

现代电力系统动态模拟实验室建设和运行

杨德先, 陈德树, 张凤鸽, 尹项根, 吴彤

(华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 分析了电力系统各种实验研究方法, 对电力系统动态模拟技术进行了深入研究, 建立了三峡巨型机组、特高压交流输电、FACTS 系列设备等模型, 同时对传统的动模实验室进行了大规模的数字化改造。这使得实验室的研究范围和能力大大提高, 并解决了很多电力工业实际问题。实践表明, 物理模拟在电力科学研究中具有显著地位, 该成果已应用到全国 20 多个动模实验室。

关键词: 特高压输电; FACTS; 动态模型; 物理模拟; 三峡电站; 水轮发电机

Construction and operation of the modern power system dynamic simulation laboratory

YANG De-xian, CHEN De-shu, ZHANG Feng-ge, YIN Xiang-gen, WU Tong

(Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper analyzes various methods of experimental research on power system, researches the power system dynamic simulation technologies, establishes the physical models of the Three-Gorge giant generator, 1000 kV UHV AC transmission system, the FACTS equipments, and so on, and at the same time makes digital reconstruction in large on traditional dynamic simulation lab. All of these have improved the experimental research abilities and scopes and solved many practical problems of power industry. Practice shows that the physical simulation is very important for power science research, the achievements have been popularized and applied in more than twenty labs in China.

Key words: UHV power transmission; FACTS; dynamic model; physical simulation; Three-Gorge hydroelectric power station; hydro-generator

中图分类号: TM743 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)09-0118-04

0 引言

电力系统的研究方法和其它科技领域一样, 可以概括为理论分析和科学实践两种途径, 理论分析无疑是极端重要的, 它能够阐明电力系统的基本规律, 并探索新原理和新方法。但是由于电力系统及其暂态过程的复杂性, 仅靠理论分析往往难以得到全面的知识。因此, 必须与科学试验相结合才能获得较全面的知识。同时有些新的原理和规律, 也往往是在科学试验的启发下总结出来的。

电力系统的科学试验研究可以在实际电力系统(简称原型)上进行, 也可以在模拟的电力系统(简称模型)上进行。在原型上进行科学试验研究, 可以得到最真实的结果, 但是在电力系统原型上进行试验往往受到很多条件限制, 如时间、经济、安全等多方面因素制约。同时对一些比较严重性试验项目(如短路、振荡、失步等), 由于系统运行条件的

限制不一定都能进行, 更不能进行多次重复性试验, 特别是对于一些规划中的工程项目, 则更难以在现有的电力系统中进行。因此, 模型试验在电力系统研究工作中具有十分重要的意义。

电力系统的模型试验方法有数学仿真和物理模拟两种。国外模拟仿真统称为 simulation。国内一般采用数学方法进行试验研究的方式习惯称为数学仿真, 将采用物理方法进行试验研究的方式习惯称为物理模拟。

1 动模的特点

电力系统动态模拟是电力系统物理模型, 它是根据相似理论建立起来的, 具有与原型相同物理性质的物理模型。是实际电力系统按一定比例关系缩小了的, 而又保留其物理特性的电力系统复制品。电力系统动态模拟主要由模拟发电机、模拟变压器、模拟输电线路、模拟负荷和有关调节、控制、测量、

保护等模拟装置组成。电力系统动态模拟具有下列一些特点。

1) 可以在模型上直接观察到所研究的课题在电力系统中产生的全部物理过程, 获得明确的物理概念, 并可很方便地对电力系统特性和诸多过程进行定性的研究。

2) 对目前还不能或不完全能用数学方程很好地描述的问题, 可以方便地利用动态模拟探求问题的物理本质, 也可以校验现有理论和教学模拟的合理性、正确性, 使理论和数学模型更加完善^[1]。

3) 对一些新型的继电保护和自动装置, 可以直接接入模型来研究。例如, 新型的继电保护可以接在动模系统中, 进行各种短路故障试验, 考核保护装置的各种性能。为校验继电保护的性能, 在原型系统中制造各种短路事故是不可能的。

动态模拟的缺点是模拟设备加工比较困难, 建设周期长, 投入经费大, 同时参数的调整受到一定的限制, 对比较复杂的原型系统一般需要进行一些简化, 才能在动模上进行试验研究。

