

电力系统实时仿真技术研究综述

罗建民¹, 戚光宇², 何正文¹, 象阳³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 平顶山平东热电有限公司,
河南 平顶山 467000; 3. 广东佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 电力系统实时仿真已成为进行电力系统试验研究、规划设计、调度运行和状态安全评估的重要工具。电力系统实时仿真技术的发展经历了物理仿真、数模混合仿真和数字仿真三个阶段。介绍了电力系统实时仿真技术的一般定义、发展历程及现状, 突出了该技术的实时性特点, 同时, 对实时仿真技术的理论基础、涉及的算法和实现方式也作了一定程度的阐述, 对电力系统实时仿真技术有较全面的比较和说明。三种实时仿真技术有各自的优缺点, 在实际应用中应有选择性地配合使用。数模混合仿真技术在仿真应用中较有优势, 成为目前较热门的研究课题, 对它作了重点介绍。最后进一步指出了电力系统实时仿真技术急需解决的问题。

关键词: 电力系统; 数字仿真; 实时仿真; 混合实时仿真

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)18-0079-08

0 引言

目前在 PC 机上广泛使用的仿真软件如 EMPT、NETOMAC、PSS/E^[1]等是电力系统试验研究和调度运行的重要工具软件。由于它们都属于非实时离线计算软件, 其仿真速度与实际系统不同, 所以不能直接与实物相连进行各类继电保护和自动化产品的分析测试。而电力系统实时仿真是解决这类问题的重要技术。当今, 世界各国的电力系统发展得越来越庞大, 电力系统的运行也随之越来越复杂, 发生的事越来越难以用传统的分析方法预测。在我国, 随着三峡电站的建设、西电东送工程的实施和全国联网工程的推进, 既有交流线路, 又有直流线路, 还包括诸如无功静止补偿器之类的电力电子设备和 FACTS 装置的全国统一电网将使电网的安全稳定运行控制变得十分复杂。这对电力系统仿真技术提出了更高的要求。实时仿真技术继承了数字仿真软件和模拟仿真器的优点, 体积小、建设周期短、功能强大, 对于测试的系统可实时闭环运行, 这是以前的仿真系统所无法比拟的。本文讨论了现有电力系统实时数字仿真的分类、各自特点及系统的现状和存在的一些问题。

1 电力系统实时仿真技术的综合比较

电力系统仿真技术是以相似原理、信息技术、系统理论及其电力系统相关的专业技术为基础, 以计算机和各种物理效应设备为工具, 利用电力系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合

性技术。若有实物系统介入仿真系统, 必须要求其仿真速度与电力系统实际动态过程完全一致^[2,3], 这种仿真称为电力系统实时仿真。电力系统实时仿真按发展阶段可分为物理仿真、数模混合仿真以及数字仿真三种类型。

1.1 电力系统动态模拟仿真

电力系统动模实验仿真系统是最早出现的进行电力系统研究的实时仿真工具。电力系统动模实验室的硬件通常按相似理论由若干台按比例缩小的电机、一定数量的型线路模型、电源、负荷、开关模型以及相应的监测、控制系统组成。通常用来进行电力系统机电暂态以及动态过程的实时仿真研究。电力系统动态模拟在元件模型中已经包含了许多复杂因素(如非正弦、非线性、非工频等)的影响, 因此可以非常有效地研究许多内在过程尚不清楚、难以或不能用数学方式描述的现象, 反映的物理过程是直观、真实的, 可以直接可靠地检验理论分析和计算结果的正确性; 可在与实际系统很近似条件下观察和研究电力系统的许多特性和过程, 得出用于指导实际电力系统安全运行的重要结论, 动模对新技术、新装备实物的运行试验非常方便, 这是动模实验的独特优点。缺点是: 设备昂贵、占地面积大、可模拟的电力系统规模受制于装置自身的规模和元件的物理特性, 装置的可扩展性和兼容性差, 也难以大量推广。它们在电力系统的发展中曾发挥重要的作用, 今后仍将发挥一定的作用。

1.2 数模混合实时仿真

在电力电子装置的控制和保护系统测试中, 对

于晶闸管和 GTO 换流装置,考虑高频的暂态特性时,由于实时数字仿真系统无法采用太小的步长(如几个 μs)^[5],此时应用原型模拟仿真器更为合适。数模混合式实时仿真系统,一般地说,除电机、动态负荷等旋转元件用数字元件模拟外,其余元件基本上与动态模拟采用的元件一致,但也不尽然。如:在发电机励磁和调速系统的测试中,有时希望用实际的动模机组来进行实验,系统其它部分则采用数字仿真进行模拟。

