

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

王卉¹, 陈楷¹, 彭哲², 杜刚³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 河北省电力勘测设计研究院, 河北 石家庄 050000;
3. 开封市电业局, 河南 开封 475003)

摘要: 介绍了电力系统数字仿真技术的分类、特点及其在电力系统中的应用, 并介绍了几种当前较为流行的数字仿真工具及其特点, 最后对电力系统数字仿真技术的发展进行了展望。

关键词: 电力系统; 数字仿真; 数字仿真工具

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)21-0071-05

0 引言

电力系统数字仿真是用数学模型代替实际电力系统, 在计算机上用数值方法对系统的运行特性进行试验和研究的过程。由于与传统的动态仿真比较, 数字仿真具有不受原型系统规模和结构复杂性的限制, 能保证被研究对象和实验系统的安全性, 具有很好的经济性, 有效性和方便性, 可预测设计中未来系统性能等优点, 数字仿真已逐渐取代动态仿真, 在电力行业中起到举足轻重的作用。而各种电力系统仿真软件也已成为电力科研工作者进行系统规划、设计、确定运行方式, 进行事故分析, 开发保护和自动装置等工作的重要工具。下面, 本文将介绍数字仿真在电力系统中的应用, 并对当今流行的几种电力系统数字仿真工具作简要的介绍。

1 我国电力系统仿真技术的发展

我国采用系统数字仿真的方法来研究和分析电力系统正常运行状态和受扰动后的动态过程, 很早就开始了。20世纪60年代初, 国内许多电力科研机构 and 高等院校先后开发了多种电力系统潮流、暂态稳定和短路电流计算程序, 后来发展成为各种专用计算程序和综合稳定程序。与此同时引进了国外多版本的电力系统电磁暂态程序(EMTP)和许多专用数字仿真程序。这些研究仿真软件可以研究电磁暂态、电磁谐振、机电振荡、发电机组轴系扭振以及由于断路器切换或雷电流冲击等引起的暂态过程。后来EMTP又增加了潮流计算、超高压直流输电的换流器、控制系统及其分析等内容^[1]。

1996年, 为了对我国正在建设的三峡工程的输电工程进行实时仿真研究, 电科院从加拿大

TEQSIM公司引进了先进的数模混合式仿真系统; 90年代中期, 为了跟踪国际上电力系统实时仿真技术发展的潮流和500kV系统继电保护现场调试及例行检验的需要, 少数电力企业和电科院、国家电力公司电力自动化研究院以及一些高校引进了少量的RTDS装置; 目前, 电科院正致力于开发全数字实时仿真系统。

2 电力系统数字仿真的应用

电力系统数字仿真发展十分迅速, 应用日益广泛, 主要包括用于培训的电力系统仿真器和用于研究的电力系统数字仿真两个方面^[2]。

目前用于电力系统培训的仿真器有电力系统调度培训仿真器、发电厂单元机组培训仿真器和变电站培训仿真器等。培训用仿真器和研究用仿真器有很大区别。研究用仿真器要求精确的算法和完善的数学模型, 对仿真环境不要求逼真。相对而言, 培训仿真器对于动态过程的计算精度和数学模型要求不高, 因而这方面的费用可以节省。但是也有一些电力系统调度培训仿真器要求具有研究仿真器的功能, 这种仿真器的价格较高。

研究仿真工具包括各种电力系统电磁暂态和暂态稳定仿真软件, 如电磁暂态软件(EMTP)和国内电力部门普遍采用的综合稳定程序。研究仿真又可分为非实时仿真和试验用的实时仿真。

2.1 非实时数字仿真

电力系统非实时仿真即离线仿真是在数字计算机上为电力系统的物理过程建立数学模型, 用数学方法求解, 以进行仿真研究的过程, 其仿真速度与实际系统的动态过程不等。非实时的研究仿真软件种类很多, 主要有电磁暂态过程仿真、机电暂态过程仿

