

基于多线程技术的数字保护实时仿真系统

杨星星¹, 张沛超¹, 刘之尧², 刘正超²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600)

摘要: 一次系统实时数字仿真对仿真步长有着严格的要求, 一般为 50~60 μs 。而微机保护等控制系统对仿真步长的要求则低得多, 两者相差达一个数量级以上。这给在 RTDS 上实现保护实时、闭环数字仿真系统带来很大困难。首先介绍了 RTDS 中控制系统以及用户自定义组件 (UDC) 的数学模型, 分析了实时仿真系统所遇到的问题, 指出多线程技术可以解决控制系统采样间隔与仿真步长不一致的问题, 从而有效缩短最小时间步长; 然后详细介绍了多线程技术的原理以及在 RTDS 中的实现方法, 并开发了基于多线程技术的保护实时数字仿真系统模型; 最后以一套纵联保护实时仿真模型为例, 在 RTDS 系统中验证了多线程技术的优越性。

关键词: 实时数字仿真系统; 多线程; 时间步长; 继电保护

A real-time digital protection simulation system based on multi-thread technology

YANG Xing-xing¹, ZHANG Pei-chao¹, LIU Zhi-yao², LIU Zheng-chao²

(1. Department of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Guangdong Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The RTDS has strict requirement for the time step of simulation, which is typically 50-60 μs . In contrast, the control systems such as digital protections have one order lower requirement for that. The great difficulties occur when implementing a real-time closed loop simulation system of protection based on RTDS. This paper first introduces the mathematical models of the RTDS control system as well as the User Defined Components (UDC). The multi-thread technology is proposed to solve the issue of inconsistency between the sampling interval and simulation time step. Then the paper introduces the multi-thread technology and its implementation approach on RTDS in detail. A real-time simulation system of protection based on multi-thread technology is illustrated and developed. Finally, a pilot line protection system is used to demonstrate the advantage of the multi-thread technology.

Key words: RTDS; multi-thread; time step; relay protection

中图分类号: TM77; TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0073-04

0 引言

传统方式下建立的保护仿真模型都是离线、开环的^[1~6]。由于在整个仿真过程中一次系统与保护、控制系统不能实时相互反馈, 故难以反映实际系统的动态特性。基于 RTDS 的微机保护仿真系统^[7]依靠强大的并行处理能力, 可以同时仿真电力一次系统和保护系统, 实现真正的实时、闭环仿真。仿真结果更接近于系统真实运行情况, 可以大大提高微机保护测试、分析和研发的效率。

实时数字仿真系统对仿真步长有着严格的要求, 其主要取决于所研究对象的频率范围^[8]。对于交流系统, 其本身可能出现的最高频率在几千赫兹, 故针对一次系统电磁暂态仿真, 仿真步长一般取 50~60 μs 。而微机保护等控制系统对仿真步长的要

求则低得多。目前实际运行的微机保护大部分基于工频原理, 1 kHz 左右的采样频率即可满足保护算法要求, 故保护系统的仿真步长一般取 1 000 μs 或更长。可见, 两者的仿真步长相差达一个数量级。但是, RTDS 无法为一次子系统和控制子系统指定不同的仿真步长, 这就迫使保护仿真必须在最小时间步长 (50~60 μs) 内完成。由此带来的问题是, 或者保护仿真无法达到实时性的要求, 或者导致大量重复计算。本文研究利用多线程技术, 将复杂的控制系统算法模块化, 通过对线程的合理调度和相继运行, 实现将控制算法跨越多个仿真步长计算, 从而有效地解决了以上问题。

1 保护实时仿真模型

1.1 RTDS 仿真模型

RTDS 仿真模型基于现代数字仿真技术, 由大量一次系统组件以及控制组件构成。对于任一组件, 可将其抽象为由一系列输入 u 、状态 x 以及输出 y 构成, 如图 1 所示。

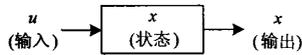


图 1 组件数学模型

Fig.1 Mathematical model of the component

对于离散系统: 其数学模型为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

对于一个复杂的控制系统, 上述输入 u 、状态 x 以及输出 y 皆为向量。在 RTDS 的一个时间步长 (50~60 μ s) 内, 应完成式 (1) 的所有计算。

