

具有 PV 节点的配电网常 Jacobian 矩阵潮流算法的分析比较

贺江胜, 索南加乐, 李怀强, 单亚洲

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着配电网实时监控要求的不断提高, 有必要寻找一种既能建立常 Jacobian 系数矩阵以提升其收敛速度, 又能满足病态条件下方程有解而不至于发散的潮流计算方法。该文基于牛顿 - 拉夫逊法的极坐标形式, 从复功率方程出发, 忽略功率方程迭代过程中影响相对较小的负荷功率, 把 PV 节点电压的实部、虚部线性拟和为幅值, 建立了完全常数项的 Jacobian 矩阵。对常 Jacobian 矩阵的适应性进行了详细的论证且得到了实际算例证实, 证明本算法提高了计算效率并显著降低了内存需求; 该算法无须解耦, 不受 R/X 数值大小的影响, 具有出色的收敛性和良好的稳定性, 最后对算法结果进行了分析说明。该算法同样适用于有环配电网和输电电网系统。

关键词: 配电网; 潮流; 常 Jacobian 矩阵

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)19-0026-08

0 引言

配电网潮流计算是配电网系统研究的基础。20 世纪 80 年代中期随着配电系统自动化在国内外的广泛兴起, 人们对低压配电网的研究开始增多, 配电网潮流的数据是配网网络重构、故障处理、无功优化、状态估计和配电管理系统 DMS 开发的重要基础。因而开发针对配电网特点的潮流计算问题也越来越引起人们的重视。

目前, 输电系统潮流计算方法已较为成熟而且获得了广泛的实际应用。但正是由于配电网有一些不同于高压输电网的固有特征, 如: 配网电压等级低; 配网环网设计开环运行; 配电网线路长、分支多, 线经小线路参数 R/X 值较大等。为此, 许多学者结合配电网特殊的网络结构, 研究开发出一些适合于低压配电网的母线类和支路类潮流算法, 诸如母线类的 Zbus 法^[1]和 Ybus 法^[2], 支路类的前推回推法^[3]、基于回路方程的算法^[4]、改进的牛顿 - 拉夫逊法^[5~7]等。

这些方法根据配电网网络辐射的特点, 建立了基于节点变量(节点功率、节点电流)和基于支路变量(支路电流、支路功率、支路损耗)运算模型的潮流方程。

Zbus 法、Ybus 法在本质上是一致的。该类算法虽然一节收敛, 可求解多回路电网, 但是处理多电源能力差。

前推回推法针对配网的树状特点, 具有收敛速度快、数值稳定性好的特点, 但是配电网复杂程度增

大时, 这类算法的迭代次数呈线性增加甚至呈几级数增长。另外, 多数前推回推法不能求解电压角度, 所以这类方法在处理无功的场合是不适用的。

基于回路方程的方法处理网孔能力较强, 收敛性较好, 但其节点和支路编号处理复杂。

快速解耦法由于其赖以存在的 $X \gg R$ 的先决条件在配电网中不再满足, 因而在多数配电网中难以收敛。为了使快速解耦法能在配电网中继续使用, 文献^[11]提出了应用补偿技术处理 R/X 较大的线路, 但都使方法复杂化, 丧失了快速解耦法原有的计算量小、收敛可靠的特点。

牛顿 - 拉夫逊法是当前广泛采用的计算潮流分布的算法。一般可以认为, 算法的收敛阶数越高, 算法的稳定性越差。即从理论上讲一阶收敛的方法有较好的稳定性。而牛顿 - 拉夫逊法是一种二阶方法, 其收敛受初值的影响较大, 当电网的末端电压低于一定值时, 牛顿 - 拉夫逊法开始发散。此外, 导致牛顿 - 拉夫逊法无法在线使用的最直接的原因是它没有形成常 Jacobian 矩阵。

为弥补牛顿 - 拉夫逊法这些缺陷, 可以采取方法“结果”的结合, 如高斯 - 赛德尔法和牛顿 - 拉夫逊法的结合, 利用前者迭代的初值, 再用后者迭代; 也可以采取方法“过程”的结合, 如文献^[7]中提出的“电流注入型混合法”, 利用已改进的牛顿 - 拉夫逊法与定雅克比法交替迭代, 以及文献^[8]提出的利用数学家 K. M Brown 的方法解算潮流, 实际上是高斯 - 赛德尔法和牛顿 - 拉夫逊法所采取方法原理的综合运用。无论是方法结果的结合, 还是方法过程的

结合,其目的都是用某一方法迭代出更接近于解点的某一值作为初值,然后再用牛顿-拉夫逊法加快收敛速度。

考虑到配电网特殊的网络结构易于产生病态条件(如 R/X 较大),以及目前配电网 DMS 系统对实时控制的要求越来越高。那么如何做到在基于牛顿-拉夫逊法优良特性的基础上,既能建立常 Jacobian 系数矩阵以提升其迭代速度,又能满足病态条件下潮流方程有解而不至于发散。为此,许多人在使牛顿-拉夫逊法 Jacobian 系数矩阵元素常数化上,做了一些有益的尝试^[5-7]。

