

基于多核PXI计算机的电力系统并行实时仿真

传统电力系统实时仿真一般都是基于专有硬件设备进行并行计算,以通用的PXI工业计算机为平台,通过多核CPU并行的方法实现了电力系统的实时仿真。通过状态方程对电力系统建模,利用分布参数线路分割大拓扑,并通过图形化编程的方式实现在多个CPU核的实时并行计算。以一个6机39三相节点系统的离线与实时仿真结果验证所介绍的基于多核PXI工业计算机的电力系统并行实时仿真方法。

汪新星¹ 黄旭² 刘旭¹ 刘浩¹/1.上海远宽能源科技有限公司
2.辽宁省电力科学研究所

0 引言

由于环境保护和可持续发展的需要,风电、光伏等可再生能源发展迅速,为了消纳这些间歇性的能源,出现了如微电网、主动配电网等新的电网组织形式;这些变化都使得电网的控制与保护变得更为复杂^[1]。实时数字仿真器既可如动模实验室中的物理设备一样同真实控制器构成闭环,又有软件仿真易于改变拓扑、易于测试故障工况的特点,因此其已成为电力科研人员进行电力系统研究与试验的重要工具。

实时仿真对于模型计算的时间有着严格的要求,单个硬件计算单元的处理能力有限,因此并行计算是实时仿真的实现关键。目前常见的电力系统实时仿真器有加拿大的RTDS HyperSim和中国电力科学研究院的ADPSS等^[2-4]。这些实时仿真器一般基于专有同时较不易得的硬件,如RISC芯片、SGI工作站和服务

器群等专有硬件系统。

PXI是由PXI联盟定义的一种通用工业计算机,原主要应用于测量领域,主要供应商为美国NI(National Instruments)公司。近年来PXI作为一个实时计算平台在汽车、航空航天等行业的半实物仿真领域也得到了应用^[5-6]。同时自从Intel在2006年发布了第一款双核酷睿CPU以来,多核CPU技术快速发展,且每个核的计算能力也不断加强,PXI也配有最新的多核CPU(目前最强为八核的Xeon CPU),这使得在多核PXI上实现较大电力系统实时仿真成为可能。

LabVIEW是NI的图形化编程软件,其在工程科技人员中使用广泛,可无缝支持PXI计算机。StarSim是一款基于LabVIEW的电磁暂态仿真程序。文献[7]介绍了利用StarSim进行双馈风机控制器的硬件在环仿真测试。文献[8]介绍了利用StarSim进行风电系统功率硬件在环仿真。本文将着重介绍StarSim利用多核CPU进行较大电力系统的并行实时仿真的设计与实现。

1 电力系统建模与仿真方法简介

电力系统仿真(电磁暂态仿真)主要有EMTP方法和状态方程法两种方法。StarSim是基于状态方程的方法,其利用图论、电路原理(基尔霍夫电压定律与基尔霍夫电流定律等)和元件本身的方程(欧姆定律等)形成电路的状态方程,即



汪新星/高级工程师

关键词/Keywords

电力系统仿真·
实时仿真·
并行运算·
多核计算机·

上海市科技型中小企业创新基金(1301H173800)。

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1)$$

式中, x 为状态变量 (电感电流和电容电压); u 为系统的输入量; A 、 B 为系数矩阵。

因为是为实时仿真设计的, StarSim 采用了定步长的仿真方法, 且同经典的 EMTP 方法一样采用计算准确度高、数值稳定性好的二阶隐式梯形法来进行积分, 即

$$x(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right)^{-1} \left\{ \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{dx}{dt}(t - \Delta t) + Bu(t) \right] + x(t - \Delta t) \right\} \quad (2)$$

式中, Δt 为仿真步长。

对于定步长的仿真算法来说, 准确地处理发生在采样点间的开关事件是很重要的, 否则会导致数值振荡和不准确的仿真结果。图1详细描述了 StarSim 应对这类事件的步骤。

