

含分布式电源的配电网潮流快速直接算法

王建勋¹, 吕群芳¹, 刘会金¹, 高丽萍²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 河南省电力公司 洛阳供电公司, 河南 洛阳 471009)

摘要: 提出一种可有效处理环网和分布式电源的快速直接算法, 利用自然编号下的节点支路关联矩阵得到稀疏的网络层次矩阵, 直接由该层次矩阵快速实现矩阵形式的前推回代。存在环网时将环路支路引入直接求解过程, 无需补偿处理。内燃机、传统燃气轮机等分布式电源采用同步发电机, 功率因数控制的作 PQ 节点, 电压控制的作 PV 节点, 采用电压控制逆变器作为并网装置的分布式电源, 可作 PV 节点; 采用电流控制逆变器作并网装置的光伏发电系统和储能系统处理为有功输出和注入电网电流恒定的 PI 节点; 采用异步发电机并网运行的风力发电机和无励磁控制的同步发电机处理为负荷静特性节点。对 IEEE 多个标准算例进行仿真对比, 指出环网和大多数类型分布式电源的引入并没有增大迭代次数, 只有 PV 类型的分布式电源接入会对收敛速度产生一定的影响。

关键词: 层次矩阵; 前推回代法; 稀疏矩阵运算; 分布式电源

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0017-05

0 引言

配电网具有节点多、支路短、呈辐射状等不同于输电网的特点, 针对这些特性许多学者开发了相应的潮流算法, 其中具有代表性的算法包括直接法^[1-2]、改进的牛拉法^[3-4]和前推回代法^[5-7]等。文献[1]提出了通过添加虚拟支路形成标准结构得到便于回路处理形式的直接法。文献[2]以各支路电流为中间量, 能快速得到表示电压降与负荷电流关系的直接求解矩阵。文献[3-4]针对配电网辐射状的特点修改了牛顿法的导纳矩阵, 使求解过程中的消去和回代过程简洁。但上述方法都存在节点支路需要优化编号的问题。文献[5]通过在根节点处加零阻抗支路使节点和支路数相同, 统一了基于电流和功率前推回代的矩阵形式, 但是其推算还是从矩阵末行开始的, 并不是高效的矩阵运算。文献[6-7]提出了前推回代通过分层运算可提高计算速度, 但是复杂的层次处理, 如矩阵自乘^[7]会降低计算效率。此外, 前推回代算法中对环网的补偿运算会使总的迭代次数增加, 计算量也会相应增大^[8]。

可见, 目前的配电网潮流算法, 存在节点支路编号复杂, 不能处理环网或处理环网计算量增大, 不能并行计算潮流或者难以有效处理分布式电源等一系列问题。针对这些缺点, 本文在直接法的基础上, 指出只需通过节点-支路关联矩阵便可得到表示配电网结构的各种层次矩阵, 从而可快速形成阻抗形式的直接求解矩阵, 算法并不需要复杂的节点支路编号。由于参与直接求解矩阵形成的各种层次矩阵为稀疏

矩阵, 在迭代运算中可直接由层次矩阵之间的运算完成一次迭代过程, 可避免满阵的直接求解矩阵频繁参与运算, 从而可节省内存空间, 提高计算效率。该直接法相当于是电流形式前推回代算法的并行矩阵计算形式, 迭代运算可以通过稀疏矩阵操作来实现, 可充分发挥 Matlab R2009a 计算程序在稀疏矩阵运算方面的优势。而且该算法将环网支路当作连枝引入直接求解过程, 因此不会像前推回代算法在对环网补偿处理时增加计算量。本文给出了各种分布式电源在该算法中的计算模型, 并通过仿真实例说明了该算法相对于前推回代法的优势, 以及该算法处理环网和分布式电源时的有效性, 并说明了各种类型分布式电源对算法收敛性的影响。

1 算法分析

1.1 网络层次矩阵

为描述网络层次, 首先定义 2 个矩阵。

a. 节点层次矩阵 $B_{n \times n}$ 。节点层次矩阵($n \times n$ 阶, n 为节点数)表示了各节点与其下级节点(包括该节点的所有下级节点)的电气联系。当节点 j 的上级节点为 i 时, 矩阵的 i 行 j 列为 1。相应地, 根节点所在行除根节点对应位置外其他全为 1。

b. 节点-支路层次矩阵 C 。节点-支路层次矩阵($n \times m$ 阶, m 为支路数)表示了支路与节点的对应关系, 当潮流由支路 j 流向节点 i 时, 矩阵的 i 行 j 列为 1。通过矩阵 C 可以将支路和节点对应, 所以节点层次可以直接反映支路层次。

