

一种基于回路电流法的有源配电网潮流算法

董树锋¹, 章杜锡², 周飞², 曹志昆², 何仲潇¹, 宋永华¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网宁波供电公司, 浙江 宁波 315016)

摘要:提出一种基于回路电流法的主动配电网三相潮流算法,并提出风机等多种分布式电源在该算法中的计算模型。首先建立配电网对应的图,然后将基本回路电流、变压器原边支路电压、非恒阻抗负荷支路电压、分布式电源支路电压、异步电机正序负序电压、转差率作为未知量,列写回路 KVL 方程、变压器原副边电流方程、负荷功率平衡方程以及分布式电源相关方程,推导 Jacobian 矩阵,并利用牛顿法求解方程。该方法不需要 PV 节点转化为 PQ 节点的过程,也不需要环路解列及复杂的节点编号,没有对 Jacobian 矩阵进行简化和近似,具有二阶收敛性。算例表明,所提方法计算速度快,能够处理所有常见的分布式电源,具有较强环路处理能力,且比前推回推法有更好的收敛性。

关键词:主动配电网;三相潮流计算;回路电流法;分布式电源;二阶收敛性

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.002

0 引言

配电网潮流计算是配电网设计、调度运行、无功优化以及其他相关方面研究工作的基础,随着分布式电源 DG (Dispersed Generation) 在主动配电网中进一步推广和应用,开发含 DG 配电网潮流计算技术的需求与日俱增。因此,研究主动配电网潮流计算技术、提升潮流计算技术的适应面与性能,对配电网自动化和主动配电网技术的发展与研究具有重大的意义。

根据配电网的特点,很多学者从不同角度对配电网潮流算法进行了研究。一种研究方向是将输电网潮流算法进行改进后应用于配电网,例如在 PQ 解耦算法基础上衍生而来的算法^[1-3],该类算法的优点是能够较方便地处理 PV 节点和网络环路,但是这类算法形式复杂,其收敛性受配电网较大的 R/X 的影响。另一种研究方向是充分利用配电网强辐射状、弱环网的拓扑特点开发新的潮流算法,可分为母线类方法和支路类方法。母线类方法以母线上的注入量(电流或功率)和母线电压作为状态量,代表方法有 ZBus 法^[4]、YBus 法等。支路类方法以支路电流或功率作为状态量列出系统的状态方程并求解^[5-7],代表方法有回路阻抗法^[5],以及目前被广泛应用的前推回推法^[6]。前推回推法具有运算简单、

收敛性好、节省内存等优点,这些特点恰好符合规模庞大、拓扑结构简单的配电网潮流计算的要求。前推回推算法的最大缺点是环路处理能力弱,应用于存在一定数量环路的配电网,计算容易发散,其另一缺点是难以处理 PV 节点。为了处理 PV 类型的节点,目前的做法^[8-12]通常是根据电压和无功之间的灵敏度,在前推过程中将 PV 节点转化为 PQ 节点,这样处理对算法的收敛性会产生多大影响目前缺乏理论分析和大量算例验证。

配电网中一般可以忽略馈线对地电纳和变压器对地支路。当配电网处于辐射状或弱环网运行状态时,其独立环路数比节点数少得多,所以回路电流法比较适用于进行配电网潮流计算。基于此思想,本文提出了一种基于回路电流法的配电网潮流算法,并对该方法进行扩展,使之能够处理 PV 节点模型、异步电机模型等所有常见的 DG 模型。该方法具有环路处理能力强、收敛性好等特点,且不需要将环路解列,不需要复杂的节点编号,在处理 PV 节点时无需 PV 转 PQ 的过程,求解时没有对 Jacobian 矩阵进行简化和近似,具有二阶收敛性。

本文首先针对不含 DG 的情况,提出基于回路电流法的配电网基本潮流方程,接着提出各种常见的 DG 模型及其在潮流计算中的处理方法,然后提出基于回路电流法配电网潮流方程的求解步骤,最后基于 IEEE 标准配电系统和 33 节点系统设计了多个算例,并从收敛性、计算速度、环网处理能力、DG 处理能力等方面说明本文算法的有效性。

1 基于回路电流法的配电网潮流基本方程

本节仅考虑不含 DG 的配电网, DG 的处理将在

收稿日期:2017-04-22;修回日期:2017-12-01

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2014AA051901);
国家自然科学基金资助项目(51207136)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2014AA051901) and the National Natural Science Foundation of China (51207136)

下一节中详述。首先将配电网看成是由顶点和支路组成的图,图上的支路对应于馈线、变压器绕组、负荷、并联电容、电压源等设备。以 IEEE 4 节点标准配电网为例,其示意图见图 1(其中 $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$),网络中变压器采用 D-D 接法,则网络拓扑图如图 2 所示,图中给出了连枝和树枝、支路编号、回路编号以及等效电压源的位置。本文建立图时:进行三相建模;忽略馈线对地导纳;大地节点和根节点之间加入等效电压源。图 2 中共 18 条支路,节点 1、2、3 代表用电压源表示的根节点,节点 G 代表接地点。图中共有 7 条连枝(用虚线表示),对应 7 个基本回路,文中出现的“回路”均指拓扑图中的回路。

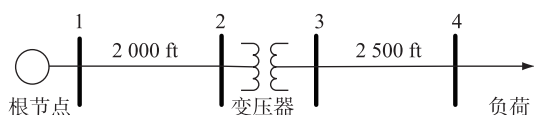


图 1 IEEE 4 节点标准配电系统

Fig.1 IEEE 4-bus standard distribution network

支路电流和回路电流之间的关系如式(1)所示。

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{B}^T \mathbf{I}_l \quad (1)$$

其中, $\mathbf{I}_b$ 为支路电流复向量; $\mathbf{B}$ 为回路矩阵; $\mathbf{I}_l$ 为回路电流复向量。矩阵 $\mathbf{B}$ 中行对应回路,列对应支路,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 & \vdots & \mathbf{B}_{T1} & \vdots & \mathbf{B}_{T2} & \vdots & \mathbf{B}_{L1} & \vdots & \mathbf{B}_{L2} \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

由于图 2 中负荷为恒功率负荷,不含恒电流负荷,回路矩阵中不含有对应的分块矩阵 $\mathbf{B}_{L2}$ 。

配电网络中一般只有电压源,基尔霍夫电压定律(KVL)的矩阵形式为:

$$\mathbf{BZB}^T \mathbf{I}_l - \mathbf{BU}_s = 0 \quad (3)$$

其中, $\mathbf{Z}$ 为阻抗矩阵; $\mathbf{U}_s$ 为电压源复向量。与式(2)中支路顺序对应, $\mathbf{U}_s$ 可以表示为:

$$\mathbf{U}_s = [\mathbf{U}_0^T \quad -\mathbf{U}_{T1}^T \quad \mathbf{U}_{T2}^T \quad -\mathbf{U}_{L1}^T \quad -\mathbf{U}_{L2}^T]^T \quad (4)$$

