

多级控制中心全局电网潮流计算及闭环控制仿真系统

顾慧杰¹, 王彬², 赵旋宇¹, 郭庆来², 周华锋¹, 孙宏斌², 汤磊²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623;

2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了模拟电网互联一体, 但调度控制分层分区进行的特点, 研发多级控制中心协同的全局电网潮流计算及闭环控制仿真系统。介绍其关键技术实现, 包括定关口的模型拼接、定关口模型拆分、连续数据断面拟合、多用户任务调度和并行处理以及模拟子站控制等。通过与实时系统以及与调度员培训仿真系统的对比说明该系统特点。以南方电网为应用对象, 搭建网省地一体化全局潮流计算及闭环控制仿真系统, 为验证多级控制中心协调控制策略提供仿真基础。

关键词: 电力系统; 多控制中心; 协调控制; 闭环仿真

Simulation of global power flow calculation and closed-loop control for multi-level hierarchical control centers

GU Hui-jie¹, WANG Bin², ZHAO Xuan-yu¹, GUO Qing-lai², ZHOU Hua-feng¹, SUN Hong-bin², TANG Lei²

(1. China Southern Power Grid Dispatching Control Center, Guangzhou 510623, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Traditional automatic control systems are deployed in independent control centers, while the power system is interconnected and controlled respectively. In order to simulate this feature, the global power flow calculation and power system closed-loop control for multi coordinated control centers is proposed. Some key technologies are introduced, including the standardized model combined/split technology, the continuous data section fitting technology, multi-user scheduling and parallel processing technology, the slave station simulation technology, etc. By comparing with the real-time system and dispatcher training system, the features of proposed method are described. Based on the proposed method, the China Southern Grid simulation system integrated for grid, provincial and district power system is constructed, which can be used to verify the coordinating control strategy among multi-level hierarchical control centers.

This work is supported by National Science & Technology Pillar Program (No. 2013BAA01B03), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51025725), National Natural Science Foundation of China (No. 51277105), State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS13007), and Key Research Program of China Southern Power Grid Company (No. K-ZD2012-014).

Key words: power system; multi-level hierarchical control centers; coordination control; closed loop simulation

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0052-08

0 引言

当前, 在各控制中心内建设自动控制系统来实施自动控制已成共识^[1-6]。自动控制系统的投入对保证电网的安全优质经济运行发挥了重要作用^[7-19]。

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAA01B03); 国家杰出青年科学基金(51025725); 国家自然科学基金(51277105)资助项目; 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS13007); 南方电网公司科技项目(K-ZD2012-014)

为了验证自动控制系统的可靠性、有效性, 需要对自动控制系统的控制指令进行分析验证, 目前验证控制策略的仿真方法主要有两种:

(1) 简单算例仿真。利用标准系统或实际现场系统给出的孤立断面, 进行控制计算给出控制策略, 简单人工分析。该方案操作简单, 但该方案忽略断面之间的前后联系, 只能验证单步控制逻辑, 无法模拟电网连续运行时的真实情况。

(2) 电力系统模拟闭环控制。使用调度员培训仿真系统^[20-21](Dispatcher Training Simulator, DTS)

来模拟电网连续实时断面, 控制系统从 DTS 中获取实时数据并将控制策略交给 DTS 执行。该方法计算能仿真电力系统的连续变化过程, 但是各级控制中心的 DTS 只能模拟所管辖的部分电网, 电网互联一体, 相互影响, 需要将控制策略放到全局电网来验证其控制策略的合理性。

(3) 实际系统验证, 直接将控制方法应用于实际通过开环策略分析和闭环控制效果评估来验证控制方法的有效性。这种方法风险极大, 不能进行异常测试, 不能验证控制方法在电网极端运行条件是否可以正常工作。

本文提出了一种适用于中国电网特点的网省地一体化全局电网闭环控制潮流仿真方法, 通过模型拼接和合并技术, 构造了全局电网以及各控制中心可观测到的部分电网模型, 以连续的潮流计算来模拟电网的连续变化, 通过模拟子站技术来实现仿真电力系统的闭环控制功能。