以图 1 所示的 6 节点网络为例说明各矩阵的形成方法。

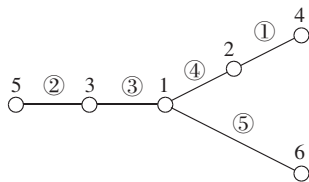


图 1 6 节点树状网络

Fig.1 6-bus tree network

根据该网络的自然编号,易得节点-支路关联矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

从根节点出发,可对 A 进行行列搜索^[6]。搜索过程可用 A 中所示箭头表示,根据箭头的走向即可形成矩阵 B_{n-n} ,例如根节点到某一末端节点的通路依次遍历 5-3-1-2-4 节点,那么该通路的所有上级节点已知,将 B_{n-n} 矩阵中相应位置置 1 即可。为方便搜索过程,可将遍历的列搜索出发点位置处置 0,而行搜索出发点位置处置 -1,最终矩阵 C 可由搜索完成后的矩阵 A 求反直接得到。

$$B_{n-n} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.2 阻抗矩阵形式的直接法

由图 1 所示辐射网易得支路电流和负荷电流的关系,某一支路电流等于其后续节点的负荷电流之和:

$$\begin{bmatrix} B_3 \\ B_4 \\ B_2 \\ B_1 \\ B_0 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = HI \quad (1)$$

其中, $B_1 \sim B_5$ 表示相应支路的电流, B_0 可以认为是对平衡节点添加了虚拟支路; $I_1 \sim I_6$ 表示相应节点的负荷电流; H 即为文献[2]中表示支路电流与负荷电流关系的层次矩阵,其可以由 B_{n-n} 对角元素加 1 得到,对角元素置 1 表示各支路电流还包括该支路末端各节点本身的负荷电流。同样,平衡节点与各节点的电压差可表示为各节点上级支路的电压差之和,如式(2)所示。其中, $Z_H = \text{diag}(CZ_B)$, $Z_B = [Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5]^T$ 为按自然编号排序的支路阻抗列向量。由于矩阵 C 中与根节点相关的行是全零的,所以 Z_0 为零,虚拟支路会被消去,并不影响求解过程。由此可求得各节点

与平衡节点的电压差如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} U_5 \\ U_5 \\ U_5 \\ U_5 \\ U_5 \\ U_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_3 & 0 & Z_2 & 0 & Z_0 & 0 \\ Z_3 & Z_4 & Z_2 & 0 & Z_0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 & Z_0 & 0 \\ Z_3 & Z_4 & Z_2 & Z_1 & Z_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_0 & 0 \\ Z_3 & 0 & Z_2 & 0 & Z_0 & Z_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_3 \\ B_4 \\ B_2 \\ B_1 \\ B_0 \\ B_5 \end{bmatrix} = H^T Z_H \quad (2)$$

$$\Delta U = H^T \text{diag}(CZ_B) H I \quad (3)$$

直接求解矩阵^[2]可以表示为

$$D = H^T \text{diag}(CZ_B) H \quad (4)$$

式(3)可直接求解电压差,因为 $\text{diag}(CZ_B)$ 和 H 均为稀疏矩阵,直接采用稀疏矩阵运算可避免形成满元的阻抗矩阵,从而可节省内存空间,提高计算速度,实际操作中只有在取 PV 节点的阻抗元素时才需要计算式(4)。

1.3 算法的收敛性分析

阻抗矩阵形式的直接法是基于叠加原理,各个节点的电压由平衡节点在各节点上产生的电压与各节点上等值注入电流所产生的电压叠加求得。在无接地支路的配电网中,平衡节点单独作用时网络开路,此时各节点电压等于平衡节点电压,而各节点上等值注入电流所产生的电压可通过阻抗矩阵求得。对比于上述求解过程可知,直接求解矩阵即是平衡节点接地时的阻抗矩阵,因为是用负荷电流表示(流出节点)的,参考方向不同,所以叠加变为了相减。

电流形式前推回代法是根据网络层次,由负荷电流逐层前推各支路电流,然后再根据支路电流逐层回代得各节点电压。本文提出的方法是利用节点的层次关系,由式(1)给出支路电流与负荷电流的矩阵表达形式,因此前推过程通过一次矩阵运算完成。同样,支路电压差的回代运算由式(2)得出,所以电压修正量的求解可以通过直接求解矩阵一次完成。所以,电流形式的前推回代实质上是阻抗矩阵直接法的分层求解形式,两者均是一阶线性收敛的^[9]。

