

doi: 10.7690/bgzdh.2013.09.014

配电网 PQ 和 PV 节点的潮流算法

徐恒娇, 王洪诚, 许瑾, 马鹏宇, 赵子龙

(西南石油大学研究生学院, 成都 610500)

摘要: 针对传统配电网潮流算法难以满足分布式发电系统潮流计算的要求, 提出一种三相不平衡配电网潮流直接算法。该算法是基于回路分析法生成的道路矩阵, 推导出一种简单的利用阻抗矩阵计算潮流的直接方法, 推导了 PV 节点网络的有功电流和无功电流关系, 提出一种新的处理 PV 类型分布式电源 (DG) 的方法, 将其方法引入到潮流算法中, 利用 Matlab 编程得出计算结果。实例结果表明: 该算法计算思路清晰, 编程简单, 具有实用和参考价值。

关键词: 配电网; 潮流算法; PV 节点

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Power Flow Algorithm of Distribution Network's PQ and PV Node

Xu Hengjiao, Wang Hongcheng, Xu Jin, Ma Pengyu, Zhao Zilong

(College of Graduate, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: As traditional distribution power flow algorithm is difficult to meet the requirements of the trend of distributed power generation systems, and directly to a three-phase unbalanced distribution power flow algorithm. Road matrix generated based on circuit analysis matrix, derives a direct method for the use of a simple calculation of the trend of the impedance. Based on the characteristics of the PV node model, and deriving the PV node network active current and reactive current relationship, and a new processing PV type distributed power (DG) method, the method is a very simple introduction to the proposed three-phase flow calculation, and uses Matlab programming to come to the calculation result. Examples Result shows that the algorithm computational thinking is clear, with simple programming and good versatility.

Key words: distribution network; power flow algorithm; PV node

0 引言

相对于传统的集中式电源而言, 分布式电源是指规模不大、分布在负荷附近的电源。目前, 分布式发电技术在全球的发展很快^[1], 但传统的配电网潮流算法则难以满足含分布式发电系统潮流计算的要求, 必须对现有的配电网潮流算法进行改造和调整^[2]; 因此, 笔者提出一种三相不平衡配电网潮流直接算法, 并推导出一种简单的利用阻抗矩阵计算潮流的直接方法。

1 不平衡负荷的潮流计算方法

1.1 道路矩阵的定义

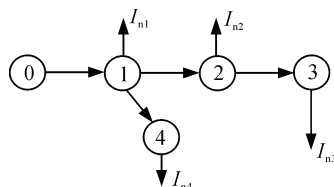


图 1 一简单配电网

一个节点的道路是指节点沿树到根所经过的路径上的支路集合, 对于一个给定的树, 节点的道路是唯一的^[3]。用道路矩阵 T 描述道路, 针对单相配

电网, $T(i, j)$ 是一个 $n \times n$ 阶矩阵, 假定道路的方向都是从电源点指向各节点, 各支路方向与道路方向相同, 则如果支路 j 在道路 i 上, $T(i, j)=1$, 反之 $T(i, j)=0$ 。道路矩阵的建立如图 1。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 基于道路矩阵的潮流算法

1.1 节中介绍的道路矩阵 T 是一个稀疏下三角阵, 利用稀疏技术可以降低内存需求。设定支路电流为 I_b ($n \times 1$ 阶), 依据 KCL 电流定律, 支路电流与节点注入电流满足 (T' 表示道路矩阵转置):

$$I_b = T'I_n \quad (2)$$

式 (2) 基于道路矩阵给出了 I_b 、 I_n 之间的关联。对任一放射性配电网, 基于欧姆定律有:

$$V_b = Z_b I_b \quad (3)$$

设电源节点电压为 V_0 (1×1 阶), 各节点电压为 V ($n \times 1$ 阶), 则可知任一节点与电源节点的电压差等于从此节点开始沿着该节点所在道路到达电源节

