

DOI: 10.7667/PSPC180270

极坐标系下主动配电网三相线性潮流计算方法

孙大雁¹, 韦永忠¹, 巨云涛², 杜松怀²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 线性潮流计算方法可以提高主动配电网集中优化控制的鲁棒性和快速性。随着分布式电源在主动配电网中的广泛接入, 配电网中的电压控制节点逐步增多, 以保持正常的电压水平。现有直角坐标系下三相线性潮流无法处理本地压控节点, 现有极坐标下的线性潮流模型未能详尽考虑分布式电源控制特性、网损分摊特性与配电网三相特点。因此提出三相极坐标系下的线性潮流计算方法来解决这个问题。所提方法考虑了 Y 或 Delta 型连接 ZIP 负荷、单相或三相分布式电源(Distributed Generators, DGs)等类型。同时考虑了 DGs 的详细控制模型和分布式松弛母线模型。最后通过三相不平衡的 IEEE 13,34,37 和 123 节点系统验证所提方法的精度和对各种节点类型的适应性。
关键词: 主动配电网; 分布式电源; 本地电压控制; 极坐标; 三相潮流

Three-phase linear flow calculation method for active distribution network in polar coordinate system

SUN Dayan¹, WEI Yongzhong¹, JU Yuntao², DU Songhuai²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power CO., LTD, Nanjing 210024, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The linear power flow calculation method can improve the robustness and rapidity of the centralized optimization control of active distribution network. With the wide access of distributed generation in active distribution network, voltage control nodes in distribution network gradually increase to maintain normal voltage level. Existing three-phase linear power flow under a rectangular coordinate system cannot cope with local voltage control nodes, the existing linear power flow model under the polar coordinate system failed to consider detailed control characteristics of DGs, network loss allocation and three-phase characteristics of distribution network. Therefore, this paper proposes a linear power flow calculation method in the three-phase polar coordinate system to solve the problem. The proposed method considers the types of Y-connection ZIP load, Delta-connection ZIP load and single-phase or three-phase Distributed Generators (DGs), etc. DGs detailed control model and distributed slack bus model are also considered. Finally, the proposed method's accuracy and adaptability of various node types are verified by the three-phase unbalanced IEEE 13, 34, 37 and 123 nodes system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No. J2017013) and National Natural Science Foundation of China (No. 51707196).

Key words: active distribution network; distributed generators; local voltage control; polar coordinates; three-phase power flow

0 引言

随着经济的发展和人们对生态环境的重视, 不可再生能源的发展遇到了瓶颈。如光伏发电等分布式可再生能源发电越来越多地接入配电网。鲁棒的

潮流计算方法是现代配电网管理的基石, 以便适应大规模的分布式电源接入。基于迭代潮流的集中优化控制, 无法保证得到可靠收敛和全局最优解, 不适合实时运行优化与控制。可鲁棒求解的线性潮流计算方法在实时运行中引起广泛关注^[1]。此外, 不确定性潮流^[2-3]、可靠性分析^[4]、网络重构^[5]等也依赖于准确性和适应性良好的线性潮流算法。

传统配电网潮流算法分为两类, 分别为不动点

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(项目任务书号: J2017013); 国家自然科学基金项目资助(51707196)

迭代法和牛顿拉夫逊法。前推回代方法^[6-7]、隐式 Zbus 方法^[8-9]、显式 Zbus 方法、回路分析方法^[10-11]等被归类为不动点迭代法。牛顿拉夫逊法可分为基于电流失配^[12]和功率失配两种方法。牛顿拉夫逊法在大规模 DGs 渗透的主动配电网上有更好的应用前景。

为了在直角坐标系线性化潮流(Linear Power Flow, LPF)中处理 ZIP 负荷,文献[13]使用了一种简单的曲线拟合技术获得直角坐标系下的 ZIP 负荷模型。为了保证全局最优,文献[14]给出了不含 DGs 的配电网半定量松弛公式的线性逼近。假设在标称电压附近存在复数扰动,文献[15]能够通过忽略二次项来获取 LPF。文献[16]通过潮流流形隐式线性化得到一个优化的线性模型。与实数域线性化潮流方程不同,文献[17]给出 ZIP 负荷在复数域的线性化模型。文献[18]给出母线类型为 PQ 和 PV 的单相线性化潮流模型,然而,文章中并未考虑 ZIP 负荷和三相线性化模型。文献[19]提出基于在两种负荷潮流间插值的不动点迭代线性化方法,该方法能够降低计算复杂度。文献[20]扩展了上述方法以适应星形和未接地三角形连接设备。为了提高 LPF 的精确度,文献[21]在 LPF 公式中采用对数电压幅值。文献[22]指出直角坐标系下压控节点很难处理。因此,文献[23]提出在极坐标系下处理 LPF。

