

交直流电力系统多时间尺度全过程仿真和建模研究新进展

汤涌

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

New Progress in Research on Multi-Time Scale Unified Simulation and Modeling for AC/DC Power Systems

TANG Yong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: New achievements from the research on multi-time scale unified simulation and modeling for AC/DC power systems are summarized. As the technical foundation of the research, PSD Power Tools, developed and owned by Power System Department of China Electric Power Research Institute and widely used in power utilities of China, is a power system simulation and analysis software package. By means of PSD Power Tools, following research results in power system simulation are achieved, including hybrid simulation of electromechanical transient and electromagnetic transient, unified simulation of electromechanical transient stability and medium- and long-term stability, small signal stability analysis of large-scale power system, short-circuit current calculation, static voltage stability analysis and optimal power flow calculation; the new achievements in the modeling are as following: prime mover and energy supply models, new exciter and governor models of generator, wind power models, HVDC models, FACTS device models, load models and protection and control system models and so on. These research achievements strengthen and enhance the simulation ability of AC/DC power systems and further improve the technical level of power system simulation and modeling in China.

KEY WORDS: AC/DC power system; multi-time scale; hybrid simulation; unified simulation; power system modeling

摘要: 综述了以电力系统分析软件为基础的交直流电力系

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BAA13B03); 国家自然科学基金资助项目(50595412); 国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]189)。

Key Project of National Eleventh-Five Year Scientific and Technical Supporting Program of China(2008BAA13B03); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50595412).

统多时间尺度全过程仿真和建模研究的新成果。在仿真方面的新成果有电力系统机电暂态-电磁暂态混合仿真、机电暂态-中长期动态全过程仿真、大规模电力系统小扰动稳定性计算、短路电流计算、静态电压稳定计算、最优潮流计算等; 在建模方面的新成果有发电厂电力系统模型、发电机励磁和调速系统新模型、风力发电、直流输电系统模型、FACTS装置模型、负荷模型、保护与控制系统模型等。这些研究成果丰富和完善了交直流电力系统仿真能力, 进一步提高了我国电力系统仿真与建模的技术水平。

关键词: 交直流电力系统; 多时间尺度; 混合仿真; 全过程仿真; 电力系统建模

0 引言

随着经济的发展和技术的进步, 电网发展面临新课题和新挑战。依靠现代输电、信息、通信和控制技术, 构建坚强智能电网已成为电力工业发展趋势。大量先进的输电技术和控制系统将在电力系统得到应用, 如先进的特高压交直流输电技术、智能化的高级电网调度技术、灵活交流输电技术(flexible AC transmission systems, FACTS)、大功率电力电子装置、广域继电保护系统、广域安全稳定监控系统、大规模可再生能源发电等。这些必将对电力系统仿真与建模提出更高的要求。

近年来, 中国电力科学研究院电力系统研究所, 在国家电网公司科技项目、国家科技支撑计划项目、国家自然科学基金等重大科技项目的支持下, 在电力系统仿真和建模领域持之以恒地进行了艰苦的研究与开发, 形成了具有自主知识产权、功能强大并在我国得到广泛应用的交直流电力系统多时间尺度

全过程仿真软件包——PSD 电力系统仿真软件(PSD power tools)。本文是近期研究与开发成果的总结。

1 电力系统仿真技术的发展

1.1 电力系统多时间尺度特性与仿真技术

电力系统是一个复杂的大规模非线性系统,含有大量不同时间常数的变量,有些变量具有快变特征而有些变量则具有慢变特征。因此电力系统是一个多时间尺度系统,从机电暂态过程的角度来看,它可以分为快变(电磁暂态)、正常速率(机电暂态)及慢变(中长期动态)3组变量,因而电力系统至少是3时间尺度动态系统^[1-3]。

由于电力系统的复杂性和多时间尺度特性,在进行电力系统仿真建模时,为提高计算效率,在机电暂态仿真中,通常忽略电磁过程的快动态和中长期过程的慢动态。即在机电暂态仿真中,认为电磁暂态过程已经结束,电磁暂态变量已衰减完毕,而中长期过程还没有开始变化,即中长期动态变量保持恒定。

随着直流输电和 FACTS 等电力电子装置和其它非线性元件广泛应用于电力系统,这些元件引起的波形畸变及其快速暂态过程对系统机电暂态过程的影响越来越大,相互独立的电力系统电磁暂态仿真程序和机电暂态仿真程序,已难以适应现代电力系统对仿真的要求。因此很有必要开发能进行电磁暂态过程和机电暂态过程混合仿真的电力系统仿真技术和软件。

