第 43 卷 第 6 期 2019 年 3 月 25 日
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.43 No.6 Mar.25, 2019
DOI: 10.7500/AEPS20180428001

大规模输配一体化系统牛顿法潮流计算性能分析及改进方法

唐坤杰[1], 董树锋[1], 朱炳铨[2], 宋永华[3,1]

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省杭州市 310007;
3. 澳门大学电机及电脑工程系, 澳门特别行政区 999078)

摘要: 为满足输配电网一体化潮流计算精度和计算速度需求,提出了一种改进的牛顿法潮流计算方法。针对输配电网一体化牛顿法雅可比矩阵病态严重、收敛性能较差等问题,采用自适应 Levenberg-Marquardt 算法初始精度提升速度快的特征选取初值、不完全三角分解法预处理雅可比矩阵,有效地保证了数值稳定性,提高了牛顿法的收敛性能。针对输配电网一体化后规模庞大、计算效率低等问题,利用图形处理器并行加速技术对算法中的一些计算量密集的步骤,包括雅可比矩阵的生成、矩阵-向量运算等进行加速处理。算例测试表明,该算法能够显著提高大规模输配电网一体化潮流计算的速度和精度,对于多配电网区域、环网、分布式电源、病态系统等多种情形具有较强的普适性。

关键词: 输配电网一体化; 牛顿法; 潮流计算; 收敛性能; 图形处理器并行加速

0 引言

2012 年,国家电网有限公司发布了公司 1 号文件《关于全面推进"三集五大"体系建设的意见》,其中的"大运行"体系建设要求"建立各级输变电设备运行集中监控与电网调度业务高度融合的一体化调度控制体系,实行国调、分调运行业务一体化运作"[1-2]。输配电网协同管理和调度的概念应运而生,输配电网的协同计算需求日益增长[3-5]。

传统分层分区管理体制下的潮流计算一般采用等值算法,即网省级调度一般将配电网等值为功率已知的负荷,地县级调度则将输电网等值为电压已知的电源。但是,由于配电网中光伏、风机等分布式电源迅速发展,输电网与配电网间的耦合关系大大增强[6-8]。因此,在输配电网一体化背景下,电网需要重新进行建模,潮流计算的方法也相应产生变化,一些学者对于输配电网全局潮流的建模和计算进行了研究。文献[7-11]提出了主从分裂模型,并采用交替迭代算法求解输配电网全局潮流。但是,主从分裂模型本质上仍是一种分层模型,且需要主从多次迭代,对于环网需要额外进行处理,实现过程相对繁琐。

在输配电网一体化格局下,为了精细刻画输配电网间的耦合性,牛顿法仍然是一个较好的选择。近年来,很多学者对于如何提高牛顿法潮流计算的性能做了深入的研究。文献[12-17]通过对牛顿法潮流计算过程中的雅可比矩阵做适当改进提高牛顿法的收敛性能。文献[18]针对牛顿法初值敏感性提出了一些提高牛顿法潮流收敛性的初值给定方法。文献[19-20]利用图形处理器(graphics processing unit, GPU)并行计算技术应用到牛顿法中提高大规模潮流计算效率。但是,以上的成果还未针对输配电网一体化牛顿法性能做出针对性的分析研究。

结合以上问题,本文沿着"建模—算法设计—算法实现"的思路,对输配电网一体化潮流计算进行了改进设计。具体地,本文的主要工作和创新包括以下几点。

1)建模方面:结合具体算例,揭示全局一体化模型和算法的必要性,以及一体化牛顿法对于求解输配电网一体化潮流的优势。

2)算法设计方面:利用不完全三角分解法(以下简称 ILU 分解法)作为雅可比矩阵预处理方法。同时,利用自适应 Levenberg-Marquardt 算法(以下简称 L-M 算法)抗病态能力强、初始精度提升速度快的特点,选取输配电网一体化牛顿法潮流计算的初值,提高一体化牛顿法的收敛性。

3)算法实现方面:利用 GPU 并行加速技术对计算密集型步骤进行加速,提高算法的计算效率。

算例测试表明,本文提出的算法应用于大规模

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-09-08。
上网日期: 2018-11-29。
国家电网公司科技项目(52110418000M)。

输配电网一体化潮流计算中收敛性能优良,计算效率高,对于多配电网区域、环网、分布式电源、病态系统等情形有较强的适用性。

1　基于主从分裂模型的输配电网全局潮流计算方法的主要缺陷

1.1　基本数学模型

在主从分裂模型中,输电网作为主系统,配电网作为从系统,主系统和从系统之间没有直接相连的支路,而只是间接地通过边界节点发生联系[10]。

一般采用交替迭代算法求解模型,即输配电电网分别采用适宜的算法、基准值和收敛精度要求交替进行潮流计算,使得预设的中间变量最终收敛[7-10]。

1.2　算法的局限性

1.2.1　主从分裂算法原理分析

主从分裂算法能够计算输配电网全局潮流,但其本质上仍是一种分层的、近似的模型。

其中,"分层"体现在交替迭代的过程中,只有在边界节点处输配电网之间发生数据交换,而输配电网的潮流仍由各级调度系统独立进行计算,对外部网络不需要建立详细模型[13]。

