

DOI: 10.7667/PSPC180128

一种含 PV 节点的配电网线性潮流计算方法

刘宽, 王淳, 伍惠铖, 陈宇杰, 贺争亮

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 为了解决线性潮流计算方法无法处理 PV 节点的问题, 提出了一种含 PV 节点的配电网线性潮流计算方法。所提方法从极坐标的牛顿-拉夫逊法潮流计算的节点功率方程出发, 利用配电网的特征对节点功率方程中的非线性项进行线性近似处理, 得出一种线性潮流方程。所提方法不仅适用于弱环网络, 还克服了大多数线性潮流计算方法无法处理 PV 节点的缺陷。算例分析表明, 以牛顿-拉夫逊法潮流计算结果作为基准, 所提方法的最大误差的数量级保持在 10^{-4} , 计算精度与计算效率满足配电系统快速分析的要求。

关键词: 线性潮流; 配电网; 牛顿-拉夫逊; 线性近似

A linear power flow calculation method for distribution networks with PV nodes

LIU Kuan, WANG Chun, WU Huicheng, CHEN Yujie, HE Zhengliang

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to solve the problem that the most linear power flow calculation methods can not deal with PV nodes, a linear power flow calculation method for distribution networks is proposed. Focused on the nodal power equations of polar coordinates' Newton-Raphson power flow calculation, the proposed method uses linear approximation to handle the nonlinear terms in the nodal power equations according to the characteristics of distribution networks, and brings up a kind of linear power flow equation. The proposed method not only applies to weakly meshed networks, but also overcomes the defects that the most linear power flow calculation methods can not deal with PV nodes. The results of Newton-Raphson power flow calculation method is taken as a criterion, and the analysis of examples show that the magnitude of the maximum error of the proposed method is maintained at 10^{-4} . Computational accuracy and computational efficiency all meet the engineering demand of rapid analysis of distribution system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467012).

Key words: linear power flow; distribution networks; Newton-Raphson; linear approximation

0 引言

潮流计算是配电系统分析的基础, 是配电网规划、优化和网络重构等工作的必要环节^[1-3]。目前配电网常用的潮流计算方法主要包括前推回代法^[4]、改进牛顿法^[5]、回路阻抗法^[6]和隐式 Z_{bus} 高斯法^[7]等。许多学者在这些方法的基础上提出了一些改进算法^[8-11], 减少了潮流计算时间, 但这些方法均涉及迭代过程, 难以满足对配电网进行实时分析与控制的需求。

近年来, 已有相关文献对配电网的线性潮流计算方法展开了研究^[12-13], 文献[14]忽略了配电网的

线路损耗, 在前推回代法的基础上给出了一种配电网的线性潮流计算方法, 但无法处理环路和 PV 节点, 且计算结果精度不高; 文献[15]根据配电网的自身特性对回路电压方程进行线性近似处理, 将回路电压方程简化为一种线性形式的代数方程, 从而得出了一种含分布式电源的配电网线性潮流计算方法, 但计算误差较大。文献[16]基于负荷的“ZIP”模型, 把节点注入电流项在实数域内进行泰勒级数展开, 保留泰勒展开式中的常数项和一次项, 忽略高阶项, 得到了一种复平面下的线性潮流方程, 但该方程在近似过程中未考虑 PV 节点, 适用范围受限。文献[17]在文献[16]的基础上, 定量分析了配电网潮流方程的简化条件, 根据节点电压相角差较小的特点, 给出了两种配电网的简化方法, 建立了两

种线性潮流计算模型,但均不适用于含 PV 节点的配电网。随着越来越多的分布式电源(Distribution Generation, DG)接入配电网,有些 DG 所呈现的特性在潮流计算中需要作为 PV 节点处理。而上述线性潮流计算方法均未考虑 PV 节点,因此有必要对含 PV 节点的配电网线性潮流计算方法展开研究。

本文首先根据配电网节点电压相角差较小与电压幅值接近于 1.0 p.u.的特点,给出了 3 种非线性项的线性近似形式。然后把极坐标形式的节点功率方程中所含有的非线性项进行线性近似处理,得出了一种含 PV 节点的配电网线性潮流计算方法,该方法不仅适用于弱环网络,而且克服了大多数配电网线性潮流算法无法处理 PV 节点的缺陷。最后以牛顿-拉夫逊法的计算结果作为基准,采用测试系统对所提方法的计算精度与计算效率进行测试。

