

PC 机集群系统在电力系统暂态稳定分析中的应用

卢锦玲, 于 磊, 李 英

(华北电力大学 电力系, 河北 保定 071003)

摘要: 暂态稳定分析的并行求解研究主要集中在对暂态计算时数学方程的并行化、暂态计算的内在并行性 2 方面。从网络分割的角度出发, 采用基于支路分割的并行算法, 以分割支路两端的电压为交接变量, 将分割支路两端的节点看作有注入电流的节点, 通过迭代最终实现并行计算。以 MPICH.NT.1.2.5 作为操作平台, 利用 MPI(Message Passing Interface)传递函数库实现并行通信。最后, 通过 IEEE 39 节点系统对该算法进行测试, 验证了该算法的正确性, 并且通过与传统算法的比较得到了令人满意的并行加速比。

关键词: 暂态稳定; 支路分割; MPI 函数库; 并行运算

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0036-03

0 引言

暂态稳定计算是电力系统动态安全的重要工具, 但其计算量大、计算时间长, 成为制约机电暂态在线仿真和实时应用的关键因素。为加快暂态稳定的计算速度, 实现在线实时的暂态稳定仿真和控制, 国内外学者将并行计算引入电力系统暂态稳定分析计算, 开发各种并行快速仿真算法。这些算法主要挖掘暂态稳定计算内在的并行性^[1-4], 采用并行处理技术, 加快暂态稳定仿真计算速度。目前的研究还不能达到实时计算的速度, 而且很难再进一步提高仿真计算速度。

现在已有许多基于 Unix 平台的集群系统^[5], 但在 Windows 环境下建立基于 MPICH 的并行计算平台, 国内报道不多。本文以 PC 机和局域网构建了简单的并行计算集群, 并根据分块法^[6]和母线分割法^[7]的原理, 采用支路分割法将网络根据 PC 机个数分割成子网络, 再将子网络分配到各 PC 机上进行计算, 服务器负责进程的安排及计算联络线电流。此外, 本文还给出了 PC 机集群系统的硬件、软件环境以及程序的设计与实现, 探讨了实现过程中的关键技术、解决方法。最后, 对 IEEE 39 节点系统进行了测试, 并和单机系统比较, 得到了令人满意的效果。

1 暂态稳定分析并行算法

1.1 一般暂态稳定求解

暂态稳定计算初始条件由电力系统稳态潮流的结果确定, 然后根据暂态稳定的计算条件(如故障类

型、地点、切除时间等), 求解描述电力系统暂态过程的方程式组。方程式组包括描述网络运行行为的代数方程和描述发电机组及其控制回路动态行为的微分方程式组:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{U}, \mathbf{x}) \quad (1)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{U}, \mathbf{x}) = 0 \quad (2)$$

式中 $\mathbf{U}$ 表示所有网络的状态变量; $\mathbf{x}$ 表示所有发电机组及控制回路的状态变量。

暂态稳定的数值计算是要联合求解上述 2 组方程式, 得到随时间变化的变量 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{x}$ 。式(1)主要表示系统中的动态元件特性, 而式(2)主要表示电网方程, 该方程组的一般解法是交替迭代法。显然, 式(1)有明显的并行性, 可直接进行并行求解, 而式(2)则没有明显的并行性。因此, 对暂态计算的并行处理主要集中在对式(2)的并行化上, 而根据式(2)所表达的含义, 本文通过网络分割实现其并行。

1.2 基于支路分割的方法

基于支路分割的系统分裂方法是根据系统的地理分布以及网络接线情况, 选定系统中某几条支路作为分割支路, 系统在分割支路上解列, 分为若干以区域为基本单位的、毗邻的子系统。在支路分割时, 尽量做到选取分割支路个数最少, 以减少并行计算时的计算量和通信量。

以图 1 所示系统为例, 母线 i 与母线 j 间的支路 b_{ij} 为分割支路, 系统分裂为 A_1 和 A_2 2 个子系统, 如图 2(a)(b)所示, 原系统等价为 2 个含有注入电流的独立系统。

