

新疆电网全数字仿真系统的建设及思考

钟 显¹ 樊艳芳¹ 常喜强² 王 衡²

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 随着新疆电网的发展日益庞大,全网形成了 750-220 kV 主网架。伴随着风电、光伏等新能源的接入、哈密—郑州(±800 kV)特高压直流输电的投运及准东—川渝(±1100 kV)特高压直流输电的建设,整个新疆电网的运行也更为复杂。为了提高新疆电网安全稳定运行的能力,建设电网全数字仿真系统对新疆电网进行仿真模拟,并且对电网全数字仿真系统的仿真精度和可信度也提出了更高的要求。为此,介绍了新疆电网全数字仿真实验中的建设、新能源特性的仿真等研究,并对电网仿真系统中的海量数据提出了云技术数据管理中心和视景仿真应用于全数字仿真系统可视化处理的思路。

关键词: 电力系统; 数字仿真; 实时仿真; 云技术; 视景仿真

Abstract: Along with the rapid development of XinJiang power grid, 750 ~ 220 kV main grid is formed. With the new energy such as wind and photovoltaic connected to power grid, the operation of HaMi - ZhengZhou (±800 kV) UHVDC and the construction of ZhunDong - ChuanYu (±1100 kV) UHVDC, the grid operation in XinJiang becomes more complex. In order to improve the ability of safe and stable operation of XinJiang power grid, the digital simulation system is established for the simulation of XinJiang power grid, and the higher requirements for the accuracy and reliability of this system are also put forward. Therefore, the construction of digital simulation system and the researches on the characteristics of new energy are introduced. Also, the data management center with cloud technology and visual simulation are proposed to be applied to the visualization processing for the large amount of data in digital simulation system.

Key words: power system; digital simulation; real-time simulation; cloud technology; visual simulation

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0009-06

0 引 言

随新疆电网的大发展,融入风电、光伏等新能源,传统的方法对电网运行进行分析和监测难以满足要求。加上互联系统中含有交直流输电线路,而且广泛应用了电力电子装置,电网的稳控运行更复杂^[1]。目前,新疆电网形成了 750~220 kV 的主网架和 UHVDC(哈密—郑州±800 kV)的投运,加上 750 kV 超高压交流输电建设将发展构成环网。整个新疆电网的复杂程度更高,对新疆电网的安全稳定运行水平、规划预测能力及调度控制等提出了更高的技术要求。建设新疆对电网全数字仿真实验中心,实现有效的仿真和分析研究,对新疆电网甚至是全国电网的安全、可靠、经济运行都有着重要意义^[2]。

1 电力系统全数字仿真系统的概况

电力系统全数字仿真系统(下面称全数字仿真系统)是电力系统实时仿真技术经历了动态模拟仿真、数模混合实时仿真系统后,发展的一项新的仿真技术。20 世纪 90 年代初,随数字信号处理器(DSP)的兴起,加拿大 RTDS 公司首先推出的实时仿真系统(RTDS)。随后法国电力公司(EDF)开发的有实时和非实时仿真系统(ARENE)、加拿大魁北克水电研究所研发的数字实时仿真器(HYPER-SIM)、深圳殷图科技发展有限公司开发的数字动态实时仿真系统(DDRST)及中国电科院研发的全数字实时仿真装置(ADPSS)^[2]。它们都是依托各种设备为硬件平台,采用 CPU 并行处理技术。通过软件在 CPU 上运行来模拟电力元件,基于这个特点给

基金项目: 1. 新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2011105); 2. 国家自然科学基金项目(51367016)

未来元件仿真带来了发展空间^[1]。

目前,全数字仿真系统依托计算机技术、建模技术以及数值算法的发展,开展了电力系统的电网分析计算,使得硬件处理速度更快,模型、参数更准确和适应性更强。另外,全数字仿真系统在实现基本仿真的同时,需要更深的发展大规模实时与超实时仿真、在线应用,实现全过程动态模拟仿真,使仿真可信度与精度更高、功能性与综合性更强。