其中, $\mathbf{U}_0$ 为对应电压源电压复向量,值为常数; $\mathbf{U}_{T1}$ 为变压器原边支路对应的电压复向量; $\mathbf{U}_{T2}$ 为变压器副边绕组对应的电压复向量; $\mathbf{U}_{L1}$ 为恒功率负荷支路对应的电压复向量; $\mathbf{U}_{L2}$ 为恒电流阻抗支路对应的电压复向量。 $\mathbf{U}_{T1}$ 、 $\mathbf{U}_{L1}$ 、 $\mathbf{U}_{L2}$ 正方向与电流正方向相同, $\mathbf{U}_{T2}$ 正方向和电流正方向相反,故只有 $\mathbf{U}_{T2}$ 前面是正

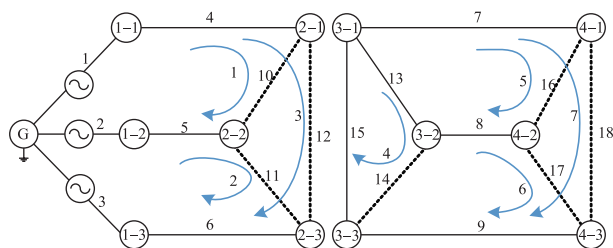


图 2 IEEE 4 节点标准配电网络拓扑图

Fig.2 Topology of IEEE 4-bus standard distribution network

如果将变压器原边绕组、变压器副边绕组、恒功率负荷、恒电流负荷对应的支路排在最后,则 $\mathbf{B}$ 可以表示为:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_0 \quad \mathbf{B}_{T1} \quad \mathbf{B}_{T2} \quad \mathbf{B}_{L1} \quad \mathbf{B}_{L2}] \quad (2)$$

其中, $\mathbf{B}_0$ 为馈线、恒阻抗、电容和电抗支路对应的部分; $\mathbf{B}_{T1}$ 为变压器原边支路对应的部分; $\mathbf{B}_{T2}$ 为变压器副边支路对应的部分; $\mathbf{B}_{L1}$ 为恒功率负荷支路对应的部分; $\mathbf{B}_{L2}$ 为恒电流负荷支路对应的部分。图 2 中支路编号已经按照此顺序进行排列。

本文支路电流的正方向为:馈线对应支路的正方向为编号小的节点流向编号大的节点;对于变压器绕组和负荷对应的支路,正方向如文献[13]中所示。此时图 2 对应的回路矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \vdots & \mathbf{B}_{T1} & \vdots & \mathbf{B}_{T2} & \vdots & \mathbf{B}_{L1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

号,其余均加上负号。 $\mathbf{U}_{T1}$ 和 $\mathbf{U}_{T2}$ 之间有如下关系:

$$\mathbf{U}_{T2} = \mathbf{N}_{T1} \mathbf{U}_{T1} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{N}_{T1}$ 为常数方阵,采用有名值计算时数值为原副边匝数比的倒数,采用标幺值计算时数值均为 1,不同接法变压器对应的非零元位置见文献[13]。将式(4)和式(5)代入式(3),则有:

$$\mathbf{BZB}^T \mathbf{I}_l + (\mathbf{B}_{T1} - \mathbf{B}_{T2} \mathbf{N}_{T1}) \mathbf{U}_{T1} + \mathbf{B}_{L1} \mathbf{U}_{L1} + \mathbf{B}_{L2} \mathbf{U}_{L2} - \mathbf{B}_0 \mathbf{U}_0 = 0 \quad (6)$$

将 $\mathbf{I}_l$ 、 $\mathbf{U}_{T1}$ 、 $\mathbf{U}_{L1}$ 、 $\mathbf{U}_{L2}$ 作为未知量,除式(6)之外,还需要增加相应数量的方程才能求解,本文对此做如下处理。

a. 变压器绕组电流关系。变压器原副边之间电流关系式为:

$$\mathbf{N}_1 \mathbf{B}_{T1}^T \mathbf{I}_l - \mathbf{B}_{T2}^T \mathbf{I}_l = 0 \quad (7)$$

其中, N_i 为对角矩阵, 采用有名值计算时其值为变压器匝数比, 采用标么值计算时其为单位阵。

b. 非恒阻抗负荷功率平衡方程。 恒功率负荷的功率平衡方程为:

$$\text{diag}(\mathbf{U}_{L1}) \mathbf{B}_{L1}^T \mathbf{I}_1^* - \mathbf{S}_L = 0 \quad (8)$$

其中, $\text{diag}(\cdot)$ 表示取对角矩阵, 括号内向量作为对角线元素; 上标“*”表示共轭; $\mathbf{S}_L$ 为负荷功率组成的常复数向量。恒电流负荷(指电流幅值和功率因数恒定的负荷)的功率平衡方程为:

$$\text{diag}(\mathbf{U}_{L2}) \mathbf{B}_{L2}^T \mathbf{I}_1^* - |\mathbf{U}_{L2}| \cdot \mathbf{I}_{L2} = 0 \quad (9)$$

其中, $|\mathbf{U}_{L2}|$ 为 $\mathbf{U}_{L2}$ 中元素取模后组成的向量; $\mathbf{I}_{L2}$ 为恒

电流负荷电流常复数向量, 该向量第 k 个元素 $\mathbf{I}_{L2,k} = |\mathbf{I}_{L2,k}| \angle \varphi_{L2,k}$, 其中 $|\mathbf{I}_{L2,k}|$ 为该负荷电流的幅值, $\varphi_{L2,k}$ 为其功率因数角; “ $\cdot$ ”表示 2 个维数相同向量取对应元素相乘得到新向量。

将式(6)~(9)联立, 以 $\mathbf{I}_1$ 、 $\mathbf{U}_{T1}$ 、 $\mathbf{U}_{L1}$ 、 $\mathbf{U}_{L2}$ 作为未知量, 方程个数和未知量个数相同。将方程中所有复数矩阵($\mathbf{I}_1$ 、 $\mathbf{U}_{T1}$ 、 $\mathbf{U}_{L1}$ 、 $\mathbf{U}_{L2}$ 、 $\mathbf{Z}$)的实部和虚部分开, 以 $\mathbf{I}_1$ 、 $\mathbf{U}_{T1}$ 、 $\mathbf{U}_{L1}$ 、 $\mathbf{U}_{L2}$ 的实部和虚部作为未知量, 使用牛拉法求解, 可得 Jacobian 矩阵的形式如式(10)所示, 式中上标“ x ”、“ y ”分别表示复数矩阵(复向量)的实部、虚部。图 2 对应的具体计算结果见表 1。