1 线性近似

1.1 基本潮流方程

假设配电网共有 n 个节点,其中第 1 号节点为平衡节点,2~ m 号节点为 PQ 节点, $m+1$ ~ n 号节点为 PV 节点。对于配电网的每一个节点,其节点功率方程的极坐标形式可表示为

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: i, j 表示配电网中的节点编号($i, j=1, 2, 3, \dots, n$); P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的电源发出的有功功率和无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 负荷的有功功率和无功功率; P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的总注入的有功功率和无功功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电压相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为导纳矩阵的实部和虚部。

将方程组(1)两边同时除以 V_i , 得出式(2), 式(2)中的非线性项为 $\frac{1}{V_i}$ 、 $\sum_{j=1}^n V_j \cos \delta_{ij}$ 和 $\sum_{j=1}^n V_j \sin \delta_{ij}$, 需要将以上 3 种非线性项线性化方可得到线性潮流方程。

$$\begin{cases} \frac{P_i}{V_i} = \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ \frac{Q_i}{V_i} = \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 线性近似

潮流计算时,通常定义平衡节点的电压幅值为 1 p.u., 电压相角为零。

典型的配电网一般具备以下特点: 1) R/X 的比值较大,一般接近于 1 或大于 1; 2) 各节点电压的幅值接近于 1.0 p.u.; 3) 各节点电压相角接近于平衡节点的相角; 4) 任意两点之间的电压相角差较小,接近于零。

根据上述配电网的特点可知,任意两节点之间的电压相角差 $\delta_{ij} \approx 0$, 则有 $\cos \delta_{ij} \approx 1$, $\sin \delta_{ij} \approx \delta_{ij}$; 节点 i 的电压幅值 $V_i \approx 1.0$ p.u., 节点 i 的电压相角 $\delta_i \approx 0$, 则有

$$V_j \delta_{ij} = V_j (\delta_i - \delta_j) \approx -\delta_j \quad (3)$$

为了得出 $1/V_i$ 的线性近似形式,定义节点 i 的电压幅值为 $V_i = 1 - \Delta V_i$, 其倒数可表示为

$$\frac{1}{V_i} = \frac{1}{1 - \Delta V_i} \quad (4)$$

式(4)在 $\Delta V_i = 0$ 处的泰勒级数展开式为

$$\frac{1}{V_i} = \frac{1}{1 - \Delta V_i} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \Delta V_i^k, \quad |\Delta V_i| < 1 \quad (5)$$

由于 ΔV_i 通常取值为 0~0.1 p.u., 二次项及更高次项的值相对较小,式(5)只保留常数项和一次项,可得

$$\frac{1}{V_i} \approx 1 + \Delta V_i \quad (6)$$

再把 $V_i = 1 - \Delta V_i$ 代入式(6)中,可得出 $1/V_i$ 的线性近似形式为

$$\frac{1}{V_i} \approx 2 - V_i \quad (7)$$

为了说明式(7)的近似值与精确值之间的差别,定义误差表达式为

$$\Delta_i = \left| 2 - V_i - \frac{1}{V_i} \right| = \left| \sum_{k=2}^{\infty} \Delta V_i^k \right| \quad (8)$$

由式(8)可知,节点的电压幅值 V_i 越接近于 1.0 p.u., 误差值 Δ_i 越小。通常情况下, V_i 的取值为 0.9~1.0 p.u., 在该区间的最大误差值为 0.011 p.u.