而"近似"指的是在交替迭代计算过程中的配电网潮流部分,需要假设配电网的根节点为平衡节点或假设其电压恒定。而事实上,这些根节点在一体化输配电网下往往只是普通的 PQ 节点。因此,这一假设可能使得主从分裂模型交替迭代的收敛值和传统的牛顿法计算结果存在一定偏差。为了验证这一结论,利用算例 A 和算例 B 进行测试,对比主从分裂法和牛顿法计算边界节点电压幅值 U_B(本文中电压幅值均采用标幺值,后文不再另行标注)、注入有功功率 P_B、注入无功功率 Q_B的结果。算例 A 和算例 B 的输电网部分均为 IEEE 标准算例 CASE 30,但接入的配电网总负荷存在较大差异。对比结果见附录 B 表 B1。

由表 B1 不难看出,在接入配电网负荷较小时,主从分裂法收敛的值与传统的牛顿法计算结果一致,这是因为,主从分裂法计算配电网部分时所隐含的假设条件——配电网的根节点电压恒定是成立的,因此这一假设不会给交替迭代计算结果带来显著误差。但是当配电网总负荷较大时,主从分裂法所隐含的假设条件不再成立,最终收敛的值与传统的牛顿法计算结果则存在较大偏差。

1.2.2　多配电网区域的收敛性问题

主从分裂模型及交替迭代算法的核心在于边界节点的物理量交互,但这也是这一模型和算法的潜在弱点。根据主从分裂法的收敛性分析,随着同一配电根节点下馈线数目的增加,主从分裂法的收敛性将变差[10]。

1.2.3　环网、分布式电源对算法的影响

环网、分布式电源会恶化主从分裂算法的收敛性[11]。同时,由于对于环网、分布式电源需要进行等值处理,导致算法繁琐,且计算结果不够精确。随着智能电网的发展,分布式电源渗透率逐步上升,环网运行方式也逐渐增多,因此,传统的主从分裂法的适用性受到限制。

2　大规模输配电网一体化牛顿法潮流计算的优势及关键问题分析

2.1　牛顿法潮流计算的优势

2.1.1　输配电网的耦合关系分析

由 1.2.1 节的分析可知,主从分裂模型实质上是分层的、近似的,在需要精确计算的场合上具有局限性。而一体化牛顿法潮流计算,将输配电网模型不设假设条件、不作近似地完全进行拼合,即将输电网和配电网中每一个节点和每一条支路都视作相同地位进行处理,是一种全局一体化模型,能够精确刻画输配电网的耦合关系,而不仅仅是通过边界节点的物理量变化来反映。

由于在模型和算法方面都不隐含对系统的假设和近似,因此可以认为利用一体化牛顿法可以精确刻画输配电网一体化的潮流分布。

2.1.2　多配电网区域、环网、分布式电源适应性分析

根据牛顿法的特点可知,多配电网区域、环网、分布式电源都是一种普通的情形,无须像主从分裂算法一样进行额外的处理。例如环网的联络开关可以处理为牛顿法中的一条支路,分布式电源连接的节点可以处理为牛顿法中的 PV 节点。因此,算法实现简单,普适性强。

2.2　关键问题分析

虽然牛顿法有计算精确、普适性强的优势,但是用于大规模输配电网一体化潮流计算时也面临一些收敛性能、计算精度、计算效率等方面的困难和挑战,需要作为关键问题进行处理。

2.2.1　雅可比矩阵的预处理

雅可比矩阵是一个稀疏、非对称、实矩阵。由于输配电网的网络参数、负荷量一般存在数量级差异,一体化输配电网使得牛顿法计算过程中产生的雅可比矩阵条件数差,谱分布分散,呈现病态,如附录 B 表 B2 所示。这可能产生数值问题,也有可能影响牛顿法的收敛性。因此,需要采取合适的预处理措

施改善雅可比矩阵的条件数和谱分布。

2.2.2　牛顿法的初值选取

牛顿法对于初值的选取比较敏感，不恰当的初值会使得算法不收敛[23]。在输配电网一体化下，系统往往呈现病态。如附录 B 表 B3 所示，部分算例如算例 C 至算例 E 采用平启动将出现雅可比矩阵趋向奇异的情形，最终无法收敛。因此，需要采取方法寻找合适的初值以保证牛顿法的收敛性。

2.2.3　大规模系统的计算加速

实际的输配电网一体化系统规模非常庞大，因此传统的计算方式往往难以满足潮流计算的实时性需求。因此，需要采取一些并行技术来实现牛顿法的加速。

3　大规模输配电网一体化牛顿法潮流计算收敛性能分析及改进方法

3.1　基于 ILU 分解法的雅可比矩阵预处理

根据 2.1.1 节和 Kantorovich 定理[23]可知，对雅可比矩阵进行预处理，改善病态程度，不仅有利于减少数值问题的产生，还能够保证牛顿法的收敛性。

考虑到输配电网一体化牛顿法中的雅可比矩阵一般是大型非对称的稀疏矩阵，且对角线是占优的，因此 ILU 分解法是一个较好的选择[19,24]。

另一方面，由于输配电网一体化的大型病态系统产生的雅可比矩阵条件数差，为了收获更好的性能，ILU 分解法的填充等级的确定需要在计算效率和预处理效果中间做出折中处理。本文采取 ILU2 分解法。