1 系统结构

本文提出的网省地一体化全局电网闭环控制潮流仿真系统结构如图 1 所示。

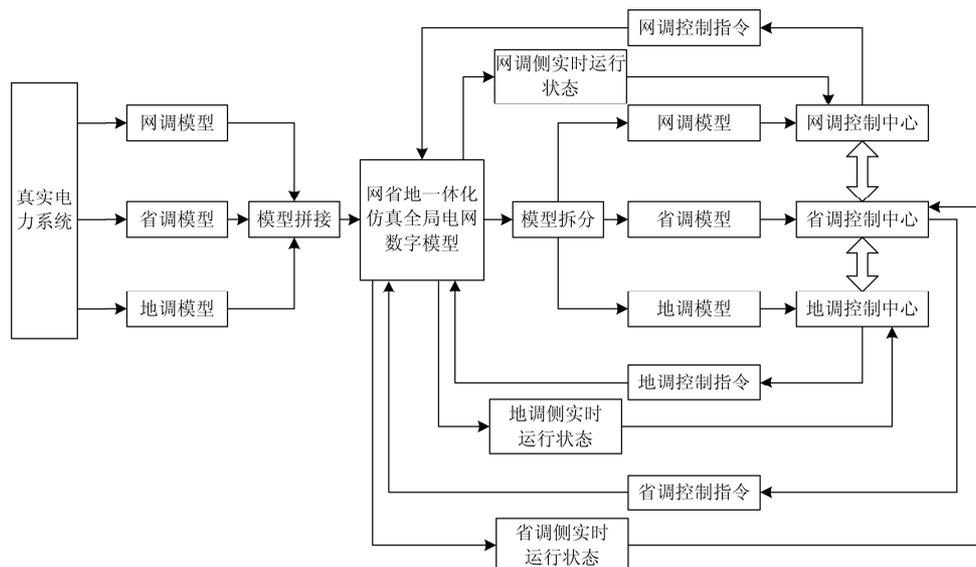


图 1 仿真系统结构

Fig. 1 Structure of simulation system

整个控制系统可以分为仿真电力系统和模拟控制中心两个模块。

(1) 仿真电力系统通过潮流计算来得到全网的运行状态, 同时支持接收仿真控制策略并通过潮流调节作用到仿真电网, 从而改变其运行状态。

(2) 模拟控制中心负责接收仿真电力系统生成的仿真电网数据并生成控制策略, 并将产生的控制策略送至仿真电力系统。

在仿真过程中, 仿真电力系统和模拟控制中心之间存在数据交换, 图 2 给出了其数据交互流程。

数据交互过程描述如下:

(1) 从网/省/地各级控制中心得到各控制中心可观测到的真实电网模型。

(2) 通过模型拼接技术, 得到网省地一体化的全局电网仿真模型。

(3) 通过模型拆分技术, 依调度关系, 得到网/省/地各自控制中心仿真所用的局部电网模型。

(4) 进行网省地一体化的全局潮流计算, 模拟

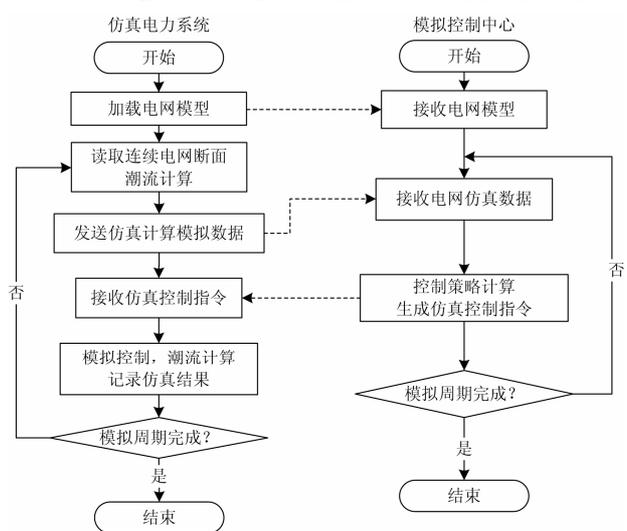


图 2 仿真系统的数据流程

Fig. 2 Flow chart of control simulation system

构造数据采集与监视控制系统 (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), 生成网省地一体化电网的仿真状态。

(5) 网/省/地各级控制中心从模拟 SCADA 中得到各自可观测电网的实时运行状态, 并进行控制计算, 并发送至模拟 SCADA。

(6) 模拟 SCADA 接收并执行网/省/地各级控制中心生成的控制指令, 通过全局电网潮流仿真, 更新其仿真运行状态。

2 关键技术研究

从数据流程的交互内容来分析, 为实现仿真功能, 需要解决以下几个关键问题:

- (1) 如何得到仿真所用的电网模型?
- (2) 如何实现仿真电力系统的连续仿真?
- (3) 如何实现仿真电力系统与模拟控制中心之间的数据交互?
- (4) 仿真电力系统中如何执行模拟控制中心下发的控制策略?

