计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算

张立梅[1,2] 唐巍[1]
（1．中国农业大学信息与电气工程学院 北京 100083 2．河北农业大学信息科学与技术学院 保定 071001）

摘要 结合前推回代法的特点，分析研究了各种类型分布式电源在前推回代潮流计算中的数学模型。针对前推回代法对 PV 节点和环网失效的问题，提出了依据节点电阻矩阵、节点电抗矩阵及电压偏差对 P、V 恒定型分布式电源和环网断点功率修正方法，设计了适合于分布式电源和环网的灵活节点编号方法，给出了改进前推回代潮流算法的执行过程。通过 20 节点系统和 IEEE90 节点系统的仿真，对所提出算法的适应性、计算速度、收敛性等进行了分析，结果表明本文提出模型和方法能够快速、方便求解含多电源多类型的配电网潮流。

关键词：分布式电源 潮流计算 前推回代 环网 功率调整 配电网
中图分类号：TM743；TM91

Back/Forward Sweep Power Flow Calculation Method of Distribution Networks With DGs

Zhang Limei[1,2] *Tang Wei*[1]
（1. China Agricultural University Beijing 100083 China 2. Agricultural University of Hebei Baoding 071001 China）

Abstract Integrated with the characteristics of the back/forward sweep, this paper presents the various models of distributed generators (DGs) adapted to the back/forward sweep method. Considering the limits of the back/forward sweep for solving PV node and meshed network, their power correction equations are put up based on resistance matrix, reactance matrix and mismatch of voltage magnitude, planning the flexible nodal numbering scheme suited for DGs and meshed network, giving the procedure of the improved back/forward sweep algorithm. Plenty of simulations with 20 buses and IEEE 90 buses system are carried out to illustrate the performance of the proposed method. The results show that the presented method is simple, flexible, reliable and available to solve power flow of radial and meshed distribution network with multi-source and multi-type DGs.

Keywords: Distributed generation, power flow calculation, back/forward sweep, meshed network, power correction, distribution network.

国家“十一五”科技支撑计划项目（2006BAJ04B06）。
收稿日期 2009-09-28 改稿日期 2010-03-17

1 引言

随着电力市场改革的不断深入，对配电网经济性和可靠性提出了越来越高的要求，分布式发电(Distributed Generation，DG) 得到了越来越多的关注。DG 与大电网相互补充、协调，是综合利用现有资源和设备为用户提供可靠和优质电能的最佳方式[1-2]。随着 DG 技术水平的提高、各种分布式电源(DGs) 设备性能的不断改进及其效率的不断提高，DG 的成本也在不断降低，应用范围不断扩大。然而，大量 DG 接入使传统的配电网逐步发展成一个复杂的多电源网络，随之潮流的方向必然发生变化[3-4]。传统的配电网潮流算法因未考虑各种形式的 DG 而不能直接使用，因此，研究涉及 DG 影响的潮流算法尤为重要。

传统的配电网潮流算法主要有牛顿拉夫逊法[5-6]、直接法[7]和前推回代法[8]三种类型，有关这些潮流计算方法及其特点的描述可参阅文献 [9-11]。包含 DG 的配电网潮流计算与传统配电网潮流计算的主要区别有：配电网从原来的无源网络变成了含不同类型不同大小 DGs 的有源网络；DGs 种类的各异性使其潮流计算模型呈现出多样性，这与传统发电机组计算模型不一致；这使配电网潮流计算比传统的配电网潮流计算更加复杂[3,9-11]。因此，理解这些不同、建立各种 DGs 的潮流模型是求解含 DGs 的配电网潮流的关键所在。

目前，在 DG 并网的潮流计算方法研究方面，学术界已经开展了一些工作。文献 [5]提出了基于牛顿法处理各种 DG 的配电网潮流计算方法，但由于牛顿法本身对电压初值非常敏感， Jacobi 矩阵形成复杂，而且需要求逆计算，再加上配电网中具有较大的 R/X，致使其在配电网中存在收敛困难的问题；文献[12]介绍了 DG 与电网互联的三种常见接口类型，在直接法的基础上，采用灵敏度矩阵的补偿算法对包含不同类型 DG 的配电网潮流计算进行了研究。与牛顿拉夫逊法和直接法相比，前推回代法因其具有易编程、计算效率高、收敛性好、占用内存少、不需要求 Jacobi 矩阵等优点在配电系统中得到了广泛应用，但是该方法要求配电网除首端平衡节点以外的节点都为 PQ 节点[13-14]。它的这一要求限制了其在含有多种类型 DGs 配电网中的应用。本文正是基于此，通过提出改进模型及算法，探讨 研究前推回代法对于含有不同类型 DGs 配电网潮流计算的可行性和适用性，并通过大量仿真予以验证。

