

基于网络拓扑分析的配电网潮流节点分析法

孟晓芳¹, 刘文宇¹, 朴在林¹, 王力²

(1. 沈阳农业大学 信息与电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110161;

2. 七台河电业局, 黑龙江省 七台河市 154600)

A Nodal Analysis Method of Load Flow in Distribution Network Based on Network Topology Analysis

MENG Xiao-fang¹, LIU Wen-yu¹, PIAO Zai-lin¹, WANG Li²

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, Liaoning Province, China;

2. Qitaihe Electric Power Bureau, Qitaihe 154600, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: By use of network topology analysis and Kirchoff's current law, a load flow calculation method for complex distribution network is proposed in which the models of transmission lines, shunt capacitors, loads and PV nodes are considered as well as the influences of transmission lines' charging effect, PV nodes, capacitors and loads are taken into account. There is no much demand for the numbering of nodes and branches, thus lines and nodes can be numbered flexibly. The proposed algorithm is verified by IEEE 30-bus system, simulation results show that the proposed algorithm can be utilized in the load flow calculation of complex distribution network where looped network, PV nodes and charging effect exist.

KEY WORDS: distribution network; power flow; network topology; incidence matrix; Kirchoff's current law (KCL)

摘要: 利用网络拓扑分析方法及基尔霍夫电流定律, 提出一种复杂配电网的潮流计算方法, 考虑了线路、并联电容器、负荷及PV节点的模型, 计及了线路的充电效应、PV节点以及电容器和负荷的影响。该算法对节点和支路编号的要求不高, 提高了节点和支路编号的灵活性。采用该算法对IEEE 30节点系统进行了仿真计算, 结果表明, 该算法是计算具有环网、PV节点及充电效应的复杂配电网潮流的一种有效方法。

关键词: 配电网; 潮流; 网络拓扑; 关联矩阵; 基尔霍夫电流定律

0 引言

配电网的潮流计算是配电网各种分析的基础, 也是配电网规划的重要依据。配电网的潮流计算方法很多, 如牛顿法^[1-2]、前推回代法^[3]、利用双向等效电压降模型的计算方法^[4]、树状链表和递归搜索方法^[5]、基于集中抄表系统采集数据的线性潮流计算方法^[6]等。随着配电网电压等级的提高以

及对可靠性、电能质量和节能要求的日益提高, 配电网中的风电及小水电逐渐增多, 而且配电网中的多分段多连接技术的研究力度在加大, 配电网将逐渐成为多电源(分布式电源)、多回路的环网, 对配电网的潮流计算提出了更高的要求。配电网中常用的前推回代算法在处理多电源和环网时能力较弱^[7]。文献[8]采用叠加原理处理分布式电源, 而且计算环网时需要解环, 增加了迭代次数。文献[9]利用网损灵敏度的参与因子计算含有分布式电源的配电网潮流。对于含有大量分支线路、环网及分布式电源的配电网, 潮流计算量非常大, 其计算方法也较多^[10-15]。文献[10]采用改进的牛顿法, 给出了适用于配电网的形成雅可比矩阵的计算公式, 但由于配电网的特点, 改进牛顿法对并联支路及补偿电容的处理较困难, 并且要求相邻2个节点间的电压差要足够小, 这使其应用受到了一定的限制^[2,12]。文献[11]利用多端口补偿技术和基尔霍夫定律, 可以有效计算弱环网的潮流, 但该方法对网络中的节点和支路编号的要求较高, 而且需要形成戴维南等效阻抗矩阵。文献[12]通过解环的方法计算单电源环网的潮流, 考虑了并联导纳的影响。文献[13]也采用解环方法, 而且采用面向元件的编号方法。文献[14]将接有分布式电源的节点考虑为PV节点。文献[15]给出了馈线及电容器的简单数学模型。文献[16]分析了网络和负荷的数据, 给出了计算支路电流、电压及损耗的公式。

为了提高算法的有效性和灵活性, 适应配电网的要求, 降低对节点和支路编号的要求, 并且不需要解环, 本文以网络拓扑技术及基尔霍夫电流定律

(Kirchoff's current law, KCL)为基础, 考虑了线路的充电效应、PV节点、环网、电容器和负荷变化的影响, 提出了配电网潮流计算的节点分析方法, 并给出了算例及分析比较。该算法提高了节点和支路编号的灵活性, 与其他计算方法相比, 应用KCL使计算更加简单, 且有利于含有环网和多电源(可看作PV节点^[8])配电网的潮流计算。