$$\mathbf{J}_{ac} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{Z}^x\mathbf{B}^T & -\mathbf{B}\mathbf{Z}^y\mathbf{B}^T & \mathbf{B}_{T1}-\mathbf{B}_{T2}\mathbf{N}_{T1} & 0 & \mathbf{B}_{L1} & 0 & \mathbf{B}_{L2} & 0 \\ \mathbf{B}\mathbf{Z}^y\mathbf{B}^T & \mathbf{B}\mathbf{Z}^x\mathbf{B}^T & 0 & \mathbf{B}_{T1}-\mathbf{B}_{T2}\mathbf{N}_{T1} & 0 & \mathbf{B}_{L1} & 0 & \mathbf{B}_{L2} \\ \mathbf{N}_1\mathbf{B}_{T1}^T-\mathbf{B}_{T2}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{N}_1\mathbf{B}_{T1}^T-\mathbf{B}_{T2}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{diag}(\mathbf{U}_{L1}^x)\mathbf{B}_{L1}^T & \text{diag}(\mathbf{U}_{L1}^y)\mathbf{B}_{L1}^T & 0 & 0 & \text{diag}(\mathbf{B}_{L1}^T\mathbf{I}_1^x) & \text{diag}(\mathbf{B}_{L1}^T\mathbf{I}_1^y) & 0 & 0 \\ \text{diag}(\mathbf{U}_{L1}^y)\mathbf{B}_{L1}^T & -\text{diag}(\mathbf{U}_{L1}^x)\mathbf{B}_{L1}^T & 0 & 0 & -\text{diag}(\mathbf{B}_{L1}^T\mathbf{I}_1^y) & \text{diag}(\mathbf{B}_{L1}^T\mathbf{I}_1^x) & 0 & 0 \\ \text{diag}(\mathbf{U}_{L2}^x)\mathbf{B}_{L2}^T & \text{diag}(\mathbf{U}_{L2}^y)\mathbf{B}_{L2}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{diag}(\mathbf{B}_{L2}^T\mathbf{I}_1^x - \mathbf{U}_{L2}^x/|\mathbf{U}_{L2}| \cdot \mathbf{I}_{L2}^x) & \text{diag}(\mathbf{B}_{L2}^T\mathbf{I}_1^y - \mathbf{U}_{L2}^y/|\mathbf{U}_{L2}| \cdot \mathbf{I}_{L2}^y) \\ \text{diag}(\mathbf{U}_{L2}^y)\mathbf{B}_{L2}^T & -\text{diag}(\mathbf{U}_{L2}^x)\mathbf{B}_{L2}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{diag}(-\mathbf{B}_{L2}^T\mathbf{I}_1^y - \mathbf{U}_{L2}^y/|\mathbf{U}_{L2}| \cdot \mathbf{I}_{L2}^y) & \text{diag}(\mathbf{B}_{L2}^T\mathbf{I}_1^x - \mathbf{U}_{L2}^x/|\mathbf{U}_{L2}| \cdot \mathbf{I}_{L2}^x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

表 1 负荷三相平衡 IEEE 4 节点系统回路电流法潮流计算结果

Table 1 Calculation results of power flow for IEEE 4-bus system with three-phase balanced loads using loop current method

节点	相别	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
		幅值/V	相角/(°)	幅值/V	相角/(°)	幅值/V	相角/(°)	幅值/V	相角/(°)	幅值/V	相角/(°)
1	A	7.20	0	7.20	0	7.20	0	7.20	0	7.20	0
	B	7.20	-120.0	7.20	-120.0	7.20	-120.0	7.20	-120.0	7.20	-120.0
	C	7.20	120.0	7.20	120.0	7.20	120.0	7.20	120.0	7.20	120.0
2	A	7.12	-0.3	7.12	-0.3	7.12	-0.3	7.13	-0.3	7.12	-0.2
	B	7.15	-120.3	7.15	-120.3	7.13	-120.3	7.15	-120.3	7.14	-120.3
	C	7.13	119.7	7.13	119.7	7.13	119.6	7.14	119.7	7.13	119.7
3	A	2.27	-3.2	2.27	-3.3	2.27	-3.2	2.29	-2.9	2.26	-2.9
	B	2.28	-123.1	2.28	-123.1	2.25	-123.1	2.30	-122.8	2.27	-122.8
	C	2.28	116.8	2.27	116.7	2.26	116.8	2.29	117.2	2.26	117.2
4	A	1.98	-7.8	1.97	-8.0	2.00	-7.1	2.03	-6.8	1.95	-6.7
	B	2.10	-127.3	2.10	-127.4	2.00	-126.9	2.13	-126.5	2.06	-126.4
	C	2.04	112.0	2.03	111.8	2.00	111.5	2.08	112.9	2.00	113.0

2 主动配电网潮流计算中 DG 的处理方法

主动配电网潮流计算中常见的 DG 模型可以分为下面几类^[11-12]。

a. PQ 节点模型。

在潮流计算中, 采用恒功率因数和恒功率控制方式的工频热电联产同步机组的有功和无功出力可看成恒定值, 可将其作为 PQ 节点进行处理, 本文称其为 PQ 节点模型。PQ 节点模型 DG 支路方程为:

$$\text{diag}(\mathbf{U}_{G1}) \mathbf{B}_{G1}^T \mathbf{I}_1^* + \mathbf{S}_{G1} = 0 \quad (11)$$

其中, $\mathbf{B}_{G1}$ 为回路矩阵 $\mathbf{B}$ 中该类型 DG 支路对应的部分; $\mathbf{U}_{G1}$ 为 DG 支路电压复向量; $\mathbf{S}_{G1}$ 为 DG 功率组成的常复数向量。

b. 恒电流模型。

光伏发电系统和蓄电池并网控制的是输入电网的电流, 在潮流计算中可以将它们视为向电网输入电能的恒电流负荷。本文中的恒电流负荷是指电流幅值和功率因数恒定的负荷(并非电路理论中的恒流源)。恒电流模型 DG 支路方程为:

$$\text{diag}(\mathbf{U}_{G2}) \mathbf{B}_{G2}^T \mathbf{I}_1^* + |\mathbf{U}_{G2}| \cdot \mathbf{I}_{G2} = 0 \quad (12)$$

其中, B_{G2} 为 B 中该类型 DG 支路对应的部分; U_{G2} 为 DG 支路电压复向量; $|U_{G2}|$ 表示 U_{G2} 中元素取模后组成的向量; I_{G2} 为 DG 支路电流常复数向量。

c. PV 节点模型。

在潮流计算中, 燃料电池、微型燃气轮机、采用自动电压调节的工频热电联产同步机组的有功出力 and 电压幅值可看成恒定值, 故可将其作为 PV 节点进行处理, 本文称其为 PV 节点模型。PV 节点模型 DG 支路方程为:

$$\text{diag}(U_{G3}^x) B_{G3}^T I_1^x + \text{diag}(U_{G3}^y) B_{G3}^T I_1^y + P_{G3} = 0 \quad (13)$$

$$|U_{G3}| - U_{FG3} = 0 \quad (14)$$

其中, B_{G3} 为 B 中该类型 DG 支路对应的部分; U_{G3}^x 、 U_{G3}^y 分别为 DG 支路电压实部和虚部组成的向量; I_1^x 、 I_1^y 分别为回路电流实部和虚部组成的向量; P_{G3} 、 U_{FG3} 分别为 DG 支路有功和电压幅值常数向量。