真和中长期动态过程仿真 3 种^[2]。

1) 电磁暂态过程数字仿真

电磁暂态过程数字仿真是用数值计算方法,采用瞬时值方式计算,对电力系统中从数微秒至数秒之间的电磁暂态过程进行仿真模拟。电磁暂态仿真,可以精确地模拟含有 HVDC 和 FACTS 装置的复杂系统的各种元件,如晶闸管、GTO 甚至 IGBT。电磁暂态过程仿真必须考虑输电线路分布参数特性和参数的频率特性、发电机的电磁和机电暂态过程以及一系列元件(避雷器、变压器、电抗器等)的非线性特性。因此,电磁暂态仿真必须建立这些元件和系统的代数或微分、偏微分方程。一般采用的数值积分方法为隐式积分法。由于电磁暂态模式是建立在解微分方程的基础上,它的求解速度较慢,所能够描述的系统也相对较小,所以,这种模式一般不适用于大型电力系统的研究。一般进行电磁暂态仿真时,都要对电力系统进行等值化简。

2) 机电暂态过程数字仿真

机电暂态过程数字仿真采用有效值方式进行计算。机电暂态仿真主要研究电力系统受到大扰动后的暂态稳定和受到小扰动后的静态稳定性能。其中暂态稳定分析是研究电力系统受到诸如短路故障、切除线路、发电机、负荷、发电机失去励磁或者冲击性负荷等大扰动作用下,电力系统的动态行为和保持同步稳定运行的能力。机电暂态计算中电网络用基于复阻抗的代数方程描述。因此,机电暂态模式下系统是一个纯基波模型。同时,在这一模式下,发电机和其他电机既可以用完整的也可以用降阶的微分方程来表示。由于引入了对称分量法(正序、负序及零序系统),机电暂态模式也可以计算系统的不对称故障。这种模式采用代数方程描述系统,对所描述系统的大小一般没有限制。因此,在实际工程中常用于大型电力系统的稳定研究。但是,由于这些程序采用纯基波模型,在使用上也有一定的局限性,特别是它无法处理电力系统非线性特性等。

3) 中长期动态过程仿真^[2]

电力系统中长期动态过程仿真是电力系统受到扰动后较长过程的动态仿真,要计入在一般暂态稳定过程仿真中不考虑的电力系统长过程和慢速的动态特性,包括发电厂热力系统和水力系统以及核反应系统的动态响应,以及继电保护系统、自动控制系统的动态行为等。长过程动态稳定计算的时间范围可从几十秒到几十分钟,甚至数小时。主要用来分析电力系统较长时间的动态特性。与电力系统暂态

稳定计算一样,电力系统长过程稳定计算也是联立求解描述系统动态特性的微分方程组和描述系统网络特性的代数方程组,以获得电力系统长过程动态稳定的时域解。但是,电力系统长过程动态的响应时间常数从几十毫秒到 100 s 以上,是典型的刚性系统,需要采用隐式积分算法。为避免计算时间过长,还必须采用自动变步长计算技术。

2.2 实时数字仿真

电力系统实时仿真目前主要用于继电保护装置和发电机励磁调节系统的实验,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和与实物相联系的参数转换、功率放大与连接。因此多数实时仿真系统采用并行计算机和并行算法,把计算任务分摊到各并行计算机上进行并行计算和信息交换。

电力系统实时仿真系统经历了动态模拟仿真系统、数模混合式实时仿真系统,现已开发出全数字式实时仿真系统。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 RIDS 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(RIDS)。继 RIDS 公司后,法国电力公司(EDF)、加拿大魁北克水电研究所的 TEQSIM 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^[3]。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。

3 几种常用的数字仿真工具

3.1 电磁暂态仿真程序 EMTP

电力系统数字仿真最先应用于电力系统暂态过程的研究。电力系统电磁暂态计算程序(ETMP)就是一种功能很强,适用性很广的研究用数字仿真程序。它可用于研究电磁暂态、电磁谐振、机电振荡、机组轴系扭振和由断路器切换、雷电冲击引起的暂态过程。它最初由加拿大大不列颠哥伦比亚大学(UBC)的 H. W. Dommel 教授创立,又经过很多专家的努力而日臻完善。中国电力科学研究院对该程序进行进一步的研究开发和改进,形成了 EMTPE

(Electromagnetic Transient & Power Electronics) 软件包,即电力系统电磁暂态及电力电子数字仿真软件包。

EMTP 和其他一些电磁暂态程序中大多采用隐式梯形积分法^[4],在暂态过程中,对于长线等分布参数元件,其电压和电流之间的关系由偏微分方程描述。线路两端电压、电流之间的关系,可以由偏微分方程的解析解转换成用纯电阻和电流源构成的暂态等值计算电路。依次对各个步长进行递推计算,便可求得整个暂态过程的数值解。