针对以上四个问题, 本节将重点讨论其技术解决方案。

2.1 模型拼接与拆分

模型拆分和合并技术可解决电网模型从哪里来的问题。

目前 IEC61970 标准在控制中心已得到普及应用^[22]。实际电力系统可以将电网模型导出为标准格式文件 (包括 CIM/XML 格式^[23]或 CIM-E 格式^[24]), 再导入到仿真电力系统中, 形成仿真电力系统。

电网互联一体, 但调度分层分区进行, 从各控制中心拿到的电网模型只是全局电网的一部分, 为了建立网省地一体化的全局电网模型, 需要利用模型拼接技术来生成全局电网仿真模型; 并利用模拟拆分技术得到全局电网模型相一致的各控制中心可观测电网模型, 如图 3。

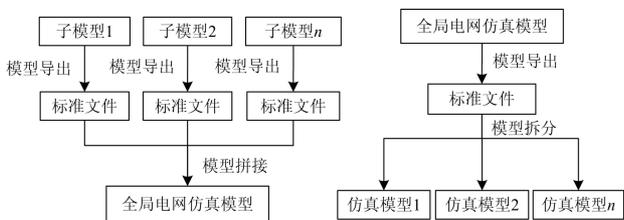


图 3 模型拆分/合并应用场景

Fig. 3 Flow chart of power system model splitting and combining

(1) 模型拼接技术

通过给定的各子系统关口和全网拓扑, 删除外网部分或等值部分, 将各子模型的保留部分通过关口合并, 最终得到全局电网模型 (本文称为定关口合并法)。其合并流程如图 4 所示。

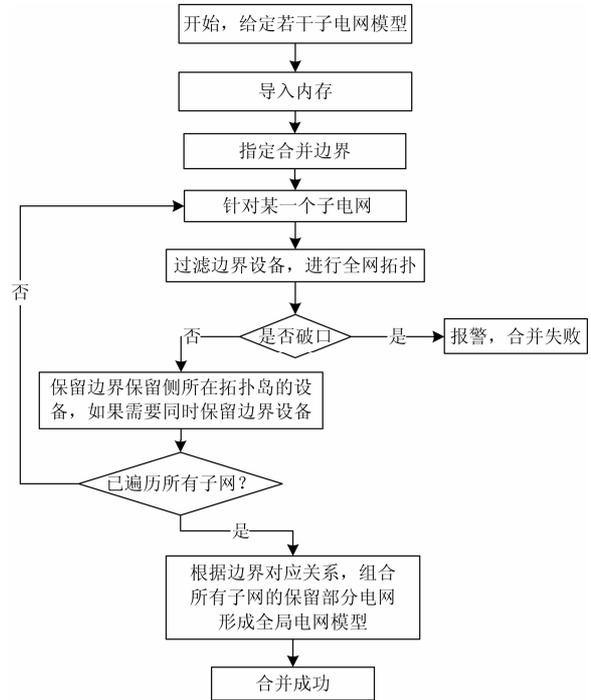


图 4 定关口拼接法

Fig. 4 Model combining method by given gates

其中判定是否破口的方法是, 检查是否存在关口设备两端在同一个拓扑岛的现象, 如果存在, 则说明存在破口现象, 反之, 则没有。

(2) 模型拆分技术

针对各控制中心, 过滤不可观测的部分电网, 在关口上进行等值, 最终得到所需要的可观测模型。拆分方法包括定区域拆分法和定关口拆分法两种, 拆分流程如图 5 所示。

2.2 连续数据断面拟合

仿真系统能从实际现场拿到一个或者多个离散时间点 (时间间隔约为分钟级) 的数据断面, 而为了实现电力系统的秒级连续仿真, 将离散的数据断面生成一系列秒级的连续断面。本文给出两种连续断面生成方式。

(1) 单断面扩展

假设只有某一孤立断面, 则可将该断面作为初始状态 (即 0 时刻的状态), 人工给定系统负荷变化曲线, 按照发电负荷同比例增长的方式得到某一时段内的电网连续变化状态。需要注意的是在拟合过程中, 全网网损的偏差量会累积到平衡机上, 因此

