

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191027

一种含分布式电源的配电网三相潮流混合计算方法

邓红雷, 张莉彬, 唐崇旺, 刘昭

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对现有配电网三相潮流计算方法的不足, 提出了一种新的含分布式电源的配电网三相潮流混合计算方法。分析了配电网中相关元件的特点, 建立了配电线路、配电变压器和负荷的三相数学模型。对4种不同类型分布式电源节点的处理方式进行了分析, 采用前推回代法和牛拉法的混合计算方法建立了三相潮流计算模型。采用回路阻抗矩阵法来计算三相电压差, 解决了单相潮流计算方法的适用性问题, 采用以节点电压的收敛性作为潮流计算程序迭代与否的控制目标, 可直接求取电压值, 迭代计算简洁高效。最后, 以包含分布式电源的IEEE 33节点网络模型和山滩变某10 kV配电线路为例, 验证了该混合计算方法的收敛性与高效性。

关键词: 配电网; 三相潮流计算; 分布式电源; 前推回代法; 回路阻抗矩阵法

A hybrid calculation method of three-phase power flow with distributed generation resource on a distribution network

DENG Honglei, ZHANG Libin, TANG Chongwang, LIU Zhao

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Given the shortcomings of the three-phase power flow calculation method for the distribution network, a new three-phase power flow hybrid calculation method for a distribution network with distributed power supply is proposed. This paper first analyzes the characteristics of the relevant components, and establishes the three-phase mathematical model of distribution lines, distribution transformers and loads. Analyzing the processing methods of four different types of distributed power supply nodes, a three-phase power flow calculation model is established using a forward-backward algorithm and the Newton-Raphson method. The loop impedance matrix method is used to calculate the three-phase voltage difference. It solves the applicability problem of the single-phase power flow calculation. The convergence of the node voltage is used to control the power flow calculation. The voltage value can be obtained directly, and the iterative calculation is simple and efficient. Finally, it is verified that this method has good convergence by taking the IEEE 33-node network model and a 10 kV distribution line from Shantan substation as examples.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777079).

Key words: distribution network; three-phase power flow calculation; distributed power supply; forward-backward algorithm; loop impedance matrix method

0 引言

在电力供电网络中, 分布式电源占比越来越大, 整个电力网络表现出线路参数不对称和三相负荷不平衡的结构模式, 因此, 对接入分布式电源的配电网进行潮流分布计算具有重要的意义^[1]。

目前, 国内外对于含有分布式电源的配电网潮流计算方法进行了大量研究^[2-3], 单相潮流计算已经不

能满足配电网潮流建模和计算的要求, 三相潮流模型建立和计算成为研究的热点。从配电网三相潮流计算的模型方面来看, 文献[4]建立了基于Kron简化模式下的配电网三相潮流计算模型, 采用前推回代法进行计算, 得出配电网三相潮流简化计算结果。文献[5]提出了包含多个分布式电源的配电网的三相潮流稳态模型, 改进了之前采用正序功率恒定的模式, 将单相考虑扩展到三相, 促进了配电网潮流计算模型研究的进一步深入。文献[6]中采用相电压建立了配电网的三相潮流计算模型, 在模型中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777079)

考虑了光伏发电对于潮流分布的影响。从配电网三相潮流计算方面来看,文献[7]根据配电网网络拓扑结构生成道路矩阵,借助道路矩阵数据实现节点电流和电压的关系构建,从而简化了计算过程,计算的复杂性大幅降低,但是算法较为复杂,编程实现较为困难。文献[8]在深入分析风力发电机、微型燃气轮机、光伏电池等几种形式的分布式电源的结构特点的基础上,构建了不同分布式电源的分析模型,同时采用前推回代法计算配电网的三相潮流,但是对于处理多个网孔的能力较差。文献[9]采用回路阻抗法计算配电网三相潮流,该方法具有通用性强的特点,在处理辐射型配网和环形配网方面均能有效计算潮流分布,但是加大了算法的复杂度,改变了配电网原有网络结构,不便于网络重构。

由此可见,如何实现含分布式电源的不对称电网的潮流分布计算及分析是当前的研究难点。本文提出了一种新的含有多种常见分布式电源的不对称电网和负荷的潮流分布计算及分析方法。首先,本文分析了常见的分布式电源的网络模型所具有的控制方程,对控制方程的边界调节和适用条件进行了界定;然后,构建了前推回代法和牛拉法的混合模型计算不平衡配电网的三相潮流分布模型,利用网络阻抗矩阵方式分析配电网,构建了线路和节点的矩阵模型;最后,通过具体算例验证了所提方法的可行性和有效性。