电力系统运行部门非常重视动模实验, 特别是继电保护实验, 颁布了中华人民共和国“DL/T871-2004 电力系统继电保护产品动模试验”电力行业标准, 并针对新研制的保护装置入网, 无任该保护装置是进行何种数字仿真实验, 最后一关是要通过动模实验考核。因此动模实验在电力系统研究中具有不可替代的地位。

2 物理模拟与数字仿真关系(表 1)

表 1 物理模拟与数字仿真对比
Tab.1 Comparison between physical simulation and digital simulation

项目	物理模拟	数字仿真
模型与理论的关系	以实验为基础, 检验和推动理论研究	以理论为指导, 结果依靠理论
实验研究的前提条件	只需物理过程的物理量, 不需数学模型	必须确定物理过程的数学模型
模型物理量	与原型系统相同, 不改变性质	可以与原型系统不同
物理过程	直观、真实	不直观
建模的工作	物理模型建立、参数的调整	数学模型建立、仿真算法的设计
与实际装置相联	直接接入	不能或者通过功率放大器相联
模型通用性	较差、参数修改较难	较强、参数修改容易
模型的规模	规模不能过大	规模可以很大
模型的投资	投资较多	投资可大可小
模型的使用	操作复杂、不安全	操作简单、安全

数学仿真是建立在数学方程式基础上的一种对原型系统进行仿真研究的方法。对于各种物理现象, 在一定的假设条件下写出其运动过程的数学方程式, 借助专门的数学求解工具进行求解, 以得出所需要的结果。

数学仿真存在的主要问题是物理概念不够直观, 同时它要求对研究系统的全部环节都必须列出数学方程式, 这对于一些新的领域和现象的研究, 可能会产生一定的困难。

综上所述, 各种研究工具都有其特点和适用范围, 即使不断推陈出新的数字式电子计算机也难尽善尽美。因此, 取长补短、相互配合才是较好的解决方案。

3 动模实验室的数字化改造

数字化改造的总体思路是: 针对原有的物理模型, 以计算机网络为支撑, 研制从设备低层级到上层系统级的完整数字监控系统, 取代长期以来一直使用的庞大的监控屏, 采用微机型调速、励磁、同期设备和就地微机测控单元以及遥视系统, 实现电力系统“五遥”功能。

3.1 微机监控系统和信息平台建设

监控系统采用分层式结构, 包括就地监控单元层和上层管理单元层, 两层之间通过网络通信方式进行互连, 监控系统的基本硬件结构如图 1 所示。

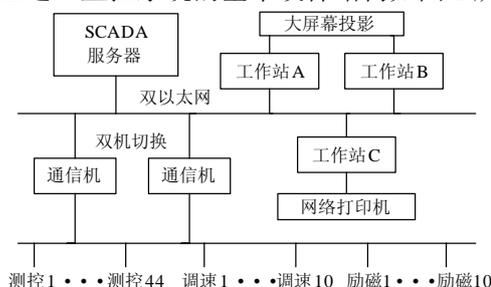


图 1 监控系统的硬件结构

Fig.1 Hardware structure of the monitoring and control system

数字子站系统由 44 台网络型测控装置、10 台微机原动机及调速系统和 10 台微机励磁调节器及负电阻器组成, 对各类电力设备进行全数字式监控, 被监控的电力设备包括 10 套发电单元、4 组无穷大单元、8 组负荷单元、4 组分相线路开关、14 组四相线路开关以及 4 组特高压系统单元。各开关单元包括开关系统和电流、电压互感器、微机测控装置, 作为就地监控单元通过以太网与主控通信单元相联, 然后送至主控室的上层监控计算机。

建模时将各开关单元采用搭积木方式, 上位计算机采用组态方式绘制相对应的主接线, 以及实时

显示每个测量点的数据并通过投影仪投在大幕墙上,供试验人员分析。

数据记录与分析系统是采用2台64路模拟量的故障录波仪和2台32路ECT的合并单元,通过以太网相连,在各办公室的计算机上可以将试验系统各点记录量显示出来进行分析,控制室通过大屏幕投影可以看到各点的电气信号录波量和视频信号。

3.2 微机型原动机及调速系统

原动机及调速系统仿真器,由微机调速控制器、原动机和调速器特性仿真软件共同构成,可以实现汽轮机特性或水轮机特性及其调速器特性的模拟,主要仿真环节有:汽轮机蒸汽容积惯性、原动机特性以及汽轮机机械液压式调速器等环节;水轮机的水锤效应、原动机特性及水轮机机械液压调速器等环节。

