

特邀主编寄语

由于电力系统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、试验系统的安全性和具有良好的经济性、方便性等许多优点,正被愈来愈多的科技人员所关注,并已在研究、试验、工程、培训等多方面获得广泛的应用。电力系统数字仿真技术(器)的研究、开发,包括数学模型、仿真软件、模型结构、仿真算法分析方法等,不断有新的成果涌现。各种培训仿真器和研究用实时仿真器的研制和应用也大大推动了电力系统数字仿真技术的发展。随着电力系统的发展和一些最新的计算机技术、人工智能技术、新的数值计算方法和实时仿真技术在电力系统数字仿真中的应用,数字仿真对电力工业的发展将会做出更大的贡献。

为了让更多的同行了解有关信息和促进这一领域的学术交流,我们在“电力系统数字仿真技术应用”专题研讨栏目内收录了 8 篇文章,奉献给大家。希望可以起到抛砖引玉的作用,吸引更多的人关心和参与电力系统数字仿真的研究和应用。

国家电力公司电力自动化研究院 顾锦汶 梁志成

电力系统数字仿真及其发展

陈礼义 顾 强

(天津大学电力系 300072 天津)

摘 要 电力系统数字仿真已成为电力系统研究、试验和人员培训的有效工具。文中讨论了系统仿真的定义、分类、特点和应用,阐述了电力系统数字仿真在系统研究、试验和培训中的发展前景。认为改进现有电力系统研究仿真软件,开发用于实时试验和培训仿真器的新软件是今后的主要任务,必须采用面向对象技术、人工智能技术、新的数值计算方法和实时仿真算法等新技术。

关键词 电力系统 数字仿真 实时仿真 培训仿真器

分类号 TM 743

1 系统、模型与仿真

系统数字仿真是一门新兴学科,是计算机科学、计算数学、控制理论和专业应用技术等学科的综合。生产和科学技术的发展使完成某种特定功能的各事物相互之间产生了一定的联系,形成各种各样的系统。为研究、分析和设计系统,需要对系统进行试验。最初人们在系统原型上做试验,但由于种种原因不具备在原型上做试验的条件,只能按原型的特征构造一个系统模型(物理的或数学的),并在该模型上做试验。人们把建模和在模型上做试验的过程称为系统仿真。可见,系统、模型与仿真三者之间有密切联系。在研究、考察系统仿真时必然要涉及到这 3 个部分及其相互关系。系统仿真包括建立数学模型、建立仿真模型和在模型上做试验 3 个主要步骤。

1.1 系统仿真的含义

仿真(simulation)这个词被引入科技领域,受到广大科技人员的认可,但是其含义在许多科技文献中说法并不一致。文献[1]分别把 22 篇论著中关于仿真的定义列出来,以便读者了解这个词的含义。其中认为仿真的广义定义为“仿真是用模型研究系统”。精确的定义为“仿真是用数值模型研究系统在规定时间内的工作特征”。有的论著把在数字计算机上的“活的”模型做试验称为系统数字仿真。

1.2 系统仿真的分类^[2]

按原型系统状态变化的时间过程分为连续系统仿真和离散系统仿真;按实物参与仿真过程可分为实时仿真和非实时仿真;按仿真目的可分为研究仿真和培训仿真;按仿真对象所属专业类别可分为各种专业系统仿真,如电力系统仿真、化工系统仿真、航天系统仿真等;按仿真模型可分为物理仿真和数字仿真。

1.3 系统数字仿真的用途

由于系统数字仿真作为一种研究、试验和培训手段具有极好的经济性和实用性,几乎可以应用于任何一种工程与非工程领域。就工程领域应用而言,它的应用范围主要在以下几个方面:

- a. 系统规划、设计与试验;
- b. 系统动态特征的分析与研究;
- c. 系统在运行中的辅助决策、管理与控制;
- d. 系统运行人员的教学培训,例如载体的操纵、系统的控制与操作、系统过程的博弈决策等。