1.2.1 数字与模拟混合实时仿真的理论基础

模拟仿真用物理器件对真实系统的行为进行仿真,被仿真系统和仿真系统之间的关系必须满足相似定理。在混合仿真系统中,模拟部分包括动模发电机组,或者是 HVDC 换流器或 FACTS 装置(包括快速的晶闸管和 GTO 器件、换流变压器、直流电抗器等)的原型模拟仿真器。数字部分包括其它发电机、其它 HVDC 换流器和 FACTS 装置及其控制保护系统以及复杂的交流系统部分(详细的发电机模型、传输线模型、变压器模型、互感器模型和负荷模型等)。被测试的实际控制和保护系统与发电机组或者原型模拟仿真器相连进行实时测试。实时数字仿真系统和模拟仿真器(包括发电机组和原型电力电子装置)分别作为两个子系统,通过数模混合实时接口将两个子系统结合起来做实时仿真,从而扩展了实时仿真研究的范围。因此,如果能够为两个仿真子系统形成统一协调的边界条件,并通过以 A/D 和 D/A 转换为核心的接口技术完成物理量与数字量的转换,那么完全可以利用物理方法和数值方法联合模拟一个真实系统,数模混合实时仿真系统的结构图如下所示:

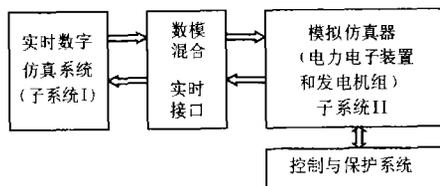


图 1 数模混合实时仿真系统结构图

Fig 1 Real-time simulation of digital-analog circuit

数模混合实时仿真接口技术是基于替代定理的,替代定理的内容是:如果将一条支路或电路的某一部分以单端口网络的形式从电路中取出,且同时已知其端口电流,则被取出的部分可以用相应的电流源来替代而并不改变电路其余部分的状态;如果将一条支路或电路的某一部分以单端口网络的形式从电路中取出,且同时已知其端口电压,则被取出的

部分可以用相应的电压源来替代而并不改变电路其余部分的状态。因此,仿真子系统的边界条件可以在仅已知端口电流或电压的情况下由动态刷新的电流源或电压源代替。实际上,节点电压在数字仿真中是直接存在的。在每一步长内,数字仿真计算出来的电压、电流值保持不变,直到下一步长才更新。

在模拟仿真器侧,根据替代定理,由实时数字仿真系统实现的部分用戴维南等值电路表示,如图 2(a)所示,包括电压放大器和串联的等值电阻 R_t 。不管数字部分有多复杂,在模拟部分中其等值电路都可用戴维南电路实现。电阻 R_t 的大小决定于数字部分的结构和仿真步长。用电压放大器实现的电压源电压为:

$$e(t) = V_{\text{node}} + I_b R_t$$

在实时数字仿真部分侧,根据替代定理,由模拟仿真器实现的部分用诺顿等值电路表示,如图 2(b)所示,包括等值电流源 I_n 和并联电阻 R_n 。

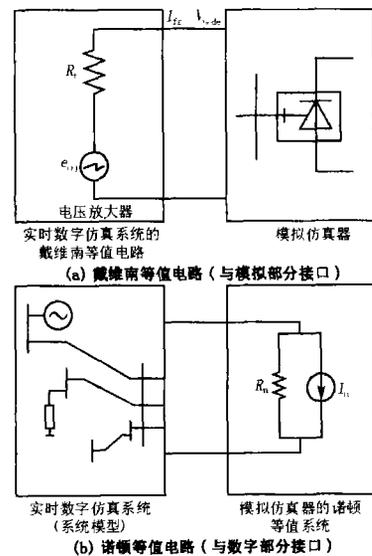


图 2 数模混合实时仿真系统接口电路

Fig 2 Interface circuit of digital analog simulation

在数字仿真部分中,用一条支路来表示,为纯数字形式,不需要实际物理的电流源和电阻元件。在每一步长中, I_n 通过电流测量环节和 A/D 转换输入到实时数字仿真系统中。这两种接口电路在实际应用中存在两个不足之处:对于含有发电机、传输线、变压器和开关等元件的较大规模交流网络,等值电阻 R_t 和 R_n 的计算比较困难。当网络结构变化时, R_t 和 R_n 要相应地改变。但在连续的仿真过程中,实际物理电阻元件 R_t 和 R_n 的灵活调整是不现实的。戴维南等值电压源在数字系统中并不是直