随着电力系统远距离输电容量的不断增加,输电网络重载问题日益突出,电力系统在暂态稳定之后的中长期动态稳定性(包括电压稳定性问题)将逐步成为电力系统安全稳定运行的重要问题之一,威胁电力系统的安全稳定运行。分析电力系统的长过程动态稳定性问题,避免发生大面积停电事故,以及研究防止事故扩大的有效措施(即第3道防线),必将成为电力系统计算分析的一项重要内容。因此很有必要开发能够统一仿真机电暂态和中长期动态过程的电力系统全过程仿真技术和软件。

1.2 电磁暂态与机电暂态混合仿真

电磁暂态过程仿真是用数值计算方法对电力系统中从 μs 至数 s 之间的电磁暂态过程进行仿真模拟。电磁暂态过程仿真可以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的(避雷器、变压器、电抗器等)非线性特性,直流输电和 FACTS 装置的暂态过程。

由于电磁暂态仿真不仅要求对电力系统的动态元件采用详细的非线性模型,还要计及网络的暂态过程,这使电磁暂态仿真程序的仿真规模受到了限制。一般进行电磁暂态仿真时,都要对电力系统进行等值化简。

机电暂态过程仿真是基于基波、单相和相量模拟技术,对 HVDC 系统和 FACTS 装置的模拟采用准稳态模型,对于 HVDC 和 FACTS 等电力电子装置的快速暂态特性和 MOV 等非线性元件引起的波形畸变特性,还不能较精确的模拟。在交流系统不对称条件下,采用准稳态模型仿真 HVDC 系统和 FACTS 装置也是不精确的。

电磁暂态与机电暂态混合仿真的主要思路是把大规模电力系统分为需要进行电磁暂态仿真的子系统和仅进行机电暂态仿真的子系统,分别进行电磁暂态仿真和机电暂态仿真,在各子系统的交界处进行电磁暂态仿真和机电暂态仿真的交接,以提高机电暂态程序的仿真精度。

1.3 全过程动态(机电暂态与中长期动态)仿真

电力系统的动态过程(从机电暂态过程到中长期动态过程)是一个连续的过程,并不是截然分开的。暂态过程对中长期过程有影响,中长期过程对后续新的暂态过程也有作用,它们之间往往是密不可分的。电力系统全过程动态仿真就是把电力系统的机电暂态过程、中期动态过程和长期动态过程有机地统一起来进行仿真。

电力系统全过程动态仿真时间从几 s 到数十 min ,甚至若干个 h ,时间跨度大。因此需要采用自动变步长积分方法,在系统的快变阶段(机电暂态)使用小步长计算,而在慢变阶段(中长期动态)使用大步长。现有全过程动态仿真程序的数值积分方法大多采用 Gear 类变步刚性积分方法,这种方法的优点是暂态过程及中长期动态过程可以采用统一的模型和数值积分方法,在中长期动态过程中可以用大步长进行仿真。

电力系统全过程动态仿真除了用于常规暂态稳定程序能进行的分析计算工作外,还可以进行复杂和严重事故的事后分析,研究扰动后较长时间的事故重演,以了解事故发生的本质原因,研究正确的反事故措施等。因此研究全过程动态仿真技术,开发和完善全过程动态仿真程序,不仅能够提高我国在该领域研究和软件开发水平,而且给电网的安全运行分析和决策提供强有力的仿真工具。

2 多时间尺度全过程仿真软件开发的基础

多时间尺度全过程仿真技术和软件的开发基础是具有自主知识产权的 PSD 电力系统分析软件。该软件包是在 20 世纪 80 年代初在浙江大学韩祯祥院士和中国电力科学研究院张力平教授为首的一批专家学者从美国邦那维尔电力局(Bonneville Power Administration, BPA)引进的电力系统分析程序(BPA 程序)的基础上,经过持之以恒的消化吸收再创新和推广应用而形成的大型商用电力系统分析软件包^[4-6]。

PSD 电力系统分析软件功能强大、可靠性高、稳定性好、适应面广,经受了长期和大量的工程实践考验,仿真计算结果可信,适用于大规模交直流电力系统的全时间尺度全过程仿真计算分析。

