

# 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法

孟晓丽<sup>1</sup>, 唐巍<sup>2</sup>, 刘永梅<sup>1</sup>, 吕继兴<sup>3</sup>, 刘永福<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;  
3. 河北农业大学信息科学与技术学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 以牛顿拉夫逊法为基础, 建立了复杂配电网中的三相配电线路、负荷、变压器和调压器等的数学模型, 提出了复杂配电网三相不平衡潮流的并行计算方法, 以提高大规模复杂配电网潮流计算的性能。考虑配电网的馈线数和节点数, 设计了同构模式下多核(2、4)处理器的任务分配, 对比负载均衡、并行加速比。通过 IEEE 123 节点标准馈线、某电网 1000 节点馈线及 IEEE 123、37、34 和 13 标准馈线拆装重组而成的数十条馈线等的仿真, 对所提并行潮流计算方法的计算速度、收敛性和加速比进行测试和比较分析。仿真结果表明, 所提并行计算算法能充分利用计算机的多核资源、显著提高了计算效率。

**关键词:** 三相潮流; 牛顿拉夫逊法; 并行计算; 多核 CPU; 配电网

## Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network

MENG Xiaoli<sup>1</sup>, TANG Wei<sup>2</sup>, LIU Yongmei<sup>1</sup>, LÜ Jixing<sup>3</sup>, LIU Yongfu<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. College of Information Science & Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the mathematical model in Newton-Raphson method about three-phase distribution circuit, load, transformers and regulator, this paper puts forward a three-phase unbalanced power flow parallel computing method to improve the performance of large-scale complex distribution network computing. Integrating with feeder number and node number of the distribution network, the task assignment problems are designed in the isomorphism multicore processors. And the load balance and parallel speedup are analyzed and presented. Plenty of simulations are carried on the IEEE 123, a real 1 000 nodes and dozens of feeders, which are composed of IEEE 13, IEEE 34, IEEE 37 and IEEE 123, in order to test the convergence and computational efficiency of proposed algorithm. The simulation results show that the algorithm can reduce the calculation period, make full use of the resources of multicore processors, and significantly improve the computational efficiency.

**Key words:** three-phase power flow; Newton-Raphson method; parallel computing; multicore CPU; distribution network

中图分类号: TM711; TM727.2; TM91 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0045-07

## 0 引言

电力系统重构和电力市场的开放使电力系统逐渐成为互联的、大规模、复杂的网络, 而供电方对经济性、用电方对可靠性的高要求使先进的电力电子设备在电力系统中不断的出现。因此现代电力系

统面对的是强非线性与多元件的超大规模的跨区跨省电网, 其计算量与计算复杂度急剧增加, 且对计算的实时性和算法的效率提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。

潮流计算作为电力系统规划、运行分析、评估的基础, 其高效并行算法及相应软件的研究已成为研究大规模电力系统的关键<sup>[4]</sup>。截止目前, 有关潮流并行计算的研究已经取得了一定进展。早期的潮流并行算法研究主要包括分块法<sup>[5-6]</sup>、多重因子化法<sup>[7]</sup>、稀疏矢量法<sup>[8]</sup>和逆矩阵法<sup>[9-10]</sup>。这些潮流并行算法主要与向量处理机、共享存储并行机相适应,

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“智能配用电的技术体系及仿真基础性问题研究”(PD71-12-010); 河北省科技发展计划项目(13215206)

可获得很高的加速比, 其实现效率可达 60%~70%。但这些方法均是以线性方程组的前代回代和因子分解过程为切入点实现并行的, 由于受进程数限定, 存在当导纳矩阵维数不能被进程数整除时无法实现并行的问题。