根据上述理论分析,线性近似处理可总结为以下 3 点。

近似 1: 任意节点 i 电压幅值的倒数可线性近似为

$$\frac{1}{V_i} \approx 2 - V_i \quad (9)$$

近似 2: 潮流方程中的三角函数可线性近似为

$$\begin{cases} \cos \delta_{ij} \approx 1 \\ \sin \delta_{ij} \approx \delta_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

近似 3: 非线性形式 $V_j \delta_{ij}$ 可线性近似为

$$V_j \delta_{ij} \approx -\delta_j \quad (11)$$

2 线性潮流计算模型

根据第 1 节所述的 3 点线性近似处理, 对方程组(2)中的非线性项进行线性近似, 以下为线性近似处理过程。

根据前述近似 1, 消除方程组(2)中非线性项 $1/V_i$, 方程(2)可改写为

$$\begin{cases} 2P_i - P_i V_i = \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ 2Q_i - Q_i V_i = \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中仍存在非线性项($V_j \cos \delta_{ij}$ 与 $V_j \sin \delta_{ij}$), 应用近似 2 消除非线性项中的三角函数, 方程(12)可整理成式(13)。

$$\begin{cases} 2P_i - P_i V_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} V_j + \sum_{j=1}^n B_{ij} V_j \delta_{ij} \\ 2Q_i - Q_i V_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} V_j \delta_{ij} - \sum_{j=1}^n B_{ij} V_j \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中存在非线性项 $V_j \delta_{ij}$, 继续应用近似 3, 方程(13)可简化为

$$\begin{cases} 2P_i - P_i V_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} V_j - \sum_{j=1}^n B_{ij} \delta_j \\ 2Q_i - Q_i V_i = -\sum_{j=1}^n G_{ij} \delta_j - \sum_{j=1}^n B_{ij} V_j \end{cases} \quad (14)$$

式(14)不再包含任何非线性项, 为线性方程组。写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_P \\ \mathbf{D}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{B} & \mathbf{G} \\ -\mathbf{G} & -\mathbf{B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(15)中各矩阵的具体表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{D}_P = \begin{bmatrix} 2\mathbf{P}_S - \text{diag}(\mathbf{P}_S) \cdot \mathbf{V}_S \\ 2\mathbf{P}_N - \text{diag}(\mathbf{P}_N) \cdot \mathbf{V}_N \\ 2\mathbf{P}_M - \text{diag}(\mathbf{P}_M) \cdot \mathbf{V}_M \end{bmatrix} \\ \mathbf{D}_Q = \begin{bmatrix} 2\mathbf{Q}_S - \text{diag}(\mathbf{Q}_S) \cdot \mathbf{V}_S \\ 2\mathbf{Q}_N - \text{diag}(\mathbf{Q}_N) \cdot \mathbf{V}_N \\ 2\mathbf{Q}_M - \text{diag}(\mathbf{Q}_M) \cdot \mathbf{V}_M \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{SS} & \mathbf{B}_{SN} & \mathbf{B}_{SM} \\ \mathbf{B}_{NS} & \mathbf{B}_{NN} & \mathbf{B}_{NM} \\ \mathbf{B}_{MS} & \mathbf{B}_{MN} & \mathbf{B}_{MM} \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{SS} & \mathbf{G}_{SN} & \mathbf{G}_{SM} \\ \mathbf{G}_{NS} & \mathbf{G}_{NN} & \mathbf{G}_{NM} \\ \mathbf{G}_{MS} & \mathbf{G}_{MN} & \mathbf{G}_{MM} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta}_S \\ \boldsymbol{\delta}_N \\ \boldsymbol{\delta}_M \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_S \\ \mathbf{V}_N \\ \mathbf{V}_M \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: 下标 S、N 和 M 分别表示配电网中的平衡节点、PQ 节点的集合和 PV 节点的集合; $\text{diag}(\mathbf{P})$ 和 $\text{diag}(\mathbf{Q})$ 分别表示以列向量 \mathbf{P} 与列向量 \mathbf{Q} 为对角元素的方阵; \mathbf{V}_S 、 $\boldsymbol{\delta}_S$ 、 \mathbf{P}_S 和 \mathbf{Q}_S 为平衡节点的电压幅值、电压相角、注入的有功功率和注入的无功功率; \mathbf{V}_N 、 $\boldsymbol{\delta}_N$ 、 \mathbf{P}_N 和 \mathbf{Q}_N 为 PQ 节点的电压幅值列向量、电压相角列向量、注入的有功功率列向量和注入的无功功率列向量; \mathbf{V}_M 、 $\boldsymbol{\delta}_M$ 、 \mathbf{P}_M 和 \mathbf{Q}_M 分别为 PV 节点的电压幅值列向量、电压相角列向量、注入的有功功率列向量和注入的无功功率列向量; \mathbf{G} 和 \mathbf{B} 为导纳矩阵的实部矩阵和虚部矩阵。