线性化潮流可以提高主动配电网的鲁棒性和快速性,本文所提极坐标系下的线性化潮流算法可以解决现有直角坐标系下线性化潮流算法无法解决本地压控节点以及现有极坐标下线性化潮流算法未考虑主动配电网特性及电网结构等缺点和不足。该算法大大节省了潮流计算时间和计算量,提高了计算速度。

一般来说,线性潮流算法具有如下三个重要特点:

- (1) 采用三相模型,因此能够处理 ZIP 负荷模型;
- (2) 具有处理各种星形或三角形连接设备的能力;
- (3) 具备应对压控母线的的能力,并且考虑了 DGs 的网损分摊特性^[24]。

本文主要工作如下:

(1) 本文考虑了 ZIP 负荷和一系列三相设备的连接模型;

(2) 与文献[17-22]相比较,随着 DGs 的不断渗透,压控节点这一不可忽视的因素在本文中得到了充分的考虑;

(3) 为了确保与实际潮流结果更接近,本文应用了分布式松弛母线模型,并且考虑了 DGs 的网损分摊特性。

1 极坐标系下的线性潮流模型

1.1 网络模型

$$\begin{aligned} \sin \theta_{ij} &= \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0} + \theta_{ij,0}) = \\ &= \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0}) \cos \theta_{ij,0} + \\ &= \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0}) \sin \theta_{ij,0} \approx \\ &= (\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0}) \cos \theta_{ij,0} + \sin \theta_{ij,0} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_{ij} &= \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0} + \theta_{ij,0}) = \\ &= \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0}) \cos \theta_{ij,0} - \\ &= \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0}) \sin \theta_{ij,0} \approx \\ &= \cos \theta_{ij,0} - (\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0}) \sin \theta_{ij,0} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\theta_i - \theta_j - \theta_{ij,0} \approx 0$, 下标 0 表示初值量。

配电网中一条母线有三相,表示三个节点。假设电网中有 n 个节点,节点注入有功功率为

$$\begin{aligned} \frac{P_i}{U_i} &= \sum_{j=1}^n G_{ij} U_j \cos \theta_{ij} + \sum_{j=1}^n B_{ij} U_j \sin \theta_{ij} \approx \\ &= \sum_{j=1}^n G_{ij} (U_j \cos \theta_{ij,0} - (\theta_j - \theta_{ij,0}) \sin \theta_{ij,0}) + \\ &= \sum_{j=1}^n B_{ij} ((\theta_j - \theta_{ij,0}) \cos \theta_{ij,0} + U_j \sin \theta_{ij,0}) \end{aligned} \quad (3)$$

相似地,节点注入无功功率为

$$\begin{aligned} \frac{Q_i}{U_i} &= -\sum_{j=1}^n B_{ij} U_j \cos \theta_{ij} + \sum_{j=1}^n G_{ij} U_j \sin \theta_{ij} \approx \\ &= -\sum_{j=1}^n B_{ij} (U_j \cos \theta_{ij,0} - (\theta_j - \theta_{ij,0}) \sin \theta_{ij,0}) + \\ &= \sum_{j=1}^n G_{ij} ((\theta_j - \theta_{ij,0}) \cos \theta_{ij,0} + U_j \sin \theta_{ij,0}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: i, j 为节点编号; U 和 θ 分别为电压幅值和相角; B 和 G 分别为导纳矩阵的实部和虚部。

讨论:

(1) 保留非线性。与文献[22]对比,假设节点 i 是 PQ 节点。式(3)左侧用 $1/U \approx 2 - U$ 进行线性化,同时考虑单相网络,有

$$P_i \approx \frac{\sum_{j=1}^n G_{ij} U_j + \sum_{j=1}^n B_{ij} (\theta_i - \theta_j)}{2 - U_i}$$

有功功率为非线性,这会对非线性 PQ 负荷的逼近更好。用一个简单的例子来说明,假设一个两节点的系统:节点 1 是松弛母线,标幺值为

$\dot{U}_1 = 1.2 + 0j$, 节点 2 是 PQ 节点, 标么值为 $P_2 = 0.3$, $Q_2 = 0.3$ 。根均方误差为

$$e = \sqrt{\left[(U_2 - U_{2,\text{true}})^2 + (\theta_2 - \theta_{2,\text{true}})^2 \right] / 2}$$

所提方法和文献[25]中现有方法的误差有不同的值, 其值如图 1 所示。由图 1 可知所提方法更准确。尽管所提方法主要是为三相配电网设计的, 该方法同样可扩展到平衡或者正序网络。