近年来, 随着高性能价格比的多核计算机及可扩展集群式计算机研究的逐步成熟及应用, 电力系统潮流并行计算的研究得到了进一步的发展。文献[11]在自行搭建的计算机机群上提出了一种基于消息传递接口的 PQ 分解法并行潮流算法, 该算法计算时间较少, 加速比和并行效率较高。硕士论文[12]以牛顿—拉夫逊潮流算法为基础, 提出了一种基于树形计算结构的电力系统潮流分区并行算法。该算法大幅度缩短潮流计算时间, 具有较强的模块性和扩展性, 便于采用分布式计算及实时仿真。文献[13]针对 GPU 计算密集、高度并行化等特点, 提出了适用于 GPU 处理的简化牛顿法, 具有较高的计算效率。硕士论文[14]基于 GPU 研究了高斯-赛德尔法、牛顿-拉夫逊法、P-Q 分解法三种潮流的并行算法, 分析比较了三种并行算法的加速效果。文献[15]提出了一种适合于网络环境的电力系统潮流并行算法, 按照支路切割有效地将大规模电力系统的潮流计算问题转化为若干个子网络的潮流计算问题, 通过分配于各个 PC 机的子网络之间的分解计算获取加速比。文献[16]提出了一种适用于电力系统分析计算的多核并行技术, 该并行算法既考虑了计算机硬件结构, 又充分发挥了 CPU 最大计算能力。文献[17]将电气系统与控制系统的求解过程进行解耦, 提出了一种面向分布式发电微网系统暂态仿真的并行计算方法。该方法简单、仿真计算速度快, 能充分利用多核处理器资源。

就算法实现而言, 传统并行算法的实现主要依赖于集群式计算机, 而随着多核计算机的推广应用, 目前利用多核心处理器提升仿真计算速度已成为一种趋势<sup>[16,18-19]</sup>。此外, 目前有关电力潮流的并行计算大都是关于单相潮流上, 而有关三相不平衡潮流计算的并行算法较少。因此, 本文针对大规模三相不平衡配电网潮流计算的特征, 以牛顿法为基础, 同时考虑线路不平衡、负荷不平衡等问题, 设计了同构模式下多核(2、4)处理器的任务分配, 对比负载均衡、并行加速比, 给出了不同配置下的并行计算最佳方案。通过 IEEE 馈线仿真对所提潮流计算方法的计算速度、收敛性和加速比进行测试和比较分析。

## 1 三相不平衡配电网数学模型

### 1.1 配电线路模型

配电网线路由架空线路和地下电缆组成, 均可采用标准三相  $\pi$  型等值电路表示, 如图 1 所示。

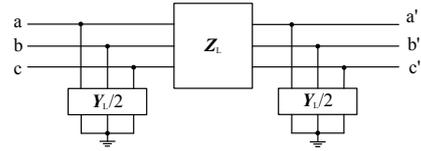


图 1 配电线路三相等值电路

Fig. 1 Three-phase equivalent circuit of distribution lines

图中,  $Z_L$ ,  $Y_L$  是三相线路的阻抗矩阵和并联导纳矩阵, 如下:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix}$$

阻抗矩阵中元素的自阻抗、互阻抗计算公式如式(1)、式(2)所示。

$$z_{mn} = R_n + R_g + j[0.1445 \lg(\frac{D_g}{r_z}) + 0.0157 \mu_r] \quad (1)$$

$$z_{mn} = R_g + j0.1445 \lg(\frac{D_g}{D_{mn}}) \quad (2)$$

式中: 下标  $m, n$  表示相线, 取 a, b, c 三种, 且  $m \neq n$ ;  $R_n$  表示  $n$  相导线单位长度电阻;  $R_g$  表示大地单位长度电阻;  $D_g$  表示导线与大地虚构导线之间的等效深度;  $D_{mn}$  表示  $mn$  相导线之间的距离。

并联导纳矩阵的计算如式(3)所示:

$$\mathbf{Y}_L = \frac{1}{j\mathbf{X}_{abc}} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{X}_{abc}$  是容抗矩阵, 其形式与并联导纳矩阵类似。其中的自容抗和互容计算如式(4)~式(5)所示。

$$x_{mn} = 0.1318 \times 10^6 \lg(\frac{H_{mn'}}{r_n}) \quad (4)$$

$$x_{mn} = 0.1318 \times 10^6 \lg(\frac{H_{mn'}}{D_{mn}}) \quad (5)$$

式中:  $H_{mn'}$  表示  $n$  相导线与其相应镜像导线之间的距离;  $r_n$  表示  $n$  相导线半径;  $H_{mn}$  表示  $m$  相导线与  $n$  相镜像导线之间的距离。