2 分布式电源的潮流计算模型

DG 类型很多，按发电能源是否可以再生分为两大类，一类是利用可再 生能源，主要包括风力发电、太阳能光伏、 小水电、地热能、生物质能、海洋能等发电形式；另一类是利用不可再生能源，主要包括热电联产、微型燃气轮机、燃料电池等发电形式[4]。DG 种类的多样性决定了其模型在潮流计算中的复杂性，已经有一些文献对其潮流计算模型进行了分析[10,12]。综合分析各种文献资料，从 DG 接入配电网的方式来看， DGs 在潮流计算中的模型基本上可分为三类：P、Q 均恒定的分布式电源（模型 I）；P、V 恒定型分布式电源（模型 II）；P 恒定而 $Q=f(V)$ 型的分布式电源（模型 III）。

本文在潮流计算时将所有的 DGs 都看作负的负荷，但由于 DGs 种类的差异性，导致其具体的处理方法不同。针对上述三种类型的 DGs，结合前推回代法的要求来分析其潮流计算模型。

2.1 *P*、*Q* 恒定型分布式电源 模型

此种 DGs 与功率大小相等的负荷相比，只是功率流向相反，潮流计算为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{I}} = -P_{\mathrm{s}} \\ Q_{\mathrm{I}} = -Q_{\mathrm{s}} \end{cases} \tag{1}$$

因此，对于该种类型分布式电源，在前推回代潮流计算时只是输入数据符号改变，潮流计算过程不需要特殊处理。

2.2 *P*、*V* 恒定型分布式电源 模型

对于 P、V 恒定型 DGs，P 和 V 是恒定值，其潮流计算模型：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{II}} = -P_{\mathrm{s}} \\ U = U_{\mathrm{s}} \end{cases} \tag{2}$$

式中，P_{s}、U_{s} 分别是 P、V 恒定型 DGs 的有功和电压。这与前推回代法要求负荷为 PQ 类型的条件不相符，需要特殊处理。

理论分析和大量的实验表明：①电力系统节点无功主要和电压幅值有关；②节点注入电压对 DG 来说，在 P 恒定不变的情况下，其端电压随 DG 注入无功的增大而增大，且对全网其他节点电压有提升作用。因此，可以根据 PV 节点电压偏差 (ΔU)修正无功功率，即

$$Q_{\mathrm{II}}^{t+1} = Q_{\mathrm{II}}^{t} + \Delta Q = Q_{\mathrm{II}}^{t} + f(\Delta U^{t}) \tag{3}$$

式中，t 指迭代次数，$f(\Delta U^{t})$ 是无功修正量 ΔQ 的表达式，将在 3.1 节详细介绍。

需要指出的是，实际中 P、V 恒定型 DGs 通常给定无功上、下限，而经过该方程修正后的无功有可能超出无功要求的范围。因此，为了避免这种情况的发生，将无功修正方程式改为如下形式：

$$Q_{\mathrm{II}}^{t} = \begin{cases} Q_{\mathrm{II}}^{t-1} + \Delta Q & -Q_{\mathrm{II}}^{\max} \leqslant Q_{\mathrm{II}}^{t-1} + \Delta Q \quad -Q_{\mathrm{II}}^{\min} \\ -Q_{\mathrm{II}}^{\max} & Q_{\mathrm{II}}^{t-1} + \Delta Q \leqslant -Q_{\mathrm{II}}^{\max} \\ -Q_{\mathrm{II}}^{\min} & Q_{\mathrm{II}}^{t-1} + \Delta Q \geqslant -Q_{\mathrm{II}}^{\min} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$Q_{\mathrm{II}}^{\max}$ 和 $Q_{\mathrm{II}}^{\min}$ 是 P、V 恒定型 DGs 的无功上、下限。

2.3　P 恒定、$Q=f(V)$ 型分布式电源模型

对于该类型的 DGs，其潮流计算模型如方程式（5）所示。迭代过程中无功的调节通过上次迭代的电压幅值计算得到。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{III}} = -P_{\mathrm{s}} \\ Q_{\mathrm{III}}^{t} = -f(U^{t-1}) \end{cases} \tag{5}$$