需要根据平衡机的偏差量, 进一步调整各发电机有功出力, 避免了平衡机有功出力的异常。

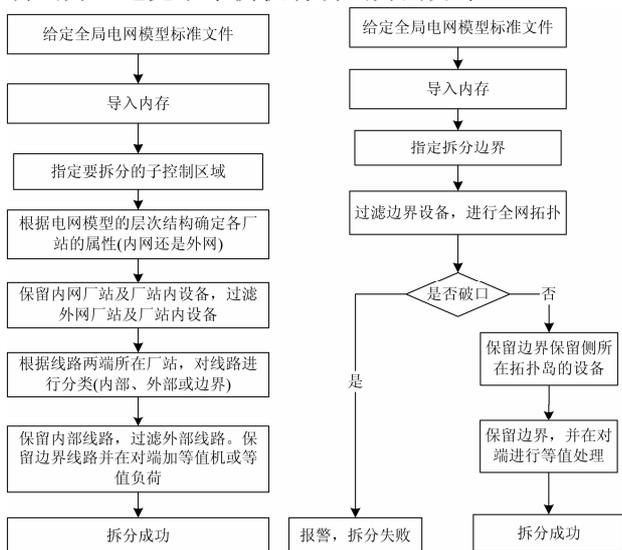


图 5 定区域/定关口拆分法

Fig. 5 Model splitting method by given area or given gates

(2) 多断面拟合

假设已有某一段时间内的若干数据断面, 则可以这若干连续数据断面为基础, 拟合得到该时段内的电网连续变化状态 (如图 6 所示)。

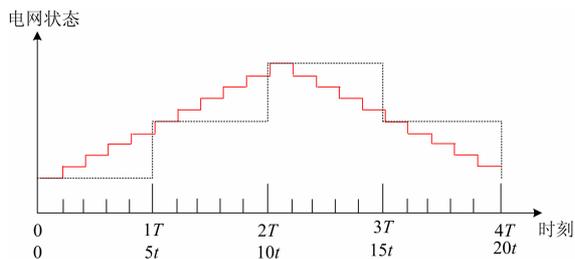


图 6 连续数据断面拟合示意图

Fig. 6 Sketch diagram of continuous sections simulation

图 6 中, 虚线给出了基于已有数据断面 (间隔周期为 T) 的系统状态变化曲线, 实线给出了基于拟合后连续断面 (间隔周期缩短为 t) 的系统状态变化曲线。可见多断面拟合的本质就是将一个间隔周期较长的数据断面序列通过插值的方法得到一个间隔周期较短的更接近于连续变化的数据断面序列, 在拟合过程中需要根据平衡机的出力变化对全网发电机出力进行修正。

2.3 多用户任务并行处理

仿真电力系统和模拟控制中心之间存在如下的信息交互问题:

(1) 在仿真电力系统内部中, 需要同时进行潮流仿真、接收模拟控制策略和更新模拟电网状态

等多项任务, 并且任务之间还需要交互信息和时序配合。如何同时协调这些任务?

(2) 在实际电力系统中, 控制对象 (即电力系统) 只有一个, 而有多个控制中心, 每一个控制中心都需要从电力系统中获取实时数据并将控制策略作用于电网, 两者通过已有的调度数据网进行通信。类似地, 在仿真控制系统中如何实现一个仿真电力系统和多个控制中心 (我们称之为用户) 之间的信息交互?

为此, 本节研发了多用户任务并行处理技术来解决上述问题。

(1) 多任务调度技术: 如图 7 中的圈①内容所示, 利用多线程+共享内存+线程锁技术来解决多任务协调并存问题。将仿真电力系统所在的主机称为 SCADA 数据发生器 (简称数据发生器), 在数据发生器上驻留电力系统模拟多线程进程, 每一个线程常驻内存并实现特定功能 (比如计算功能、接收控制策略功能或更新电网状态功能等), 各线程之间通过共享内存^[25]进行信息交互, 并通过线程锁来避免线程冲突, 保证其顺序执行。