对于以上 3 类 DG, 处理方法与非恒阻抗负荷支路是类似的, 即在状态变量中增加 DG 支路电压, 并增加相应的 DG 支路方程与其他方程联立求解。

d. 异步发电机模型。

风机是一种常见的 DG, 它在潮流计算中常作为异步发电机模型参与计算。异步发电机本身没有励磁装置, 主要靠电网提供的无功功率建立磁场, 在潮流计算中既不能作为 PQ 节点, 也不能作为 PV 节点, 其三相有功一般是已知量, 而无功是电压和转差率的函数, 考虑到三相不平衡的情况, 需要采用序分量进行分析。

以 Y 接法的三相异步电机为例, 采用序分量进行分析, 正序或负序的等效电路如图 3 所示^[13]。异步电机一般采用中性点不接地的方式, 因此电机的零序电压和电流均为 0。图 3 中, R_s 为定子电阻; X_s 为定子漏抗; R_r 为转子电阻; X_r 为转子漏抗; X_m 为励磁电抗; U_i 为序电压, I_i 为序电流, s_i 为转差率, $i = 1$ 表示正序, $i = 2$ 表示负序。

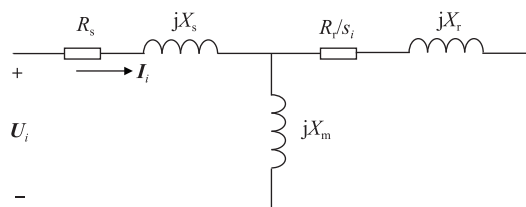


图 3 序分量下的异步电机等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of induction machine with sequence components

正序和负序等效电路的唯一的区别在于 s_i 不同, 正序和负序转差率有如下关系式:

$$s_1 = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (15)$$

$$s_2 = 2 - s_1 \quad (16)$$

其中, n_s 为同步转速; n 为转子转速。

在潮流计算中, 认为风机发出的有功功率是给定值, 设为 P , 则可得下面 3 个方程:

$$U_{1,x} I_{1,x} + U_{1,y} I_{1,y} + U_{2,x} I_{2,x} + U_{2,y} I_{2,y} + P/3 = 0 \quad (17)$$

$$\frac{U_1 - (R_s + jX_s) I_1}{jX_m} + \frac{U_1 - (R_s + jX_s) I_1}{j(R_r/s_1 + jX_r)} - I_1 = 0 \quad (18)$$

$$\frac{U_2 - (R_s + jX_s) I_2}{jX_m} + \frac{U_2 - (R_s + jX_s) I_2}{j(R_r/s_2 + jX_r)} - I_2 = 0 \quad (19)$$

其中, $U_{1,x}$ 、 $U_{1,y}$ 、 $U_{2,x}$ 、 $U_{2,y}$ 分别为序电压的实部和虚部; $I_{1,x}$ 、 $I_{1,y}$ 、 $I_{2,x}$ 、 $I_{2,y}$ 分别为序电流的实部和虚部。将式 (18)、(19) 写成实部、虚部的形式, 并整理可得:

$$R_r U_{i,x} - R_r R_s I_{i,x} + (R_r X_s + R_r X_m) I_{i,y} + s_i [(X_s X_r + X_s X_m + X_r X_m) I_{i,x} + (R_s X_r + R_s X_m) I_{i,y} - (X_r + X_m) U_{i,y}] = 0 \quad (20)$$

$$R_r U_{i,y} + R_r R_s I_{i,y} - (R_r X_s + R_r X_m) I_{i,x} + s_i [(X_s X_r + X_s X_m - X_r X_m) I_{i,y} - (R_s X_r + R_s X_m) I_{i,x} + (X_r + X_m) U_{i,x}] = 0 \quad (21)$$

其中, $i = 1, 2$ 。当已知序电压时, 可以通过方程式 (17)、(20)、(21) 求解序电流和转差率。

基于上述方法求解含感应电机模型的配电网潮流时, 需要进行如下改进。

a. 增加感应电机的正序电压、负序电压、正序转差率 (下面简称为转差率) 作为状态变量。

b. 在回路 KVL 方程中 U_s 部分, 异步电机支路对应的位置增加等效电压源, 其值为 $-A_{p1} U_{i,1} - A_{p2} U_{i,2}$, 其中, $p \in \{1, 2, 3\}$ 为该支路对应的相位; A_{p1} 、 A_{p2} 分别为正序和负序分量到三相分量的变换矩阵; $U_{i,1}$ 、 $U_{i,2}$ 为第 i 台异步电机的正序和负序电压。

c. 用回路电流表示异步电机的正序、负序电流, 并代入方程式 (17)、(20)、(21) 中, 和式 (6) — (9) 联立, 用牛顿法进行求解。

3 基于回路电流法的潮流算法

本文所提基于回路电流法的潮流算法的步骤如下。

a. 初始化, 形成配电网详细拓扑图, 从大地顶点开始广度优先遍历图, 形成树枝和连枝, 每一条连枝对应一个基本回路, 基本回路由一条连枝和若干树枝组成 (如图 2 所示), 根据基本回路形成回路矩阵 B , 设置 I_1 、 U_{T1} 、 U_{L1} 、 U_{L2} , 以及 DG 支路电压和异步电

机正序电压、负序电压、转差率的初值。通常电压初值为额定值,电流和转差率初值均为0,并置 $k=1$ 。

b. 计算式(6)~(9)以及DG相关方程式的不平衡量,将计算结果实部和虚部依次排列组成向量设为 Δf 。

c. 计算 Jacobian 矩阵,即式(10),计算结果为 J_{ac} 。

d. 通过计算 $-J_{ac}^{-1}\Delta f$,得到修正量 $\Delta I_1^x, \Delta I_1^y, \Delta U_{T1}^x, \Delta U_{T1}^y, \Delta U_{L1}^x, \Delta U_{L1}^y, \Delta U_{L2}^x, \Delta U_{L2}^y$,以及与DG相关的状态变量的修正量,并更新未知量:

$$\begin{cases} I_1^{k+1} = I_1^k + \Delta I_1^x + j\Delta I_1^y \\ U_{T1}^{k+1} = U_{T1}^k + \Delta U_{T1}^x + j\Delta U_{T1}^y \\ U_{L1}^{k+1} = U_{L1}^k + \Delta U_{L1}^x + j\Delta U_{L1}^y \\ U_{L2}^{k+1} = U_{L2}^k + \Delta U_{L2}^x + j\Delta U_{L2}^y \\ \vdots \end{cases} \quad (22)$$