1.4 系统数字仿真的特点

- a. 不受原型系统规模和结构复杂性的限制;
- b. 保证被研究和试验系统的安全性;
- c. 系统数字仿真试验具有很好的经济性、有效性和方便性;
- d. 可用于对设计中未来系统性能的预测。

1.5 建立数学模型和仿真模型的任务

建立数学模型的任务是根据系统仿真目的和原型的数学相似原则构造模型的数学描述。在具体做法上应考虑以下几个问题。

明确仿真目的,考虑数学模型的简化条件,确定数学模型的规模;如果系统是由若干子系统组成,应保证整个系统数学模型的统一性,例如系统的统一坐标系;系统模型的数学描述有明确的逻辑关系,有灵活和可扩充的模型结构;数学模型应有利于数值计算程序的设计,尽可能减少计算工作量。

建立仿真模型指的是根据数学模型设计一个可在数字计算机上执行的仿真程序,成为在数字计算机上“活的”数学模型。在建立仿真模型时应考虑到以下几个问题:选择数值稳定性高、误差可以控制、计算工作量少和尽可能节省内存空间的算法;吸收计算机硬件和软件系统的新成果、新技术,提高仿真系统的功能,降低造价;引用先进的程序设计技术和技巧,提高仿真软件的可靠性、可扩展性和调试维修方便,具有直观友好的人机界面。

1.6 电力系统数字仿真

电力系统数字仿真是系统仿真的一个分支。在电力系统领域,人们很早就采用系统仿真的方法研究电力系统,从直流计算台、交流计算台、电力系统动态模型和模拟计算机等物理仿真到电力系统数字仿真。电力系统的科学研究和试验从来都离不开系统仿真技术。在某种意义上,电力系统仿真的技术水平代表了电力系统科学研究水平。电力系统工作者一般把在物理模型上的仿真称为动态模拟,而在数字计算机上数学模型的试验称为数字仿真。

电力系统数字仿真可分为研究仿真和培训仿真2类。研究仿真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等。培训仿真包括属于 EMS 的调度员培训仿真器 DTS、变电站运行人员培训仿真器和发电厂机组运行人员培训仿真器。有的 DTS 具有研究仿真的功能,因此硬件和软件均很庞大而复杂,设备昂贵。

研究仿真又可分为非实时仿真和试验用的实时仿真。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试验,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。

电力系统人员培训系统由于有人的参与,其动态过程也要求实时,但计算精度只限于满足培训要求,因此,不应要求与试验研究用的实时仿真相同,模型与算法都可以简化。

非实时的研究仿真软件种类很多,从简单电力系统到复杂电力系统,有通用的综合仿真软件,也有许多专用的仿真软件。简单电力系统仿真,系统中只有一台发电机(等值机),仿真各种短路故障、自励磁、次同步谐振、发电机误同期合闸、输电线波过程等暂态过程。复杂电力系统仿真的系统有多个发电机、多条输电线和各种负荷,以及发电机组的调速系统和励磁调节系统。这种仿真在模型和算法上与简单电力系统仿真有很大区别,仿真时间范围包括电磁暂态、机、网相互作用,首摆暂态稳定和长期动态过程。设计电力系统数字仿真软件的2个重要任务是建立数学模型和建立仿真模型。建立数学模型的依据是电机学、电力系统理论、电路基础理论和控制系统理论。模型的规模依据仿真目的而定,文献[2,3]给出各种电力系统模型的范例。

2 电力系统数字仿真的应用

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。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种版本的电力

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^[4]以及由于断路器切换或雷电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。

为适应各种科研项目的需要,专用的研究仿真软件种类繁多,在模型形式、算法、功能等方面有各自的特点和创新之处。

由于继电保护设备的试验和设计的需要,开发了既有试验功能又有辅助设计功能的电力系统继电保护辅助分析数字仿真系统。这是一种有实物(保护装置)接入的电力系统实时数字仿真器(RTDS)。为实现数字仿真系统和被研究实物的连接,采用并行数字计算机、数模转换器和功率放大器产生单回或双回输电线路的电压、电流,并含有直流分量、基波分量以及各次谐波分量。