注入电流位置只与分割支路的联接母线有

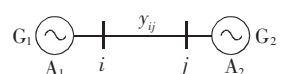


图 1 简单电力网络
Fig.1 A simple power system

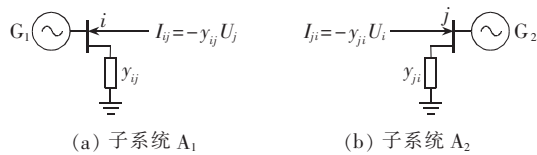


图 2 子系统
Fig.2 The subsystems

关,子系统 A_1 的注入电流在母线 i 上, $I_{ij} = -y_{ij}g(U_j - U_i)$, 即 $I_{ij} = -y_{ij}gU_j + y_{ij}gU_i$, 故可得到如图 2(a) 所示的子系统 A_1 , 在原有网络中母线 i 上增加了 y_{ij} 。同理, 子系统 A_2 的注入电流在母线 j 上, $I_{ji} = -y_{ji}g(U_i - U_j)$, 在原有网络中母线 j 上增加了 y_{ji} 。2 个子系统之间以 A_1 内母线电压 U_i 和 A_2 内母线电压 U_j 作为交接变量。

注入电流对应于分割支路所联相邻子系统母线的电压变量, 该变量即为实现系统求解的子系统间的交接变量。基于支路分割的系统分裂方法可应用于多条分割支路与母线相连的情况, 即子系统间多回路连接或母线连接多子系统的情况, 子系统间关联简单、明确, 解耦子系统具有较强的独立性, 较适应于电力系统复杂的网络拓扑结构及其市场化运营。

1.3 基于 MPI 的网络计算方案

MPI(Message Passing Interface)由一组库函数组成, 并程序的各任务通过这些函数进行通信。MPI 程序以 C 或 Fortran 程序为载体, 所以其程序的基本框架与 C 或 Fortran 程序基本相同, MPI 程序的构成如图 3 所示。

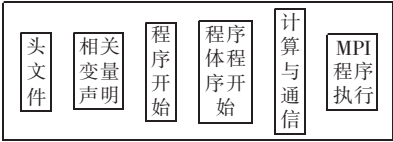


图 3 MPI 程序框架结构
Fig.3 The frame of MPI procedure

MPI 可通过 MPICH 实现^[8-10]。MPICH 含 3 层结构, 最上层是 MPI 的 API, 基本是点到点通信和在点到点通信基础上构造的集群通信(collective communication); 中间层是 ADI (Abstract Device Interface) 层, 其中 Device 可以简单地理解为某种底层通信库, ADI 就是对各种不同底层通信库不同接口的统一标准; 底层是具体的底层通信库。