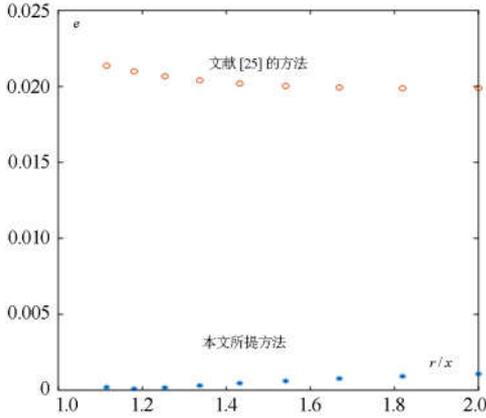


图 1 不同方法的根均方误差

Fig. 1 Root mean square error of different methods

(2) 文献 [21] 采用 $Q_i/U_i^2 = Q_i e^{-2\ln U_i} \approx Q_i(1 - 2\ln U_i)$ 和 $Q_i/U_i = Q_i e^{-\ln U_i} \approx Q_i(1 - \ln U_i)$ 的对数电压。然而, 本文直接采用电压幅值, 该方法可以简化三相最优潮流分析。在第 3 部分中提供了详细的对比。

1.2 ZIP 负荷 Y 形连接

与文献[17]在复数域推导的泰勒级数不同。在 $U = 1.0$ 邻域, 电压幅值的倒数经泰勒展开后, 近似为 $1/U \approx 2 - U$ 。根据这个推导, 注入的有功功率为

$$\frac{P_k}{U_k} = \frac{a_p^Y U_k^2 + b_p^Y U_k + c_p^Y}{U_k} \cdot P_0 \approx (a_p^Y U_k + b_p^Y + c_p^Y (2 - U_k)) \cdot P_0 \quad (5)$$

式中: a_p^Y 、 b_p^Y 和 c_p^Y 表示满足求和约束 $a_p^Y + b_p^Y + c_p^Y = 1$ 的 ZIP 系数; k 为节点编号; P_0 表示基础有功功率, 为常数。

对于无功功率可以得到类似的推导:

$$\frac{Q_k}{U_k} = \frac{a_q^Y U_k^2 + b_q^Y U_k + c_q^Y}{U_k} \cdot Q_0 \approx (a_q^Y U_k + b_q^Y + c_q^Y (2 - U_k)) \cdot Q_0 \quad (6)$$

式中, Q_0 表示基础无功功率, 为常数。

1.3 ZIP 负荷 Delta 形连接

由于沿配电网线路角度差非常小, 线电压和相电压有如下的数学关系。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\phi_1 \phi_2} &= U_{\phi_1} e^{j\theta_{\phi_1}} - U_{\phi_2} e^{j\theta_{\phi_2}} = \\ &U_{\phi_1} e^{j\theta_{\phi_1}} \left(1 - \frac{U_{\phi_2}}{U_{\phi_1}} e^{j(\theta_{\phi_2} - \theta_{\phi_1})} \right) \approx \dot{U}_{\phi_1} (1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: 加点的变量为复数值; $\phi_1, \phi_2 \in \{ab, bc, ca\}$ 表示相角; ϕ_{10} 和 ϕ_{20} 为初始相角。

$\dot{U}_{\phi_1 \phi_2}$ 也可以由相变量 ϕ_2 近似得到:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\phi_1 \phi_2} &= U_{\phi_1} e^{j\theta_{\phi_1}} - U_{\phi_2} e^{j\theta_{\phi_2}} = U_{\phi_2} e^{j\theta_{\phi_2}} \left(\frac{U_{\phi_1}}{U_{\phi_2}} e^{j(\theta_{\phi_1} - \theta_{\phi_2})} - 1 \right) \approx \\ &\dot{U}_{\phi_2} (e^{j(\phi_{10} - \phi_{20})} - 1) \end{aligned} \quad (8)$$

ZIP 负荷的 Delta 形连接近似为

$$\begin{aligned} \frac{P_{\phi_1 \phi_2}}{U_{\phi_1 \phi_2}} \frac{\dot{U}_{\phi_1}}{U_{\phi_1}} &= \left(a_p^D \frac{U_{\phi_1 \phi_2}^2}{U_{\phi_1 \phi_2}} e^{j\theta_{\phi_1}} + b_p^D \frac{U_{\phi_1 \phi_2}}{U_{\phi_1 \phi_2}} e^{j\theta_{\phi_1}} + \frac{c_p^D}{U_{\phi_1 \phi_2}} e^{j\theta_{\phi_1}} \right) \cdot P_0 = \\ &\left(a_p^D \dot{U}_{\phi_1 \phi_2}^* \dot{U}_{\phi_1} + b_p^D \frac{\sqrt{3} U_{\phi_1}}{(1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} + \frac{c_p^D}{U_{\phi_1} (1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} \right) \cdot P_0 \approx \\ &\left(a_p^D U_{\phi_1} (1 - e^{j(\phi_{10} - \phi_{20})}) + \frac{\sqrt{3} b_p^D}{(1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} + \frac{c_p^D}{(1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} (2 - U_{\phi_1}) \right) \cdot P_0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: a_p^D 、 b_p^D 、 c_p^D 表示满足条件 $a_p^D + b_p^D + c_p^D = 1$ 的 ZIP 系数; P_0 表示基础有功功率, 为常数。

