

考虑负荷电压静特性和 PV 节点的配电网 线性化潮流计算

赵恩来¹, 胡雨¹, 郭俊², 苏鑫磊¹, 刘鹏源¹, 杨君¹

(1. 北京国网信通埃森哲信息技术有限公司, 北京 100052;
2. 国网福建省电力有限公司 电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 鉴于原有的高维非线性潮流模型无法适用于配电网线性规划, 而现有的线性化潮流模型存在通用性不强的问题, 提出了一种考虑负荷电压静特性和 PV 节点的配电网线性化潮流计算方法。所提方法基于极坐标系下的潮流方程, 利用配电网的特征对潮流方程的电压幅值和相角进行解耦; 再根据 PV 节点自身的控制特性, 推导出一种含 PV 节点的线性化潮流计算模型。所提模型不仅考虑了 PV 节点和负荷电压静特性, 而且兼顾对过负载和弱环网的适应性, 无需迭代便可求解配电网的电压分布。仿真结果表明: 所提方法具有较高的精度和通用性, 可用于配电网的快速分析。

关键词: 配电网; 线性化潮流; 负荷电压静特性; 过负载; 快速分析

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24815

Linear Power Flow Calculation of Distribution Network Considering Load Voltage Static Characteristics and PV Node

ZHAO Enlai¹, HU Yu¹, GUO Jun², SU Xinlei¹, LIU Pengyuan¹, YANG Jun¹

(1. Beijing SGITG Accenture Information Technology Co., Ltd., Beijing 100052, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.,
Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: In view of the fact that the original high-dimensional nonlinear power flow model cannot be applied to the linear planning of distribution network, and the existing linear power flow model has the problem of weak universality, a calculation method of distribution network linear power flow was proposed considering the static characteristics of load voltage and PV nodes. Based on the power flow equation in polar coordinates, the proposed method decoupled the voltage amplitude and phase angle of the power flow equation using the characteristics of the distribution network. According to the control characteristics of PV nodes, a linear power flow calculation model with PV nodes was derived. The proposed model not only considered the static characteristics of PV nodes and load voltages, but also considered the adaptability to overload and weak loop networks. It could solve the voltage distribution of distribution networks without iteration. The simulation results show that the proposed method has high accuracy and versatility, and can be used for rapid analysis of distribution networks.

Key words: distribution network; linear power flow; load voltage static characteristic; overload; rapid analysis

随着分布式电源(distributed generation, DG)的大量并网, 配电系统的结构变得越来越复杂^[1]。潮流计算方法是分析不同类型 DG 并网的基础, 基于迭代潮流方程的配电网优化会受到潮流模型的非线性度和低计算效率的限制。当配电网

优化需要进行大规模潮流计算时, 原有的高维非线性潮流方程会导致配电网优化的速度变得极为缓慢。而采用线性化的潮流模型替代原有的高维非线性潮流模型, 可有效地缓解以上问题, 提高配电网优化效率, 保障优化算法的收敛性^[2-4]。

基金项目: 国网福建省科技项目(SGFJDK00SZXX2200117)

作者简介: 赵恩来(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力信息测试设计, Email: lutuoan7958792@163.com

为了提高潮流计算方法的效率,已有大量文献展开了相关的研究。文献[5]采用快速解耦法求解潮流方程,一定程度上提高了大型区域互联系统潮流的计算效率。文献[6]假设配电系统在平启动的运行方式下,分别对PQ节点和PV节点的注入功率进行变换,得到一种广义快速分解潮流计算方法。文献[7]将系统的压控节点进行建模,对原始的前推回代法进行改进,推导出一种含PV节点的潮流计算模型。虽然以上方法在一定程度上提高了潮流计算效率,并兼顾了PV节点的适应性,但均属于迭代过程。文献[8]利用配电系统线路两端相角差较小的特点,将潮流方程中的非线性项进行拟合,建立了一种全线性、纯数值运算的潮流计算模型。文献[9]采用电压幅值为独立变量,建立了一种高精度的线性化潮流模型。虽然上述方法从不同层面上提高了潮流计算性能,但线性化过程中仅把系统的负荷当作恒定不变的恒功率负荷,尚未考虑到负荷电压静特性。

在实际工程中,电压波动会导致系统的负荷特性发生变化。当电压偏离额定值时,负荷可能表现出恒功率、恒电流、恒阻抗或其组合特性,进而影响系统潮流的分布^[10]。文献[11]采用恒阻抗-电流-功率(constant impedance Z, constant current I, constant power P, ZIP)负荷表示负荷电压静特性,得到一种考虑负荷电压静特性的线性潮流计算方法。文献[12]将电压幅值作为独立变量,通过拟合法将综合负荷模型的非线性项进行线性处理,得到一种计算精度较高的线性潮流方程。文献[11]和文献[12]虽然考虑了负荷电压静特性,但在简化过程中未考虑到PV节点。在实际工程中,潮流计算模型需要将通过电压控制型逆变器并网的光伏、部分风机视为PV节点^[1],这使得文献[11]和文献[12]适用范围受限。