接存在的, $e(t)$ 的值要通过已知的节点电压和支路电流来确定。而节点电压在数字仿真中是直接存在的, 它可以由计算得出。在每一步长内, 数字仿真计算出来的电压、电流值会保持不变, 直到下一步长才更新。这一特点可使接口做如下简化: 戴维南等值电压源和串联电阻可由数值等于接口处节点电压的恒定电压源代替, 模拟仿真器部分不做改动, 实际物理电阻元件可以省略, 节点电压通过电压源直接输出, 这种简化不会降低准确度。类似地, 诺顿等值电流源 I_n 和并联电阻 R_n 也可用一个值等于接口处支路电流的恒定电流源代替, 不会影响数字部分侧, 而该支路上的并联电阻 R_n 可设置一个非常大的值, 如 1M 以上。数字仿真系统负责维持接口处节点上电压和电流的正确关系。数字仿真系统接受从模拟仿真器侧测量返回的接口处支路电流, 在节点方程求解中将其作为注入电流矢量的一部分:

$$GU = I \quad (2)$$

G 为纯电阻节点导纳矩阵; U 为 t 时刻未知节点电压; I 为注入电流矢量, 包括电流源前一刻的值和测量到的接口支路电流值。数字系统求解出 t 时刻节点电压, 通过 D/A 转换将接口处节点电压送给模拟仿真器。数字仿真部分工作时相当于一个数字控制的电压源, 交流网络部分作为其内部阻抗, 模拟仿真器则是它的负载。

目前, 国际上的实时数字仿真设备的核心软件均为 EMTP (ElectroMagnetic Transient Program), 或是以 EMTP 为基础改进形成的 EMTDC (ElectroMagnetic Transient in Direct Current Systems)。EMTP 在求解电力网络时首先通过梯形积分法将电力网络转换为一个由电阻与电流源组成的等值计算网络, 然后利用节点法通过公式 $U = Y^{-1} I$ 计算得到网络节点电压。其中, Y 为网络节点导纳矩阵; I 为节点注入电流源向量; U 为节点电压向量。所以说, 数字仿真子系统的边界条件宜用电流源形式, 而物理仿真子系统的边界条件则宜用电压源形式^[6,7]。

1.2.2 数字与模拟混合实时仿真接口实现

模拟仿真器为能量系统, 而数字仿真系统为信号系统, 两者需经过接口相连。

HVDC 和 FACTS 等电力电子原型模拟仿真器的功率较小, 电压放大器就可供给和吸收其能量。含有电力电子原型模拟仿真器的数模混合实时接口的硬件实现如图 3 所示。混合接口时, 数字系统侧接口处节点电压由数字仿真系统计算得到后经 D/A 转换送出, 通过电压源功率放大器送入 HVDC 和

FACTS 原型模拟仿真器, 同时模拟仿真器侧接口处支路电流经电流互感器测量后作为反馈模拟量经 A/D 转换后注入数字仿真系统, 形成闭环交互。因此, 与数字系统侧连接的接口为信号接口。

动模机组的功率较大, 必须采用能实现四象限功率交换的背靠背变流器才能实现与数字部分的接口。背靠背变流器基本结构包括整流器逆变器与耦合直流电容, 整流与逆变器均采用可控电力电子器件, 从而实现完全控制输出电压并实现四象限的功率交换。所以说, 与模拟系统侧连接的接口为功率接口。需要指出的是, 此类大功率的背靠背变流器实现并不容易, 目前同时连接多台动模机组还存在较大的技术难度。

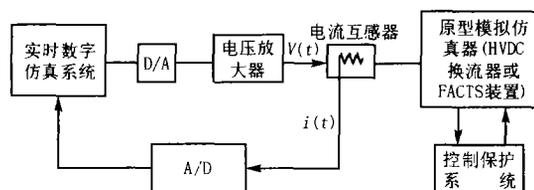


图 3 数模混合实时接口的硬件实现示意图

Fig 3 Hardware realization of digital-analog realtime interphase

1.2.3 数字与模拟混合实时仿真的特点

由上可知, 可以根据具体情况对数字与模拟混合实时仿真的结构进行灵活调整, 内在过程尚不清楚、难以或不能用数学方式描述的子系统或元器件可以用实物或物理模型代替, 这使得对电力系统的研究范围有了很大提高。数模混合式实时仿真系统的另一优点就是其数值稳定性较全数字仿真好^[2]。但由于其部分结构仍是基于相似理论的物理模型, 数模联合式实时仿真装置或多或少也具有上述物理模型的缺点, 即设备昂贵、占地面积较大、可模拟的电力系统规模受制于装置自身的规模和元件的物理特性, 装置的可扩展性和兼容性较差, 物理部分的接线、改线比较麻烦。