式中，U^{t-1} 是第 $t-1$ 次迭代的电压幅值；Q_{III}^{t} 是第 t 次的无功功率。

3　P、V 恒定型 DGs 的无功修正及环网处理

3.1　P、V 恒定型 DGs 无功修正量 ΔQ 的推导

假设系统有 N 个 P、V 恒定型 DGs 接入配电系统，且假设 DG 注入电网的电流为正方向，则节点注入电流增量矢量 $\Delta\bar{\boldsymbol{I}}$ 和节点电压增量矢量 $\Delta\bar{\boldsymbol{U}}$ 的关系满足

$$\boldsymbol{Z}\Delta\bar{\boldsymbol{I}} = \Delta\bar{\boldsymbol{U}} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{Z}$ 代表 P、V 恒定型 DGs 的节点阻抗矩阵，方程式两边同乘电压幅值，则得到

$$\boldsymbol{U}\boldsymbol{Z}\Delta\bar{\boldsymbol{I}} = \boldsymbol{U}\Delta\bar{\boldsymbol{U}} \tag{7}$$

由于首端线路电压幅值和相角保持不变，而配电系统中各 DG 的电压幅值及相角相差很小，可认为其近似等于基准电压，因此有

$$\Delta\bar{\boldsymbol{S}}^{*} = \bar{\boldsymbol{U}}^{*}\Delta\bar{\boldsymbol{I}}\boldsymbol{U} \approx \boldsymbol{U}\Delta\bar{\boldsymbol{I}} \tag{8}$$

式中，$\Delta\bar{\boldsymbol{S}}$ 为复功率，符号“*”表示共轭。

由式（7）和式（8）得

$$\boldsymbol{Z}\Delta\bar{\boldsymbol{S}}^{*} = \boldsymbol{U}\Delta\bar{\boldsymbol{U}} \tag{9}$$

将 $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{R} + \mathrm{j}\boldsymbol{X}$ 和 $\Delta\bar{\boldsymbol{S}}^{*} = \Delta\boldsymbol{P} - \mathrm{j}\Delta\boldsymbol{Q}$ 代入式（9），又由于 $\Delta\bar{\boldsymbol{U}}$ 主要取决于其实部 $\Delta\boldsymbol{U}$，即 $\Delta\bar{\boldsymbol{U}} \approx \Delta\boldsymbol{U}$，代入

并展开可得到其实部方程为

$$\boldsymbol{R}\Delta\boldsymbol{P} + \boldsymbol{X}\Delta\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{U} \tag{10}$$

因为 P、V 恒定型 DGs 发出的有功恒定不变，即 $\Delta\boldsymbol{P}\equiv 0$，所以

$$\boldsymbol{X}\Delta\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{U} \tag{11}$$

则有

$$\Delta\boldsymbol{Q} = f(\Delta\boldsymbol{U}) = \boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{U} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{X}$ 代表由 $\boldsymbol{Z}$ 阵各元素虚部构成的电抗矩阵，定义为 $\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{V}$ 恒定型 DGs 的节点电抗矩阵。

上式表明，第 i 个 P、V 恒定型 DGs 无功修正量 ΔQ_i 不仅与所在节点电压 U_i、电压偏差 ΔU_i 有关，还与其他 P、V 恒定型 DGs 节点的电压、电压偏差有关，其相关性通过节点电抗矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的逆矩阵来传递。由于各节点电压幅值相差不大，上式中 $\boldsymbol{U}$ 可用基准电压幅值来代替，故第 i 个 P、V 恒定型 DGs 无功修正量 ΔQ_i 主要取决于各 P、V 恒定型 DGs 节点的电压偏差 ΔU_i 和节点电抗矩阵 $\boldsymbol{X}$。

3.2　节点电抗矩阵

设配电系统中 P、V 恒定型 DGs 有 n 个，则节点电抗矩阵 $\boldsymbol{X}$ 为 $n\times n$ 的对称方阵，其中的对角元素 x_{ii} 为第 i 个 P、V 恒定型 DGs 的自电抗，其值等于从第 i 个 P、V 恒定型 DGs 到等效电压源节点之间支路的电抗之和，而非对角元素 x_{ij} 为两个 P、V 恒定型 DGs 之间的互电抗，其值等于从两个 P、V 恒定型 DGs 到等效电压源节点之间共同支路的电抗之和。