对于平衡节点, \mathbf{V}_S 和 $\boldsymbol{\delta}_S$ 是已知量, \mathbf{P}_S 和 \mathbf{Q}_S 为待求量; 对于 PQ 节点集合, \mathbf{P}_N 和 \mathbf{Q}_N 是已知量, \mathbf{V}_N 和 $\boldsymbol{\delta}_N$ 为待求量; 而对于 PV 节点集合, \mathbf{V}_M 和 \mathbf{P}_M 是已知量, $\boldsymbol{\delta}_M$ 和 \mathbf{Q}_M 为待求量。对式(15)进行矩阵展开, 整理可得已知节点注入功率(\mathbf{P}_N 、 \mathbf{Q}_N 、 \mathbf{P}_M)的线性表达式为

$$2\mathbf{P}_N = \mathbf{G}_{NS} \cdot \mathbf{V}_S + \mathbf{G}_{NM} \cdot \mathbf{V}_M - \mathbf{B}_{NS} \cdot \boldsymbol{\delta}_S + (\mathbf{G}_{NN} + \text{diag}(\mathbf{P}_N)) \cdot \mathbf{V}_N - \mathbf{B}_{NN} \cdot \boldsymbol{\delta}_N - \mathbf{B}_{NM} \cdot \boldsymbol{\delta}_M \quad (19)$$

$$2\mathbf{P}_M = \mathbf{G}_{MS} \cdot \mathbf{V}_S + (\mathbf{G}_{MM} + \text{diag}(\mathbf{P}_M)) \cdot \mathbf{V}_M - \mathbf{B}_{MS} \cdot \boldsymbol{\delta}_S + \mathbf{G}_{MN} \cdot \mathbf{V}_N - \mathbf{B}_{MN} \cdot \boldsymbol{\delta}_N - \mathbf{B}_{MM} \cdot \boldsymbol{\delta}_M \quad (20)$$

$$2\mathbf{Q}_N = -\mathbf{B}_{NS} \cdot \mathbf{V}_S - \mathbf{B}_{NM} \cdot \mathbf{V}_M - \mathbf{G}_{NS} \cdot \boldsymbol{\delta}_S - (\mathbf{B}_{NN} - \text{diag}(\mathbf{Q}_N)) \cdot \mathbf{V}_N - \mathbf{G}_{NN} \cdot \boldsymbol{\delta}_N - \mathbf{G}_{NM} \cdot \boldsymbol{\delta}_M \quad (21)$$

式(19)一式(21)为 3 个线性方程组, 方程的个数分别为 $m-1$ 、 $n-m$ 和 $m-1$, 三者总个数等于未知量的个数, 因此由以上 3 式即可求出网络中各节点的电压。

为了方便求解, 合并式(19)一式(21), 整理成矩阵形式, 并把 $\boldsymbol{\delta}_S = [0]$ (平衡节点的电压相角为 0)代入, 可得

$$\mathbf{W} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{X} \quad (22)$$

式中, 矩阵 \mathbf{X} 是待求量, 表达式为

$$\mathbf{X} = [\boldsymbol{\delta}_N \quad \boldsymbol{\delta}_M \quad \mathbf{V}_N]^T \quad (23)$$

式中, 上标 T 表示矩阵的转置。系数矩阵 \mathbf{W} 和系数矩阵 \mathbf{J} 的表达式分别为

$$W = \begin{bmatrix} 2P_N - G_{NS} \cdot V_S - G_{NM} \cdot V_M \\ 2P_M - G_{MS} \cdot V_S - (G_{MM} + \text{diag}(P_M)) \cdot V_M \\ 2Q_N + B_{NS} \cdot V_S + B_{NM} \cdot V_M \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$J = \begin{bmatrix} -B_{NN} & -B_{NM} & G_{NN} + \text{diag}(P_N) \\ -B_{MN} & -B_{MM} & G_{MN} \\ -G_{NN} & -G_{NM} & -B_{NN} + \text{diag}(Q_N) \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中： W 为 $(n+m-2) \times 1$ 阶矩阵，其元素可由节点注入功率、导纳矩阵、平衡节点的电压幅值和 PV 节点的电压幅值求出； J 为 $(n+m-2) \times (n+m-2)$ 阶方阵，其元素可由节点注入功率和导纳矩阵求出。