2 PC 机集群暂态稳定并行算法设计

采用支路分割的网络分割方法, 子系统的网络方程式与系统网络方程式基本一致, 在对邻接子系统间交接变量加以处理后子系统可采用系统求解方式。

子系统在计算上具有并行性, 适于实现子系统级上的粗粒度并行计算。网络分割的并行求解算法如图 4 所示。

把每个子网络的数据存放到不同的 PC 机上, 服务器控制器需要附加子网络的联络线参数及模型, 暂态稳定计算并行算法的流程设计如图 4 所示。

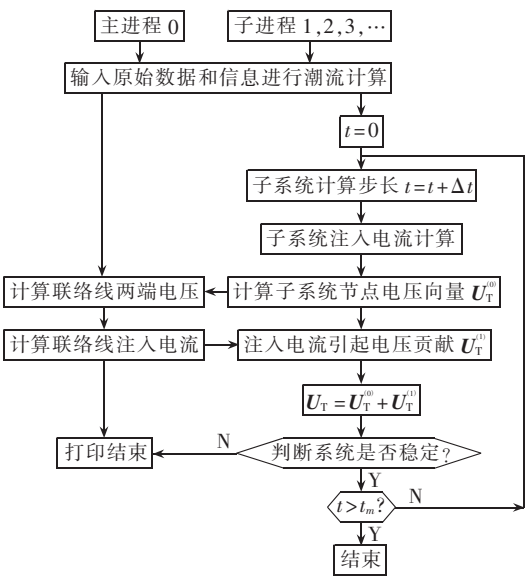


图 4 暂态稳定并行流程图
Fig.4 The parallel flowchart of transient stability

a. 各 PC 机计算子网络的注入电流, 其中不包括联络线电流, 用前代和回代过程完成 1 次迭代, 确定子网络内部每个节点的电压值和相角 $U_T^{(0)}$;

b. 把 a 中各边界电压由各 PC 机送到服务器, 在服务器上计算跨过各子网络联络线支路两端电压;

c. 在服务器上, 由各联络线母线电压计算各联络线电流;

d. 把联络线电流转换为注入母线电流, 送到各 PC 机;

e. 用前代及回代过程, 同时计算子网络由于注入联络线母线电流引起的电压贡献 $U_T^{(1)}$;

f. 总的电压为 $U_T = U_T^{(0)} + U_T^{(1)}$;

g. 在各子网络中, 由发电机方程和算得的电压计算发电机的电流;

h. 在各子网络中计算发电机新的功率 P_E 和加速功率 $P_M - P_E$, 相应的转子角度则由加速方程计算。

子系统内发电机、励磁调节器、原动机与调速器、负荷等动态元件的微分方程在子系统所在的处理单元计算, 分割支路的相关计算在 1 台独立的计算机上进行。系统在分系统上实现并行计算主要依靠子系统处理单元与分割支路处理单元间的电压变量通信。

3 PC 机集群系统硬件及软件环境

3.1 硬件环境

本 PC 局域网集群系统由 1 台联想 DES-1016R 型交换机和 4 台 PC 以星型结构方式组成。在这 4 台机中, 将其中 1 台设为服务器, 负责分发进程和协同工作, 其余 3 台作为客户机负责子网络的运算。

3.2 软件环境

操作系统采用中文版 Windows 2000 Sever 或

XP,支持软件采用 MPICH.NT.1.2.5,编程工具采用 Fortran 90 调用 MPI 消息传递库函数。MPI 是一种消息传递型并行通信的程序设计规程,也就是一个消息传递库,库函数可以嵌在 C、C++ 和 Fortran 等语言中调用。MPI 建立了一个实用、可移植、有效和灵活的标准,已成为应用最广泛和最稳定的并程序序设计技术。

4 算例

以 IEEE 新英格兰 10 机 39 节点系统为例,将其划分为 A、B、C 3 个子系统,其划分如图 5 所示。

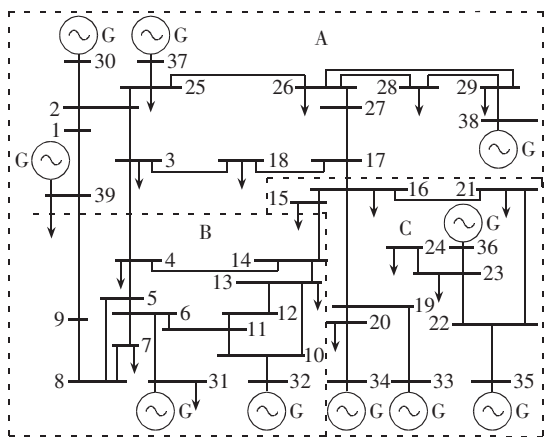


图 5 IEEE 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.5 IEEE-New England ten-unit thirty-nine-bus system

bus 9-39, bus 3-4, Bus 14-15 和 bus 17-20 的线路为切割支路。在每台 PC 机上安装以 Fortran 90 开发的暂态稳定计算程序,并将各子系统的原始数据分别存放在不同的 PC 机上。在服务器上进行进程的安排和数据处理。研究线路母线出口处发生三相接地短路,在单机系统上运行时间为 3.834 s,而在本文构建的 PC 机集群系统上,运行时间为 1.637 s,其加速比 $3.834/1.637=2.342$ 。此计算结果表明,采用该集群系统获得了较大的加速比。当然,随着系统规模扩大,网络分割时联络线的数目将会增多,网络间通信量将会增大,影响并行计算速度。