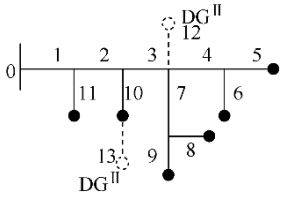

图 1　电抗矩阵求解示意图

Fig.1　The schematic for solution of reactance matrix

以图 1 为例，节点 12 和 13 处装有 P、V 恒定型 DGs，则节点电抗矩阵 $\boldsymbol{X}$ 为 2×2 的矩阵，即

$$\boldsymbol{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{pmatrix}$$

其中节点 12 和 13 的自电抗 x_{11}、x_{12} 和互电抗 x_{12}、x_{21} 依次为

$$\begin{cases} x_{11} = X_{12} + X_1 + X_2 + X_3 \\ x_{22} = X_{13} + X_1 + X_2 + X_{10} \\ x_{12} = x_{21} = X_1 + X_2 \end{cases}$$

式中，X_1、X_2、X_3、X_{10}、X_{12} 和 X_{13} 分别表示支路 1、2、3、10、12、13 的电抗值。

由于节点电抗矩阵物理意义明确，只取决于线路参数，因此可一次计算完成，潮流计算过程中不需要二次求取。另外，由于 P、V 恒定型 DGs 数量有限，故矩阵规模较小，其逆矩阵容易获得。

3.3　环网的处理及断点修正方程式

配电网在正常运行时是辐射状的，不允许有闭环产生，但在某些极端运行方式下，如负荷转移或故障处理等，可能会出现短时的环网运行状态。对于环网，本文仍然是通过解环将环网变成辐射状网

络[8,15-17]。所采用的解环方法是：在环上的任意点处断开，将断点拆成两个节点，并假定其所带负荷初值分别为(P_0, Q_0) 和 $(-P_0, -Q_0)$，如图 2 所示。在迭代过程中断点处所带负荷需进行修正，其有功、无功修正量 $(\Delta P, \Delta Q)$ 的推导与 P、V 恒定型 DGs 无功修正量相似，对于断点而言，除得到形似式（10）的实部方程，还可得到虚部方程式

$$-\boldsymbol{R}\Delta\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{X}\Delta\boldsymbol{P}=\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{\delta} \tag{13}$$

由于相角的变化很小，可认为 $\Delta\boldsymbol{\delta}=0$，即

$$\Delta\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{X}\Delta\boldsymbol{P} \tag{14}$$

联合式（10）和式（14）可得到修正方程式

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{R}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{U}\\ \Delta\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{X}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{R})^{-1}\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{U}\end{cases} \tag{15}$$

式中，$\boldsymbol{U}$ 是电压幅值；$\boldsymbol{R}$ 是含有 n 个环的电阻矩阵，为 $n\times n$ 的对称方阵，其中的对角元素为第 i 个环的自电阻，其值等于第 i 个环的所有支路的电阻之和，而非对角元素为两环之间的关联电阻，其值等于两环公共支路的电阻之和；$\boldsymbol{X}$ 是电抗矩阵，也为 $n\times n$ 的对称方阵，其中元素含义类似于 $\boldsymbol{R}$，只是计算时用电抗替换电阻。

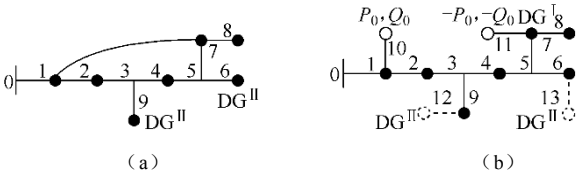

图 2 解环示意图

Fig.2 The breakpoint representation

4 含分布式电源的改进前推回代潮流算法的实现

4.1 灵活节点编号方案

本文将线路首端等值为电压源，节点编码方案从电压源的零号母线开始，依次编为 0，1，2，3，…N，支路编号与其末端节点编号相同。对于 P、Q 恒定型 DGs，考虑到其在前推回代潮流计算过程中与普通负荷一样，节点编号时不需单独处理。

对于断点处的编号，其编号在所有负荷点和 P、Q 恒定型 DGs 编号完成后进行，并使解环所形成的两个断点编号相邻。

对于 P、V 恒定型 DGs，由于在计算过程中需要调节无功，将其看作独立的节点，并使其通过一条具有零阻抗和零电抗的虚拟支路与配电网相连（如图 1 中虚线所示），其节点编号（或支路编号）在所有的断点编号完成后进行。

对于 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs，与 P、V 恒定型 DGs 的一样也看作独立的节点，并通过一条具有零阻抗和零电抗的虚拟支路与配电网相连，并使其节点编号在所有 P、V 恒定型 DGs 节点编号完成后进行。