2 数字仿真系统关键技术

2.1 分网并行计算技术

在大规模复杂的交直流电网中为实现实时与超实时仿真,应用分网并行计算技术提高了仿真能力。由于仿真中没有网络的实际接线,针对变电站中刀闸、开关的影响难以模拟,通过把厂站的拓扑结构与电网中变化的拓扑结合分析来考虑刀闸、开关的动作影响;电网运行时设备的投切、参数变化及母线的分裂与合并等变化,均可采用并行仿真模式,可更真实地模拟电力系统运行。比如机电-电磁混合仿真,不再单纯地进行机电与电磁仿真,避免了较大的误差^[3,4]。但文献(1)提出,由于 CPU 并行处理技术的应用,相应地它们之间的通信、数据交换及不同模型的算法等因素,因而数值不稳定成了仿真规模的限制。电力系统分网并行计算示意图如图 1 所示。

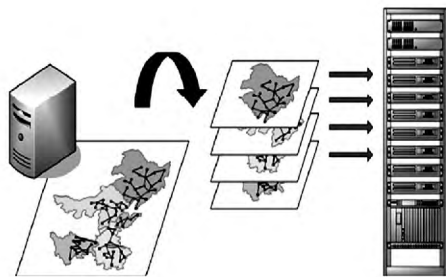


图 1 电力系统分网并行计算示意图

2.2 系统辨识技术

系统辨识(system identification),即“动态建模”,也就是利用被控制系统的输入、输出数据,经计算机数据处理后,估计出系统的数学模型。在电力系统仿真中,通过系统辨识技术中的参数辨识,来检验模型是否正确(或者接近)描述了原系统。即模型输入/输出是否充分接近原型系统的输入/输出

行为。这样检验了仿真模型在多大程度反应真实系统,有助于提高全数字仿真系统的准确性与可信度。

3 典型的全数字仿真系统的功能比较

目前主要应用典型的全数字仿真系统是 RDTs、HYPERsIM 及 ADPSS 系统,介绍如下。

1) RTDS 系统以电磁暂态仿真为研究,既可进行继电保护装置及控制系统的闭环测试,也可进行大规模的动态模拟仿真分析。具有友好的界面支持,给学习人员提供方法、工具^[7];

2) HYPERsIM 系统既可实现机电暂态、电磁暂态的实时仿真,也可进行装置实验,但目前对于二者的混合仿真却实现不了^[1,2];

3) ADPSS 系统可实现机电暂态与电磁暂态的实时、离线仿真,还可实现机电暂态的分网并行计算、继电保护试验;它利用 EMS 和 SCADA 系统接收测得的实时数据,处理后连接至继电保护、PSS 等装置实现闭环测试,它与 MATLAB 的联合性很强,可自定义完成功能任务^[5,6]。

对 RDTs、HYPERsIM 及 ADPSS 系统的技术功能进行比较,如表 1 所示^[1,5,6]。

根据表中 3 种典型系统的比较可知,在全数字仿真系统实现基本功能的前提下,ADPSS 系统突出特点是能够进行大规模的机电暂态仿真、机电-电磁混合仿真;在实现电网安全自动(安全稳定)装置的协调控制策略研究中,ADPSS 系统实现的效果则更优;励磁系统仿真和装置试验中,ADPSS 系统具有丰富的励磁系统仿真模型。包括直流励磁机、交流励磁机和静止励磁系统等 30 多种同步发电机的励磁系统模型,在中国可以进行绝大部分励磁系统的模拟仿真,满足电网稳定计算的要求;在其他方面的应用也更广泛。而对于 RDTs 与 HYPERsIM 系统,它们实现机电暂态仿真的规模要小;机电-电磁混合仿真、机网协调功能也无法实现。

4 新疆电网全数字仿真系统的建设

4.1 新疆电网全数字仿真系统的构建

新疆电网全数字仿真系统在硬件上提出了高要

求,以 ADPSS 装置为核心设备,加上 40 台高性能的计算服务器、8 台数据服务器、6 台应用服务器、1 个磁盘阵列和 12 台 PC 终端机构成的机群。利用机群和并行计算技术实现大规模复杂交、直流的电磁暂态和机电暂态仿真、电磁-机电暂态混合仿真及对外接物理装置进行仿真实验。高性能的机群服务用户还还可由需求扩展节点,容易实现;并可以把数据网与管理网络分离,提高了网络的传输速度与可用性。新疆电网全数字仿真系统数据管理采用 PSDB 电网计算数据管理系统,来实现规划与调度数据的统一,协同调试运行方式。通过基础数据与应用数据平台,能够协同多地部门异地共同维护和管理电网各类数据,实现调度运行和电网规划的相关计算分析。PSDB 电网计算数据管理系统如图 2 所示。