由文献[5~7]提到的几种配电网潮流算法可以看出,一种是改进牛顿-拉夫逊法 Jacobian 矩阵,使其多数元素为常数来加快迭代方程的收敛速度;一种是利用简化了的牛顿-拉夫逊法 Jacobian 矩阵,用前推回推法进行迭代来求解潮流;文献[9]以直角坐标形式阐述了建立牛顿-拉夫逊法常 Jacobian 矩阵的形式,显著提高了收敛性能。

这些方法都各有长短,但需要说明的是:在牛顿-拉夫逊法 Jacobian 矩阵基础上,无论怎样增大 Jacobian 矩阵中常数元素的数量,都没有建立完全常数项的常 Jacobian 矩阵。尽管可以提高收敛速度,但只是相对于常规牛顿-拉夫逊法而言的。

本文是在对以上几种改进牛顿-拉夫逊法比较的基础上,基于牛顿-拉夫逊法的极坐标形式,从复功率方程出发,在忽略负荷功率的前提下,建立了完全常数项的 Jacobian 矩阵。文中对忽略的合理性,从理论上进行了论证,并得到了算例的验证。对于具有 PV 节点系统的常 Jacobian 矩阵,本文采取了对电压幅值进行实部、虚部线性拟合^[10]的方法,并对这种线性拟合的合理性进行了论证比较。通过算例多方面证实了基于牛顿-拉夫逊法的常 Jacobian 矩阵配电网潮流算法计算量小,收敛速度快,算法稳定,不受电压相角和 R/X 值大小的影响,且适用于有环网和输电网。

1 极坐标形式常 Jacobian 矩阵的原理

设导纳矩阵为 Y ,电压的极坐标形式为 $U_i = U_i e^{j\theta_i}$,则节点复功率方程为:

$$S_i = U_i \sum_j Y_{ij} U_j = U_i^2 Y_{ii} + U_i \sum_{j \neq i} Y_{ij} U_j \quad (i=0,1,2, \dots, n) \quad (1)$$

其中:平衡节点为 0 号。于是对应节点功率误差方程为:

$$S_i = S_{is} - U_i \sum_{j \neq i} Y_{ij} U_j \quad (2)$$

其中: $S_{is} = P_{is} + jQ_{is}$ 为已知给定节点的负荷功率,牛顿-拉夫逊法的极坐标形式的修正方程为:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U/U \\ \theta/U \end{bmatrix} \quad (3)$$

则复功率误差为:

$$S = P + jQ = [(H + jM) \quad (N + jL) \quad U/U] \quad (4)$$

式中:

$$H_{ij} + jM_{ij} = \begin{cases} j U_i Y_{ij} U_j & (i \neq j) \\ j (U_i^2 Y_{ii} - S_{is}) & (i = j) \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{ij} + jL_{ij} = \begin{cases} - U_i Y_{ij} U_j & i \neq j \\ - (U_i^2 Y_{ii} + S_{is}) & i = j \end{cases} \quad (6)$$

按自导纳的定义, $U_i^2 Y_{ii}$ 为除节点 i 外其它节点都接地时,由节点 i 注入的复功率。这功率若远大于正常运行时节点 i 的负荷复功率,也即 $|U_i^2 Y_{ii}| \gg |S_{is}|$ 成立。则式(5)和(6)可简化为:

$$H_{ij} + jM_{ij} = \begin{cases} j U_i Y_{ij} U_j & (i \neq j) \\ j U_i Y_{ii} U_i & (i = j) \end{cases} \quad (7)$$

$$N_{ij} + jL_{ij} = \begin{cases} - U_i Y_{ij} U_j & i \neq j \\ - U_i Y_{ii} U_i & i = j \end{cases} \quad (8)$$

1.1 常 Jacobian 矩阵对角元的形成

首先,将节点的对地并联支路(如线路充电电容、并联电容器、并联电抗器及非标准变比变压器等值电路的对地支路等)从导纳矩阵的对角元素中分离出来,并作为节点的一个恒定阻抗 Y_{i0} 来处理。于是有

$$G_{ii} = - \sum_j G_{ij}; \quad B_{ii} = - \sum_j B_{ij} \quad (9)$$

所以令 $Y_{ii} = - \sum_{j \neq i} Y_{ij}$, 则 $Y_{ii} = Y_{i0} + Y_{ii}$;假设正常情况下,相邻两节点电压近似相等,则有

$$S_{is} = U_i^2 Y_{ii} + U_i \sum_{j \neq i} Y_{ij} U_j = U_i^2 Y_{i0} + U_i^2 Y_{ii} + U_i \sum_{j \neq i} Y_{ij} U_j \quad U_i^2 Y_{i0} \quad (10)$$

