

# 电力系统静态安全最优潮流并行计算方法

阳育德,陶琢,刘辉,覃智君

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530000)

**摘要:**针对大规模预防性安全约束最优潮流计算耗时长的问题,提出 2 种基于单机多处理器平台的粗粒度并行计算方法以提高求解效率。依据多预想故障计算过程相互独立的特点合理分解计算任务,平衡各核心负载,降低通信损耗,并利用 MATLAB 并行工具箱编写具有高并行度的程序代码,充分利用多核资源。得到的优化调度方案可使电网运行同时满足正常状态和  $N-1$  故障状态约束,使电力系统具备承受一定程度故障干扰的能力。3 个系统的多预想故障设置方案的测试结果表明,所提算法在保证精确性和收敛性的基础上,加速效果明显,易扩展至多机集群架构。

**关键词:**安全约束最优潮流;多核并行; $N-1$ ;补偿法;电力系统

**中图分类号:**TM 711

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.015

## 0 引言

电网结构日益复杂,区域互联愈发紧密,为追求经济性,电力系统通常运行在安全极限边界。2005 年 5 月的莫斯科大停电事故致使当地电网瘫痪持续 4 h<sup>[1]</sup>;2006 年 7 月的华中电网 500 kV 嵩郑线路过负荷导致河南电网大面积停电<sup>[2]</sup>;2006 年 11 月,欧洲互联电网若干条线路过载造成电网解列,1 500 万用户受到影响<sup>[3]</sup>。造成此类大型事故的原因大多在于电力系统在线静态安全分析工具不力,不能制定周密的  $N-1$  静态安全预防控制策略<sup>[4-5]</sup>以供调度员在紧急情况下做出相应决断。

预防性安全约束最优潮流 PSCOPF (Preventive Security Constrained Optimal Power Flow) 同时考虑正常运行状态(基态)和预想故障状态(故障态)下的变量约束条件,通过预先调整发电机出力和节点电压使系统具备应对故障干扰的能力。故障冲击下,处于边缘运行的网络因受到扰动而切断相应支路,系统进入紧急状态。在快速自动控制装置恢复系统功率平衡后且慢速控制(发电机功率调整、并联电容器或电抗投切等)动作未响应前,实时分析系统薄弱点,提供决策依据,避免发生由线路过载、电压越界等引发严重的连锁故障,尽早阻断系统状态恶化。

PSCOPF 提供同时满足基态和故障态约束条件的最优运行控制策略,理论上可以保证电网安全,但随着系统中预想故障数增多,求解过程存在计算耗时长和内存占用大的问题。为提高静态安全预防控制效率,含多离散或连续变量的大规模、非凸、非线性规划问题给电网安全在线分析系统带来了新的挑战,众多学者提出安全约束最优潮流 OPF (Optimal

Power Flow) 的计算策略并引入并行架构以进行高效求解。

安全约束最优潮流问题主要有 3 种求解思路: Benders 分解<sup>[6]</sup>实现基态主问题与多故障态子问题的协调处理,可扩展至并行模式,但该方法并不适用于非凸优化问题的求解;主导事故思想<sup>[7]</sup>筛除事故集合中对系统影响较小的故障元素以减少计算量,但有效故障的过滤标准主观性较强;网格压缩法<sup>[8]</sup>考虑网络各部分受故障影响强弱有差异,按支路或节点分割网络,且仅考虑受故障影响强的节点以达到缩减故障态变量数的目标,但等值计算过程存在误差。

目前多核并行技术在电力系统领域已得到广泛应用<sup>[9-11]</sup>,具体主要分两大类:一类是直接法,包括三角因子并行分解法、带状矩阵并行处理、多次因子分解法;另一类是迭代法,包括线性方程系数分解法、高斯松弛牛顿法、波形松弛法等<sup>[12]</sup>。文献[13]针对最优潮流算法中稠密正定矩阵,采用有向无环图的分块超级节点矢量技术进行 Cholesky 分解,获得了较好的细粒度并行提速效果,但分解过程的各步骤彼此依赖且不适用于稀疏非正定矩阵。总之,各种算法都有各自的优缺点,要结合具体电力系统应用环境选择相应算法以满足实时要求。

本文在传统 PSCOPF 模型和基于补偿法 PSCOPF 模型<sup>[14]</sup>的基础上进行改进,提出 2 种单机多核并行方法。IEEE 118、IEEE 300 及 S1047 节点系统测试结果表明:在不增加硬件配置投入的条件下,2 种改进方法可保证计算精度,降低求解难度,快速识别故障,有效减少通信损耗与数据竞争,节省内存资源,大幅提升计算速度和求解效率,且粗粒度并行模式方便扩展至集群架构,具有广泛应用前景。

## 1 PSCOPF 数学模型

PSCOPF 在最优潮流的基础上,联立基态与故

收稿日期:2017-12-29;修回日期:2018-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577085)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577085)