1.4 环网和接地支路的处理

以图 2 所示的含环网的 6 节点网络为例说明环网和接地支路的处理方法。

根据文献[2]的方法, H 应做如下修改:假定环路支路电流的方向,然后确定顺电流方向以及逆电流方向的节点(不包括环路的首端节点)。矩阵 H 增加 1 行 1 列,列元素中顺电流方向节点的相应行置 1,逆电流方向节点相应位置 -1,新添的对角元素同样置 1。在图 2 所示网络中,若假设电流为由节点 4 到节点 6,则相应列的 2、4、7 行为 1,6 行为 -1。 C 应做如下

层前推回代算法潮流计算程序和本文所提算法的潮流计算程序来进行试验。所编制的前推回代算法程序包括电流形式和具有接近二阶收敛特性的功率形式^[14],本文算法包括未采用稀疏矩阵的直接法和使用稀疏矩阵求解的直接法。对 IEEE 33 节点系统^[15]、IEEE 69 节点系统^[15]和某 90 节点系统^[1]进行对比测试,允许误差设为 10^{-5} ,结果表明各种算法均能可靠收敛,且节点电压精度相差不大。表 1 为各种算法迭代次数 N_{ite} 和计算时间 t_{cal} ,计算时间均为运行 50 次后所得到的平均时间。算法 1、2、3、4 分别为功率前推回代法、电流前推回代法、阻抗矩阵直接法、稀疏矩阵直接法。本机配置为 E2160 处理器,2 GB 内存。

表 1 4 种形式潮流计算时间和迭代次数比较

Tab.1 Comparison of computing time and iterative times among four power flow algorithms

算法	IEEE 33 节点系统		IEEE 69 节点系统		某 90 节点系统	
	t_{cal}/s	N_{ite}	t_{cal}/s	N_{ite}	t_{cal}/s	N_{ite}
1	0.0058	3	0.0113	3	0.0133	3
2	0.0074	5	0.0131	5	0.0153	4
3	0.0021	5	0.0064	5	0.0144	4
4	0.0021	5	0.0066	5	0.0105	4

由表 1 可知电流前推回代法与本文算法的收敛特性是一致的。功率前推回代法虽然每次迭代的计算量略大,但是迭代次数少,所以其计算速度较电流前推回代法快,这与文献^[16]的结论是相符的。当矩阵运算量不大时,阻抗矩阵直接法在少节点系统中计算速度最快,此时稀疏矩阵运算在少节点系统中并不能体现其优势,但是随着系统的增大,这种优势将逐渐明显,阻抗矩阵直接法的计算性能已经降低,但是稀疏矩阵直接法仍旧保持着高的计算效率。

表 3 各种方案部分节点电压值和迭代次数

Tab.3 Partial node voltages and iterative times of different schemes

节点	U							
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
8	0.95571	0.93929	0.94576	0.93518	0.95945	0.96996	0.96171	0.97246
17	0.93424	0.91743	0.92405	0.91339	0.93806	0.94881	0.94056	0.95157
29	0.93610	0.93170	0.94580	0.92202	0.98286	0.98555	0.95606	0.99194
31	0.93110	0.92930	0.94085	0.91694	1.00000	1.00000	0.95116	1.00000
32	0.93082	0.92983	0.94058	0.91666	0.99974	0.99974	0.95089	1.00050
N_{ite}	5	5	5	5	16	14	5	11
t_{cal}/s	0.0044	0.0030	0.0027	0.0029	0.0078	0.0073	0.0143	0.0205

4 结论

文中所提算法不需要复杂的节点支路编号,迭代过程直接由稀疏的层次矩阵快速完成,所需内存空间小,计算效率高。该算法在环网和分布式电源处理方面也很有效,环网和大多数类型分布式电源的引入并没有增加迭代次数,只有 PV 类型的分布式电源接入会对收敛速度产生一定的影响。利用层次矩阵可以方便地形成各相阻抗矩阵,所以该方法也适用于三相不平衡潮流计算。

除此之外,直接法不会因为环网的存在影响迭代次数,并且在处理分布式电源上很有效。为验证这一点,本文在 IEEE 33 节点系统中引入环网和几种具有代表性的分布式电源进行仿真计算,采用表 2 所示的多种方案,其中允许误差设为 10^{-5} 。