1 配电网元件模型

配电系统是电力系统中重要的末端网络,通过其向用户端传输电能,由多种电气元件构成,包括变压器、线路、分布式电源和配电负荷等,为了有效计算配电网的三相潮流计算,建立元件的数据模型至关重要。

1.1 配电线路模型

图1给出了配电线路的等效电路模型,模型中充分考虑了配电线路的串联阻抗和对地导纳参数。根据图1配电线路的等效模型,可得到配电线路的数据模型参数如下^[10]。

导纳矩阵为

$$Y_l = \begin{bmatrix} Z_l^{-1} + Y_l/2 & Z_l^{-1} \\ Z_l^{-1} & Z_l^{-1} + Y_l/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $Y_l/2$ 为对地导纳矩阵; Z_l 为串联阻抗矩阵。其计算公式如式(2)和式(3)所示。

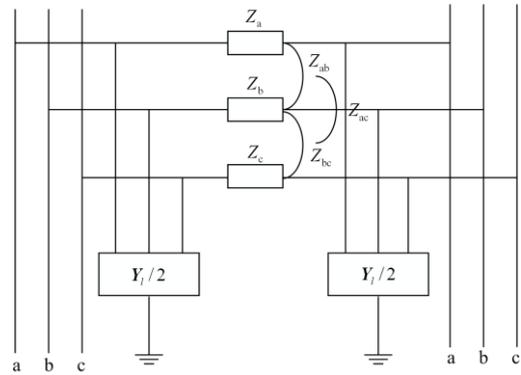


图1 配电线路三相等效电路图

Fig. 1 Three-phase equivalent circuit diagram of distribution lines

$$\frac{Y_l}{2} = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 配电变压器模型

变压器的三相模型如图2所示,模型是由导纳矩阵和损耗矩阵组成^[11],从而实现利用变压器的二次侧电压求解的目的。

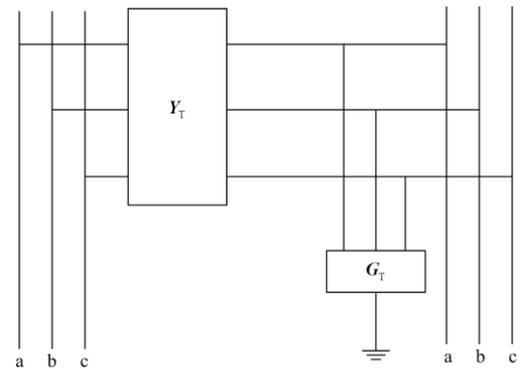


图2 配电变压器的三相模型

Fig. 2 Three-phase model of distribution transformer

根据图2的配电变压器的三相模型,其三相电压和三相电流能够通过式(4)表示出来。

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = Y_T \begin{bmatrix} U_p \\ U_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, p 和 s 分别表示变压器高压侧和低压侧。

在求解过程中,虽然 Y_T 具有表达式,但是其数值不容易直接求解,可以通过推导的方式简化求解,文献[12]有较为详尽的不同变压器模型参数矩阵。

1.3 配电负荷模型

根据负荷类型来看,可将负荷分为恒功率、恒电流和恒阻抗型式,根据接线方式可分为星形和三角形^[13]。

在建立配电负荷计算模型的过程中,可通过其额定功率来计算不同类型负荷的参数模型。

以三角型负荷为例,若给定相间的额定功率:

$$S_i^{\%} = \begin{bmatrix} S_{iab}^{\%} & S_{ibc}^{\%} & S_{ica}^{\%} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $S_{iab}^{\%}$ 、 $S_{ibc}^{\%}$ 和 $S_{ica}^{\%}$ 分别为负荷的相间额定功率。

这种情况下,对于恒功率的负荷则具有和式(5)相同的参数表达式。

对于恒电流的负荷,具有式(6)的表达式^[14]。

$$\mathcal{I}_i = \begin{bmatrix} \mathcal{I}_{iab} \\ \mathcal{I}_{ibc} \\ \mathcal{I}_{ica} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{iab}^{\%} / ((\mathcal{U}_a - \mathcal{U}_b)^*)) \\ (S_{ibc}^{\%} / ((\mathcal{U}_b - \mathcal{U}_c)^*)) \\ (S_{ica}^{\%} / ((\mathcal{U}_c - \mathcal{U}_a)^*)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathcal{U}_a 、 \mathcal{U}_b 和 \mathcal{U}_c 分别表示相电压; \mathcal{I}_{iab} 、 \mathcal{I}_{ibc} 和 \mathcal{I}_{ica} 分别表示相间电流。