令

$$|U_i^2 Y_{ii}| / |S_{is}| = |Y_{ii}| / |Y_{i0}| = \quad (11)$$

一般对于配电网来说,充电电容很小,所以无并联支路的 Y_{i0} 很小可以忽略,则 $\gg 1$ 自然成立。但进行无功补偿时, Y_{i0} 就不能忽略了。由于 Y_{i0} 不含串连补偿时的互导纳,所以这里只需考虑并联补偿。为了防止无功潮流的流动造成网损的增加,并联补偿是本着就地补偿的原则,即只补偿相邻线路的无功。今节点 $i-j$ 之间的无功被完全补偿,即 $Q_{ij} = Q_{i0}$, 则

$$U_{ij}^2 B_{ij} = U_{i0}^2 B_{i0}, \quad B_{ij} / B_{i0} = U_{i0}^2 / U_{ij}^2 \quad (12)$$

若假定配网相邻两节点电压降为 $U_{ij} = 10\% U_{i0}$, 则 $B_{ij} = 100 B_{i0}$, 所以 $\gg 1$ 成立。这一点在后面的算例分析中表 3 可以得到证实。

忽略 S_{is} 后, 省略推导过程, 式(4)的矩阵形式表示的复功率修正方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{S_i}{U_i} \\ \dots \\ \frac{S_n}{U_n} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{i1} & \dots & Y_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\frac{U_1}{U_i} - j) \mathbb{V}_1 \\ \dots \\ (\frac{U_n}{U_n} - j) \mathbb{V}_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

其展开式为:

$$\frac{S_i}{U_i} = - \sum_{j, i, j=1}^n Y_{ij} (\frac{U_j}{U_i} - j) \mathbb{V}_j = - \sum_{i, j=1}^n Y_{ij} \mathbb{V}_j \quad (14)$$

式(14)即为本算法的迭代方程。设定电压初值, 用式(14)反复迭代, 当 $\max |S_i| < \epsilon$, 停止迭代。

从式(13)可以看出, 本算法无需太多的假设建立了其元素完全由导纳矩阵获得的常 Jacobian 矩阵。

1.2 具有 PV 节点常 Jacobian 矩阵的形成

考虑到分散的发电机系统, 配电网可能出现多电源运行状态。此时可以把一个电源节点当成平衡节点, 其余电源节点为 PV 节点; 为提高供电质量而进行无功补偿时, 某些节点必须作为 PV 节点处理。

式(14)是只考虑 PQ 接点的功率迭代方程, 其右边状态变量

$$(\frac{U_j}{U_i} - j) \mathbb{V}_j = U_j e^{-j} - j \mathbb{V}_j \quad (15)$$

实际为 \mathbb{V}_j , 对于已知电压幅值的 PV 节点, 其电压幅值方程在电压相角较小时, 可以用其实、虚部线性表示为^[10]:

$$U_i = \sqrt{(e_i^2 + f_i^2)} \quad k_1 e_i + k_2 f_i \quad (16)$$

其中: k_1 和 k_2 为常数。则电压幅值误差可定为:

$$U_i = U_i^s - \sqrt{(e_i^2 + f_i^2)} \quad U_i^s - k_1 e_i - k_2 f_i \quad (17)$$

式中: U_i^s 为 PV 节点的电压, 由式(17)可得到:

$$\begin{cases} \partial U_i / \partial e_i = - \frac{e_i}{\sqrt{(e_i^2 + f_i^2)}} = - \cos \quad - k_1 \\ \partial U_i / \partial f_i = - \frac{f_i}{\sqrt{(e_i^2 + f_i^2)}} = - \sin \quad - k_2 \end{cases} \quad (18)$$

相应的电压误差方程为:

$$U_i = - \cos \quad e_i - \sin \quad f_i \quad - k_1 \quad e_i - k_2 \quad f_i \quad (19)$$

当电压相角 δ 很小时, 适当选取 k_1, k_2 可以使得式(16)误差很小, 同时可以减少有 PV 节点功率方程迭代次数(如表 8)。若选取 $k_1 = 1.05, k_2 = 0$ 时, 电压幅值拟合方程与实际值的理论误差为 $(1 - k_1 \cos \delta)$, 例如当配网电压相角为 30° 时, 理论误差为 9.07%。实际上 PV 节点迭代收敛判据 U_i 为与准确值的误差, 所以尽管确定的 k_1, k_2 的值为与准确值存有一定偏差的常数会导致迭代次数的变化, 但对于方法的迭代收敛性能不会带来很大的负面影响。在实际计算中, k_1 的选择对迭代的敛散性是不敏感的。这可以在算例中表 7 得到证实。

