

DOI: 10.7652/xjtuxb201306020

改进的前推回代法在含分布式电源 配电网计算中的应用

闫丽梅¹, 谢一冰¹, 徐建军¹, 薛晨光², 赵海龙¹, 白丽丽¹

(1. 东北石油大学电气信息工程学院, 163318, 黑龙江大庆; 2. 中海石油(中国)有限公司丽水作业公司, 200030, 上海)

摘要: 针对含分布式电源(DG)的接入会使传统的前推回代法失效的问题,对 DG 并网后的前推回代法进行了改进。由于传统的无功初值取值方法与实际值偏差较大,使迭代次数增加,本算法基于无功分摊原理确定 PV 型 DG 的无功初值,改进了无功修正值的求法。传统的前推回代法不能处理 PV 型节点,因此需要把 PV 节点转换为 PQ 节点进行求解,给出了无功修正量与节点的电压偏差和节点电抗的关系。结果表明:对于 PV 恒定型 DG 单独并网时的潮流,PV 型 DG 从 1~3 台并网计算中,分别迭代到 5、7、7 次收敛,收敛次数增加小于 2 次,迭代时间增加少于 0.01 s;同时给出了 PQ 型和 PI 型 DG 单独、混合并网时的计算结果,各方案的迭代次数小于 10 次,时间增加小于 0.01 s,说明本算法对解决 PQ、PI 和 PV 节点单独、混合接入 DG 的潮流计算问题的正确性。

关键词: 分布式电源;潮流计算;前推回代

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0117-07

Improved Forward and Backward Substitution in Calculation of Power Distribution Network with Distributed Generation

YAN Limei¹, XIE Yibing¹, XU Jianjun¹, XUE Chenguang², ZHAO Hailong¹, BAI Lili¹

(1. Department of Electrical Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Lishui Operating Company, CNOOC, Shanghai 200030, China)

Abstract: To solve the invalidity of traditional forward and backward substitution in distributed generation(DG) case, an improved forward and backward substitution method is proposed. Large deviation between the reactive initial value from the traditional method and the actual value leads to increasing iterations, so reactive power allocation theory is considered to determine the reactive initial value, and to improve the algorithm for modified reactive value. The traditional forward and backward substitution is unable to deal with PV-type nodes, they have to be converted to PQ nodes to solve. The relationship of reactive power revised value with voltage deviation of nodes and node reactance is obtained. The simulation indicates that for load flow of single invariable PV-type DG connecting to grid, the convergence needs 5, 7 and 7 iterations respectively for one to three PV-type DG grid. The increase of iteration number is less than 2 and the increased iteration period is less than 0.01 s to verify the reasonableness of the algorithm. For PQ-type and PI-type DG separate grid or mixing grid, the iterations of all options are less than 10, and increased period is less than 0.01 s.

Keywords: distributed generation; load flow calculation; backward and forward

收稿日期: 2012-10-25。 作者简介: 闫丽梅(1971—),女,教授。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20090460863); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201260);黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(12511003)。

网络出版时间: 2013-04-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130417.1134.004.html>

分布式电源(DG)作为新兴的电力技术,具有广阔的发展前景。传统的配电网一般是单电源,分布式电源并网后,会使得配电网中电源数量增加,从而变成了多电源供电模式,这会对配电网中潮流产生影响。为了解决传统潮流算法对各类 DG 失效的问题,国内外相关学者对含有 DG 的配网潮流算法都进行了一些研究。

文献[1]对 DG 并网的接口形式进行了相关的研究,根据几种典型的 DG 运行方式建立了这些 DG 的数学模型,并在潮流计算方法中结合灵敏度补偿法,从而能计算不同种 DG 并入配电网的系统潮流。文献[2]提出了一种能处理 PQ、PV 型 DG 的三相潮流算法,在前推回代法的基础上通过相关改变达成的,把 PV 型 DG 的电压正序分量作为调节参数,再结合灵敏度补偿算法,完成对无功补偿值的计算,从而实现对 PV 型 DG 的处理。文献[3]提出一种快速潮流算法,将 DG 和并联电容器简化等效为 PQ 节点,突出实现运算的快速性。文献[4]提出了引入补偿法的改进牛顿法,改进后的牛顿法可以有效地进行接有 DG 的配电网三相潮流计算,提高了算法的计算速度。文献[5]提出了一种改进 Zbus 潮流算法,算法是建立在叠加原理基础上的,通过补偿技术实现对 PV 节点的处理,该方法对初值的大小不是特别敏感,并且其收敛性不会受到高 R/X 值影响。

