

一种配电网 Zbus 潮流算法

高金辉, 张兰杰

(河南师范大学 物理与电子工程学院; 河南省光伏材料重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:针对 Zbus 高斯算法处理配电网 PV 节点能力弱、计算量大, 忽略平衡节点的三相不对称问题, 提出一种新的配电网 Zbus 潮流算法。该算法从基于叠加原理的改进 Zbus 算法出发, 用补偿法处理 PV 节点, 对网络方程进行虚实部分解, 得到简单的雅克比矩阵; 通过引入内电势节点来处理平衡节点处的三相电压不平衡问题。算例分析表明该算法计算速度快, 收敛性和稳定性较好, 克服了 Zbus 高斯算法的弱点。

关键词: PV 节点; 三相电压不平衡; 改进 Zbus 算法; 补偿法; 虚实部分解

中图分类号: TM744

文献标志码: A

目前, 在配电网^[1]三相潮流计算问题上, 国内外学者进行了较多研究, 出现了多种算法。具有代表性的有前推回代法、牛顿法和 Zbus 高斯法等。前推回代法收敛好, 迭代次数相对较少, 简单容易实现, 但不能很好地解决配电网环网问题。牛顿法收敛性优于前推回代法, 但处理环网问题能力较弱、效率较低且计算量很大。改进的 Zbus 高斯法, 忽略平衡节点处的三相不对称问题, 能很好地处理配电网环网问题, 当系统中只有松弛节点作为电压节点时, 收敛性能几乎和牛顿法一样优越, 但处理 PV 节点能力弱, 计算量大。

为此, 本文介绍一种改进 Zbus 潮流算法。该算法在改进 Zbus 算法基础上, 对网络方程进行虚实部分解, 得到较为简单的雅克比矩阵, 通过修改雅克比矩阵的元素补偿 PV 节点的不匹配量, 很好处理了 PV 节点, 求解过程简单方便; 且在平衡节点处引入内电势点, 有效处理了平衡节点的三相不对称问题。

1 Zbus 高斯算法介绍

配电网可以看作是线性网络, 网络中各节点电压有 2 部分作用^[2-3]: 1) 根节点(一般把它作为平衡节点)的作用, 它等效成电压源; 2) 配电网负荷的作用, 它转化成注入电流, 等效成电流源。根据叠加原理, 当根节点电压单独作用时, 所有的电流源都从网络中移走, 得到节点电压 V_{k_1} , 而当所有电流源作用时, 根节点与地短接, 此时节点电压为 V_{k_2} , 则网络中节点 k 的实际电压为 $V_k = V_{k_1} + V_{k_2}$ 。

假设存在一个含 n 节点的配电网, s 为平衡节点。则节点导纳矩阵 Y 为 $n \times n$ 维, 各节点电压电流矢量 U 和 I 为 $n \times 1$ 维。Zbus 高斯法在忽略平衡节点三相电压不对称的基础上, 推导出网络迭代方程

$$V_n^{i+1} = Y_n^{-1}(I_n^i - Y_{n_0} V_n^i) + E \times V_s, \quad (1)$$

式中

$$E \times V_s = V_{n_2}; Y_n^{-1}(I_n^i - Y_{n_0} V_n^i) = V_{n_1}^{i+1}, \text{ 则 } I_n^i - Y_{n_0} V_n^i = Y_n V_{n_1}^{i+1} \quad (2)$$

利用线性方程组的三角分解法求出(2)中的 $V_{n_1}^{i+1}$, 代入(1)式即可得到各节点的电压 V_n^{i+1} 。

2 改进 Zbus 潮流算法

2.1 PV 节点的处理

在典型的配电网中, 有时会出现暂时的双电源或闭环情况, 当两馈线闭合出现双电源运行时, 一般将其

收稿日期: 2015-03-25; 修回日期: 2015-09-19.

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(102102310041)

第 1 作者简介: 高金辉(1962-), 男, 河南南阳人, 河南师范大学教授, 研究方向为微电网, 光伏发电系统等。

通信作者: 张兰杰, E-mail: zhanglanjie2012@163.com.