表 2 加入环网或者接入分布式电源的各种方案

Tab.2 Different schemes to connect looped network or distributed generations

方案	引入环网或分布式电源	分布式电源参数	接入点
1	7-20 支路闭合		
2	双馈型风机(PQ)	$P=200\text{ kW}, Q=100\text{ kvar}$	32
3	定速型异步风机(PQ(U))	$P=1000\text{ kW}, s=0.033$	29
4	光伏发电系统(PI)	$P=600\text{ kW}, I=10\text{ A}$	17
5	燃料电池(PV)	$P=200\text{ kW}, U=12.66\text{ kV}$	31
6	1+5		
7	1+3+4		
8	1+2+3+4+5		

表 3 为各种方案的部分节点电压标幺值、潮流迭代次数和计算时间。各种方案潮流计算均能可靠收敛且均能得到比较精确的结果。由方案 1 和方案 7 的结果可以看出,环网的存在并不会增加本算法的迭代次数,对 PI 节点和 PQ(U)节点类型的分布式电源有相同的结论,而环路支路的判断过程导致方案 1 和方案 6 的计算时间稍大。由于 PV 节点采用补偿处理,所以含 PV 节点时算法的迭代次数会有所增加,方案 5、6、8 证实了这一点,同时可看出方案 5、6、8 的迭代次数逐次减小,说明了环网和其他类型节点的引入对算法处理 PV 节点有利。由以上分析可知直接法能够很好地处理环网和多种分布式电源混合并网的配电系统,能在计算速度上有很大的提高。

参考文献:

- [1] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEE Proceedings-C, 1991, 138(1): 78-88.
- [2] TENG Jenhao. A direct approach for distribution system load flow solutions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [3] ZHANG F, CHENG C S. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [4] 蔡中勤, 郭志忠. 基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 13-16.

- CAI Zhongqin, GUO Zhizhong. Newton load flow for radial distribution network based on upstream labeling technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 13-16.
- [5] 张尧, 王琴, 宋文南, 等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报[J]. 1998, 18(3): 217-220.
- ZHANG Yao, WANG Qin, SONG Wennan, et al. A load flow algorithm for radial distribution power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-220.
- [6] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 76-80.
- YAN Wei, LIU Fang, WANG Guanjie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 76-80.
- [7] 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 system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 74-79.
- [8] 刘莉, 袁博, 宛力. 基于关联矩阵自乘的配电网潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 53-55.
- LIU Li, YUAN Bo, WAN Li. Distribution network flow calculation based on incidence matrix squaring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 53-55.
- [9] 张明, 毕鹏翔, 刘健, 等. 辐射状配电网支路电流法潮流计算的收敛特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 41-44.
- ZHANG Ming, BI Pengxiang, LIU Jian, et al. Research on convergence of branch current method based power flow calculation for radial distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 41-44.
- [10] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 85-89.
- [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, 郭学凤. 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] 蔡旭晖, 刘卫国, 蔡立燕. Matlab 基础与应用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 1-27.
- [14] 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 on power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [15] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 196-202.
- [16] 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): 45-49.
- ZHANG Xuesong, LIU Zhuo, YU Erkeng, et al. A comparison on power flow calculation method for distribution network[J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 45-49.

(编辑: 李育燕)

作者简介:

王建勋(1984-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 研究方向为配电系统优化和电能质量分析与控制(E-mail: wangcoven7@163.com);

吕群芳(1985-), 女, 湖北大冶人, 硕士研究生, 研究方向为含分布式电源的配电系统优化(E-mail: lvqunfang@163.com);

刘会金(1952-), 男, 湖北大冶人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: hjliu@whu.edu.cn);

高丽萍(1976-), 女, 河南南阳人, 工程师, 主要从事电网规划工作(E-mail: 1127556656@qq.com)。

Fast and direct power flow algorithm for distribution network with distributed generation

WANG Jianxun¹, LÜ Qunfang¹, LIU Huijin¹, GAO Liping²

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471009, China)

Abstract: A fast and direct algorithm is proposed, which can effectively deal with looped network and distributed generation. The node-branch incidence matrix with natural number is used to form the sparse hierarchy matrix, which is then used to directly achieve the rapid matrix back/forward sweep calculation. The loop branch of looped network can be introduced into the direct solution procedure and the compensation is not necessary. The internal combustion engines or gas turbines with synchronous generator are treated as PQ node in power factor control or PV node in voltage control; the distributed generations with voltage-controlled inverter as paralleling device are treated as PV node; the photovoltaic power generation system or energy storage system with current-controlled inverter as paralleling device are treated as PI node; the wind turbine with induction generator or synchronous generator without excitation control are treated as load node with static characteristics. Several normal IEEE examples are tested and the results show that only the PV-node distributed generation will introduce some impact on the convergence speed.

Key words: hierarchy matrix; back/forward sweep method; sparse matrix manipulation; distributed generation