实时数字仿真器(RTDS)多用于继电保护装置的试验,提供一个继电保护装置试验用的一次系统实际运行的仿真环境。如国家电力公司电力自动化研究院引进配备的一套RTDS就是一种较高水平的电力系统实时数字仿真器^[5]。

近几年来,有些电力系统实时仿真装置应用于发电机励磁调节装置AVR的测试。实时仿真装置提供电力系统一次系统和励磁系统某些部件闭环测试环境。随着大功率电力电子技术在输、配电系统中的应用,在实时仿真系统中进行高压直流输电设备及其控制器的实验也已出现。未来柔性交流输电技术FACTS的各种电力电子装置的样机试验将首先考虑在实时仿真器上进行。

此外,有用于系统运行人员培训的电力系统培训仿真,包括电力系统调度人员培训仿真器DTS(或运行人员培训仿真器OTS),变电站运行人员培训仿真器以及发电厂单元机组运行人员培训仿真器。这种仿真与电力系统研究仿真有较大区别。它是以运行人员教学、培训为目的的教学工具,要求培训环境尽可能和实际工作环境相同,例如有相同形式的控制台、操作机构、仪表盘、信号盘、屏幕显示、音响信号等,使学员有身临其境的感觉。这种仿真系统要给学员一种认真、严肃的培训环境,这样才有利于培养学员正确、灵敏的反应能力和判断能力,提高运行技术水平。电力系统培训仿真器的设计应以满足培训要求为目标,硬件、软件和教学功能软件都应保证环境的实时性和真实性,满足教学要求。

由于电力系统事故所造成的损失很大,因此提高运行人员技术水平,防止事故发生及在事故发生后避免事故扩大很重要。电力系统培训仿真器以其极佳的经济性、有效性而受到电力部门的重视,并迅速发展成为一种新兴的产业。

3 电力系统数字仿真的发展

不论是研究仿真、培训仿真还是实时仿真,近几年来在深度和广度上都有引人注目的发展,以致于很难全面列举各类仿真系统的发展情况。但是可以从前述的系统仿真3个要素和3个步骤来考察电力系统数字仿真的发展。电力系统仿真的发展可从以下几个侧面来考察。

3.1 模型的精细程度和多样性

可从建立数学模型来考察。数字仿真的基础工作是建立数学模型和在数值模型上做试验,可见建模是很关键的工作。电力系统原型是一个由各种电气设备(元件)和电路联成的整体。电力系统仿真属于连续系统仿真(时间域的动态过程仿真),所以数学模型通常包括元件的动态描述和电路的数学描述,也就是说数学模型主要由微分方程与网络方程组成。建模的任务除了推导出精细的数学模型外,还要根据仿真目的选定各元件模型的形式、规模以及相互间的联系,例如发电机-网络的接口以及坐标变换。从理论上讲,电力系统数学模型可以考虑得很精细,但是仿真计算量非常大,有时甚至很难实现,所以建模的假设和模型的简化是一件很重要的工作,严格来讲对假设要进行论证,或者根据实测或试验来证实,否则有可能忽略某些未被发现的现象。这点应给予足够的重视。

数学模型还应包括模型中的参数。参数的准确性直接影响仿真结果。这个问题往往研究和分析不够,例如发电机的暂态参数、等值发电机的等值参数等。每个参数对仿真结果的影响不同,应逐个加以分析和验证。最近国内的一些刊物上有的论文对FACTS模型用电力系统动态模拟试验结果做检验,这是很有价值的。

在研究仿真方面,从简单功能的暂态分析软件扩展成综合分析软件,仿真目的的多样性决定了模型的多样性,模型的种类和规模大大增加。为了便于选择模型和增添新的模型,有的仿真软件采用动态模型库和自定义模块等方法是非常合理和实用的。