障态下的安全约束条件构成优化模型:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \\ \text{s.t. } \mathbf{h}_q(\mathbf{x}_q, \mathbf{u}_0) = 0 \\ \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}_0 \leq \bar{\mathbf{u}} \\ \underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x}_q(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \leq \bar{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  为目标函数, 下标“0”表示基态;  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$  分别为状态因变量(节点电压幅值、线路传输功率等)和控制自变量(发电机出力、无功投入、变比等), 均满足各自的上、下限约束, 故障态因变量可由基态因变量推导表示为  $\mathbf{x}_q(\mathbf{u}_0, \mathbf{x}_0)$ ; “-”、“\_”分别表示相应变量上、下界;  $q=0, 1, \dots, N_C, N_C$  为预想故障数,  $q=0$  表示基态,  $q \neq 0$  表示故障态;  $\mathbf{h}_q$  为基态与故障态下的  $N_C+1$  组潮流方程等式约束。

### 1.1 目标函数

$$f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \min \sum_{i \in S_G} |P_{Gi}^0 - P_{Gi0}| \quad (2)$$

其中,  $S_G$  为发电机集合;  $P_{Gi}^0$  为第  $i$  台发电机基态有功功率;  $P_{Gi0}$  为第  $i$  台发电机初始有功功率。控制目标为发电机总调整量最小, 即故障发生后发电机有功出力受影响波动最小。

### 1.2 等式约束

$$\mathbf{h}_0 = \begin{cases} P_{Gi}^0 - P_{Di}^0 - V_i^0 Y_{ij} \sum_{j=1}^N V_j^0 \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij}) = 0 \\ Q_{Ri}^0 - Q_{Di}^0 - V_i^0 Y_{ij} \sum_{j=1}^N V_j^0 \sin(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij}) = 0 \end{cases} \quad i, j \in S_N \quad (3)$$

$$\mathbf{h}_k = \begin{cases} P_{Gi}^k - P_{Di}^k - V_i^k Y_{ij} \sum_{j=1}^N V_j^k \cos(\delta_i^k - \delta_j^k - \alpha_{ij}) = 0 & i \in S_{\text{balance}}; j \in S_N \\ P_{Gi}^0 - P_{Di}^0 - V_i^k Y_{ij} \sum_{j=1}^N V_j^k \cos(\delta_i^k - \delta_j^k - \alpha_{ij}) = 0 & i \notin S_{\text{balance}}; j \in S_N \\ Q_{Ri}^0 - Q_{Di}^0 - V_i^k Y_{ij} \sum_{j=1}^N V_j^k \sin(\delta_i^k - \delta_j^k - \alpha_{ij}) = 0 & i \in S_{\text{PQ}}; j \in S_N \\ V_i^k = V_i^0 & i \in S_{\text{PV}} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $k=1, 2, \dots, N_C$ ;  $P_{Gi}^k, Q_{Ri}^k$  分别为第  $i$  台发电机的有功出力、无功源的无功出力;  $P_{Di}^k, Q_{Di}^k$  分别为节点  $i$  的有功负荷、无功负荷;  $Y_{ij}, \alpha_{ij}$  分别为线路  $i-j$  导纳幅值和相角;  $V_i, \delta_i$  分别为节点  $i$  电压幅值和相角;  $N$  为节点数;  $S_N$  为所有节点集合;  $S_{\text{balance}}$  为平衡节点集合;  $S_{\text{PQ}}, S_{\text{PV}}$  分别为 PQ 节点和 PV 节点集合; 上标“0”表示基态参数, 上标“ $k$ ”表示故障态参数。等式约束共  $N_C+1$  组功率平衡方程, 即 1 组基态潮流方程  $\mathbf{h}_0$  和  $N_C$  组故障态潮流方程  $\mathbf{h}_k$ 。预想事故下, 除

平衡机外的发电机出力与基态保持一致, 平衡机有功功率单独作为控制变量维持故障态系统的有功平衡, 而无功平衡由 PV 节点电压承担。

### 1.3 不等式约束

$$\mathbf{g}_0 = \begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^0 \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^0 \leq \bar{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{V}_i \leq V_i^0 \leq \bar{V}_i & i \in S_N \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \bar{P}_{ij} & i, j \in S_L^0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_k = \begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^k \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_{\text{balance}} \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^k \leq \bar{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{V}_i \leq V_i^k \leq \bar{V}_i & i \in S_N \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij}^k \leq \bar{P}_{ij} & i, j \in S_L^k \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $k=1, 2, \dots, N_C$ ;  $P_{ij}$  为线路  $i-j$  传输功率,  $\bar{P}_{ij}, \underline{P}_{ij}$  分别为其上、下限;  $S_G$  为发电机节点集合;  $S_R$  为无功源节点集合;  $S_L$  为线路集合。式(5)、(6)分别描述了基态与故障态下系统的不等式约束, 包含控制变量及系统安全状态变量的约束。故障状态下仅对平衡机的有功出力进行约束, 此外各状态下的不等式约束包含系统无功源、节点电压和线路传输有功的限制。