收稿日期: 2013-03-20; 修回日期: 2013-04-27

基金项目: 西南石油大学 (2012—2015) 学科建设专项基金

作者简介: 徐恒娇 (1988—), 女, 四川人, 硕士, 从事电力系统及其自动化、控制科学与工程研究。

点所经过支路的支路电压之和, ($U=[1,1,\dots,1]^T$, 共 n 个):

$$\Delta V = UV_0 - V = TV_b = TZ_b I_b = TZ_b T' I_g \quad (4)$$

各节点电压 V 为

$$V = UV_0 - \Delta V \quad (5)$$

1.3 计算步骤

式 (4) 是该算法的核心, 其潮流计算步骤为 (k 为迭代次数变量):

步骤 1: 取 $V^0 = V_0 U$;

步骤 2: 计算 $I_{gpi}^k = (S_{pi} / V_{pi}^{k-1})^*$;

步骤 3: 基于式 (4) 计算 ΔV^k ;

步骤 4: 基于式 (5) 计算 V^k ;

步骤 5: 判断 V^k 和 V^{k-1} 之差是否满足精度要求, 满足结束迭代, 不满足转步骤 2。

1.4 简单算例分析

一简单放射式配电网, 如图 2 所示的 8 节点配电网系统, 计算结果如表 1 所示。笔者采用标么值计算 (误差精度为 $1e-5$), 输出的结果以有名值的形式表示。测试算例系统中, 基准容量为 10 MVA, 基准电压为 12.47 kV^[4]。计算的节点为 PQ 节点, 负荷有功功率和无功功率是已知的。结果如表 1。

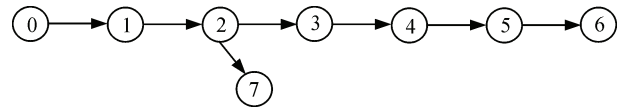


图 2 8 节点放射式系统

表 1 各节点电压值

节点	电压					
	A 相		B 相		C 相	
	幅值	相位	幅值	相位	幅值	相位
1	1.0e+003 * 7.035 9	-0.999 2	1.0e+003 * 6.896 5	-120.610 9	1.0e+003 * 6.654 3	116.135 9
2	1.0e+003 * 6.874 6	-2.045 7	1.0e+003 * 6.594 3	-121.277 8	1.0e+003 * 6.144 6	111.607 1
3	1.0e+003 * 6.766 9	-2.795 3	1.0e+003 * 6.410 5	-121.683 7	1.0e+003 * 5.805 2	108.409 6
4	1.0e+003 * 6.660 5	-3.569 1	1.0e+003 * 6.227 0	-122.113 5	1.0e+003 * 5.486 1	104.828 0
5	1.0e+003 * 6.615 3	-4.006 4	1.0e+003 * 6.135 4	-122.294 3	1.0e+003 * 5.327 1	102.857 1
6	1.0e+003 * 6.615 3	-4.006 4	1.0e+003 * 6.135 4	-122.294 3	1.0e+003 * 5.327 1	102.857 1

2 含分布式电源的配电网潮流算法

2.1 含分布式电源的潮流算法

在含分布式电源的配电网中, 难处理的是 PV 节点, 它的有功功率 P 恒定, 电压幅值 V 恒定^[5-6]。笔者采用开环阻抗矩阵 (戴维南等效阻抗矩阵) 来处理 PV 节点, 从道路矩阵中把各 PV 节点所在的道路行向量拿出来, 组成一个新的矩阵 T_d , 则有:

$$Z_d = T_d Z_b T_d' \quad (6)$$

把各 PV 节点开环后, 配电网仍是一个放射网络, 所以包含 PV 节点的配电网潮流计算过程与 1.2 节所述过程类似。先要建立道路矩阵, 由于 1.2 节已经阐述了道路矩阵的定义, 这里不过多讨论。将含有 DG 分布式电源的节点都看成 PV 节点, PV 节点有功功率已知, 无功初始值可选为零。每相注入电流可用式 (7) 计算:

$$I_{dp} = -\left(\frac{P_s + jQ}{3V_d}\right)^* \quad (7)$$

式中: $p=a,b,c$ (下同); V_d 表示 PV 节点给定电压 \dot{V}_d 的幅值, 负号表示 PV 节点是对外输出功率。

PV 节点电压幅值为常量, 假定开环点两侧具有相同的相角, 则第 i 个 PV 节点的开环 ΔV_{dpi}^k 可在第 k 次迭代时用式 (8) 计算:

$$\Delta V_{dpi}^k = (V_{dpi} - V_{dpi}^k) e^{j\theta_{dpi}^k} \quad (8)$$

其中: V_{dpi} 为 PV 节点预给定值幅值; V_{dpi}^k 为开环点当前电压 V_{dpi}^k 的幅值; θ_{dpi}^k 为 V_{dpi}^k 的相角。 ΔI_d 、 ΔV_d 、 Z_d 可以表示为:

$$\Delta V_d = \Delta e + j\Delta f \quad (9)$$

$$\Delta I_d = \Delta c + j\Delta d \quad (10)$$

$$Z_d = R_d + jX_d \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} X_d & R_d \\ -R_d & X_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta d \\ \Delta c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (12)$$

k 次迭代后, 第 i 个 PV 节点视在功率的改变量:

$$\Delta S_{dpi}^{k+1} = V_{dpi} e^{j\theta_{dpi}^k} (\Delta I_{dpi}^k)^* = V_{dpi} e^{j\theta_{dpi}^k} (\Delta c_{dpi}^k - j\Delta d_{dpi}^k) \quad (13)$$

整理可得:

$$\Delta P_{dpi}^{k+1} = \text{Re}(\Delta S_{dpi}^{k+1}) = V_{dpi} (\cos(\theta_{dpi}^k) \Delta c_{dpi}^k + \sin(\theta_{dpi}^k) \Delta d_{dpi}^k) \quad (14)$$

Re 表示取实部, 因为 PV 节点有功功率为常数, 即 $\Delta P_{dpi}^{k+1} = 0$, 带入式 (14) 可得:

$$\Delta c_{dpi}^k = -\Delta d_{dpi}^k \tan(\theta_{dpi}^k) \quad (15)$$

而无功增加量 (Im 表示取虚部) 为:

$$\Delta Q_{dpi}^{k+1} = \text{Im}(\Delta S_{dpi}^{k+1}) = V_{dpi} (\sin(\theta_{dpi}^k) \Delta c_{dpi}^k - \cos(\theta_{dpi}^k) \Delta d_{dpi}^k) \quad (16)$$

把式 (15) 带入式 (16) 可得：

$$\Delta Q_{dpi}^{k+1} = -\Delta d_{dpi}^k V_{dpi} (\sin(\theta_{dpi}^k) \tan(\theta_{dpi}^k) + \cos(\theta_{dpi}^k)) = \Delta d_{dpi}^k V_{dpi} / \cos(\theta_{dpi}^k) \quad (17)$$

分别求出第 i 个节点三相无功增量后，可得总的无功增量为

$$\Delta Q_{di}^{k+1} = \Delta Q_{dai}^{k+1} + \Delta Q_{dbi}^{k+1} + \Delta Q_{dci}^{k+1} \quad (18)$$

在第 $k+1$ 次迭代时，第 i 个 PV 节点的无功功率为

$$Q_{di}^{k+1} = Q_{di}^k + \Delta Q_{di}^{k+1} \quad (19)$$

然后带入式 (7)，求得 PV 节点新的注入电流，开始下一次迭代。忽略式 (12) 中的 Δc ，则由式 (12) 可得：

$$X_d(-\Delta d^k) = \Delta e^k \quad (20)$$

其中：

$$X_d = T_d X_b T_d' \quad (21)$$

$$\Delta e_{dpi}^k = \text{Re}(\Delta V_{dpi}^k) = (V_{dpi}^k - V_{dpi}^k) \cos(\theta_{dpi}^k) \quad (22)$$