1.3 数字实时仿真系统

1.3.1 数字实时仿真系统现状

在 20 世纪 90 年代初, 随着商业化高速数字信号处理器 (DSP) 的问世, 加拿大 Manitoba 直流研究中心 RTDS 公司率先推出了国际上第 1 台电力系统全数字实时仿真系统 (RTDS)。继 RTDS 公司后法国电力公司 (EDF)、加拿大魁北克水电研究所的 TEQSM 公司等也相继进行了全数字实时仿真系统的开发和研制工作。所有的全数字实时仿真系统, 无论其采用什么样的硬件平台, 其共同特点都是基

于多 CPU 并行处理技术,由系统仿真时下载到该 CPU 的软件来决定该 CPU 模拟什么电力系统元件,因此,在时间步长和 I/O 设备的频宽满足要求的情况下,系统的一次元件模型只取决于软件而与硬件无关。这个显著的特点为用户对未来新元件的仿真提供了充分的发展空间。

就数字实时仿真设备而言,目前国际上主要产品:加拿大 Manitoba 直流研究中心 RTDS 公司的 RTDS,法国电力公司(EDF)的 ARENE,加拿大魁北克 TEQSM 公司的 HYPERSM。

RTDS 是国际上最早研制出的全数字实时仿真装置,其技术主要依托于加拿大 Manitoba 直流研究中心。RTDS 的并行处理器采用 NEC 公司的高速信号处理器和 AD 公司的 SHARCAD21062 高速信号处理器,处理器主板及软件均自行开发。这样做的好处是可以充分利用 DSP 的硬件资源,但在计算机芯片技术飞速发展的今天,这种开发模式不利于硬件的升级换代。RTDS 的软件核心是 EMDC,图形界面是 PSCAD。

HYPERSM 系统的技术依托于魁北克水电研究所(REQ)。REQ 建立了目前世界上最大的数模混合式实时仿真系统。TEQSM 公司在其数模混合式实时仿真技术的基础上,为了适应电力系统实时仿真技术发展的潮流,也于近期开发出了全数字电力系统实时仿真系统(HYPERSM)。HYPERSM 硬件采用基于共享存储器的多 CPU 超级并行处理计算机如 SG2000 或多 CPU 的并行计算用的 Alpha 工作站。主要用于电力系统电磁暂态仿真,仿真的规模可以相当大,也可以用于装置试验。其中基于 SGB200 服务器的 HYPERSM 也可用于直流系统动态特性仿真。HYPERSM 的软件核心是 EMTP 程序。

ARENE 系统 ARENE 是法国电力公司(EDF)研究开发的全数字实时仿真系统。该系统的硬件平台为 HP 公司生产的基于多处理器的 HP-CONVEX 并行处理计算机。到目前为止,该并行处理计算机的最大 CPU 数量已达到 64 个。ARENE 系统的硬件全部采用市场上能买到的标准组件(如 HP 的并行处理计算机、I/O 接口板等),EDF 只研究用于实时仿真电力系统的算法及相关软件。同时,该实时仿真系统还提供了基于 C 语言的用户自定义功能,使用该功能,用户可以自己定义新的元件模型。ARENE 的软件核心也是 EMTP 程序。

以上这些实时仿真设备的主要问题是:价格昂

贵,投资和维护费用都较高,且随着所模拟系统规模的增长,用户还需增加运算单元,投资随之增加;仿真规模大时数值不稳定问题也成为限制其使用的瓶颈问题;基于处理器的并行技术,无法充分利用微处理芯片的最新成果,升级扩展的难度较大。为了节约硬件设备开销,电科院、日本三菱电机公司、加拿大哥伦比亚大学等单位正在采用商用微机(PC)作为硬件平台来开发研制电力系统全数字实时仿真系统(DDRTS—digital dynamic real time simulator)。该系统由多台高档微机通过高速网络连接实现并行处理的集群计算机,其优点是价格便宜,可扩展性好,但技术相对复杂。

1.3.2 数字实时仿真系统的特点

实时数字仿真系统的出现是计算机技术、并行计算技术、数字信号处理技术和现代控制技术发展的产物。在目前各种实时数字仿真系统中,大都采用并行处理的硬件结构和高速数字信号处理器 DSP 芯片,利用数学上可分割子系统的概念在各个运算芯片组间分担计算任务。由于有实物参与,因此要求仿真系统是实时的,实时仿真软件必须在一个实际步长内完成所有状态变量和非状态变量的求解计算,还要完成和实物相联系的数据转换、通信、数据存取、信号功率放大等过程^[7]。

其优点是:数字建模经济、快捷、参数调整方便,随着所研究的电力系统规模的增大,只需增加各并行处理模块即可保持原有步长,这无疑大大增加了其使用的灵活性。缺点是:在全数字电力系统实时仿真系统中,由于各并行处理器间的通信、数据交换及模型算法等各方面因素的影响,数值不稳定问题成了限制仿真规模的重要问题。而且,在某些场合下(如:要针对电力电子电路高精度触发的要求)现水平的数字仿真器无法满足要求,可行的解决方案还是构成数模混合仿真系统,即把数字仿真器完成不了的任务交由模拟仿真器来完成。