这样编号的好处是：一方面 便于潮流计算时对断点，P、V 恒定型和 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 的功率进行调整，省去查找 DG 接入位置节点编号时间，从而提高程序的计算效率；另一方面利于分布式电源接入数量、位置的改变，从而提高算法的灵活性。

4.2 改进算法过程描述

根据 DG 的特点，本文研究的计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算方法满足以下假设 ：

（1）为了保证整个配电线路是严格吸收型的受端网络，即负荷总容量一般仍大于分布式电源的总容量。

（2）分布在不同馈线上的负荷是恒功率负荷。

结合前推回代方法框架，改进算法执行过程中充分考虑了各种 DGs 的初值设定、DGs 的无功功率调整、DGs 对算法收敛判据的影响，改进算法 描述如下：

（1）读取系统原始数据，形成 P、V 恒定型 DGs 节点电抗矩阵及断点电阻、电抗矩阵，给定最大迭代次数 $N_{\max}$。

（2）设置所有负荷节点和 P、Q 恒定型 DGs 的 P、Q 为给定值，假定其电压初值 $U^0=U_B\angle 0°$（U_B 为基准电压幅值）；设置 P、V 恒定型 DGs 节点的 P、V 为给定值，假定其无功初值 $Q^0=-(Q_{\min}+Q_{\max})/2$；设置 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 节点的 P 为给定值，电压为 $U^0=U_B\angle 0°$，无功初值为 $Q^0=-f(U_B)$；设置环的断点处所带负荷初值分别为 (P_0, Q_0) 和 $(-P_0, -Q_0)$。

（3）前推计算：从线路最末端开始，以初值电压和功率为已知条件，计算出支路 首端功率，依此类推，直到电压源节点为止。

（4）回代计算：从电压源开始，以首端功率和首端电压为已知条件，计算末端电压，依此类推，直至线路最末端为止。

（5）DGs 无功功率及环的断点处有功、无功调整：根据（4）获得的各节点电压，P、V 恒定型

DGs 的无功功率按式（12）、式（3）和式（4）进行调整；对 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 的无功按式（5）进行调整；对断点处的有功、无功按式（15）进行调整。

（6）收敛校验：所有非 P、V 恒定型 DGs 节点本次迭代电压幅值 $U_i^{(k)}$ 与上次迭代电压幅值 $U_i^{(k-1)}$ 满足 $\max|U_i^{(k)}-U_i^{(k-1)}|\leqslant\varepsilon$（$\varepsilon$ 为计算精度），P、V 恒定型 DGs 节点电压幅值满足 $\max|U_i^{(k)}-U_s|\leqslant\varepsilon$，且断点处两母线电压幅值差满足预设精度要求，则迭代收敛，转（7）；否则判断是否满足最大迭代次数要求（$N>N_{\max}$），若满足则转（7），不满足则转步骤（3）。

（7）计算结束，输出潮流计算结果。

5　仿真测试与分析

为了验证分析算法的有效性和收敛性，所提出的算法在两个配电系统上（20 节点系统和 IEEE90 节点系统）进行了大量的测试，收敛精度要求为 $\varepsilon=10^{-4}$。

5.1　20 节点配电系统

20 节点系统的拓扑结构和原始数据信息参见文献[18]，进行两种情况测试：情况 1（C1）中 DGs 均为 P、Q 恒定型，其数量、容量及安装位置同文献[18]；情况 2（C2）是将情况 1 中节点 8 和 14 处的 P、Q 恒定型 DGs 换成 P、V 恒定型 DGs，其有功与电压幅值与情况 1 中一致。仿真结果电压分布如图 3 所示。

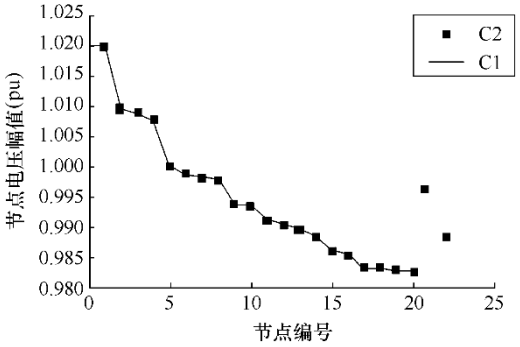

图 3　情况 1 和情况 2 的电压分布

Fig.3　The feeder's voltage profile for C1 and C2

从图 2 可以看出：情况 1 仿真结果与文献[18]电压分布相同，说明本文方法对于 P、Q 恒定型 DGs 适用；而情况 2 添加了 P、V 恒定型 DGs，由于其 P、V 值按情况 1 潮流结果给定，理论上电压分布结果应与情况 1 一致，而仿真结果也与情况 1 完全一致，说明本文方法对于 P、V 恒定型 DGs 适用。

