

大电网安全稳定控制系统硬件在环 实验环境构建

侯玉强

国家电网有限公司系统保护实验室
二〇一九年十月

目 录

01 背景介绍

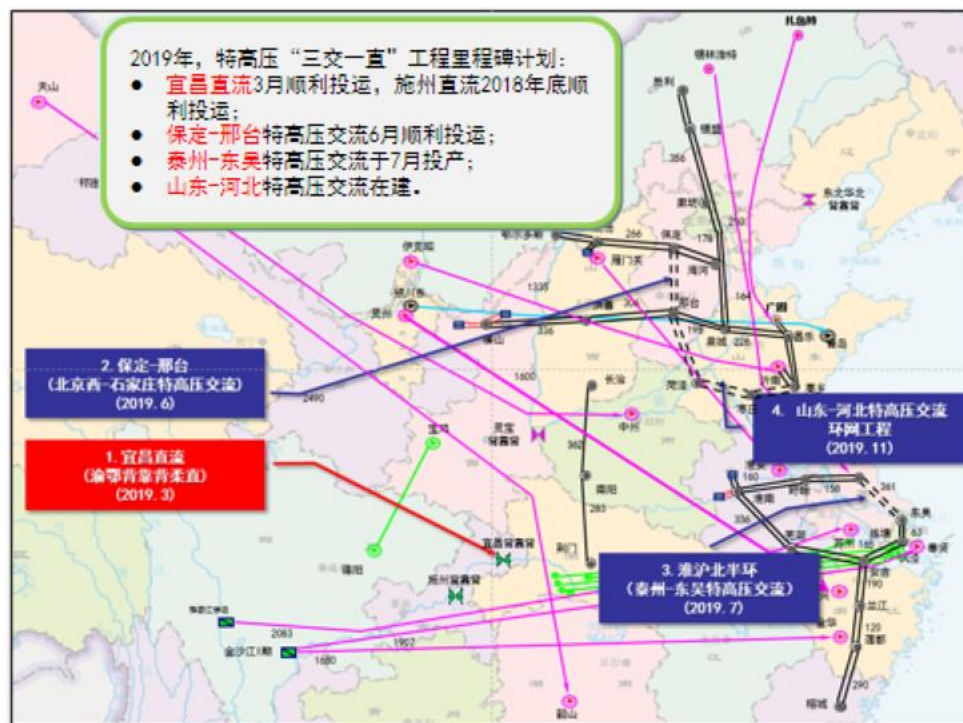
02 大电网安控系统硬件在环实验环境构建 相关工作介绍

03 实际安控系统工程验证案例

04 总结与展望

一、背景介绍

2019年6月19日，西南电网异步运行；9月26日，±1100kV吉泉直流投运，电网特高压系统输电规模进一步提升，电网格局和电源结构持续变化。特高压交流与500千伏交流电网、特高压直流群与交流系统、新能源发电与常规电源的耦合进一步加剧，不均衡、不协调的矛盾不断累积，电网长期处于高风险过渡期。



与传统就地平衡模式为主的交流电网相比，当前电网的故障防御体系规模大、关联度高，运行风险大。主要体现在以下四个方面：

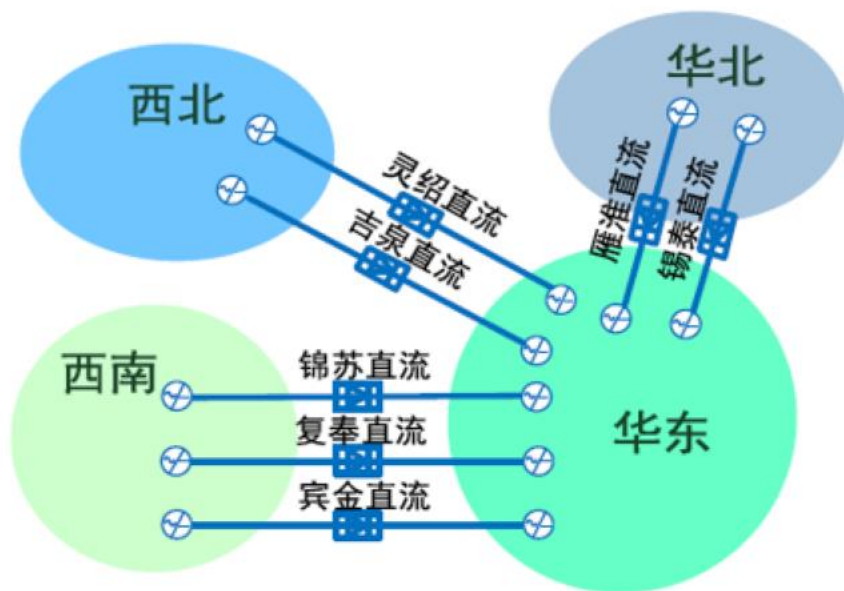
- 1、跨区直流送电严重依赖安控系统；
- 2、安控分布广泛、措施量大，运行风险高；
- 3、控制资源有限，安控措施相互耦合；
- 4、二次系统关联各区域电网，存在“多米诺”风险。