配电网大多采用辐射式网络结构,而经过电力部门多年的实际运算,已经证明前推回代法是计算放射状配电网潮流的有效的经典算法。算法可分为前推过程^[6-7]和回代过程。前推回代法对求解放射状配电网潮流具有很多优点,比如收敛性好、编程简单、数值的稳定性高、计算时间少以及计算效率高^[8-12]。

本文主要改进了传统的前推回代法,基于无功分摊原理确定 PV 型 DG 的无功初值,改进了无功修正值的求法,给出了改进后的前推回代法的计算步骤。最后在 MATLAB 7.8 版本环境下,编写了含有 DG 的配电网潮流计算程序,进行了多项算例的潮流计算,通过对算例的输出结果进行分析,验证了本文的算法是可行有效的。

1 改进的前推回代法

1.1 无功修正值的求解

假设一个有 N 个 PV 型 DG 并入放射状配电网系统,设 DG 注入电流的方向为正方向,则 PV 型 DG 并网节点处应满足如下关系

$$\Delta \dot{U} = Z \Delta \dot{I} \quad (1)$$

式中: $\Delta \dot{U}$ 为节点电压变化量; Z 为 PV 恒定型 DG 的节点阻抗矩阵; $\Delta \dot{I}$ 为节点注入电流的变化量。节点注入功率的变化为

$$\Delta \bar{S} = U \Delta I^* \quad (2)$$

通常情况下,在配电网处于正常运行的状态下,节点电压标幺值近似等于 1,相角很小, $\cos \theta \approx 1$, 于是有

$$\Delta \bar{S} = \Delta I^* \quad (3)$$

将 $\Delta I = \Delta \bar{S}^*$ 代入到式(3),可得

$$\Delta U \approx Z \Delta \bar{S}^* \quad (4)$$

再将 $\Delta \bar{S}^* = \Delta P - jQ$ 和 $Z = R + jX$ 代入式(4),由于 $\Delta \dot{U}$ 主要由其实部 ΔU 决定,展开后实部方程如下

$$R \Delta P + X \Delta Q = \Delta U \quad (5)$$

又由于 PV 型 DG 的有功功率为恒定值,即 ΔP 为 0,可将式(5)简化为

$$X \Delta Q = \Delta U \quad (6)$$

因而无功修正值为

$$\Delta Q = X^{-1} \Delta U \quad (7)$$

式中: X 为节点阻抗矩阵 Z 中各元素虚部组成的电抗矩阵,定义为 PV 恒定型 DG 的节点电抗矩阵。由式(7)可知,第 i 个 PV 恒定型 DG 无功修正量 ΔQ 不仅与所在节点电压 U_i 、电压偏差 ΔU 有关,还与其他 PV 恒定型 DG 节点的电压、电压偏差有关,其相关性通过节点电抗矩阵 X 的逆矩阵来传递。由于各节点电压幅值相差不大,故第 i 个 PV 恒定型 DG 无功修正量主要取决于各 PV 恒定型 DG 节点的电压偏差 ΔU 和节点电抗矩阵 X 。

1.2 PV 节点无功初值的选定方法

一般情况下,PV 节点的无功初值为 0 或者为无功上下限和的一半。这种方法求解简单,但与无功初值的实际值之间的偏差可能较大^[13]。

PV 型 DG 并网处的无功主要源于无功补偿装置,与 DG 的无功输出无关,与系统中负荷的大小和位置相关,并且与 PV 型 DG 的并网点的位置也有联系^[14]。无功初值会影响潮流计算的收敛性能,因而本文基于无功分摊改进了配电网 PV 节点的无功初值确定方法,准确确定出无功初值,提高了收敛性。

PV 节点电压可视为恒定值,而配电网根节点处的电压也为恒定值,假设 PV 型 DG 的无功补偿装置为无限大,则可认为系统中的无功负荷由根节点与 PV 型 DG 共同分摊。