对于恒阻抗的负荷,其表达式为

$$y_i = \begin{bmatrix} y_{iab} \\ y_{ibc} \\ y_{ica} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{iab}^{\%} / ((\mathcal{U}_a - \mathcal{U}_b)^2) \\ S_{ibc}^{\%} / ((\mathcal{U}_b - \mathcal{U}_c)^2) \\ S_{ica}^{\%} / ((\mathcal{U}_c - \mathcal{U}_a)^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, y_{iab} 、 y_{ibc} 和 y_{ica} 分别表示相间的阻抗。

2 改进的配电网三相混合潮流计算模型

2.1 算法原理与流程

配电网的潮流计算方法主要有牛拉法、前推回代法和回路阻抗法等,不同的方法存在不同的特点,牛拉法作为潮流计算常用的算法,其对于初值设定要求较高,比较容易出现不收敛的情况。

前推回代法算法包含前推和回代过程,前推过程是根据配电网的始端电压和末端功率求配电网的时段功率,回代过程是采用根据配电网的首端电压和首端功率逐步计算节点间的电压降,从而能够推导出整个配电网系统的节点电压值^[15]。就这样前推和回代过程不断反复,最终系统的电压逐步收敛,可得到系统的潮流分布情况。

本文将牛拉法和前推回代法相结合,采用前推回代法来确定配电网三相初值,采用牛拉法进行潮流计算,集合两个计算方法的优势,算法具体流程图见图3。

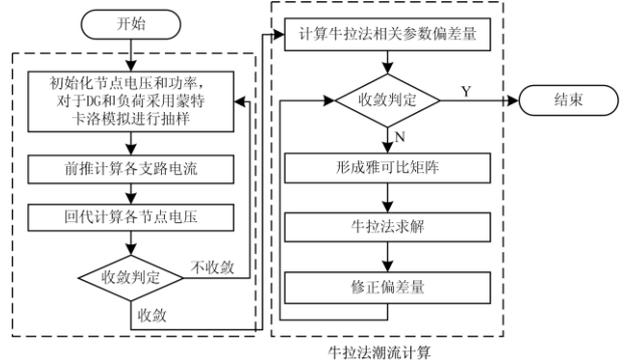


图3 混合潮流计算方法流程图

Fig. 3 Flow chart of hybrid power flow calculation method

因为三相潮流计算的电压差和单相有较为明显的差异,无法将单相计算电压差的方法直接套用在三相潮流计算过程中^[16],因此,本文采用混合潮流计算方法结合回路阻抗法进行配电网系统潮流计算。

在电压差迭代求解的过程中,首先建立配电网的回路阻抗矩阵如式(8)。

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,对角线阻抗代表的是回路的自阻抗,非对角线阻抗代表的是回路三相间的互阻抗。

从而能够得

$$\mathcal{U}_n^{\mathcal{L}} = \mathbf{Z}_k \mathcal{I}_n^{\mathcal{L}} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{I}_a^{\mathcal{L}} \\ \mathcal{I}_b^{\mathcal{L}} \\ \mathcal{I}_c^{\mathcal{L}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathcal{U}_n^{\mathcal{L}}$ 为回路的电压差向量; $\mathcal{I}_n^{\mathcal{L}}$ 为回路电流向量。

2.2 分布式电源的处理方式

最初的配电网的电源供应点在线路的两侧,潮流计算较为简单,但是随着分布式电源的加入,配电网成为一个多源的网络模型,在潮流计算过程中,需要对不同类型的分布式电源进行分析,确定其计算模型^[17],为准确的计算配电网潮流计算做好铺垫。

分布式电源的节点种类可以分为 PQ、PV、PI 和 PQ(V)节点四种^[18],在三相潮流计算过程中要合理处理这些节点才能保证潮流计算的准确性。

(1) PQ 节点类型的分布式电源比较简单,即将分布式电源当成负的负荷,因为 PQ 型分布式电源是发出恒定的有功功率和无功功率,其作用和负荷相似,但是功率方向正好相反。分布式电源节点注入电流可用式(10)表示^[19]。

$$\mathcal{I}_{in}^{\mathcal{L}} - PQ = \left[\frac{P + jQ}{\mathcal{U}^*} \right]^* \quad (10)$$