因 PSCOPF 模型不涉及离散变量, 其为含连续变量的非线性规划问题, 现代内点法<sup>[15]</sup>具有迭代速度快、鲁棒性强、收敛性好且不受初值选择影响的优点, 方便求解大型电力系统安全约束最优潮流问题, 故本文采用该算法求解模型。

## 2 求解方法分析

### 2.1 概述

随着预想故障数增多和系统规模变大, 考虑多预想故障的 PSCOPF 问题求解耗时甚至会发生内存溢出无法计算的情况。本节详细阐述 2 种改进并行方法: 改进方法 1 对 PSCOPF 模型(式(2)~(6))不做改变, 在保证求解结果一致的前提下将运算程序写为并行结构, 利用 MATLAB 并行函数实现多 CPU 核并行加速计算; 改进方法 2 结合补偿法推导  $N-1$  断线后的节点电压线性表达式, 将其代入后续现代内点法求解过程中, 并对原 PSCOPF 模型中等式约束部分合理简化以缩减计算量, 按一定规则将任务分解和调度至各 CPU 核心, 降低并行开销, 以大幅提高计算速度。

### 2.2 改进方法 1

单个 CPU 的性能开发已接近极限, 摩尔定律不再适用, 利用众核并行在数据缓存处理和逻辑控制上的优势, 将复杂问题分解成多个子任务同时执行, 缩短计算时间, 提高求解效率, 可获得海量计算能力。针对数值并行计算<sup>[16]</sup>, MATLAB 推出广泛应用

于数值分析与工程计算领域的并行计算工具箱,以解决数值计算密集型问题。

PSCOPF 的多预想故障模型求解程序必涉及大量 for 循环计算,该部分程序执行耗时严重,可利用 parfor 函数分解循环并行处理。处理循环时采用 client 和 worker 模式,client 为编写和启动并行代码的 MATLAB 端,负责分配任务和汇总结果,worker 为并行代码多个执行端。数值并行算法设计遵循 PCAM 方法学<sup>[17]</sup>,通过划分、通信、组合和映射 4 个步骤实现。

改进方法 1 流程图如图 1 所示,图中  $\alpha$  为并行池中可管理的 worker 总数, $\mu$  为预设的收敛精度, $N-1$  断线潮流计算扫描越限故障以及故障态安全约束的雅可比矩阵和海森矩阵的求解为算法核心和最耗时的 2 个模块,模型计算量随故障数增多而急剧变大,加入并行结构可提升计算效率。由于每个预想故障的求解过程相互独立,仅通过对静态最优潮流中的稳态初值运行点建立关系,parfor 函数可自动将问题分解为并行任务映射至各 CPU 核处理。利用修正矩阵的稀疏性特点,每个 CPU 核计算稠密数据以元胞数组阵列形式存储并返回至 client。在循环体外组成稀疏的修正方程,节省内存资源,降低数据通信次数,实现时间、数据及功能上的粗粒度并行架构,提升计算速度。

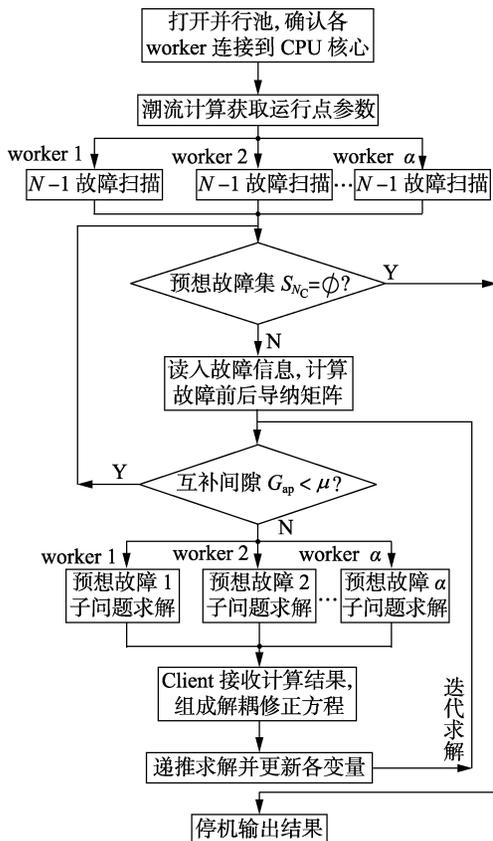


图 1 改进方法 1 流程图

Fig.1 Flowchat of improved method 1

并行模型设计需注意:挖掘问题的并行性,划分任务应彼此无耦合关系,即分解为互不相关的分段;子任务执行结果不受执行顺序影响,可乱序执行;均衡分配线程负载,否则会导致部分线程繁忙而其他线程空闲等待;利用元胞数组阵列存储稠密的并行计算结果,在循环体外形成稀疏修正方程,节省内存资源;parfor 并行会占用硬件资源进行必要的通信,应尽量进行邻近 CPU 通信;模型应具有灵活性、普遍适用性,易推广至集群架构。