PSD 电力系统分析软件的主要仿真计算分析功能模块包括: PSD-BPA 潮流计算程序、PSD-BPA 暂态稳定程序、PSD-FDS 电力系统全过程动态仿真程序、PSD-SSAP 电力系统小扰动稳定性分析程序、PSD-PSMODEL 电力系统机电暂态-电磁暂态混合仿真计算程序、PSD-VSAP 电力系统电压稳定分析程序、PSD-SCCP 电力系统短路电流计算程序、PSD-OPF 无功优化程序、PSD-PSDB 电网计算数据库系统、PSD-PCS 电力系统数字平台、PSD-NET 电力系统快速分布式统一计算平台、PSD-PSAW 系统分析集成平台、PSD 地理接线图格式潮流图程序、PSD 电力系统单线图格式潮流图程序、PSD-MyChart 稳定曲线对比工具、BPA-PSASP 潮流及稳定数据转换程序等^[7]。

PSD 电力系统分析软件中电力系统模型丰富、种类齐全。其特点为:有多种火电、水电、核电以及风电机组模型;励磁系统和调速系统模型可基于现场实测随时扩充更新;具有考虑配电网的综合负荷模型(SLM);国内独家实现的全过程动态仿真程序,包含多种中长期元件模型,能够准确仿真大电网机电暂态以及中长期过程;电力系统小扰动分析程序,计算快速准确,界面友好;电力系统机电-电磁暂态混合仿真程序,具有国内外主要直流厂家的详细控制系统模型,实现了电网对称及不对称故障条件下的 HVDC 和 FACTS 的电磁暂态-机电暂态混合仿真;电网计算数据库提供电网基础数据,数据权威性好、准确度高,软件界面集成操作、图形化界面、人机交互友好;在全国规划设计、调度运行、科研院所和高校得到了广泛应用。

3 多时间尺度全过程电力系统仿真研究开发新成果

3.1 电磁暂态-机电暂态混合仿真

2003 年,中国电力科学研究院系统所开始研发大规模交直流系统的电磁暂态和机电暂态混合仿真软件,在 PSD-BPA 暂态稳定程序中嵌入了 HVDC 和 FACTS 的电磁暂态模型,实现了电磁暂态和机电暂态的混合仿真,使之能较准确地模拟含有 HVDC 和 FACTS 装置的交直流电力系统在各种条件下的动态特性^[8-9]。

1) 大规模多馈入交直流系统电磁暂态仿真程序——PSD-PSModel 电磁暂态仿真软件。

PSD-PSModel 电磁暂态仿真软件适用于机电暂态与电磁暂态混合仿真的电磁暂态时域仿真程序,尤其着重于 HVDC 和 FACTS 设备与交流系统相互作用的仿真研究。既可以独立运行,完成局部系统详细电磁暂态仿真的任务,也可以与 PSD-BPA 暂态稳定程序联立运行,实现混合仿真的研究。

PSD-PSModel 开发了专用的类似于 PSCAD/EMTDC 的 6 脉动换流桥,并内置了锁相环、测量部分等;既有换流阀的电磁暂态模型,又在程序中内置了直流系统的准稳态模型;程序采用了考虑任意重事件发生的多步变步长电磁暂态仿真算法,对事件发生时刻计算精确、可以消除数值振荡、能处理任意组合的事件序列。

2) 考虑机电暂态网络三相不对称的机电暂态-电磁暂态混合仿真。

利用电磁暂态仿真模块 PSModel 与机电暂态仿真程序 PSD-BPA 实现的电磁暂态-机电暂态混合仿真。

机电暂态系统对电磁暂态系统的等效方法为:采用考虑三相不对称的诺顿等值模型,在每一个机电暂态-电磁暂态数据交换时刻,将基波正序、负序以及零序转换为三相诺顿等值电路以及三相注入电流源,并把诺顿等值电路参数传递给电磁暂态子系统。

电磁暂态系统对机电暂态系统等效方法为:采用在一个机电暂态仿真步长内三序恒定功率作为电磁暂态子系统等效来进行机电暂态子程序仿真。

当一个网络具有多回直流时,采用对每一回直流系统单独进行仿真计算,通过机电暂态网络将多回直流自然解耦,同时也提高了计算速度。

电磁暂态-机电暂态混合仿真模块,首次实现

了不对称故障条件下的混合仿真, 及多馈入直流系统的混合仿真。

3) PSD-PSModel 元件模型。

目前已经开发实现了以下几类电力系统元件:

- ①无源元器件, 包括电阻、电感、电容以及专用的高压交直流滤波器;
- ②变压器, 具有单相和三相的变压器模型;
- ③电源, 包括单相和三相的各种电流源和电压源;
- ④故障和开关元件, 包括三相各种不同的故障和三相可触发的开关元件;
- ⑤电力电子元件, 包括二极管、晶闸管、GTO 以及 6 脉动换流桥;
- ⑥直流系统, 即直流模型以及 6 脉动或 12 脉动的锁相环和触发脉冲发生器;
- ⑦测量元件, 即测量电压、电流、有功、无功以及基波相量的元件;
- ⑧机电-电磁暂态混合仿真接口、准稳态模型接口;
- ⑨全自定义的控制系统仿真模块, 采用搭模块方式实现控制系统的仿真。