3.2　基于自适应 L-M 算法的牛顿法初值选取

根据 2.1.2 节和 Kantorovich 定理[23]可知，牛顿法的收敛性与初值的选取高度相关。传统的初值选取方法如 Gauss-Seidel 法，计算效率很低，不适用于大规模系统的实时性潮流计算。因此，需要利用尽可能低的计算代价寻找初值。

自适应 L-M 算法是通过解决非线性最小二乘问题，以应对矩阵病态的挑战[25]。一些学者将这一方法应用到病态潮流的求解中，以提高收敛性[15-17]。但是，L-M 算法计算量大，收敛速度也比较慢，用这一方法完整计算潮流效率比较低。

利用文献[16]中的方法对算例 C 至算例 E 进行潮流计算。从图 1 可以看出，自适应 L-M 算法的收敛曲线特性变化较大，特别是易出现“平台”区。对于较大规模的算例如算例 D 和算例 E，收敛次数达到 35 和 55 次之多，计算效率低。图 1 中的 $\boldsymbol{F}$ 表示迭代过程中的误差向量。

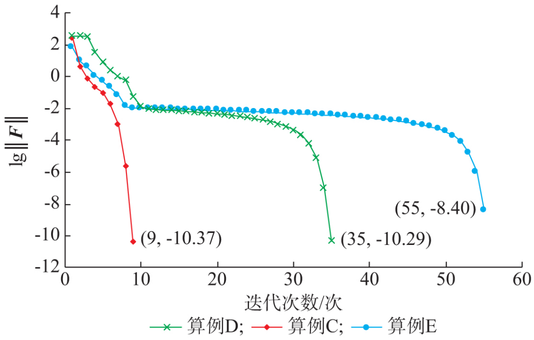

图 1　L-M 算法计算精度变化曲线

Fig.1　Variation of calculation precision by L-M algorithm

但是，根据图 1，收敛曲线在初始迭代时很陡，说明计算精度提升较快。利用这一特性，可以将这一算法和牛顿法进行结合，即基于自适应 L-M 算法进行牛顿法的初值选取，然后再利用牛顿法收敛速度快、运算量相对较小的优势，提高计算效率。

本文提出的基于自适应 L-M 算法初值选取的牛顿法的具体步骤如下。

步骤 1：设定潮流状态变量初值 $\boldsymbol{X}_1$（平启动），取舍指标下限阈值 p_0，阻尼因子修正上限阈值 p_H，阻尼因子修正下限阈值 p_L，自适应因子下限阈值 m，自适应因子调整系数 s，自适应因子初值 α_1，残差向量目标收敛精度 r，L-M 算法迭代步数 $k=1$。

步骤 2：根据式(1)计算当前迭代步的阻尼因子 λ_k。

$$\lambda_k=\alpha_k\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k)\| \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{F}(\cdot)=\boldsymbol{0}$ 为潮流方程；下标 k 表示迭代步为 k 时对应的值。

步骤 3：根据式(2)计算当前迭代步的修正量 $\Delta\boldsymbol{X}_k$。

$$\Delta\boldsymbol{X}_k=-(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}_k)\boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}_k)+\lambda_k\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}_k)\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{J}(\cdot)$为雅可比矩阵；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

步骤 4：根据式(3)计算取舍指标 τ_k。

$$\tau_k=\frac{\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k)\|^2-\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k+\Delta\boldsymbol{X}_k)\|^2}{\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k)\|^2-\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k)+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}_k)\Delta\boldsymbol{X}_k\|^2} \tag{3}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{X}_k$ 为潮流状态变量变化值。

步骤 5：将 τ_k 与取舍指标与下限阈值 p_0 对比，确定是否接受当前迭代步的修正。

$$\boldsymbol{X}_{k+1}=\begin{cases}\boldsymbol{X}_k+\Delta\boldsymbol{X}_k & \tau_k>p_0\\ \boldsymbol{X}_k & \tau_k\leqslant p_0\end{cases} \tag{4}$$

步骤 6：调整自适应因子。

$$\alpha_{k+1}=\begin{cases} s\alpha_k & \tau_k < p_{\mathrm{L}} \\ \alpha_k & p_{\mathrm{L}} \leqslant \tau_k \leqslant p_{\mathrm{H}} \\ \max\left(\dfrac{\alpha_k}{s}, m\right) & \tau_k > p_{\mathrm{H}} \end{cases} \tag{5}$$

步骤7：若$\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k)\|_\infty < r$，则进入步骤8，否则令$k=k+1$，返回步骤2。

步骤8：设定牛顿法最大迭代步数、收敛精度，利用$\boldsymbol{X}_k$作为牛顿法初值，进行牛顿法求解。

算法中涉及的参数$p_0, p_{\mathrm{L}}, p_{\mathrm{H}}, m, s, \alpha_1, r$等选取的优劣关系到算法的收敛情况和计算效率，一般采用大量数值实验得到的经验参数。