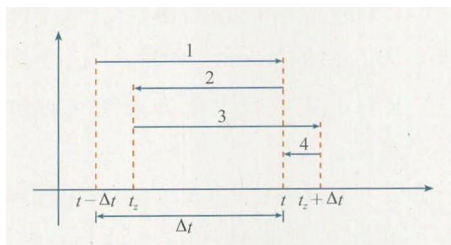


图1 应对采样点间拓扑变化的步骤

当完成从 $t - \Delta t$ 时刻到 t 时刻的一步积分后, StarSim 将根据边界条件 (如二极管电流是否由正变负) 判断是否在采样点间发生了拓扑变化, 如果有, 将先插值回拓扑变化时刻 t_z (如二极管在电流过零点), 更新电路的拓扑, 然后根据新拓形成新的系数矩阵 $A(t_z)$ 、 $B(t_z)$, 再利用状态量在拓扑变化时是连续的, 可以根据式 (3) 得到电路拓扑突变后的状态量微分量, 即

$$\frac{dx}{dt}(t_z) = A(t_z)x(t_z) + B(t_z)u(t_z) \quad (3)$$

然后 StarSim 再利用式 (2) 向前积分到 $t_z + \Delta t$ 时刻, 再回插到采样点 t 。除了正常的积分步, StarSim 需要附加插值两次、二阶积分一步来应对采样点间的拓扑变化。

到达采样点 t 后, StarSim 读取此时刻外部开关的控制信号 (如断路器的控制命令), 判断是否

有变化, 如果有, 需要更新对应的拓扑和方程。然后再向前进行下一步的积分, 如此循环往复。

2 拓扑分割与模型预先生成

分布参数线路模型的两端是没有直接的电气连接的, 一端对另一端的影响是通过值 (电压值和电流值) 传递进行的; 因此其是一个理想的、常用的将一个大电力系统分为几个等效的小系统的元件。以单相分布参数线路为例, 其等效电路如图2所示。

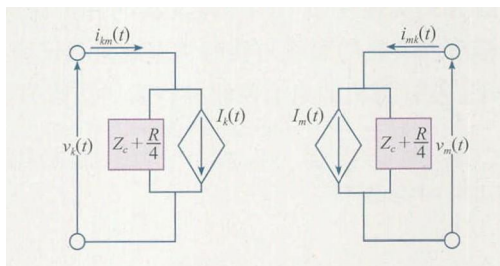


图2 单相分布参数线路模型

注入电流的计算公式为

$$I_k(t) = \frac{-Z_c}{(Z_c + R/4)^2} (v_m(t - \tau) - (Z_c - R/4)i_{mk}(t - \tau)) - \frac{R/4}{(Z_c + R/4)^2} (v_k(t - \tau) - (Z_c - R/4)i_{km}(t - \tau)) \quad (4)$$

式中, I_k 为 k 端的注入电流源; τ 为线路的波传播时间; Z_c 为特征阻抗; R 为线路电阻; v_m 、 v_k 、 i_{mk} 和 i_{km} 为端口电压、电流。

StarSim 中设计了如图3的单端单相分布参数线路模块, 除了电气端子外, 还有数据输入和数据输出的端子, 用来和对端进行电压值和电流值的交互, 两个单端元件匹配起来就可以替换原来的一个输电线路, 实现模型的分割。对于三相系统也有类似的设计。

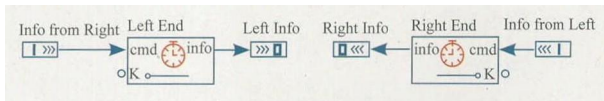


图3 StarSim单端单相分布参数线路模型

分布参数线路分割拓扑后不仅利于并行运算, 同时也相当于式 (1) 的方程通过行列变换化为如式 (5) 的对角阵, 一个大的方程变为两个阶次低的小方程将大大减少仿真的计算量, 利于实

时仿真实现。

$$\begin{pmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

电力系统通常都含有晶闸管、断路器等开关元件，这些开关的每个开关状态组合都对应一个特定的拓扑，为了减少在线形成新拓扑的数学模型造成的实时仿真抖动，实时仿真前，每个子系统将预先生成所有可能或一定数量（当开关过多时）的拓扑模型，并用循环buffer缓存在线生成的新模型（再次用到时无须生成），通过这样的方法来提高实时仿真的实时性。