综上所述,配电网潮流分析存在着以下关键点:考虑负荷电压静特性、应对PV节点的能力、高效的求解速度。因此,本文提出了一种考虑负荷电压静特性和PV节点的配电网线性化潮流计算方法。首先,利用配电网电压降不大的特点,对节点功率方程的非线性项进行Taylor级数展开。然后,根据配电网线路两端相角差较小的特征,将潮流方程中电压幅值和相角进行解耦,最终实现潮流方程的线性化。该方法具有简明的表达式,可直接求取电压分布。同时,PV节点这

个不可忽视的因素在本文中得到了充分的考虑。最后,通过IEEE33,IEEE141,IEEE873节点系统验证了本文方法的有效性。

1 潮流计算数学模型

1.1 网络模型

在极坐标系下,牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson, NR)法的节点功率方程可用导纳和电压来表示,如下式所示:

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

式中: V_i, V_j 分别为节点*i*和节点*j*的电压幅值; $P_{L,i}, P_{G,i}, P_i$ 分别为节点*i*的负荷有功功率、DG有功功率、总注入有功功率; $Q_{L,i}, Q_{G,i}, Q_i$ 分别为节点*i*的负荷无功功率、DG无功功率、总注入无功功率; G_{ij}, B_{ij} 分别为导纳的实部和虚部; δ_{ij} 为线路*ij*的电压相角差。

1.2 负荷电压静特性模型

现实的配电网中,电压波动会导致系统的负荷特性发生变化。因此,本文使用ZIP负荷模型^[13]表示负荷电压静特性,如下式所示:

$$\begin{cases} P_L(V) = [C_Z (\frac{V}{V_0})^2 + C_I (\frac{V}{V_0}) + C_P] P_0 \\ Q_L(V) = [C'_Z (\frac{V}{V_0})^2 + C'_I (\frac{V}{V_0}) + C'_P] Q_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} C_Z + C_I + C_P &= 1 \\ C'_Z + C'_I + C'_P &= 1 \end{aligned}$$

式中: V_0, V 分别为系统额定电压和实际电压; P_0, Q_0 分别为额定有功功率和额定无功功率; C_P, C_I, C_Z 分别为有功恒功率负荷、恒电流负荷和恒阻抗负荷的比例系数; C'_P, C'_I, C'_Z 分别为无功恒功率负荷、恒电流负荷和恒阻抗负荷的比例系数。

为了便于分析节点功率方程的非线性项,将 V_0 转化为标称电压下^[14],然后根据式(2)可推导出式(1)左侧项,如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{P_G - P_L(V)}{V} = \frac{P_G - C_P P_0}{V} - (C_Z V + C_I) P_0 \\ \frac{Q_G - Q_L(V)}{V} = \frac{Q_G - C'_P Q_0}{V} - (C'_Z V + C'_I) Q_0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)和式(3)可知,潮流计算模型是一个强非线性的方程组,方程组的非线性项主要来源

于 $1/V$, $\sum_{j=1}^n V_j \sin \delta_{ij}$ 和 $\sum_{j=1}^n V_j \cos \delta_{ij}$ 。因此,对上述非线性项进行线性化处理,是得到线性潮流模型的关键。

2 线性近似条件分析

2.1 $1/V$ 的线性化

根据典型配电网的特征可知,系统各节点的电压幅值 V 趋近 1.0(标么值),则电压幅值 V 和电压降 ΔV 之间的关系可作如下表述:

$$V = 1 - \Delta V \quad (4)$$

取式(4)的倒数,在 $\Delta V=0$ 处将其进行 Taylor 级数展开,如下式所示:

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

实际的配电系统中,为了确保电气设备可以安全稳定地运行,通常系统各节点的电压降 ΔV 很少超过额定电压的 $\pm 10\%$ ^[4], ΔV 的二次项及更高次项的值相对较小。因此,仅保留式(5)的常数项和一阶项,可实现对 $1/V$ 的线性化,如下式所示:

$$\frac{1}{V} \approx 1 + \Delta V = 2 - V \quad (6)$$

为了分析式(6)简化的合理性,定义式(6)电压幅值的相对误差计算公式如下:

$$\Psi(V) = 100 \cdot \left| \frac{1/V - (2 - V)}{1/V} \right| \quad (7)$$

图1给出了式(6)在 $V \in [0.9, 1.1]$ (标么值)的相对误差分布。由图1可知, V 越接近于 1.0(标么值),相对误差越小。当 V 的波动范围为 0.9~1.1(标么值)时,式(6)在该区间的最大相对误差不超过 1.0%。