根据式(22)可计算出配电网各节点电压幅值和电压相角。与文献[16]的线性潮流计算方法相比，所提方法考虑了 PV 节点，更具有通用性。

3 算例分析

本文算例均是使用 Matlab 2016Ra 软件，在 Windows 10 操作系统、Inter(R) Core(TM) i7 CPU 3.60 GHz 和 16 GB RAM 环境下进行测试。

3.1 计算精度比较

以 IEEE33 配电系统作为算例，对所提方法的计算精度进行测试。IEEE33 配电系统如图 1 所示，具体数据见文献[18]，系统的基准功率为 10 MVA，基准电压为 12.66 kV；节点 1 为平衡节点，其电压幅值为 1.0 p.u.，电压相角为 0；同时假设联络线 8-21 与联络线 9-15 的开关处于闭合状态，其余联络线开关均断开。

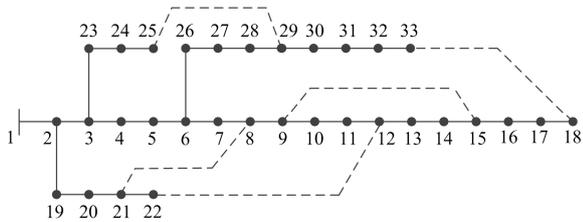


图 1 IEEE33 配电系统

Fig. 1 IEEE33 distribution system

图 2 给出了采用所提方法计算出的节点电压幅值分布折线图，为了比较方便，图 2 中一并给出了基于文献[16]的线性潮流算法和牛顿-拉夫逊法的计算结果(收敛精度取 10^{-5})。可以看出，3 种方法的计算结果高度一致。为了进一步比较，表 1 给出了 2 种线性潮流计算方法的电压幅值误差值，误差计算方法如式(26)所示，二者的最大误差分别为 3.1×10^{-4} p.u. 与 2.6×10^{-4} p.u.，平均误差分别为 $1.4 \times$

10^{-4} p.u. 与 1.2×10^{-4} p.u.，两种方法计算的误差值基本相同，最大误差和平均误差的数量级均为 10^{-4} ，具有较高的精度。

$$\varepsilon_i = |V_{LPFi} - V_{NPFi}| \quad (26)$$

式中： V_{LPFi} 为线性潮流计算方法得到的电压幅值； V_{NPFi} 为牛顿-拉夫逊法计算得到的电压幅值。

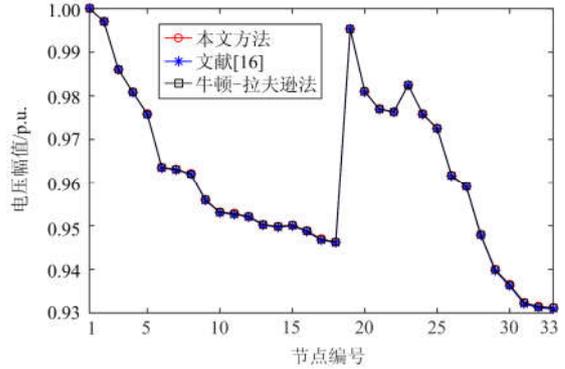


图 2 3 种潮流算法的电压幅值分布折线图

Fig. 2 Voltage amplitude distribution line chart of three kinds of power flow methods

表 1 两种线性潮流计算方法的误差比较

Table 1 Error comparison of two kinds of linear power flow calculation methods

| 误差 | 线性潮流计算方法 | |
|------|--------------------|------------------------|
| | 本文/ 10^{-4} p.u. | 文献[16]/ 10^{-4} p.u. |
| 最大误差 | 3.1 | 2.6 |
| 平均误差 | 1.4 | 1.2 |