3.2 电力系统机电暂态-中长期动态全过程动态仿真

1998 年, 中国电力科学研究院系统所开始研发电力系统全过程动态仿真程序, 已在实际工程中得到应用^[10-18]。

1) 电力系统全过程动态仿真程序——PSD-FDS 电力系统全过程动态仿真程序。

PSD-FDS 电力系统全过程动态仿真程序的数值积分是在 Gear 类算法的基础上, 采用了一种新的适合全过程动态仿真的组合数值积分算法。该算法有机地结合了固定步长隐式梯形积分法和变步长 Gear 法的优点, 并通过一定的切换策略, 使二者在仿真中自动切换。

固定步长的隐式梯形积分法和 2 阶变步长数值积分法都具有 A 稳定性且都是自启动的, 计算中 2 种方法可以相互切换, 可以使 2 种积分方法得到有机结合, 扬长避短, 根据电力系统动态过程的特点自动选择合适的积分方法: ①在电力系统全过程仿真的机电暂态过程中采用固定步长的隐式梯形积分法, 动态元件的微分方程和电力网络的代数方程进行简单迭代求解; ②在中长期动态过程中采用变步长的 Gear 法, 微分方程和代数方程联立求解; ③固定步长和变步长 2 种方法在仿真中依据一定的策略自动切换, 从而在保证数值稳定性和仿真精度的前提下, 克服现有变步长 Gear 法在机电暂态过程中计算效率低下和间断处理复杂的问题, 提高了程序的计算效率。

2) 中长期动态元件模型。

全过程动态仿真需要考虑时间常数较大的模型对动态过程的影响, 以及更多自动装置的动作, 如: 暂态稳定不予考虑的锅炉、水轮机模型、自动发电控制、变压器分节头的自动调整等, 因而模型的种类众多, 方程的阶数高。

连锁反应事故中, 继电保护和安全自动装置的动作行为极为关键, 是防止系统崩溃的重要防线, 因此需要建立继电保护装置模块库(包括主保护、后备保护、自动重合闸等)和安全自动控制装置模块库, 克服以往仿真软件不能真实反映因保护拒动或误动而产生连锁故障的缺点, 能够对电力系统全动态过程进行有效仿真, 为分析电力系统的中长期过程动态稳定性问题和研究防止事故扩大的有效措施提供强大的仿真功能。

3) 全过程动态仿真程序的应用。

①用于常规暂态稳定计算分析。

②电力系统发生多重连锁反应故障后的全过程模拟, 如系统解列、频率崩溃等过程; 对复杂和严重事故的事后分析, 以了解事故发生的本质原因; 研究正确的反事故措施, 为正确的安排自动装置提供有效的分析工具。

③动态电压稳定性分析。研究电压稳定性的机理和防止电力系统电压崩溃的有效措施。

④在规划设计阶段, 考核系统承受极端严重故障的能力, 即超出正常设计标准的严重故障, 以校核规划设计方案适应性。

⑤研究事故的发展过程和训练运行人员的紧急处理能力、紧急无功支援的有效性、旋转备用和旋转备用机组的安排和分布、自动发电控制策略等。

⑥研究锅炉控制系统(包括反应堆)和发电厂辅助设备在大扰动后的响应对发电厂运行特性的影响, 协调发电厂的控制与保护系统。

3.3 大规模电力系统小扰动动态稳定性分析程序

电力系统小扰动动态稳定分析程序是新一代电力系统频域特征值计算分析程序, 用于分析大规模交直流电力系统的小扰动稳定性计算分析, 已在国内的电力系统规划、运行和科研等部门中得到广泛应用^[19-21]。

程序中使用 2 种特征值计算方法: QR 法和隐式重启动的 Arnoldi 算法。前者用于小规模电力系统, 能求出系统中全部特征值; 后者用于大规模电力系统的部分特征值计算分析。支持多核心 CPU

或对称多处理器(SMP)计算机系统的并行计算。

利用先进的隐式重启动 Arnoldi 算法和稀疏矩阵技术进行特征值计算,收敛性好,计算可靠,系统的计算规模不受限制,能够很好地解决漏根问题;同时具有特征值、特征向量、机电回路相关比、参与因子、灵敏度等丰富的计算分析功能。