图 2 PSDB 电网计算数据管理系统

4.2 新疆电网全数字仿真系统的研究

目前,新疆电网全数字仿真系统实现功能有全数字仿真实验、综合仿真应用及全过程仿真安全评估 3 个方面。针对仿真,该仿真系统进行了风电并网中 SVC 并列运行仿真。

当前新疆电网投入大量的 SVC 装置,实际上由于系统电压波动,SVC 协调控制系统响应时间慢,协调性、可靠性和稳定性能差,严重影响 SVC 装置功能发挥,从而影响了风电发展。在新疆全数字仿真系统仿真中应用发电厂并列运行机组的调差理论,对并列运行的 SVC 进行仿真。图 4 是在模拟风电场 35 kV 低压侧把 1 号与 2 号 SVC 装置并列运行,当 SVC 无调差情况下进行阶跃性扰动时电流的输出曲线。由图 4 可见,两台 SVC 无功补偿装置不具有进行相互协调的调节能力,故系统无法进行平衡运行。

表 1 数字仿真实验中心 3 种系统的比较

| 项 目 | RTDS | HYPERSIM | ADPSS |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 电网协调功能 | 无 | 无 | 需开发 |
| 在线数据接口 | 无 | 无 | 有 |
| 潮流计算 | 有 | 有 | 有 |
| 机电暂态仿真 | 小规模 | 中等规模 | 大规模 |
| 电磁暂态仿真 | 有 | 有 | 有 |
| 机电-电磁混合仿真 | 无 | 无 | 有 |
| 用户自定义模型接口 | 有 | 有 | 有 |
| MATLAB 接口 | 有 | 有 | 有 |
| 物理装置接口 | 有 | 有 | 有 |
| 电网分析计算功能 | 有 | 有 | 有 |
| 电力系统数学模型验证研究 | 有 | 有 | 有 |
| 电力系统故障的再现和分析 | 有 | 有 | 有 |
| 继电保护和自动(安全稳定)装置的检验和试验研究 | 有 | 有 | 有 |
| 励磁系统仿真和装置的试验研究 | 有 | 有 | 有 |
| 新技术、新设备进行检测和试验 | 有 | 有 | 有 |
| 网络划分 | 有 | 有 | 有 |
| 电网安全自动(安全稳定)装置的协调控制策略研究 | 有 | 有 | 有(效果好) |
| 交直流混合仿真 | 可以 | 可以 | 可以 |
| 硬件结构 | 多个 DSP 芯片并行计算 | SGI 服务器或 PC | 集群计算机 |
| 硬件升级费用 | 购买新 RACK 费用高 | 更换高性能服务器费用较高 | 增机群服务器和网卡费用低 |
| 实时性 | 最好 | 好 | 好 |
| 图形化界面 | 英文界面 | 英文界面 | 中文界面 |
| 应用情况 | 大规模的仿真、高压直流模拟、交流暂态网络分析、测试继保装置及安全自动装置 | 电磁暂态仿真、装置试验、直流系统的动态性仿真 | 大规模交、直流模拟机电暂态分网并行计算、电磁暂态仿真、继电保护试验 |