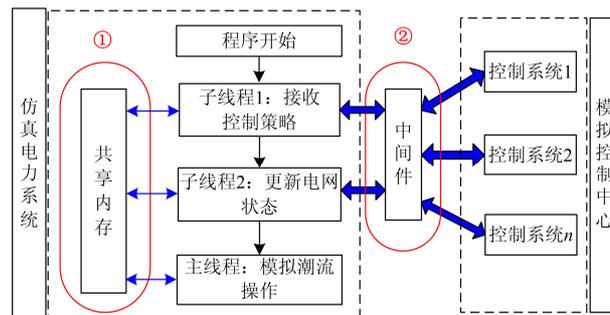


图 7 多用户任务并行处理示意图

Fig. 7 Sketch diagram of handling tasks with multi-users

(2) 多用户访问技术: 如图 7 中的圈②内容所示, 利用中间件技术^[26-27]来实现仿真电力系统和模拟控制中心之间的 1 对 N 数据通信。作为服务端, 仿真电力系统提供接收控制策略和更新电网状态两个服务接口, 作为客户端, 模拟控制中心利用发送控制策略和接收电网状态两个接口完成与服务端 (仿真电力系统) 的信息交互。

2.4 模拟子站调节

模拟子站调节技术用于仿真电力系统厂站端子站的调节功能, 响应执行模拟控制中心下发的控制指令。

如果模拟控制中心下发的控制策略表现为调节发电机的有功/无功/机端电压、开关遥控或者分

接头遥调等一次设备的调节, 则仿真电力系统可将其转化为潮流操作, 直接进行潮流仿真。

但是, 在实际电力系统中, 自动电压控制 (Automatic Voltage Control, AVC) 系统以控制中心内电网为控制对象, 考虑控制中心内电网的运行约束, 以控制中心内无功电压调节设备为控制手段, 通过解析法或者规则法给出使本控制中心内电网运行状态更优的控制策略, 并通过闭环控制作用于电力系统。AVC 系统 AVC 主站给出的电厂控制策略一般为高压母线的电压设定值 (或调节量), 需要由建立在电厂侧的 AVC 子站系统通过调节发电机的自动电压调整器 (Automatic Voltage Regulation, AVR) 来响应 AVC 主站给出的控制策略。相应地, 需要在仿真电力系统加入模拟电厂子站的调节功能, 使得仿真电力系统可追踪模拟控制中心下发的电厂高压母线电压调节指令。

在实际电厂的电压控制中, 考虑到低压母线的电压及无功注入对高压母线电压的灵敏度难以准确地计算, 多数电厂控制子站系统采用了“小步长、多轮次”连续控制的方法, 即对电厂内的发电机的机端电压进行连续多次小步长调节, 直到电厂高压侧母线达到电压指令目标。在仿真电力系统中, 为了准确模拟控制系统对电厂电压的控制, 也采用了上述“小步长、多轮次”控制算法, 具体的控制流程如图 8 所示。

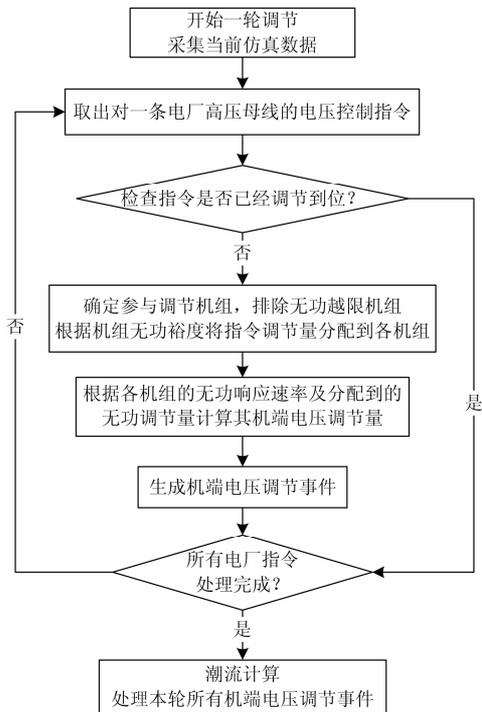


图 8 电厂子站仿真模块工作流程

Fig. 8 Flow chart of power plant control simulation

通过修改各发电机的无功响应速率, 使得仿真电力系统通过“多轮次”的调节来响应 AVC 系统给出的单次控制指令。仿真电力系统的“多轮次”的计算周期就是其潮流计算周期, 一般为 1~2 s, 满足闭环仿真要求。

3 讨论分析

本节通过本文方法与实时系统的对比以及与 DTS 仿真的对比两个方面来说明本文方法特点。

3.1 与实际系统的对比

两种控制系统共用状态估计和控制计算等核心计算模块。不同之处在于:

(1) 数据来源上。实际控制系统的数据来源于实际电力系统并时刻更新; 而仿真系统的 SCADA 数据来源是截取的某个 (或连续某几个) 电网运行方式的数据断面。

(2) 指令执行上。实际控制系统的控制指令直接通过控制中心能量管理系统 (Energy Manager System, EMS) 提供的遥控/调接口下发至厂站端并作用于实际电力系统; 而仿真控制系统产生的控制策略需要通过某种方式作用到仿真电力系统中, 从而模拟出对电网的控制影响。

(3) 数据记录上。为更直观地观察控制效果, 仿真控制系统可实时记录电网的所有运行状态数据 (包括潮流、电压等可测量和系统网损等不可测量), 并通过人机界面实时更新显示; 而真实的电力系统中, 必须依赖于状态估计才能得到全网的运行状态数据。

(4) 对比实验上。基于同一个数据断面, 仿真控制系统可以给出各种的控制方案下的不同控制效果, 据此完成对比分析; 而真实电力系统中很难找到运行状态完全相同的两个时间点或时间段。

3.2 与 DTS 仿真的对比

本文方法的 SCADA 数据发生器类似于 DTS 的教员台: 接收控制策略并进行电网仿真; 本文方法的各模拟控制中心主机类似于 DTS 的学员台: 发出控制策略并接收仿真电网状态。两个系统的区别如下:

(1) 目的不同。DTS 中仿真只是手段, 其目的侧重于培训人 (即调度员) 对电网的操作; 闭环控制仿真系统侧重于验证自动控制系统的控制策略。

(2) 控制对象不同。DTS 的控制对象是本控制中心内的电网模型, 要实现多个控制中心对同一个电网的控制仿真, 就必须由分布于多个控制中心间的 DTS 系统进行联合仿真; 闭环控制仿真系统的

控制对象是整个仿真电力系统, 各模拟控制中心可以依据各自的电网模型进行独立地或协调地控制决策, 但最终的控制策略将作用于整个全局电网。

(3) 指令产生方式不同。DTS 的模拟操作由人类(调度员)给出; 闭环控制仿真系统的模拟操作由各控制中心的自动控制系统通过控制计算自动周期产生。

(4) 实现功能不同。DTS 不但能实现稳态仿真还能实现暂态仿真, 不但能模拟一次设备控制, 还能模拟保护设备动作。闭环控制仿真系统紧扣电网自动有功/无功控制这一稳态(或准稳态)问题, 只实现了对一次设备的仿真控制, 并且实现了模拟电厂子站的调节功能。与 DTS 系统相比, 其针对性更强, 操作更加灵活, 对软硬件要求更少。

可见, 与 DTS 相比, 在稳态控制(尤其是对多级控制中心协调闭环控制仿真)方面, 本文方法有着其独特的优势。

4 应用实例

基于本文技术, 设计实现了南方电网省地一体化的全局电网潮流仿真及其无功电压闭环控制模拟系统, 如图 9 所示。

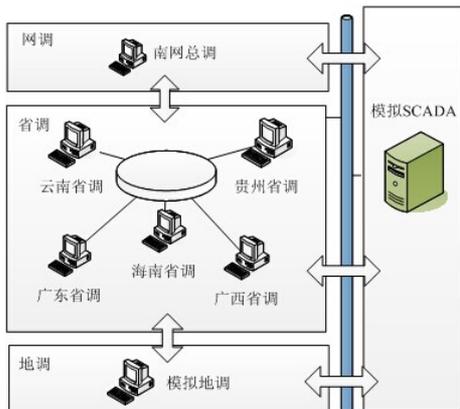


图 9 网省地一体化的仿真控制系统架构

Fig. 9 Simulation system architecture of grid-provincial-district system integration

在硬件架构上, 整个仿真控制系统由 8 台计算机组成, 其中 1 台用于模拟 SCADA 数据发生器, 1 台用于模拟南网总调 AVC 主站系统, 5 台用于模拟 5 个省调 AVC 主站系统, 1 台用于模拟地调 AVC 系统, 这 8 台计算机通过 100 M 带宽的局域网互联。

在数据交互上, 为实现 AVC 控制功能, 各网、省、地调 AVC 主机都需要与数据发生器进行数据交互, 并且为了实现协调控制功能, 上下级控制系统

之间(即: 网省之间以及省地之间)分别需要交互协调信息。

在电网模型上, 仿真系统从实际现场拿到的是基于 CIM/XML 格式的网省一体全局电网模型文件, 并将该模型导入到数据发生器中模拟网省全局电网; 网调 AVC 系统使用全局电网模型; 省调 AVC 系统使用的电网模型是由全局电网模型拆分而来(只保留了本省内的 500/200 kV 电网结构); 地调 AVC 系统采用了 120 个独立的辐射网结构, 每个辐射网结构分别挂接到各省(市)调的 220 kV 负荷母线上, 各辐射网的初始有功/无功来源于所挂接负荷母线上等值负荷的有功/无功。并通过网省输电电网和地调辐射网的主从分解协调潮流计算, 最终得到网省地一体化全局电网的电网状态数据。