2.2 含 PV 节点时三相潮流计算步骤

其潮流计算步骤如下 (k 为迭代次数变量)：

步骤 1：取 $V^0 = V_0 U$ ，无功功率初值 $Q=0$ ，PV 节点的电压差初值为零；

步骤 2：计算 PV 节点开环等值阻抗；

步骤 3：计算 $I_{gpi}^k = (S_{pi} / V_{pi}^{k-1})^*$ ；

步骤 4：基于式 (7) 计算 PV 注入电流，将 PV 注入电流合并入支路；

步骤 5：基于式 (4) 计算 ΔV^k ，基于式 (5) 计算 V^k ；

步骤 6：计算 PV 节点电压后，基于式 (22) 算出 PV 节点的电压差；

判断 PV 节点电压差之差是否满足精度要求，满足结束迭代，不满足转步骤 4。

2.3 算例分析

图 3 所示为 6 母线三相不平衡系统，变压器 Yn-Yn 接线，在母线 3 和 5 接入 2 个 PV 型分布式电源，线路单位长度阻抗参数与其他线路相同。PV1 和 PV2 有功功率分别为 120 kW 和 150 kW，并假定其无功输出无界。计算结果见表 2。

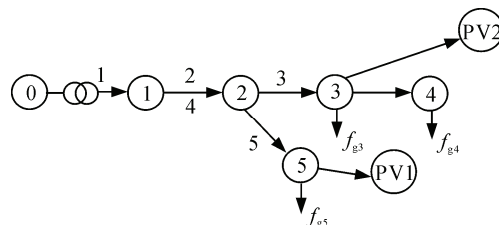


图 3 6 母线 2PV 系统

表 2 6 母线 2PV 系统计算结果

节点	无 PV 投入			投入 PV1			投入 PV1~2		
	Va	Vb	Vc	Va	Vb	Vc	Va	Vb	Vc
1	0.997 33	0.997 07	0.997 70	0.999 72	0.999 46	1.000 06	1.000 24	1.000 00	1.000 60
2	0.979 03	0.979 69	0.985 69	0.992 78	0.991 90	0.999 08	0.997 17	0.995 33	1.002 83
3	0.966 23	0.962 00	0.975 51	0.980 13	0.974 43	0.989 08	0.993 68	0.985 44	1.001 28
4	0.963 04	0.958 40	0.973 34	0.976 98	0.970 87	0.986 95	0.990 58	0.981 91	0.999 19
5	0.971 02	0.976 61	0.982 05	0.996 04	0.998 49	1.006 34	0.996 93	0.998 67	1.006 46
PV1	—	—	—	0.998 82	1.000 90	1.009 04	0.998 82	1.000 26	1.008 25
PV2	—	—	—	—	—	—	0.994 88	0.986 42	1.002 39

根据上述结果可以看出：投入 PV 后对各节点电压起到了很好的支撑作用，尤其投入 2 个 DG 后，最大电压偏差不超过 2%，系统各节点电压得到了极大改善。

3 结论

笔者首先对分布式发电系统中的相关模型作了简单介绍，然后重点研究了 PV 类型 DG 节点的处理方法，并把其引入到所提潮流算法中，最后通过算例验证了基于道路法进行含分布式系统的潮流计算结果的可行性及其收敛效率。实例结果证明：该算法计算思路清晰，编程简单。

参考文献：

[1] 黄丽娟, 王守相. 分布式发电系统的三相潮流计算方法

[D]. 天津大学硕士论文, 天津大学: 黄丽娟, 2007: 1-2.
 [2] 彭谦, 杨以涵, 姜彤. 电力系统稳态高斯算法的研究 [D]. 华北电力大学博士学位论文, 华北电力大学: 彭谦, 2009: 1-2
 [3] 王明岗, 毕睿华. 基于前推后代法解决环网的配电网潮流计算[J]. 南京工程学院学报: 自然科学版, 2005, 3(1): 6-8.
 [4] 杨建, 周绪利, 彭世忠. 交流伺服系统高精度电流矢量控制[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 81-82.
 [5] 张学松, 柳焯, 于尔铿, 等. 配电网潮流算法比较研究 [J]. 电网技术, 1998, 22(4): 3.
 [6] SarikaKhushalani, JigneshM. Solanki, Noel.Schulz. Development of Three-Phase Unbalanced Power Flow Using PV and PQ Models for Distributed Generationand Study of the Impact of DG Models[J]. IEEE Transactions on power systems, 2007, 22(3): 3-4.