2 我国电力系统实时仿真的应用与发展

我国电力系统实时仿真的发展历程基本跟踪了国际上电力系统实时仿真发展不同阶段的最新技术,基本情况如下:从 20 世纪 50、60 年代开始有电力系统动态模拟实验室到 80 年代初,电科院和武汉高压研究所从美国 PTI 公司分别引进了 TNA(Transient Network Analyzer)设备这段时期我国电力系统实时仿真基本是全物理仿真。80 年代中期,从原瑞士 BBC 公司(现 ABB)引进了早期的数模混合式高

压直流模拟仿真设备;1996年,为了对我国正在建设的三峡工程的输配电工程进行实时仿真研究,电科院从加拿大 TEQSM 公司引进了先进的数模混合式仿真系统;90年代中期,一些科研单位和高校开始引进 RTDS 装置。

目前,大部分高校企业及科研机构主要依靠动模试验和基于并行数字处理器(DSP)的实时仿真器(RTDS)对装置进行继电保护装置闭环测试以及 AV、RPSS、HVDC、SVC、STATCOM、CSC、UPFC 等 FACTS 控制装置的闭环测试^[8],RTDS 与其他离线仿真技术相结合还可进行大规模电力系统动态行为模拟和分析,这二者都有局限性,前面已有分析。随着微处理器技术的迅速发展,微机的计算能力不断提高,价格也不断下降,为基于微机的电力系统实时数字仿真(DDRTS)的开发提供了广阔的发展空间。基于微机的电力系统实时数字仿真系统成本低,升级容易,且有良好的扩展性和兼容性。国内一些高校和科研机构正致力于这方面的研究,并取得了很大成果^[9,10]。

3 关于电力系统实时仿真算法及其性能分析

算法选择是实时仿真首先碰到的问题,选择合适的仿真算法可以使实时仿真以足够的精度顺利完成试验任务。在实时仿真中,要求采用尽量大的步长,但这是以保证要求的计算精度和使系统稳定为前提的。而实时仿真除了必须是稳定的和具有一定的精度外,还有自身的特殊要求。在步长要求一定时,为了提高仿真精度,可以采用各种补偿以减少误差。如:在实时仿真中,由于 D/A 转换器的引入,会使输出产生延迟,为了提高仿真精度,有必要对它进行补偿。又因为在实时仿真中,仿真时间应严格与实际系统运行时间相等,故对实时计算方法提出了特殊的要求:

1)要求差分方程是可计算的。

2)在一个步长内把所有差分方程都计算一遍(计算的快速性)。根据要求 1),如果某环节的输入来自实物,该环节差分方程的右端不能需要 $(K+1)T$ 时刻的输入值,即计算一开始必须得到该环节的输入,可见区分实时算法与非实时算法就是看差分方程的右端是否含有 $(K+1)T$ 时刻的输入值。

3)由于实时仿真动态输入输出的需要,一般都进行定步长的仿真计算,仿真计算应该做到每一个仿真步距内的计算比较平均,尽量减少在控制方面

的时间消耗。

4)能够采用大步长。这是因为在进行实时仿真时,要求在一个固定的时间间隔内给出下一采样时刻的实时输出,只有采用尽可能大的步长进行计算,才能在给定的时间间隔内对要求解的方程都计算一遍。

前面已介绍的实时数字仿真设备的核心软件均为 EMTP,它所采用的一个重要算法是梯形积分法。

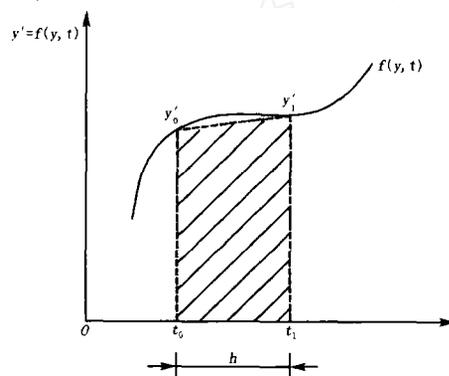


图 4 隐式梯形积分法示意图

Fig 4 Schematic diagram of implicit cascade integration method

对于方程 $\frac{dy}{dt} = f(y, t)$, 若在 $[t_n, t_{n+1}]$ 区段近似认为 $y = f(y, t)$ 为直线(参见图 4)并以直线下的梯形面积 $\frac{h}{2}(y_n + y_{n+1})$ 近似于 $\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(y, t) dt$ 的真值,则相应的通用计算公式为:

$$y_{n+1} + \frac{h}{2}(y_n + y_{n+1}) = y_n + \frac{h}{2}[f(y_n, t_n) + f(y_{n+1}, t_{n+1})] \quad (1)$$