新近开发的电力系统实时仿真采用模块化的形式建模,主要电力元件有:

无源RLC支路,滤波器和电源;单回输电线路和

同杆双回输电线;考虑饱和影响的双绕组和三绕组变压器;断路器和故障设置;同步电机及励磁机、调速器;串联补偿设备 MOV 和 TCSC;高压直流阀组;电流互感器(TA)和电压互感器(TV)。

用户可以用这些电力系统基本元件建立所需的电力系统仿真模型。

由于电力系统原型具有模块结构的特点,也可以用传递函数表示的框图建立数学模型。这是另一种形式的模型。也就是说把系统模型分解归纳成若干种标准模块,按标准模块组成系统模型。当原型系统元件或结构改变时,模型的修改非常方便,这就是面向结构图的数值仿真模型^[2,6]。

在培训仿真方面,建模要着重考虑仿真的真实性和实时性,尽可能减少计算量。模型的简化是重要而细致的工作,精度和计算是突出的矛盾。从培训目的出发可以忽略某些快速衰减分量的模型,也可以在不同动态过程阶段采用不同数学模型,这对培训效果不会有很大影响,但却能保证实时性。有些 OTS 模型就是这样处理的^[7]。

3.2 数字仿真数值方法的多样性

电力系统数字仿真数学模型一般是用微分方程和网络代数方程表示,微分方程可以用数值积分法求数值解。从大量的参考文献中可看出,电力系统数字仿真所采用的方法是多种多样的,从简单的欧拉法、改进欧拉法、隐式梯形法到龙格-库塔法;从单步法、多步法到具有误差修正的预测-校正法;从等步长到变步长计算都用到^[3]。经过多年的应用与探索,如今多数数字仿真软件采用隐式梯形法或同类的算法,其原因如下:

a. 隐式梯形法有很好的数值稳定性。不仅对短期动态仿真,尤其对于复杂电力系统长期动态过程仿真来说是非常可靠的。在很长的计算过程中截断误差不会繁殖以致影响仿真结果。但是隐式梯形法每步计算的截断误差较大,因此步长不宜过大。

b. 隐式梯形法的计算式简单,便于把微分方程化为差分方程并和网络方程联立求解,以消除交接误差。用于 RLC 电路的暂态仿真时,这种方法很容易构造等值电路的差分方程,但是在数值计算中,由于突变扰动后非状态变量发生突变,但在计算中难以求得,常以突变前的值代替,因此会产生非状态变量计算值的不正常摆动,称为数值振荡。可以采取适当方法消除^[2]。

c. 隐式梯形法计算量少,便于提高仿真速度。

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。

以上所述是属于古典数值积分法的应用。近几年来,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,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。文献[2,6,8,9]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。

离散相似法是针对动态环节的,有明显的物理概念,不同动态环节有不同差分方程,很适合于面向结构图仿真,或对模型库中各种模型用不同差分方程表示。

由离散相似法可派生出许多快速数字仿真方法,有效提高计算速度。

在变电站培训仿真和调度员培训仿真中,为实现开关操作的逻辑关系和电网故障诊断与处理等培训功能,采用了人工智能技术和专家系统等。在继电保护装置动作过程的仿真中提出用逻辑判断法代替定值比较法,很大程度上减少了计算量,保证仿真系统有很好的实时性。

3.3 电力系统仿真软件设计方法的改进

现在使用的电力系统研究仿真软件大多采用面向功能(function-oriented)的方法设计。随着电力系统的发展,电力系统研究对电力系统仿真软件功能的要求越来越高,不断提出各种新要求。由于面向功能设计方法使系统组织方式、用户界面和计算功能的组织是专用的、固定的。不同系统之间缺乏共同性和相互综合的可能性。也就是说,这种设计方法强调系统功能的分析与描述,软件系统是结构化的。一般由各种应用模块组成,每个模块只能完成一种