配电网多为放射状网络,为方便计算,根据 PV 型 DG 并网点的位置,确定一条含有根节点、PV 节

点与末节点的线路。根节点与PV节点之间的无功负荷由两者平均分摊,而PV节点到末节点之间的无功负荷则都由PV节点处的DG提供。若PV型DG并网点处于辐射网络多条支路之间,优先选择到末节点无功负荷最大的支路。由于实际中的补偿装置容量是有限的,在上述理想条件下,通过分摊法计算出的无功初值如果超出了补偿装置的最大容量 $Q_{\max}$,则节点电压不能保持恒定,此时应当将PV节点转化为PQ节点,无功即为补偿装置的最大容量。因此,PV节点的无功初值应如下式所示

$$Q_0 = \begin{cases} Q'_0, & Q'_0 < Q_{\max} \\ Q_{\max}, & Q'_0 \geq Q_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Q_0 为最终的PV节点无功初值; Q'_0 是在理想条件下由无功分摊法计算出的无功初值; $Q_{\max}$ 是补偿装置的最大容量。

以图1为例,在节点5和8处分别并入两台PV恒定型分布式电源a和b,则两台PV型DG的无功

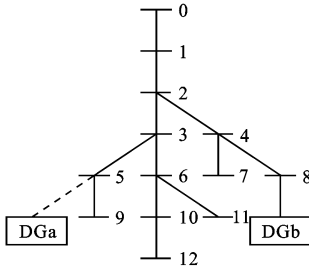


图1 无功初值求解示意图

初值为

$$Q'_a = (Q_1 + Q_2 + Q_3)/2 + (Q_5 + Q_9) \quad (9)$$

$$Q'_b = (Q_1 + Q_2 + Q_4)/2 + Q_8 \quad (10)$$

式中: Q'_a 与 Q'_b 为理想条件下分布式电源的无功初值; Q_n 为节点 n 处的无功负荷。将式(9)、式(10)代入式(8),即可求出最终的PV节点无功初值。

1.3 计算流程

根据上述的潮流算法研究,含有分布式电源的配电网潮流计算程序流程如图2所示,具体的计算步骤如下。

第1步:首先读取或者输入相应的系统原始数据,形成节点阻抗矩阵与关联矩阵。

第2步:输入配电网系统各节点处的负荷值与所有并入系统的分布式电源的相应给定值,确定分布式电源并入系统中的节点位置。PI型DG确定其 P 、 I 的给定值,求解该PI节点电源的注入无功值;PQ型DG确定其 P 、 Q 给定值;设置PV型DG的 P 、 V 给定值,计算出该PV型DG的无功初值,

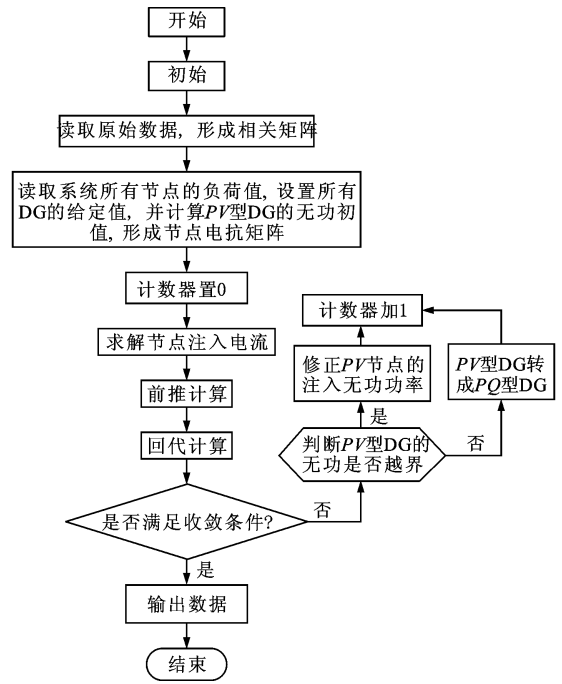


图2 改进潮流算法流程

同时形成节点电抗矩阵。

第3步:计算系统中各节点负荷的注入电流,并与分布式电源并网节点处分布式电源的注入电流进行叠加。

第4步:前推计算过程。自配电系统线路的末端开始,向根节点方向前推求解各条支路上的电流和功率损耗。

第5步:回代计算过程。自配电网根节点开始,向系统末端回代求解各节点处的电压。

第6步:判断是否收敛。非PV型DG节点的收敛条件是本次迭代的电压幅值 $U_i^{(K)}$ 与前次迭代的电压幅值 $U_i^{(K-1)}$ 之差的绝对值不大于 ϵ (ϵ 为收敛精度),即 $|U_i^{(K)} - U_i^{(K-1)}| \leq \epsilon$ 。PV型DG节点处的电压幅值应符合 $|U_i^{(K)} - U_s| \leq \epsilon$ 。若满足以上条件,迭代收敛,跳至步骤8;若不满足以上条件,更新系统中所有节点的电压值,跳转到步骤7。