### 1.2 负荷模型

配电网三相负荷的连接方式考虑 Y 型和  $\Delta$  型两

种, 包括平衡和不平衡负荷。负荷模型包括为恒功率负荷、恒电流负荷、恒阻抗负荷三种模型<sup>[21-22]</sup>。

对于恒功率负荷, 无论负荷所在节点的电压如何变化, 每次计算时负荷功率始终维持给定值不变。

$$s = P_0 + jQ_0 \quad (6)$$

对于恒电流负荷, 指得是电流幅值和功率因数角保持恒定, 并不是指电流的角度恒定。在潮流计算第一次迭代中首先利用给定的恒电流和假定电压计算出功率。在每次迭代计算中, 每相功率计算如式(7)所示。

$$S_{k+1} = I_0 \times U_k / \delta_k - \theta_0 \quad (7)$$

式中:  $I_0$ ,  $\theta_0$  是电流幅值和功率因数角;  $U_k$ ,  $\delta_k$  是迭代电压幅值和相角。

对于恒阻抗型负荷, 种负荷的实际功率值也是随电压变化而变化。在每次迭代计算中, 每相功率计算如式(8)所示。

$$S_k = S_0 \times \left(\frac{U_k}{U_0}\right)^2 \quad (8)$$

式中:  $S_k$ ,  $S_0$  是实际功率和给定功率角;  $U_k$ ,  $U_0$  是迭代电压幅值和额定电压。

### 1.3 变压器模型

本文中配电网三相变压器模型如图 2 所示<sup>[20-21]</sup>, 该模型用  $6 \times 6$  的漏磁导纳矩阵  $Y_T$  和铁损模块表示。漏磁导纳矩阵  $Y_T$  的计算方法同文献[21]。铁芯损耗变压器的铁芯损耗表示为以每相电压为变量的函数, 计算公式如式(9)~式(10)所示。

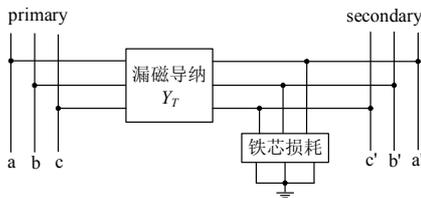


图 2 三相变压器等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of three-phase transformer

$$P_{Fe} = \frac{S_N}{S_B} (A|V|^2 + Be^{C|V|^2}) \quad (9)$$

$$Q_{Fe} = \frac{S_N}{S_B} (D|V|^2 + Ee^{F|V|^2}) \quad (10)$$

式中:  $P_{Fe}$ 、 $Q_{Fe}$  分别为铁芯损耗的有功无功标么值;  $S_N$ 、 $S_B$  为额定容量和系统容量基准值;  $|V|$  为电压幅值标么值; 在潮流计算中各系数采用典型值, 即  $A = 0.00267$ ;  $B = 0.734 \times 10^{-9}$ ;  $C = 13.5$ ;  $D = 0.00167$ ;  $E = 0.268 \times 10^{-13}$ ;  $F = 22.7$ 。

### 1.4 三相调压器模型

三相调压器由 3 个单相调压器连接而成。当 3 个调压器连接在一起时, 每个调压器都有各自的补偿控制电路, 因此, 每个调压器的分接头可以单独改变。本文考虑了三个调压器接地星型连接情况, 如图 3 所示。

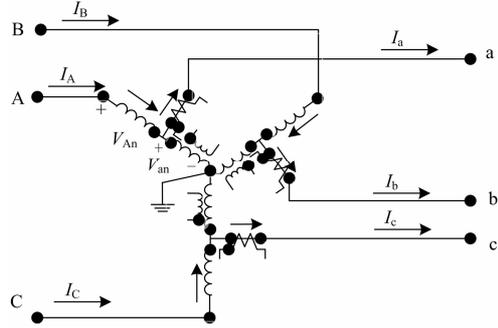


图 3 星型连接调压器示意图

Fig. 3 Equivalent circuit of star join voltage regulator

三相调压器输入电压和输出电压的关系式如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Rb} & 0 \\ 0 & 0 & a_{Rc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $a_{Ra}$ 、 $a_{Rb}$ 、 $a_{Rc}$  代表 3 个单相调压器的有效变比。由于调压器输出电压调节范围在  $\pm 10\%$  之间, 所以这些变比必须满足区间  $[0.9, 1.1]$ 。