应用功能,模块的组合由它们之间的界面来完成。这种设计方法指导下的仿真软件,当需要不断扩展和修改功能时,修改工作量很大,容易导致系统冗余增大,结构变得复杂而且利用率下降,修改费用高。

进入 90 年代以来,面向对象(object-oriented)方法公认是解决这个难题的有效手段。文献[10]阐述了一种新的软件设计思想和方法。这种设计思想把认识和描述现实系统对象(客体)的过程和方法与分析、设计和实现这个系统的过程和方法结合起来。或者说面向对象方法是了解决软件系统设计中问题空间和解题空间的不一致问题而提出来的。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。面向对象技术引入电力系统仿真软件对软件的开发有重要意义,但仍有许多具体问题需要研究与探索,例如电力系统仿真的建模,面向对象在数值计算中的应用等。文献[11]建议把面向对象技术用于电力系统动态仿真,提出电力系统动态仿真的类层次图和用面向对象技术编程的实现方法。文献[12]采用面向对象技术开发电力系统仿真软件,提出建模方法和编程方法。

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,因为目前存在快速发展的必要性和技术上的可能性。首先从发展必要性来看,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。环境保护制约和电力市场,电力行业体制改革已提到日程上来^[13]。作为电力系统科研、规划、设计和运行人员培训不可缺少的工具,电力系统数字仿真必定会有新的发展和突破^[14,15]。

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,柔性交流输电(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^[11,16]。

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,系统的稳定性与安全性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。

随着电力市场的形成,属于博奕型的仿真系统会发展起来,它将具有经营管理、经济分析、运行决

策的功能。这种系统仿真对建模、仿真方法和可视化培训仿真系统必将提出新要求。它可以帮助市场管理人员、非电力系统专业的与市场运营有关的贸易经纪人、财务人员以及电力政策决策人员理解电力系统运行的基本原理,认识电力交易政策与电力系统运行的安全性、经济性、可靠性和电能质量的相互关系。

为保证供电可靠性,电源系统可靠性指标和可靠性的评价是非常重要的。采用可靠性数字仿真来获得系统随机特性和对电源储备能力的估计将会发展起来。因为可靠性数字仿真具有通用性及对复杂系统的适应性。

其次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。应充分注意吸收和引入其他领域的新成果,如以下几个方面:

a. 数模混合的实时仿真。电力系统数字仿真很难做到实时,可以用数模混合仿真。这种仿真用数字-模拟混合计算机系统仿真。例如电力系统中的控制器仿真可以用模拟计算机实现电力系统实时仿真,用数字计算机实现数字控制系统仿真,或用控制器原型接入混合仿真系统做试验。这种仿真也可用于培训仿真器以实现实时性的要求。

b. 面向对象(object-oriented)技术。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。但是在实现过程中将有许多问题要解决。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、结构也将随电力系统发展而经常改变。拟定一个以面向对象技术为指导的模型方案需要反复研究与探索。例如 EPRI 提出研究一种公共信息模型(common information model,缩写为 CIM)以用于 EMS^[17,18]。其目的是提供一种可使不同用户在 EMS 环境下共用 EMS 数据库,并且可长期进行应用功能的扩展和修改的模型。采用面向对象技术是完成此项任务的有效工具。

c. 现代数字仿真算法。这种方法已在第 3 部分提到,除离散相似法以外还包括可调整数值积分法、增广矩阵法、实时仿真法、采样控制系统仿真法和面向结构图仿真法等。引入这些新方法可以减少计算量,提高精度和数值稳定性。

d. 高性能的可视化数值计算工具软件。例如文献[19]提出的 MATLAB 软件,用这种软件重新开

发 EMTP 软件,成为 MatEMTP,它比 EMTP 有更优良的性能。

综上所述,可以预料在下世纪,在电力系统数字仿真软件设计方面,将在以下 3 个方面有新的发展:采用先进的软件开发技术改进大型电力系统研究仿真软件;采用人工智能技术和先进软件设计技术开发各种用途的电力系统人员培训仿真器;采用更有效的硬件与软件技术开发功能更完善的试验用的实时仿真系统。在建立新的数学模型和新算法方面将有新的发展,电力系统数字仿真将成为一个具有强大经济实力的新产业。