1 网络模型

1.1 线路

线路采用π型等值模型, 对于线路 $l(i, j)$, 忽略其电导, 其等值模型如图1所示。

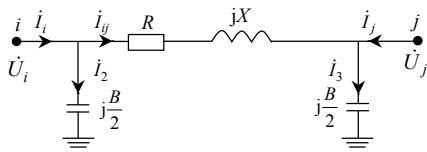


图1 线路的π型等值模型
Fig. 1 The π-type equivalent model of lines

图1中的线路可用下式描述:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} + Y/2 & -Z^{-1} \\ -Z^{-1} & Z^{-1} + Y/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z 为线路 l 的阻抗, $Z = R + jX$, R 和 X 分别为线路 l 的电阻和电抗; Y 为线路 l 的导纳, $Y = jB$, B 为线路 l 的电纳; I_i 和 I_j 分别为节点 i 、 j 的注入电流; U_i 和 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压。

式(1)可改写为

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} & -Z^{-1} \\ -Z^{-1} & Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y/2 & 0 \\ 0 & Y/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了分析方便, 线路 l 的并联支路用注入电流源表示, 如图2所示, 式(2)可进一步改写为

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} & -Z^{-1} \\ -Z^{-1} & Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{Si} \\ I_{Sj} \end{bmatrix} = Z^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{Si} \\ I_{Sj} \end{bmatrix} \quad (3)$$

即

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ij} \\ -I_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{Si} \\ I_{Sj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

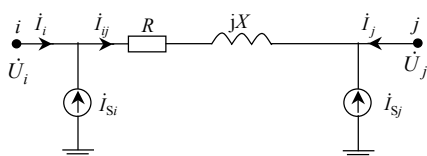


图2 线路的修正π型等值模型
Fig. 2 The modified π-type equivalent model of lines

式中: I_{Si} 、 I_{Sj} 为线路 l 节点 i 、 j 的等效注入电流源; I_{ij} 为线路 l 串联支路的电流。

定义线路 $l(i, j)$ 并联支路的关联矩阵为 M_l , M_l 为 $N \times 2$ 阶矩阵, M_l 第1列的 i 位置和第2列的 j 位置为1, 其余元素均为0, 即

$$M_l = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \quad (5)$$

设配电网有 N 个独立节点, b 条线路, 线路 l 并联支路的等效注入电流源对配电网的贡献为

$$\Delta I_{sk} = M_l \begin{bmatrix} Y/2 & 0 \\ 0 & Y/2 \end{bmatrix} M_l^T U_N = \begin{bmatrix} I_{Si} \\ I_{Sj} \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \quad (6)$$

式中: ΔI_{sk} 为 $N \times 1$ 阶电流列矢量, 其第 i 个元素为 I_{Si} , 第 j 个元素为 I_{Sj} , 其余元素均为零; U_N 为 $N \times 1$ 阶节点电压列矢量。

网络中所有线路并联支路的等效注入电流源对配电网的贡献为

$$\Delta I_{sl} = \sum_{k \in \Omega} \Delta I_{sk} \quad (7)$$

式中: Ω 为所有不能忽略充电效应线路的集合; ΔI_{sl} 为 $N \times 1$ 阶电流列矢量。

1.2 并联电容器

设电容器的导纳不变, 节点 i 并联电容器的导纳为 Y_C , 节点 i 的初始电压为 U_{i1} , 电容器的注入电流为 I_{i1} , $I_{i1} = U_{i1} Y_C$, 并联电容器模型如图3所示。

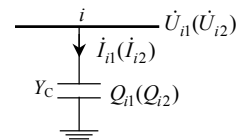


图3 并联电容器模型
Fig. 3 The model of the parallel capacitor

则电容器的注入无功功率 Q_{i1} 为

$$Q_{i1} = U_{i1} \hat{I}_{i1} = U_{i1} (\hat{U}_{i1} \hat{Y}_C) = U_{i1}^2 |Y_C| \quad (8)$$