## 2 基于牛顿-拉夫逊的三相不平衡潮流求解算法

牛顿-拉夫逊法具有适应性好、收敛快的特点, 在电力系统潮流计算中有着广泛的应用。它是将潮流方程用泰勒级数展开, 略去二阶及其以上高阶项, 实质上是将非线性方程逐次转变为线性方程求解<sup>[21-22]</sup>。

设配电网节点电压计算公式如式(12)所示。

$$U_i = e_i + jf_i \quad (12)$$

配电网三相潮流的求解方程如式(13)。

$$\begin{cases} \Delta W = J \Delta U \\ \Delta W = [\Delta P_1^m, \Delta Q_1^m, \Delta P_2^m, \Delta Q_2^m, \dots, \Delta P_r^m, (\Delta V_r^m)^2, \Delta P_n^m, (\Delta V_n^m)^2]^T \\ \Delta U = [\Delta e_1^m, \Delta f_1^m, \Delta e_2^m, \Delta f_2^m, \dots, \Delta e_r^m, \Delta f_r^m, \Delta e_n^m, \Delta f_n^m]^T \\ m = a, b, c \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $J$  是雅克比矩阵;  $\Delta W$  是节点的三相有功、无功功率和电压平方不匹配列向量,  $\Delta U$  是三相电压的修正列向量,  $m$  是三相电压的 a, b, c 三相。

对于 PQ 节点需要知道确定的有功功率  $\Delta P_i^p$  和无功功率  $\Delta Q_i^p$ , 计算公式如式(14)。

$$\begin{aligned} \Delta P_i^p &= P_i^p - \sum_{j=1}^n \sum_{m=a}^c [e_i^{pm} (G_{ij}^{pm} e_j^{pm} - B_{ij}^{pm} f_j^{pm}) + \\ &\quad f_i^{pm} (G_{ij}^{pm} f_j^{pm} + B_{ij}^{pm} e_j^{pm})] \\ \Delta Q_i^p &= Q_i^p - \sum_{j=1}^n \sum_{m=a}^c [f_i^{pm} (G_{ij}^{pm} e_j^{pm} - B_{ij}^{pm} f_j^{pm}) + \\ &\quad e_i^{pm} (G_{ij}^{pm} f_j^{pm} + B_{ij}^{pm} e_j^{pm})] \end{aligned} \quad (14)$$

$p = a, ba, c; m = a, b, c$

对于 PV 节点需要知道确定的有功功率  $\Delta P_i^p$  和电压平方  $(\Delta V_i^p)^2$ , 计算公式如式(15)。

$$\begin{aligned} \Delta P_i^p &= P_i^p - \sum_{j=1}^n \sum_{m=a}^c [e_i^{pm} (G_{ij}^{pm} e_j^{pm} - B_{ij}^{pm} f_j^{pm}) + \\ &\quad f_i^{pm} (G_{ij}^{pm} f_j^{pm} + B_{ij}^{pm} e_j^{pm})] \\ (\Delta V_i^p)^2 &= (U_i^{pm})^2 - [(e_i^{pm})^2 + (f_i^{pm})^2] \end{aligned} \quad (15)$$

$p = a, ba, c; m = a, b, c$

通过式(13)可求得  $\Delta U$ , 从而可以获得节点电压的修正量, 然后开始下一次迭代, 直到收敛为止。

### 3 多核并行处理

目前配电网的潮流计算研究集中在研究改进已有的算法, 很少考虑 CPU 结构的变化, 因此即便是使用多核处理器来运行, 由于所有的操作都在一个核心上执行, 采用的都是串行结构, 也体现不了多核处理器的优势, 因此基于并行计算技术的应用是潮流计算性能提高的另一个途径, 能够充分发挥多核中央处理器性能。针对通信问题以及单机多核(处理器)硬件架构发展的趋势, 本文提出一种共享存储模式下的对称多核并行计算方法, 进一步改进大规模并行计算的性能<sup>[14,23]</sup>。