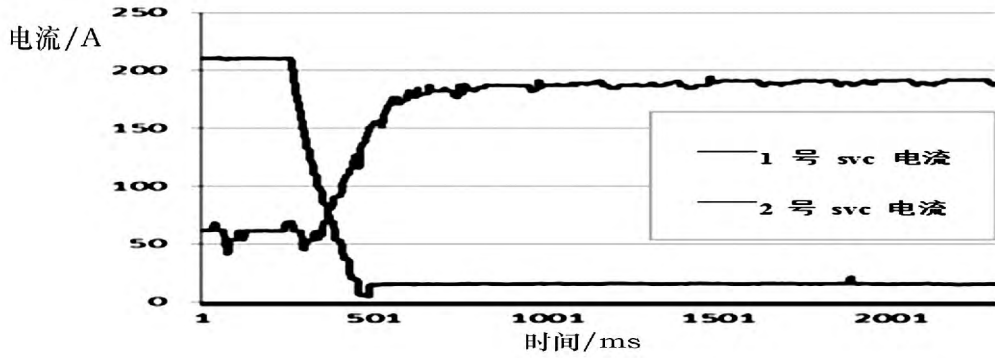


图 3 无调差时阶跃扰动并列运行时 SVC 电流输出

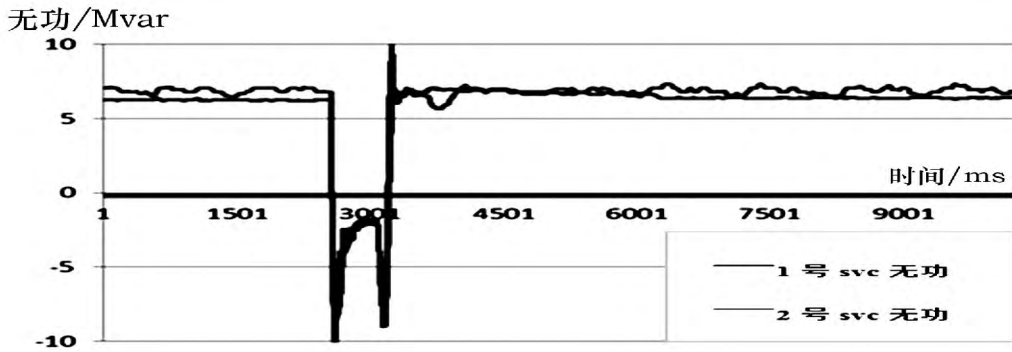


图 4 有调差时并列运行 SVC 的无功输出

图 4 是 2 台 SVC 无功补偿装置在故障前以恒调差为 5% 时进行并列运行。当模拟风电场并网点 110 kV 高压侧发生短路故障, 110 kV 电压突然跌落到 0.4(p. u.) 时, 并网点处于低电压状态, 此时 SVC 无功补偿装置发出正确的动作且进行及时电压调整, 因此保证 SVC 合理动作。故障消除后 2 台 SVC 无功补偿装置都能恢复稳定, 进行并列运行。

由上看出, 仿真中解决了 SVC 调差系数的难题。并且, 在新疆华电十三间房风电场进行了现场测试验证, 验证了在并列运行的 SVC 设置合理调差时提供合理的电压波动阻尼, 并实现 SVC 无功装置合理的无功分配能力。

此外, 一方面应用该系统还进行了大规模交直流混联系统的仿真分析。如图 5 所示, 新疆电网建设了新疆与西北主网的 750 kV 的第二通道工程及哈郑直流输电线路。

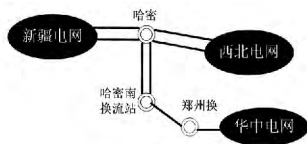


图 5 接线图

应用新疆电网全数字仿真系统建立了包含

(±800 kV) 哈郑直流在内的交直流混联系统的仿真模型, 进行了交、直流混联系统的潮流、暂态稳定及暂态稳定的仿真研究, 得知了混联电网的特性。并对哈郑直流模型还进行了单极闭锁故障、双极闭锁故障的仿真, 研究了系统中的稳定性, 并综合评估分析后, 应用于运行的大电网。

另一方面, 该系统实现了数据中心与协同计算。该系统的数据中心是将仿真实验数据、实时运行数据进行规划、研究, 并建立了数据中心维护机制, 定期进行维护、校核; 为了实现多级调度机构异地并行的数据管理以及联合方式计算。首先对新疆地区分区, 再对每一个地区的元件参数, 比如发电机、变压器及输电线路的参数通过仿真软件进行校核, 对不同电压等级进行数据分压处理。再利用调度数据管理平台进行统一整理, 形成原始的数据库。对处理好的数据通过协同计算, 与国网调度系统的数据中心平台实现对接、分割, 通过分布联合工作, 提高效率和管理水平。

最后, 应用该系统进行了风电的低电压穿越、电力系统故障的分析与反演、安全自动装置的协调控制策略研究、继电保护和自动装置的检验和试验研究等。

5 全数字仿真系统建设应用的几点思考

(1) 数据中心的升级处理——云技术

目前全国各电网应用全数字仿真系统是建立数据中心对自身的数据进行存储,需要硬件上配备高性能的服务器构成 PC 机群;对数据的管理需要采用数据管理软件进行管理应用。再就是地域性因素导致设备维护分散,数据管理不集中及消耗大量的人力资源。云技术在信息技术的处理能力方面强大,采用多个用户计算服务的方式,为用户提供计算力、各种软件服务和存储空间。可见该技术善于数据存储和计算服务功能。