式中, U^k 为电源的节点电压。

(2) 对于需要使用流控型逆变器设备进行并网的分布式电源, 包括光伏发电、燃料电池和部分风力发电机组, 可以将该分布式电源系统处理为 PI 节点, 这类节点的重心是要合理计算其无功功率 Q , 从而将其转换为 PQ 节点。可采用式(11)计算该 PI 节点的输出无功功率^[12]。

$$Q^k = \sqrt{|I|^2 |U|^2 - P^2} \quad (11)$$

根据节点的功率关系, 可得到该 PI 节点的注入电流表达式如式(12)。

$$\dot{I}_m - PI = \left[\frac{-P - jQ^k}{U^k} \right]^* \quad (12)$$

式(11)和式(12)中, 上标 k 表示在潮流计算过程中第 k 次迭代。

通过上述两个公式, 能够将 PI 节点处理成为 PQ 节点, 从而方便潮流分布的计算^[20]。

(3) 可以处理为 PV 节点的分布式电源包括以下几类^[21]:

① 装有同步发电机的分布式电源, 包括燃汽轮机和内燃机等;

② 自动电压调节方式的同步发电机, 在运行过程中 AVR 系统维持机端电压保持稳定;

③ 采用压控型逆变器接入配电网中的分布式电源。

在潮流计算中, 将 PV 节点转化为 PQ 节点能够简化计算程序, 提高计算效率, 但是在计算过程中为了提高程序的收敛性和计算效率, 采用无功分摊原理^[22]确定无功功率的初值, 这样在程序迭代计算过程中能够大幅降低迭代次数, 提高运算收敛性。

PV 节点计算过程中第 k 次迭代的注入电流偏差量见式(13)。

$$\Delta I^k = Z^{-1} \Delta U^k \quad (13)$$

式中, $Z(n \times n)$ 为配电网的灵敏度阻抗矩阵, 该矩阵只和线路参数相关, 在计算过程中仅需要一次求解, 无需反复迭代, 计算程序简单高效。

在潮流计算过程中, 采用标幺值的方式, 含分布式电源的节点电压相角差很小, 标幺值约为 1, 对于 PV 节点而言, 由于节点的有功功率保持不变, 因此得到无功功率第 k 次迭代的偏差计算公式^[23]:

$$\Delta Q^k = -\Delta I^k = -Z^{-1} \Delta U^k \quad (14)$$

公式(14)结合无功分摊原理, 得到 $k+1$ 次无功功率的表达式:

$$Q^{k+1} = Q^k + \Delta Q^k \quad (15)$$

经过处理, 将 PV 节点转换成 PQ 节点进行处理, 提高潮流计算效率。

(4) PQ(V)节点一般指的是一类风力发电机组^[24], 这类机组的有功功率是确定的, 但是电压不恒定, 无功功率受电压和有功功率影响。这类发电机的特点是本身不能够发出无功功率, 因此电压不能进行调节, 发电机组本身的励磁无功由电网或者同步发电机提供, PQ(V)节点的电压和发电机的转差率决定该发电机所吸收的无功功率数值^[25]。

在潮流计算过程中, 将 PQ(V)节点转化为 PQ 节点能够简化计算过程, 提高程序编制和运行效率。在第 k 次迭代时, PQ(V)节点的无功功率如式(16)^[26]。

$$Q^k = -\frac{U^2}{x_p} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2 x^2}}{2x} \quad (16)$$

式中: $x = x_1 + x_2$, $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c + x_m}$, x_1 和 x_2 分别是定子漏抗和转子漏抗, x_c 为机组端并联电容器的电抗, x_m 为激磁电抗^[27]。

经过上述公式的处理之后, PQ(V)节点就能转化为 PQ 节点, 方便程序实现潮流计算。

3 算例分析

3.1 改进的 IEEE 33 节点算例

采用 IEEE 33 节点为例计算该系统的潮流分布, 验证该含分布式电源的潮流算法的正确性, 图 4 给出了 IEEE 33 节点系统的拓扑图^[28], 在该系统 25 节点增加光伏发电电源(PI 节点), 在 33 节点增加风力发电电源(PQ(V)节点)。