#### 3.1 多核并行内存访问方式

由于半导体制作工艺的限制和中央处理器体系结构的局限, 提升处理器主频的空间已经很小, 因此多核处理器架构的 CPU 应运而生。多核处理器是将多个处理器核心集成到一个处理芯片上, 每个核心都是一个单独的处理器, 可以拥有独立的高速缓冲存储器, 多个核心也可以共享一个高速缓冲存储器(二级缓存)。在现存的多核处理器采用的是共享高速缓冲存储器方案, 内存由多个核心共享, 多个核心是对称的(偶数个核心), 因此是共享存储的对称式多核处理器, 2 核心的存储结构如图 4 所示。

多核的每个核心存取数据都是通过高速缓存进行, 在此过程中共享二级高速缓存, 如果多核核心同时存取二级高速缓存, 将引起竞争, 使得 CPU 的

效率下降。

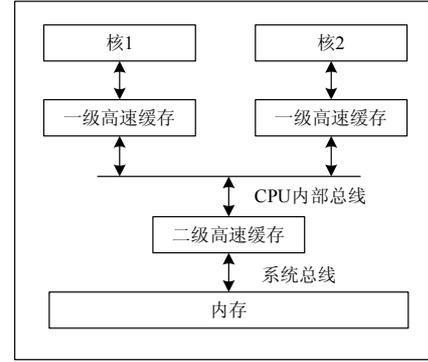


图 4 多核存储结构

Fig. 4 Multicore storage structures

#### 3.2 多核并行处理的负载均衡

在多核环境下, 充分发挥每个计算核心的性能, 保证每个核心任务分配合理, 避免系统运转的不均衡。这项工作主要是多核环境下的任务调度, 负责对任务分配进行优化, 这种优化考虑运行时间和数据共享两个方面<sup>[16,23]</sup>。

任务分配完毕形成一个任务队列 TaskQueue, 每个任务对应一个配电网的潮流计算, 所有进程共享此任务队列, 完成任务队列的所有任务即完成大规模复杂配电网的潮流计算。

并行处理主要通过建立多个进程来完成, 每个进程在一个核心上运行, 多核中央处理器有几个核心, 就建立几个并行处理的进程。这种并行处理的进程能够保证每个核心的负载均衡。在并行处理中, 加速比是衡量并行算法的性能和效果, 如式(16), 而并行效率是衡量资源利用率的重要指标, 多核 CPU 的效率计算公式如式(17)<sup>[24]</sup>。

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{S_p}{P} \quad (17)$$

式中:  $S_p$  是加速比;  $P$  是并行计算机中处理器的个数;  $T_1$  是单处理器下的运行时间;  $T_p$  是在有  $P$  个处理器并行系统中的运行时间;  $\eta$  是  $P$  个 CPU 的效率。

负载均衡作为并行计算的重要因素, 对并行计算时间有着重要的影响。本文用负载均衡度作为衡量负载均衡的指标。其定义如式(18)<sup>[24]</sup>。

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^p x_i}{p \cdot \max(\frac{x_i}{c_i})} \quad (18)$$

式中:  $x_i$  是分配到第  $i$  个 CPU 的负载;  $c_i$  是第  $i$  个 CPU 的计算能力;  $\lambda$  是负载均衡度。考虑到本文是在同构模式下进行的计算, 可认为每个 CPU 的计算能力相同, 因此式(18)简化如下:

$$\lambda = \frac{X}{p \cdot \max(x_i)} \quad (19)$$

式中,  $X$  是总负载, 是分配到各 CPU 任务的总和。

考虑到潮流计算过程与馈线数、节点数有关, 在进行潮流计算任务分配时用馈线数和馈线的节点数加权值来表示负载, 如式(20)。即:

$$x_i = \omega_1 F_i + \omega_2 N_i \quad (20)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  是权重因子;  $F_i$  是馈线数,  $N_i$  指节点数。