令 $U_i = e_i + j f_i, \quad U_i = e_i + j \quad f_i$, 则将式(14)左边虚部、实部分开为:

$$\text{Re}[i] = \frac{P_i e_i + Q_i f_i}{U_i^2}; \quad \text{Im}[i] = \frac{Q_i e_i - P_i f_i}{U_i^2} \quad (20)$$

仅假设 PV 节点电压相角较小, 左端忽略节点电压角度影响, 可得到误差方程的实部为:

$$\frac{P_i}{U_i^2} = G_{ii} \quad e_i - B_{ii} \quad f_i + \sum_{j, i, j=1}^n (G_{ij} \quad e_j - B_{ij} \quad f_j) \quad (21)$$

由此, 将式(13)的 Jacobian 矩阵元素实、虚部分开计算, 可以得到统一的常 Jacobian 矩阵。设第 k 个节点为 PV 节点, 则修正方程为式:

$$\begin{bmatrix} \text{Im}[1] \\ \text{Re}[1] \\ \dots \\ U_k \\ \frac{P_k}{U_k^2} \\ \dots \\ \text{Im}[n] \\ \text{Re}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & G_{11} & \dots & B_{1k} & G_{1k} & \dots & B_{1n} & G_{1n} \\ G_{11} & -B_{11} & \dots & G_{1k} & B_{1k} & \dots & G_{1n} & -B_{1n} \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -k_1 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ G_{k1} & -B_{k1} & \dots & G_{kk} & -B_{kk} & \dots & G_{kn} & -B_{kn} \\ \dots & \dots \\ B_{n1} & G_{n1} & \dots & B_{nk} & G_{nk} & \dots & B_{nn} & G_{nn} \\ G_{N1} & -B_{N1} & \dots & G_{Nk} & -B_{Nk} & \dots & G_{Nn} & -B_{Nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ f_1 \\ \dots \\ e_k \\ f_k \\ \dots \\ e_n \\ f_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

由式 (22) 求得的修正量对节点电压进行修正:

$$e_i^{(r+1)} = e_i^{(r)} - e_i^{(r)}; \quad f_i^{(r+1)} = f_i^{(r)} - f_i^{(r)} \quad (23)$$

用式 (17) 求解电压幅值的误差,再用式 (22) 反复迭代,当 $\max U_i <$ 停止迭代。求得的电压幅值和相角分别为:

$$U_i = \sqrt{e_i^2 + f_i^2}, \quad \tan \delta_i = f_i / e_i \quad (24)$$

从式 (22) 可以看出,只与系统的导纳矩阵有关的常 Jacobian 矩阵,在其迭代过程中不像牛顿 - 拉夫逊法那样要对 Jacobian 矩阵时时更新,其因子表只需一次形成,因而迭代过程就简化为对适配量的反复前代/回代过程,大大减少了计算量(如表 3)。

2 算例比较分析

本文选取 28 节点^[11]、30 节点^[12]、69 节点^[13]、120 节点 4 个系统来进行验证,并将该法与牛顿 - 拉夫逊法、快速解耦法以及文献[6]提到的方法进行收敛性比较。考虑到快速解耦法中的 BX 法比 XB 法收敛性能好,因此下面的表中以 BX 来代表快速解耦法。以下运算中允许误差为 10^{-6} ,nc 表示不收敛。

2.1 常 Jacobian 矩阵忽略负荷功率的条件测试

从以上形成的完全常数项 Jacobian 矩阵的过程来看,算法进行了 $|U_i^2 Y_{ii}| \gg |S_{is}|$ 的假设,前面 1.1 节已做出了理论证明,表 1 为 $|U_i^2 Y_{ii}| / |S_{is}|$ 比值的 4 个系统测算结果。

表 1 系统 $|U_i^2 Y_{ii}| / |S_{is}|$ 值的大小

Tab.1 The ratio of $|U_i^2 Y_{ii}| / |S_{is}|$ in different node systems

	28 节点	30 节点	69 节点	120 节点
最大	2 961.26	无穷大	无穷大	无穷大
最小	65.643	570.82	100.0	18.61

从表 1 可以看出,上述 4 个系统中,120 节点系统的值为最小且等于 18.61,在表 3 中依然显示出最好的收敛效果,说明 $\gg 1$ 这种假设是成立的。

2.2 配电网病态条件 R/X 值测试比较

配电网与输电网一个显著的差别在于线经的变化,因而导致了 R/X 的值远大于输电网的。所以在保持线路阻抗值不变的情况下,改变电阻电抗比值,来研究、比较几种算法的收敛性能,表 2 为 R/X 变化时 4 个系统的收敛次数比较。