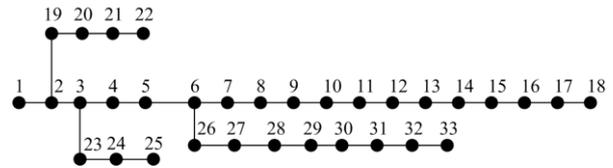


图 4 IEEE 33 节点系统拓扑图

Fig. 4 System topology of IEEE 33 node

该 IEEE 33 节点系统采用牛拉法和前推回代混合方法进行潮流计算, 电压收敛精度设置为 10^{-5} , 经过 5 次迭代, 系统达到收敛精度要求, 该系统的潮流计算结果见表 1。

从表 1 可知, 本算法完全能够实现含分布式电源的电网和负荷的潮流分布计算。对该 IEEE 33 节点系统采用普通的牛拉法和前推回代法分别进行计算, 最后得到该三种方法的对比情况, 如表 2。

表 1 含分布式电源的 IEEE 33 节点系统潮流计算结果

Table 1 Power flow calculation results of IEEE 33 node system with distributed power supply

节点 编号	节点电压幅值			节点电压相角		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	1	1	1	0	-120	120
2	0.9976	0.9976	0.9975	0.0092	-119.987	120.0128
3	0.9868	0.9864	0.9862	0.0632	-119.917	120.084
4	0.98	0.9795	0.9793	0.1274	-119.843	120.1599
5	0.9734	0.9723	0.9724	0.1923	-119.765	120.2372
6	0.9569	0.9543	0.9551	0.1235	-119.822	120.1886
7	0.9536	0.9509	0.9518	-0.0905	-120.049	119.9741
8	0.9491	0.9461	0.9473	-0.0536	-120.01	120.0082
9	0.9433	0.9399	0.9415	-0.1122	-120.078	119.9411
10	0.9381	0.9342	0.9362	-0.1606	-120.136	119.8857
11	0.9373	0.9333	0.9353	-0.153	-120.128	119.8924
12	0.936	0.9318	0.9338	-0.1403	-120.116	119.9029
13	0.9306	0.9258	0.9277	-0.2057	-120.202	119.8067
14	0.9287	0.9236	0.9255	-0.2656	-120.277	119.7256
15	0.9276	0.9222	0.924	-0.2912	-120.314	119.6878
16	0.9263	0.9208	0.9227	-0.3138	-120.338	119.6646
17	0.9243	0.9188	0.9207	-0.3878	-120.416	119.589
18	0.9237	0.9182	0.9201	-0.3968	-120.426	119.5794
19	0.9971	0.997	0.997	-0.0018	-119.998	120.0023
20	0.9937	0.9934	0.9933	-0.0689	-120.066	119.9364
21	0.9931	0.9927	0.9926	-0.0881	-120.086	119.9178
22	0.9925	0.992	0.9919	-0.1075	-120.108	119.8983
23	0.9855	0.9849	0.9847	0.0235	-119.954	120.044
24	0.9836	0.9827	0.9823	-0.0629	-120.037	119.9529
25	0.9847	0.9838	0.9834	-0.1058	-120.08	119.9096
26	0.9553	0.9524	0.9541	0.161	-119.726	120.2158
27	0.9532	0.9499	0.9518	0.2146	-119.662	120.279
28	0.9436	0.939	0.9411	0.3163	-119.533	120.4073
29	0.9368	0.9313	0.9335	0.4076	-119.42	120.5193
30	0.9339	0.9281	0.9303	0.5076	-119.301	120.638
31	0.9309	0.9247	0.927	0.467	-119.344	120.5975
32	0.9303	0.9241	0.9264	0.4604	-119.351	120.5914
33	0.9303	0.9241	0.9265	0.4769	-119.334	120.608