### 3.3 多核并发控制

在多核系统中, 还应考虑任务执行的并发控制, 即使两个核心选择相同的任务, 也不能使得有的任务被丢失, 为此本文设计队列自旋锁来进行并发控制。如果队列被别的进程加锁, 则本进程一直执行忙式等待, 进程在读取任务队列之前对任务队列加锁, 读取完毕之后, 对任务队列解锁。

### 3.4 并行计算潮流基本步骤

并行计算的潮流算法分为两个阶段: 数据预处理阶段和并行潮流计算阶段。在数据预处理阶段, 分单条复杂馈线和多馈线两种情况进行考虑。针对单条复杂馈线, 将牛拉法用到的雅可比矩阵分成  $2 \times 2$  的分块矩阵, 分块原则按照找零块、找相同块、找单位块、化分为单位对角块的原则来进行, 然后将不同块作为任务形成自旋锁的队列。对于多馈线情况, 为每个配电网的潮流计算生成潮流计算的任务, 将这些任务形成自旋锁的队列。数据预处理阶段采用串行处理。

并行潮流计算节点, 根据 CPU 核心的数量, 创建等量线程, 每个线程均访问自旋锁的任务队列, 提取相应的潮流计算任务, 依据牛顿-拉夫逊法进行潮流计算。整个并行潮流计算流程如图 5 所示。每

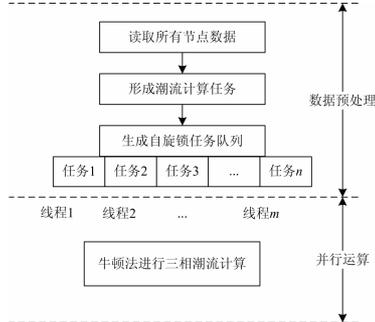


图 5 潮流并行计算流程图

Fig. 5 Flow chart of parallel load flow calculation

个线程完成牛顿法三相不平衡潮流计算, 每个线程的详细流程如图 6 所示。

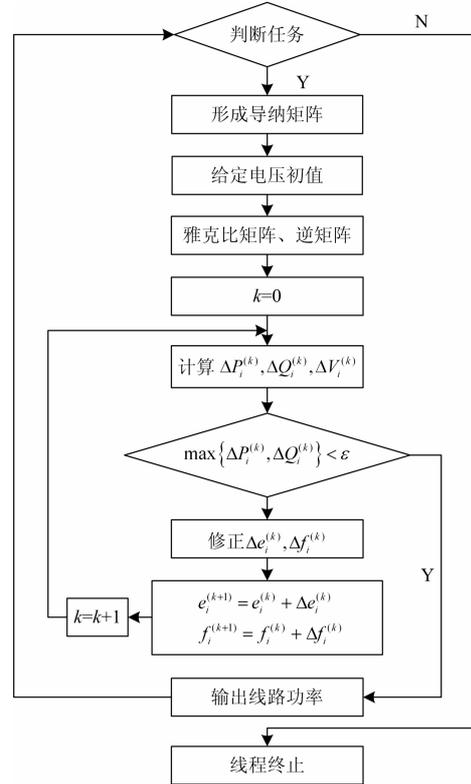


图 6 单线程计算流程图

Fig. 6 Flow chart of single thread calculation

## 4 算例分析

本文使用 Java 语言进行潮流计算的编程, 在单台多核计算机上实现了大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算。实验用的多核计算机是 2.2G Hz 4 核 CPU 和 4G 内存。分别使用其中的 1 核、2 核和 4 核 CPU 对 IEEE 123 节点系统进行牛顿-拉夫逊潮流计算, 计算结果如表 1 所示。对某实际配电网 1000 节点进行牛顿-拉夫逊潮流计算得到的结果如表 2 所示。并通过 IEEE 发布的 4 个馈线算例, 即 123 节点、37 节点、34 节点和 13 节点<sup>[25]</sup>的复制和组合来对大规模配电网中数十条馈线的并行计算进行仿真模拟, 模拟结果如表 3 所示。