e. 判断连续2次之间的修正量绝对值是否都小于收敛标准,若是,则结束;否则令 $k = k + 1$ 并返回步骤b。

4 算法特征分析

本文提出的潮流算法具有以下特征:

a. 本文方法采用牛顿法求解,没有对Jacobian矩阵进行简化或近似,算法具有二阶收敛性;

b. 本文方法基于回路电流法建立潮流方程,具有较强的处理环网的能力,对于辐射状和弱环状配电网不需要区别对待、环路解列以及额外的拓扑分析和复杂的节点编号;

c. 在推导过程中没有对 R/X 做任何假设;

d. Jacobian 矩阵中的大部分元素是恒定值,只有非恒阻抗负荷与DG对应的部分是变化的,更新Jacobian的工作量较小;

e. 本文方法能够处理恒电流、恒功率、恒阻抗等类型的负荷,也能够处理异步电机、PV节点等类型的DG,处理PV节点过程中不需要将PV节点转换成PQ节点。

5 算例分析

5.1 基于IEEE 34节点系统构造的算例

IEEE 34节点系统是根据真实的配电网数据建立的。该系统线路很长且负载很轻,具有并联电容,有缺相的现象。由于系统线路长、负载不平衡,该系统可能会存在收敛问题^[14]。图4为34节点系统单线图,表2给出了DG的参数和接入位置,表3设计了5种DG的测试方案,表4给出了含DG的34

节点辐射型配电网的测试结果。由表4可见,在前推回推收敛的情况下,本文方法的迭代次数少于前推回推法。在方案6中出现前推回推法不收敛的情况,该方案用本文方法计算能够收敛。同时,由计算结果的对比可以看出,本文所采用的方法在前推回推法也收敛的情况下,比前推回推法计算速度更快,证明了本文算法的快速性。

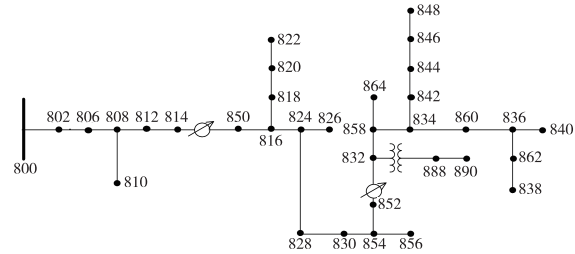


图4 IEEE 34节点配电系统单线图

Fig.4 Single-line diagram of IEEE 34-bus distribution network

表2 IEEE 34节点系统中DG配置

Table 2 DG configuration in IEEE 34-bus system

DG 编号	类型	接入节点	参数
DG ₁	PQ节点	846	Y接,每相额定功率 30+j20 kV·A
DG ₂	恒电流	836	Y接,每相额定功率 30+j20 kV·A
DG ₃	PV节点	860	Y接,每相额定有功 30 kW,
			额定相电压 13.0 kV
DG ₄	异步发电机	848	见文献[15]T ₁ ,G ₁
DG ₅	异步发电机	890	见文献[15]T ₂ ,G ₂

表3 IEEE 34节点系统测试方案

Table 3 Test schemes of IEEE 34-bus system

方案	DG 类型	DG 接入情况
1	PQ节点	仅接入 DG ₁
2	恒电流	仅接入 DG ₂
3	PV节点	仅接入 DG ₃
4	PQ节点+恒电流+PV节点	接入 DG ₁ —DG ₃
5	异步电机	仅接入 DG ₄
6	异步电机	接入 DG ₄ 、DG ₅
7	PQ节点+恒电流+PV节点+异步电机	接入 DG ₁ —DG ₅

表4 基于IEEE 34节点系统的测试结果

Table 4 Test results for IEEE 34-bus system

方案	迭代次数		计算时间/s		偏差范围/V
	前推回推法	本文方法	前推回推法	本文方法	
1	8	4	0.235	0.215	<0.1
2	8	4	0.234	0.229	<0.1
3	8	4	0.206	0.194	—
4	7	4	0.223	0.207	—
5	11	6	0.344	0.245	<1
6	不收敛	6	—	0.250	—
7	不收敛	7	—	0.269	—

为了测试算法处理环路的能力,本文通过合并节点增加环路的方式构造了相应算例。所谓合并是指把2个电压等级相同的节点变成一个节点,并将原来连在2个节点上的设备连到合并后的节点上。对IEEE 34节点系统,将节点822和848合并、节点826和858合并。合并后,原辐射状网络变成含2个环路的网络。该弱环状配电测试系统的DG接入方

案仍与表 3 相同,测试结果如表 5 所示。其中环网方案 6 的异步电机计算结果见表 6,电压计算结果见表 7。由表 5 可见本文方法在测试中收敛次数在 7 次之内,验证了本文方法的有效性。同时,针对配电网中 DG 常见的 PV 节点处理,方案 3 算例中节点 836 接入 PV 型 DG,其节点电压计算结果为 13.00 kV(见表 8),这与额定相电压相同,因此验证了本文对 PV 节点处理的正确性。

表 5 基于 IEEE 34 节点系统的弱环网测试结果

Table 5 Test results of weak loop network for IEEE 34-bus system

方案	本文方法迭代次数	方案	本文方法迭代次数
1	4	5	6
2	4	6	6
3	4	7	7
4	4		

表 6 异步发电机计算结果

Table 6 Calculation results of induction motor

电机	正序电压		负序电压		转差率
	幅值/V	相角/(°)	幅值/V	相角/(°)	
G ₁	252.64	6.9	1.13	123.0	-0.009 66
G ₂	0.22	19.5	1.24	82.1	-0.013 30