基于电网全数字仿真系统中数据中心的问题,借鉴目前云计算技术在谷歌、雅虎等搜索引擎中处理海量数据的应用,来对全数字仿真系统的数据进行云技术处理。用户可以通过云数据中的节点获取数据,比如说进行仿真试验、安全评估及与调度配合进行任务的分配和资源管理等。云结构如图 6 所示。

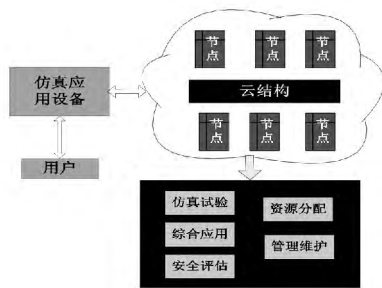


图 6 云结构

首先,形成自己的数据云。就是用大量的服务器形成大规模用户终端系统进行应用服务,对数据应用多副本纠错,结构相同的节点可进行交替,保证数据的可靠性;接着是数据的存储。数据包括实时监测数据和仿真数据,在这两类数据中,可对每一类的公共数据统一某一节点进行存储。如发电机、变压器及线路的参数模型数据,对各个地区的数据进行节点分开存储。当进一步进行数据分类时,可分为正常运行、故障的实测数据及仿真试验验证的数据等;再就是,数据的管理维护。在数据服务平台上,可设置访问权限,不同的部门设置不同的访问等级。如国调部门可以调用全国各地区的数据,而省调只能访问到新疆电网的数据和共享的数据资源,地调的权限则更低。当不同的地区间访问时,可以通过访问申请或设置其他账号来访问,并且在各个

地区通过云对自己的数据进行更新处理。以访问日志的形式监管云数据库的访问及流动情况;最后,需要加强数据安全和保密措施。

(2) 可视化的深度处理——视景仿真

随着电网调度自动化的发展,通过具有可视化的 EMS 系统对电网进行监测管理。因而可视化技术不断研究发展。根据这一思路,可应用可视化技术在全数字仿真系统实现仿真过程的直观逼近模拟。

如全网的潮流动态图中,依据视景仿真形成潮流三维图。首先,建立三维模型。建立发电机、输电线路、变压器、母线等设备及拓扑结构的其他信息模型数据,为了增强效果还可以建立地理图的模型数据;接着应用图像图形处理技术,构造出电网的三维地理接线图;再就是仿真的再现。实时监测数据在仿真系统进行试验验证时,不仅形成三维潮流的动态画面,还显示电气设备的运行状态。并且,利用拼接技术进行仿真图形的缩放处理,调出厂站及变压器的接线情况。当仿真过程中进行故障分析,可以进行预警、警告的可视化显示。视景仿真模块图如图 7 所示。

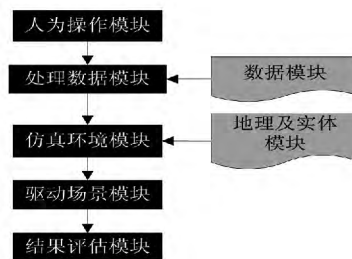


图 7 视景仿真模块

它包含人为操作模块,能提供仿真界面环境,在窗口观察、显示重要数据功能;数据模块可分为实时数据和仿真数据。该模块把获取的数据进行处理,归类、筛选、过滤;仿真环境模块是导入仿真的地理图及实体图,显示模拟的三维仿真环境;驱动场景模块是模拟环境的动态化驱动;结果评估模块将仿真数据与正常或故障运行时的数据比对,进行验证和试验,显示评估结果。可见,视景仿真更能真实逼近的模拟仿真,视觉上给人强烈的冲击,使调度人员快速获取电网运行状态,提高工作效率。

(3) 智能化仿真分析报告

由全数字仿真系统知道,它能够进行电网分析一系列功能的试验与验证。至于仿真数据的

分析,需要人为的通过波形、数据等的分析得出结论。当电网变得更加复杂及需要处理的数据较多时,人为的因素可能影响到工作效率和质量。因此,提出了全数字仿真智能化仿真分析报告的自动生成思路。