一、背景介绍

1、跨区直流送电严重依赖安控系统；但存在控制资源受限和措施耦合

为满足保安全、保供电、促消纳需求，安控系统已成为保障高压直流工程可靠送电的重要手段。国网省级电网以上共配置安控装置3200余套。2019年，跨区直流送电能力总计10150万千瓦，若不考虑安控系统，送电能力还不及安控投运方式的1/3。

交直流送电能力高度依赖安控，系统切机、切负荷措施等控制资源有限，送受端之间不同交直流输电系统之间共享控制资源的情况逐步增多，电网运行关联程度高。

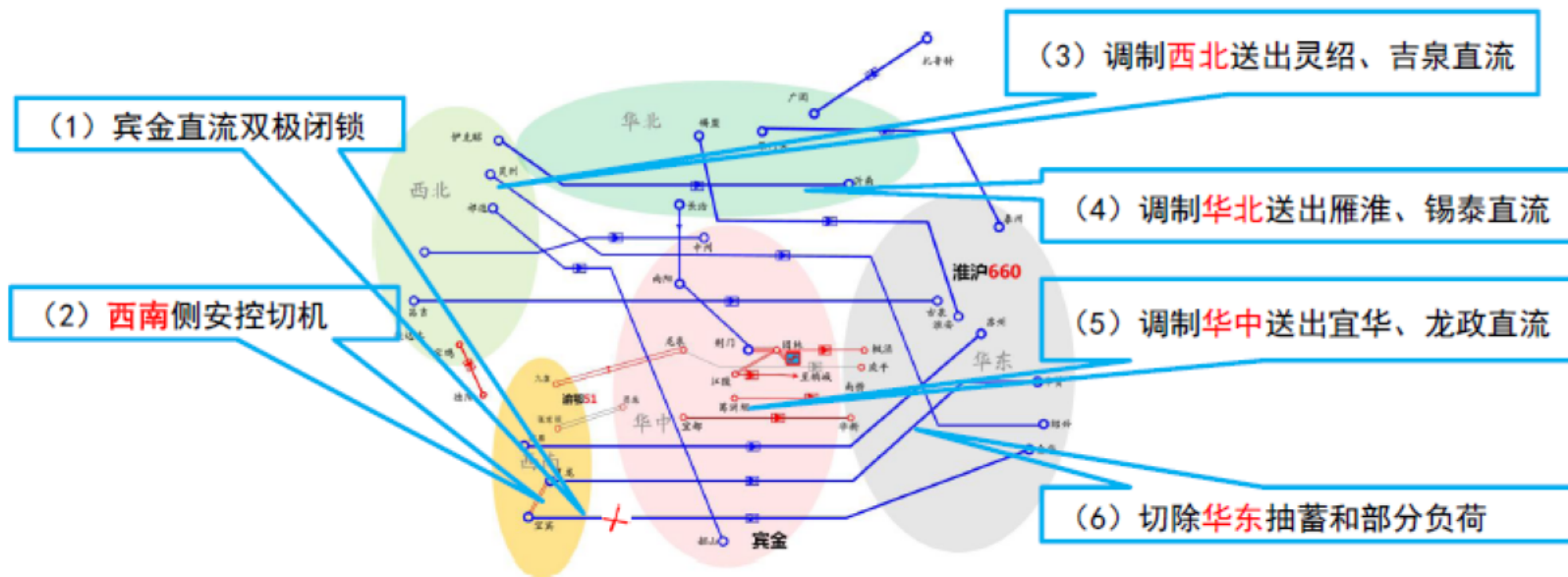


例如：西南电网异步运行后，复奉、锦苏、宾金三大直流送端均启用频率限制控制(FLC)功能。华东频率协控系统提升三大直流的控制措施无法使用（提升140万千瓦仅能起到40万千瓦的效果），需改由西北、华北送华东的吉泉、灵绍、雁淮、锡泰直流部分承担。