上述算法中，式(2)其实是线性方程组的求解表达式，其中，由于$\lambda_k \boldsymbol{I}$的引入使得方程组的系数矩阵条件数差，可能引起数值精度问题。为了规避这一问题，可以考虑将方程组改写为：

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_k}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}_k)^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}_k) & -\sqrt{\lambda_k}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{X}_k \\ \dfrac{\boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}_k)\Delta\boldsymbol{X}_k}{\sqrt{\lambda_k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1(\boldsymbol{X}_k) \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{F}_1(\boldsymbol{X}_k) = -\frac{\boldsymbol{J}(\boldsymbol{X}_k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}_k)}{\sqrt{\lambda_k}} \tag{7}$$

不难发现，经过改写后的线性方程组的系数矩阵为实数对称矩阵，可以采用LDL分解提升计算效率。算例表明，改写后的系数矩阵条件数显著降低，方程组求解具有更好的数值稳定性。

4　大规模输配电网一体化牛顿法潮流计算的GPU并行加速方法

实际的输配电网一体化系统规模非常庞大，为了满足潮流计算的实时性需求，对于上述算法中的一些计算量密集的步骤需要进行必要的加速处理。

4.1　GPU加速与CUDA模型

近年来，GPU技术飞速发展，特别是在GPU通用计算编程模型和框架CUDA(compute unified devices architecture)推出后，GPU因其强大的并行计算能力已被广泛应用到诸多学科领域中[26]。在CUDA编程模型下，用户可以编写特殊的内核函数，对于不同的数据并行处理相同的指令[27]。

4.2　大规模雅可比矩阵的并行生成

在潮流计算中，以极坐标为例，雅可比矩阵中的每一个元素都是导纳矩阵元素、节点间相角差、节点电压、节点功率注入等参量的函数，任意两个元素之间的计算相互独立，因此雅可比矩阵的生成是自然可并行的。考虑到雅可比矩阵一般为稀疏矩阵，可以采用稀疏存储技术利用CSR(compressed sparse row)格式存储雅可比矩阵，利用GPU分别并行生成行偏移数组、列号数组和数值数组[20]。

4.3　大规模矩阵-向量运算的并行加速

矩阵-向量运算同样具有自然可并行性。数据规模较大时，利用GPU能够并行加速。具体地，在本文算法中，式(3)、式(6)中均包含矩阵-向量乘法的运算形式，可以进行并行加速处理。

5　算例分析

为了验证相关结论，本文使用或构造了算例A至算例H作为测试分析使用(详见附录A表A1)[21-22]。测试中的程序基于MATLAB R2015a编写，运行在64 bit的Windows10操作系统上。测试使用的CPU型号为Intel Core i7-7700K，运行主频为4.20 GHz；内存为32 GB；GPU为NVIDIA GeForce GTX1080，支持CUDA8.0标准。潮流计算收敛精度要求为10^{-8}(标幺值)，牛顿法最大迭代次数为50次。

5.1　算法计算精确度分析

本文提出的算法计算较传统的等值算法、主从分裂算法都有更高的精度。以MATPOWER 6.0的潮流计算结果作为参照，利用算例A、算例B、算例G、算例H比较本文算法、主从分裂算法、等值算法计算边界节点电压幅值U_{B}、注入有功功率P_{B}、注入无功功率Q_{B}的结果，如表1所示。其中，各算例的输电网部分均为IEEE标准算例CASE 30，以算例A为参照样例，算例B接入的配电网总负荷显著增大，算例G接入与算例A相同的配电网但闭合联络开关，算例H接入与算例A相同的配电网但接入分布式电源。综合算例A、算例B、算例G、算例H计算结果，以分析算法在重负荷、环网、分布式电源等情形下的计算精确度。

由表1可知，MATPOWER的潮流计算结果与本文算法的计算结果完全一致，这是由于本文算法将输电网和配电网的模型完全拼合为一个整体进行计算，且模型、算法中不隐含任何假设条件，故而利用一体化牛顿法计算潮流所得到的收敛值是输配电网一体化系统潮流的精确解。此外，特别要指出的是，除了能够和MATPOWER的潮流算法取得相同精度外，本文算法相对于MATPOWER潮流算法在收敛性能方面更具优势，将在5.3节中进行验证和说明。

表1　不同算法的潮流计算结果对比

Table 1　Comparison of power flow calculation results with different algorithms

算例	边界节点序号	是否含环网	是否含分布式电源	配电网总负荷/MVA	自适应L-M本文算法			主从分裂算法			等值算法		
					U_B	P_B/MW	Q_B/Mvar	U_B	P_B/MW	Q_B/Mvar	U_B	P_B/MW	Q_B/Mvar
A	1	否	否	7.60+j5.39	0.925	4.318	2.928	0.925	4.318	2.928	0.929	3.803	2.695
	2				0.925	4.318	2.928	0.925	4.318	2.928	0.929	3.803	2.695
B	1	否	否	22.71+j17.04	0.964	24.532	18.495	0.974	10.810	8.499	0.965	22.727	17.127
G	1	是	否	7.60+j5.39	0.926	3.978	2.842	0.926	3.978	2.842	0.929	3.803	2.695
	2				0.926	4.316	2.927	0.926	4.316	2.927	0.929	3.803	2.695
H	1	否	是	7.60+j5.39	0.987	2.636	−12.030	0.949	2.326	−1.770	0.934	1.802	2.696
	2				0.985	4.231	2.890	0.948	4.281	2.912	0.934	3.803	2.697