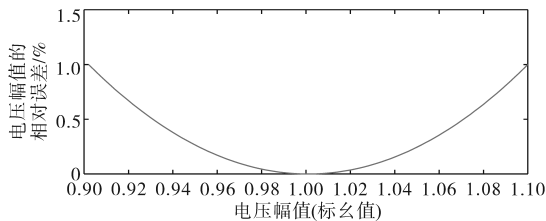


图1 线性简化的误差曲线

Fig.1 Error curve of linear approximation

至此,根据式(6)可推导出节点功率方程式(3)左侧项的表达式,如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{P_G - P_L(V)}{V} = (F_Z P_0 - P_G)V + 2P_G - F_1 P_0 \\ \frac{Q_G - Q_L(V)}{V} = (F'_Z Q_0 - Q_G)V + 2Q_G - F'_1 Q_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} F_Z &= C_P - C_Z \\ F_1 &= C_1 + 2C_P \\ F'_Z &= C'_P - C'_Z \\ F'_1 &= C'_1 + 2C'_P \end{aligned}$$

2.2 电压幅值和相角解耦

对于配电系统而言,节点导纳矩阵具有以下两大典型特征:节点导纳矩阵的对角元素等于与该节点直接相连的所有支路导纳的总和;节点导纳矩阵的非对角元素等于直接连接两节点的支路导纳的负值。两大特征可以采用下式进行表示:

$$Y_{ij} = \begin{cases} -y_{ij} & j \neq i \\ y_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} & j = i \end{cases} \quad (9)$$

式中: Y_{ij} 为支路 ij 的节点导纳矩阵元素; y_{ij} 为支路 ij 的导纳; y_{ii} 为节点 i 的自导纳(含对地导纳)。

根据式(9),可对式(1)的节点注入有功功率进行变形,如下式所示:

$$\begin{aligned} \frac{P_i}{V_i} &= \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} + \sum_{j=1}^n V_j B_{ij} \sin \delta_{ij} \\ &= g_{ii} V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n [g_{ij}(V_i - V_j \cos \delta_{ij}) - b_{ij} V_j \sin \delta_{ij}] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: g_{ij} , b_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; g_{ii} 为 y_{ii} 的实部。

由式(10)可知,节点功率方程中存在大量电压与三角函数的乘积项,导致模型中电压和相角耦合紧密。考虑到配电网各节点电压相角与平衡节点电压相角相差很小,通常趋近于零^[12],根据这一特征,可对相角差 δ_{ij} 的正弦函数和余弦函数进行 Taylor 级数展开,忽略其二阶及更高次项,得到 $\sin \delta_{ij} \approx \delta_{ij}$, $\cos \delta_{ij} \approx 1$ 。根据上述简化和配电网节点电压幅值趋近于 1.0(标么值)的特征,可以对式(10)的电压幅值和相角进行解耦,如下:

$$\begin{aligned} \frac{P_i}{V_i} &\approx g_{ii} V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(V_i - V_j) - \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{ij}(\delta_i - \delta_j) \\ &= [V_i \sum_{j=1}^n g_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (-g_{ij}) V_j] - [\delta_i \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (-b_{ij}) \delta_j] \\ &= \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} - (B_{ii} - b_{ii}) \delta_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij} \delta_j \end{aligned} \quad (11)$$

式中: δ_i , δ_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压相角。

同理,式(1)的节点注入无功功率通过相应的线性化处理方式可转换为下式:

$$\frac{Q_i}{V_i} = -\sum_{j=1}^n V_j B_{ij} - (G_{ii} - g_{ii})\delta_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n G_{ij}\delta_j \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可知,功率方程右侧的电压幅值和相角已完成解耦,联立后如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{P_i}{V_i} = \sum_{j=1}^n G_{ij}V_j - \sum_{j=1}^n B'_{ij}\delta_j \\ \frac{Q_i}{V_i} = -\sum_{j=1}^n B_{ij}V_j - \sum_{j=1}^n G'_{ij}\delta_j \end{cases} \quad (13)$$

式中: G'_{ij} , B'_{ij} 分别为减去节点自导纳的导纳矩阵第*i*行、第*j*列元素的实部和虚部。

3 考虑PV节点和负荷电压静特性的线性潮流方程

根据第2节的简化,联立式(8)和式(13),可将节点功率方程整理为下式:

$$\begin{cases} (F_{Z,i}P_{0,i} - P_{G,i})V_i + 2P_{G,i} - F_{L,i}P_{0,i} = \sum_{j=1}^n G_{ij}V_j - \sum_{j=1}^n B'_{ij}\delta_j \\ (F'_{Z,i}Q_{0,i} - Q_{G,i})V_i + 2Q_{G,i} - F'_{L,i}Q_{0,i} = -\sum_{j=1}^n B_{ij}V_j - \sum_{j=1}^n G'_{ij}\delta_j \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知,若配电网仅含平衡节点和PQ节点,式(14)左右两侧已完成线性化。但实际配电网系统通常需要PV型DG主动参与无功功率与电压的调节^[4],而考虑到PV型DG的自身控制特性,该类型DG并网后会导致系统节点的无功功率无法事先确定,这使得配电网潮流计算过程中无法将其作为PQ节点处理。因此,有必要研究一种考虑负荷电压静特性和PV节点的配电网线性潮流计算方法。