为了验证该算法对 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 的适用性，在节点 8 处接该类型 DGs，无功与端电压的计算式采用文献[11] 同步电机接入时的电压方程式：

$$Q_{\mathrm{DG}}^{\mathrm{P}}=-\sqrt{\left(\frac{E_{\mathrm{DGq}}V_{\mathrm{out}}}{X_{\mathrm{d}}}\right)-P_{\mathrm{s}}^{2}}+\frac{V_{\mathrm{out}}^{2}}{X_{\mathrm{d}}}\qquad(16)$$

式中，参数 $X_{\mathrm{d}}=0.0017$，$P_{\mathrm{s}}=0.0424$。采用本文方法 4 次迭代就可达到潮流收敛，节点 8 处的电压幅值为 0.9853 (pu)，无功注入为 0.0157 (pu)。无功注入与电压幅值符合给定函数关系，表明本文方法对于 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DG 适用。

5.2　IEEE90 节点系统

IEEE90 节点系统为复杂配电系统，用来测试各种 DGs 并网对潮流收敛性的影响，其支路、负荷参数取自文献[19]，但本文采用不同的编码方案（0 是平衡节点），其拓扑结构如图 4 所示。

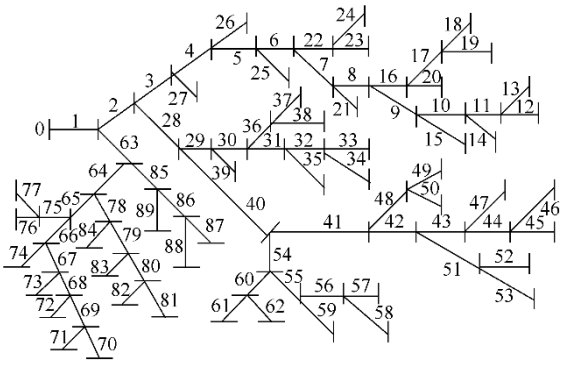

图 4　IEEE 有 90 节点系统拓扑结构

Fig.4　The topological structure for IEEE 90 bus system

采用本文所述算法进行了六种情况测试，仿真结果见下表。

表　计算结果

Tab.　The calculative on results

测试类别		迭代次数	计算时间 /s
A	A1	2	0.156
	A2	2	0.169
	A3	2	0.161
	A4	2	0.168
	A5	2	0.155
B	B1	3	0.312
	B2	4	0.328
	B3	4	0.327
	B4	4	0.344
	B5	5	0.343

C	C1	3	0.343
	C2	6	0.328
	C3	4	0.344
	C4	5	0.328
D	D1	3	0.327
	D2	4	0.344
	D3	4	0.359
E	E1	3	0.312
	E2	3	0.328
	E3	3	0.344
	E4	3	0.343
F	F1	3	0.328
	F2	3	0.328
	F3	7	0.343
G	G1	3	0.312
	G2	3	0.312
	G3	7	0.327
	G4	4	0.344

（1）情况 A：用来测试 P、Q 恒定型 DGs 数量及其安装位置对潮流收敛性的影 响。

A1：没有 DGs；

A2：1 个 DG 安装在节点 79；

A3：3 个 DG 安装在节点 5、30、79；

A4：5 个 DG 安装在节点 5、11、30、57、79；

A5：5 个 DG 安装在节点 5、11、14、28、29，且 P、Q 容量同文献[13]。

（2）情况 B：用来测试 P、V 恒定型 DGs 数量及其安装位置对算法收敛性的影响。

B1：1 个 DG 安装在节点 29；

B2：2 个 DG 安装在节点 8、29；

B3：3 个 DG 安装在节点 8、29、66；

B4：4 个 DG 安装在节点 8、29、42、66；

B5：4 个 DG 安装在节点 8、29、13、24，且所有 P、V 恒定型 DGs 的无功初值 Q^0=–0.375(pu)。

（3）情况 C：用来测试 P、V 恒定型 DGs 无功初值的选取对算法收敛性的影响， 3 个安装在母线 8、29、66，其无功初值依次取 0、0.3、0.6、0.75（pu）。