### 2.3 基于补偿法的 PSCOPF 模型

补偿法在线路开断的两端并联一个与线路等值的负阻抗来模拟支路断线。不改变系统网络拓扑结构的情况下,通过引入节点注入补偿功率(或补偿电流)线性求解  $N-1$  开断节点电压。补偿法在精度上优于直流潮流法和灵敏度法,算法结构简单不需推导灵敏度矩阵,故障判断准确,计算省时。利用叠加原理,线路开断后电压  $V^k$  由基态电压  $V^0$  和引入补偿电流后电压的改变量  $\Delta V^k$  组成:

$$V^k = V^0 + \Delta V^k \quad (7)$$

利用等值发电机原理推导开断节点两端的系统等效内阻  $Z_{mn}$ ,进而得到开断节点注入的补偿电流,则补偿法线路开断后节点电压向量具体表达式为:

$$V^k = [E - Y^{-1}M(M^T Y^{-1}M - Z_{mn})^{-1}M^T] V^0 \quad (8)$$

其中, $M$  为开断支路节点两端注入的单位电流向量; $E$  为单位对角矩阵; $Y$  为节点导纳矩阵。

则线路传输有功功率表达式为:

$$P_{ij}^k = -G_{ij}(V_i^k)^2 + G_{ij}V_i^k V_j^k \cos(\delta_i^k - \delta_j^k) + B_{ij}V_i^k V_j^k \sin(\delta_i^k - \delta_j^k) \quad (9)$$

其中, $G_{ij}$  为线路  $i-j$  导纳的实部; $B_{ij}$  为线路  $i-j$  导纳的虚部。

将上述补偿法与 PSCOPF 模型结合,当基态等式约束  $h_0(u_0, x_0)$  满足功率平衡条件,则故障态等式约束  $h_k(u_0, x_k(u_0, x_0))$  也可以通过潮流方程的检验。故基于补偿法的 PSCOPF 模型中等式约束仅保留基态  $h_0$  部分(式(3)),目标函数和不等式约束不作改变。

补偿法假设事故后除开断线路两节点外的其他节点的注入功率(注入电流)维持不变,而实际情况下部分节点的补偿量是会改变的,且用叠加法求解非线性潮流计算问题也会引入误差。因此可以同时采取 2 种措施控制计算精度的偏差:优化过程中 PV 节点的电压幅值作为控制变量在事故前后保持不变,故所求 PV 节点电压幅值直接采用事故前的电压值  $|V_i^k| = |V_i^0| (i \in S_{PV})$ ;引入误差因子  $\varepsilon$ ,对故障态线路传输有功功率的不等式约束进行紧缩处理,经算例测试  $\varepsilon$  取 0~5% 可获得更为理想的最优控制结果。

$$P_{ij}(1-\varepsilon) \leq P_{ij}^k \leq \bar{P}_{ij}(1-\varepsilon) \quad (10)$$

当预想故障数为  $N_c$ 、状态变量数为  $N_x$  时,补偿法 PSCOPF 模型可减少  $N_c$  组等式约束和  $N_c N_x$  个变量计算。补偿法线性求解、计算量缩减和优化模型结构可大幅提升算法的求解效率,且预想事故集合发生变化时,随之变化的只有不等式约束部分,模型稳定性增强,受预想故障的影响较小,详细的求解原理可参考文献[14,18]。

### 2.4 改进方法 2

结合补偿法的数值特性和单机多处理器平台结构,基于补偿法的 PSCOPF 模型中循环体计算规模减少,仅依靠 parfor 函数按 for 循环体自动划分问题粒度已不能获得较好的并行效果。并行开销主要包含线程管理、消息传递和程序性能不足带来的冗余计算,除创建或关闭线程、任务分配及存储器访问等不可避免的并行开销外,多核通信的总线占用也是造成并行任务执行效率低的重要因素。因此将复杂计算型问题进行粒度划分并按一定原则重新调度分配子任务到各核心,各个处理单元执行补偿法 PSCOPF 程序求解,可以有效避免多个处理器产生总线争用的情况,达到降低通信开销的目标。

图 2 给出改进方法 2 的求解流程,在  $N-1$  断线扫描模块中,引入补偿法线性求解代替传统潮流迭代计算,故障筛选精确且计算迅速,并行结构加速不明显,故不再加入并行模型。迭代过程中求解子问题的故障态安全约束雅可比矩阵和海森矩阵过程依然复杂,仍有必要采用单指令流多数据流的并行结构提升该模型的求解速度。大规模数据被均衡划分传递至局部进行私有化处理,并行执行相同程序代码,计算结果同样采用元胞数组存储并且统一返回 client,在循环体结构外形成高维稀疏修正矩阵,实现并行计算架构。