假定配电系统中节点的总数为*n*,存在3种不同类型的节点。其中节点1为平衡节点,节点2~*m*为PQ节点,节点*m*+1~*n*为PV节点,则式(14)对应的矩阵形式如下式所示:

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

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_P &= \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{F}_{Z,S}\mathbf{P}_{0,S} - \mathbf{P}_{G,S}) \cdot \mathbf{V}_S + 2\mathbf{P}_{G,S} - \mathbf{F}_{L,S}\mathbf{P}_{0,S} \\ \text{diag}(\mathbf{F}_{Z,W}\mathbf{P}_{0,W} - \mathbf{P}_{G,W}) \cdot \mathbf{V}_W + 2\mathbf{P}_{G,W} - \mathbf{F}_{L,W}\mathbf{P}_{0,W} \\ \text{diag}(\mathbf{F}_{Z,R}\mathbf{P}_{0,R} - \mathbf{P}_{G,R}) \cdot \mathbf{V}_R + 2\mathbf{P}_{G,R} - \mathbf{F}_{L,R}\mathbf{P}_{0,R} \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_Q &= \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{F}'_{Z,S}\mathbf{Q}_{0,S} - \mathbf{Q}_{G,S}) \cdot \mathbf{V}_S + 2\mathbf{Q}_{G,S} - \mathbf{F}'_{L,S}\mathbf{Q}_{0,S} \\ \text{diag}(\mathbf{F}'_{Z,W}\mathbf{Q}_{0,W} - \mathbf{Q}_{G,W}) \cdot \mathbf{V}_W + 2\mathbf{Q}_{G,W} - \mathbf{F}'_{L,W}\mathbf{Q}_{0,W} \\ \text{diag}(\mathbf{F}'_{Z,R}\mathbf{Q}_{0,R} - \mathbf{Q}_{G,R}) \cdot \mathbf{V}_R + 2\mathbf{Q}_{G,R} - \mathbf{F}'_{L,R}\mathbf{Q}_{0,R} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{SS} & \mathbf{G}_{SW} & \mathbf{G}_{SR} \\ \mathbf{G}_{WS} & \mathbf{G}_{WW} & \mathbf{G}_{WR} \\ \mathbf{G}_{RS} & \mathbf{G}_{RW} & \mathbf{G}_{RR} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{SS} & \mathbf{B}_{SW} & \mathbf{B}_{SR} \\ \mathbf{B}_{WS} & \mathbf{B}_{WW} & \mathbf{B}_{WR} \\ \mathbf{B}_{RS} & \mathbf{B}_{RW} & \mathbf{B}_{RR} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{V}_S^T \quad \mathbf{V}_W^T \quad \mathbf{V}_R^T]^T \quad \boldsymbol{\delta} = [\boldsymbol{\delta}_S^T \quad \boldsymbol{\delta}_W^T \quad \boldsymbol{\delta}_R^T]^T$$

式中:下标S,W,R分别为配电系统的平衡节点、PQ节点集合、PV节点集合; $\mathbf{V}$, $\boldsymbol{\delta}$ 分别为平衡节点电压和相角的列向量; $\mathbf{P}$, $\mathbf{Q}$ 分别为节点有功功率和无功功率的列向量; $\mathbf{G}$, $\mathbf{B}$ 分别为导纳的实部矩阵和虚部矩阵。

对于平衡节点, $\mathbf{V}_S$ 和 $\boldsymbol{\delta}_S$ 为配电网的已知量,待求量为 $\mathbf{P}_{0,S}$ 和 $\mathbf{Q}_{0,S}$;对于PQ节点, $\mathbf{P}_{0,W}$, $\mathbf{Q}_{0,W}$, $\mathbf{P}_{G,W}$ 和 $\mathbf{Q}_{G,W}$ 为配电网的已知量, $\mathbf{V}_W$ 和 $\boldsymbol{\delta}_W$ 为待求量;而对于PV节点, $\mathbf{P}_{0,R}$, $\mathbf{P}_{G,R}$ 和 $\mathbf{V}_R$ 为配电网的已知量, $\mathbf{Q}_{0,R}$, $\mathbf{Q}_{G,R}$ 和 $\boldsymbol{\delta}_R$ 为待求量。

至此,由式(15)可知,通过配电系统各节点的已知量($\mathbf{V}_S$, $\boldsymbol{\delta}_S$, $\mathbf{V}_R$, $\mathbf{P}_{0,W}$, $\mathbf{Q}_{0,W}$, $\mathbf{P}_{0,R}$, $\mathbf{P}_{G,W}$, $\mathbf{Q}_{G,W}$, $\mathbf{P}_{G,R}$)便可推导出同时考虑PV节点和负荷电压静特性的配电网线性潮流方程,如下式所示:

$$\mathbf{L} = \mathbf{J}\mathbf{X} \quad (16)$$

其中

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{RS} & -\mathbf{G}_{RS} & -\mathbf{G}_{RR} + \text{diag}(\mathbf{F}_{Z,R}\mathbf{P}_{0,R} - \mathbf{P}_{G,R}) \\ \mathbf{B}'_{WS} & -\mathbf{G}_{WS} & -\mathbf{G}_{WR} \\ \mathbf{G}_{WS} & \mathbf{B}'_{WS} & \mathbf{B}_{WR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta}_S \\ \mathbf{V}_S \\ \mathbf{V}_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2\mathbf{P}_{G,S} + \mathbf{F}_{L,S}\mathbf{P}_{0,S} \\ 2\mathbf{P}_{G,W} + \mathbf{F}_{L,W}\mathbf{P}_{0,W} \\ 2\mathbf{Q}_{G,W} + \mathbf{F}'_{L,W}\mathbf{Q}_{0,W} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = -\begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{RR} & \mathbf{B}'_{RW} & -\mathbf{G}_{RW} \\ \mathbf{B}'_{WR} & \mathbf{B}'_{WW} & -\mathbf{G}_{WW} + \text{diag}(\mathbf{F}_{Z,W}\mathbf{P}_{0,W} - \mathbf{P}_{G,W}) \\ \mathbf{G}'_{WR} & \mathbf{G}'_{WW} & \mathbf{B}_{WW} + \text{diag}(\mathbf{F}'_{Z,W}\mathbf{Q}_{0,W} - \mathbf{Q}_{G,W}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = [\boldsymbol{\delta}_R^T \quad \boldsymbol{\delta}_W^T \quad \mathbf{V}_W^T]^T$$

式中: $\mathbf{X}$ 为 $(m+n-2) \times 1$ 阶矩阵,对应的元素为未知量,由待求的电压和相角构成; $\mathbf{L}$ 为 $(m+n-2) \times 1$ 阶矩阵; $\mathbf{J}$ 为 $(m+n-2) \times (m+n-2)$ 阶方阵。

$\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{J}$ 的元素均为已知量,主要由配电网ZIP负荷模型的比例系数、导纳矩阵、平衡节点对应的电压和相角、PQ节点对应的有功功率和无功功率、PV节点的有功功率和电压、PQ型DG的有功分量和无功分量、PV型DG的有功分量和电压求得。

由式(16)可知,由于线性化潮流计算模型的方程总数为 $m+n-2$,刚好等于待求量的个数。因此,通过式(16)可以求得配电系统各个节点的电压幅值。

文献[12]是目前应用较为广泛的一种配电网

线性化潮流模型,它是通过拟合法将综合负荷模型的非线性项进行线性处理,得到一种计算精度较高的线性潮流方程,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} -A_{re} \\ -A_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{re} + C_{re} & B_{im} - C_{im} \\ B_{im} + C_{im} & -B_{re} + C_{re} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{re} \\ V_{im} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: A, B, C 均为复矩阵,可由系统已知的节点功率和导纳矩阵求得,具体的矩阵表达式可以参考文献[12]; V 为非平衡节点的节点电压向量;下标re和im分别表示实部和虚部。

下面从两个方面分析本文方法与文献[12]的差异性。

1)计算性能分析。当配电系统只含有平衡节点和PQ节点时,若假设系统有 m 个节点,则这两种模型的线性方程总个数均为 $2m-2$,因此,两种模型的计算量相同。假设配电系统存在3种不同类型的节点。其中节点1为平衡节点,节点 $2 \sim m$ 为PQ节点,节点 $m+1 \sim n$ 为PV节点,则本文的潮流计算模型的总方程个数为 $n+m-2$,但式(17)已经不再适用。

2)PV节点的适应性。通过电压控制型逆变器接入电网的光伏、部分风机和储能系统都应处理为PV节点^[4],而文献[12]并不具备应对压控节点的能力。本文则是基于极坐标下的NR法建立的潮流方程,具有较强处理PV节点的能力,通用性更强。

4 算例仿真

为测试所提模型的计算精度和求解效率,本文将应用于IEEE33^[15], IEEE141^[16], IEEE873^[17]节点系统,并以NR法的计算结果为精准值,计算线性化潮流模型电压幅值的最大相对误差如下式所示:

$$E_{\max} = \max |100 \cdot (V_i^{\text{LPF}} - V_i^{\text{AC}}) / V_i^{\text{AC}}| \quad (18)$$

式中: i 为配电系统节点的编号; V_i^{LPF} 为线性潮流求解的电压幅值; V_i^{AC} 为NR法求解的电压幅值。

4.1 误差分析

首先,本节基于IEEE33节点系统对所提模型的计算误差进行详细分析。测试系统的拓扑结构如图2所示,具体的网络参数见文献[15]。

IEEE33节点系统的基准功率和基准电压分别为10 MVA, 12.66 kV,节点1为平衡节点。同时,假设7~18节点为生活负荷,2~6节点和19~22节点为商业负荷,23~33节点为工业负荷,具体参数如表1所示。