式中符号“ \wedge ”表示复数的共轭。同理, 当节点 i 的电压为 U_{i2} 时, 可得此时无功功率 Q_{i2} 为

$$Q_{i2} = U_{i2}^2 |Y_C| \quad (9)$$

用标幺值表示时, 假设初始电压 U_{i1} 为额定值, 则其标幺值为 $U_{i1} = 1.0$, 根据式(8)(9)可得

$$Q_{i2} = Q_{i1} U_{i2}^2 \quad (10)$$

进一步可得电压为 U_{i2} 时, 电容器的注入电流 I_{i2} 为

$$I_{i2} = \hat{U}_{i1} U_{i2} I_{i1} = \alpha_{Ci} I_{i1} \quad (11)$$

式中: α_{Ci} 为节点 i 电容器的注入电流系数, $i = 1, 2, \dots, N$, 根据电压变化情况修改, $\alpha_{Ci} = \hat{U}_{i1} U_{i2}$ 。

当网络中有 N 个独立节点时, 所有电容器的注入电流 $\dot{\mathbf{I}}_{SC}$ 为

$$\dot{\mathbf{I}}_{SC} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \vdots \\ \dot{I}_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{C1} & & & \\ & \alpha_{C2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \alpha_{CN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \vdots \\ \dot{I}_{N1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

特别地, 当节点 j 没有接电容器时, $\alpha_{Cj}=0$ 。

1.3 负荷模型

设节点 i 的负荷在电压 \hat{U}_{i1} 时的有功和无功功率分别为 P_{i1} 和 Q_{i1} , 功率因数为 $\cos\varphi_1$, 则节点 i 负荷的注入电流 \dot{I}_{i1} 为

$$\dot{I}_{i1} = (P_{i1} - jQ_{i1}) / \hat{U}_{i1} = P_{i1} / \hat{U}_{i1} \cdot (1 - j \tan\varphi_1) \quad (13)$$

设节点 i 的负荷在电压 \hat{U}_{i2} 时的有功和无功功率分别为 P_{i2} 和 Q_{i2} , 功率因数为 $\cos\varphi_2$, 设 $P_{i2} = \alpha_{iP}P_{i1}$, $Q_{i2} = \alpha_{iQ}Q_{i1}$, 则节点 i 负荷的注入电流 \dot{I}_{i2} 为

$$\dot{I}_{i2} = \frac{(\alpha_{iP}P_{i1} - j\alpha_{iQ}Q_{i1})}{\hat{U}_{i2}} = \frac{P_{i1}}{\hat{U}_{i1}} \cdot \frac{\hat{U}_{i1}}{\hat{U}_{i2}} (\alpha_{iP} - j\alpha_{iQ} \tan\varphi_1) = \frac{(\alpha_{iP} - j\alpha_{iQ} \tan\varphi_1) \hat{U}_{i1}}{(1 - j \tan\varphi_1) \hat{U}_{i2}} \dot{I}_{i1} = \beta_{Li} \dot{I}_{i1} \quad (14)$$

式中: α_{iP} 和 α_{iQ} 分别为有功和无功功率系数; β_{Li} 为负荷电流系数, 根据负荷变化情况进行修改

$$\beta_{Li} = \frac{(\alpha_{iP} - j\alpha_{iQ} \tan\varphi_1) \hat{U}_{i1}}{(1 - j \tan\varphi_1) \hat{U}_{i2}}$$

当网络中 N 个独立节点均有负荷时, N 个节点负荷的注入电流列矢量 $\dot{\mathbf{I}}_{SL}$ 为

$$\dot{\mathbf{I}}_{SL} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \vdots \\ \dot{I}_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{L1} & & & \\ & \beta_{L2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \beta_{LN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \vdots \\ \dot{I}_{N1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

1.4 PV节点

PV节点可以看作特殊的解环点, 如图4(a)所示的PV节点 j 可等效为图4(b)所示模型, 图中 P^S 和 U^S 分别为节点 j 指定的有功注入功率和电压幅值^[14]。节点 j 的无功注入功率 Q 需要满足节点的无功约束。

节点 j 的注入电流 \dot{I}_{SPV_j} 为

$$\dot{I}_{SPV_j} = (P^S + jQ) / \hat{U}_j \quad (16)$$

由上面的分析可知, 对于 N 个独立节点的配电网, 节点注入电流 $\dot{\mathbf{I}}_N$ 为

$$\dot{\mathbf{I}}_N = \Delta \dot{\mathbf{I}}_{sl} + \dot{\mathbf{I}}_{SC} + \dot{\mathbf{I}}_{SL} + \dot{\mathbf{I}}_{SPV} \quad (17)$$