3 图形化多核并行仿真

多核并行编程一般通过文本编程的方式来实^[9-10]现，但文本本身是串行的；对于多核并行，LabVIEW的图形化的方式直观、易于实现。

LabVIEW中一个定时循环（Timed-loop）就代表一个线程，用户可以将一个或者多个定时循环

分配到指定的CPU核上，来实现单核多线程或者多核多线程并行的编程。图4为利用LabVIEW进行实时多核并行编程的一个例图，其中有两个定时循环，一个分配到CPU0核，一个分配到了CPU1核，两个循环中各自运行着由一个大电力系统通过分布参数线路分割得到的两个子系统的数学模型。

并行计算单元间高速的确定性通信也是实现电力系统实时仿真的关键。LabVIEW的RT（Real-Time）FIFO，可以很好地帮助实现从一个核到另一个核的实时确定性通信。图4中应用了两个RT FIFO，来实现两个核之间信息（分布参数线路两端的电压值和电流值）的实时确定性传送。

4 实时仿真验证

图5为一个包括6个三相电动机39个三相节点19条三相分布参数线路的电力系统，在图5所示的分界处通过分布参数线路将系统分为三个子系统进行仿真。在3 s时，在图5所示的故障点发生持续0.1 s的A、B两相对地短路故障。图6为故障点附近线路的C相电压与A相电流，其中Simulink的仿真

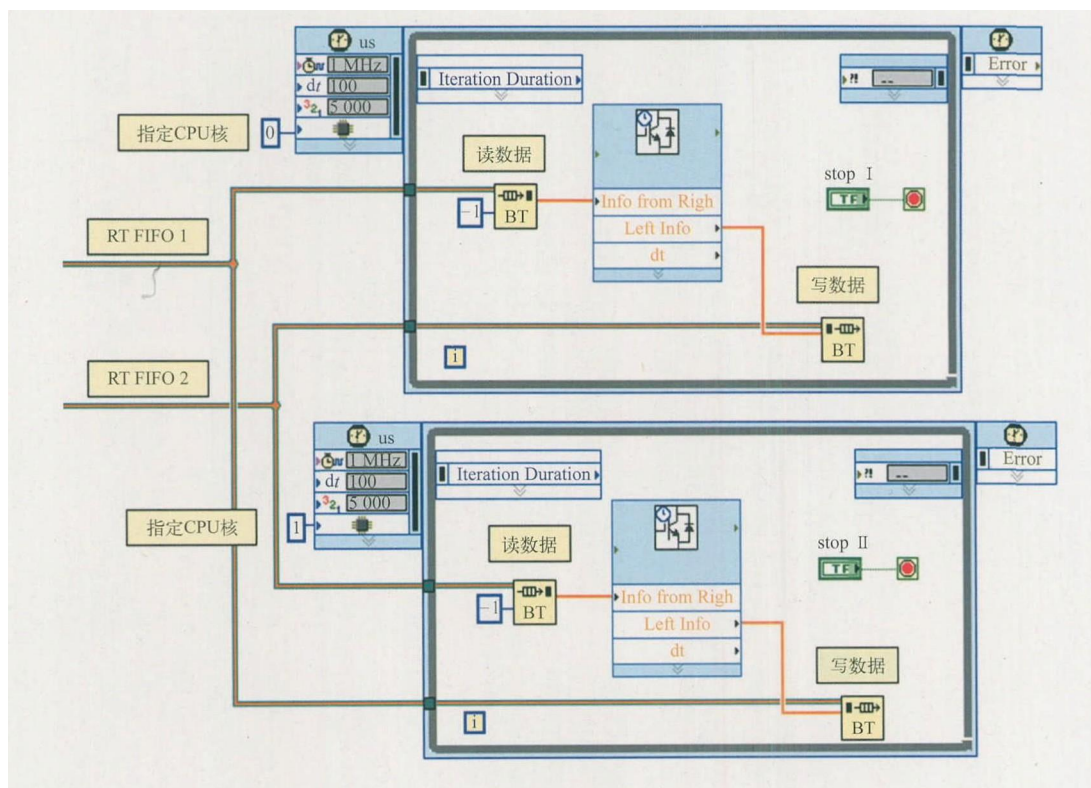
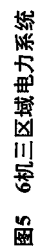
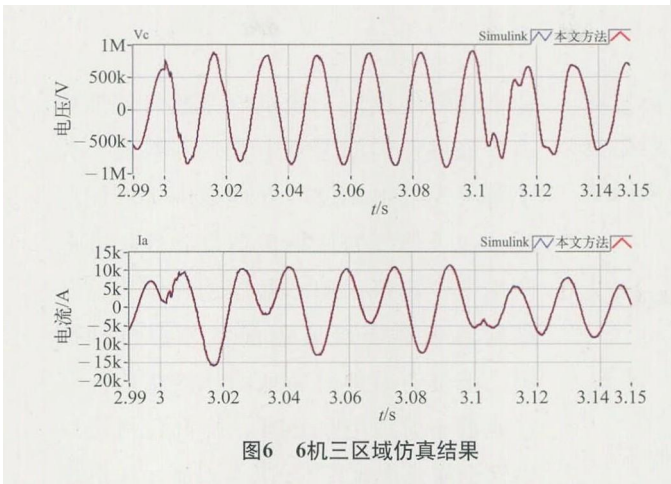