参考文献

- Alan B A. Compilation of Simulation. Simulation, 1979, 33(2):61~63
- 黄家裕,陈礼义,孙德昌. 电力系统数字仿真. 北京:水利电力出版社,1995
- Stott B. Power System Dynamic Response Calculation. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(2)
- 黄家裕,张益,孙德昌. 用于机电耦合研究的汽轮发电机轴系模型. 电力系统自动化,1998,22(7)
- 梁志成,马献东,王力科,等. 实时数字仿真器 RTDS 及其应用. 电力系统自动化,1997,21(10)
- 熊光楞,肖田元,张燕云. 连续系统仿真与离散事件系统仿真. 北京:清华大学出版社,1991
- 杨志新,李乃湖,陈珩. 华东电力系统调度员培训仿真器的动态全过程准实时仿真. 中国电机工程学报,1996,16(3)
- 科恩 G A,韦特 J V. 连续系统数字仿真. 李仰东译. 北京:科学出版社,1981
- Smith J M. Mathematical Modeling & Digital Simulation for Engineers & Scientists. Wiley & Sons Inc, 1977
- Zhu Jun, Lubkeman D L. Object-Oriented Development of Software Systems for Power System Simulation. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2)
- 陈礼义,董 蕾,陈超英,等. 具有串联电压源的 FACTS 暂态稳定数字仿真. 电网技术,1997,21(3)
- 励 刚,尤海波,徐 斌,等. 面向对象技术在电力系统中的应用. 见:'97 全国电力系统自动化学术研讨会论文集. 1997
- 周孝信. 研究开发面向 21 世纪的电力系统技术. 见:中国电机工程学会电力系统自动化专委会学术年会论文集. 1997
- Thomas J O, Gross G, Laufenberg M Z, et al. Visualizing Power System Operaitons in an Open Market. IEEE Computer Application in Power, 1997, 10(1)
- Handschin E. System Operation in an Energy Market Environment. In: IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power System and Power Plants. Beijing: 1997
- 陈超英,陈 涌,陈礼义. 统一潮流控制器对继电保护运行影响的仿真研究. 电力系统自动化,1998,22(7)
- 张沛超. 面向对象的基于知识的电力系统仿真技术. 见:'98 全国电网调度自动化,运动及厂站自动化,仿真技术学术交流会议论文集. 南京:1998
- A Proposed Common Information Model. EPRI-API Project, RP 3654-1
- Jean Mahseredjian. Creating an Electromagnetic Transients Program in MATLAB, MatEMTP. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1)

陈礼义,男,1938 年生,教授,主要从事电力系统仿真及电力系统柔性交流输电方面的研究。

顾 强,男,1963 年生,高级工程师,在职硕士研究生,主要从事电力系统自动化研究。

POWER SYSTEM DIGITAL SIMULATION AND ITS DEVELOPMENT

Chen Liyi, Gu Qiang

(Tianjin University, 300072, Tianjin, China)

Abstract The digital simulation of power systems has proved to be an effective tool for research, testing and operator training of power systems. This paper discusses the definition, classification, characteristics and application of the system simulation. Then the prospect of applying the digital simulation to the research, testing and operator training of power system is expounded. Improvement of the existing power system simulation software for research and development of new simulation software for real-time testing and operator training simulation will be of the main task. New technologies such as object-oriented methodology, artificial intelligence technique, new numerical methods and real-time simulation algorithm will offer important contribution.

Keywords power systems digital simulation real-time simulation training simulator