这种数值积分方法就称为梯形积分法。显然,这种方法属单步、隐式解法, y_{n+1} 要通过方程(1)才能得到。这是一个 y 的非线性差分方程,它与一般代数方程的区别在于参数随着时间变化而变化,步长 h 也可能变化。

3.1 梯形积分法的精度

将式(1)中 $f(y_{n+1}, t_{n+1})$ 在 y 点作泰勒展开,则

$$y_{n+1} = f(y_{n+1}, t_{n+1}) = f(y_n, t_n) + h \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{t_n} y_n + \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{t_n} \right) + O(h^2) \quad (2)$$

而由于

$$y_n = \frac{d}{dt} f(y, t) \Big|_{t_n} = \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{t_n} y_n + \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{t_n} \quad (3)$$

将式(3)带入式(2),再将式(2)带入式(1),整理可得:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [2y_n + hy_n + O(h^2)] = y_n + hy_n + \frac{h^2}{2} y_n + O(h^3) \quad (4)$$

与泰勒级数展开式相比可知,隐式梯形法具有二阶精度,三阶截断误差。

3.2 梯形积分法的数值稳定性

对于典型微分方程 $\frac{dy}{dt} = y$, 由于取

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(y_n, t_n) + f(y_{n+1}, t_{n+1})] = y_n + \frac{h}{2} (y_n + y_{n+1}) \quad (5)$$

整理得:

$$y_{n+1} = \frac{2+h}{2-h} y_n \quad (6)$$

因此,梯形积分法的数值稳定条件为:

$$\left| \frac{2+h}{2-h} \right| < 1 \quad (7)$$

相应的数值稳定域为 (h) 平面上整个半平面, 即和 $(-2, 0)$ 点和 $(+2, 0)$ 点之距离的比值小于 1 的集合, 见图 (5) 的阴影部分。具有这种数值稳定域的积分方法又称是 A 稳定的^[11]。这类积分方法在数值稳定性方面对计算步长无任何限制。

从大量的参考文献中可看出, 实时数字仿真所采用的方法是多种多样的, AB1 (Euler) 法、AB2 法、AB3 法、AB4 法、由 AM2 法改进得到的预测-校正 RTAM2 公式、RTAM3 公式、RTAM4 公式以及 RK 算法改进得到的 RKRT3 公式等^[12]。电力系统实时仿真中, 之所以一般选用梯形积分算法或同类算法是因为该算法本身具有优良的特性。首先, 它是 A 稳定的, 稳定区域为无限, 这是选择较大步长所需要的。另外, A 稳定的隐式线性多步公式的阶不得超

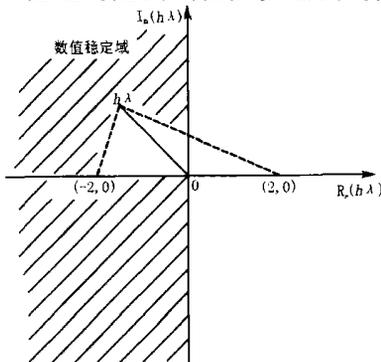


图 5 梯形积分法的数值稳定域

Fig 5 Digital stability margin of cascade integration method

过 2, 而且在所有 A 稳定的二阶算法中, 梯形法具有最小的局部截断误差 $1/12^{[13]}$ 。同时, 隐式梯形法的缺点也不容忽视。当用于联立求解时, 差分方程和网络代数方程联立形成维数很大的非线性方程组。当采用牛顿法求解时, 雅可比矩阵是一个稀疏可变的矩阵, 因此计算量很大。可采取一种折衷办法, 在连续几次迭代中使用同一个雅可比矩阵的三角分解因子, 也可采用网络拓扑关系的局部跟踪与修正, 以节省重新结点排序和形成因子表的计算量。对于发电机组轴系机械运动和电气系统动态过程相关联的数字仿真, 由于两组差分方程的关联变量变化慢, 采用预测-迭代方法可以减少计算量, 以上所述都是属于古典数值积分法, 它们在电力系统实时数字仿真中已有很好的应用。近些年来, 有学者提出一种值得注意的数值计算方法——现代数值仿真算法。其中主要是离散相似法, 它的主要思想是模仿数据采样系统把连续信号转化为离散信号的原理, 利用 Z 变换方法构造各种动态环节 (如积分、惯性等环节) 的离散相似模型。也就是说, 这种方法也可以得到各种动态环节的差分方程。同古典数值积分法相比, 主要特点为: 对不同动态环节 (如积分环节、惯性环节等) 构造不同形式的差分方程。而且可通过对某环节传递函数进行相位移和幅值的调整, 以便控制精度和数值稳定性, 这是古典数值积分法所不能做到的^[14-17]。现代数值仿真算法在电力系统实时仿真中的广泛应用仍是广大科技工作者正在努力实现的工作之一。