图4 LabVIEW多核并行框图



结果为将系统进行整体仿真得到，三个子系统联合仿真的结果与Simulink对整个拓扑整体仿真的结果非常接近，基本重合。



通过离线仿真验证了所介绍的算法后，以图7所示的一个硬件架构来测试与验证所介绍的实时仿真系统。其中，PXI（型号为PXIe-8135，其配有Intel i7 2.3 GHz的四核CPU）作为电力系统的实时仿真器，图5的系统作为测试算例，并将图5中同步发电机M3的励磁调节器（AVR）外移到一个工业实时控制器上。实时仿真器和工业实时控制器（模拟AVR）通过IO板卡连接而构成一个实时闭环仿真测试系统。

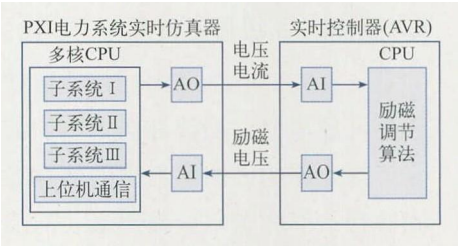


图7 实时闭环仿真系统示意图

PXI的四个核中，一个核负责和仿真上位机进行通信，其余三个核每个核仿真一个子系统。仿真步长为100 μs。图8为实时仿真时当图5所示处发生短路故障时通过示波器录得的发电机M3机端电压与励磁电压波形。

从图8中可以看出，在系统发生短路导致机端电压跌落时，AVR快速作用，强励以维持系统的电压稳定；当故障消失时，AVR反向调节抑制系统过电压，并逐渐恢复正常励磁电压。通过

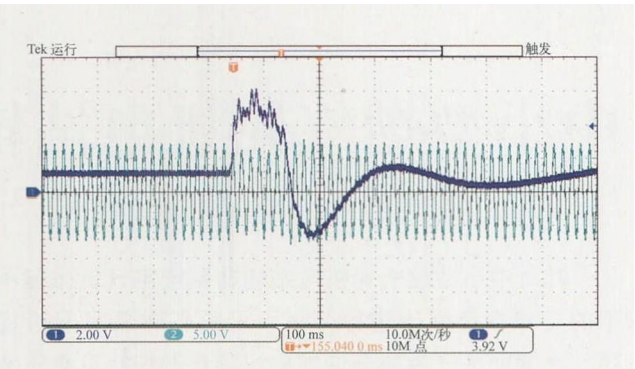


图8 故障过程示波器波形

故障工况的实时仿真测试验证了AVR的作用与有效性。

实时运行时三个子系统的模型平均运行时间分别为80 μs、41 μs和66 μs。故障点在子系统二中，图9为子系统二在故障过程的运行时间。除了小的波动外有四个较大的点（>50 μs）。前两个点对应的是断路器指令变化发生时仿真程序判断是否要改变拓扑，因此增加了运行时间；后两个点对应的是A、B两相断路器电流过零（断路器断开）时由于插值引起的运行时间增加。这些行为同图1对应。在全过程中，模型运行时间始终小于100 μs，保持了仿真系统的实时性。