第7步:判断PV型DG节点无功是否越界,如果PV节点无功没有越界,可求解出无功修正值 ΔQ ,然后对PV节点的无功值进行修正,再转至步骤3;一旦PV节点无功越界,此时将PV节点转换为PQ节点处理,PQ节点的无功 Q 等于PV节点的无功上限或者下限,具体的情况取决于PV节点无功越界的是上限还是下限。PV节点转换为相应的PQ节点后,转至步骤3。

第8步:潮流计算结束,输出计算结果,如各节

点电压值、潮流计算迭代次数及迭代时间等。

2 IEEE 33 节点和 PG&E 69 节点系统仿真

2.1 两种系统简介

2.1.1 IEEE 33 节点配电系统简介 33 节点配电系统如图 3 所示。该系统电压等级为 12.66 kV,基准功率为 10 MW,变电站有功负荷为 5 084.26 kW,无功负荷为 3 347.32 kV·A,系统节点编号如图 3 所示,其中 0 为平衡节点,电网共有 33 个节点,32 条支路^[11],计算精度取为 $\epsilon=10^{-6}$ 。

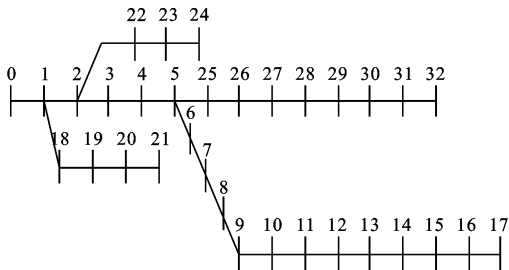


图 3 IEEE 33 节点配电系统示意图

2.1.2 美国 PG&E 69 节点配电系统简介 美国 PG&E 69 节点配电系统如图 4 所示。该配电系统共有 69 个节点,68 条支路,节点编号如图所示,其中 0 为根节点,该系统电压等级为 12.66 kV^[12],系统有功负荷为 3.802 MW,无功负荷为 2.694 MV·A,计算精度为 $\epsilon=10^{-6}$ 。

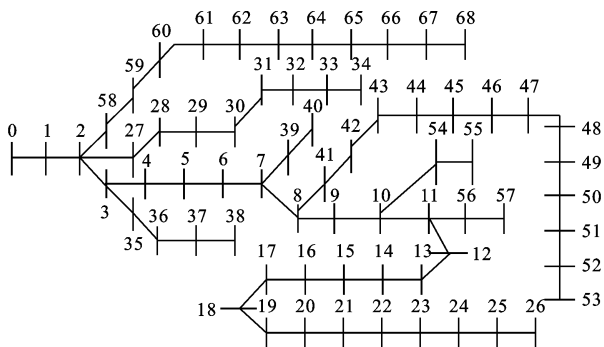


图 4 美国 PG&E 69 节点配电系统示意图

2.2 对 PQ、PI、PV 节点 DG 单独并网的测试

2.2.1 PQ 型 DG 单独并网的情况 方案 1.0:无 DG 并网。方案 1.1:1 台 500 kW 的风力机组并网。方案 1.2:2 台 500 kW 的风力机组并网。方案 1.3:3 台 500 kW 的风力机组并网。方案 1.4:4 台 500 kW 的风力机组并网。方案 1.5:5 台 500 kW 的风力机组并网。方案 1.6:6 台 500 kW 的风力机组并网。各个方案的仿真结果如表 1~表 3 所示。

表 1 IEEE 33 节点 PQ 型 DG 单独并网各方案计算结果

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
1.0	0		4	7.866
1.1	1	31	4	8.038
1.2	2	15,31	4	8.162
1.3	3	15,24,31	3	7.814
1.4	4	15,20,24,31	3	7.712
1.5	5	8,15,20,24,31	3	8.066
1.6	6	8,12,15,20,24,31	3	8.139