3.2 PSS/E 软件

PSS/E (Power System Simulator for Engineering) 是由美国电力技术公司 (Power Technologies, Inc.) 自 20 世纪 70 年代推向市场后,经不断修改、完善的电力系统仿真软件。它以潮流计算为核心,将稳定、短路电流分析等功能集成在一个软件包内^[5]。

在潮流计算方法上,PSS/E 提供了 5 种方法,即:完全的 Newton-Raphson 法、解耦的 Newton-Raphson 法、快速的 Newton-Raphson 和 Gauss-Seidel 法及改进的 Gauss-Seidel 法。各种方法在计算中可以相互切换,即对初值要求较高的情况,可以在放开发电机无功功率限制的前提下选一种计算方法求得一个收敛值,然后将此收敛值作为初值,再加上发电机无功功率限制选另一种计算方法进行潮流计算。

PSS/E 提供了一种类似 Fortran 的二次开发语言 IPLAN,可以进行后续开发工作。可以认为 IPLAN 为用户提供了对 PSS/E 进行二次开发的一个平台,在 PSS/E 应用程序子目录中就包含由 PSS/E 用户开发且免费提供的用 IPLAN 编制的应用程序。

3.3 NETOMAC 软件

NETOMAC (network torsion machine control) 是德国西门子公司研制的电力系统仿真软件,自 20 世纪 70 年代初开始,经过近 30 年的开发、使用和发展,NETOMAC 程序不断完善,其功能日益强大。

NETOMAC 是一个功能强大的电力系统仿真软件包^[6],其特点是:

1) 元件模型全。它可详细模拟电力系统几乎所有的元件,包括避雷器、晶闸管等非线性元件,高压直流输电 (HVDC) 以及静止无功补偿器 (SVC) 等 FACTS 装置。

2) 仿真频带宽。它既可模拟 10^{-2} Hz 频率的汽轮发电机调节过程,也可以模拟 10^6 Hz 的雷电波过程,能进行电磁暂态、机电暂态、稳态等各种电力系统过程的仿真计算。

3) 功能多且强。它可进行潮流、短路、稳定、动

态等值、电动机启动分析、参数辨识、机组轴系扭振、优化潮流等各种计算。

NETOMAC 包括类似于 EMTP 和 EMDC 程序的电磁暂态模式和类似于 PSASP 和 BPA 程序的机电暂态模式。在整个仿真计算中,可分时段采用不同的数学模型。例如:在 $[0, t_1]$ 时间段内采用电磁暂态的模型,而在 $[t_1, T]$ 时间段内采用机电暂态模型。还可以将网络分为若干块,各块分别采用电磁暂态或机电暂态模型并行计算,积分步长也可以不同。把这两种模式集成在同一界面下是 NETOMAC 仿真软件包的一个特点。

NETOMAC 是一种面向对象的仿真语言,它具有 80 种模块,其中有积分惯性等基本环节,也有较大的组合模块。例如汽轮机调节中的功率跃变接力器和功率调节开关等专用模块;逻辑连接模块和条件及非条件转移;加、减、乘、除、乘方、对数、三角函数等数学模块,锁相环、死区、采样保持模块;还有快速傅立叶变换 (FFT),自相关或互相关函数计算的数字信号处理模块。它具有良好的开放性,通过模块化仿真语言 (BOSL——block oriented simulation language),可嵌入用户自行编制的 FORTRAN 语言数学表达式、逻辑表达式、子程序。

3.4 电力系统实时数字仿真工具 RTDS

RTDS (Real-Time Digital Simulator) 是由加拿大马尼托巴高压直流中心研制的实时全数字化暂态模拟装置,主要功能是对电力系统电磁暂态过程进行实时仿真^[7]。RTDS 模拟电磁暂态过程的原理与算法和 EMTP 扩充了直流功能的 EMDC 相同,也就是 EMDC 的实时化,是一套用来完成对电力系统电磁暂态过程进行全数字模拟的计算机装置。他的硬件的基本单元称为 Rack,一套 RTDS 装置可以包括几个或几十个 Rack,Rack 的数量决定仿真系统的规模。