由表1可知,等值算法的计算结果有较大误差,对于环网、分布式电源的处理效果很差。对于算例G,系统中含有环网结构,但在将配电网等值到输电网的过程中环网结构会被忽略,故等值算法的计算结果与联络开关断开时没有区别(算例A),造成计算偏差;而对于含分布式电源算例H的边界节点1,计算偏差更为显著,电压的计算偏差超过0.05,无功功率的计算偏差甚至超过14 Mvar。

主从分裂算法相比等值算法的精确度显著提高,对于配电网负荷较轻及环网情形,如1.2.1节中所述,主从分裂算法的假设条件成立,故而处理效果较好,和一体化牛顿法能达到基本相同的精度。但是,对于配电网负荷较重或分布式电源存在的场合处理效果不佳。特别地,对于算例B,有功、无功功率的计算偏差分别接近14 MW和10 Mvar。

综上可知,本文提出的输配电网一体化牛顿法对于环网、分布式电源等情形具有普适性,能够实现潮流的精确计算。

5.2　雅可比矩阵预处理效果分析

以一体化牛顿法潮流计算算例C第一次迭代中生成的雅可比矩阵为例,对比ILU(0),ILU(1),ILU(2)分解法、对角线预处理下,雅可比矩阵条件数和谱分布的改善情况,以及预处理的计算耗时,如表2所示。

表2　不同预处理方法下牛顿法第一次迭代雅可比矩阵特性及预处理计算耗时

Table 2　Properties of Jacobian matrix formed in the first iteration of Newton method under different preconditioning methods and their time consumption

预处理方法	预处理前		预处理后		
	条件数	最大特征值	条件数	最大特征值	耗时/ms
ILU(0)	2.692×10^6	5.349×10^4	1.282×10^4	1.962±0.076i	1.24
ILU(1)			2.505×10^3	1.943±0.159i	12.40
ILU(2)			1.004×10^3	1.887	14.14
对角线			4.464×10^7	2.331±58.596i	0.35

由表2可知,对于病态系统算例C,4种预处理方法都显著改善了雅可比矩阵的谱分布。而在条件数方面,对角线预处理虽然速度快,但是增大了条件数,效果较差,ILU分解的三种方法速度相对较慢,但都降低了2个数量级以上的条件数。

进一步地对比ILU分解法的三种系列方法可以看出,随着填充等级的提高,条件数改善效果更佳,谱分布也更加聚集,但是计算耗时也在增加。因此,由于输配电网一体化牛顿法潮流中的雅可比矩阵病态严重、规模大,填充等级需要折中选择,本文算法选择ILU(2)分解法。

5.3　基于自适应L-M算法初值选取方法的效果分析

结合文献[28]中的大量数值实验结果,及输配电网一体化牛顿法中雅可比矩阵的实际特点,算法中的相关参数取值为:取舍指标下限阈值 $p_0=0.000\,1$,阻尼因子修正上限阈值 $p_H=0.95$,阻尼因子修正下限阈值 $p_L=0.8$,自适应因子下限阈值 $m=0.001$,自适应因子调整系数 $s=10$,自适应因子初值 $\alpha_1=1$,残差向量目标收敛精度 $r=100$。

上文2.2.2节中已经分析到,实际的输配电网一体化系统往往严重病态,MATPOWER潮流算法难以保证收敛性,如在平启动下对于算例C至算例E的潮流求解无法收敛。进一步地,为了验证本文提出的初值选取方法的有效性和高效性,利用本文算法和MATPOWER中的Gauss-Seidel算法对算例C至算例E进行计算。算例C至算例E是三个严重病态的输配电网一体化系统,用以凸显出使用自适应L-M算法的必要性,突出其相比于传统算法的优势。

由表3可知,本文使用的自适应L-M算法的收敛性显著好于MATPOWER中的Gauss-Seidel算法,对于病态系统算例D和算例E,Gauss-Seidel算法发散,无法实现初值选取。同时,自适应L-M算法的计算速度也更快。

表 3　两种初值选取算法的计算效率对比
Table 3　Efficiency comparison of two algorithms for choosing initial values

算例	自适应 L-M 算法		Gauss-Seidel 算法	
	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms
C	2	69.99	2	312.67
D	4	250.76	发散	—
E	1	290.09	发散	—

注："—"表示在 Gauss-Seidel 算法设定最大迭代次数 1 000 的条件下，算法发散，故不统计计算时间。

5.4　GPU 加速效果分析

本文提出了大规模雅可比矩阵生成、矩阵运算、矩阵-向量运算的 GPU 并行加速方法。为了验证算法的有效性，利用 10 000 节点以上大规模算例 E 和算例 F 进行测试，统计平均每次雅可比矩阵生成时间，即式(3)和式(6)中矩阵-向量运算的 CPU 串行计算时间和 GPU 并行计算时间。