5 结语

本文以 PC 机和局域网构建了并行计算集群,利用网络分割技术,将不同的子系统分配到不同的 PC 机上,并行程序的各子任务通过 MPI 的库函数进行通信。实现了用子系统微分代数方程的内部求解代替整个系统的统一求解。系统求解过程中,子系统间只须交接由于互联所产生的对子系统的电压贡献,便可实现整个系统的暂态稳定性仿真计算,从而提高了计算速度。由于 PC 机局域网平台的并行集群系统运算速度快、系统稳定、界面友好、操作方便、构建费用低廉,可为电力系统暂态稳定分析的在线、实时仿真的实现提供有力的工具。

参考文献:

- [1] 王成山,张家安. 基于支路分割和区域迭代的暂态稳定性仿真并行算法[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 22-26.
WANG Cheng-shan, ZHANG Jia-an. Parallel algorithm for transient stability simulation based on branch cutting and subsystem iterating[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(1): 22-26.
- [2] WU Jun-qiang, BOSE A, HUANG Jin-an, et al. An parallel implementation of power system transient stability analysis[J]. **IEEE Trans. on Power System**, 1995, 10(3): 1226-1233.
- [3] 洪超. 电力系统暂态稳定计算的一种时间并行算法[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 31-35.
HONG Chao. A parallel-in-time algorithm for analysis of power system transient stability[J]. **Power System Technology**, 2003, 27(4): 31-35.
- [4] 李亚楼,周孝信,吴中习. 基于 PC 机群的电力系统机电暂态仿真并行算法[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 6-12.
LI Ya-lou, ZHOU Xiao-xin, WU Zhong-xi. Parallel algorithm of power system electromechanical transient simulation based on PC cluster[J]. **Power System Technology**, 2003, 27(11): 6-12.
- [5] 薛巍,舒继武,王心丰,等. 电力系统暂态稳定仿真并行算法的研究进展[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 177-182.
XUE Wei, SHU Ji-wu, WANG Xin-feng, et al. The study of parallel algorithm in power system transient stability simulation[J]. **System Simulation Transaction**, 2002, 14(2): 177-182.
- [6] HAPP H H. 分块法及其在电力系统中的应用[M]. 丘昌涛,译. 北京:科学出版社,1987.
- [7] KWASNICKI W T. High speed transient stability; multi-processing solution [D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1998.
- [8] BUYYA R. 高性能集群计算[M]. 郑伟民,石威,汪东升,等,译. 北京:电子工业出版社,2001.
- [9] 都志辉. 高性能计算并行编程技术[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [10] 陈国良. 并行计算——结构、算法、编程[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

卢锦玲(1971-),女,山东莒县人,副教授,研究方向为人工智能在电力系统中的应用及电力系统可靠性分析;

于磊(1979-),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为并行计算在电力系统中的应用(E-mail: 200302060@163.com);

李英(1977-),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为电力系统 PMU 优化配置。

Application of PC cluster system in electric power system transient stability analysis

LU Jin-ling, YU Lei, LI Ying

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Current parallel solution of transient stability analysis mainly focuses on two directions: the parallelism of mathematical equations for transient calculation and the inner parallelism of transient calculation. A kind of parallel algorithm based on branch cutting is adopted from the point of view of branch cutting. It regards the voltages at both ends of a cut branch as conjugating variables and the nodes as nodes with injection currents, then uses iteration to realize parallel calculation. MPICH.NT.1.2.5 is used as operating platform and the MPI transfer function database to realize parallel communication. It is used in IEEE 39-bus system and the result proves its correctness and the satisfying parallel accelerator is achieved through comparison with traditional algorithms.

Key words: transient stability; branch cutting; MPI function database; parallel algorithm