能依据汽轮机和水轮机的原动机及其调速系统的数学模型模拟出原动机和调速系统特性。

3.3 微机励磁调节器及负电阻器屏

微机励磁调节器及负电阻器是为满足科研与教学的特殊需要而专门设计的,其控制参数可在线修改灵活方便。

微机励磁调节器的励磁方式可选择:微机它励、微机自并励、励磁机自励、励磁机它励和外接励磁机五种;其控制方式可选择:恒UF、恒IL、恒 α 、外接DK、外接UK和外接PSS;并设有诸多限制功能等安全保护措施;

模拟发电机组转子绕组配备负电阻器可以灵活调整模型机组励磁绕组的时间常数,达到真实模拟的目的。

3.4 微机型电力系统负荷模拟器

(1) 能够模拟电力系统负荷的静态功率频率特性方程。即能够分别模拟与频率无关的负荷、与频率的1~4次方成正比的负荷,以及由它们共同组成的综合负荷。各项负荷的大小及其在总负荷中的比例可以在负荷模拟器设计的容量范围内自由设置。

(2) 能够模拟电力系统负荷的动态频率特性。即能够通过电气方法模拟转动负荷的转动惯量。

负荷模拟器由异步电动机+直流发电机+两个反向并联的三相全控桥+负荷模拟控制器等基本部分组成,采用“物理模拟+数学模拟”的混合模拟方法进行模拟,负荷消耗的功率回馈电网。

4 现代特大型电力设备模拟

4.1 特高压输电线路模拟系统

1000 kV特高压输电线路是以我国特高压试验示范工程为原型,按照电压模拟比1000;电流模拟

比400;阻抗模拟比2.5;功率模拟比40万倍建立起来的物理模型,该模拟系统于2006年底建成,已承担和完成了我国特高压试验示范工程的多项重大试验研究项目。

模拟系统采用16组II单元和4组并联电抗器,每组II单元可模拟原型系统15 km或者60 km,其阻抗角为 88.5° 。其中6个II单元模拟晋东南—南阳特高压线路360 km;10个II单元模拟南阳—荆门特高压线路285 km,模拟线路共设有10个短路点,南阳设有开关站,每条线路两端均有模拟并联电抗器。

4.2 特高压变压器模拟系统

特高压变压器是特高压输电系统中关键的电力设备装置,该系统于2007年初建成,先后承担、完成了国家电网公司、深圳南瑞公司等的多项重大研究、试验项目^[2]。

模拟系统以我国特高压试验示范工程为原型,由主自耦变压器、调压变压器以及补偿变压器三个部分组成。高、中、低压侧,各侧容量比分别为:1:1:1/3。

可以完整地模拟特高压1000 kV变压器的主自耦变压器、调压变压器以及补偿变压器端部、绕组匝间以及主自耦变压器跨分支绕组匝间等各种类型变压器故障。可用于变压器内部故障暂态特征的保护新原理的试验研究^[3]。

4.3 巨型多分支发电机模拟系统

2005年初建立了三峡巨型多分支发电机的物理模拟系统,这在世界上尚属首次,对三峡电站的安全可靠运行以及相关电力系统的安全稳定运行具有重要作用,并首次在物理模拟机组采用了光电流互感器测量电流。这个基于结构模拟的三峡机组物理模拟系统,其发电机内部电气结构与实际三峡电厂中发电机机组一致,其主要参数与原型三峡机组接近,其静态和动态特性可以反映三峡机组的特性。通过适当调整该物理模拟机组的额定电压、额定容量、转动惯量等可以模拟其它巨型机组的动态过程。

已经完成如下主要实验研究:

1) 模拟了三峡发电机和变压器内部各种故障,给出故障情况的各种电气量,并与暂态数字仿真程序进行校核,为保护整定提供依据。

2) 为三峡发电机组保护的动态模拟试验提供了试验条件,并对三峡机组保护配置的优化问题进行了深入研究,提出了三峡发电机组保护优化配置方案。

3) 模拟三峡发电机的励磁系统,并对其参数优

化(包括 PSS 参数), 物理模拟研究三峡发电机运行的进相能力。

5 FACTS 模拟系统的建立

5.1 柔性功率调节器(FPC)

柔性功率调节器(Flexible Power Conditioner)是由本实验室提出的一种具有自主知识产权的新型 FACTS 装置, 它将飞轮储能技术和传统的同步调相技术有机地结合在一起, 采用交流励磁和矢量控制等先进技术进行电机的转速控制, 具有储能、发电、调相等多种功能。将其用于电力系统的稳定性控制, 可实现有功功率和无功功率同时双向大范围快速调节, 极大地增强电力系统的稳定性。