从表 1~表 3 中可知, 随着 CPU 核数的增加, 计算时间在逐渐减少, 加速比在逐渐增加。从理论上来说, 4 核的计算效率应该是 2 核的 2 倍, 但从表 1 至表 3 中可以看出, 实际并未达到, 其原因主要是由于负荷不均衡和 CPU 锁竞争等原因的影响, 但计算效率能达到 0.72。

表 1 IEEE 123 节点潮流计算仿真结果

Table 1 Simulation results for IEEE 123 node

| 核数 | 计算时间/ms | 加速比   | 计算效率 |
|----|---------|-------|------|
| 1  | 328     |       |      |
| 2  | 257     | 1.276 |      |
| 4  | 179     | 1.832 | 0.72 |

表 2 配电网 1 000 节点潮流计算仿真结果

Table 2 Simulation results for 1 000 node

| 核数 | 计算时间/ms | 加速比   | 计算效率 |
|----|---------|-------|------|
| 1  | 2 321   |       |      |
| 2  | 1 677   | 1.394 |      |
| 4  | 1 037   | 2.238 | 0.81 |

表 3 多馈线潮流计算并行算法仿真结果

Table 3 Simulation results for parallel load flow calculation algorithm

| 馈线数 | 计算时间/ms |       |       | 加速比   |       | 计算效率 |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|------|
|     | 单核      | 2 核   | 4 核   | 2 核   | 4 核   |      |
| 4   | 1 326   | 987   | 488   | 1.343 | 2.734 | 1.00 |
| 8   | 2 475   | 2 046 | 1 243 | 1.210 | 1.991 | 0.82 |
| 16  | 5 548   | 2 983 | 1 581 | 1.860 | 3.509 | 0.94 |
| 32  | 11 664  | 6 689 | 3 927 | 1.744 | 2.970 | 0.85 |
| 50  | 16 889  | 9 854 | 5 670 | 1.714 | 2.979 | 0.87 |

通过对 IEEE123 节点、37 节点、34 节点和 13 节点的仿真可知,在该并行算法中,馈线的节点数对算法的计算时间有一定的影响。通常来说节点数相差较少的线路的计算时间相差不大,当馈线的节点数相差比较多时其影响是非常大,如表 1 和表 2 中所示。且随着核数的增加其计算时间并不成线性减少,分析其原因可能是由于增加了多核之间的通信而致。

从表 3 中可知,随着馈线数的增加,无论单核、2 核和 4 核,其计算时间都在增加,而在馈线数相同的情况下,核数越高计算时间越少。当分配在每核上的馈线数相同、且节点数相差不多的情况下,单核、2 核、4 核的计算速度几乎成倍增加,分析原因主要是在进行馈线的潮流计算时各核之间独立完成任务,相互之间不进行通信。

## 5 结论

对于大规模复杂配电网三相不平衡潮流计算,通过合理分配 CPU 自旋锁任务队列,能充分发挥 CPU 的并行运算能力、大大降低运算时间、提高计算效率。大量的仿真实验表明,本文提出的大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行多核算法,充分利

用了多核资源,计算速度明显提高,从而节约了硬件成本。算法简单、有效、易于实现,所得结论可为系统调度运行人员提供参考依据。

## 参考文献

- [1] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 257-270.  
ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 257-270.
- [2] 董雷,杨以涵,张传成,等. 综合考虑网络结构不确定性的概率潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 211-216.  
DONG Lei, YANG Yihan, ZHANG Chuancheng, et al. Probabilistic load flow considering network configuration Uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 211-216.
- [3] 桂勋. 多核并行和设计模式在海量电力暂态数据处理与分析中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
GUI Xun. Application research of multi-core parallel and design pattern on massive transient data processing and analysis in power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [4] 顾慧杰,王彬,赵旋宇,等. 多级控制中心全局电网潮流计算及闭环控制仿真系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 52-59.  
GU Huijie, WANG Bin, ZHAO Xuanyu, et al. Simulation of global power flow calculation and closed-loop control for multi-level hierarchical control centers[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 52-59.
- [5] 薛巍,舒继武,王心丰,等. 电力系统潮流并行算法的研究进展[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(9): 15-37.  
XUE Wei, SHU Jiwu, WANG Xinfeng, et al. Advance of parallel algorithms for power flow simulation[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2002, 42(9): 15-37.
- [6] 汪芳宗. 电力系统并行计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [7] LIN S L, VAN NESS J E. Parallel solution of sparse algebraic equations[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1994, 19(2): 743-749.
- [8] WU Junqiang, BOSE A. Parallel solution of large sparse matrix equation sand parallel power flow[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1995, 10(3): 1343-1349.
- [9] MONTAGNA M, GRANELLI G P. Level wise algorithms for vector processing of sparse power system matrices[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1996, 11(1): 239-245.

