} - i_{dm}^r X_{dm} + e_d \\ f_m = i_{dm}^a X_{dm} + i_{dm}^r R_{dm} + f_d \end{cases} \quad (18)$$

式中: e_m 、 f_m 分别为节点 m 电压的实部、虚部; R_{dm} 、 X_{dm} 分别为 dm 支路的负荷等值电导、电纳; e_d 、 f_d 分别为节点 d 电压的实部、虚部。

式(18)中 e_d 、 f_d 仍满足式(10), 将式(18)带入式(13)替换退化节点 m 的电压方程, 并将该方程组置于节点 d 的电压方程组之后, 可求得 $2(N-1)$ 个节点电压。

需要注意的是, 如果节点 d 也为退化节点, 则需要对所有回路电流方程与节点电压方程进行排队, 排队原则为: 保证未退化节点在退化节点之前, 且退化节点之间应满足递推关系。

配电网一般为树状结构, 如图 4 所示。树

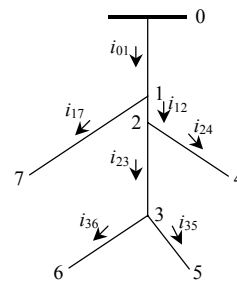


图 4 配电网结构

Fig. 4 Structure of distribution network

的中间节点一般不带负荷，均为退化节点，如节点1—3；而树的末端节点均为未退化的负荷节点，如节点4—7。

在回路电流求解过程中，用相关联未退化负荷节点4—7的KCL方程替换含有退化节点1—3的回路电流方程，从而可求得回路电流。在节点电压求解过程中，求解退化节点1—3的电压时，需在求出未退化节点4—7的电压之后，应用式(18)逐一推导并重复迭代直至满足收敛条件。

4 回路电流法与回路阻抗法的比较

4.1 回路阻抗法

回路阻抗法中，节点负荷采用恒阻抗模型表示，由于不考虑线路对地电容，因此从馈线根节点到每个负荷节点之间将形成1条回路，根据基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)可得回路电压方程

$$\begin{cases} U_S = Z_{(1,1)}I_1 + Z_{(1,2)}I_2 + \dots + Z_{(1,n)}I_n \\ \vdots \\ U_S = Z_{(n,1)}I_1 + Z_{(n,2)}I_2 + \dots + Z_{(n,n)}I_n \end{cases} \quad (19)$$

式中： U_S 为馈线根节点电压； I_i 为负荷节点*i*的负荷电流； $Z_{(i,i)}$ 为第*i*条回路的自阻抗； $Z_{(i,j)}$ 为第*i*、*j*条回路的互阻抗。

求解式(19)可得各负荷节点的负荷电流，然后可求出各条支路电压降，进而可求得各节点电压和负荷节点功率，反复迭代，直到负荷节点功率与给定负荷功率的差值满足要求。

4.2 比较分析

经典的配电网回路阻抗法是本文所述回路电流法的1种特殊情况，两者既有联系又有不同，主要体现在以下2方面：

1) 回路概念的不同。

本文回路电流法中，电气元件的π型等值电路即为1个基本回路，忽略接地支路后，基本回路为电气元件的链支。而若回路拓展为由母线至未退化负荷节点之间的链支时，则该回路便为回路阻抗法中的回路。

2) 电流变量的不同。

回路阻抗法中的电流变量为各负荷节点的注入负荷电流，而本文回路电流法中的电流变量为线路及变压器支路上流过的支路电流。与回路阻抗法相比，本文回路电流法避免了计算回路互阻抗的过程。此外，支路电流变量还具有物理意义清晰、节点电压计算方便等优点。

5 算例

本节将以文献[14]的33节点配电网(如图5所示)为例验证配电网回路电流法。为验证本文方法对节点退化现象的处理能力，去掉中间节点1、2、5的负荷，令其变为退化节点。节点和支路参数如表1、2所示， P_L 、 Q_L 分别为节点的有功负荷、无功负荷，基准电压 $U_B=12.66\text{ kV}$ ，基准容量 $S_B=10\text{ MVA}$ 。