3.4 静态电压稳定分析程序

PSD-VSAP 静态电压稳定分析软件采用连续潮流法和模态分析技术进行电力系统的静态电压稳定性计算分析,可实现对系统的静态电压稳定裕度分析和模态分析,并具有良好的图形输出和结果显示功能。软件具有计算速度快、精度高、适应性强的特点,界面友好,能进行动态计算跟踪、多方式 PV 曲线比较、棒图比较等功能,使用方便灵活^[22]。

PSD-VSAP 静态电压稳定分析软件具有以下功能:

1) 静态电压稳定裕度分析。

可实现对单负荷母线、区域负荷母线的功率裕度和电压裕度计算,并可对全网负荷母线的功率裕度和电压裕度进行扫描。以线性模拟算法和连续潮流法计算系统的静态电压稳定裕度,使计算结果更加符合实际系统电压稳定分析的需要。

2) 模态分析。

利用模态分析技术确定电压失稳的最小奇异模式,并以负荷母线参与因子确定电网中的相对弱区域、弱负荷母线,作为无功补偿和低压减载措施的最佳选择;以最小奇异模式下发电机组无功变化灵敏度和线路无功变化灵敏度确定系统中的关键发电机组和关键线路。

3) 可用传输容量计算。

采用连续潮流法计算系统的可用传输容量,主要考虑的非线性因素有发电机无功出力限制、电压约束等,使计算结果更符合实际。

3.5 短路电流计算

PSD-SCCP 短路电流计算程序主要为电力系统电气设备的选择、开关遮断容量的校核、继电保护整定计算、系统接线方式的比较、不对称故障时线路零序电流分布对通信线路的扰动和多端口阻抗等值计算等提供高效、快速的计算手段。程序计算功能齐全,满足电力系统调度运行和规划设计部门的计算要求;且界面友好、菜单简洁明了、操作方便、输出功能强,可根据需要选择任意输出项。

PSD-SCCP 的特点有:可以按分区或电压等级分别进行三相短路电流水平和单相短路电流水平

扫描;可对单个节点不同故障形态下的短路电流进行计算;可对单条线路,不同位置和不同故障形态(包括对称和不对称故障)下的短路电流进行计算,对任意线路进行单相短路全线扫描,计算出相邻线路的零序电流变化曲线。可根据系统的拓扑结构进行多端口等值,给出等值系统的序阻抗参数。

3.6 无功优化程序

新版 PSD-OPF 无功优化程序采用改进的原对偶内点法和混合遗传算法 2 种算法,并针对无功优化的特点进行了改进。算法的目标函数为系统损耗最小,对应约束条件包括潮流方程等式约束,以及无功补偿设备的无功出力容量、发电机无功出力容量、变压器抽头和电压幅值约束等不等式约束。新版程序已在网省调度中心、电力设计院、中试所及供电公司得到广泛应用。

新版程序有预生成优化文件功能、快速计算功能和选择计算功能,可以方便地建立优化文件,并进行优化计算。

4 多时间尺度全过程电力系统仿真建模

4.1 同步电机模型

同步电机是电力系统中最重要动态元件,对同步电机的精确模拟,是整个电力系统仿真的基础。对同步电机数学模型的精确描述是原始 Park 方程,但是原始 Park 方程所需的参数不能直接得到,因而无法在电力系统仿真中直接应用。实际应用的是基于电机参数的 Park 方程。由于通过试验能够得到的电机参数少于原始 Park 方程要求的参数,因此必须在一定假设条件下,进行适当简化,得到用电机参数描述的同步电机模型。

分析了在原始 Park 方程的基础上导出的 2 种常用的基于不同基本假设的电机参数同步电机模型。指出了在接近临界状态时,2 种模型的仿真结果存在一定的差别,特别是在求取暂态稳定和小扰动动态稳定极限时,其极限值会有一定的差别。因此在比较不同的电力系统仿真程序的计算结果时,要考虑其同步电机模型的影响^[23]。

分析了电力系统仿真软件中得到广泛应用的简化同步电机模型中的几种运动方程的表达式,及其方程中阻尼系数的物理意义,以及各种运动方程对电力系统动态稳定特性的影响,提出了适用于电力系统动态稳定性分析的运动方程^[24]。

4.2 原动机调速器模型、励磁系统及 PSS 模型

提出并完善了电力系统稳定计算用励磁、调速

系统模型, 制定了相关的测试标准^[25]。

建立了发电机及其控制系统建模的有效工作模式, 包括参数测试、PSS 参数配置、仿真计算、电网扰动试验、仿真计算与扰动试验结果对比分析、评价并改进仿真计算精度、提出动态稳定解决方案等工作环节。