中一个电源当作 PV 节点. 此时, PV 节点的注入电压不能由(1)式求解, 本文通过补偿技术进行特殊处理, 即 $V_n^{n+1} = V_n^n + \Delta U^n$. 由 Zbus 算法三相复电流不匹配公式, 结合虚实部分解法^[4] 得到

$$\begin{cases} \Delta I_{r_i,s}^n = \frac{U_{r_i,s}^n \Delta P_{i,s}^n + U_{m_i,s}^n \Delta Q_{i,s}^n}{U_{r_i,s}^{n,2} + U_{m_i,s}^{n,2}}, \\ \Delta I_{m_i,s}^n = \frac{U_{m_i,s}^n \Delta P_{i,s}^n + U_{r_i,s}^n \Delta Q_{i,s}^n}{U_{r_i,s}^{n,2} + U_{m_i,s}^{n,2}}, \end{cases} \quad (3)$$

对(3)式采用牛顿法得电压电流偏差量计算公式

$$\Delta I = Y' \Delta U, \quad (4)$$

式中: $\Delta I = \begin{bmatrix} \Delta I_{m_i,s}^n \\ \Delta I_{r_i,s}^n \end{bmatrix}_{1 \times n}$, $Y' = [Y_{ij}]_{n \times n}$, $\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_{r_i,s}^n \\ \Delta U_{m_i,s}^n \end{bmatrix}_{1 \times n}$. 上式雅克比矩阵 Y' 结构类似于节点导纳矩阵 Y , 所有非对角元素可直接由节点导纳矩阵元素得到, 迭代时修改少量元素即可, 节省计算时间. 且 Y' 为对称阵, (4)式利用 LDL^T 分解法可得电压修正量 ΔU_i^n .

若网络中有一个 PV 节点, 设该节点为 k , 电压幅值恒定为 V , 补偿该节点的电压值使其满足需要, 相应的该节点电流矢量变为 $I_k' = I_k^n + \Delta I_k^n$, ΔI_k^n 为电流修正量, 则: $Y_{ij} \Delta I_k^n = \Delta U_k^n$, 又由 PV 节点的: $\Delta P_k^n = 0$.

对两式引入(3), 得到 PV 节点的电流不匹配量计算公式

$$\begin{cases} \Delta I_{r_i,s}^{n'} = \frac{U_{m_i,s}^n \Delta Q_{i,s}^n}{U_{r_i,s}^{n,2} + U_{m_i,s}^{n,2}}, \\ \Delta I_{m_i,s}^{n'} = \frac{U_{m_i,s}^n \Delta Q_{i,s}^n}{U_{r_i,s}^{n,2} + U_{m_i,s}^{n,2}}, \end{cases} \quad (5)$$

及电流电压不匹配量关系

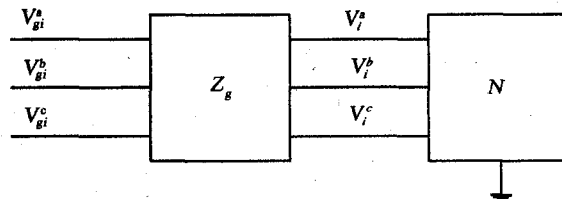
$$\Delta I' = Y'' \Delta U', \quad (6)$$

式中, $\Delta I' = \begin{bmatrix} \Delta I_{m_i,s}^{n'} \\ \Delta I_{r_i,s}^{n'} \end{bmatrix}_{1 \times n}$, $Y'' = [Y_{ij}']_{n \times n}$, $\Delta U' = \begin{bmatrix} \Delta U_{r_i,s}^{n'} \\ \Delta U_{m_i,s}^{n'} \end{bmatrix}_{1 \times n}$.

式(6)的雅克比矩阵 Y'' 中 0 元素增多, 迭代时需要更新的矩阵元素减少. 利用(6) 求出补偿后的电压不匹配量, 计算无功修正量更新 PV 节点的无功注入功率, 继续进行迭代, 很好地处理了 PV 节点, 并大大减少了计算量. 迭代时, 经过修正计算的无功功率若出现越界直接转化成 PQ 节点.

2.2 三相平衡节点的处理

在处理平衡节点时, 本文认为其三相电压不对称, 在网络方程变量中引入平衡节点的电压, 并对其进行相应的计算. 取平衡节点的 c 相电压为系统的基准电压, a, b 两相作为待求变量参加计算. 在平衡节点处引入发电机内电势节点^[5], 内节点记入后的网络如图 1. 增加内电势节点后, 平衡节点变为一个中间节点, 其三相注入功率都为零.



V_{gi} 为前后两节点间电压降, Z_g 为引入节点.

图1 引入内节点的系统结构示意图

在平衡节点引入内节点 g_i 后, i 点的 c 相电压、三相复功率变为已知量: c 相电压为基准电压, 三相复功率: $S_{a_i} = 0; S_{b_i} = 0; S_{c_i} = 0$. 由于发电机内部结构对称, g_i 点的 a, b 相电压可以由 c 相电压完全表示, 即:

$$V_{a_{g_i}} = V_{b_{g_i}} = V_{c_{g_i}}; \theta_{b_{g_i}} = \theta_{c_{g_i}} - \frac{2\pi}{3}; \theta_{a_{g_i}} = \theta_{c_{g_i}} + \frac{2\pi}{3}. \quad (7)$$

与常规 Zbus 高斯算法不同, 本文考虑了平衡节点的三相不对称问题, 通过引入内节点对平衡节点 i, a

和 b 两相分别列出了功率方程及对应的电压变量,在式(7)基础上容易得出平衡点的雅可比元素,并纳入网络方程进行相应的求解.