一、背景介绍

2、二次系统关联各区域电网，存在“多米诺”风险

传统区域安控系统一般用于解决单一输电工程、单一通道的稳定问题，控制资源一般限于工程近区。随着特高压工程输电容量的剧增，安控系统需要动用的资源由局部向大区、全网发展。各大区电网间通过二次系统相互关联，一旦发生连锁故障，电网失稳风险高。



二次系统将宾金直流故障传播至其他区域电网，需严格控制各跨区直流措施量

目 录

01 背景介绍

02 大电网安控系统硬件在环实验环境构建 相关工作介绍

03 实际安控系统工程验证案例

04 总结与展望

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

开展控制系统硬件在环实验验证是系统保护实验室的核心工作。控制系统硬件在环实验着力于全模型、全逻辑、多场景验证，重点分析复杂连锁故障模拟、一/二次系统交互特性和多安控系统协同动作特性。与厂内测试、现场联调手段互为补充，共同形成控制系统可靠性实验验证体系。

侧重一次电网与控制系统之间、多个控制系统之间的信息交互。
1) 可更灵活、更便捷模拟复杂的相继故障场景
2) 控制代价极小，同时可评估控制措施执行效果。

控制系统级硬件在环实验

厂内装置测试

侧重装置层面的电网故障识别判据、装置功能验证
1) 难以建立全系统概念
2) 利用试验箱输入理想触发信号，难以模拟复杂故障场景，也无法验证控制措施执行效果。



可实现控制系统全环节测试，是系统投运前的重要一环。
1) 时间紧，工作量大，协调难度大，难以测试充分
2) 控制措施只出口不动作，难以评估控制措施执行效果。

现场联调测试

开展了四个方面的研究工作



基础模型库建设



硬件在环安控系统组件重构



实验流程标准化



实验任务自动化

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

1、基础模型库建设——提供真实输入，反映控制效果

包括5方面工作。

(1) 同步发电机励磁、调速、PSS 及锅炉元件建模

全面梳理了目前电网运行方式数据涉及的励磁、调速/原动机/锅炉、PSS模型与RTDS仿真平台固有模型库的匹配关系。对于在方式数据中应用广泛但固有模型库未提供的，按模型框图严格搭建并与机电仿真校核比对，解决系统元件模型缺失问题。

机电暂态与RTDS的励磁系统模型对比

PSD-8PA ^o	RTDS ^o	备注 ^o	PSD-8PA ^o	RTDS ^o
EA ^o	RTDS_EXDC1XV2 ^o	∅	FM ^o	均无对应模型，按框图新建（包含串联PID的KV=1/D，并联PID三类） ^o
EB ^o	RTDS_ESACS4 ^o	需处理 ^o	FN ^o	
EC ^o	RTDS_EXACS ^o	需处理 ^o	FO ^o	
ED ^o	RTDS_EEET3 ^o	∅	FP ^o	
EE ^o	RTDS_ESOC3A ^o	需处理 ^o	FQ ^o	
EG ^o	RTDS_EXST1 ^o	∅	FR ^o	
EA ^o	RTDS_EXST1 ^o	需处理 ^o	FT ^o	
EA ^o	RTDS_EXDC1XV2 ^o	需处理 ^o	FU ^o	
FA ^o	RTDS_EXDC1XV2 ^o	∅	FV ^o	
FB ^o	RTDS_EXDC2XV2 ^o	需处理 ^o	FX ^o	
FC ^o	RTDS_EXACS ^o	∅	FY ^o	
FD ^o	RTDS_EXST2 ^o	∅	EL ^o	均无对应模型，按框图新建 ^o
FE ^o	RTDS_ESOC3A ^o	∅	EO ^o	
FF ^o	RTDS_EXACS ^o	∅	EN ^o	
FG ^o	RTDS_EXACS ^o	∅	FO ^o	
FN ^o	RTDS_EXACS ^o	∅	FP ^o	
FJ/FK ^o	RTDS_EXST1 ^o	∅	FJ/FK ^o	
FL ^o	RTDS_ESST2A ^o	需处理 ^o	FL ^o	