从表 2 可以看出,牛顿 - 拉夫逊法、本文提出的算法以及文献[6]提出的算法都不受 R/X 的影响,

随着 R/X 的增大仍保持良好的收敛性;而 PQ 法受 R/X 的影响大,随着 R/X 的增大,PQ 法假设条件不再满足,其收敛性能急剧降低。

2.3 收敛速度的测试比较

文献[6]通过转换变量的方法形成了并不完全是常数的 Jacobian 矩阵,尽管较牛顿 - 拉夫逊法常数项增多了,但是每次迭代过程中与牛顿 - 拉夫逊法一样,系数矩阵仍要时时更新;而本文的算法是在牛顿 - 拉夫逊法的基础上建立了完全常数项的 Jacobian 系数矩阵,尽管迭代次数有所增加,但由于常系数矩阵的存在,每次迭代的时间却大大减少了,表 3 为系统的收敛次数和时间的比较。

表 2 R/X 比值变化时收敛比较

Tab.2 Convergence characteristics of different ratios of R/X

系统节点数	R/X 所乘因子	NR	BX	本方法	文献[6]
28	0.5	4	78	12	5
	1.0	4	nc	10	5
30	0.5	3	10	8	4
	1.0	3	14	8	4
	2.0	3	25	8	4
	3.0	3	41	8	4
69	4.0	3	nc	8	4
	0.5	3	9	6	4
	1.0	3	15	6	4
120	2.0	3	28	6	4
	3.0	3	nc	6	4
	0.5	2	5	4	4
120	1.0	2	6	4	4
	2.0	2	8	4	4
	5.0	2	nc	3	4

注:69 节点系统 B-KVA = 10000

表 3 收敛时间比较

Tab.3 Comparison of convergence time per iteration

系统	性能	NR	BX	本算法	文献[6]
28	时间	1.04		0.22	0.22
	次数	3	nc	6	6
30	时间	0.77	0.55	0.16	0.33
	次数	3	14	8	4
69	时间	6.10	1.87	0.49	0.72
	次数	3	15	6	4
120	时间	11.8	2.25	1.10	2.30
	次数	2	6	4	4

由表 3 可以看出,随着牛顿 - 拉夫逊法 Jacobian 矩阵常数项增多,算法的收敛速度可以大幅度提高。本方法则是完全常数项的 Jacobian,所以其收敛速度高于牛顿 - 拉夫逊法及改进牛顿 - 拉夫逊法如文献

[6]的方法。且文献[6]不适用于有环网和具有 PV 节点的配网; PQ 法虽是完全常数项的 Jacobian 矩阵,但由于其解耦条件导致收敛次数增大,明显劣于本方法。

图 1 是以 69 节点系统为例所作的牛顿 - 拉夫逊法、快速解耦法、文献[6]和本文方法收敛性能的比较曲线。从收敛特性图中可以看出,牛顿 - 拉夫逊法在配电网中仍为二次收敛,其收敛次数是最少的;在迭代次数上,开始阶段本文算法与文献[6]提出的方法优于牛顿 - 拉夫逊法;PQ 法不仅收敛次数多,而且由于解耦,其线性收敛性不是很稳定,相邻两次之间有上下抖动;随着收敛精度的提高,文献[5]迭代次数略高于牛顿 - 拉夫逊法;本方法由于完全常数化了 Jacobian 矩阵,收敛次数略逊于牛顿 - 拉夫逊法,但其收敛性能很稳定,曲线拟合中偏离点较少,表现出良好而稳定的一次收敛性能;但是需要强调的是,从表 3 可以看出,虽然二阶收敛方法迭代次数少,但线性的一阶收敛方法每次迭代的时间少,其收敛的时间远小于前者。表 4 为 69 节点系统不同收敛精度时,上述几种方法收敛次数与收敛时间的比较。

表 4 69 节点收敛精度、次数、时间比较

Tab. 4 Comparison of convergence accuracy, times and computing time of 69-node system

收敛精度	NR		PQ-BX		本方法		文献[6]	
	时间	次数	时间	次数	时间	次数	时间	次数
10^{-0}	1.92	1	0.17	1	0.17	1	0.22	1
10^{-1}	3.90	2	0.33	3	0.22	2	0.33	2
10^{-2}	3.85	2	0.49	5	0.16	2	0.33	2
10^{-3}	4.78	3	0.66	7	0.27	3	0.33	2
10^{-4}	4.73	3	0.88	10	0.38	4	0.50	3
10^{-5}	4.83	3	1.21	13	0.50	5	0.49	3
10^{-6}	5.94	3	1.43	15	0.49	6	0.66	4