3.3 实时仿真算法、步长的一般选取原则

一般来说, 对于同样的步长, 阶数较高的方法误差较小, 因此为了减少每一步的截断误差, 可以提高方法的阶数; 但在另一方面, 对于一些精度要求比较低的问题, 为了减少计算量, 应选用阶数较低的方法。因此, 在实际计算过程中, 为了满足精度要求, 应该首先考虑步长, 只有当达到最小步长但还没有满足精度要求时, 才考虑提高算法的阶数; 并且在用某个阶数的算法减小连续几步步长的计算中均满足精度要求时, 还要考虑降低算法的阶数。

最后需要指出的是, 因为各种数值积分法各有所长, 没有一种方法能适应各种不同的要求, 所以如何选择仿真算法是一个十分复杂的问题, 至今尚无一种确定的原则。

4 结语

综上所述, 可以看出: 所谓全数字实时仿真系统

并非一点物理部分没有,在做实时仿真时至少待测试物理装置或模拟仿真器是属于物理部分的。数字仿真、物理仿真以及数模混合式仿真三者区别在于物理部分多一点还是少一点。物理部分所占比例往往取决于全数字仿真系统能否解决或能在多大程度上解决实际问题,同时还顾及到综合比较后的经济效益问题,所以数字实时仿真和数模实时混合式仿真一样存在数模之间的接口问题。在这个意义上说,三种实时仿真方法有一定的统一性(物理仿真可以看成是数模混合式仿真的特殊情况)。

鉴于这种现状,作者认为电力系统实时仿真急需解决的问题应包括:

1)电力系统实时仿真可信度(Credibility)的研究^[18,19]。再精确的模型其仿真结果与现实系统总有误差,关键是如何将误差控制在可以容忍的范围内。这主要包括仿真模型的精确度的研究,模型参数的精确确定等。

2)大功率、高速、高精度的数模接口元件的进一步研制,如:D/A、A/D转换器,I/O设备,功率放大器^[20]。

3)除了完善现阶段提出的经典数值积分方法外,还应研究一些新算法,如:现代数值仿真算法,主要是离散近似法、可调整数值积分法、增广矩阵法、采样控制系统仿真法和面向结构图仿真法等。

4)电力系统实时仿真的数字稳定性研究。

参考文献:

- [1] 陈楷,彭哲,杜刚,等.数字仿真技术在电力系统中的应用及常用的几种数字仿真工具[J].继电器,2004,32(21):71-75.
CHENG Kai, PENG Zhe, DU Gang, et al Application of Digital Simulation Techniques and Several Simulation Tools in Power System[J]. Relay, 2004, 32(21): 71-75.
- [2] 潘学萍.电力系统数字仿真研究综述[J].江苏电机工程,2005,24(1):80-84.
PAN Xue-ping Research Summary on Power System Digital Simulation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(1): 80-84.
- [3] 汤涌.电力系统数字仿真技术的现状与发展[J].电力系统自动化,2002,26(17):66-70.
TANG Yong Present Situation and Development of Power System Simulation Technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [4] B A, A B. 电力系统的物理模拟[M].杨昌琪,译.北京:中国工业出版社,1962
B A, A B. The Physical Simulation of Power System[M]. YANG Chang-qi, Trans Beijing: China Industry Press, 1962
- [5] 郑三立,雷宪章,韩英铎,等.电力系计算机及实时数字仿真(下)[J].电力系统自动化,2001,25(4):40-44.
ZHENG San-li, LEI Xian-zhang, HAN Yin-duo Computer and Real-time Digital Simulation of Power Systems Part Two Real-Time Digital Simulation of Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 40-44.
- [6] 钱鑫,李琥,施围,等.电力系统仿真计算机软件介绍[J].继电器,2001,30(1):43-46.
QIAN Xin, LI Hu, SHI Wei, et al Simulation Software of Power System[J]. Relay, 2001, 30(1): 43-46
- [7] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[J].李永庄,林集明,等译.北京:水利电力出版社,1991.
Dommel H W. Power System Electromagnetic Transient Compute Theory[J]. LI Yong-zhuang, LN Jiming, et al Trans Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1991.
- [8] 陈礼义,顾强.电力系统数字仿真及其发展[J].电力系统自动化,1999,23(23):1-6.
CHENG Li-yi, GU Qiang Power System Digital Simulation and Its Development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 1-6
- [9] 柳勇军,梁旭,闵勇.电力系统实时数字仿真技术[J].中国电力,2004,37(4):39-42.
LIU Yong-jun, LIANG Xu, MING Yong Power System Real-Time Digital Simulation Technologies[J]. Electric Power, 2004, 37(4): 39-42
- [10] 郑三立,梁旭,孙刚,等.基于微机的电力系统数字动态实时仿真装置[J].电力系统自动化,2004,28(1):92-98.
ZHENG San-li, LIANG Xu, SUN Gang Power System Real-time Digital Simulation Device Based on PC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 92-98
- [11] 郑三立,胡明亮,洪军,等.电力系统数字动态实时仿真系统的研制和应用[J].现代电力,2003,20(6):27-31.
ZHENG San-li, HU Ming-liang, HONG Jun, et al Development and Application of Digital Dynamic Real Time Simulator in Power Systems[J]. Modern Electric Power, 2003, 20(6): 27-31.
- [12] Kosterv D N, Tybr C W. Model Validation for the August 10, 1996, WSCC System Outage[J]. IEE Trans on Power Systems, 14(6).
- [13] 廖瑛,梁加红,等.实时仿真实理论与支撑技术[M].长沙:国防科技大学出版社,2002
LIAO Ying, LIANG Jia-hong, et al Real Time Simulation