式中 $\dot{\mathbf{I}}_{SPV}$ 为所有PV节点形成的注入电流列矢量。

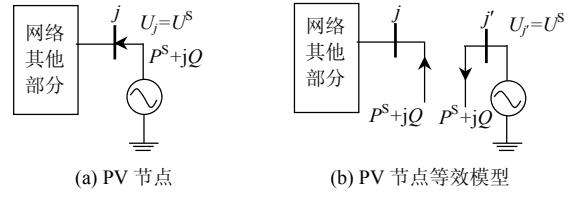


图4 PV节点及其等效模型

Fig. 4 The PV node and its equivalent model

2 网络拓扑分析方法

2.1 纯辐射式配电网

当系统为纯辐射式网络(即没有连支)时, 网络的所有支路均为树支, 定义 \mathbf{A} 为节点-树支关联矩阵, 规定节点注入电流以流入节点为正, 支路电流以离开首节点为正, 则该网络各节点的KCL方程表示为

$$\mathbf{A} \mathbf{i}_b = \mathbf{i}_N \quad (18)$$

式中: b 为树支数; N 为节点总数减1(即独立节点数); \mathbf{A} 为 $N \times b$ 阶矩阵; 源节点为参考节点; \mathbf{i}_b 为 $b \times 1$ 阶列矢量; \mathbf{i}_N 为 $N \times 1$ 阶列矢量。

根据式(18)可得到

$$\mathbf{i}_b = \mathbf{T} \mathbf{i}_N \quad (19)$$

式中 \mathbf{T} 为支路-道路(节点)关联矩阵^[17], 为 $b \times N$ 阶矩阵, $\mathbf{T} = \mathbf{A}^{-1}$ 。

2.2 有回路的配电网

当系统含有回路(即有连支)时, 根据联络开关的位置可以确定回路。当联络开关全部打开时, 即为2.1节所描述的纯辐射式配电网, 此时的分析同上。当联络开关闭合时, 网络中有回路, 此处的回路指基本回路即单连支回路, 回路电流(即连支电流)为 \mathbf{i}_L 。设树支数为 b , 连支数为 m , 定义回路矩阵为 \mathbf{B} , 则

$$\mathbf{B} = [-(\mathbf{A} \mathbf{T}^T) \quad \mathbf{E}_1] \quad (20)$$

式中: \mathbf{E}_1 为 m 阶单位阵; \mathbf{A}_1 为连支-节点关联矩阵。则有回路配电网的KCL方程^[18]表示为

$$\mathbf{B}^T \mathbf{i}_L + \mathbf{T} \mathbf{i}_N = \mathbf{i}_b \quad (21)$$

式中: \mathbf{i}_b 为 $b_1 \times 1$ 阶列矢量; $\mathbf{T}' = [\mathbf{T} \quad \tilde{\mathbf{0}}]^T$, $\tilde{\mathbf{0}}$ 为 $m \times N$ 阶零矩阵, \mathbf{T}' 为 $(b+m) \times N$ 阶矩阵。

根据文献[19], 回路电流 \mathbf{i}_L 为

$$\mathbf{i}_L = \mathbf{Z}_L^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{e} - \mathbf{Z}_b \mathbf{T}' \mathbf{i}_N) \quad (22)$$

式中: $\mathbf{Z}_L = \mathbf{B} \mathbf{Z}_b \mathbf{B}^T$ 为 $m \times m$ 阶回路阻抗阵, \mathbf{Z}_b 为 $b_1 \times b_1$ 阶元件阻抗阵, 是一个对角阵, b_1 为所有支路数, $b_1 = b+m$; \mathbf{e} 为电动势源列向量。

所以, 有回路配电网的支路电流 \mathbf{i}_b 为

$$\mathbf{i}_b = \mathbf{B}^T \mathbf{Z}_L^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{e} - \mathbf{Z}_b \mathbf{T}' \mathbf{i}_N) + \mathbf{T}' \mathbf{i}_N \quad (23)$$