表 2 方案 1.6 在 IEEE 33 节点系统中潮流输出结果

节点	电压幅值	相角	节点	电压幅值	相角	节点	电压幅值	相角
0	1.000	0	12	1.001	1.677	24	0.989	0.328
1	0.999	0.044	13	1.001	1.719	25	0.984	0.902
2	0.994	0.257	14	1.002	1.759	26	0.983	0.969
3	0.992	0.399	15	1.004	1.810	27	0.976	1.181
4	0.990	0.546	16	1.002	1.745	28	0.971	1.355
5	0.985	0.854	17	1.001	1.737	29	0.969	1.480
6	0.985	0.963	18	0.999	0.055	30	0.969	1.551
7	0.987	1.045	19	1.001	0.177	31	0.970	1.587
8	0.993	1.270	20	1.002	0.228	32	0.969	1.581
9	0.995	1.406	21	1.001	0.208			
10	0.995	1.422	22	0.992	0.266			
11	0.996	1.449	23	0.989	0.276			

注:表中电压幅值和相角均为标么值。

表 3 美国 PG&E 69 节点 PQ 型 DG 单独并网各方案计算结果

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
1.0	0		5	11.608
1.1	1	23	5	11.913
1.2	2	23,67	5	12.004
1.3	3	23,50,67	5	12.667
1.4	4	23,32,50,67	5	12.519
1.5	5	20,23,32,50,67	5	12.155

由表 1~表 3 数据可以看出,本文算法可以求解 PQ 型 DG 单独并网时系统的潮流,相对于没有 DG 并网时的计算结果,并没有增加迭代次数,也没有增加计算时间,因此本算法对只有 PQ 型 DG 并网情况下的潮流计算是有效的。

2.2.2 PI 型 DG 单独并网的情况 方案 2.0:无 DG 并网。方案 2.1:1 台通过电流控制型逆变器并网 500 kW 的光伏发电系统安装。方案 2.2:2 台

通过电流控制型逆变器并网 的 500 kW 的光伏发电系统安装。方案 2.3:3 台通过电流控制型逆变器并网的 500 kW 的光伏发电系统安装。各方案的潮流计算结果如表 4、表 5 所示。

表 4 IEEE 33 节点 *PI* 型 DG 单独并网各方案计算结果

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
2.0	0		4	7.866
2.1	1	31	4	8.088
2.2	2	15,31	4	8.182
2.3	3	15,24,31	4	8.245

表 5 美国 PG&E 69 节点 *PI* 型 DG 单独并网各方案计算结果

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
2.0	0		5	11.608
2.1	1	23	5	11.693
2.2	2	23,67	5	12.161
2.3	3	23,50,67	5	12.006

由表 4 和表 5 的计算结果可以看出,算法可以处理 *PI* 型 DG 单独并网的情况,并没有增加迭代次数,同时也没有牺牲计算时间。

2.2.3 *PV* 恒定型 DG 单独并网的情况 方案 3.0:无 DG 并网。方案 3.1:1 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机并网。方案 3.2:1 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 1 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站并网。方案 3.3:2 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 1 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站并网。各方案的计算结果见表 6、表 7。

表 6 IEEE 33 节点 *PV* 型 DG 单独并网各方案计算结果

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
3.0	0		4	7.866
3.1	1	31	5	17.478
3.2	2	15,31	7	23.089
3.3	3	15,24,31	7	26.822

由表 6 和表 7 的计算结果可以得出,算法可以求解 *PV* 恒定型 DG 单独并网时的潮流,从 1 台到 3 台 *PV* 型 DG 并网,分别迭代到 5、7、7 次潮流收敛,收敛次数没有明显的增加,并且计算时间也没有明显增加。

根据以上几种情况各方案的计算数据可以得

出,本文算法可以较好地解决 *PQ*、*PI* 和 *PV* 节点考虑的 DG 单独并入配电系统时的潮流计算,并没有增加收敛次数,具有较好的收敛性能。

表 7 美国 PG&E 69 节点 *PV* 型 DG 单独并网各方案计算结果

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
3.0	0		5	11.608
3.1	1	23	5	19.803
3.2	2	23,67	5	26.581
3.3	3	23,50,67	10	36.188

2.3 测试 *PV* 型 DG 无功分摊确定初值法的性能

PV 节点的无功初值一般取为 0 或者是无功上下限和的一半,本文基于无功分摊改进了无功初值的确定方法。本节主要通过测试仿真,来比较这 3 种方法的优劣。

方案 4.1:1 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机并网。方案 4.2:1 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 1 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站并网。方案 4.3:2 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 1 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站分别并网。方案 4.4:3 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 1 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站分别并网。方案 4.5:3 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 2 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站分别并网。方案 4.6:3 台输出功率为 500 kW 的微型燃气轮机和 3 台输出功率为 500 kW 的燃料电池发电站分别并网。各方案的计算结果见表 8 和表 9。