制定了《大型发电机励磁控制系统建模导则》、《电力系统稳定器参数整定导则》、《同步发电机原动机及控制系统建模导则》和《调速系统建模导则》。

提出了包含并联 PID 控制环节的励磁系统模型, 完善了过励、低励限制功能和整流器模型。

提出了原动机调速器分环节的建模、测试方法, 建立了电气液压式调速器模型, 完善了汽轮机和水轮机调速器原动机模型。

4.3 风力发电模型

开发了风电机组及其控制系统模型; 包括风速模型、保护系统模型(发电机转速保护、低电压过电压保护)和风力发电机组模型。

1) 固定转速风力发电机组模型。

变桨距型风力发电机组模型包括叶片、轮毂、齿轮箱、联轴器、异步发电机、机端补偿电容器组和桨距控制系统等。主要模型有: ①风功率模型。包括适用于定桨距型(失速型)风力发电机组和变桨距型风力发电机组的模型。②桨距控制系统模型。③风力发电机组模型。风电机是一个异步发电机, 模型与马达模型相似, 风电机组的滑差是负值、发出有功功率。

2) 变速恒频风电机组模型(GE 公司)。

该模型适用于 GE1.5 型和 GE3.6 型风电机组(双馈机组)。发电机模型与传统的发电机模型不同, 用代数方程和微分方程表示, 还包括转子双质量块模型、电气控制系统模型、风功率模型、桨矩角控制模型。

4.4 发电厂及其控制系统模型

对于电力系统全过程仿真, 不仅要考虑机电暂态过程, 还要考虑中长期过程, 因此需要包括广泛的电力系统中长期动态元件、保护和控制模型^[16,26]。

1) 火电厂动力系统模型。

火电厂模型由几个独立而又互相联系的部分组成, 包括锅炉汽轮机协调控制、汽轮机及其调速系统和锅炉及其控制系统。

锅炉模型可以模拟燃煤和燃油的火电厂动态

特性。汽轮机/锅炉控制包括锅炉跟随汽轮机控制、汽轮机跟随锅炉控制、锅炉汽轮机协调控制。

2) 水电厂水力系统模型。

水电厂水力系统模型包括水轮机导管的动态模型、同隧道多导管水轮机模型、水轮机调速器的动态模型。

3) 压水反应堆核电站动态模型。

压水堆核电站主要由核反应堆、稳压器、蒸汽发生器、汽轮发电机及其附属设备组成。程序实现了我国大亚湾核电站的简化模型。

4) 自动发电控制(AGC)模型。

AGC 模型可以实现联络线功率—频率控制和经济调度算法。AGC 的输入量有: 本区域的母线频率、联络线的交换功率、各调节机组的出力。

联络线的功率偏差量与频率偏差量乘以偏差因子后的值相加得到该区域的功率误差控制信号 ACE。ACE 信号在控制过程中有以下 2 种功能:

1) 由区域频率的增量及联络线的偏差量之和能判断功率增加或减少发生的区域, 即功率不平衡发生的区域。2) 通过修改 ACE 控制信号, 调节受控机组的出力, 使发电量和负荷量重新恢复平衡, 频率恢复到正常值, 联络线功率恢复到初始设定值。

对于多个区域的互联, 联络线的交换功率为该区域边界上所有联络线测量功率的总和。ACE 信号乘以一分配因子, 分配到各受控机组, 其中各调节机组的调节范围受一对称的调节限幅环节限制。

4.5 直流输电系统模型

1) 电磁暂态模型。

已经完成 4 套典型的直流系统控制模型: ABB 典型直流系统的控制器, 具有详细的换流器控制和部分极控、站控功能; 西门子典型的直流系统控制器, 具有详细的换流器控制和部分极控、站控功能; CIGRE 推荐的直流测试系统中简单的直流控制系统模型; Matlab 中一套较复杂直流控制系统的改进。

2) 准稳态模型。

在 PSD-BPA 暂态稳定程序中实现了以西门子典型的直流系统控制器为基础的 2 种直流控制系统模型; 加上 PSD-BPA 暂态稳定程序中原有的直流控制系统模型, 目前程序中共有 4 种两端直流控制系统模型可以使用。新准直流模型有 4 种直流附加控制模型: 频率限制器、双侧频率调制、有功功率调制、逆变侧熄弧角调制。能够模拟直流系统的单极/双极闭锁、单极闭锁及极间功率转移、直流功

率/电流改变等直流系统的故障和控制功能。

4.6 负荷模型

随着电力系统的发展,负荷模型对电力系统的仿真精度的影响变得更加敏感,特别是负荷模型结构的选取、参数的确定、配电网络的模拟和接入低电压等级的电源等对电力系统的仿真计算结果会有重大影响。