（4）情况 D：用来测试 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 数量对算法收敛性的影响。

D1：1 个 DG 安装在节点 29；

D2：2 个 DG 安装在节点 8、29；

D3：3 个 DG 安装在节点 8、12、29。

（5）情况 E：用来测定 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 无功初值的选取对算法收敛性的影响， 1 个安装在节点 29，其无功初值依次取 0、0.3、0.6、0.75（pu）。

（6）情况 F：用来测试不同类型的 DGs 混合时对算法收敛性的影响。

F1：3 个 P、Q 恒定型和 1 个 P、V 恒定型 DGs 混合安装，其位置依次为 8、29、66、42；

F2：3 个 P、Q 恒定型和 1 个 P 恒定、$Q=f(V)$型 *DG*s 混合安装，安装位置依次为 8、29、66、42；

F3：1 个 P、Q 恒定型、1 个 P、V 恒定型及 1 个 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs 混合安装，其安装位置依次为 8、29、66。

（7）情况 G：用来测试算法对环网的适应性。仿真是在 IEEE 90 系统上增加环路进行。所增加的支路信息是：相连的两端点是 68-80、11-19 和 10-20，相应线路电阻、电抗取值依次是 (0.0662，0.0005)、(0.0246，0.0082) 和 (0.0209，0.0070)，所有断点的有功、无功初值都取零。 分布式电源的类型、安装数量及安装位置如下：

G1：没有 DGs；

G2：2 个 P、Q 恒定型DGs，安装位置 3 和 9；

G3：2 个 P、V 恒定型 DGs，安装位置 3 和 9；

G4：2 个 P 恒定、$Q=f(V)$ 型 DGs，安装位置 3 和 9。

5.3 结果分析

通过对测试结果进行分析，得出如下结论：

（1）对于 P、Q 恒定型 DGs，算法的收敛性与其安装位置及数量关系不大，收敛迭代次数不随 DGs 数量的增加及位置的改变而变化，在各种情况下 3 次迭代都能达到很高的计算精度，且与没有安装 DGs 时的收敛情况相一致（如上表中 A 所示）。

（2）对于 P、V 恒定型 DGs，算法的收敛性与其安装位置、数量有关。随着 P、V 恒定型 DGs 数量的改变通常迭代次数会发生变化，且安装位置的不同会对算法的收敛性产生重要影响。一般来说安装在同一支路上的多个 DGs 比相同数量安装在不同支路上的迭代次数要多（如表中 B 和 C），原因是在同一分支线上的 P、V 恒定型 DGs 之间有线路连接，存在电压降，为了保持 P、V 恒定型 DGs 电压为额定值需要调节无功，当无功越限后考虑实际情

况只能取其限值，导致迭代次数增加。算法收敛性与P、V恒定型 DGs无功初值也有一定的关系，在无功初值取值接近真值时迭代次数较少，而远离真值较多，初值的选取对算法收敛性影响不明显，如表中在初值取 0.375、0.6、0.75 时都能在 6 次迭代后达到收敛精度要求。

（3）对于 P 恒定、$Q= f(V)$ 型 DGs，算法的收敛性与其数量和安装位置有弱关联性，与没有 DGs 时相比，算法的收敛性有所降低，但 P 恒定、$Q= f(V)$ 型 DGs 数量的增加算法的迭代次数变化不大。且与 P 恒定、$Q= f(V)$ 型 DGs 无功初值的关系不大，如表中 E 在其初值取 0、0.375、0.75 等时 3 次都达到收敛精度要求。

（4）辐射状配电网结构的复杂性并不影响该算法的收敛性，无论 20 节点系统，还是 IEEE90 节点测试系统都能达到很高的收敛速度，且对各种类型的 DGs 都能达到很好的收敛效果。但对于 存在环形结构的配电网 来说，算法的收敛性与环数、环的位置、环的断点处的有功和无功初值选取有直接的关系。算法的收敛性通常是弱环网好于复杂的环网。

（5）在精确到 1V 的情况下，与文献 [3]所述算法相比，本文算法迭代收敛次数与之相当。此外，使用关联电抗矩阵使所占用存储容量减少，这在含有大量 P、V 恒定型 DGs 的情况下会提高算法的计算效率。尽管在有些情况下迭代次数有所增加，但前推回代法简单灵活的特点仍能保证本文方法在较短的计算时间内达到收敛精度要求。