图 10 给出了南网总调侧的 AVC 仿真系统界面。



图 10 AVC 仿真系统主界面

Fig. 10 Main frame for AVC simulation system

整个仿真过程分为断面初始化、施加策略、控制结果展示三个阶段, 各省、地调 AVC 系统有类似的控制交互界面。

图 11 给出了某电厂接收到新的电压设定值后, 其高压侧母线电压的变化曲线。

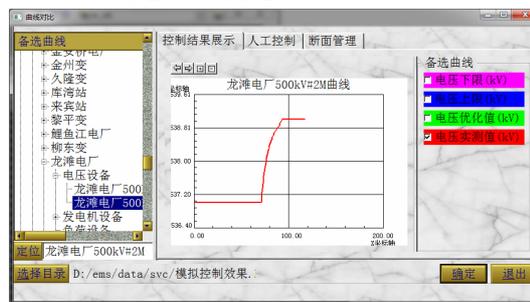


图 11 电厂母线电压变化曲线

Fig. 11 Changing curve of plant bus voltage

可以看出, 与实际系统相类似, 该电厂高压侧母线电压并不是一步调节到位, 而是经过多轮小步长的调节, 逐步逼近其设定值。

5 总结

本文提出了一种多控制中心协调的电网闭环控制仿真方法,并讨论其关键实现技术。本文方法不但可以模拟各级电网互联一体的物理结构特点,还可以模拟网省地分层分区调度的管理特点。值得说明的是,本文设计并实现的仿真控制系统和将要投入工程现场的实际控制系统共用同一个控制核心。因此只要做一些简单的接口改造工作(主要包括实时数据采集接口和指令生成和下发接口),使之具备和现场系统对接的能力,本文给出的仿真控制系统就可以直接移植到实际控制系统中去。

目前,本文方法不但已经应用于风电场自动电压控制研究^[28]等单控制中心的无功电压控制策略研究仿真验证中,还应用于多控制中心无功电压协调控制仿真验证^[29]。应用结果表明,本文方法能够有效结合实际电力调度系统分层分区的控制特点,模拟出真实情形类似的控制场景,为校验各种控制手段提供了合理有效的手段。

参考文献

- [1] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 1-10.
XIN Yao-zhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10.
- [2] 张勇军, 李启峰, 张锡填. 大电网省地电压调控的博弈收益函数建模[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 254-260.
ZHANG Yong-jun, LI Qi-feng, ZHANG Xi-tian. Game payoff function modeling for game of provincial and district voltage control in large-scale power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 254-260.
- [3] 陈宁, 于继来. 兼顾系统调频需求的分布式风电分散自治调控策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 123-130.
CHEN Ning, YU Ji-lai. Strategy for decentralized autonomous regulation of distributed wind power considering system frequency regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 123-130.
- [4] 武诚, 徐政, 常勇. 高压侧电压控制对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 146-152.
WU Cheng, XU Zheng, CHANG Yong. Effects of high side voltage control on the small signal stability of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 146-152.
- [5] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传, 等. 智能电网控制中心技术的未来发展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 21-28.
ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, WU Wen-chuan, et al. Future development of control center technologies for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 21-28.
- [6] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 56-62.
DENG Wei, TANG Xi-sheng, PEI Wei, et al. Voltage stability and control technologies of micro-grid with wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 56-62.
- [7] ARCIDIACONO V, CORSI S, NATALE A, et al. New developments in the applications of ENEL transmission system automatic voltage and reactive control[R]. Paris, France: CIGRE, 1990.
- [8] 唐建惠, 张立港, 赵晓亮. 自动电压控制系统(AVC)在发电厂侧的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 32-35.
TANG Jian-hui, ZHANG Li-gang, ZHAO Xiao-liang. Application of the auto-voltage-control in power plants[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 32-35.
- [9] 谢锋, 王学民. 电厂侧AVC子站安全约束控制策略优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 147-149.
XIE Feng, WANG Xue-min. Security constraints control strategy optimization of AVC sub-station system in power plant[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 147-149.
- [10] 钟毅, 陈蕊. 地区电网AVC系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 41-44.
ZHONG Yi, CHEN Rui. Design and realization of AVC system about area power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 41-44.
- [11] 王宽, 郑勇, 陈佑健. 考虑电压稳定的自动电压闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 31-34.
WANG Kuan, ZHENG Yong, CHEN You-jian. Automatic voltage close-loop control with voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 31-34.
- [12] 李端超, 陈实, 吴迪, 等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 20-22.
LI Duan-chao, CHEN Shi, WU Di, et al. Design and implementation of automatic voltage control system for Anhui power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 20-22.
- [13] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 江苏电网AVC主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22):