收敛精度为 10^{-4} ，母线注入功率为 $(3.6576 + j2.3093)\text{ MVA}$ ，迭代3次即可满足收敛条件，计算

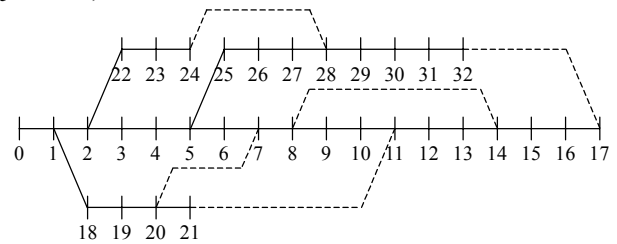


图5 33节点配电网
Fig. 5 Distribution network with 33 nodes

表1 节点参数

Tab. 1 Nodes' parameters

节点号	P_L/MW	Q_L/Mvar	节点号	P_L/MW	Q_L/Mvar
0	0.000	0.000	17	0.090	0.040
1	0.000	0.000	18	0.090	0.040
2	0.000	0.000	19	0.090	0.040
3	0.120	0.080	20	0.090	0.040
4	0.060	0.030	21	0.090	0.040
5	0.000	0.000	22	0.090	0.050
6	0.200	0.100	23	0.420	0.200
7	0.200	0.100	24	0.420	0.200
8	0.060	0.020	25	0.060	0.025
9	0.060	0.020	26	0.060	0.025
10	0.045	0.030	27	0.060	0.020
11	0.060	0.035	28	0.120	0.070
12	0.060	0.035	29	0.200	0.600
13	0.120	0.080	30	0.150	0.070
14	0.060	0.010	31	0.210	0.100
15	0.060	0.020	32	0.060	0.040
16	0.060	0.020	—	—	—

表2 支路参数

Tab. 2 Branches' parameters

支路	电阻/ Ω	电抗/ Ω	支路	电阻/ Ω	电抗/ Ω
0-1	0.0922	0.0470	16-17	0.7320	0.5740
1-2	0.4930	0.2511	1-18	0.1640	0.1565
2-3	0.3660	0.1864	18-19	1.5042	1.3554
3-4	0.3811	0.1941	19-20	0.4095	0.4784
4-5	0.8190	0.7070	20-21	0.7089	0.9373
5-6	0.1872	0.6188	2-22	0.4512	0.3083
6-7	0.7114	0.2351	22-23	0.8980	0.7091
7-8	1.0300	0.7400	23-24	0.8960	0.7011
8-9	1.0440	0.7400	5-25	0.2030	0.1034
9-10	0.1966	0.0650	25-26	0.2842	0.1447
10-11	0.3744	0.1238	26-27	1.0590	0.9337
11-12	1.4680	1.1550	27-28	0.8042	0.7006
12-13	0.5416	0.7129	28-29	0.5075	0.2585
13-14	0.5910	0.5260	29-30	0.9744	0.9630
14-15	0.7463	0.5450	30-31	0.3105	0.3619
15-16	1.2890	1.7210	31-32	0.3410	0.5302

结果如表 3 所示。

算例计算结果表明, 本文方法在处理配电网潮流计算时速度较快, 收敛精度高, 能够满足配电网潮流计算的需要, 其在处理大规模配电网潮流计算问题中具有明显优势。

表 3 计算结果
Tab. 3 Calculation results

节点号	电压幅值/pu	角度/(°)	节点号	电压幅值/pu	角度/(°)
0	1.0000	0.0000	17	0.9148	-0.4768
1	0.9972	0.0147	18	0.9967	0.0039
2	0.9837	0.0990	19	0.9931	-0.0631
3	0.9764	0.1658	20	0.9924	-0.0824
4	0.9692	0.2337	21	0.9918	-0.1028
5	0.9513	0.1497	22	0.9801	0.0681
6	0.9478	-0.0798	23	0.9735	-0.0205
7	0.9430	-0.0439	24	0.9701	-0.0641
8	0.9367	-0.1167	25	0.9493	0.1890
9	0.9309	-0.1790	26	0.9468	0.2449
10	0.9300	-0.1717	27	0.9354	0.3275
11	0.9285	-0.1603	28	0.9272	0.4051
12	0.9224	-0.2513	29	0.9236	0.5100
13	0.9202	-0.3296	30	0.9195	0.4259
14	0.9188	-0.3672	31	0.9186	0.4030
15	0.9174	-0.3903	32	0.9183	0.3953
16	0.9154	-0.4673	—	—	—