表 8 IEEE 33 节点 3 种确定无功初值方法的收敛性能比较

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数		
			初值为 0	上下限和的一半	无功分摊法
4.1	1	31	5	5	5
4.2	2	31,15	7	7	7
4.3	3	24,31,15	7	7	7
4.4	4	20,24,31,15	22	7	7
4.5	5	20,24,31,8,15	24	14	9
4.6	6	20,24,31,8,12,15	174	32	16

由表 8 和表 9 可知,随着 *PV* 恒定型 DG 并网数量的增加,无功初值若取为 0,潮流收敛次数会越来越多,在含有 6 台 *PV* 型 DG 并网时迭代次数高

达 174,收敛次数过多,会严重影响系统潮流的计算速度。

表 9 美国 PG&E 69 节点 3 种确定无功初值方法收敛性能的比较

方案	DG 数量	DG 并网位置	迭代次数		
			初值为 0	上下限和的一半	无功分摊法
4.1	1	23	6	5	5
4.2	2	23,67	6	5	5
4.3	3	23,50,67	6	65	10
4.4	4	23,32,50,67	6	65	10
4.5	5	23,32,50,21,67	270	21	15

采用上下限和的一半($Q_{\min} + Q_{\max}$)/2 作为无功初值,在计算系统潮流时,随着并入 PV 型 DG 台数的增加,迭代次数也有显著的增加,在并入 6 台 PV 恒定型 DG 时,迭代次数达到了 32 次。

采用基于无功分摊确定无功初值法时,潮流计算的迭代次数随着并网 PV 恒定型 DG 数量的增加而有所增加,在 5 台 PV 恒定型 DG 并网时,潮流计算迭代了 9 次即收敛,在 6 台 PV 恒定型 DG 并网时,迭代次数也仅仅为 16 次。

由图 5 可以得出,采用基于无功分摊确定无功初值法相比较其他的 PV 节点无功初值确定法,可以有效地降低系统潮流的迭代次数,节省了计算机程序的运行时间,提高了潮流算法的收敛性能。

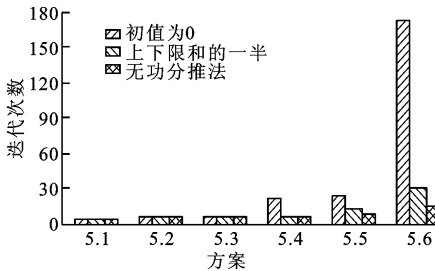


图 5 3 种确定无功初值方法的迭代次数柱形图

2.4 含各类节点 DG 的混合安装并网的测试

下面讨论 PQ、PI、PV 恒定型 DG 混合并网时,对潮流计算的收敛性能的影响。方案 5.1:3 台 300 kW 风力发电机组和 1 台 500 kW 微型燃气轮机并网。方案 5.2:3 台 300 kW 风力发电机组和 1 台 500 kW 光伏发电机组分别并网。方案 5.3:3 台 300 kW 风力发电机组、1 台 500 kW 微型燃气轮机和 1 台 500 kW 光伏发电机组分别并网。方案 5.4:3 台 300 kW 风力发电机组、1 台输出功率 500 kW 燃料电池发电站、1 台 500 kW 微型燃气轮机和 1 台

500 kW 光伏发电机组分别并网。各方案的计算结果见表 10、表 11。

表 10 IEEE 33 节点 DG 混合安装对潮流收敛性能的影响

方案	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
5.1	8、20、24、31	5	17.463
5.2	8、14、20、24	3	7.860
5.3	8、14、20、24、31	5	18.232
5.4	8、14、16、20、24、31	7	22.485

表 11 美国 PG&E 69 节点 DG 混合安装对潮流收敛性能的影响

方案	DG 并网位置	迭代次数	计算时间/ms
5.1	20、32、50、67	5	19.956
5.2	17、20、32、50	5	12.247
5.3	17、20、32、50、67	6	19.971
5.4	17、20、23、32、50、67	6	25.599

表 10 和表 11 列出了上述方案下的潮流计算结果,可以看出,尽管各类分布式电源在多处混合安装,但是并没有影响潮流算法的收敛性能,迭代次数变动很小,计算时间基本没有多大差别。由此可以验证,本文算法可以有效地计算各类分布式电源混合并网的潮流。