在 IEEE33 配电系统的节点 20、节点 32 分别接入输出有功功率为 100 kW、120 kW 的 PV 型分布式电源，从而构成 1 个含 PV 节点的配电系统。图 3 给出了采用所提方法及牛顿-拉夫逊法计算得到的节点电压幅值分布折线图。由图 3 可以看出，当配电系统含有 PV 节点时，所提方法的计算结果与牛

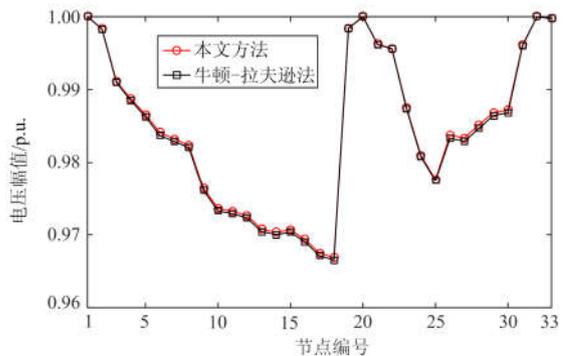


图 3 含 PV 节点系统的电压幅值分布折线图

Fig. 3 Voltage amplitude distribution line chart of system with PV nodes

顿-拉夫逊法的计算结果基本一致, 电压幅值的最大误差为 4.9×10^{-4} p.u., 平均误差为 2.5×10^{-4} p.u., 最大误差和平均误差的数量级均保持在 10^{-4} , 仍具有较高的准确性。

为了说明负载对所提线性潮流计算方法精度的影响, 表 2 给出了所提方法在不同负载下的电压幅值误差, 当系统负荷为原负荷水平的 130%、140%、150% 时, 电压幅值的最大误差值分别为 7.0×10^{-4} p.u.、 8.9×10^{-4} p.u.、 1.11×10^{-3} p.u., 平均误差分别为 3.2×10^{-4} p.u.、 4.1×10^{-4} p.u.、 5.0×10^{-4} p.u.。随着系统负荷的增加, 电压幅值的误差值也随之增加。当系统负荷为原负荷水平的 150% 时, 电压幅值的最大误差和平均误差的数量级分别为 10^{-3} 和 10^{-4} 。可见, 在系统负载较重的情况下, 所提方法的计算精度仍在可接受范围之内。

表 2 不同负载下的误差值
Table 2 Error value under different loads

| 负荷比重/% | 最大误差/ 10^{-4} p.u. | 平均误差/ 10^{-4} p.u. |
|--------|----------------------|----------------------|
| 110 | 4.2 | 1.9 |
| 120 | 5.5 | 2.5 |
| 130 | 7.0 | 3.2 |
| 140 | 8.9 | 4.1 |
| 150 | 11.1 | 5.0 |

3.2 计算效率分析

以 IEEE16^[19]、IEEE33 和 PG&E69^[20] 3 个配电系统作为算例, 对所提方法进行计算效率测试。由表 3 可知, 两种线性潮流算法无需迭代, 计算时间明显小于牛顿-拉夫逊法的计算时间。所提方法与文献[16]的方法在 3 个测试系统的计算时间分别为 3.79 ms、5.35 ms、9.36 ms 与 3.74 ms、5.28 ms、9.27 ms, 计算时间相差 0.05 ms、0.07 ms、0.09 ms, 均小于 0.10 ms。可见, 两种方法的计算时间基本一致。这是因为两种线性潮流方程的个数均为 $2n-2$ 个(假设配电网中不含 PV 节点), 其运算矩阵的阶数均为 $2n-2$, 在使用 Matlab 软件进行矩阵运算时, 计算量几乎相等, 使潮流计算时间基本一致。

表 3 3 种线性潮流算法的计算时间比较

Table 3 Computing time comparison of two kinds of power flow methods

| 测试系统 | 线性潮流计算方法 | | 牛顿-拉夫逊法/ms |
|--------|----------|-----------|------------|
| | 本文/ms | 文献[16]/ms | |
| IEEE16 | 3.79 | 3.74 | 8.71 |
| IEEE33 | 5.35 | 5.28 | 11.42 |
| PG&E69 | 9.36 | 9.27 | 18.01 |