### 2.5 改进并行架构原理

并行技术并非是简单的“分而治之”,而是一个统一的动态优化问题,非逻辑型的分解只会破坏各类约束条件间的耦合性,所以改进方法 2 依据求解需要应重新合理划分问题粒度。若划分子任务过多,并行协调管理消耗较大,反复创建与关闭线程也会占用系统资源;若划分子任务较少,易造成个别线程闲置,其他线程任务繁重,处理单元内存甚至发生溢出。为避免上述问题,均衡各 CPU 核负载,可通过式(11)依据并行池 worker 数来设置子任务规模:

$$\lambda = \lceil N_c / \alpha \rceil \quad (11)$$

其中,  $\lambda$  为每个 worker 处理故障数的阈值;“ $\lceil \cdot \rceil$ ”表示取整。

任务分解与调度示意图如图 3 所示,图中  $v$  为分解次数。分配调度的基本思想是:根据子任务间的依赖关系进行资源(处理器核)分配;对于核间通

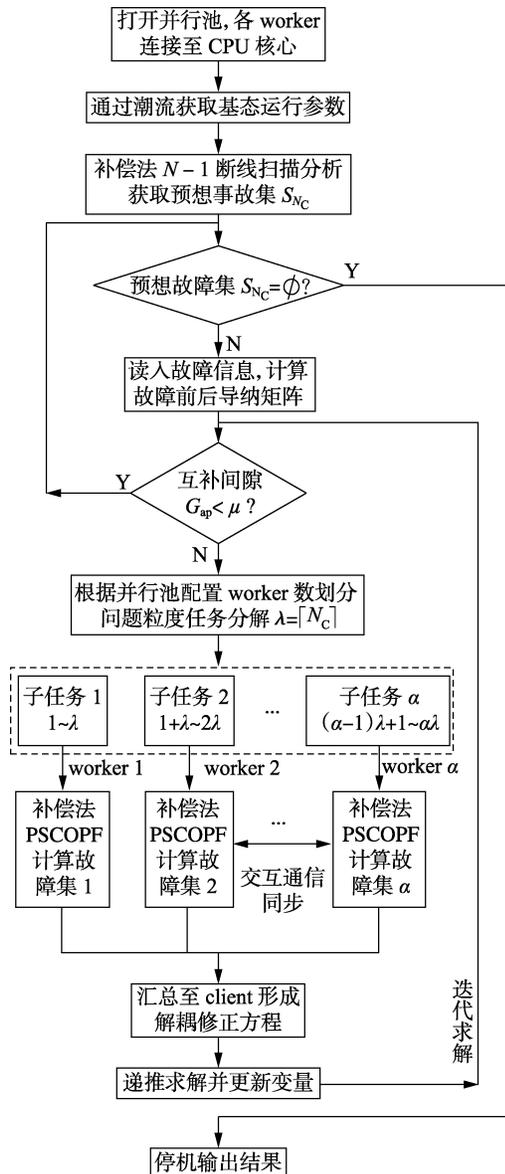


图 2 改进方法 2 流程图

Fig.2 Flowchat of improved method 2

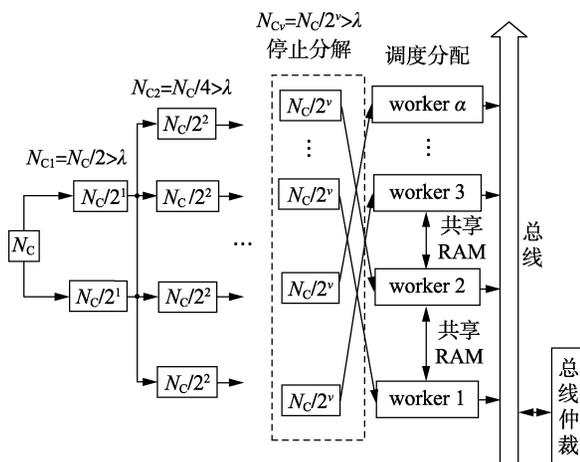


图 3 任务分解与调度示意图

Fig.3 Schematic diagram of task decomposition and dispatch

信频繁且存在数据依赖的任务,尽量分配到同一个核上串行执行或进行邻近核心的数据交换。本文主要采用共享存储器通信机制,多核 CPU 共享底层缓存 LLC (Last Level Cache) 可实现核心间的极佳通信环境,且不需要配置复杂的控制信息。核间的共享 RAM 可存储原始数据和系统基态的求解数据等,便于处理故障态子任务的核心进行读写调用,而各故障态约束的雅可比、海森矩阵元素求解过程繁琐且相互独立,数据的局部处理可有效减少通信数据开销。该预处理过程可保证子问题粒度匹配当前配置的 CPU 逻辑线程数,减少阻塞阵列,合理利用多核资源。