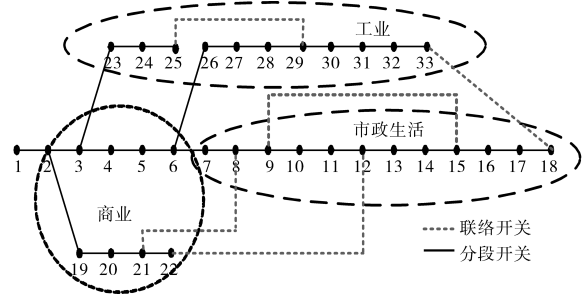


图2 IEEE33节点系统

Fig.2 IEEE33-bus system

表1 负荷模型的比例系数^[17]

Tab.1 Scale factor of load model^[17]

负荷类型	C_z	C_l	C_p	C'_z	C'_l	C'_p
商业负荷	0.16	0.80	0.04	0.76	-2.10	2.34
工业负荷	-0.07	0.24	0.83	1.00	0.00	0.00
市政生活	0.25	0.62	0.13	-0.05	0.37	0.68

使用NR法、文献[12]、本文方法求解IEEE33节点系统的电压幅值,其分布图如图3所示。

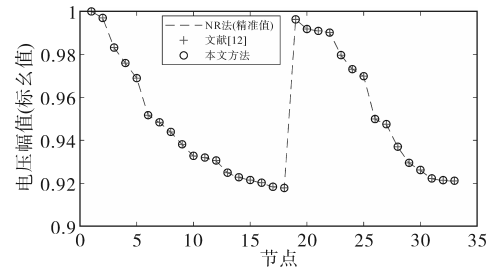


图3 电压幅值分布曲线

Fig.3 Distribution curve of voltage amplitude

由图3可知,本文方法求解出的电压幅值基本可以与NR法、文献[12]保持一致,初步验证了本文简化的合理性。为了进一步分析所提方法的计算精度,表2给出了NR法、文献[12]和本文方法计算得到的若干节点电压幅值和电压误差信息,且表中节点的排列顺序是根据计算结果的误差由大到小依次排列。

表2 电压幅值及误差

Tab.2 Voltage amplitude and error

节点	电压幅值(标么值)			相对误差/%	
	NR法	文献[12]	本文方法	文献[12]	本文方法
33	0.921 00	0.921 13	0.921 18	0.018	0.024
32	0.921 22	0.921 39	0.921 44	0.018	0.024
31	0.922 08	0.922 24	0.922 29	0.018	0.024
30	0.926 00	0.926 14	0.926 19	0.016	0.022

由表2可知,本文方法和文献[12]电压幅值的最大相对误差基本一致,误差的大小分别0.024%和0.018%,都具有较高的精度。同时,在测试中发现,本文方法、文献[12]以及NR法求解IEEE33

节点系统的时间分别为0.002 s,0.002 s,0.037 s,两种线性潮流方法的计算速度比NR法大约快18倍,具有更好的计算效率。

实际工程中,配电网负荷特性的变化会影响系统的电压分布。因此,本节基于原始的IEEE33节点系统,将系统各节点负荷分别处理为恒电流、恒功率、恒阻抗和ZIP负荷模型,采用所提的线性化潮流模型计算系统的电压分布,如图4所示。

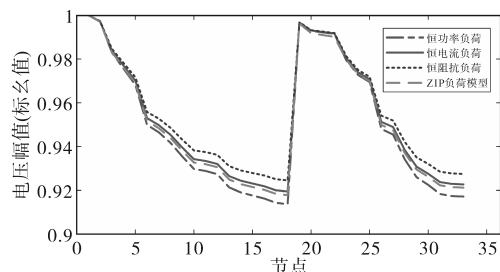


图4 不同负荷模型的电压分布

Fig.4 Voltage distribution under different load models

由图4可以发现,ZIP负荷模型的比例系数不同,会对系统电压分布造成较为明显的影响。当ZIP负荷模型的恒电流、恒阻抗系数增加时,将会提高配电系统的节点电压水平,并且末端节点电压幅度提高的程度最明显。因此,对配电网进行潮流计算时应该充分考虑到负荷电压静特性,才能更加准确地求解出系统的电压幅值。

4.2 适应性分析

4.2.1 含PV节点配电网的适应性

为了分析本文方法对含PV节点配电网的适应性。在IEEE33节点系统电压幅值较低的节点18和节点33分别接入PV型DG^[18-19],如表3所示。

表3 分布式电源接入情况

Tab.3 Distributed power access

节点	DG类型	台数	容量/kW	电压幅值(标么值)
18	PV型光伏	3	150	1
33	PV型风机	2	120	1

采用本文方法和NR法求解系统的电压幅值分布如图5所示。

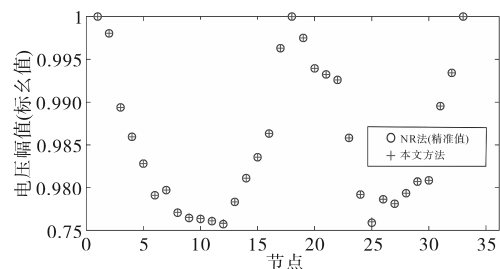


图5 含PV节点的配电系统电压分布

Fig.5 Voltage distribution of power distribution system with PV nodes

由图5可以看出,配电系统接入PV型DG,本文方法求解IEEE33节点系统的电压幅值仍然可以与NR法保持高度一致。由于DG的接入降低了系统整体的电压降,电压幅值的最大相对误差为0.008%,仍具有较好的精度,说明本文方法可以很好地应对PV型DG的接入。相比较而言,文献[12]已经难以适用于含PV节点的配电网,而本文方法在保证可靠精度的前提下,通用性更强。