由图 2 可见，本文算法对于大规模雅可比矩阵生成和矩阵-向量运算有显著的加速效果，对于式(3)和式(6)中的矩阵-向量乘法能够分别实现 2～4 倍、9～11 倍的加速效果。而对于雅可比矩阵的生成，GPU 加速效果更加显著，加速比超过 30 倍。

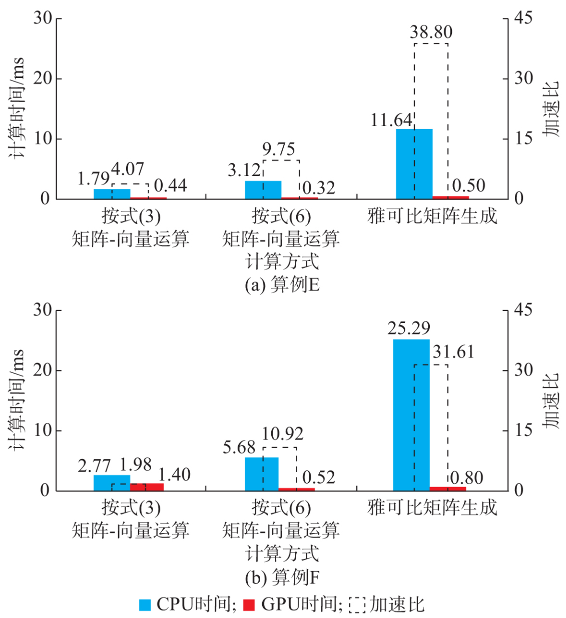

图 2　GPU 加速效果分析
Fig.2　Analysis of GPU acceleration effect

5.5　算法总体性能分析

为了验证本文算法的总体性能，统计各算例下 L-M 算法寻初值的迭代次数、牛顿法迭代次数以及潮流计算的总耗时，如表 4 所示。

由表 4 可见，本文提出的算法通过 L-M 算法和牛顿法的组合使用，收敛性能好，牛顿法一般经过 4～6 次迭代即可收敛。

算法计算速度快，特别地，对于算例 F 这样的 30 000 节点以上的输配电网一体化算例，潮流计算时间小于 1 s，在大规模系统中同样能够满足潮流计算的实时性需求。

表 4　算法总体性能分析
Table 4　Analysis of overall performance

算例	节点数	支路数	迭代次数		计算用时/ms
			L-M 算法	牛顿法	
A	168	179	0	4	7.74
B	148	159	0	4	7.46
C	3 374	4 161	2	4	140.58
D	6 515	9 037	5	6	510.75
E	13 659	20 467	1	6	705.17
F	33 652	33 720	0	4	970.93
G	168	184	0	4	7.86
H	168	179	0	4	7.74

此外，通过对比算例 A、算例 G、算例 H 可见，算法对多配电网区域、环网、分布式电源等情形适应性强，收敛性能和计算效率基本不受影响。

6　结语

本文针对大规模输配电一体化牛顿法潮流计算性能进行了深入分析，提出基于自适应 L-M 算法选取牛顿法初值、ILU 分解法预处理雅可比矩阵等措施提高算法的收敛性能，同时提出利用 GPU 对算法中计算量密集的步骤进行加速。所提方法具有以下特点。

1)算法对于多配电网区域、环网、分布式电源、病态系统等多种情形具有较强的普适性，算法的收敛性强，计算速度快，计算精度高于传统的等值算法和主从分裂法。

2)算法根据数值分析理论，通过自适应 L-M 算法选取初值，以及 ILU 分解法预处理雅可比矩阵，有效地保证了牛顿法的数值稳定性和收敛性。

3)GPU 实现了大规模雅可比矩阵的并行生成和大规模矩阵-向量运算的并行计算，加速效果显著。

算例测试表明，本文所提方法能够显著提高大规模输配电网一体化潮流计算的速度和精度，普适性强，具有工程应用的价值。在未来的研究过程中，本文所提的计算方法可以尝试应用到输配电网一体化的其他计算领域中，包括最优潮流、状态估计等。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参 考 文 献

[1] 王敏.2013国家电网公司年鉴[M].北京:中国电力出版社,2013.
WANG Min. Yearbook for State Grid Corporation of China in 2013[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[2] 刘涛,米为民,陈郑平,等.适用于大运行体系的电网模型一体化共享方案[J].电力系统自动化,2015,39(1):36-41.
LIU Tao, MI Weimin, CHEN Zhengping, et al. Integrated sharing scheme for grid model and graphics applicable to grand operation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 36-41.

[3] 郑宗强,韩冰,闪鑫,等.输配电网高级应用协同运行关键技术分析[J].电力系统自动化,2017,41(6):122-128.DOI:10.7500/AEPS20161212003.
ZHENG Zongqiang, HAN Bing, SHAN Xin, et al. Analysis on key technologies for coordinated operation of advanced application software in transmission and distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 122-128. DOI: 10.7500/AEPS20161212003.