4 结论

本文对配电网潮流方程进行近似简化, 建立了

一种线性潮流计算模型, 通过理论分析和算例验证可得出以下结论。

1) 利用配电网节点电压相角差较小与节点电压幅值接近于 1.0 p.u. 的特性, 对极坐标形式的节点功率方程进行线性近似, 最终得出一种含 PV 节点的配电网线性潮流方程。

2) 与牛顿-拉夫逊法相比, 所提方法的最大误差与平均误差的数量级均保持在 10^{-4} , 具有较高精度。所提方法的计算误差和计算时间与现有的线性潮流计算方法保持一致, 计算精度和计算效率符合配电网快速潮流分析的要求。

3) 所提线性潮流计算方法不仅适用于弱环网络, 还克服了大多数配电网线性潮流计算方法无法处理 PV 节点的缺陷, 通用性较高。

参考文献

- [1] 毛文晋, 李红伟, 李超. 一种考虑 DG 出力优化分配的配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 57-63.
MAO Wenjin, LI Hongwei, LI Chao. A distribution system reconfiguration method considering the optimal active power dispatching of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 57-63.
- [2] 徐玉琴, 李雪冬. 基于改进免疫克隆选择算法的含分布式电源配电网规划方法[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 97-101.
XU Yuqin, LI Xuedong. An improved immune clonal selection algorithm based planning method for distribution network with distributed generators[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 97-101.
- [3] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [4] SHIRMONHAMMADI D, HONG H W, SEMLYEN A, et al. A compensation-based power flow method for weekly meshed distribution and transmission networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 753-762.
- [5] ZHANG F, CHENG C S. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [6] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(1): 78-88.
- [7] CHEN T H, CHEN M S, HWANG K J, et al. Distribution

- system power flow analysis—a rigid approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [8] 陈树恒, 党晓强, 李兴源. 基于广义注入电流节点模型的配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 19-24.
CHEN Shuheng, DANG Xiaoqiang, LI Xingyuan. Power flow method for distribution network based on generalized injecting current node model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 19-24.
- [9] 杨雄, 陈兵, 李强, 等. 基于变量代换的辐射型配电网潮流算法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 189-194.
YANG Xiong, CHEN Bing, LI Qiang, et al. Power flow algorithm of radial distribution networks based on variable substitution[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 189-194.
- [10] 金勇, 刘俊勇, 李红伟, 等. 基于功率流的混合配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 15-21, 27.
JIN Yong, LIU Junyong, LI Hongwei, et al. Power flow based hybrid power flow calculation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 15-21, 27.
- [11] 扈诗扬, 杨萌, 汪芳宗. 基于坐标旋转变换的配电系统快速解耦潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 40-44.
HU Shiyang, YANG Meng, WANG Fangzong. A fast decoupled load flow method for distribution system via coordinate rotation transformation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 40-44.
- [12] AHMADI H, MARTI J R, MEIER A V. A linear power flow formulation for three-phase distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5012-5021.
- [13] MARTI J R, AHMADI H, BASHUALDO L. Linear power-flow formulation based on a voltage-dependent load model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1682-1690.
- [14] 翟鹤峰, 汪洋, 杨明, 等. 多相辐射状配电网的一种线性近似潮流方程[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(7): 78-83.
ZHAI Hefeng, WANG Yang, YANG Ming, et al. Linear approximation for power flow equation in multiphase radial distribution network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(7): 78-83.
- [15] 牛焕娜, 井天军, 李汉成, 等. 基于回路分析的含分布式电源配电网简化潮流计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1033-1038.
NIU Huanna, JING Tianjun, LI Hancheng, et al. Simplified power flow calculation for distribution network with distributed generation based on loop analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1033-1038.
- [16] GARCES A. A linear three-phase load flow for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 827-828.
- [17] 敖鑫, 王淳, 朱文广, 等. 两种配电网线性潮流计算方法及其比较[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4004-4013.
AO Xin, WANG Chun, ZHU Wenguang, et al. Derivation and comparison of two versions of linear power flow method for distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4004-4013.
- [18] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [19] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [20] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.

收稿日期: 2018-01-28; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

刘 宽(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及经济运行; E-mail: 825105734@qq.com

王 淳(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。E-mail: cu_wang@126.com

(编辑 许 威)