表 2 不同方法的潮流计算结果对比

Table 2 Comparison of power flow calculation results of the different methods

算法	迭代次数	用时/s
牛拉法	8	1.2
前推回代法	6	0.5
混合潮流算法	5	0.5

为了验证不同算法的收敛性，图 5 展示了三种算法不同迭代次数下的误差值。

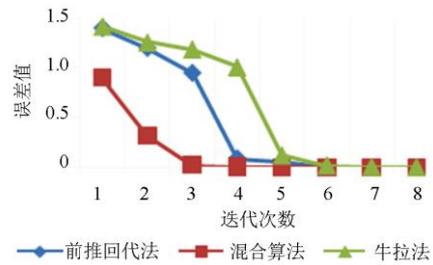


图 5 不同算法收敛性分析

Fig. 5 Convergence analysis of different algorithms

通过方法对比能够看出，本文提出的混合潮流方法比单纯的牛拉法和前推回代法均有优势，从迭代次数能够看出，混合算法所用的迭代次数最少，计算效率高；从程序计算效率方面，混合算法的计算时间低于牛拉法，和前推回代算法一致；从收敛性方面来看，混合算法的收敛性好于前推回代法和牛拉法，能够用最少的迭代步骤达到收敛结果。因此，混合算法的效率优于牛拉法和前推回代法，而且能够有效克服牛拉法中初值选择不当而导致不收敛的问题。并且随着配电网络复杂性增加，混合潮流计算法的优势会更加突出。

3.2 实例分析

以文献[29]的山滩变某 10 kV 配电线路作为实例进行计算验证，其线路实际接线如图 6 所示，相关的线路参数和分布式电源的连接与文献中一致。

应用本文的混合潮流算法对该实际的网络图进行计算验证，得到重要节点的三相潮流计算结果如表 3 所示。

表 3 实例潮流计算结果

Table 3 Calculation results of the power flow

节点 编号	节点电压幅值			节点电压相角		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	1	1	1	0	-120	120
3	0.9989	0.9983	0.9981	-0.1240	-120.897	119.9084
4	0.9987	0.9979	0.9982	-0.1660	-120.143	119.8161
6	0.9985	0.9923	0.9891	-0.1684	-120.892	119.8126
8	0.9976	0.9894	0.9921	-0.2491	-120.01	119.8124
10	0.9976	0.9942	0.9923	-0.3124	-120.136	119.7865
11	0.9977	0.9943	0.9894	-0.3329	-120.159	119.8546
12	0.9972	0.9954	0.9967	-0.3521	-120.642	119.5416
13	0.9968	0.9962	0.9951	-0.3678	-120.202	119.8132
14	0.9968	0.9961	0.9950	-0.3671	-120.277	119.6341
20	0.9959	0.9934	0.9933	-0.3792	-120.062	119.9356
26	0.9973	0.9956	0.9941	-0.2185	-120.026	119.9158
28	0.9971	0.9967	0.9951	-0.2063	-120.133	119.8065
30	0.9967	0.99932	0.9946	-0.1693	-120.301	119.9380
31	0.9960	0.9954	0.9943	-0.1085	-120.344	119.8462
35	0.9987	0.9983	0.9979	-0.1250	-120.351	119.8913
38	0.9959	0.99951	0.9939	-0.898	-120.265	119.7320