- Theory and Supporting Technologies [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2002.
- [14] 刘瑞叶,等. 计算机仿真技术 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
LU Rui-ye, et al Computer Simulation Technologies [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [15] 黄家裕,陈礼义,孙德昌. 电力系统数字仿真 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.
HUANG Jia-yu, CHEN Li-yi, SUN De-chang Digital Simulation of Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [16] 熊光楞,肖田元,张燕云. 连续系统仿真与离散事件系统仿真 [J]. 北京:清华大学出版社, 1991.
XDNG Guang-leng, XIAO Tian-yuan, ZHANG Yan-yun Concatenation System Simulation and Discrete Events System Simulation [J]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- [17] Koen G A, Waite J V. 连续系统数字仿真 [M]. 北京:科学出版社, 1981.
Koen G A, Waite J V. Concatenation System Simulation [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [18] Smith J M. Mathematical Modeling & Digital Simulation for Engineers & Scientists [M]. Wiley & Sons Inc, 1977.
- [19] 倪以信. 动态电力系统理论与分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
NI Yi-xin Dynamic Power System Theory and Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [20] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究 [J]. 电网技术, 2000, 24(12): 1-4.
HE Ren-mu Research into Veracity of Power System Dynamic Simulation [J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 1-4.
- [21] 高源,陈允平,刘会金. 电力系统物理与数字联合实时仿真 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 77-80.
GAO Yuan, CHEN Yong-ping, LU Hui-jin Joint Physical-digital Real-time Simulation of Power System [J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 77-80.

收稿日期: 2006-05-24; 修回日期: 2006-07-11

作者简介:

罗建民 (1977 -),男,研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制;

戚光宇 (1967 -),男,工程师,从事全方位的电气管理工作;

何正文 (1981 -),男,研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: hzw1981@163.com

Research on power system real-time simulation

LUO Jian-min¹, QI Guang-yu², HE Zheng-wen¹, XIANG Yang³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Pingdong Thermal Power Generation Co., Pindingshan 467000, China; 3. Foshan Power Supply Bureau, Foshan 528000, China)

Abstract: Real-time simulation has proved to be an effective tool for research, test, plan, operation and security situation assess of power systems. Real-time simulation of power systems technology development experienced physical simulation, digital physical mixed simulation and digital simulation throughout the three stages. This paper introduces the general definition, development and present situation of power system real-time simulation and highlights the real-time characteristics of this technology. Meanwhile, it illustrates the theory basis, the algorithms involved and implement methods of real-time simulation technology, compares and summaries three simulation technologies to the power system real-time simulation. Because they have their own advantages and disadvantages, they need to be employed selectively in practical application. Digital physical mixed simulation technology in the simulation applications has more advantages and is emphasized. Finally, the scheme of solving the problem of power system real-time simulation technology is put forward.

Key words: power system; digital simulation; real-time simulation; hybrid real-time simulation

(上接第 41 页 continued from page 41)

Abstract: The slope of frequency is a very important closedown element to the protection of low frequency shedding. The traditional method of realizing the element is to calculate the average value of the variation of the frequency during some time. But it lowers the natural delay of the protection. This paper aims at solving this shortcoming. Based on the plot of C167, it explains the theory that C167 is employed to measure the frequency, then gives a method that traces the frequency of the signal in the capture interrupt of the capture & compare unit (CCU) which belongs to C167. The method makes the slope of frequency keep synchronized with the criterion of low frequency, and reduces the natural delay of protection.

Key words: slope of frequency; C167; CCU; interrupt of CCU; natural delay