2.3 网络的损耗

设 $\tilde{\mathbf{R}}$ 为所有支路电阻组成的对角阵, $\tilde{\mathbf{X}}$ 为所有支路电抗组成的对角阵, \mathbf{I} 为支路电流组成的对角阵, $\hat{\mathbf{I}}_b$ 为支路电流共轭的列矢量。则网络的全部有功损耗 P_{loss} 和无功损耗 Q_{loss} 为

$$\begin{cases} P_{\text{loss}} = \hat{\mathbf{I}}_b^T \tilde{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{I}}_b \\ Q_{\text{loss}} = \hat{\mathbf{I}}_b^T \tilde{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{I}}_b \end{cases} \quad (24)$$

网络中各条支路的有功损耗 P_{loss_b} 和无功损耗 Q_{loss_b} 为

$$\begin{cases} P_{\text{loss}_b} = \mathbf{I} \tilde{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{I}}_b \\ Q_{\text{loss}_b} = \mathbf{I} \tilde{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{I}}_b \end{cases} \quad (25)$$

式中 \mathbf{I} 为各条支路电流组成的对角阵, $\mathbf{I} = \text{diag}(\hat{I}_1, \hat{I}_2, \dots, \hat{I}_b)$, 在纯辐射式配电网中 $b_1 = b$ 。

2.4 计算步骤

根据前面的分析, 本文提出算法的计算步骤如下:

1) 输入原始数据, 根据网络结构, 写出关联矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{T} 、 \mathbf{A}_1 及回路矩阵 \mathbf{B} 。

2) 根据初始节点电压初始化各节点电压。

3) 计算节点注入电流 $\hat{\mathbf{I}}_N$, 利用式(23)计算支路电流 $\hat{\mathbf{i}}_b$ 。

4) 从根节点开始计算各节点电压, 对于支路 $l(i, j)$, 若支路 l 不是变压器支路, 则节点 j 的电压为

$$\dot{U}_j = \dot{U}_i - Z_l \hat{I}_l \quad (26)$$

若支路 l 是变压器支路, 则节点 j 的电压为

$$\dot{U}_j = (\dot{U}_i - Z_l \hat{I}_l) / t_i \quad (27)$$

式中 t_i 为变压器变比, 本文将其放在线路始端。

5) 若相邻2次迭代中各节点电压的误差均不在允许的误差范围内(本文采用 1×10^{-6}), 则重复步骤3)、4), 否则转到步骤6)。

6) 若相邻2次迭代中PV节点电压的误差均不在允许的误差范围内(本文采用 5×10^{-5}), 则修改PV节点无功功率, 重复步骤3)~5), 否则转到步骤7)。

7) 计算并输出相关结果。

2.5 节点编号

配电网的潮流计算中需要对网络的节点进行编号, 甚至进行优化^[20], 节点编号的优劣会影响到计算结果, 如文献[10]中采用的编号方法使非负荷的中间节点的电流值和电压值无法计算。目前, 节点编号的方法主要有2大类: 广度优先搜索编号法^[21]和深度优先搜索编号法^[14, 22]。

由于本文提出的算法采用网络技术, 对节点和支路编号的要求不高, 采用上述2种方法均可以,

所以本文的潮流计算方法提高了节点和支路编号的灵活性。

3 算例分析

本文对IEEE 30节点系统^[19]进行了计算分析, 节点和支路编号均采用原编号。IEEE 30节点系统中支路L₄、L₆、L₉、L₁₄、L₂₀、L₂₅、L₂₆、L₂₉、L₃₂、L₃₉、L₄₀及L₄₁为连支, 其余为树支。利用本文提出的算法, IEEE 30节点系统的潮流及母线数据见表1。

表1 IEEE 30节点系统潮流及母线电压
Tab. 1 The power flow and the bus voltage in IEEE 30-bus system