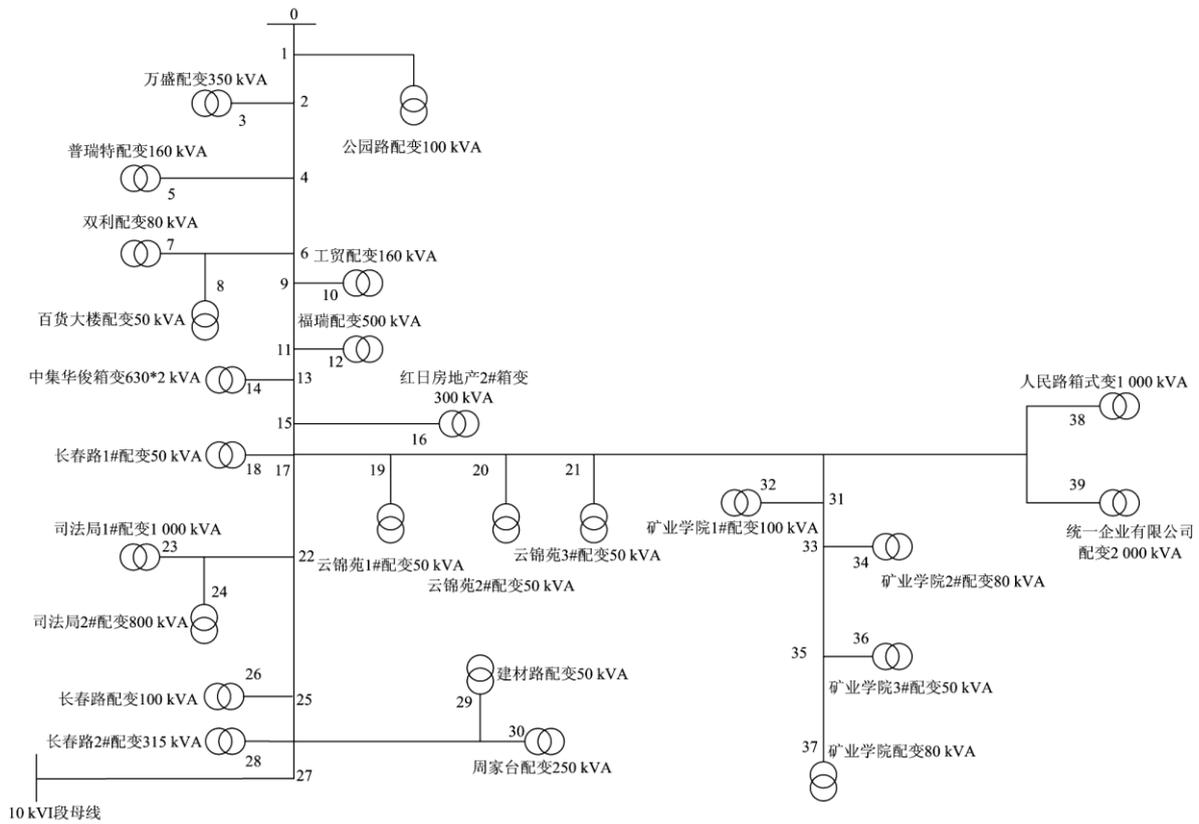


图 6 山滩某变 10 kV 线路图

Fig. 6 A 10 kV line diagram from Shantan distribution

对于该实例分别采用牛拉法和前推回代法再次进行计算, 对比三种方法的迭代次数和迭代时间, 结果见表 4。

表 4 不同方法的潮流计算结果对比

Table 4 Comparison of power flow calculation results of the different methods

算法	迭代次数	用时/s
牛拉法	15	2.8
前推回代法	11	1.7
混合潮流算法	7	1.3

通过对于实例的三相潮流计算能够看出, 混合潮流算法在解决实际潮流问题中有很好的适用性, 并且在迭代次数和用时上均有优势, 因此混合潮流计算方法在分析实际潮流计算时具有更高的计算效率。

4 结论

本文提出了一种将牛拉法和前推回代法相结合的计算配电网三相不平衡潮流分布的混合潮流算法。通过前推回代法来确定配电网三相初值, 采

用牛拉法进行潮流计算, 并采用回路阻抗矩阵法解决了单相潮流计算方法的适用性问题, 分析了含分布式电源的配电网的元件模型, 并以 IEEE 33 节点系统和山滩变某 10 kV 配电线路为例计算了其潮流分布, 经过 Matlab 编程仿真结果分析可知, 该方法具有较好的收敛性, 能够满足有效提高配电网三相不对称潮流计算性能。

参考文献

[1] KUMAR D, SAMANTARAY S R, JOOS G A reliability assessment based graph theoretical approach for feeder routing in power distribution networks including distributed generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 57: 11-30.

[2] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的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 al. Unbalanced three-phase power flow calculation of distributed power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 11-15.