该装置额定参数为: 800 V, 10 kW, 100 kJ, 500~1500 r/s, 可进行基于新原理电力系统稳定控制的探索性实验研究。

5.2 可控串联补偿装置

可控串联补偿装置(TCSC)是在常规串联补偿技术基础上发展而来的一种先进电力传输控制装置。它采用晶闸管控制的串联可变电容器对超高压输电线路的电抗进行补偿, 具有大范围快速连续调节工频阻抗的特性, 可为电力系统暂态稳定控制、阻尼功率振荡、抑制次同步振荡以及动态潮流控制等提供有效的控制手段。

该模拟装置以实际工程为原型, 对其主要元件及装置的运行控制和保护特性进行了详细模拟, 可用于包含 TCSC 的电力系统先进稳定控制方法以及新型继电保护原理与装置的实验研究。

5.3 电子电力变压器

电子电力变压器(EPT)是一种将电力电子变换技术和电磁感应原理的中、高频电能变换技术相结合, 实现将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的电能的电气设备, 可以实现变压、变流、电气隔离、传递能量和电能控制等。

本装置实现的是自平衡电子电力变压器(AEPT)。与已有的 EPT 拓扑电路相比, 最大特点是: 可以满足高电压等级要求; 能够在变压器一侧系统出现不平衡时, 保证另一侧系统仍然能够维持三相电流或电压平衡; 开关损耗小, 整机效率高。

5.4 统一潮流控制器

统一潮流控制器(UPFC)是一种功能非常强大的 FACTS 设备, 它将两种重要的灵活交流输电装置, STATCOM 和 SSSC 通过直流电容背靠背连接而成, 可以对交流输电系统中与传输线路潮流有关的几乎所有因素进行有效的控制, 是未来电力系统中重要的输电设备。

本实验装置容量 15 kVA, 是目前国内外少有的几台同类型实验装置。该装置已经与模拟电力系统相连, 可以进行与 UPFC 相关的电力系统各种特性进行探索性实验研究。

6 动模实验室的运行

华中科技大学动模实验室始建于 1962 年, 至今进行了多次大的改造和扩建。目前已拥有 10 台模拟发电机组和超过 3 000 km 的交、直流模拟输电线路、4 组无穷大电源和控制设备, 并配备了现代化的微机测量监控系统 and 智能化上层实验管理平台, 能实现自动监控、录波和遥视等功能。

建有全国第一条交流 500 kV 输电线路模型、首套可供内部故障试验的 500 kV 并联电抗器模型、全国最早的直流±500 kV 输电线路模型、首条交流 750 kV 输电线路模型、首套完整的特高压 1 000 kV 变压器模型。同时还建有完整的发电机、变压器组保护装置实验系统和世界上目前仅有的一套具有结构及参数相似的三峡巨型机组物理模型系统。还建立了超导 SMES 的模拟试验设备平台和一系列 FACTS 模拟设备。

近年来实验室承担了多项电力工业的重要试验研究任务, 如葛洲坝电厂的发变组的八侧差动保护试验; 西北电网 750 kV 交流线路、变压器、母线和电抗器保护试验; 三峡电厂的发电机失励磁保护和低频振荡试验; 863 项目超导储能的 SMES 动模试验; 1 000 kV 特高压输电线路、变压器保护研究试验等等, 以及国内外各大继电保护制造厂家的华中电网入网实验和质量检测实验等。

实验室利用率在全国高校动模名列前茅, 每年对外实验项目有 20 多项左右, 对本校也有近 30 项, 年开机天数 200 多天, 本实验室还为香港理工大学、浙江大学、四川大学、合肥工业大学、中船 719 研究所、中国电科院、国网电科院、许继、阿继等 20 所高校和科研单位, 设计、研制了动模实验设备。

7 结语

近几年来, 在动模技术研究上取得了很大地发展, 无论在相似理论、系统及其元件的模拟与设计方法、检测手段方面, 还是在动态模型的实际应用方面, 都获得了很多成果, 并已在全国推广, 对于电力系统的运行和新装备、新元件的研究上都起了一定的作用^[4]。该实验室为对外开放实验室, 可供有关方面进行研究、探索或检验性试验。

(下转第 125 页 continued on page 125)