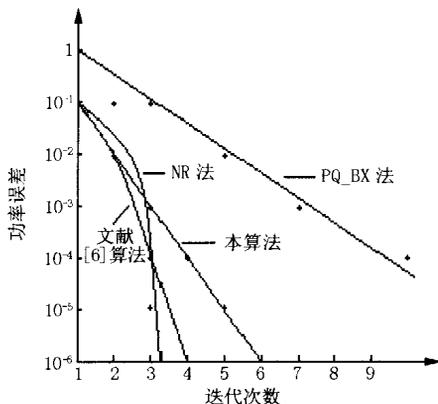


图 1 收敛特性曲线

Fig. 1 Convergence characteristics curve of different methods

从表 4 可以看出,常 Jacobian 矩阵法在收敛速度上具有突出的优势;从收敛次数看随着精度的变化,迭代次数也均匀地变化,说明其线性稳定性很高。

2.4 配电网 PV 节点测试比较

上面的 4 个测试系统里,均无 PV 节点,为了测试本方法对有 PV 节点系统潮流的收敛情况,并对其进行分析,在保持系统基本潮流状态情况下,本文对 4 个系统进行 PV 节点设定,对方法进行了测试比较。由于文献[6]不具备处理 PV 节点的能力,所以本文只提供了 NR 法、PQ-BX 法与本算法收敛情况的比较,表 5 为具有 PV 节点的系统测试。

表 5 具有 PV 节点系统测试

系统	PV 节点	PQ BX	本方法	NR
28	10 号	nc	7	5
	18 号	nc	11	5
30	15 号	nc	6	4
	10, 22 号	nc	6	4
69	10 号	14	5	4
	10, 22 号	nc	5	4
	30 号	nc	5	4
	10, 30 号	nc	5	4
120	40 号	15	5	4
	31 号	6	6	2
	39, 46 号	6	6	2
	59 号	6	6	2
	59, 100 号	6	7	2

从表 5 的测试可以看出,添加了 PV 节点后,本算法与牛顿 - 拉夫逊法依然保持了其迭代次数的优越性;同时 PQ-BX 法受大的 R/X 影响,多处仍然不能收敛,但从 120 节点系统看 BX 法都收敛了,这也说明了 BX 法在配网中使用的有限性。

表 6 是在 PV 节点用电压幅值拟合方程 $U_i = \sqrt{(e_i^2 + f_i^2)} = k_1 e_i + k_2 f_i$, 当 $k_1 = 1.05, k_2 = 0$ 时,4 个系统设定 PV 节点后,相角、正弦量、余弦量、电压幅值的实际误差及最大误差下的系统最大相角的测试结果。由结果可以看出,无论单 PV 节点,还是多 PV 节点,本方法都达到了良好的收敛结果。

前面已论证过,当 $k_2 = 0$ 时,幅值拟和的理论误差为 $(1 - k_1 \cos \delta)$,实际上即便是 k_1 导致的幅值误差很大,方程依然收敛。表 7 为 $k_2 = 0$ 时,不同的 k_1 值对收敛的影响。(限于篇幅,该表只绘制了 69 节点系统的 10 号 PV 节点,其余系统的 PV 节点有类似的结果。)

表 6 电压幅值拟和误差 $U_i = U_i^2 - \sqrt{(e_i^2 + f_i^2)}$ $U_i^2 - k_1 e_i - k_2 f_i$

Tab.6 Simulation error of voltage value $U_i = U_i^2 - \sqrt{(e_i^2 + f_i^2)}$ $U_i^2 - k_1 e_i - k_2 f_i$

系统	PV 节点	sin	cos	最大 / (°)	U %	最大 节点号	
28	10	0.032 438 6	0.032 432 9	0.999 474	4.734	4.944 76	18
	18	0.082 849 2	0.082 754 5	0.996 570	4.734	4.639 85	18
30	15	- 0.024 696	- 0.024 693	0.999 695	1.457 71	4.967 98	2
	10	- 0.022 816	- 0.022 859	0.999 739	1.4818	4.972 56	2
	22	- 0.024 151	- 0.024 149	0.999 708	1.969 38	1.969 38	2
69	10	0.036 727 0	0.367 187 0	0.999 326	2.37813	4.929 19	27
	30	0.032 036 0	0.032 030 9	0.999 487	1.849 74	4.946 12	35
	10	0.036 425 0	0.036 416 9	0.999 337	2.360 82	4.930 35	27
	30	0.031 986 7	0.031 981 2	0.999 488	4.946 29	4.946 29	27
	40	0.068 914 3	0.068 859 7	0.997 626	4.653 03	4.750 77	54
120	31	0.000 477	0.000 477 0	1	0.465 55	4.999 99	6
	39	0.000 260	0.000 260 0	1	0.466 209	4.999 99	6
	46	0.000 299	0.000 2990	1	1.180 13	4.999 99	6
	59	0.003 320	0.003 320 0	0.999 994	4.999 42	4.999 42	59
	100	0.020 597	0.020 595 7	0.999 788	4.977 73	4.977 73	59

注:拟合议程为 $U_i = \sqrt{(e_i^2 + f_i^2)}$ $k_1 e_i + k_2 f_i$

表 7 k_1 变化对收敛的影响

Tab.7 Convergence influenced by variable k_1

k_1	次数	时间	电压幅值误差
0.90	7	0.93	10.067 00
1.00	5	0.77	0.067436
1.05	5	0.77	4.929 19
1.10	6	0.88	9.925 82
1.20	8	1.04	19.919 10
1.50	12	1.54	29.912 30
2.00	17	2.15	98.865 10