[4] 闪鑫,王轶禹,金一丁,等.特高压互联电网一体化监视和故障协同处置方案及应用[J].电力系统自动化,2018,42(2):84-91.DOI:10.7500/AEPS20170230005.
SHAN Xin, WANG Yiyu, JIN Yiding, et al. Scheme and application of integrated monitoring and fault co-disposal technology of UHV interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 84-91. DOI: 10.7500/AEPS20170230005.

[5] 郭健,周京阳,李强,等.高性能在线分析计算现状与协同计算关键技术[J].电力系统自动化,2018,42(3):149-159.DOI:10.7500/AEPS20170230007.
GUO Jian, ZHOU Jingyang, LI Qiang, et al. Current status of high-performance on-line analysis computation and key technologies for cooperating computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 149-159. DOI: 10.7500/AEPS20170230007.

[6] 许洪强,姚建国,南贵林,等.未来电网调度控制系统应用功能的新特征[J].电力系统自动化,2018,42(1):1-7.DOI:10.7500/AEPS20170518001.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20170518001.

[7] JAIN H, RAHIMI K, TBAILEH A, et al. Integrated transmission & distribution system modeling and analysis: need & advantages[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, USA: 1-5.

[8] 郭志红,韩学山,李文博,等.适应分布式电源的输配电网协调潮流算法[J].山东电力技术,2014(1):1-6.
GUO Zhihong, HAN Xueshan, LI Wenbo, et al. A coordination power flow algorithm for power transmission-distribution grid accommodate distributed generations [J]. Shandong Electric Power, 2014(1): 1-6.

[9] MARINHO J M T, TARANTO G N. A hybrid three-phase single-phase power flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1063-1070.

[10] SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1484-1492.

[11] 孙宏斌,郭烨,张伯明.含环状配电网的输配全局潮流分布式计算[J].电力系统自动化,2008,32(13):11-15.
SUN Hongbin, GUO Ye, ZHANG Boming. Distributed global power flow calculation for whole transmission and looped distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 11-15.

[12] CHEN Ying, SHEN Chen. A Jacobian-free Newton-GMRES (m) method with adaptive preconditioner and its application for power flow calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1096-1103.

[13] HUANG W T, YAO K C. New network sensitivity-based approach for real-time complex power flow calculation[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2012, 6(2): 109-120.

[14] YANG H, WEN F, WANG L. Newton-Raphson on power flow algorithm and Broyden method in the distribution system [C]// IEEE Power and Energy Conference, December 1-3, 2008, Johor Bahru, Malaysia: 1613-1618.

[15] LAGACE P J, VUONG M H, KAMWA I. Improving power flow convergence by Newton Raphson with a Levenberg-Marquardt method[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 1-6.

[16] 严正,范翔,赵文恺,等.自适应Levenberg-Marquardt方法提高潮流计算收敛性[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1909-1918.
YAN Zheng, FAN Xiang, ZHAO Wenkai, et al. Improving the convergence of power flow calculation by a self-adaptive Levenberg-Marquardt method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1909-1918.

[17] 曹佳,徐潇源,严正,等.几种高阶收敛的Levenberg-Marquardt方法在潮流计算中的应用[J].电网技术,2017,41(4):1181-1187.
CAO Jia, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Application of several Levenberg-Marquardt methods with higher-order convergence in power flow calculation[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1181-1187.

[18] 李智欢,朱乔木,苏寅生,等.几种提高牛顿法潮流收敛性的初值给定方法研究[J].电工电气,2015(10):1-5.
LI Zhihuan, ZHU Qiaomu, SU Yinsheng, et al. Research on several initial value methods of improved Newton-Raphson power flow convergence [J]. Electrotechnics Electric, 2015(10): 1-5.

[19] 唐坤杰,董树锋,宋永华.基于不完全LU分解预处理迭代法的

电力系统潮流算法[J].中国电机工程学报,2017,37(增刊1):55-62.
TANG Kunjie, DONG Shufeng, SONG Yonghua. Power flow algorithm based on an iterative method with incomplete LU decomposition preconditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2017(Supplement 1): 55-62.

[20] 唐坤杰,董树锋,宋永华.一种GPU-CPU异构运算框架加速的实时 $N-1$ 交流潮流计算方法[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4329-4338.
TANG Kunjie, DONG Shufeng, SONG Yonghua. A real-time $N-1$ AC power flow calculation method based on GPU-CPU heterogeneous computing framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4329-4338.

[21] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 4(1): 725-734.

[22] ZHANG D, FU Z, ZHANG L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5/6): 685-694.

[23] 孙秋野,陈会敏,杨家农,等.牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2196-2200.
SUN Qiuye, CHEN Huimin, YANG Jianong, et al. Analysis on convergence of Newton-like power flow algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2196-2200.

[24] 谷同祥.迭代方法和预处理技术(下册)[M].北京:科学出版社,2015:159-232.
GU Tongxiang. Iterative methods and preprocessing techniques (Part Ⅱ)[M]. Beijing: Science Press, 2015: 159-232.

[25] SAUER T. Numerical analysis [M]. Cambridge: Pearson Publishing Ltd, 2016: 235-236.

[26] 张朝晖,刘俊起,徐勤建.GPU并行计算技术分析与应用[J].信息技术,2009(11):86-89.
ZHANG Chaohui, LIU Junqi, XU Qinjian. Analysis and application of the GPU parallel computing technology [J]. Information Technology, 2009(11): 86-89.