在 PSD 电力系统分析软件中实现了考虑配电网络的综合负荷模型(SLM),该模型结构合理,可方便地考虑配电网络和接入低电压网络的电源,符合电网实际^[27-28]。

4.7 FACTS 模型

针对 3 种基于电压源换流器的 FACTS 装置:静止无功发生器(STATCOM)、静止同步串联补偿器(SSSC)和统一潮流控制器(UAPFC),开发了能够与 PSD-BPA 潮流计算程序较好兼容的静态模型,提出了考虑直流侧电容动态过程的改进准稳态模型,在 PSD-BPA 暂态稳定程序实现了这 3 种 FACTS 装置各种模型的仿真模型^[29-32]。

开发了静止无功补偿器(SVC)、晶闸管可控串联电容器(TCSC)2 种灵活交流输电装置的电磁暂态详细建模。在电磁暂态-机电暂态混合仿真程序 PSD-PSMODEL 中建立了 SVC 和 TCSC 的详细电路和控制系统模型,实现了 TCSC 的过电压保护装置氧化锌限压器模型^[10]。

4.8 保护与自动控制装置模型

目前国内外广泛应用的电力系统仿真软件虽然提供了一些简单的继电保护模型,能够实现一部分简单的继电保护功能,但与我国目前电力系统中实际广泛应用的继电保护装置有着较大区别,不能反映我国电力系统中继电保护装置的动作特性。目前主要依靠人工设置预定时间开断来实现保护功能。在电力系统仿真程序中建立与我国实际应用的继电保护装置动作特性相一致的继电保护模型是非常必要的,能够有效提高仿真的真实性和准确性。

目前已完成的保护与自动控制装置模型有:新型低周低压减载模型、失步振荡解列模型、发电机转速保护模型、发电机定子过负荷模型、电容器和电抗器自动投切模型、低压自动切除电抗器模型、低压自动切除线路模型、过负荷自动切除线路模型、过负荷自动切除变压器各侧断路器模型、变压器分接头自动调整模型等。

5 结语

随着我国电网的发展,各种新技术、新设备的应用,对电力系统仿真和建模提出了更高的要求。交直流电力系统多时间尺度全过程仿真与建模研究开发的新成果,丰富和完善了具有自主知识产权的 PSD 电力系统分析软件的仿真能力和仿真功能,特别是机电暂态-电磁暂态混合仿真、机电暂态-中长期动态全过程仿真取得的突破,实现了交直流系统从电磁暂态、机电暂态到中长期动态的全过程仿真,进一步提高了我国电力系统仿真水平。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] Kurita A, Okubo H, Klapper D B, et al. Multiple time-scale power system dynamic simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 216-223.
- [3] 马凡, 马伟明, 付立军. 一种多时间尺度降阶原则及其在交直流电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 41-47.
Ma Fan, Ma Weiming, Fu Lijun. A multi-time scale order reduction principle and its application in AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 41-47(in Chinese).
- [4] 汤涌. 电力系统稳定计算隐式积分交替求解[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 1-3.
Tang Yong. An implicit integration alternating solution method for power system dynamic stability simulation[J]. Power System Technology, 1997, 21(2): 1-3(in Chinese).
- [5] 汤涌. 电力系统稳定计算复故障补偿算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 77-79.
Tang Yong. A compensation method for simultaneous faults simulation in power system stability simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 77-79(in Chinese).
- [6] 汤涌. 大规模电力系统仿真研究中的模型与参数[C]. 2006 年中国电机工程学会年会, 郑州, 2006.
- [7] PSD 电力系统分析软件简介[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [8] 刘文焯, 汤涌, 万磊, 等. 大电网特高压直流系统建模与仿真技术[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 1-3.
Liu Wenzhuo, Tang Yong, Wan Lei, et al. Modelling and simulation technologies for large UHVDC power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 1-3(in Chinese).
- [9] 万磊. 电力系统机电暂态-电磁暂态混合仿真中 FACTS 装置的建模与仿真研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [10] 宋新立, 汤涌, 卜广全, 等. 大电网安全分析的全过程动态仿真技术[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 23-28.
Song Xinli, Tang Yong, Bu Guangquan, et al. Full dynamic simulation for the stability analysis of large power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 23-28(in Chinese).
- [11] 刘涛, 宋新立, 汤涌, 等. 电力系统全过程动态仿真技术及其工程应用实践[C]. 2008 年中国电机工程学会年会, 西安, 2008.
- [12] 宋新立, 刘文焯, 汤涌. 一种计算微分代数方程组初始状态的简