母线号	母线电压		发电机输出功率		负荷功率	
	幅值/pu	相角/(°)	有功/MW	无功/Mvar	有功/MW	无功/Mvar
1	1.0500	0	138.1723	-0.2325	0	0
2	1.0338	-2.7263	57.5600	1.7036	0.2170	0.1270
3	1.0310	-4.6691	0	0	0.0240	0.0120
4	1.0259	-5.5926	0	0	0.0760	0.0160
5	1.0058	-8.9763	24.5600	21.9134	0.9420	0.1900
6	1.0222	-6.4597	0	0	0	0
7	1.0077	-8.0201	0	0	0.2280	0.1090
8	1.0230	-6.4448	35.0000	29.6761	0.3000	0.3000
9	1.0563	-8.1565	0	0	0	0
10	1.0723	-9.9298	0	0	0.0580	0.0200
11	1.0913	-6.3024	17.9300	18.6750	0	0
12	1.0542	-9.3093	0	0	0.1120	0.0750
13	1.0883	-8.1270	16.9100	26.6826	0	0
14	1.0396	-10.2200	0	0	0.0620	0.0160
15	1.0352	-10.3328	0	0	0.0820	0.0250
16	1.0433	-9.9200	0	0	0.0350	0.0180
17	1.0395	-10.2551	0	0	0.0900	0.0580
18	1.0267	-10.9478	0	0	0.0320	0.0090
19	1.0248	-11.1208	0	0	0.0950	0.0340
20	1.0292	-10.9235	0	0	0.0220	0.0070
21	1.0597	-10.3841	0	0	0.1750	0.1120
22	1.0600	-10.3813	0	0	0	0
23	1.0248	-10.7925	0	0	0.0320	0.0160
24	1.0461	-10.8611	0	0	0.0870	0.0670
25	1.0381	-10.8303	0	0	0	0
26	1.0207	-11.2319	0	0	0.0350	0.0230
27	1.0415	-10.5666	0	0	0	0
28	1.0138	-7.1573	0	0	0	0
29	1.0221	-11.7529	0	0	0.0240	0.0090
30	1.0108	-12.6035	0	0	0.1060	0.0190
系统总功率			290.1323	98.4182	283.40	126.20

将本文方法计算得出的发电机输出功率与文献[19]中的数据进行比较, 见表2。可以看出, PV节点无功功率均在允许范围内, 而且PV节点的无功功率比文献[19]中的数值小, 另外, PV节点电压与给定值相同。

与前推回代算法相比, 本文算法不需要解环, 而且不需要采用其他原理来处理多电源, 很容易处理存在环网和PV节点的配电系统。

表2 发电机输出功率比较
Tab. 2 The comparison of generators output power

母线号	本文算法				文献[19]中算法			
	母线电压		发电机输出功率		母线电压		发电机输出功率	
	幅值/pu	相角/(°)	有功/MW	无功/Mvar	幅值/pu	相角/(°)	有功/MW	无功/Mvar
1	1.0500	0	138.1723	-0.2325	1.0500	0	138.53	-2.58
2	1.0338	-2.7263	57.5600	1.7036	1.0338	-2.7374	57.56	2.43
5	1.0058	-8.9763	24.5600	21.9134	1.0058	-9.0005	24.56	22.25
8	1.0230	-6.4448	35.0000	29.6761	1.0230	-6.4864	35.00	32.27
11	1.0913	-6.3024	17.9300	18.6750	1.0913	-6.3003	17.93	17.61
13	1.0883	-8.1270	16.9100	26.6826	1.0883	-8.0216	16.91	24.96
系统总功率			290.1323	98.4182			290.40	96.95

为进一步说明本文算法的有效性，本文对不同负荷系数下的IEEE 30节点系统进行了计算，并且与文献[13]中的结果进行比较，如表3所示。可见，本文算法计算结果优于文献[13]中的算法，并且本文算法计算速度更快。

表3 本文算法与文献[13]中算法结果比较
Tab. 3 Results comparison of algorithms in this paper and reference[13]

负荷系数	文献[13]中算法			本文算法		
	最低电压/pu	迭代次数	计算时间/s	最低电压/pu	迭代次数	计算时间/s
	0.5	1.0100	10	14.2	1.0058	15
0.9	0.9779	14	16.7	1.0058	16	9.7
1.0	0.9681	14	16.7	1.0058	20	10.5
1.2	0.9479	18	19.3	1.0036	21	10.7

4 结论

本文分析了线路、电容器、负荷及PV节点在配电网潮流计算中的模型，给出了基于网络拓扑方法的配电网潮流计算方法，该算法对节点和支路编号的要求低，从而提高了算法的灵活性。

从算例结果及比较分析中可以看出，本文提出的配电网潮流计算方法是一种有效地计算复杂配电网潮流的方法，具有较强的环网计算能力，而且在考虑线路的充电效应、PV节点以及电容器和负荷的影响时，求取各支路电流非常容易。在某一运行状态下，负荷或电容器发生变化时可以一步求得支路电流。对于纯辐射式网络，该算法计算速度更快。

参考文献

[1] 蔡中勤, 郭志忠. 基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 13-16.
Cai Zhongqin, Guo Zhizhong. Newton load flow for radial distribution network based on upstream labeling technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 13-16(in Chinese).