SPMD (Single Program, Multiple Data) 是另外一种 MATLAB 支持的并行结构,通过 labindex 和 numlabs 指令获得各处理单元的编号和总数,灵活控制其执行计算任务,并行池的线程管理需要用户承担。经测试,改进方法 2 程序采用 SPMD 结构与 parfor 结构的求解速度相近,故本文仍选择 parfor 结构。SPMD 并行结构给用户提供了更大自由度,也引入了更丰富的数据类型和操作细节<sup>[19]</sup>,对于求解并行问题不失为一种新的思路。

### 3 算例分析

#### 3.1 运行环境及测试算例

仿真计算的硬件平台为 AMAX 多核服务器,操作系统为 Linux2.6.32,由 2 个主频为 2.13 GHz 的四核处理器构成,内存 12 GB,总核心数为 8,在此服务器上使用 MATLAB 2014a 软件编写计算程序。测试系统参数如表 1 所示,表中  $N_C$  为发电机节点数, $N_R$  为无功源节点数。

表 1 测试系统规模

Table 1 Scale of test system

测试系统	$N$	$N_C$	$N_R$	线路数	变压器数
IEEE 118	118	16	54	179	11
IEEE 300	300	69	69	411	106
S1047	1 047	68	152	1 182	164

#### 3.2 计算时间

选取 IEEE 118、IEEE 300 及 S1047 节点系统,采用串行求解法、改进方法 1 和改进方法 2 (并行池启用 8 个 worker) 分别对不同预想故障数量情况下的各节点系统进行综合测试比较。

测试结果如表 2 所示,串行求解 PSCOPF 模型耗时严重,且随着预想故障数的设置增多,运行时间成倍增加。采用改进方法 1 和改进方法 2 这 2 种并行计算方法可以有效减少运行时间,大幅提升计算速度。改进方法 2 通过引入补偿法对 PSCOPF 模型进行优化,合理缩减计算量,其加速效果优于改进方法 1。

表 2 测试结果比较

Table 2 Test results comparison

测试系统	预想事故数量	运行时间/s		
		串行方法	改进方法 1	改进方法 2
IEEE 118	12	2.3	1.8	1.7
	36	10.4	4.8	4.2
	72	31.6	11.2	9.8
	108	74.5	25.6	13.4
IEEE 300	12	16.8	10.7	6.5
	36	287.6	68.6	39.1
	72	1 117.2	237.2	115.8
	108	1 821.5	339.8	170.4
S1047	12	137.5	44.1	33.2
	36	861.9	157.3	105.3
	72	2 147.6	370.9	176.2
	108	3 914.5	632.4	240.6

#### 3.3 并行计算加速性能

目前主要评价并行性能 2 个指标分别为加速比  $S_p$  和并行效率  $E_p$ ,表达式为:

$$S_p = T_s / T_p \quad (12)$$

$$E_p = S_p / p \quad (13)$$

其中,  $T_s$  为串行算法运行时间;  $T_p$  为求解相同问题的并行算法运行时间;  $p$  为并行启用的核心数。

选取 IEEE 118、IEEE 300 及 S1047 系统分别采用改进方法 1 与改进方法 2 测试并与串行 PSCOPF 模型求解法比较。随着预想故障数和 CPU 核数的变化,2 种改进方法的加速比和并行效率如表 3—5 所示。

表 3 IEEE 118 节点系统并行加速比及效率

Table 3 Parallel speedup ratio and efficiency of IEEE 118-bus system

方法	预想事故数量	加速比			效率/%		
		$p=2$	$p=4$	$p=8$	$p=2$	$p=4$	$p=8$
改进方法 1	12	1.02	1.05	1.28	51.1	26.1	16.0
	36	1.10	1.30	2.16	55.2	32.4	27.1
	72	1.17	1.45	2.82	58.5	36.3	35.3
	108	1.20	1.50	2.91	59.9	37.4	36.3
改进方法 2	12	1.03	1.06	1.38	51.5	26.5	17.3
	36	1.16	1.45	2.49	58.1	36.3	31.1
	72	1.34	2.13	3.21	67.2	53.3	40.1
	108	2.58	3.46	5.52	129.3	86.5	69.2

表 4 IEEE 300 节点系统并行加速比及效率

Table 4 Parallel speedup ratio and efficiency of IEEE 300-bus system

方法	预想事故数量	加速比			效率/%		
		$p=2$	$p=4$	$p=8$	$p=2$	$p=4$	$p=8$
改进方法 1	12	1.06	1.13	1.57	53.1	28.4	19.6
	36	1.54	2.38	4.19	77.6	59.6	52.3
	72	1.71	2.65	4.71	85.5	66.3	58.9
	108	1.85	2.86	5.36	92.5	71.6	67.1
改进方法 2	12	1.53	2.05	2.57	76.5	51.2	32.1
	36	1.97	3.86	7.35	98.5	96.5	91.8
	72	2.86	6.14	9.64	143.2	153.5	120.4
	108	3.71	7.12	10.69	185.5	178.1	133.7