对于注入的无功功率可得到相似的推导:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\phi_1 \phi_2}}{U_{\phi_1 \phi_2}} \frac{\dot{U}_{\phi_1}}{U_{\phi_1}} &= \left(a_q^D \frac{U_{\phi_1 \phi_2}^2}{U_{\phi_1 \phi_2}} e^{j\theta_{\phi_1}} + b_q^D \frac{U_{\phi_1 \phi_2}}{U_{\phi_1 \phi_2}} e^{j\theta_{\phi_1}} + \frac{c_q^D}{U_{\phi_1 \phi_2}} e^{j\theta_{\phi_1}} \right) \cdot Q_0 = \\ &\left(a_q^D \dot{U}_{\phi_1 \phi_2}^* \dot{U}_{\phi_1} + b_q^D \frac{\sqrt{3} U_{\phi_1}}{(1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} + \frac{c_q^D}{U_{\phi_1} (1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} \right) \cdot Q_0 \approx \\ &\left(a_q^D U_{\phi_1} (1 - e^{j(\phi_{10} - \phi_{20})}) + \frac{\sqrt{3} b_q^D}{(1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} + \frac{c_q^D}{(1 - e^{j(\phi_{20} - \phi_{10})})} (2 - U_{\phi_1}) \right) \cdot Q_0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, Q_0 表示基础无功功率, 为常数。

如图 2 所示, KCL 电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)等号左右两侧同乘各自的复数节点电压, 然后同除各自节点电压幅值:

$$\begin{cases} \dot{I}_a^* \cdot \dot{U}_a / U_a = (\dot{I}_{ab}^* - \dot{I}_{ca}^*) \cdot \dot{U}_a / U_a \\ \dot{I}_b^* \cdot \dot{U}_b / U_b = (\dot{I}_{bc}^* - \dot{I}_{ab}^*) \cdot \dot{U}_b / U_b \\ \dot{I}_c^* \cdot \dot{U}_c / U_c = (\dot{I}_{ca}^* - \dot{I}_{bc}^*) \cdot \dot{U}_c / U_c \end{cases} \quad (12)$$

式中，“*”表示复共轭。

式(12)右侧支路电流 \dot{I}_{ab}^* 、 \dot{I}_{bc}^* 、 \dot{I}_{ca}^* 可以用 $(P_{\phi_1\phi_2} + jQ_{\phi_1\phi_2}) / \dot{U}_{\phi_1\phi_2}$ 来替代,可分别由式(9)和式(10)来表示。式(12)左侧节点注入功率可由式(3)和式(4)来替代。然后 Y 形和 Delta 形连接的 ZIP 负荷可以用线性方程表示。

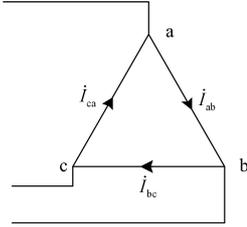


图 2 ZIP 负荷 Delta 形连接

Fig. 2 ZIP load Delta shaped connection

1.4 分布式电源模型

本文主要讨论了三相分布式电源。因为DGs具有对称配置的特性,阻抗后三相平衡的分布式电压源模型如图3所示。

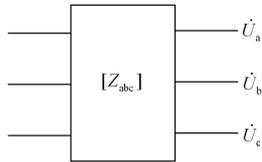


图 3 阻抗后三相平衡的分布式电压源模型

Fig. 3 A distributed voltage source model for three-phase balance after impedance

为了直接对DGs建模,平衡内部电压在潮流分析中视为变量。受PQ控制的DGs方程如式(13)。

$$\begin{cases} U_a = U_b = U_c \\ \theta_a = \theta_b + \frac{2}{3}\pi = \theta_c - \frac{2}{3}\pi \\ U_a \cdot I_a^* + U_b \cdot I_b^* + U_c \cdot I_c^* = \eta_1 P^{\text{SP}} + j\eta_2 Q^{\text{SP}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\eta_1 P^{\text{SP}} + j\eta_2 Q^{\text{SP}}$ 是内部节点注入的复功率; η_1 为考虑逆变器损耗的有功功率效率; η_2 表示考虑逆变器无功功率消耗的无功功率效率。

非线性方程(13)近似处理后的线性关系为

$$\begin{aligned} \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a^* / U_a + \dot{U}_b \cdot \dot{I}_b^* / U_b + \dot{U}_c \cdot \dot{I}_c^* / U_c \approx \\ (\eta_1 P^{\text{SP}} + j\eta_2 Q^{\text{SP}})(2 - U_a) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)可由式(3)和式(4)替代。

如果 DGs 能够控制电压,潮流方程转换为

$$\begin{cases} U_a = U_b = U_c = U^{\text{SP}} \\ \theta_a = \theta_b + \frac{2}{3}\pi = \theta_c - \frac{2}{3}\pi \\ \text{Re}(U_a \cdot I_a^* + U_b \cdot I_b^* + U_c \cdot I_c^*) = \eta_1 P^{\text{SP}} \end{cases} \quad (15)$$