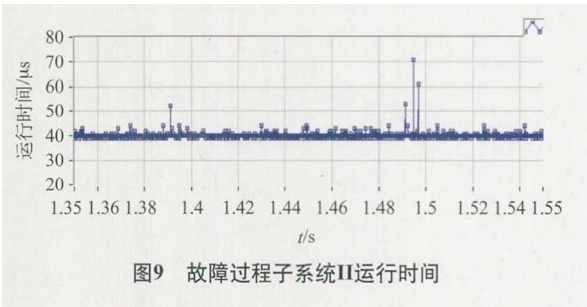


图9 故障过程子系统II运行时间

5 结束语

介绍了一种基于多核PXI计算机的电力系统并行实时仿真方法，介绍了电磁暂态建模算法、分割拓扑的方法和图形化多核并行编程方法，并通过离线与实时仿真结果验证了相关算法与系统。下一步的研究方向为利用FPGA进行电力电子系统的小步长仿真，然后通过CPU与FPGA联合仿真来进行同时含有交流电网与电力电子拓扑的微电网或新能源系统的实时仿真。

(下转第93页)

极其快速地将负载端电压调节到额定值,从而基本减轻来自电网输入端的电压波动对负载的影响。

4.3 应急不间断电源

大功率应急不间断电源(EPS)是解决电压波动停机问题的有效手段。EPS系统由整流器、逆变器、静态旁路开关及蓄电池组等部分组成,系统正常时热备状态,当主电源失电时,系统瞬间切换为由蓄电池组的直流电通过逆变器转换为交流电供负荷使用,提供给燃气轮机的停机冷却负荷,确保了供电的连续性。当电源恢复正常时,EPS系统切换到热备状态。

4.4 优缺点分析

电动机保护器或电动机再起动继电器的优点是价格便宜安装方便,理论上能够有效地保证电动机自起动,但燃气轮机厂家认为类似设备会影响轮机辅助系统的逻辑控制,拒绝在其MCC中设置,因此项目运行中较难实施。

AVC的优点是其在毫秒级内对跌落电压作出初步校正,然后在随后半个周波之内作出完全校

正。其功能上对轮机辅助系统控制逻辑无影响,且市场价格适中,在对电压波动要求较高的工业设施领域,如中东地区海外油气田中小型燃气轮机电站辅助系统中得到较为广泛的应用。

EPS系统的优点是也能提供稳定可靠的电源输出,但其与以上两种设备相比较昂贵,且大功率等级的EPS蓄电池数量较多、占地面积较大,因此在燃气轮机辅助系统中应用较少。

5 结束语

中小型燃气轮机电站辅助系统的电压稳定是电站可靠运行的关键。为了防止系统电压波动对电站辅助系统的影响,可采用快速电压调节器稳定辅助系统电压,避免轮机辅助设备由于系统电压波动而失电,继而导致整体电站事故停机。

为了保证全站停机后再次快速起动备机,设计中应详细了解主机组起停数量、顺序及辅助系统的运行工况,根据实际最大负荷工况选择应急柴油发电机容量。

(收稿日期:2016-05-21) EA

(上接第89页)

参考文献

- [1] 杨捷,张锐,刘巍.含分布式电源接入配电网故障分析[J].电气应用,2015,34(19):103-106.
- [2] 高立克,丁涛,俞小勇,等.小电流接地系统行波法选线的RTDS测试可行性分析[J].电力系统自动化,2012,36(17):113-117.
- [3] 周保荣,房大中,Laurence A S,等.全数字实时仿真器—HYPERSIM[J].电力系统自动化,2003,27(19):79-82.
- [4] 田芳,李亚楼,周孝信,等.电力系统全数字实时仿真装置[J].电网技术,2008,32(22):17-22.
- [5] 倪计民,李晓锦,石秀勇.基于NIPXI平台的发动机ECUHL系统上位机程序开发[J].汽车技术,2014(3):54-58.
- [6] 赵跃,苗克坚.基于PXI的飞控襟翼仿真系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2011,19(3):661-664.
- [7] 汪新星,刘旭,刘浩.基于StarSim和平均值法的双馈感应发电机硬件在环仿真[J].电网与清洁能源,2014,30(4):53-59.
- [8] Yu Zhou, Jin Lin, Song Yonghua, et al. A power hardware-in-loop based testing bed for auxiliary active power control of wind power plants[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 124(7):10-17.
- [9] 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.
- [12] 陈勇,李亚楼,田芳,等.基于MPI的电网仿真实时并行计算平台[J].计算机工程,2011,37(17):268-273.

(收稿日期:2015-08-18) EA