[3] YUDE Y, ANJUN S, HUI L, et al. Parallel computing of

- multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [4] KERSTING W H. Distribution system modeling and analysis[M]. BocaRaton: CRC Press, 2002.
- [5] 巨云涛, 吴文传, 张伯明, 等. 分布式电源三相稳态模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1509-1518.
JU Yuntao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Three-phase steady-state model of distributed power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1509-1518.
- [6] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A three-phase power flow approach for integrated 3-wire MV and 4-wire multigrounded LV networks with rooftop solar PV[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1728-1737.
- [7] 李红伟, 孙宏斌, 张安安, 等. 基于正序分量的含 PV 节点的三相配网潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 115-121, 10.
LI Hongwei, SUN Hongbin, ZHANG An'an. Positive-sequence component based three-phase unbalanced power flow solution for distribution system with PV nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 115-121, 10.
- [8] 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, 2016, 30(1): 35-40.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Power flow calculation of distribution network with distributed power supply[J]. Automation of Electric Power systems, 2016, 30(1): 35-40.
- [9] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEE Proceedings C—Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(1): 78-88.
- [10] 刘宽, 王淳, 伍惠铨, 等. 一种含 PV 节点的配电网线性潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 17-22.
LIU Kuan, WANG Chun, WU Huicheng, et al. A linear power flow calculation method for distribution networks with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 17-22.
- [11] CHOWDHURY B H, CHELLAPILLA S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 76(9).
- [12] 周家南, 苏宏升, 孙涛. 含分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 控制工程, 2017, 24(5): 1095-1101.
ZHOU Jianan, SU Hongsheng, SUN Tao. Three-phase power flow calculation of weak loop distribution network with distributed power supply[J]. Control Engineering, 2017, 24(5): 1095-1101.
- [13] 孙大雁, 韦永忠, 巨云涛, 等. 极坐标系下主动配电网三相线性潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 1-8.
SUN Dayan, WEI Yongzhong, JU Yuntao, et al. Three-phase linear flow calculation method for active distribution network in polar coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 1-8.
- [14] DUGAN R C, SANTOSO S. An example of 3-phase transformer modeling for distribution system analysis[C] // 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, TX, USA.
- [15] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 15-23.
LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.
- [16] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A three-phase power flow approach for integrated 3-wire MV and 4-wire multi-grounded LV networks with rooftop solar PV[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1728-1737.
- [17] SU C T, LEE C S. Modified differential evolution method for capacitor placement of distribution systems[C] // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, October 6-10, 2002, Yokohama, Japan.
- [18] 罗兰, 赵霞, 颜伟, 等. 考虑电源电压控制特性的不接地配电网改进三相潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 92-98.
LUO Lan, ZHAO Xia, YAN Wei, et al. Improved three-phase power flow model for ungrounded distribution network considering voltage control characteristics of power lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 92-98.
- [19] 张美霞, 陈洁, 杨秀, 等. 考虑风光和负荷随机性的微网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 101-107.
ZHANG Meixia, CHEN Jie, YANG Xiu, et al. Three-phase power flow calculation of micro grid considering wind and load randomness[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 101-107.
- [20] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 考虑三相潮流的微网经济运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 14-22.

- CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Study on the economic operation of micro-grid considering three-phase power flow[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 14-22.
- [21] 范晓龙, 何健, 刘汇川, 等. 含多类型分布式电源的主动配电网三相潮流计算[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 11-17.
- FAN Xiaolong, HE Jian, LIU Huichuan, et al. Three-phase power flow calculation of active distribution network with multiple types of distributed power supply[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 11-17.
- [22] 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, 2017, 37(1): 15-21, 27.
- JIN Yong, LIU Junyong, LI Hongwei, et al. Power flow calculation method of mixed distribution network based on power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 15-21, 27.
- [23] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.
- DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.
- [24] ANGELES-CAMACHO C, TORTELLI O L, ACHA E, et al. Inclusion of a high voltage DC-voltage source converter model in a Newton-Raphson power flow algorithm[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 691-700.
- [25] 龙川, 张文涛, 叶圣永, 等. 计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 97-104.
- LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 97-104.
- [26] 杨晓静, 秦超. 考虑风电调度策略的电力系统随机潮流计算[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 54-59.
- YANG Xiaojing, QIN Chao. Probabilistic load flow calculation of power systems considering wind power dispatching strategies[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 54-59.
- [27] 杨磊, 罗萍萍, 王高猛, 等. 配电网单-三相混合潮流计算模型及算法[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 102-109.
- YANG Lei, LUO Pingping, WANG Gaomeng, et al. Method of distribution network three-phase power flow calculation based on a hybrid single-three phase model[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 102-109.
- [28] 司徒友, 吴杰康, 郭清元, 等. 基于免疫 PSO 的新能源配电网无功多目标模糊优化[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 90-98.
- SITU You, WU Jiekang, GUO Qingyuan, et al. Multi-objective fuzzy optimization for reactive power of distribution network based on immune particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 90-98.
- [29] 闫馨予. 含分布式电源的配电网潮流计算[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- YAN Xinyu. Power flow calculation of distribution network with distributed power supply[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.

收稿日期: 2019-08-25; 修回日期: 2019-10-23

作者简介:

邓红雷(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力设备在线监控与故障诊断的研究; E-mail: denghl@scut.edu.cn

张莉彬(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳态分析; E-mail: 229392408@qq.com

唐崇旺(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为输变电设备在线监控系统的研究。E-mail: 1181621985@qq.com

(编辑 姜新丽)