式中, U^{SP} 表示 DGs 指定的电压。

2 分布式松弛母线模型

随着 DGs 的深入渗透,局部 DGs 可以组成微网孤岛运行。当 LPF 应用在这种状态下时,分布式松弛母线模型具有十分重要的作用^[24,26-27]。考虑 DGs 每个母线上总的注入功率, DG 有功功率注入方程为

$$(1 + k_g \gamma_k) \cdot \eta_{1,k} P_{g,k,0} = \sum_{\phi=\{a,b,c\}} \text{Re} \left(U_{g,\phi} \sum_{\phi=\{a,b,c\}} Y U_{\phi} \right) \quad (16)$$

式中: Re 表示复数的实部; $P_{g,k,0}$ 是 DGs 总有功率的初值; γ_k 为每个发电机的加权参与系数; k_g 是需要计算的标量; 一条母线可能有一相、两相或三相节点。

为了确保潮流可求解,参考相角需要指定。参考母线的平衡约束为

$$\begin{cases} U_{a,\text{slack}} = U_{b,\text{slack}} = U_{c,\text{slack}} = U^{\text{SP}} \\ \theta_0 = \theta_a = \theta_b + \frac{2}{3}\pi = \theta_c - \frac{2}{3}\pi \end{cases} \quad (17)$$

式中, θ_0 是指定的角度。

为了更加清楚地表示网损分摊的处理,以两母线系统为例,1 母线为参考母线,接三相分布式电源,2 母线接三相分布式电源,如图 4 所示,系统约束方程包括参考母线 1 的方程。

$$\begin{cases} U_{1,a} = U_{1,b} = U_{1,c} = U^{\text{SP}} \\ \theta_0 = \theta_{1,a} = \theta_{1,b} + \frac{2}{3}\pi = \theta_{1,c} - \frac{2}{3}\pi \end{cases} \quad (18)$$

2 母线的有功出力不再固定,而是与 1 母线共同承担网损,1、2 母线分布式电源的有功满足约束:

$$(1 + k_g \gamma_1) \cdot \eta_{1,1} P_{g,1,0} = \sum_{\phi=\{a,b,c\}} \text{Re} \left(U_{1,\phi} \sum_{\phi=\{a,b,c\}} Y U_{\phi} \right) \quad (19)$$

$$(1 + k_g \gamma_2) \cdot \eta_{1,2} P_{g,2,0} = \sum_{\phi=\{a,b,c\}} \text{Re} \left(U_{2,\phi} \sum_{\phi=\{a,b,c\}} Y U_{\phi} \right) \quad (20)$$

2 母线的分布式电源,另有无功约束:

$$\sum_{\phi=\{a,b,c\}} \text{Im} \left(U_{2,\phi} \sum_{\phi=\{a,b,c\}} Y U_{\phi} \right) = \eta_{2,2} Q^{\text{SP}} \quad (21)$$

2 母线的分布式电源,另有电压平衡约束:

$$\begin{cases} U_{2,a} = U_{2,b} = U_{2,c} \\ \theta_{2,a} = \theta_{2,b} + \frac{2}{3}\pi = \theta_{2,c} - \frac{2}{3}\pi \end{cases} \quad (22)$$

两母线系统共有 13 个约束方程, 有 $U_{1,a}$ 、 $U_{1,b}$ 、 $U_{1,c}$ 、 $U_{2,a}$ 、 $U_{2,b}$ 、 $U_{2,c}$ 、 $\theta_{1,a}$ 、 $\theta_{1,b}$ 、 $\theta_{1,c}$ 、 $\theta_{2,a}$ 、 $\theta_{2,b}$ 、 $\theta_{2,c}$ 、 k_g 13 个变量, 系统可解。

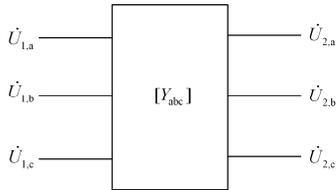


图 4 两母线系统

Fig. 4 Two-bus system

3 潮流求解

线性潮流通过线性方程组计算求得, 线性方程组为

$$AX = b \quad (23)$$

式中: X 为待求变量; A 为系数矩阵; b 为右边项。

线性潮流中的待求变量为各节点的电压幅值和相角。其中对于配电线路, 其对线性化潮流的系数矩阵的贡献包括式(3)、式(4)的右侧表达式, 对于 Y 型、 Δ 型的 ZIP 负荷对线性化潮流右边项的贡献包括式(5)一(10)的右侧表达式。遍历组成主动配电网的各个元件, 最终形成线性方程组的系数矩阵 A 和右边项 b , 然后基于矩阵的 LU 分解技术, 求得待求变量 X 的数值。