6　结论

本文对三种类型的 DGs 在前推回代潮流计算中的计算模型、节点编号方法、无功调整方法进行了研究，设计了适合各种 DGs 的改进前推回代潮流算法。节点电抗矩阵、电阻矩阵的使用使所提出算法有效克服了前推回代法只适用于 P、Q 恒定型负荷节点的限制，扩展了前推回代法的适用范围，使其不仅能够求解含各种类型、不同容量、不同位置的DGs的辐射状配电网潮流问题，且对含 DGs 的环网也适用。仿真结果表明本文提出的改进前推回代算法具有较好的收敛性和适应性，计算速度满足要求。仿真分析和结论，可为各种类型 DGs 接入配网提供依据。

参考文献

[1] Agalgaonkar A P, Kulkarni S V, Khaparde S A. Evaluation of configuration plans for DGs in developing countries using advanced planning techniques[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2006，21(2)：973- 981.

[2] Katiraei F，Iravani M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006，21(4)：1821-1831.

[3] 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)：139-146.
Lin Xia，Lu Yuping，Wang Lianhe. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electro-technical Society，2008，23(11)：139-146.

[4] 王建，李兴源，邱晓燕．含有分布式发电装置的电力系统研究综述 [J]．电力系统自动化，2005，29(24)：90-97.
Wang Jian，Li Xingyuan，Qiu Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24)：90-97.

[5] 王守相，黄丽娟，王成山，等．分布式发电系统不平衡三相潮流计算 [J]．电力自动化设备，2007，27(8)：11-15.
Wang Shouxiang，Huang Lijuan，Wang Chengshan，et a1. Unbalanced three-phase power flow with distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment，2007，27(8)：11-15.

[6] 彭谦，姜彤，杨以涵，等．快速三相高斯潮流算法 [J]. 中国电机工程学报，2009，29(4)：48-52.
Peng Qian，Jiang Tong，Yang Yihan，et al. Fast three-phase gauss load flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(4)：48-52.

[7] Teng J H. A direct approach for distribution system load flow solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2003，18(3)：882-887.

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

[9] 张荣，王秀和，付大金，等 .改进的带二阶项配电网

快速潮流算法 [J]．电工技术学报， 2004，19(7)：59-64．
Zhang Rong，Wang Xiuhe，Fu Dajin，et al. Improved algorithm for fast distribution power flow calculation including second order term[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2004，19(7)：59-64．

[10] 欧阳武．含分布式发电的配电网规划研究 [D]． 上海：上海交通大学， 2009．

[11] 陈海焱，陈金富，段献忠．含分布式电源的配电网潮流计算 [J]．电力系统自动化， 2006，30(1)：35-40．
Chen Haiyan，Chen Jinfu，Duan Xianzhong．Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]．Automation of Electric Power Systems，2006，30(1)：35-40．

[12] Thomson M，Infield D G．Network power-flow analysis for a high penetration of distributed generation[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2007，22(3)：1157-1162．

[13] 陈珩．电力系统稳态分析 [M]. 3 版．北京：中国电力出版社，2007．

[14] Chen T H，Chen M S．Distribution system power flow analysis-a rigid approach[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1991，6(3)：1146-1152．

[15] Shirmohammadi D，Hong H W，Semlyen A，et al．A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems，1988，3(5)：753-762．

[16] 张学松，柳焯，于尔铿，等．配电网追赶法潮流 [J].中国电机工程学报， 1997，17(6)：382-385．
Zhang Xuesong，Liu Zhuo，Yu Erkeng，et al．A load flow technique for distribution system based on triangular step by step method[J]．Proceedings of the CSEE，1997，17(6)：382-385．

[17] 白宏坤, 李干生. 关于电磁环网弱开环方式的探讨 [J]. 电力系统保护与控制， 2010，38(2)：60-64．
Bai Hongkun，Li Gansheng. Discussion on weak open-loop mode of electromagnetic loop[J]．Power System Protection and Control，2010，38(2)：60-64．

[18] 王志群，朱守真，周双喜，等．分布式发电对配电网电压分布的影响 [J]．电力系统自动化， 2004，28(16)：56-60．
Wang Zhiqun，Zhu Shouzhen，Zhou Shuangxi，et al．Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems，2004，28(16)：56-60．

[19] Gosw A，Basu S K．Direct solution of distributed systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution，1999，38(1)：78-88．

作者简介:张立梅 女，1972 年生，博士研究生，讲师，研究方向为电力系统分析、分布式发电优化规划、新能源发电电网性能评估等。唐 巍 女，1971 年生，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力系统分析与控制、地方电力系统优化运行、配电网可靠性、电网性能评估、新能源发电技术等。