机电暂态与RTDS的调速系统模型对比

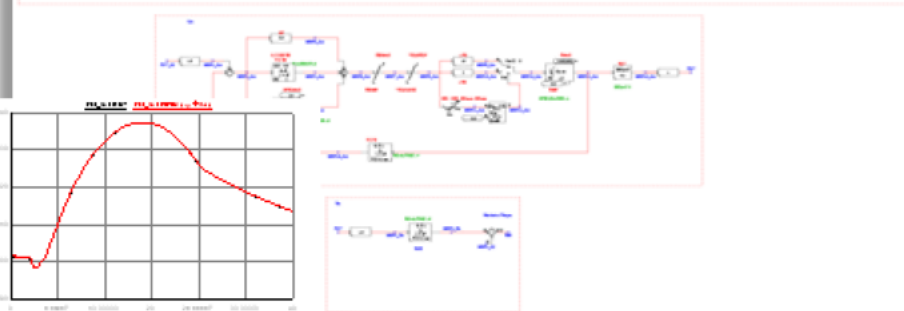
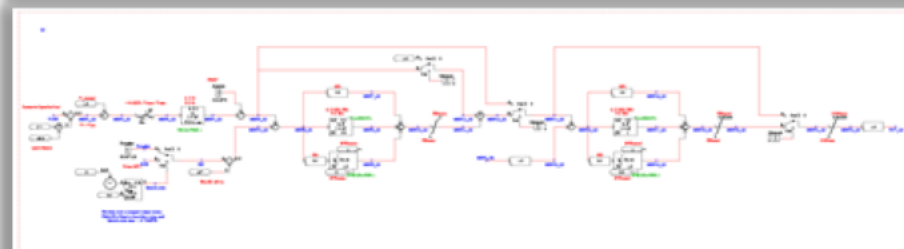
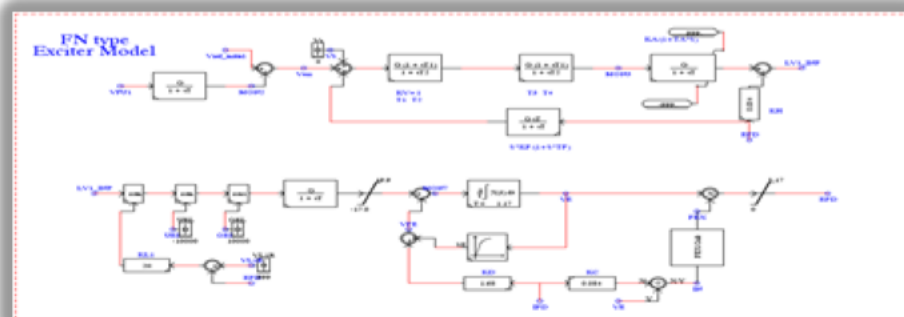
机电暂态汽轮机调速模型 ^o	RTDS 自带调速模型 ^o	机电暂态水轮机调速模型 ^o	RTDS 自带调速模型 ^o
GH 水轮机和汽轮机通用模型 ^o	与 IEEEG3 模型相似 ^o	GH 水轮机和汽轮机通用模型 ^o	与 IEEEG3 模型相似 ^o
GS 汽轮机调速器 ^o	与 IEEEG1 模型相似 ^o	GM 水轮机调节系统 ^o	无对应模型 ^o
GL 液压调速器 ^o	无对应模型 ^o	GN 水轮机调节系统 ^o	
GA 电流伺服机构 ^o		G1 水轮机调节系统 ^o	
GI 电流调节系统 ^o			
GJ 电流调节系统 ^o			
GK 电流调节系统 ^o			
TA 无再热器汽轮机模型 ^o	用单个传递函数模块表示 ^o	TW 水轮机模型 ^o	用单个传递函数模块表示 ^o
TB 串联组合、单再热器汽轮机模型 ^o	无对应模型 ^o	TV 水轮机模型 ^o	无对应模型 ^o
GX 锅炉的主汽压力变化模型 ^o			