从表 7 可以看出:当设置 k_1 产生近 100% 的电压幅值误差时,方程依然收敛。由此说明在电压幅值准确值基础上线性拟合的合理性。当然, k_1 、 k_2 不同的选择导致方程的迭代时间和次数也不尽相同。表 8 是以 28 节点系统 18 节点为 PV 节点时不同 k_1 、 k_2 的值收敛次数的比较。

表 8 不同 k_1 、 k_2 的值收敛次数的比较

Tab.8 Comparison of convergence times of different k_1 and k_2

k_1	1	1.05	1	1.05	1.05
k_2	0	0	0.1	0.05	0.1
次数	16	14	12	11	10

从表 8 中可以看出,不同的 k_1 、 k_2 的值导致的收敛次数和时间的不同。但为了提高收敛速度又不失一般性,一般都选择 $k_1 = 1.05$, $k_2 = 0$ 。从表 7 可以看出 $k_1 = 1.05$ 时收敛次数和收敛时间最小。充分证明了选择的合理性。

2.5 环网测试

本方法是根据牛顿 - 拉夫逊法的基本原理推导出的,所以在配网倒换负荷或故障时,在可能出现短时环网的情况下同样可以处理。表 9 是以 69 节点系统为例形成环网的支路数据,增加支路如下:

表 9 添加新支路

Tab.9 Added new branches

始节点	终节点	电阻	电抗
10	28	1.376 0	0.389 0
22	25	1.736 0	0.389 0

增加这两条支路后,形成了两个环,系统成为有环网。牛顿 - 拉夫逊法迭代 3 次,本方法迭代 6 次后,功率误差缩小到 10^{-6} 内,与增加前收敛次数是一样的。由此可以看出,网络的连同对本算法没有影响。所以本算法也适用于有环配电网。

2.6 算法的稳定性

正是由于基于牛顿 - 拉夫逊法常 Jacobian 矩阵的形成,使得迭代方程的稳定性大幅度提高,表 10 是以 69 节点系统为例,选择不同电压幅值的初值时算法收敛稳定性的比较。

从表 10 可以看出,当电压幅值的初值为 0.2 时,牛顿 - 拉夫逊法和文献[6]的方法都不收敛;PQ 法的迭代次数和时间都大幅度增加;而本算法却能理想收敛,说明本算法对初值选择的灵敏度比其它算法小得多,证明该算法不仅线性度高,而且稳定性远优于其它方法。此外,由此表可以看出,文献[6]

的方法,降低了牛顿-拉夫逊法的特性,使得初值选择的灵敏度骤然提高。

表 10 算法稳定性比较

Tab. 10 Comparison of algorithm stability

幅值	收敛性	NR	BX	本方法	文献[6]
1.05	次数	4	15	6	nc
	时间	55.71	1.37	0.5	
1.03	次数	4	15	6	14
	时间	5.66	1.43	0.5	2.13
0.9	次数	4	16	5	nc
	时间	5.66	1.43	0.5	2.13
0.7	次数	4	17	8	nc
	时间	6.37	1.54	0.60	
0.3	次数	7	63	10	nc
	时间	15.27	6.15	0.82	
0.2	次数	nc	63	11	nc
	时间		6.26	0.88	
0.1	次数	nc	62	12	nc
	时间		6.39	0.99	

3 结论

本文论述了基于牛顿-拉夫逊法极坐标形式,忽略 Jacobian 矩阵对角元的负荷功率,对 PV 节点的电压实部、虚部进行线形拟和,建立了完全常数项的常 Jacobian 矩阵,并对常 Jacobian 矩阵形成的原理进行了论证,由算例证实了其近似的合理性。最后由多项测试表明,由导纳矩阵直接得到的常 Jacobian 矩阵,迭代时无须改变,其计算量明显小于 NR 法及类似方法;该方法线性度高,稳定性优越,不受 R/X 比值的影响;迭代过程中有功、无功无须解耦;对有环配电网以及有接地电容系统都适用,因此该潮流算法不仅可以广泛应用于配电网的潮流问题中,也可用于输电网。

参考文献:

- [1] Chen T H, Chen M S, Hwang K J, et al. Distribution Systems Power Flow Analysis a Rigid Approach[J]. IEEE Trans on PWID, 1991, 6(3) :1146-1152.
- [2] Tripathy S C, Prasad G D, Malik O P, et al. Load Flow Solutions for Ill-conditioned Power System by a Newton-like Method[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(10) :3648-3657.
- [3] Das D, Nagi H S, Kothari D P. Novel Method for Solving Radial Distribution Networks [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrab, 1994, 141(1) :291-298.