- [10] ALVARADO F L, YU D C, BETANCOURT R. Partitioned sparse A-1 methods[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1990, 5(2): 452-459.
- [11] 刘耀年, 孙纪男. 基于MPI的电力系统潮流并行算法研究[J]. 黑龙江电力, 2012, 34(6): 401-404.  
LIU Yaonian, SUN Jinan. Study on parallel power flow algorithm based on MPI[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(6): 401-404.
- [12] 刘佳. 基于树形计算结构的电力系统潮流并行算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
LIU Jia. Research on tree structure based power flow parallel calculation of power system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [13] 夏俊峰, 杨帆, 李静, 等. 基于GPU的电力系统并行潮流计算的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 100-103.  
XIA Junfeng, YANG Fan, LI Jing, et al. Implementation of parallel power flow calculation based on GPU[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 100-103.
- [14] 郭春辉. 基于GPU的电力系统并行计算的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
GUO Chunhui. Research on parallel computing of electric power system based on GPU[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [15] 李录峰. 基于网络分割的电力系统潮流并行算法研究[J]. 电子世界, 2012(4): 10-12.  
LI Lufeng. Research on parallel calculation of power flow of power system using network partition[J]. Electronics World, 2012(4): 10-12.
- [16] 熊玮, 夏文龙, 余晓鸿, 等. 多核并行计算技术在电力系统短路计算中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 49-52, 86.  
XIONG Wei, XIA Wenlong, YU Xiaohong, et al. Multi-core parallel computation technique for power system short-circuit faults analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 49-52, 86.
- [17] 李鹏, 丁承第, 王成山, 等. 基于多核心处理器的分布式发电微网系统暂态并行仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 171-178.  
LI Peng, DING Chengdi, WANG Chengshan, et al. A parallel algorithm of transient simulation for distributed generation system based on multi-core CPU[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 171-178.
- [18] YE Xiaoji, DONG Wei, LI Peng, et al. Hierarchical multialgorithm parallel circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2011, 30(1): 45-58.
- [19] CHEN Xiaoming, WU Wei, WANG Yu, et al. An EScheduler-based data dependence analysis and task scheduling for parallel circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2011, 58(10): 702-706.
- [20] 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.
- [21] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的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.
- [22] 王振树, 林梅军, 刘岩, 等. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.  
WANG Zhenshu, LIN Meijun, LIU Yan, et al. Power flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [23] 陈羽, 刘东, 廖怀庆, 等. 网格计算环境下输配电网联合潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 42-47.  
CHEN Yu, LIU Dong, LIAO Huaqing, et al. Transmission and distribution networks united power flow under grid of computing environment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 42-47.
- [24] 李鸿健, 豆育升, 唐红, 等. 一种可变周期反馈的动态负载均衡算法[J]. 电力测量与仪器学报, 2011, 25(11): 952-958.  
LI Hongjian, DOU Yusheng, TANG Hong, et al. Dynamic load balancing algorithm based on variable period feedback[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(11): 952-958.
- [25] US EPRI. Testfeedrs[EB/OL]. [2004]. <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeedrs.html>.

收稿日期: 2014-09-14; 修回日期: 2014-10-26

作者简介:

孟晓丽(1972-), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网运行控制; Email:mengxl@epri.sgcc.com.cn

唐巍(1971-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、配电网可靠性、电网性能评估等; Email:wei\_tang@cau.edu.cn

刘永梅(1978-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为智能配电网自愈控制技术。Email:liuympcpri@163.com

(编辑 张爱琴)