表 7 IEEE 34 节点系统环网方案 6 电压计算结果

Table 7 Voltage calculation results for IEEE 34-bus system with loop scheme 6

节点	A 相		B 相		C 相	
	幅值/kV	相角/(°)	幅值/kV	相角/(°)	幅值/kV	相角/(°)
800	14.38	0	14.38	-120.0	14.38	120.0
802	14.35	0.1	14.36	-120.0	14.36	120.1
806	14.33	0.1	14.35	-119.9	14.35	120.1
808	14.00	0.8	14.16	-119.5	14.21	120.8
810	—	—	14.15	-119.5	—	—
812	13.61	1.6	13.95	-119.0	14.04	121.7
814	13.30	2.3	13.79	-118.6	13.90	122.4
816	13.30	2.3	13.79	-118.6	13.90	122.4
818	13.29	2.4	—	—	—	—
820	12.90	3.4	—	—	—	—
824	13.25	2.6	13.71	-118.2	13.85	122.7
828	13.24	2.7	13.71	-118.2	13.84	122.7
830	13.10	3.1	13.69	-118.2	13.72	123.5
832	12.87	3.9	13.68	-118.0	13.53	125.0
834	12.83	3.8	13.67	-118.1	13.50	125.1
836	12.82	3.8	13.65	-118.1	13.49	125.1
838	—	—	13.65	-118.1	—	—
840	12.82	3.8	13.65	-118.1	13.49	125.1
842	12.83	3.8	13.67	-118.0	13.50	125.1
844	12.83	3.8	13.67	-118.0	13.50	125.1
846	12.85	3.8	13.68	-118.0	13.51	125.1
848	12.86	3.8	13.68	-118.0	13.51	125.1
850	13.30	2.3	13.79	-118.6	13.90	122.4
852	12.87	3.8	13.68	-118.0	13.53	125.0
854	13.10	3.1	13.69	-118.2	13.72	123.5
856	—	—	13.69	-118.2	—	—
858	12.84	3.8	13.69	-118.1	13.51	125.1
860	12.82	3.8	13.66	-118.1	13.49	125.1
862	12.82	3.8	13.65	-118.1	13.49	125.1
864	12.84	3.8	—	—	—	—
888	2.01	6.9	2.14	-115.1	2.12	128.0
890	1.92	16.2	2.02	-107.2	2.04	136.8

表 8 IEEE 34 节点系统环网方案 3 电压计算结果

Table 8 Voltage calculation results for IEEE 34-bus system with loop scheme 3

节点	A 相		B 相		C 相	
	幅值/kV	相角/(°)	幅值/kV	相角/(°)	幅值/kV	相角/(°)
800	14.38	0	14.38	-120.0	14.38	120.0
802	14.35	-0.1	14.36	-120.1	14.36	119.9
806	14.34	-0.1	14.35	-120.1	14.35	119.9
808	14.04	-1.2	14.14	-120.8	14.13	119.1
810	—	—	14.13	-120.8	—	—
812	13.70	-2.5	13.91	-121.6	13.89	118.1
814	13.44	-3.6	13.74	-122.3	13.70	117.2
816	13.44	-3.6	13.74	-122.3	13.69	117.2
818	13.42	-3.6	—	—	—	—
820	13.05	-3.6	—	—	—	—
822	13.00	-3.6	—	—	—	—
824	13.37	-4.0	13.62	-122.6	13.60	116.8
826	—	—	13.62	-122.6	—	—
828	13.36	-4.0	13.61	-122.6	13.59	116.8
830	13.22	-4.8	13.41	-123.0	13.39	116.0
832	13.00	-6.3	13.06	-123.8	13.05	114.5
834	12.98	-6.8	13.00	-124.1	13.00	114.1
836	13.00	-6.9	13.00	-124.1	13.00	114.0
838	—	—	13.00	-124.1	—	—
840	13.00	-6.9	13.00	-124.1	13.00	114.0
842	12.98	-6.8	13.00	-124.1	13.00	114.1
844	12.98	-6.8	13.00	-124.1	12.99	114.1
846	12.98	-6.9	13.00	-124.1	13.00	114.0
848	12.98	-6.9	13.00	-124.2	13.00	114.0
850	13.44	-3.6	13.74	-122.3	13.70	117.2
852	13.00	-6.3	13.06	-123.8	13.05	114.5
854	13.22	-4.8	13.41	-123.0	13.38	116.0
856	—	—	13.40	-123.0	—	—
858	12.99	-6.5	13.03	-123.9	13.02	114.3
860	12.99	-6.8	13.00	-124.1	13.00	114.0
862	13.00	-6.9	13.00	-124.1	13.00	114.0
864	12.99	-6.5	—	—	—	—

5.2 基于 IEEE 123 节点系统构造的算例

本节以 123 节点系统为基础,闭合所有开关,通过合并节点来增加环路,构造了含有环的配电网。测试方案与结果如表 9 所示,表中(85,75)表示节点 85 和节点 75 合并,计算时间取 10 次测试的平均值。从表 9 中可以看出,随着环路的增加,本文方法均迭代 4 次之内即可收敛,计算时间在 0.08 s 左右,表现出良好的收敛性和高效的计算性能。

表 9 基于 IEEE 123 节点系统的环状配电网测试结果

Table 9 Test results of loop distribution network based on IEEE 123-bus system

方式	新增合并节点	环路个数	迭代次数	计算时间/s
0	无	0	4	0.054
1	(85,75),(36,57)	3	4	0.078
2	(39,66),(56,90)	5	4	0.074
3	(23,44),(62,101)	7	4	0.079
4	(81,86),(70,100)	9	4	0.085
5	(9,18),(30,47)	11	3	0.071
6	(34,94),(64,300)	13	3	0.081

5.3 基于 33 节点配电系统的算例

本节对文献[16]的 33 节点系统进行测试,该系统包含 37 条支路、5 个环,电压基准值取 12.66 kV,功率基准值取为 10 MV·A,其负荷和线路参数均有明显三相不平衡的情况,结果如表 10 和表 11 所示(表 10 中两者偏差及表 11 中所有数据均为标幺值)。由表可见本文方法计算结果和文献[16]中结