RTDS 采用计算机进行数字仿真,因而具备一切数字仿真的特点,如高精度、快速响应时间、修改参数方便、建立模型简单、模拟事故不会引起设备损坏等优点。除此之外,图形操作界面不仅可以直观方便地建立模拟系统并分配给 RTDS 进行实时计算,也可作为 EMDC 等软件的用户界面。RTDS 主要有以下几个方面的功能^[7]:

1) 大规模电力系统仿真

对各种复杂电力系统进行实时暂态分析和计算,可研究暂态过程中各种稳定性问题及交直流互联系统的相互影响。

2) HVDC 模拟

RTDS 可模拟 HVDC 的换流器、线路、电抗器及控制系统, AC 系统、线路、发电机等。还可与实际 HVDC 控制系统相连组成实时闭环系统。

3) TNA 功能

能实现一般的交流暂态网络分析仪(TNA)的功能,完成电力系统电磁暂态研究,可研究变压器饱和效应及其它非线性影响,自动重合闸。观察受干扰时,电网的震荡以及新型快速控制及开关设备的相互影响。

4) 可用于测试各种保护装置

RTDS 输出的模拟信号,通过功率放大器放大后,输送给实际的保护装置。继电器触点信号可送给 RTDS 中的同期合闸装置模型。因此可进行继电保护装置的实时闭环测试。

5) 用于开发和研究新型励磁调节装置及各种控制装置。

6) 用于科研及调度部门进行事故分析和仿真计算。

20 世纪 90 年代中期,为了跟踪国际上电力系统实时仿真技术发展的潮流和 500 kV 系统继电保护现场调试及例行检验的需要,少数电力企业和电科院、国家电力公司电力自动化研究院以及一些高校引进了少量的 RTDS 装置;目前,电科院正致力于开发全数字实时仿真系统。

4 电力系统数字仿真的展望

未来电力系统仿真将会以较快速度发展。我国电力系统发展面临大容量、远距离和大电网互联的问题。大功率电力电子技术以其快速、可控、大功率和灵活高效的优点将很快被引入输电系统。新型灵活交流输电(FACTS)的概念、原理及其设备的设计与应用使交流输电系统成为灵活、可控的系统,对系统的研究、规划、设计和运行产生深刻变化,FACTS 系统的设备和控制系统的数字仿真将成为热门课题。全国互联电网的形成是未来的发展趋势,大电力系统运行的动态特性,区间电能的交换与控制,系统的稳定与安全等课题的研究需要电力系统数字仿真密切配合和相应发展。

从电力系统数字仿真发展的技术准备来看,近几年来与系统仿真有密切关系的新技术发展很快,为电力系统数字仿真发展提供了有利条件。可以从下面几个方面浅谈一下。

1) 发展面向对象(object-oriented)技术^[1]。这

种技术对于改造现有电力系统数字仿真软件和设计新软件都是必要的。因为电力系统是一个复杂的大规模系统,建模所需的数据量十分庞大,结构很复杂。模型必须随应用功能的改变而变化。模型的规模、结构也将随着电力系统的发展而经常改变。由于对象系统结构与解题系统既有相互独立性(封装性)又相互联系,因此可保证软件系统不断扩展和维修。发展面向对象技术对电力系统仿真软件的开发具有重要意义,但仍有许多具体问题需要研究与探索。

2) 发展现代数字仿真算法。经过多年的应用与探索,因隐式梯形法有数值稳定性好,计算式简单,计算量少等优点,如今多数数字仿真软件采用隐式梯形法或同类的算法。近年来提出一种值得我们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,即把连续信号离散化,利用 Z 变换方法构造各种动态环节的离散相似模型。同古典数值积分方法相比,它可以对不同动态环节(如积分、惯性等环节)构造不同形式的差分方程,而且可以通过对某环节传递函数进行相位移和幅值的调整来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。此外,还包括可调整数值积分法、增广矩阵法、采样控制系统仿真法和面向结构图仿真法等。引入和发展这些新的算法可以减少计算量,提高精度和稳定性。