- 捷方法[C]. 第九届全国微分方程数值方法暨第六届全国仿真算法学术会议, 上海, 2004.
- [13] 汤涌. 电力系统全过程动态(机电暂态与中长期动态过程)仿真技术与软件研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.
- [14] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程仿真的数值方法[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 7-12.
Tang Yong, Song Xinli, Liu Wenzhuo, et al. Power system full dynamic simulation, part I: numerical method[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 7-12(in Chinese).
- [15] 汤涌, 刘文焯, 宋新立, 等. 电力系统全过程动态仿真的故障模拟[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 1-5.
Tang Yong, Liu Wenzhuo, Song Xinli, et al. Power system full dynamic simulation, part II: fault simulations[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 1-5(in Chinese).
- [16] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真的数学模型[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 20-25.
Tang Yong, Song Xinli, Liu Wenzhuo, et al. Power system full dynamic simulation, part III: long term dynamic models[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 20-25(in Chinese).
- [17] 汤涌, 刘文焯, 宋新立, 等. 电力系统全过程动态仿真的算例与分析[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 5-8.
Tang Yong, Liu Wenzhuo, Song Xinli, et al. Power system full dynamic simulation, part IV: case studies[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 5-8(in Chinese).
- [18] 赵光明. 基于电力系统全过程动态仿真的数值算法和模型研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
- [19] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 基于隐式重启 Arnoldi 算法的电力系统小干扰稳定性分析软件开发[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(增刊): 248-251.
Zhong Wuzhi, Song Xinli, Tang Yong, et al. Development of power system small signal stability analysis software based on implicitly restarted Arnoldi algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(Supplement): 248-251(in Chinese).
- [20] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 新一代电力系统分析小干扰稳定性分析软件的研究与开发[C]. 中国电机工程学会电力系统专业委员会 2005 年度学术年会, 北京, 2006.
- [21] 仲悟之. 大型电力系统小干扰稳定性分析方法研究和软件开发[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [22] 马世英, 印永华, 汤涌, 等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 14-20.
Ma Shiyong, Yin Yonghua, Tang Yong, et al. Simulation and evaluation for short term and mid/long term voltage stability [J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 14-20(in Chinese).
- [23] 汤涌. 基于电机参数的同步电机模型[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 47-51.
Tang Yong. A discussion about standard parameter models of synchronous machine[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 47-51(in Chinese).
- [24] 汤涌. 简化同步电机模型中的运动方程[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 28-31.
Tang Yong. A discussion about equations of motion of simplified synchronous machine models[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 28-31(in Chinese).
- [25] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 发电机励磁和调速器模型参数对东北电网大扰动试验仿真计算的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 69-74.
Zhu Fang, Tang Yong, Zhang Dongxia, et al. Influence of excitation and governor model parameters on simulation of large-disturbance test in northeast China power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 69-74(in Chinese).
- [26] 宋新立, 刘肇旭, 李永庄, 等. 电力系统稳定计算中火电厂调速系统模型及其应用分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 44-49.
Song Xinli, Liu Zhaoxu, Li Yongzhuang, et al. Analysis on speed governing system model for fossil-fuel generating plant and its application in power system stability simulation[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 44-49(in Chinese).
- [27] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网络的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
Tang Yong, Zhang Hongbin, Hou Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 34-38(in Chinese).
- [28] 汤涌, 侯俊贤, 刘文焯. 电力系统数字仿真负荷模型中配电网、无功补偿与感应电动机的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 8-12.
Tang Yong, Hou Junxian, Liu Wenzhuo. The modeling of distribution network and var compensator and induction motor in the load model for power system digital simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 8-12(in Chinese).
- [29] 王皓怀, 汤涌, 卜广全, 等. 静止无功补偿器数学模型的建立及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(增刊): 79-83.
Wang Haohuai, Tang Yong, Bu Guangquan, et al. Model of STATCOM and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(Supplement): 79-83(in Chinese).
- [30] Hou J, Yin Y, Tang Y. The processing method of TCSC in the electromechanical transient analysis[C]. Proceedings of IEEE-PES/CSEE International Conference on Power System Technology, 2002, Kunming, China.
- [31] 王皓怀. 基于 VSC 的 FACTS 装置 STATCOM、SSSC、UPFC 的建模和应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [32] 侯俊贤. 固定串补和可控串补的电力系统机电暂态分析研究和应用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.



汤涌

收稿日期: 2009-07-03。

作者简介:

汤涌(1959—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事电力系统仿真与建模和电力系统运行与控制等方面的研究工作, E-mail: tangyong@epri.ac.cn。

(责任编辑 王晔)