- [4] Goswami S K, Basu S K. Direct Solution of Distribution System[J]. IEEE Proc—C, 1991, 138(1) :78-88.
- [5] Zhan 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.
- [6] Exposito A C, Ramos E R. Reliable Load Flow Technique for Radial Distribution Network[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3) :1063-1069.
- [7] 牛辉,郭志忠(NIU Hui, GUO Zhi-zhong). 电流注入模型的电力系统潮流计算(Power Flow Algorithm Based on Current-Influs Model)[J]. 电网技术(Power System Technology), 1998, 22(11) :39-41.
- [8] Tripathy S C, Durga P G, Malik O P, et al. Loadflow Solutions For ill-conditioned Power Systems by a Newton-like Method[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10) :3648-3657.
- [9] 索南加乐,李怀强,罗云照(SUONAN Jia-le, LI Huai-qiang, LUO Yun-zhao). 一种新的配电网潮流常 Jacobian 牛顿算法(A Novel Newton Method with Constant Jacobian Matrix for Distribution Systems)[J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 2002, 36(12) :1222-1226.
- [10] 索南加乐(SUONAN Jia-le). 同杆双回线的故障分析及继电保护(博士学位论文)(Fault Analysis of Double Circuit Lines and Protective Relaying, Doctoral Dissertation)[D]. 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1991.
- [11] Ghosh S, Das D. Method for Loadflow Solution of Radial Distribution Networks [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(6) :641-648.
- [12] Cespedes R. New Method for the Analysis of Distribution Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(1) :391-396.
- [13] Baran M E. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1) :725-732.

收稿日期: 2003-12-23; 修回日期: 2004-06-21

作者简介:

贺江胜(1965-),男,硕士研究生,主要从事电力系统潮流计算方面的研究工作; E-mail: lao-lang308@sohu.com

索南加乐(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护的教学和研究工作;

李怀强(1978-),男,硕士研究生,主要从事电力系统潮流计算方面的研究工作。

Method analysis and comparison of power distribution systems composed of PV nodes with constant Jacobian matrix

HE Jiang-sheng, SUONAN Jia-le, LI Huai-qiang, SHAN Ya-zhou

(Electrical Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the increasing demand for real-time control of power distribution system, it is necessary to search for a new method which could not only form constant Jacobian coefficient matrix to accelerate iteration convergence rapidly, but also solve ill-conditioned nonlinear algebraic equation not to result in divergence as well. Based on Newton-Raphson method in polar form and derived from complex power equation, the Jacobian matrix of the proposed method has become constant by neglecting node load power which will bring less influence in iterating process and by linearizing the real and image of PV node voltage to magnitude. The applicability of constant Jacobian matrix has been demonstrated in detail and tested by numerical tests. The results show that the proposed method is very efficient and requires less computer memory observably. It does not need to decouple, and the ratio of resistance and reactance does not influence its convergence. The proposed method has excellent convergence characteristics and much better robustness. The results of the algorithm are analyzed in this paper. The proposed method can be used in meshed distribution and transmission networks as well.

Key words: power distribution system; load flow; constant Jacobian matrix

(上接第 12 页 continued from page 12)

作者简介:

唐剑东(1976-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中的应用; E-mail: tangjdw@vip.sina.com

熊信银(1945-),男,教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中应用;

吴耀武(1963-),男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划。

Reactive power optimization of power system based on artificial fish swarm algorithm

TANG Jian-dong, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, JIANG Xiu-jie

(School of Electric Power, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An artificial fish swarm algorithm(AFSA) for reactive power optimization of power system and a model based on AFSA are presented for the first time in this paper. Compared with the genetic algorithm(GA) and the modified Tabu search algorithm(MTSA), the reactive power optimization result of IEEE 6, IEEE 14 node system and a real region power system by AFSA shows that AFSA has a strong robustness and good global astringency. It also shows that AFSA is a successful and feasible approach for reactive power optimization.

Key words: artificial fish swarm algorithm; power system; reactive power optimization; random search

(上接第 17 页 continued from page 17)

Multi-parameter bifurcation analysis of a typical power system with the Walve aggregated load model

LIU Shao-feng, GAO Jiu-feng, LI Peng

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper performs a multi-parameter bifurcation analysis of a typical power system with the Walve aggregated load model using a general nonlinear analysis software Auto97. The results indicate that the method by multi-parameter bifurcation analysis is superior to that by single-parameter analysis in discovering the influences of system parameters on voltage stability of power system. The results imply that a higher reference voltage(V_{ref}) and a bigger exciter gain(K_{AVR}) can not only increase the power transmission limit of the system, but also decrease the possibility of voltage collapse caused by system voltage oscillating. The analysis also indicates that there is a complementary relation between V_{ref} and K_{AVR} , thus adjusting K_{AVR} and V_{ref} properly can avoid Hopf bifurcation and maintain the system's security operation, and that a higher limit of the excitation conduces to sustaining system voltage dynamic stability.

Key words: power systems; voltage stability; saddle-node bifurcation; Hopf bifurcation