果的偏差在 10^{-3} p.u. 之内,本文方法仅 3 次迭代就能收敛。

表 10 2 种算法收敛性比较

Table 10 Comparison of convergence between two algorithms

方法	迭代次数	两者偏差
本文方法	3	$\leq 10^{-3}$
文献[16]方法	外层不大于 5,内层小于 15	

表 11 33 节点系统潮流计算结果对比

Table 11 Comparison of power flow results for 33-bus system

节点	A 相潮流		B 相潮流		C 相潮流	
	本文方法	文献[16]方法	本文方法	文献[16]方法	本文方法	文献[16]方法
0	1.000 00	1.000 00	-0.500 00-j0.866 03	-0.500 00-j0.866 03	-0.500 00+j0.866 03	-0.500 00+j0.866 03
1	0.997 18+j0.000 20	0.997 18+j0.002 07	-0.498 33-j0.863 71	-0.498 33-j0.863 70	-0.498 78+j0.863 39	-0.498 78+j0.863 39
2	0.986 66+j0.000 70	0.986 66+j0.000 71	-0.492 35-j0.854 98	-0.492 36-j0.854 94	-0.494 00+j0.853 71	-0.494 00+j0.853 70
3	0.983 07+j0.000 75	0.983 06+j0.000 76	-0.490 59-j0.852 08	-0.490 58-j0.852 01	-0.492 28+j0.850 51	-0.492 29+j0.850 52
4	0.979 76+j0.000 74	0.979 75+j0.000 76	-0.488 75-j0.849 05	-0.488 72-j0.848 97	-0.490 63+j0.847 50	-0.490 63+j0.847 53
5	0.972 10-j0.001 13	0.972 08-j0.001 11	-0.486 18-j0.840 95	-0.486 13-j0.840 81	-0.485 06+j0.841 44	-0.485 09+j0.841 51
6	0.971 15-j0.002 67	0.971 13-j0.002 64	-0.487 08-j0.839 22	-0.487 08-j0.839 07	-0.483 29+j0.841 42	-0.483 31+j0.841 48
7	0.970 11-j0.002 95	0.970 09-j0.002 93	-0.486 74-j0.838 11	-0.486 75-j0.837 98	-0.482 51+j0.840 71	-0.482 53+j0.840 75
8	0.967 10-j0.003 34	0.967 08-j0.003 32	-0.485 40-j0.835 04	-0.485 43-j0.834 91	-0.480 59+j0.838 24	-0.480 60+j0.838 25
9	0.966 69-j0.003 71	0.966 68-j0.003 69	-0.485 50-j0.834 42	-0.485 53-j0.834 30	-0.480 24+j0.838 26	-0.480 25+j0.838 27
10	0.966 70-j0.003 75	0.966 69-j0.003 73	-0.485 53-j0.834 39	-0.485 56-j0.834 27	-0.480 18+j0.838 24	-0.480 19+j0.838 25
11	0.966 85-j0.003 85	0.966 83-j0.003 84	-0.485 69-j0.834 44	-0.485 73-j0.834 33	-0.480 11+j0.838 35	-0.480 11+j0.838 36
12	0.963 70-j0.003 75	0.963 68-j0.003 74	-0.483 91-j0.831 58	-0.483 96-j0.831 46	-0.478 31+j0.835 32	-0.478 31+j0.835 32
13	0.962 61-j0.003 92	0.962 59-j0.003 91	-0.483 48-j0.830 42	-0.483 54-j0.830 29	-0.477 42+j0.834 39	-0.477 42+j0.834 38
14	0.962 39-j0.003 80	0.962 37-j0.003 78	-0.483 20-j0.830 14	-0.483 27-j0.830 01	-0.477 30+j0.834 00	-0.477 29+j0.833 98
15	0.960 61-j0.003 55	0.960 59-j0.003 54	-0.481 92-j0.828 72	-0.482 00-j0.828 60	-0.476 66+j0.832 21	-0.476 65+j0.828 95
16	0.957 13-j0.003 72	0.957 11-j0.003 71	-0.479 96-j0.825 58	-0.480 08-j0.825 46	-0.474 86+j0.829 03	-0.474 83+j0.828 95
17	0.955 99-j0.003 28	0.955 98-j0.003 26	-0.478 86-j0.824 88	-0.478 99-j0.824 76	-0.474 76+j0.827 75	-0.474 72+j0.827 65
18	0.995 48-j0.000 06	0.995 47-j0.000 05	-0.497 66-j0.862 08	-0.497 66-j0.862 06	-0.497 72+j0.862 01	-0.497 72+j0.862 01
19	0.981 49-j0.001 52	0.981 48-j0.001 51	-0.491 48-j0.848 88	-0.491 49-j0.848 81	-0.489 42+j0.850 13	-0.489 42+j0.850 15
20	0.977 58-j0.002 37	0.977 56-j0.002 35	-0.490 13-j0.844 93	-0.490 14-j0.844 84	-0.486 74+j0.847 06	-0.486 75+j0.847 07
21	0.974 04-j0.003 34	0.974 03-j0.003 33	-0.489 08-j0.841 15	-0.489 11-j0.841 05	-0.484 14+j0.844 42	-0.484 14+j0.844 43
22	0.981 39+j0.000 47	0.981 38+j0.000 48	-0.489 57-j0.850 15	-0.489 60-j0.850 09	-0.491 10+j0.849 00	-0.491 09+j0.848 97
23	0.971 13-j0.000 63	0.971 12-j0.000 62	-0.484 71-j0.840 37	-0.484 81-j0.840 29	-0.484 83+j0.840 16	-0.484 80+j0.840 07
24	0.963 97-j0.000 94	0.963 96-j0.000 93	-0.480 94-j0.833 93	-0.481 10-j0.833 82	-0.481 10+j0.834 00	-0.481 04+j0.833 86
25	0.971 14-j0.000 98	0.971 13-j0.000 96	-0.485 02-j0.840 21	-0.485 43-j0.840 03	-0.484 89+j0.840 88	-0.484 74+j0.840 53
26	0.969 95-j0.000 76	0.969 93-j0.000 73	-0.484 13-j0.839 22	-0.484 52-j0.839 05	-0.484 47+j0.839 61	-0.484 32+j0.838 28
27	0.965 05-j0.000 93	0.965 04-j0.000 91	-0.481 51-j0.834 63	-0.481 79-j0.834 49	-0.481 71+j0.835 01	-0.481 60+j0.834 77
28	0.961 73-j0.000 88	0.961 71-j0.000 86	-0.479 58-j0.831 65	-0.479 78-j0.831 53	-0.479 97+j0.831 77	-0.479 89+j0.831 60
29	0.958 79+j0.000 15	0.958 78+j0.000 17	-0.476 88-j0.829 41	-0.474 07-j0.829 29	-0.479 42+j0.828 33	-0.479 34+j0.828 17
30	0.955 86-j0.001 91	0.955 85-j0.001 89	-0.477 32-j0.825 53	-0.477 49-j0.825 41	-0.475 96+j0.826 74	-0.475 89+j0.826 61
31	0.955 32-j0.002 51	0.955 31-j0.002 49	-0.477 63-j0.824 72	-0.477 79-j0.824 60	-0.475 16+j0.826 64	-0.475 10+j0.826 52
32	0.955 53-j0.002 88	0.955 52-j0.002 87	-0.478 16-j0.824 70	-0.478 31-j0.824 58	-0.474 91+j0.827 08	-0.474 86+j0.826 97

目前常见的环路处理方法大多需要利用前推回推法求解辐射状网络的潮流^[9,16-18]。本文在 33 节点系统的节点 17 处接入了变压器 T_1 和风机 G_1 ,并在文献[16]中合环点处将环路解列,构造了含 DG 的辐射型网络算例。算例中 T_1 的参数为:750 kV·A,12.66 kV/0.48 kV, $Z_{T1}=1+j5\%$; G_1 参数与文献[15]中相同。对于解环后的网络,表 12 给出了风机有功出力变化时 2 种算法的收敛性对比。可以看出,当出力增加时,前推回推法不再收敛,意味着传统处理弱环网的潮流算法将失效,而本文方法均能较快

表 12 解环后 33 节点系统 2 种算法收敛性比较

Table 12 Comparison of convergence between two algorithms after loop splitting of 33-bus system

方法	迭代次数			
	出力 300 kW	出力 400 kW	出力 500 kW	出力 660 kW
本文方法	5	5	5	5
前推回推法	8	8	不收敛	不收敛