4 数值实验

本文所提三相 LPF 方法能够扩展到输电网正序潮流。为了证明其有效性, 本文采用了 Matpower 程序^[28]和 IEEE 的标准算例进行数值实验。

4.1 正序潮流

文献[21]得到应用 $Q_i e^{-2\ln V_i}$ 比应用 $Q_i e^{-\ln V_i}$ 更精确的结论。因为 $Q_i e^{-2\ln V_i}$ 可以更好地逼近正常运行范围内潮流方程的非线性项。为解决这个问题, 本文与文献[21]采用相同的算例。数值试验采用 $\dot{S}_i \cdot U_i^{-1} \approx \dot{S}_i \cdot (2 - U_i)$, 与采用对数转换的方法比较, 与文献[21]一致, 采用根均方误差

$$\Delta x^{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2 / n}$$

来研究不同方法的性能。不同 LPF 方法的电压幅值误差结果在表 1 中给出。文献[21]中的方法仅在少数算例中优于本文研究中提出的方法。所以, 本文方法与文献[21]中的方法相比并不差。

表 1 不同冷启动线性潮流(LPFP)模型的电压幅值误差
Table 1 Voltage amplitude error of different cold start Linear Power Flow (LPFP) model

案例名称	M0 法, $Q_i e^{-2\ln V_i}$ [18]	本文所提方法
IEEE RTS	0.022 659 329	0.023 952 747
IEEE 30-Bu	0.011 407 923	0.010 153 46
IEEE 57-Bus	0.008 940 968	0.007 529 236
IEEE 118-Bus1	0.002 786 515	0.002 869 858
IEEE 145-Bus	0.050 578 501	0.055 265 158
IEEE 300-Bus	0.018 093 941	0.019 242 791
PEGASE 1354	0.011 361 606	0.010 886 934
Polish 2736sp	0.001 980 923	0.002 517 578
French 2848rte	1.142 417 706	0.242 925 555
French 2868rte	0.025 322 81	0.033 409 648
PEGASE 2869	0.013 084 163	0.012 048 105
French 6468rte	0.067 073 441	0.085 355 339
French 6470rte	0.042 506 629	0.048 523 28
PEGASE 2869	0.013 084 163	0.012 048 105
French 6468rte	0.067 073 441	0.085 355 339
French 6470rte	0.042 506 629	0.048 523 28

观察数值试验的结果, 很难确定哪种方法更适用于感性电力网络。然而本文所提方法直接使用电压幅值, 而非对数电压幅值, 该方法在实际应用中更为方便。

4.2 不含 DG 的三相潮流

采用 IEEE 标准配网来比较不同方法的精确度^[29]。方法一代表文献[17]所描述的算法, 方法二代表文献[22]提出的算法。馈线中三角形连接而出现的浮点问题可以通过将浮动网络的一个节点固定为电压源节点来解决, 即该节点为浮动网络的参考电压源。表 2 结果表明方法 2 的精度低于方法 1 和本文所提方法。本文所提方法和方法 1 都具有极好的准确度。然而方法 1 无法处理直角坐标系下的压控节点。

表 2 不同冷启动三相 LPF 模型的电压幅值误差

Table 2 Voltage amplitude error of three phase LPF model with different cold start

案例名称	方法 1 的 RMS 误差	方法 2 的 RMS 误差	本文所提方法的 RMS 误差
IEEE 13	0.008 7	0.172 7	0.005 5
IEEE 34	0.006 3	0.034	0.007 4
IEEE 37	0.005 0	0.047 5	0.001 8
IEEE 123	0.015 7	1.261 2	0.006 0

4.3 在 LPF 中分布式电源的影响

本文所提出的 LPF 方法与传统功率潮流结果相比较的电压曲线如图 4 所示。每种情况下 DGs 的配置由表 3 给出。每一个三相 DG 的正序和负序阻抗标幺值为 0.002 54, 零序阻抗标幺值为 0.004。指定

三相 DG 的复功率标幺值为 $0.08 + 1j \times 0.08$ ，基准功率为 1 MVA。在 IEEE13, 34 和 37 中有各种设备，如 ZIP 负荷、压控 DGs、调压器和 Y 或者 Delta 连接的变压器等。根据图 4—图 6 的数值结果可知，本文所提 LPF 方法能够接近最终潮流结果，并对 ADN 的各种三相节点类型具有很好的适应性。本文所提 LPF 方法可以应用于实时配电运行调控^[30-31]。

表 3 DG 配置和参数

Table 3 DG configuration and parameters

案例名称	方法 1 的 RMS 误差	方法 2 的 RMS 误差	本文所提方法的 RMS 误差
IEEE 13	0.008 7	0.172 7	0.005 5
IEEE 34	0.006 3	0.034	0.007 4
IEEE 37	0.005 0	0.047 5	0.001 8