- 83-87.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Research and development of AVC system for power networks of Jiangsu province[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 83-87.
- [14] CORSI S, POZZI M, SABELLI C, et al. The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid-part I: reasons of the choice and overview of the consolidated hierarchical system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1723-1732.
- [15] CORSI S, POZZI M, SFORNA M, et al. The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid - part II: control apparatuses and field performance of the consolidated hierarchical system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1733-1741.
- [16] 王智涛, 胡伟, 夏德明, 等. 东北 500 kV 电网 HAVC 系统工程设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 85-88.
WANG Zhi-tao, HU Wei, XIA De-ming, et al. Design and application of HAVC system in the 500 kV power grid of Northeast China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 85-88.
- [17] 陈晓兵, 周群, 王庆红, 等. 广西电网无功电压优化控制系统[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 1): 34-38.
CHEN Xiao-bing, ZHOU Qun, WANG Qing-hong, et al. Voltage/optimization control system of Guangxi power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(S1): 34-38.
- [18] 郭庆来, 王蓓, 宁文元, 等. 华北电网自动电压控制与静态电压稳定预警系统应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 95-98.
GUO Qing-lai, WANG Bei, NING Wen-yuan, et al. Applications of automatic voltage control system in North China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 95-98.
- [19] SUN Hong-bin, GUO Qing-lai, ZHANG Bo-ming, et al. An adaptive zone division based automatic voltage control system with applications in China[J]. IEEE Trans on PWRs, 2013, 28(2): 1816-1828.
- [20] 张慎明, 姚建国. 调度员培训仿真系统的现状和发展趋势[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 60-66.
ZHANG Shen-ming, YAO Jian-guo. Current simulation and development trend of dispatcher training simulator[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 60-66.
- [21] 孙宏斌, 吴文传, 张伯明, 等. 电网调度员培训仿真系统的新特征和概念扩展[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 6-11.
SUN Hong-bin, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, et al. New features and function extension of dispatcher training simulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 6-11.
- [22] IEC 61970—2003 energy management system application program interface (EMS-API) part 301, common information model (CIM) base[S].
- [23] 张慎明, 刘国定. IEC61970 标准系列简介[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 1-6.
ZHANG Shen-ming, LIU Guo-ding. Introduction of standard IEC 61970[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 1-6.
- [24] 辛耀中, 陶洪铸, 李毅松, 等. 电力系统数据模型描述语言 E[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 48-52.
XIN Yao-zhong, TAO Hong-zhu, LI Yi-song, et al. E language for electric power system model description[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 48-52.
- [25] 吴文传, 张伯明, 徐春晖. 调度自动化系统实时数据库模型的研究与实现[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 28-32.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, XU Chun-hui. Study and implementation of real time database management system(RTDBMS) model applied in EMS[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 28-32.
- [26] 黄柳青, 王满红. 构件中国:面向构件的方法与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [27] 李朝辉. 基于构件复用技术的组态模型及平台研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
LI Chao-hui. Research of a configuration model based on component and its platform implementation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [28] LIU Yi-feng, GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, et al. Network model based coordinated automatic voltage control strategy for wind farm[C] // 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies, in 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Tianjin, 2012.
- [29] 王彬. 多级控制中心无功电压协调优化控制[D]. 北京: 清华大学, 2011.
WANG Bin. A study on reactive power and voltage coordinated optimal control for multi-level hierarchical control centers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-20

作者简介:

顾慧杰(1985-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统调度自动化;

王彬(1984-), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为调度自动化和无功电压优化控制; E-mail: wb1984@tsinghua.edu.cn

周华锋(1977-), 男, 博士, 高工, 主要研究方向为电力自动化系统运行管理, 下一代电力自动化系统研究。