3) 采用更有效的硬件与软件技术开发功能更完善的试验用大规模实时仿真系统。目前的实时仿真装置(包括全数字和数模混合式)的仿真规模都不大,在大电网仿真试验时,都要进行大规模的等值化简,使实时仿真装置的应用,特别是大电网机电暂态和动态特性仿真研究方面,受到了很大的限制。因此,需要发展大规模电力系统实时仿真装置。由于受实验室规模和物理设备的限制,数模混合式电力系统实时仿真装置的仿真规模不可能无限扩大。然而,随着计算机软硬件技术的快速发展、计算技术的不断提高、仿真技术的日益完善,全数字式电力系统实时仿真装置可望具备对大规模电力系统进行实时仿真的能力。

参考文献:

- [1] 陈礼义,顾强(CHEN Li-yi, GU Qiang). 电力系统数字仿真及其发展(Power System Digital Simulation and Its Development) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(12).

- [2] 黄家裕,陈礼义,孙德昌 (HUANG Jiayu, CHEN Liyi, SUN Dechang). 电力系统数字仿真 (Power System Digital Simulation) [M]. 北京:水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1995.
- [3] 汤涌 (TANG Yong). 电力系统数字仿真技术的现状与发展 (Present Situation and Development of Power System Simulation Technologies) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(17).
- [4] 夏道止 (XIA Daozhi). 电力系统分析 (Power System Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [5] 张扬,陆承宇,杜振东 (ZHANG Yang, LU Chengyu, DU Zhen-dong). 电力系统仿真软件 PSS/E 简介 (The Brief Introduction of Power System Simulation Software PSS/E) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 1997, (1).
- [6] 韩祯祥,张琦,徐政 (HAN Zhenxiang, ZHANG Qi, XU Zheng). 一个大型集成化的电力系统仿真计算软件—NETOMAC (An Integrated Software Package for Power System Simulation and Computation—NETOMAC) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(9).
- [7] 许汉文,黄涌,陈坚 (XU Hanwen, HUANG Yong, CHEN Jian). 电力系统实时数字仿真系统介绍 (Real-time Digital Simulator in Power System) [J]. 华中电力 (Central China Electric Power), 2002(3).
- [8] 郑三立,雷宪章 (ZHENG Sanli, LEI Xiannzhang), Retzman D. 电力系统计算机及实时数字仿真(上)—电力系统计算机仿真 (Computer and Realtime digital Simulation of Power Systems, Part One: Computer Simulation of Power Systems) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(7).
- [9] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论 (EMTP Theory Book) [M]. 李永庄,林集明,曾昭华,译 (LI Yongzhuang, LIN Jiming, ZENG Zhao-hua, Trans). 北京:水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1991.

收稿日期: 2004-02-24; 修回日期: 2004-03-24

作者简介:

王 卉(1978 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电磁暂态仿真;E-mail: kfgirl @263.net

陈 楷(1980 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

彭 哲(1979 -),女,助工,现从事电气设计方面工作。

Application of digital simulation techniques and several simulation tools in power system

WANG Hui¹, CHEN Kai¹, PENG Zhe², DU Gang³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hebei Electric Power Design Institution, Shijiazhuang 050031, China; 3. Kaifeng Electric Power Bureau, Kaifeng 475003, China)

Abstract: This paper introduces the classification, characteristics and application of the digital simulation techniques in power system, and then proposes the application of several popular simulation tools, finally describes the prospect of digital simulation development of power system.

Key words: power system; digital simulation; digital simulation tools

(上接第 51 页 continued from page 51)

作者简介:

杨 坤(1979 -),男,硕士研究生,主要研究方向为电力

市场及电能质量;E-mail: yangk32@sina.com.cn

杨洪耕(1949 -),男,教授,主要研究方向为电力市场及电能质量。

Flicker measurement based on wavelet transform and its implementation on DSP

YANG Kun, YANG Hong-geng

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610045, China)

Abstract: The wavelet transform (WT), which is a very powerful tool for analysing non-stationary signals, can effectively measure and analyse the power quality signals. This paper proposes a flicker method based on FWT and its implementation on DSP. This method can accurately find out the start time of flicker signals and use FFT to detect the frequency and amplitude of the flicker signals in the following. This method can also enhance the efficiency of FFT calculation by DSP.

The project is supported by XJ Education Bounty of China Electricity Fund.

Key words: FWT; power quality; DSP; FFT