表 5 S1047 节点系统并行加速比及效率  
Table 5 Parallel speedup ratio and efficiency of S1047-bus system

方法	预想事故数量	加速比			效率/%		
		$p=2$	$p=4$	$p=8$	$p=2$	$p=4$	$p=8$
改进方法 1	12	1.24	1.88	3.12	62.1	47.3	38.9
	36	1.46	2.78	5.48	73.3	69.6	68.5
	72	1.65	3.01	5.79	82.4	75.1	72.4
	108	1.82	3.17	6.19	91.1	79.2	77.4
改进方法 2	12	1.94	2.48	4.14	97.1	62.1	51.7
	36	2.70	4.52	8.18	134.8	112.9	102.3
	72	3.45	6.67	12.18	172.7	166.6	152.3
	108	4.49	8.51	16.26	224.6	212.6	203.3

从表 3—5 结果可得如下结论。

**a.** 预想故障设置数一定,同样的求解方法在不同内核环境下,随着 CPU 核数的增加,运行时间减少,加速比增加,并行效率下降。线程管理与通信、数据同步时变量重复定义使占用内存增加会导致并行效率降低<sup>[20]</sup>。

**b.** 相同的内核环境下,随着预想故障数增加,计算时间增多,加速比增加,并行效率提升。加速比和效率变化趋势相对稳定,并未随着计算规模的显著增加而产生明显的变化。

**c.** 预想故障较少时,串行可快速解决计算量少的问题,且多核心线程的通信开销使并行并不能取得好的加速效果。当预想故障增多时,多核心并行加速效果开始显现,但并行核心并非越多越好,一般开启的 worker 数等于计算机核数会获得较好的加速比。

**d.** 2 种改进方法均有较好的加速效果,并行池启用 8 个 worker,改进方法 1 不改变 PSCOPF 模型且加入并行模式,加速比最高可提升 6.19 倍;改进方法 2 基于补偿法的 PSCOPF 并行模型合理缩减计算规模,较串行计算时间的加速比高达 16.26 倍,体现出并行处理对于大规模复杂计算问题的有效性和优越性。

## 4 结论

本文提出基于单机对称多处理平台的粗粒度并行计算方法,旨在解决大规模多预想故障的 PSCOPF 问题的快速精确计算,具有以下特点。

**a.** 计算精度高。改进方法 1 基于 PSCOPF 传统求解法,在不涉及模型简化和等值计算的基础上实现并行加速;改进方法 2 结合补偿法的 PSCOPF 模型,根据基态等式约束检验故障态情况,模型结构优化但不影响故障诊断,且受预想故障影响小,将所有预想故障均考虑在内,无需过滤故障来减少计算量。

**b.** 节省硬件资源。算法中合理划分子任务粒度,将共享数据转化为局部私有化数据,减少数据竞争。利用稀疏矩阵特点,各处理单元稠密计算结果

以元胞数组形式存储,并在循环体外组成大规模稀疏修正矩阵,节省内存占用,降低数据通信损耗。

**c.** 并行加速效果好。利用 CPU 在数据缓存处理和逻辑控制上的优势,结合 MATLAB 并行算法结构,合理划分问题粒度,均衡各 CPU 负载,提高计算代码并行度,快速得到指导全网发电机组出力调整的最优控制策略。

**d.** 方法简单,可扩展性强。粗粒度并行计算强度高,各计算节点通信量少,适用性广泛,可通过分布式计算引擎扩展至网络连接的多台计算机集群,实现基于多 worker 调用的应用模式,进而获得海量计算能力,具有广阔发展前景。

## 参考文献:

- [1] 徐伟华,艾芊,周玉光,等. 莫斯科 5·25 大停电对中国电力市场发展的启示[J]. 华东电力,2005,33(7):45-48.  
XU Weihua, AI Qian, ZHOU Yuguang, et al. Lessons learned from Moscow 5·25 blackout to power market development in China[J]. East China Electric Power, 2005, 33(7):45-48.
- [2] 周勇,陈震海. 华中(河南)电网“7.1”事故分析与思考[J]. 湖南电力,2008,28(3):28-30.  
ZHOU Yong, CHEN Zhenhai. Analysis and consideration of “7.1” accident in central China(Henan) power grid[J]. Hunan Electric Power, 2008, 28(3):28-30.
- [3] 葛睿,董昱,吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术,2007,31(3):1-6.  
GE Rui, DONG Yu, LÜ Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lessons to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(3):1-6.
- [4] 傅旭. 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):120-124.  
FU Xu. Static security preventive control considering uncertainty factors for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):120-124.
- [5] 李响,张国庆,郭志忠. 输电断面潮流的  $N-1$  静态安全约束[J]. 电力自动化设备,2004,24(11):10-13.  
LI Xiang, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong.  $N-1$  principle steady state security restriction on power flow of transmission tie line group[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2004, 24(11):10-13.
- [6] 钟世民,韩学山,刘道伟,等. 计及校正控制的安全约束最优潮流的奔德斯分解算法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):65-71.  
ZHONG Shimin, HAN Xueshan, LIU Daowei, et al. Benders decomposition algorithm for corrective security-constrained optimal power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1):65-71.
- [7] CAPITANESCU F, GLAVIC M, ERNST D, et al. Contingency filtering techniques for preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4):1690-1697.
- [8] PLATBROOD L, CAPITANESCU F, MERCKX C, et al. A generic approach for solving nonlinear-discrete security-constrained optimal power flow problems in large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3):1194-1203.
- [9] GEPNER P, KOWALIK M F. Multi-core processors: new way to achieve high system performance[C]//International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering, 2006. Bialystok, Poland:IEEE, 2006:9-13.