RTDS 自身只提供了简单的保护系统组件, 需要开发用户自定义组件 UDC (User Defined Component) [9]。UDC 的函数原型可抽象为:

$$[\text{sys}, \text{x0}, \text{str}, \text{ts}] = f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \text{flag}, p1, p2, \dots) \quad (2)$$

其中: t 为当前仿真时间; x 为状态变量; u 为输入向量; flag 为仿真阶段标志; $p1, p2, \dots$ 为其他自定义变量。

各仿真阶段所要执行的任务如表 1 所示。

表 1 UDC 函数框架

Tab. 1 Function structure of UDC

Flag	UDC 函数框架	仿真阶段	主要任务
0	Initialize	初始化 $\mathbf{x0}$	1.指定状态变量个数 2.指定输出变量个数 3.指定输入变量个数 4.指定初始状态 $\mathbf{x0}$
1	Update	更新状态 \mathbf{x}	计算: $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k)$
2	Output	计算输出 \mathbf{y}	计算 $\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k)$
3	Terminate	仿真结束	终止仿真

1.2 保护仿真模型

基于上述用户自定义组件开发技术, 利用模块化和集成化开发的思想, 本文开发了一套完整的纵联线路保护模型。该模型中包含图 2 所示的主要保护功能模块。

图中, 对保护功能模块的划分依照 IEC61850 标准 [10]。例如, 方向元件 (RDIR) 实现对故障功率方向的判别; 选相元件 (PPHS) 实现对故障相类别的判断等等。

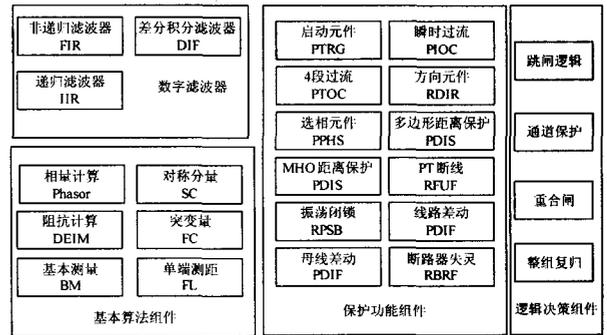


图 2 保护实时仿真系统主要模块

Fig.2 Main components of the real time protection simulation system

2 多线程技术

2.1 多线程技术原理

线程是操作系统分配处理器时间的基本单位, 是程序中一个单一的顺序控制流。合理地使用多线程技术, 可以达到“宏观上并行, 微观上串行”的执行效果, 从而有效提高处理器的利用率。本文中利用多线程技术的核心思路是: 将复杂控制系统划分为若干个有机的功能单元模块, 由线程控制执行。在一个控制系统采样间隔内, 每个 RTDS 仿真步长 (即一个线程) 只计算其中的一个或多个单元模块, 各线程相继进行计算, 计算结果通过全局变量进行耦合, 从而实现了控制算法在不同仿真步长之间的跨越计算 (即多线程运行), 解决了控制系统采样间隔和 RTDS 仿真步长不一致的问题。

2.2 线程划分

设 RTDS 仿真步长为 50 μ s, 保护系统采样率为 1 kHz, 则理论上保护仿真算法的最大线程数为 20 个。在本文开发的纵联线路保护仿真系统中实际使用了 5 个线程, 程序流程图如图 3 所示。其中各线程任务分配为:

线程 0: 公共服务, 包括实现多线程机制的公共代码、采样以及启动元件等。

线程 1: 模拟量计算, 包括滤波、序分量以及突变量计算等; 阻抗计算; 辅助启动, 如零序电流辅助启动, 静稳启动等。

线程 2: 方向元件, 选相元件, 以及四段式零序保护功能。

线程 3: 距离元件, 包括接地距离和相间距离。

线程 4: 振荡闭锁, 以及通道保护。

线程 5: 总跳闸逻辑, 重合闸, 整组复位等。

由于各单元模块算法计算量有较大差别, 通过在各线程间合理分配计算任务, 可以实现资源的最

优配置, 从而有效缩短时间步长, 以满足对复杂系统仿真的实时性要求。

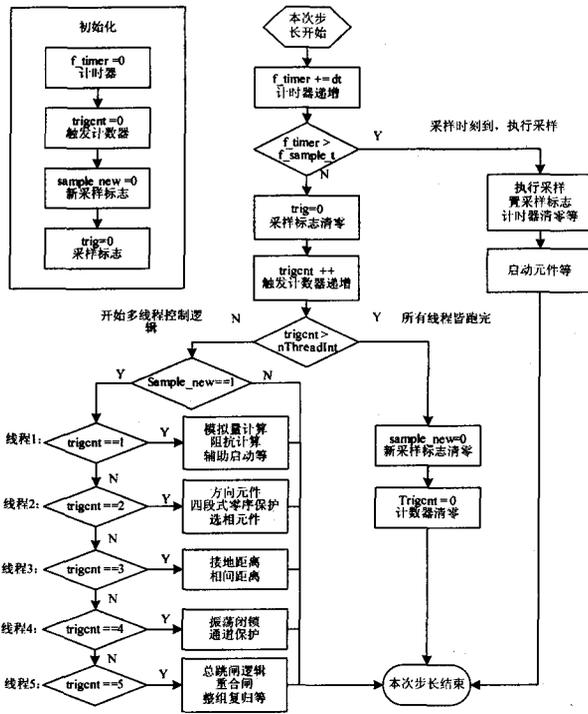


图3 程序流程图

Fig. 3 Flow chart of the program

3 运行结果

图4为一次系统模型图, 采用双电源、双回线系统。系统中嵌入了两套纵联线路保护仿真模型, 分别安装在线路L1的两侧。

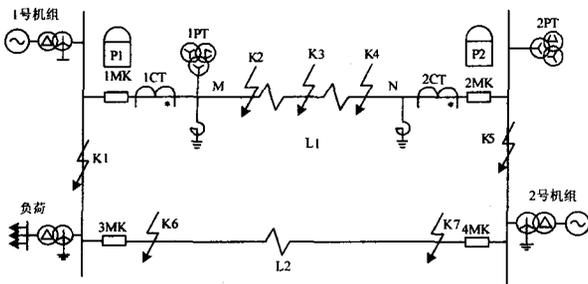


图4 一次系统模型

Fig.4 The primary system model

测试中启用了 RTDS 系统的一个 Rack (含 4 片 PowerPC 处理器) 进行并行计算。仿真步长置为 60 μs , 保护采样间隔为 833 μs , 线程数为 5。对线程运行情况进行监视, 结果如图 5 所示。图中横坐标为仿真时间(s), 纵坐标为当前所处的线程。当新的采样标志被触发后 (A 处粗线时刻), 表示系统

有新的采样数据等待读取。此时仿真程序中断正在执行的 2 号线程, 回滚到 0 号线程, 进入数据准备阶段。此后线程在新采样数据的基础上依次执行 0 到 5 号线程, 直到被新的采样标志中断 (图中 B、C 等粗线标注时刻)。由图可见, 多线程技术实现了控制算法在多个 RTDS 仿真步长之间的跨越计算, 使采样间隔和 RTDS 仿真步长达到了同步。

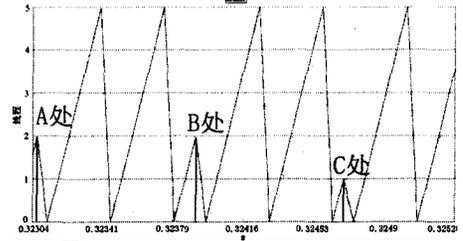


图5 线程监视结果

Fig. 5 Multi-thread monitoring result

进一步, 为分析多线程技术的实际效果, 本文分别采用不同的线程数, 通过试算确定了各自所需的最小时间步长, 结果如表 2 所示。由表 2 可见, 在不使用多线程技术的情况下, 仿真最小时间步长多达 112 μs , 不满足实时性要求。在采用多线程技术后, 最小仿真步长得到了明显缩短。当线程数为 5 时即可满足步长为 50~60 μs 的实时仿真要求。

表 2 多线程时间步长

Tab. 2 Multi-threaded time step

线程数	最小时间步长 / μs
1	112
2	78.8
3	64.7
4	58.6
5	48.6

上述仿真结果表明, 系统还拥有较大的线程裕度。当保护等控制系统的规模和复杂度进一步提高时, 可以启用更多的线程。

4 结论

(1) RTDS 不但可以仿真一次系统, 而且可以仿真微机保护等各种复杂的二次控制系统。利用多线程处理技术, 可以解决实时仿真系统中控制系统采样间隔和 RTDS 仿真步长严重不一致所带来的问题。