2.3 算法的实例分析

采用 MATLAB2012a 对图 2 中的上述算法进行验证,并对图 3 所示的 30 节点的配电网计算. 设 1 为平衡节点且节点电压为 1.05 pV,支路信息如文献^[6],收敛精度取 10^{-5} pV,分析以下 2 种情况,验证算例有效性.

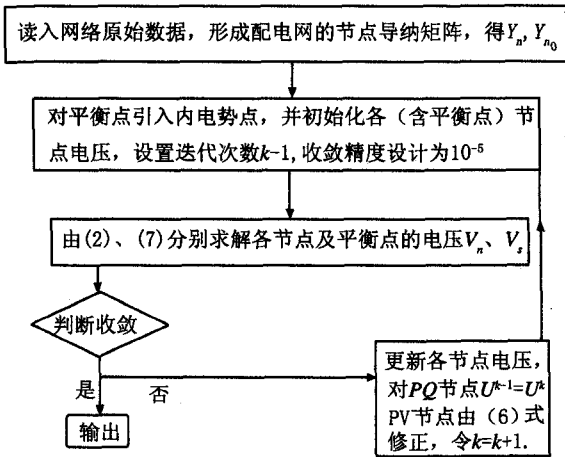
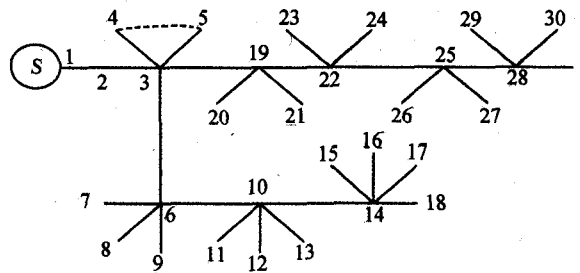


图2 算法基本流程图



任意两节点间的实线代表网络的一条支路

图3 30节点算例系统网络结构图

情况 1,网络为辐射状网络,节点 4,5,7,8,9,11,12,13,15,16,17,18,20,21,22,23,24,26,27,29,30 负荷均为 $0.16+0.008j$. 情况 2,连通网络的节点 4,5,形成弱 $R_{45}=0.0236, X_{45}=0.0233$.

计算显示,2 种情况均能在 4~5 次迭代收敛. 在情况 1 时,得到的表 1 的结果. 比较同一网络计算的文献^[2]、^[7],本方法迭代次数相对较少,节省时间,且不影响计算结果的准确性.

当网络出现弱环时,比较表中情况 1、情况 2 可以看出本算法仍有很好的收敛性.

表 1 情况 1,2 电压幅值、相位计算结果

节点	电压幅度/pV			情况 1		情况 2	
	本文	文献[2]	文献[7]	电压幅度/pV	电压相位	电压幅度/pV	电压相位
1	1.050 000	1.0500	1.050 000	1.050 000	0.000 000	1.050 000	0.000 000
2	0.926 501	0.9265	0.926 458	0.926 501	-0.038 20	0.926 411	-0.038 20
3	0.925 096	0.9251	0.925 064	0.925 196	-0.038 39	0.925 002	-0.038 39
4	0.924 136	0.9241	0.924 138	0.924 136	-0.03 801	0.924 126	-0.037 99
5	0.924 001	0.9239	0.923 939	0.924 001	-0.038 02	0.924 001	-0.037 95
6	0.918 502	0.9185	0.918 514	0.918 502	-0.037 45	0.918 504	-0.037 45
7	0.917 985	0.9180	0.917 965	0.918 085	-0.037 22	0.917 990	-0.037 22
8	0.918 001	0.9180	0.917 965	0.918 001	-0.037 22	0.918 000	-0.037 22
9	0.917 100	0.9171	0.917 065	0.917 100	-0.036 85	0.917 103	-0.036 85
10	0.916 438	0.9164	0.916 434	0.916 438	-0.037 65	0.916 428	-0.037 63
11	0.915 816	0.9158	0.915 831	0.915 816	-0.037 39	0.915 812	-0.037 37
12	0.915 503	0.9155	0.915 516	0.915 503	-0.037 27	0.915 509	-0.037 25
13	0.915 916	0.9159	0.915 936	0.915 916	-0.037 45	0.915 920	-0.03 745
14	0.915 702	0.9157	0.915 699	0.915 702	-0.037 73	0.915 703	-0.03 773
15	0.915 231	0.9152	0.915 236	0.915 231	-0.037 54	0.915 228	-0.03 754
16	0.915 205	0.9152	0.915 218	0.915 205	-0.037 53	0.915 201	-0.03 752
17	0.914 504	0.9145	0.914 501	0.914 504	-0.037 23	0.914 508	-0.03 723
18	0.914 938	0.9149	0.914 947	0.914 938	-0.037 41	0.914 927	-0.03 741
19	0.922 906	0.9229	0.922 909	0.922 906	-0.038 54	0.922 904	-0.03 854
20	0.922 704	0.9227	0.922 710	0.922 704	-0.038 46	0.922 706	-0.03 846