- [10] 王成山,杨建林,张家安,等. 一种暂态稳定并行仿真的改进算法及其加速比分析[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):1-4.  
WANG Chengshan, YANG Jianlin, ZHANG Jiaan, et al. Improved parallel algorithm for transient stability simulation and analysis of its speedup[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2006, 26(5): 1-4.
- [11] 范文涛,薛禹胜. 并行处理在电力系统分析中的应用[J]. 电力系统自动化,1998,22(2):64-67.  
FAN Wentao, XUE Yusheng. The application of parallel processing in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(2): 64-67.
- [12] 吉兴全,王成山. 电力系统并行计算方法比较研究[J]. 电网技术,2003,27(4):22-26.  
JI Xingquan, WANG Chengshan. A comparative study on parallel processing applied in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 22-26.
- [13] 李佩杰,韦化,李滨,等. 最优潮流中有向无环图的并行数值分解算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):66-72.  
LI Peijie, WEI Hua, LI Bin, et al. A parallel numerical factorization algorithm based on directed acyclic graph in optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 66-72.
- [14] 阳育德,冯彦维,韦化. 基于补偿法的预防性静态安全控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):47-54.  
YANG Yude, FENG Yanwei, WEI Hua. Preventive static security control based on compensation method[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2015, 35(12): 47-54.
- [15] WEI H, SASAKI H, YOKOYAMA R. An application of interior point quadratic programming algorithm to power system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 260-266.
- [16] 陈国良,孙广中,徐云,等. 并行算法研究方法学[J]. 计算机学报,2008,31(9):1493-1502.  
CHEN Guoliang, SUN Guangzhong, XU Yun, et al. Methodology of research on parallel algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(9): 1493-1502.
- [17] FOSTER I T. Designing and building parallel programs: concepts and tools for parallel software engineering[M]. New York, USA: Addison Wesley Publishing Company, 1995.
- [18] YANG Y, FENG Y. Large-scale preventive security constrained optimal power flow based on compensation method[C]//Power & Energy Society General Meeting. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [19] 刘维. 实战 Matlab 之并行程序设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.
- [20] 罗彬,李刚,苗树敏,等. 大规模电力系统潮流转移比多核并行批处理方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(21):5446-5454.  
LUO Bin, LI Gang, MIAO Shumin, et al. A parallel batch method for power flow transferring analysis in large-scale power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5446-5454.

#### 作者简介:



阳育德

阳育德(1971—),男,广西柳州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统优化理论研究及计算(**E-mail**: yangyude@gxu.edu.cn);

陶琢(1992—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统静态安全分析及并行计算(**E-mail**: taozhuo\_hj@qq.com);

刘辉(1979—),男,四川南充人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化控制、电动汽车、需求响应(**E-mail**: hughlh@126.com);

覃智君(1977—),男,广西南宁人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统优化、高性能数值计算以及信息技术在电力系统中的应用(**E-mail**: zjqin@gxu.edu.cn)。

## Parallel computation methods for static security-constrained optimal power flow of power system

YANG Yude, TAO Zhuo, LIU Hui, QIN Zhijun

(Key Laboratory of Guangxi Electric Power System Optimization and Energy-saving Technology, Guangxi University, Nanning 530000, China)

**Abstract:** Aiming at the time-consuming problem of large-scale preventive security-constrained optimal power flow, two coarse grained parallel computing methods based on single machine multicore platform are proposed to improve the solving efficiency. According to the mutually independent characteristics of multi-contingency calculation process, the computation task is decomposed reasonably to balance the loads of each core and reduce the communication loss, and MATLAB parallel toolbox is used to write program code with high parallelism to make full use of multi-core resources. The obtained optimal dispatching scheme can make the grid operation meet the constraints of both normal state and  $N-1$  fault state, and make power grid has the ability to withstand a certain degree of fault interference. The test results of multi-contingency setting schemes of three systems show that the proposed algorithm has obvious acceleration effect based on the guarantee of accuracy and convergence, and it is easy to be extended to multi-machine cluster architecture.

**Key words:** security-constrained optimal power flow; multi-core parallel;  $N-1$ ; compensation method; electric power systems