机电暂态与RTDS的PSS模型对比

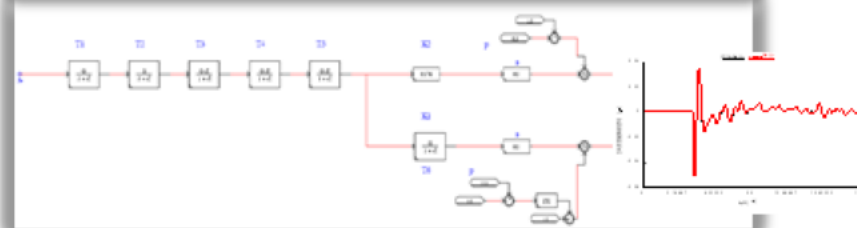
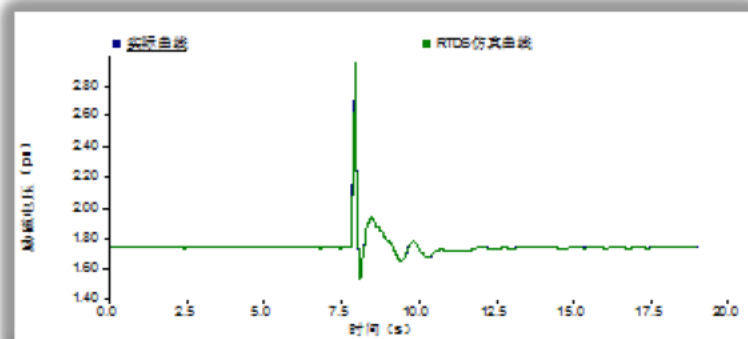
机电暂态仿真软件模型 ^o	RTDS 自带模型库 ^o
SP/S6/SF/SS ^o	PSS1A ^o
SX ^o	PSS1A ^o
SI ^o	PSS2A/PSS2B ^o
SH ^o	无对应模型 ^o
SA ^o	无对应模型 ^o
SB ^o	与 PSS2A 相似，但缺少输入信号的二阶过虑环节 ^o
SE ^o	无对应模型 ^o
SL ^o	无对应模型 ^o
SV ^o	无对应模型 ^o
SV ^o	与 IEE2ST 相似 ^o

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

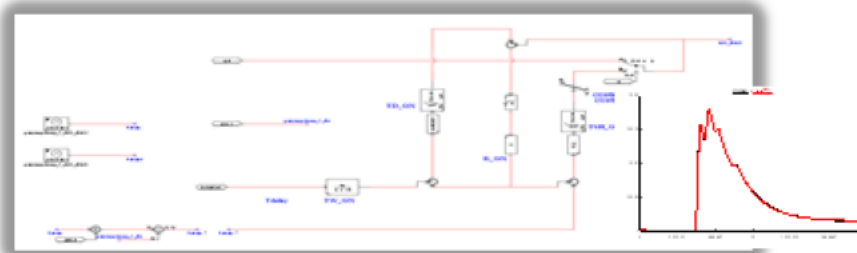
完成了20余种励磁系统、10余种PSS和多种调速系统的自定义建模，基本涵盖了目前国家电网运行方式数据涉及的全部类型，提高了大电网仿真建模的精细度。