[27] COOK S. CUDA programming: a developer's guide to parallel computing with GPUs[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.

[28] LAGACE P J. Power flow methods for improving convergence [C]// IEEE Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, Canada: 1387-1392.

唐坤杰(1994—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统高性能计算方法。E-mail: tangkunjie1994@163.com

董树锋(1982—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统状态估计和有源配电网分析。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn

朱炳铨(1967—),男,高级工程师,主要研究方向:电网调度运行管理。E-mail: hzzbq@sina.com

(编辑　鲁尔姣)

Performance Analysis and Improvement of Newton Method for Power Flow Calculation of Large-scale Integrated Transmission and Distribution Network

TANG Kunjie[1], *DONG Shufeng*[1], *ZHU Bingquan*[2], *SONG Yonghua*[3,1]

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310007, China;
3. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Macau, Macau 999078, China)

Abstract: In order to meet the demand of integrated power flow calculation speed, an improved Newton method is proposed. In view of the seriously ill-conditioned Jacobian matrix and poor convergence and so on, an adaptive Levenberg-Marquardt method is used to choose the initial values, and incomplete LU decomposition method is used to preprocess Jacobian matrices, which effectively guarantees the numerical stability and improves the convergence of Newton method. To solve the problem of large-scale and low computing efficiency after integration of transmission and distribution networks, the GPU parallel acceleration technology is used to accelerate some steps with intensive computation including the formation of Jacobian matrix, matrix-vector operation and so on. The numerical experiments show that, the proposed algorithm can significantly improve the speed and accuracy of the large-scale integrated transmission and distribution networks, and it has a strong universality for different situations such as multiple distribution network areas, distribution network with loops or distributed generators, ill-conditioned systems.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 52110418000M).

Key words: integrated transmission and distribution network; Newton method; power flow calculation; convergence; GPU parallel acceleration

附录 A

表 A1　本文使用或构造的算例说明

Table A1　Instruction of cases used or built in this paper

算例	是否构造	节点数	支路数	来源 / 构造方法
CASE A	是	168	179	输电网 CASE30 于节点 30 经变压器接 2 个 69 节点配电网于节点 1，且边界节点序号为 1 和 2
CASE B	是	148	159	输电网 CASE30 于节点 3 经变压器接 1 个 118 节点配电网于节点 1
CASE C	否	3374	4161	matpower 算例 case3375wp
CASE D	否	6515	9037	matpower 算例 case6515rte
CASE E	否	13659	20467	matpower 算例 case13659pegase
CASE F	是	33652	33720	输电网 CASE118 于各个节点经变压器接入尽量多的 69 节点配电网于节点 1
CASE G	是	168	184	在 CASE A 基础上将 1 号边界节点对应的配电网所有联络开关投入
CASE H	是	168	179	在 CASE A 的基础上将 1 号边界节点对应的配电网的节点 15、30、45、61 分别接入 1 个分布式电源

注：

1. 表格中的输电网 CASE30、118 来源于 IEEE 标准算例。表格中提到的 69 节点配电网来源于文献[18]，118 节点配电网来源于文献[19]。
2. 表格中的 case3375wp、case6515rte、case13659pegase 为 matpower 自带算例，同时包含输电网、配电网节点。
3. 构造算例时连接输配电网的变压器参数（标么值）统一为 r = 0.002，x = 0.01，ratio = 1；接入的分布式电源每个出力为 0.5 MW。
4. “接入尽量多的”是指每个输电网节点处接入的配电网数目尽可能多，但负荷总量不超过原来节点的负荷量，且接入后从原输电网节点的负荷数据中扣除接入的配电网的负荷总量。

附录 B

表 B1　主从分裂法和牛顿法计算结果的对比

Table B1　Comparison between results from Master-slave-splitting method and Newton method

	配电网总负荷 /MW+jMvar	主从分裂法 U_B	主从分裂法 P_B/MW	主从分裂法 Q_B/Mvar	牛顿法 U_B	牛顿法 P_B/MW	牛顿法 Q_B/Mvar
CASE A	7.60+j5.39	0.925	4.318	2.928	0.925	4.318	2.928
CASE B	22.71+j17.04	0.974	10.810	8.499	0.964	24.532	18.495

表 B2　牛顿法第一次迭代雅可比矩阵特性

Table B2　Properties of the Jacobian matrix formed in the first iteration of Newton method

算例	牛顿法第一次迭代雅可比矩阵条件数	牛顿法第一次迭代雅可比矩阵的最大特征值
IEEE CASE30	492.806	107.72 ±j28.30
CASE A	2.364×10^5	1068.9 ±j801.8
CASE B	9.738×10^5	220.01 ±j69.36

表 B3　平启动下牛顿法迭代次数

Table B3　Iteration times of Newton method under flat start

算例	收敛情况	收敛次数 / 不收敛原因
CASE A	收敛	4
CASE B	收敛	4
CASE C	不收敛	雅可比矩阵趋向奇异
CASE D	不收敛	雅可比矩阵趋向奇异
CASE E	不收敛	雅可比矩阵趋向奇异