(2) 通过在各个线程间协作进行计算任务分配, 可以实现系统计算资源的优化配置, 从而有效缩短仿真时间步长, 最大化地提高仿真效率。

(3)多线程处理技术为开发复杂的保护实时仿真系统提供了可能性,具有重要实用价值。

参考文献

[1] 蔡泽祥,许志华.继电保护装置动作逻辑的数字仿真系统[J].电力系统自动化, 2006, 30(14): 101-105.
CAI Ze-xiang, XU Zhi-hua. Digital Simulation System of Relay Protection Movement Logic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(14):101-105.

[2] Berbic N, Memisevic R, Vorsic J. Application of Program Packages EMTDC and Matlab in the Analysis of Impact of Neutral Point Operating Regime on the Magnitude of Touch Voltage[J].IEEE Trans on, 2005,2(1):838- 843.

[3] 程刚, 张沛超. 基于 Matlab 和 ATP 的微机距离保护动态仿真[J].继电器, 2006, 34(22): 5-8.
CHENG Gang, ZHANG Pei-chao. Dynamic Simulation of microprocessor-based Distance Protection Based on Matlab and ATP[J]. Relay,2006, 34(22): 5-8.

[4] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 基于 ATP-EMTP 的大型电力系统暂态稳定仿真[J].电力系统自动化, 2006, 30 (21): 54-56.
GU Dan-zhen,AI Qian,CHEN Chen, et al.Transient Stability Simulation of a Large Power System Based on ATP-EMTP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (21): 54-56.

[5] 薛巍,舒继武,严剑峰,等.基于集群机的大规模电力系统暂态过程并行仿真[J].中国:电机工程学报, 2003, 23 (28): 38-43.
XUE Wei, SHU Ji-wu, YAN Jian-feng, et al.

Cluster-Based Parallel Simulation for Power System Transient Stability Analysis[J].Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (28): 38-43.

[6] Du X W, Liu D C, Li Y. Mixed Digital/Analog Testing System for Relay Protection of Power System[A]. in: IEEE Industrial Electronics and Applications Conference[C]. 2007:407-410 .

[7] 杨星星, 张沛超. 基于 RTDS 的微机保护实时闭环仿真系统的研究[J].电力系统自动化, 审稿中.

[8] 郑三立, 雷宪章, Retzmann D,等.电力系统计算机及实时数字仿真(下)——电力系统实时数字仿真[J]. 电力系统自动化.

[9] RTDS Technologies Inc. Real Time Digital Simulation for the Power Industry Manual Set, 2007.

[10] 王玲, 崔琪, 负保记,等.基于 IEC61850 的高压线路间隔的建模研究[J].继电器, 2007, 35 (24) :1-5.
WANG Ling, CUI Qi, YUAN Bao-ji. Analysis on High Voltage Line Bay Based on IEC61850[J]. Relay, 2007, 35 (24) :1-5.

收稿日期: 2008-10-16

作者简介:

杨星星(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护以及数字化仿真; E-mail: dsyang1984@sjtu.edu.cn

张沛超(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为继电保护、电网调度自动化;

刘之尧(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护运行管理。

(上接第 72 页 continued from page 72)

[5] 何国锋,谭震宇.采用等分散抽样法的电力系统仿真[J].电力自动化设备, 2004, 24 (7): 57-59.
HE Guo-feng, TAN Zhen-yu. Power System Probabilistic Simulation Using Average and Scatted Sampling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (7): 57-59.

[6] 宋晓通, 谭震宇. 改进的重要抽样法在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29 (13): 56-59.
SONG Xiao-tong, TAN Zhen-yu. Application of Improved Important Sampling Method in Power System Reliability Evaluation [J]. Power System Technology, 2005, 29 (13): 56-59.

[7] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
FANG Zai-gen. Computer Simulation and Monte-Carlo Method [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.

收稿日期: 2008-10-17; 修回日期: 2008-12-18

作者简介:

王晶(1982-), 女, 助教, 硕士, 研究方向为电工理论与新技术; E-mail: qixiawangjing@126.com

王昉(1982-), 女, 助教, 硕士, 研究方向为电力电子与电气传动。