收敛。

5.4 基于 69 节点配电系统的算例

本节对文献[17]和文献[9]中所述的美国 PG&E 69 节点配电系统进行了计算分析。对文献

[17]中所述的6种运行方式,利用本文方法进行仿真计算。通过闭合联络开关,改变网络中的回路数,测试结果如表13所示。从表13中可以看出,随着回路数的增加,本文方法迭代次数均为4次。本文方法计算时间在0.28 s左右,文献[17]的计算时间在0.3~0.4 s之间。表14给出了文献[9]中的算例仿真方案,其方案1—6分别对应在节点88、46、14、52、34、23接入额定有功功率为200、300、250、300、200、250 kW的PV节点。从表14中可以看出,本文方法迭代次数在5次以内,能够快速有效地处理含PV节点的配电网。文献[17]和文献[9]所采用的基于回路分析法的潮流算法是一种收敛性好且计算速度十分迅速的潮流计算方法,与之相比,本文方法具有更少的迭代次数,计算速度较快,不失为一种良好的潮流计算方法。

表13 基于PG&E 69节点系统的环状配电网测试结果

Table 13 Test results of loop distribution network based on PG&E 69-bus system

方式	打开的联络开关	本文方法耗时/s	迭代次数	
			本文方法	文献[17]方法
1	12-20,10-70,14-90,26-54,38-48	0.281	4	7
2	12-20,10-70,14-90,26-54	0.278	4	7
3	12-20,10-70,14-90	0.282	4	7
4	12-20,10-70	0.279	4	7
5	12-20	0.275	4	6
6	无	0.269	4	5

表14 基于PG&E 69节点系统的含PV节点的环状配电网测试结果

Table 14 Test results of loop distribution network with PV node based on PG&E 69-bus system

方式	打开的联络开关	PV节点接入方案	迭代次数	
			本文方法	文献[9]方法
1	全部闭合	1—6	4	5
2	全部闭合	—	4	4
3	全部打开	1—6	5	7
4	26-54,38-48	1—3	5	6
5	全部打开	1—3	5	6
6	26-54,38-48	—	4	6

6 结论

随着对供电可靠性要求的提高和对绿色能源的进一步利用,配电系统逐渐接入了风机等各种DG,并出现弱环网运行的现象,这给配电网潮流计算带来了新的困难。目前最常见的前推回推法处理回路的能力比较弱,环路增加到一定数目会出现不收敛问题。同时,目前常见的回路电流法大多需要计算节点注入电流,对于主动配电网中各类复杂的DG

模型计算注入电流较为困难,且没有通用的计算方法。为此本文提出了一种基于回路电流法的配电网三相潮流算法,并提出了异步电机模型等多种DG模型的处理方法,不受配电网三相不平衡的影响,且无需确定环路解列点,解决了用该方法求解含DG主动配电网潮流的问题,通用性较强。综上所述,本文方法收敛性好,迭代次数少,计算速度快,对于环路的处理能力强,并且能够处理所有常见的DG模型,在配电网潮流计算方面具有一定的优越性。

参考文献:

- [1] RAJICIC D, BOSE A. A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 743-746.
- [2] WANG L, XIANG N, WANG S, et al. Novel decoupled power flow [J]. IEEE Proceedings C, 1990, 137(1): 1-7.
- [3] VAN AMERONGEN R. A general-purpose version of the fast decoupled load flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 2(3): 760-770.
- [4] 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.
- [5] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems [J]. Proceedings of IEE Part C, 1991, 138(1): 78-88.
- [6] SHIRMOHARNADI 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(2): 753-762.
- [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] FARAG H E, EL-SAADANY E F, EL SHATSHAT R, et al. A generalized power flow analysis for distribution systems with high penetration of distributed generation [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1499-1506.
- [9] 李红伟, 张安. 含PV型分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 128-135.
LI Hongwei, ZHANG An'an. Three-phase power flow solution for weakly meshed distribution system including PV type distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 128-135.
- [10] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827.
- [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] 丁明, 郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 35-40.
DING Ming, GUO Xuefeng. Three-phase power flow for the weakly meshed distribution network with the distributed generation [J].

- Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 35-40.
- [13] KERSTING W H. Distribution system modeling and analysis [M]. New York, USA: CRC Press, 2002: 201-213.
- [14] Distribution Test Feeder Working Group. Distribution test feeders [EB/OL]. (2013-08-05) [2016-01-12]. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>.
- [15] DUGAN R C, KERSTING W H. Induction machine test case for the 34-bus test feeder-description [C] // Power Engineering Society General Meeting, [S.l.]: IEEE, 2006: 1-15.
- [16] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 74-79.
- CHE Renfei, LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 74-79.
- [17] 吴文传, 张伯明. 配网潮流回路分析法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 67-71.
- WU Wenchuan, ZHANG Boming. Study on loop analysis theorem of distribution system power flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 67-71.
- [18] 祁晓枫, 王承民, 孙伟卿, 等. 适用于配电网潮流计算的改进回路电流法[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 60-64.
- QI Xiaofeng, WANG Chengmin, SUN Weiqing, et al. An improved loop current analysis suitable to power flow calculation of distribution network [J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 60-64.
- [19] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Study on convergence of back/forward sweep distribution power flow [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.

作者简介:



董树锋

董树锋(1982—),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向为状态估计和有源配电网分析(E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn);

章杜锡(1983—),男,浙江苍南人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统工作(E-mail: temple_zju@163.com);

周飞(1987—),男,浙江余姚人,工程师,硕士,主要从事电力调度自动化工作(E-mail: 285653801@qq.com)。

Loop-current method based power flow algorithm for active distribution network

DONG Shufeng¹, ZHANG Duxi², ZHOU Fei², CAO Zhikun², HE Zhongxiao¹, SONG Yonghua¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Ningbo Electric Power Bureau, Ningbo 315016, China)

Abstract: A three-phase power flow algorithm for active distribution network based on loop-current method is proposed, in which, the calculation models of various distributed generations, such as wind turbines, etc. are built. The graph of distribution network is constructed, while the loop KVL equations, transformer winding current equations, load power balance equations, and distributed generation relevant equations are formulated, which take the fundamental loop current, transformer primary winding voltage, branch voltage of non-constant impedance load, branch voltage of dispersed generation, positive and negative voltages of induction motor, and slip as unknown quantities. The Jacobian matrix is derived and Newton method is adopted to solve the equations. The process of PV node transferring to PQ node, loop splitting and complex node numbering; and simplification and approximation of Jacobian matrix are not needed in the proposed method, and it is of quadratic convergence. Cases show that, the proposed method can handle all common distributed generations and loop circuits with fast calculation speed, and has better convergence than the forward-backward sweep method.

Key words: active distribution network; three-phase power flow calculation; loop current method; distributed generation; quadratic convergence