智能化仿真分析就是自动的分析仿真结果而生成报告文件。比如,在励磁系统仿真和装置的试验研究中。首先是数据的获取,将电网中实际运行的励磁系统通过励磁方式、控制方式及发电机 PSS 稳定性进行分类,利用实时监测获取数据,如发电机在不同的出力时,对应的定子电压、电流、转子电流是多大以及相序参数。并且,对发电机在正常运行及受到干扰情况下,通过功角稳定性分析,哪些情况下失稳,哪些情况下稳定。这时所获取的各项数据是相对比较精确的,也就是在一个特定的范围内能保证励磁系统的正常工作,因而形成一个梯度的数据库;接着数据分析,比如在发电机功角稳定性分析中,正常运行能保证系统中的节点电压幅值、频率大小以及功率传输为稳定值;受到扰动时功角发生变化,严重时导致发电机失步等分析结果形成典型的分析文件。并且,对于发电机失稳时,建议应该采取怎样的操作措施也提出在分析报告文件中。因而对各种分析形成分析报告文件库。

这样,在全数字仿真对励磁系统模型进行试验验证时,就可以直接得到模型参数与实际参数的差别,并且通过智能化分析直观地看到分析结果。此外,在电力系统故障的分析与反演等其他研究中,同样建立数据库和分析文件库进行智能化分析。智能化分析结构如图 8 所示。

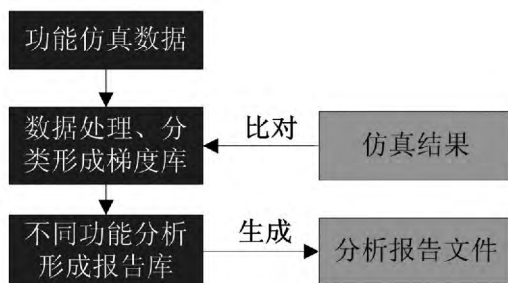


图 8 智能化分析结构

(4) 与继电保护故障信息系统的配合

当运行的电网发生故障时,在 SCADA/EMS 平台取得实时数据,全数字仿真系统是进行故障的分析和实现该故障的再现;而继电保护故障信息系统(下面称保信系统)是将数据进行过滤、筛选,智能

分析故障并作出处理决策。发现两者可以依据实时数据进行分析,但处理侧重点不一样,因而形成两个系统在功能上配合的思路。对于实时监测的故障数据,利用全数字仿真系统分析和反演验证后,再进行数据的分类、过滤及筛选,建立保信系统的数据信息;而保信系统在对故障分析处理作出决策后,反过来可利用全数字仿真系统来验证处理决策是否正确,能否恢复电网的正常运行。两者相互配合,对调度人员提供详细分析依据的同时,在电网安全运行及实时监测系统建设中提供子系统,从而有力支撑电网的稳定运行。

此外,还可以建立调度人员培训平台,通过截取数据对负荷预测、厂站监控及模拟真实环境仿真等一系列培训;多直流输电系统的仿真、风光储能系统的建设及负荷模型的搭建方面可以利用全数字仿真系统进行更深的研究。因而不断完善全数字仿真系统的功能建设,有助于提高调度一体化的能力水平。

6 结 论

电力系统全数字仿真系统对于电力系统的运行与安全监测发挥着重要作用。仿真系统与故障信息系统、安全评估预警系统以及安全稳定控制测试系统一起共同作用,构建了大电网的运行仿真、实时监测及安全评估等功能。新疆电网全数字仿真系统需要创新提升、完善建设,实现从电网规划到生产运行、科研研发应用服务一体的全数字仿真中心。基于该仿真系统建设的思考,提出了云技术、视景仿真技术、智能化分析及保信系统间的配合等应用的新思路。无论通过什么方式完善全数字仿真系统功能建设,在如今的大电网发展中,都具有广阔的应用前景。

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, 16(17): 66-70.
- [2] 李升健, 于伟城, 黄灿英. 电力系统实时数字仿真技术及其应用综述[J]. 江西电力, 2012, 36(5): 73-76.
- [3] 田芳, 李亚楼, 周孝信. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
- [4] 田芳, 董春晖, 李亚楼, 等. 电力系统运行及安全监控仿真系统的研究与开发[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 80-86.