[2] 索南加乐, 李怀强, 罗云照, 等. 一种新的配网潮流常Jacobian牛顿算法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(12): 1222-1226.

Suonan Jiale, Li Huaqiang, Luo Yunzhao, et al. Novel Newton method with constant Jacobian matrix for distribution systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(12): 1222-1226(in Chinese).

[3] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 76-80.
Yan Wei, Liu Fang, Wang Guanjie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 76-80(in Chinese).

[4] 刘健, 马莉, 韦力, 等. 复杂配电网潮流的降规模计算[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 60-63,76.
Liu Jian, Ma Li, Wei Li, et al. Analysis of large scale distribution network with reduced calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 60-63,76(in Chinese).

[5] 邵黎, 谢开贵, 何潇. 用于复杂配电网潮流计算和可靠性评估的树状链表和递归搜索方法[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 39-43.
Shao Li, Xie Kaigui, He Xiao. Dendroidal link table and recursion search technique for power flow calculation and reliability estimation of complex distribution networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 39-43(in Chinese).

[6] 彭谦, 张弘鲲, 刘海燕, 等. 基于集抄系统的配电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 69-72.
Peng Qian, Zhang Hongkun, Liu Haiyan, et al. Load flow algorithm for distribution network based on centralized meter reading system[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 69-72(in Chinese).

[7] 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 Xuesong, Liu Zhuo, Yu Erkeng, et al. A comparison on power flow calculation methods for distribution network[J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 45-49(in Chinese).

[8] 王守相, 江兴月, 王成山. 含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 38-42.
Wang Shouxiang, Jiang Xingyue, Wang Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 38-42(in Chinese).

[9] 杨旭英, 段建东, 杨文宇, 等. 含分布式发电的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 140-143.
Yang Xuying, Duan Jiandong, Yang Wenyu, et al. Power flow calculation based on power losses sensitivity for distribution system with distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 140-143(in Chinese).

[10] Zhang Fang, Cheng Carols. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.

- [11] Shirmohammadi 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.
- [12] Haque M H. Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration[J]. IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 33-38.
- [13] Rajcic D, Ackovski R, Taleski R. Voltage correction power flow[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 1056-1062.
- [14] Luo G X, Semlyen A. Efficient load flow for large weakly meshed networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(4): 1309-1316.
- [15] Vempati N, Shoultz R R, Chen M S, et al. Simplified feeder modeling for load flow calculations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(1): 168-174.
- [16] Chiang Hsiao-Dong, Wang Jin-Cheng, Miu Karen Nan. Explicit loss formula, voltage formula and current flow formula for large-scale unbalanced distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1061-1067.
- [17] Gohokar V N, Khedkar M K, Dhole G M. Formulation of distribution reconfiguration problem using network topology: a generalized approach[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2-3): 305-310.
- [18] 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 Wenchuan, Zhang Boming. Study on loop analysis theorem of distribution system power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 67-71(in Chinese).
- [19] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 15-19, 325-328.
- [20] 乐全明, 吕飞鹏, 郁惟镛, 等. 形成节点阻抗矩阵的节点编号顺序优化算法[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 88-91.
Yue Quanming, Lü Feipeng, Yu Weiyong, et al. An optimal node numbering order algorithm to build bus impedance matrix[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 88-91(in Chinese).
- [21] Goswami S K, Basu S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(1): 78-88.
- [22] 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 Shouxiang, Wang Chengshan. Comparative study of optimal node indexing schemes for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 54-58(in Chinese).



孟晓芳

收稿日期: 2009-12-04。

作者简介:

孟晓芳(1974—), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为农村电力网规划和负荷管理, E-mail: xfmeng123@126.com;

刘文字(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无功优化及控制;

朴在林(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农业电气化与自动化。

(责任编辑 沈杰)