3 结 论

(1)利用基于改进的前推回代算法计算 DG 接入后的系统潮流,无论 DG 怎么接入,都没有影响潮流算法的收敛性能,迭代次数变动很小,计算时间基本没有多大差别。由此可以验证,本文算法计算各类分布式电源并网的潮流是有效的。

(2)基于无功分摊确定 PV 恒定型 DG 的无功初值法,在两套算例的测试计算中发现,本文算法优于无功初值取 0 和取上下限和一半的方法,比这两种方法具有更好的收敛性能,与前推回代法相结合求解潮流时更稳定高效。

参考文献:

[1] 李新,彭怡,赵晶晶,等. 分布式电源并网的潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):78-81.
LI Xin, PENG Yi, ZHAO Jingjing, et al. Power flow calculation of distribution network with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 78-81.
[2] 赵晶晶,李新,许中. 含分布式电源的三相不平衡配电

- 网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 94-98.
- ZHAO Jingjing, LI Xin, XU Zhong. Calculation of three-phase unbalanced power flow in distribution network containing distributed generation [J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 94-98.
- [3] 相里碧玉, 蔡金铨, 孙铁群. 计及分布式发电的配电网快速潮流算法[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 62-66.
- XIANGLI Biyu, CAI Jinding, SUN Yiqun. A fast power flow solution algorithm for radial distribution networks with distributed generation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(4): 62-66.
- [4] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统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 for distributed power generation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 11-15.
- [5] 穆世霞, 刘君. 一种改进的配电网潮流算法[J]. 现代电力, 2009, 26(4): 47-50.
- MU Shixia, LIU Jun. Improved algorithm of load flow calculation for distribution networks [J]. Modern Electric Power, 2009, 26(4): 47-50.
- [6] 顾晨, 乐秀璠, 张晓明. 基于改进前推回代法的弱环配电网三相潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 160-164.
- GU Chen, LE Xiufan, ZHANG Xiaoming. Three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems based on modified back/forward sweep method [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 160-164.
- [7] 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.
- [8] 李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 等. 基于节点分层的配网潮流前推回代方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 63-67.
- LI Ruqi, XIE Linfeng, WANG Zongyao, et al. Back/forward substitution method for radial distribution load flow based on node-layer [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 63-67.
- [9] 张颖颖, 曹广益, 朱新坚, 等. 燃料电池: 有前途的分布式发电技术[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 57-61.
- ZHANG Yingying, CAO Guangyi, ZHU Xinjian. Fuel cell: promising distributed generation technique [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 57-61.
- [10] 王林川, 梁峰, 李漫. 含有分布式电源配电网重构算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 41-44.
- WANG Linchuan, LIANG Feng, LI Man. Research on the distribution network reconfiguration with the distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 41-44.
- [11] 王守相, 江兴月, 王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 42-45, 61.
- WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators [J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 42-45, 61.
- [12] 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.
- [13] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
- LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [14] 徐玉琴, 李雪东, 张继刚, 等. 考虑分布式发电的配电网规划问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 87-91.
- XU Yuqin, LI Xuedong, ZHANG Jigang, et al. Research on distribution network planning considering DGs [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 87-91.

[本刊相关文献链接]

- 岳涵, 赵登福, 夏道止, 等. 求解大型电力系统机电振荡模式的逆幂方法. 2010, 44(10): 93-98.
- 谷永刚, 肖凯, 夏经德, 等. 利用增量二次规划和启发式方法的电力系统动态无功优化. 2010, 44(8): 106-111.
- 汪成根, 张保会, 李鹏, 等. 基于自适应解列的电力系统解列面快速搜索. 2009, 43(2): 90-95.
- 别朝红, 刘辉, 李甘, 等. 含风电场电力系统电压波动的随机潮流计算与分析. 2008, 42(12): 1500-1505.
- 徐林, 王秀丽, 王锡凡, 等. 电力系统充裕度分析中的快速组合事件概率算法. 2008, 42(6): 713-717.
- 李静耘, 杜正春, 楚国莉, 等. 基于聚类的多运行方式下电力系统稳定器设计. 2008, 42(2): 204-208.
- 丁晓莺, 王锡凡, 王建学. 一种考虑可靠性指标的最优潮流模型. 2007, 41(10): 1219-1223.

(编辑 杜秀杰)