当记忆作用消失以后,如果用公式 $\theta = \arg(\dot{U}/\dot{U}')$ 计算,取图 8 系统所获静模数据(每周波 20 个采样点),经过傅式算法滤波以后,测得 $\arg(\dot{U}/\dot{U}')$ 在 93° 至 85° 之间变化,可能导致距离继电器误动;如果用 $\arg(\dot{U}'_{|0|}/\dot{U}')$ 进行计算的话,当记忆作用消失后 $\dot{U}'_{|0|}$ 约等于 \dot{U}' ,也就是此时 $\arg(\dot{U}'_{|0|}/\dot{U}')$ $\approx 0^\circ$,保护肯定不会误动。而在区内故障记忆作用有效的时候, $\arg(\dot{U}'_{|0|}/\dot{U}') = \arg(\dot{U}_{|0|}/\dot{U}')$,该继电器能正确动作。

5 结束语

该方法已经成功地应用于南瑞城乡 DSA8341 高压线路保护中,在动模试验中发现,三相故障时如果采用传统的用记忆电压极化的方法,在反方向经过渡电阻故障时,总会有一种过渡电阻使得距离保护误动。而采用了本文提出的实用判据之后就能很好地解决动模试验中出现的这些问题,并且对其他的保护逻辑也不会造成不好的影响。

参考文献

- [1] 朱声石. 确良高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

ZHU Sheng-shi. The Principle and Technical of EHV Protection Relay[J]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

- [2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

CHEN De-shu. The Principle and Technic of Microcomputer Protection Relay[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992.

- [3] 朱声石. 高压电网线路保护的新技术[J]. 电力系统自动化, 1989, 13(4): 3-7.

ZHU Sheng-shi. The New Principle of EHV Protection Relay, 1989, 13(4): 3-7.

- [4] 洪佩孙, 李九虎. 输电线路距离保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 2008.

HONG Pei-sun, LI Jiu-hu. Line Protection of Distance Relay[M]. Beijing: Hydraulic and Electric and Power Press, 2008.

收稿日期: 2009-06-10

作者简介:

王忠(1969-), 男, 硕士研究生, 长期从事线路继电保护研究;

余洪(1981-), 男, 硕士研究生, 长期从事线路继电保护研究; E-mail: yu_005hust@163.com

李娟(1979-), 女, 硕士研究生, 长期从事线路继电保护研究。

(上接第 121 页 continued from page 121)

电力系统的发展和研究中不断出现了一些新的要求, 物理模拟今后还要进一步地研究和发展, 还需要深入掌握原型系统和各元件的特性, 发展电力系统的实验技术, 进一步提高模型的精确度与实际系统实验进行比较, 真实和动态地再现电力系统的各种动态运行工况和扰动过程, 为电力系统的研究提供科学依据。

参考文献

- [1] 维尼柯夫 В А, 伊万诺夫斯莫连斯基 А В. 电力系统的物理模拟[M]. 北京: 中国工业出版社, 1962.

Веников В А, Ивановсмоленский А В. Physical Simulation of Power System[M]. Beijing: China Industry Press, 1962.

- [2] 陈德树, 唐萃, 尹项根, 等. 特高压交流输电继电保护及相关问题[J]. 继电器, 2007, 35 (5): 1-3.

CHEN De-shu, TANG Cui, YIN Xiang-gen, et al. Special Issues and Suggestion on Protective Relaying Applied in UHV Transmission Line[J]. Relay, 2007, 35 (5): 1-3.

- [3] 杨德先, 陈德树, 陈卫, 等. 特高压交流输电系统的

动态物理模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (22): 36-39.

YANG De-xian, CHEN De-shu, CHEN Wei, et al. Dynamic Physical Model of 1000 kV UHV AC Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (22): 36-39.

- [4] 杨德先, 陆继明. 电力系统综合实验原理与指导[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

YANG De-xian, LU Ji-ming. The Principle and Direction on Power System Integrated Experiment[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

收稿日期: 2009-06-22; 修回日期: 2009-10-23

作者简介:

杨德先(1963-), 男, 高级工程师, 硕士学位, 电力系统动态模拟实验室主任, 主要研究方向为电力系统自动化及动态模拟; E-mail: ydx@mail.hust.edu.cn

陈德树(1930-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护等领域的教学、研究工作;

张凤鹤(1980-), 女, 工程师, 硕士学位, 主要研究方向为电力系统数字仿真及动态模拟。