4.2.2 环状配电网的适应性

正常情况下,配电网采用闭环设计、开环运行的供电模式。但在某些极端情况下,系统可能会短暂的闭环运行。为了分析本文方法对环状配电网的适应性,闭合IEEE33节点系统支路8—21,9—15的联络开关,构成环状配电网,并采用NR法和所提方法计算系统闭环前、后各节点电压分布,如图6所示。

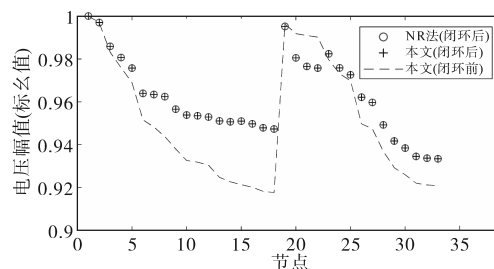


图6 开环和闭环的电压分布

Fig.6 Voltage amplitude of open and closed loops

观察图6可知,当配电网含有环网时,所提的线性化潮流模型求解系统的电压幅值与NR法基本相同,且电压幅值的最大相对误差为0.013%,说明所提模型可以很好地应对含环网系统。比较配电网闭环前、后的电压分布可以发现,闭环后系统电压水平会有一个提升的过程。

4.3 其他因素对算法的影响

4.3.1 负荷比重的影响

为了分析负荷比重对本文方法精度的影响,通过增加系统中所有的负荷比重,来模拟均匀过载的病态系统运行情况。本文系统负荷比重的调整范围为原负荷水平的1.0~3.0倍,使用本文方法求解IEEE33节点系统的电压幅值最大相对误差如图7所示。

由图7可知,随着系统负荷的不断增大,本文方法的计算误差也在不断增大。这是由于随着负荷比重的增加,系统的最低电压幅值也会不断降低,使得系统各节点的电压降增大,最终导致潮流方程在求解过程中误差变大。虽然系统处

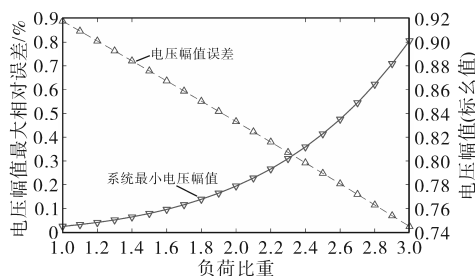


图7 不同负荷比重下的电压误差

Fig. 7 Voltage error under different load weights

于严重的过负荷,本文方法的电压幅值最大相对误差仍然可保持在1%以内,说明所提方法对过负荷的配电网具有一定的适用性。

4.3.2 不同节点系统的影响

为了验证本文方法应用到其他系统的有效性,方便起见,假设负荷模型相同分量的比例系数一致,其中 $C_z = C'_z = 0.2$, $C_l = C'_l = 0.3$, $C_p = C'_p = 0.5$ 。采用三种不同方案分别求解 IEEE141, IEEE873 节点系统的电压误差情况,如表4所示。

表4 不同测试系统的误差对比

Tab.4 Error comparison of different test systems

系统	方法	时间/s	迭代次数	最大相对误差/%
IEEE141	NR 法	0.355	4	0.000
	文献[12]	0.007	1	0.023
	本文方法	0.008	1	0.025
IEEE873	NR 法	2.173	5	0.000
	文献[12]	0.020	1	0.074
	本文方法	0.017	1	0.079

由表4可知,文献[12]和本文方法在不同的配电系统中的电压幅值最大相对误差基本一致,误差均小于0.1%,说明两种线性化潮流计算模型在不同节点数的配电系统中仍具有较好的性能。此外,本文方法和文献[12]的计算效率也基本相同,这是由于两种线性潮流计算模型的方程总个数相同,所以在 Matlab 进行矩阵运算时,两种线性潮流算法的计算量基本一致。相比于 NR 法,所提方法无需迭代且求解效率更高。当配电系统的规模越大时,本文方法的求解速度提升越明显,所提模型求解 IEEE873 节点系统的效率是 NR 的100倍左右。