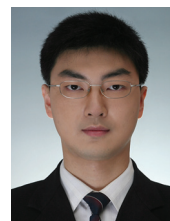
6 结论

本文利用电气元件 π 型等值模型建立了电力网络回路电流分析模型, 并利用配电网特点, 对回路电流方程进行了简化, 使其更适用于配电网潮流计算。本文回路电流法在处理少环网问题时与回路阻抗法步骤相似, 而当少环网中含有退化节点时本文方法略显不足, 因而本文节点退化处理方法有待进一步改善, 但总体而言, 本文方法是对已有配电网潮流计算方法的有益补充。

参考文献

- [1] 刘耀年, 岂小梅, 李国鹏, 等. 基于回路阻抗法的配电网潮流计算[J]. 继电器, 2004, 32(8): 8-10.
Liu Yaonian, Qi Xiaomei, Li Guopeng, et al. Load flow algorithm for distribution network based on loop-impedance method[J]. Relay, 2004, 32(8): 8-10(in Chinese).
- [2] 王佳佳, 吕林, 刘俊勇, 等. 基于改进分层前推回代法的含分布式发电单元的配电网重构[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 60-64.
Wang Jiajia, Lü Lin, Liu Junyong, et al. Reconfiguration of distribution network containing distribution generation units based on improved layered forward-backward sweep method[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 60-64(in Chinese).
- [3] Goswami S K, Basu S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(1): 78-88.
- [4] Fan Zhang, Carols Cheng. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power

- Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [5] Zimmerman R D, Chiang H D. Fast decouple power flow for unbalanced radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2045-2051.
- [6] Chen T H, Chen M S, Hwang K J, et al. Distribution system power flow analysis a rigid approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [7] Tripathy S C, Prasad G D, Malik O P, et al. Load flow solutions for III-conditioned power system by a Newton-like method[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3648-3657.
- [8] 杨旭英, 段建东, 杨文字, 等. 含分布式发电的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 139-143.
Yang Xuying, Duan Jiandong, Yang Wenyu, et al. Power flow calculation based on power losses sensitivity for distribution system with distribution generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 139-143(in Chinese).
- [9] 汪芳宗, 叶婧, 李燕山. 一种新的少环配电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 47-50.
Wang Fangzong, Ye Jing, Li Yanshan. A new load flow calculation method for weakly meshed distribution systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 47-50(in Chinese).
- [10] 孙健, 江道灼, 刘志华. 基于前推回代的配电网潮流改进算法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 81-84.
Sun Jian, Jiang Daozhuo, Liu Zhihua. Modified power flow algorithm of distribution network based on forward/backward sweep method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 81-84(in Chinese).
- [11] 孟晓芳, 刘文宇, 朴在林, 等. 基于网络拓扑分析的配电网潮流节点分析法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 140-145.
Meng Xiaofang, Liu Wenyu, Piao Zailin, et al. A nodal analysis method of load flow in distribution network based on network topology analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 140-145(in Chinese).
- [12] 赵晶晶, 李新, 许中. 含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 94-98.
Zhao Jingjing, Li Xin, Xu Zhong. Calculation of three-phase unbalanced power flow in distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 94-98(in Chinese).
- [13] 祝洪博, 刘新伟, 邵萌萌, 等. 基于注入电流不平衡量的配电网改进潮流算法[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(3): 22-25.
Zhu Hongbo, Liu Xinwei, Shao Mengmeng, et al. Improved power flow calculation of distribution network based on injection current imbalance[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(3): 22-25(in Chinese).
- [14] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 196-198.
- [15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 311-313.



祁晓枫

收稿日期: 2010-10-28。

作者简介:

祁晓枫(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化与控制, E-mail: laoqi_001@126.com;

王承民(1970), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统节能与经济运行、电力市场等;

孙伟卿(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统经济运行。

(编辑 徐梅)