续表

节点	电压幅度/pV			情况 1		情况 2	
	本文	文献[2]	文献[7]	电压幅度/pV	电压相位	电压幅度/pV	电压相位
21	0.921 801	0.9218	0.921 798	0.921 801	-0.03 8 08	0.921 803	-0.03 808
22	0.921 235	0.9212	0.921 240	0.921 235	-0.038 77	0.921 221	-0.03 877
23	0.921 000	0.9210	0.921 075	0.921 000	-0.038 75	0.921 107	-0.03 873
24	0.920 608	0.9206	0.920 623	0.920 608	-0.038 50	0.920 605	-0.03 850
25	0.920 416	0.9204	0.920 439	0.920 416	-0.038 81	0.920 415	-0.03 881
26	0.919 900	0.9199	0.919 891	0.919 900	-0.038 58	0.919 901	-0.03 858
27	0.919 907	0.9199	0.919 857	0.919 907	-0.038 56	0.919 800	-0.03 856
28	0.920 010	0.9200	0.920 022	0.920 010	-0.038 86	0.920 014	-0.03 886
29	0.918 903	0.9189	0.918 916	0.918 903	-0.038 43	0.918 900	-0.03 843
30	0.919 711	0.9197	0.919 726	0.919 711	-0.038 75	0.919 712	-0.03 875

3 结 论

算例分析表明,本算法将网络方程进行虚实部分解,得到简单的雅克比矩阵,推导电压不匹配量,能较好地处理 PV 节点,通过引入内节点,很好地解决了平衡节点处的三相不对称情况.由于雅克比矩阵元素和导纳矩阵元素大部分都一样,迭代时雅克比矩阵只需更新极少的元素,减少了运算量,提高了计算速度.同时,该算法继承了改进 Zbus 算法的优点,对初值不敏感,收敛性好,能解决 R/X 比值较大的问题,且不需要复杂的节点编号,还能对弱环运行的配电网进行处理.

参 考 文 献

- [1] 高金辉,马高峰,王虹霞.光伏发电系统的防雷设计[J].河南师范大学学报(自然科学版),2013,41(3):42-45.
- [2] 穆世霞,刘君.一种改进的配电网潮流计算[J].现代电力,2009,26(4):47-50.
- [3] 孙健,江道灼.基于牛顿法的配电网 Zbus 潮流计算方法[J].电网技术,2004,28(15):41-44.
- [4] 游广增,徐政.一种不对称配电网三相潮流快速算法[J].继电器,2006,34(19):29-32.
- [5] 詹华伟,史水斌,吴雪冰,等. MATLAB 下的馈电网络测量数据的导出与验证[J].河南师范大学学报(自然科学版),2011,41(2):43-46.
- [6] 郭剑锋,孙惠娟,苑方丞.一种实用的潮流计算方法[J].华东交通大学报,2009,25(5):84-87.
- [7] 曹亮,孔峰,陈昆薇.一种配电网的实用潮流算法[J].电网技术,2002,26(11):58-60.

A Power Flow Algorithm for Disitribution Network Zbus

GAO Jinhui, ZHANG Lanjie

(College of Physical and Electronic Engineering, Henan Normal University;
Henan Key Laboratory of Photovoltaic Material, Xixiang 453007, China)

Abstract: On account of Zbus Gaussian algorithm is poor in processing PV nodes of distribution network, and has a large scale of computing. With ignoring the problem of balance nodes' asymmetric three-phase, we put forward a new Zbus power flow algorithm for distribution network. The algorithm derives from improved Zbus algorithm which is based on the superposition principle. First we adopt the compensation method to process PV nodes, then proceed real and imaginary part decomposition of network equation, and obtain a simplified Jacobi matrix. In addition, we resolve the problem of balance nodes' three phase voltage unbalance by introducing internal potential nodes. The examples indicate that the new Zbus power flow algorithm has the advantages of high speed, good convergence and stability. What's more, the new algorithm overcomes the weaknesses of Zbus Gauss algorithms.

Keywords: PV node; three-phase voltage imbalance; improve Zbus algorithm; compensation Act; real and imaginary parts decomposition