5 结论

1)本文所提方法充分考虑了负荷电压静特性,能更好地响应负荷随电压的变化,从而提供更加精确的潮流计算结果。

2)本文所提方法不仅解决了大多数线性化

潮流模型无法处理 PV 节点的难题,而且兼顾对环状配电网的适应性。

3)在系统处于严重过负荷的情况下,电压幅值的最大相对误差仍然可以保持在1.0%以内,满足配电网快速潮流分析的精度要求。

4)与 NR 法相比,所提模型无需迭代便可求解配电网的电压分布,计算效率更高。算例表明,配电系统规模越大,本文方法的求解速度提升越明显。所提出的线性潮流计算方法求解 IEEE873 节点系统的效率是 NR 的100倍左右,具有较好的实用价值。

线性化潮流模型作为配电网优化的约束条件时,可以将很多配电网优化问题转化为混合整数线性规划问题。因此,下一步研究内容可将所提的线性化潮流模型应用于配电网故障重构、优化调度等非线性优化问题中。

参考文献

- [1] 刘明,赵作男,谢国民.一种应用于分布式电源的高增益双输入 DC-DC 变换器[J].电气传动,2020,50(9):53-59.
LIU Ming, ZHAO Zuonan, XIE Guomin. A high gain dual input DC-DC converter for distributed power supply[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 53-59.
- [2] 巨云涛,杨明友,吴文传.适用于配电网三相优化潮流的数据物理融合驱动线性化方法[J].电力系统自动化,2022,46(13):43-52.
JU Yuntao, YANG Mingyou, WU Wenchuan. Hybrid data-physical-driven linearization method for three-phase optimal power flow in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 43-52.
- [3] 樊哲新,杨知方,冯楠,等.潮流方程线性化误差分析及最优状态空间选取[J].电力系统自动化,2020,44(1):109-117.
FAN Zhixin, YANG Zhifang, FENG Nan, et al. Error analysis and optimal state space selection of linear power flow equation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 109-117.
- [4] 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.
WANG Shouxiang, WANG Chengshan. Analysis of modern power distribution system[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [5] 孟庆东,张嵩,李本新,等.基于快速解耦的电力系统连续潮流并行计算方法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(7):41-48.
MENG Qingdong, ZHANG Song, LI Benxin, et al. Fast decoupling based parallel computing method for continuation power flow in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(7): 41-48.

- [6] 陈艳波,张智,徐井强,等.广义快速分解潮流计算方法[J].电力系统自动化,2019,43(6):130-139.
CHEN Yanbo, ZHANG Zhi, XU Jingqiang, et al. Generalized fast decoupled load flow algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 130-139.
- [7] 李卫东,马俊,胡幸集,等.城市综合能源网统一前推回代能流计算方法[J].电力自动化设备,2022,42(9):1-8.
LI Weidong, MA Jun, HU Xingji, et al. Unified energy flow calculation of back/forward sweep method in urban integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 1-8.
- [8] 卫志农,朱梓荣,赵静波,等.电力系统半线性与全线性最优潮流模型[J].电力系统自动化,2018,42(14):107-114.
WEI Zhinong, ZHU Zirong, ZHAO Jingbo, et al. Semi-linearized model and full-linearized model of optimal power flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 107-114.
- [9] 李红伟,潘力,韩璐,等.基于电压幅值对数变换的配电网三相不平衡线性潮流计算[J].中国电力,2022,55(5):143-148.
LI Hongwei, PAN Li, HAN Lu, et al. Three-phase unbalanced linear power flow calculation based on voltage magnitude logarithmic transformation[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 143-148.
- [10] BOKHARI A, ALKAN A, DOGAN R, et al. Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1372-1381.
- [11] 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.
- [12] GHAREBAGHI S, SAFDARIAN A, LEHTONEN M. A linear model for AC power flow analysis in distribution networks[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(4): 4303-4312.
- [13] 李文俏,王振树,李中强.基于分岔理论的负荷模型对交直流混联系统电压稳定性的影响[J].电力自动化设备,2020,40(11):144-149.
LI Wenqiao, WANG Zhenshu, LI Zhongqiang. Influence of bifurcation theory based load model on voltage stability of AC/DC hybrid system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 144-149.
- [14] GARCES A. A linear three-phase load flow for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 827-828.
- [15] 马倩,张海峰.考虑开关动作次数的多时段配电网动态重构[J].电测与仪表,2021,58(3):9-14.
MA Qian, ZHANG Haifeng. Multi-period dynamic reconfiguration of distribution network considering the number of switching actions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 9-14.
- [16] DAS D, KOTHARI D P, KALAM A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1995, 17(5): 335-346.
- [17] MAXIMINO L, RIOS V. Local voltage stability assessment for variable load characteristics[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2010.
- [18] 刘伟琦.分布式光伏集群等值建模及配电网动态仿真[D].南京:东南大学,2020.
LIU Weiqi. Equivalent modeling of distributed photovoltaic cluster and dynamic simulation of distribution network[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [19] 聂颖惠.含分布式电源的配电网可靠性分析[D].南京:东南大学,2017.
NIE Yinghui. Reliability analysis of distribution network with distributed generation [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

收稿日期:2022-11-28

修改稿日期:2022-12-12