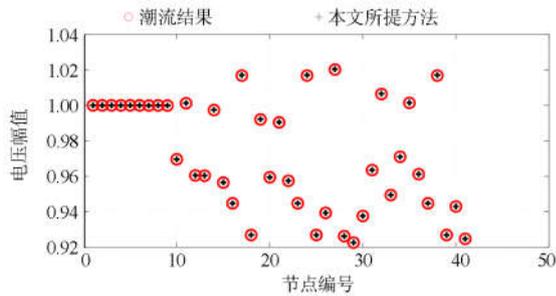


图 4 IEEE 13 LPF 和传统潮流结果

Fig. 4 IEEE 13 LPF and traditional tidal current results

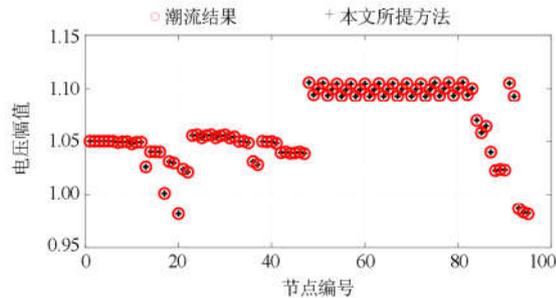


图 5 IEEE 34 LPF 和传统潮流结果

Fig. 5 IEEE 34 LPF and traditional tidal current results

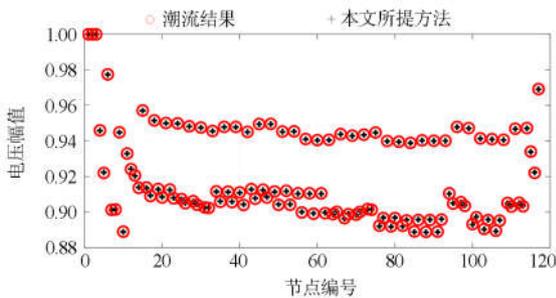


图 6 IEEE 37 LPF 和传统潮流结果

Fig. 6 IEEE 37 LPF and traditional tidal current results

4.4 分布式松弛母线对 LPF 的影响

为了评估分布式松弛母线对 LPF 的影响^[32-33]，本文使用了表 2 中 IEEE 13 测试案例中的 DG 配置。不同标量变量 k_g 的潮流数值结果如图 7 所示。通过与图 7 结果相比较，本文得到分布式松弛母线对 LPF 结果的影响是不可忽略的结论。仿真计算表明，本文所提 LPF 方法可以处理分布式松弛母线，且不能忽略该因素的影响。

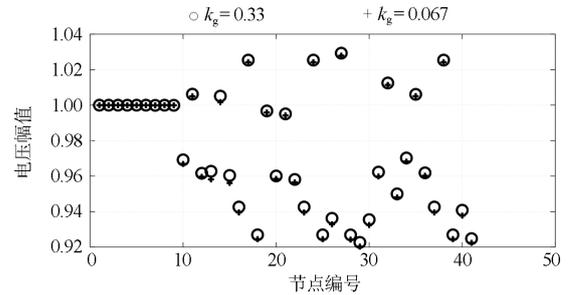


图 7 IEEE 13 分布式松弛母线结果

Fig. 7 IEEE 13 distributed slack bus results

5 结论

本文提出了一种极坐标系下线性化潮流求解思路。本文所提的在极坐标系下的线性化潮流算法，可以有效解决传统线性化潮流方法在大规模分布式电源接入电网后引起的压控节点增多问题上无法有效处理的难题。

本文所提方法充分考虑了 ZIP 负荷的 Y 型和 Delta 型连接模型、分布式电源模型和分布式松弛母线模型，使得在潮流计算过程中，极坐标系下的线性化潮流算法所得的计算结果更加接近实际的潮流计算结果。本文所提方法属于线性化计算方法，可以降低计算量和减少计算时间，大大提高计算速度。

下一步的研究重点将放在不同网络参数对极坐标系下线性化潮流算法性能的影响，进而提出提高其性能的方法。

参考文献

- [1] STOTT B, JARDIM J, ALSAC O. DC power flow revisited[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1290-1300.
- [2] DING T, BO R, LI F, et al. Interval power flow analysis using linear relaxation and optimality-based bounds tightening (OBBT) methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(1): 177-188.
- [3] 韩笑, 周明, 李庚银. 基于无迹变换随机潮流建模的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 9-17.

- HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Stochastic optimal dispatching of active distribution networks based on stochastic power flow modeling using unscented transformation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(3): 9-17.
- [4] BENIDRIS M, MITRA J. Reliability and sensitivity analysis of composite power systems under emission constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 29(1): 404-412.
- [5] FERREIRA R S, BORGES C L T, PEREIRA M V F. Distribution network reconfiguration under modeling of AC optimal power flow equations: a mixed-integer programming approach[C] // *Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, April 15-17, 2013, Sao Paulo, Brazil: 1-8.
- [6] 曹煜, 郭创新, 章禹, 等. 计及无功潮流影响的传输介数概念及其电网关键线路辨识研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(23): 9-16.
CAO Yu, GUO Chuangxin, ZHANG Yu, et al. Study of the concept of transmission betweenness considering the effect of reactive power flow and its application in identification of critical lines in power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 9-16.
- [7] KOCAR I, LACROIX J S. Implementation of a modified augmented nodal analysis based transformer model into the backward forward sweep solver[C] // *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-11.
- [8] 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.
- [9] DŽAFIĆ I, JABR R A, HALILOVIC E, et al. A sensitivity approach to model local voltage controllers in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1419-1428.
- [10] WU W C, ZHANG B M. A three-phase power flow algorithm for distribution system power flow based on loop-analysis method[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2008, 30(1): 8-15.
- [11] CHEN T H, YANG N C. Loop frame of reference based three-phase power flow for unbalanced radial distribution systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(7): 799-806.
- [12] GARCIA P A N, PEREIRA J L R, CARNEIRO S, et al. Three-phase power flow calculations using the current injection method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(2): 508-514.
- [13] MARTÍ 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] GAN L, LOW S H. Convex relaxations and linear approximation for optimal power flow in multiphase radial networks[C] // *Power Systems Computation Conference*, August 18-22, 2014, Wroclaw, Poland: 1-9.
- [15] DHOPLÉ S V, GUGGILAM S S, CHEN Y C. Linear approximations to AC power flow in rectangular coordinates[C] // *2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, September 29-October 2, 2015, Monticello, IL, USA: 211-217.
- [16] BOLOGNANI S, DÖRFLER F. Fast power system analysis via implicit linearization of the power flow manifold[C] // *2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, September 29-October 2, 2015, Monticello, IL, USA: 402-409.
- [17] GARCES A. A linear three-phase load flow for power distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 31(1): 827-828.
- [18] BOLOGNANI S, ZAMPIERI S. On the existence and linear approximation of the power flow solution in power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 31(1): 163-172.
- [19] BERNSTEIN A, WANG C, DALL'ANESE E, et al. Load-flow in multiphase distribution networks: existence, uniqueness, and linear models[EB/OL]. [2017]. <https://arxiv.org/abs/1702.03310>.
- [20] BERNSTEIN A, DALL'ANESE E. Linear power-flow models in multiphase distribution networks[C] // *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, September 26-29, 2017, Torino, Italy: 1-6.
- [21] LI Z, YU J, WU Q H. Approximate linear power flow using logarithmic transform of voltage magnitudes with reactive power and power loss consideration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 33(4): 4593-4603.
- [22] AHMADI H, MARTÍ 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.
- [23] WANG Y, ZHANG N, LI H, et al. Linear three-phase

- power flow for unbalanced active distribution networks with PV nodes[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2017, 3(3): 321-324.
- [24] TONG S, MIU K N. A network-based distributed slack bus model for DGs in unbalanced power flow studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 835-842.
- [25] YANG J, ZHANG N, KANG C, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3607-3617.
- [26] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A new AC/DC decoupled power flow algorithm based on augmented Jacobian Matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.
- [27] 廖小兵, 刘开培, 张亚超, 等. 基于区间泰勒展开的不确定性潮流分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 750-758.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, ZHANG Yachao, et al. Uncertain power flow analysis based on interval Taylor expansion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 750-758.
- [28] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.
- [29] Distribution Test Feeders-Distribution Test Feeder Working Group-IEEE PES distribution system analysis subcommittee[EB/OL]. [2018-01-28]. <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>.
- [30] 田松峰, 陈曦, 铁成梁, 等. 基于等效电耗法的分布式系统能量利用研究[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 19-24.
TIAN Songfeng, CHEN Xi, TIE Chengliang, et al. Research on energy utilization of distributed system based on equivalent power consumption method[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 19-24.
- [31] 梁捷, 李刚, 王建楠. 基于字典优化法和 ϵ -约束法的双目标热电调度[J]. 热力发电, 2017, 46(10): 81-87.
LIANG Jie, LI Gang, WANG Jiannan. Bi-objective thermoelectric dispatching based on dictionary optimization method and ϵ -constraint method[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(10): 81-87.
- [32] 林城, 袁峥, 李桂源, 等. 基于系统静态调节特性的故障后潮流计算[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 50-54.
LIN Cheng, YUAN Zheng, LI Guiyuan, et al. Post-fault power flow calculation based on system static regulation characteristics[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 50-54.
- [33] 罗超, 林芳, 李子, 等. 考虑连锁故障运行风险的机会约束最优潮流模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 57-62.
LUO Chao, LIN Fang, LI Zi, et al. Opportunity constrained optimal power flow model considering cascading failure operational risk[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 57-62.

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-06-07

作者简介:

孙大雁(1970—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统建模与控制; E-mail: ddsdy@vip.sina.com

韦永忠(1976—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: wyz_cn@163.com

巨云涛(1985—), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: juyuntao@cau.edu.cn

(编辑 魏小丽)