(下转第 45 页)

难度大,投资较大。

适用性比较:硬接点适合于常规站或者不具备通信能力的视频监控系统;GOOSE 联动方式适用性好,能应用于任何监控系统与视频监控系统;MMS 联动适用于具有 61850 通信能力的视频监控系统;一体化联动方式则适用性较差,对于已经建成的智能站不适用,适合于新建智能站并采用一体化设计的系统。

4 一种组合式智能联动方式应用

根据上述联动方式的比较,考虑到目前智能变电站的发展情况,采用 GOOSE 联动方式是较为灵活、可靠性较高、易实现、投资较少的一种方式,并且适用性广,可适用于任何智能站不同的监控和视频监控系统。为了实现更强的功能,可将智能终端 GOOSE 联动和测控 GOOSE 联动进行组合联动,这样既可以实现断路器和隔离开关位置变位联动(如因保护跳闸等),也可以实现遥控时预先进行摄像头定位,从而实现监控系统和视频监视系统的联动高级应用,目前该种联动方式已在 110 kV 实训智能变电站得到了良好应用,实现了顺控联动(预先定位)、仿真培训变位联动、油位告警联动等功能。

参考文献

- [1] 苏永春,辛建波,龚晓波. 数字化变电站保护与视频系统联动控制方案[J]. 中国电力, 2010, 43(4): 33-37.
- [2] 徐胜朋,姜利,袁建学. 利用变电站远程视频系统实现安全监控[J]. 电力系统通信, 2008, 29(190): 15-21.
- [3] 黄敏,乐坚浩,王志毅. 220 kV 变电站远程视频监控中心系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 69-71.
- [4] 娄源利,龚晓波,胡敏强,等. 与 GOOSE 通信联动的数字化变电站遥视系统的研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 69-71.
- [5] 龚晓波,吴在军,胡敏强,等. 与 GOOSE 联动的数字化变电站遥视系统[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 94-98.

作者简介:

- 廖小君(1974), 硕士, 副教授, 从事继电保护方面研究及信息系统方面的研究;
- 黄忠胜(1982), 硕士, 讲师, 从事继电保护和智能变电站二次系统方面的研究;
- 吕飞鹏(1968), 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和综合信息处理智能系统方面的研究。

(收稿日期: 2014-06-03)

(上接第 14 页)

- [5] 郝晓平. 电力系统实时数字仿真技术及应用发展[J]. 湖北电力, 2009, 33(4): 7-9.
- [6] 叶廷路, 王晓蔚, 高骏. 电力系统全数字仿真装置在河北电网的应用调试[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 105-108.
- [7] 柳勇军, 梁旭, 阎勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 39-42.
- [8] Kosterev DN, Taylor CW, Mittelstadt WA. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage[J]. IEEE Trans. Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [9] 张晋华, 刘云, 印永华. 特高压交/直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2008, 31(23): 1-5.
- [10] 杜瑾. 云计算在军事仿真中的应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(25): 6995-6997.
- [11] 田芳, 宋瑞华, 周孝信, 等. 全数字实时仿真装置与直流输电控制保护装置的闭环仿真试验及分析[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 57-62.
- [12] Tian Fang, Li Yalou, Zhou Xiaoxin, and et al. Research, Development and Application of Advanced Digital Power System Simulator(ADPSS) [C]. The International Conference on Electrical Engineering, Okinawa, Japan, 2008.

- [13] 刘钟淇. 风力发电系统中的实时数字仿真技术[J]. 风能产业, 2010(3): 46-51.
- [14] 张松树, 陈勇, 李芳, 等. 电力系统运行方式计算协同系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 270-274.
- [15] 赵林, 王丽丽, 刘艳, 等. 电网实时监控可视化技术研究与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 538-543.
- [16] 刘健, 谢旭, 牛四清, 等. 电网调控仿真培训系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 127-131.
- [17] 程斌, 刘峥, 杨林. 基于视景仿真技术的飞行训练过程仿真再现方法研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(增): 379-382.

作者简介:

- 钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;
- 樊艳芳(1971), 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;
- 常喜强(1976), 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;
- 王衡(1984), 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2014-04-14)