励磁/调速系统RTDS自定义模型



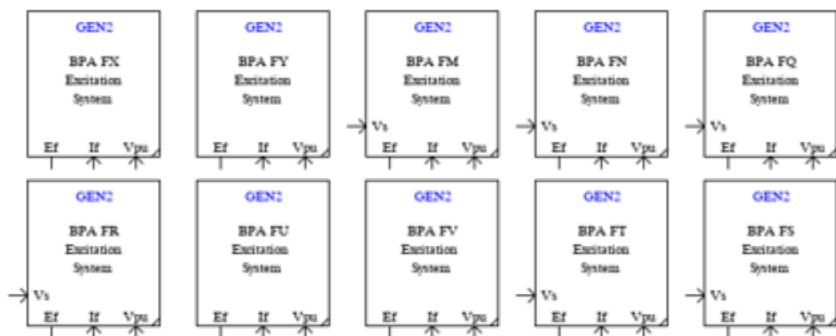
SA型电力系统稳定器RTDS自定义模型



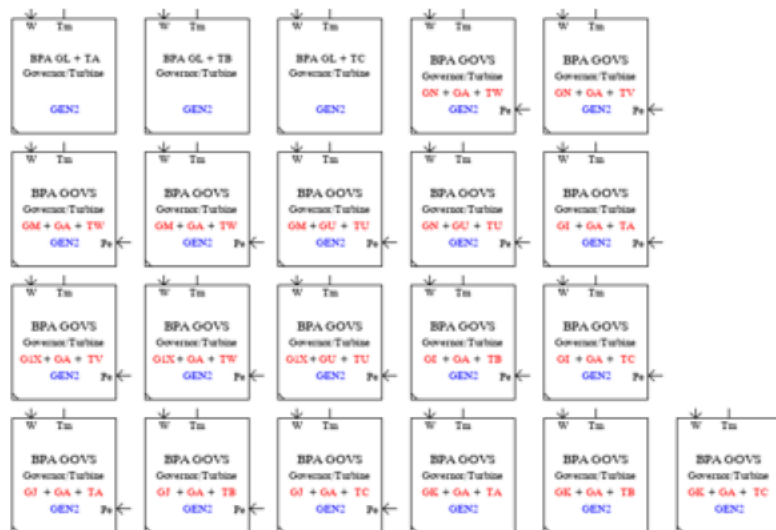
锅炉主汽压力锅炉RTDS自定义模型

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

为提升大电网安全稳定控制系统闭环实验中一次系统建模工作的便捷性，减少参数填写、初始化计算、信号命名的工作量，与RTDS公司合作，完成自定义模型的封装与测试，封装后的元件模型已经植入最新发布的V5.009版本。



封装后的各类励磁系统自定义模型

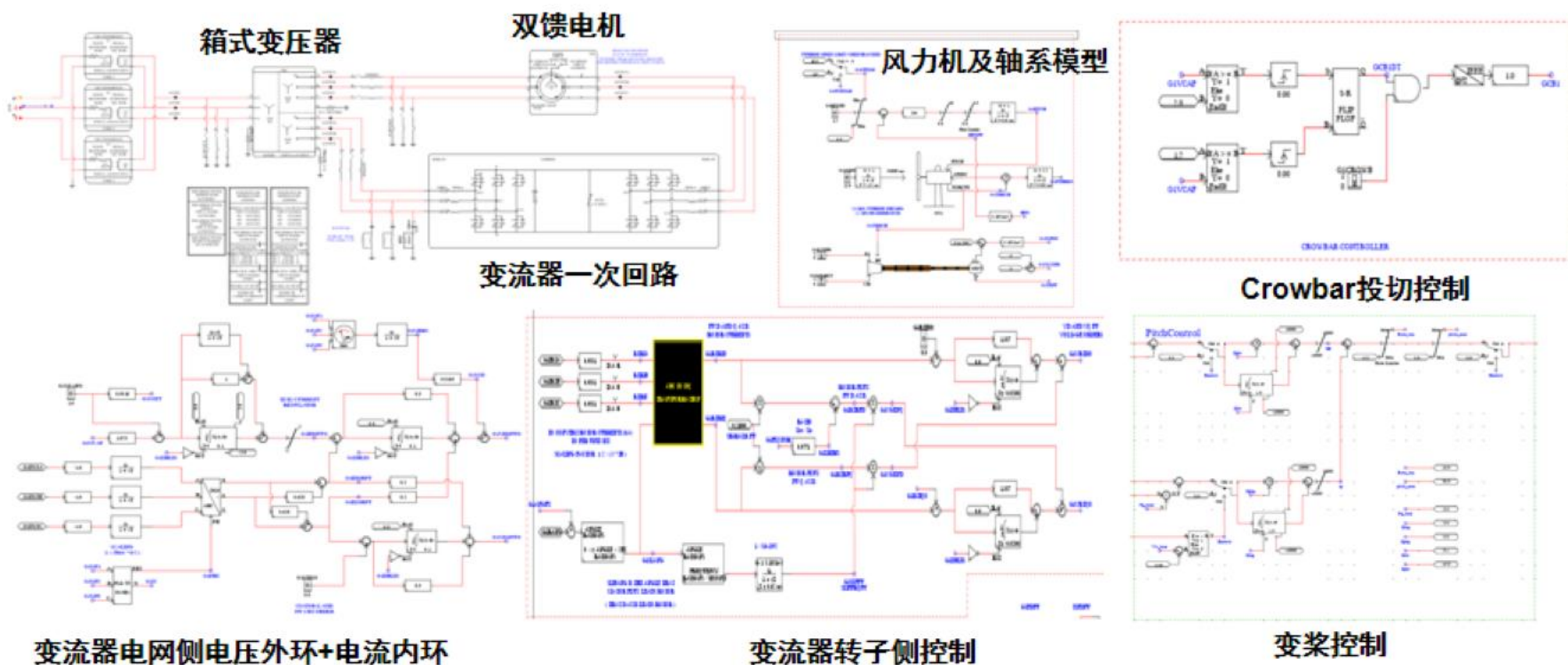


封装后的各类调速系统自定义模型

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

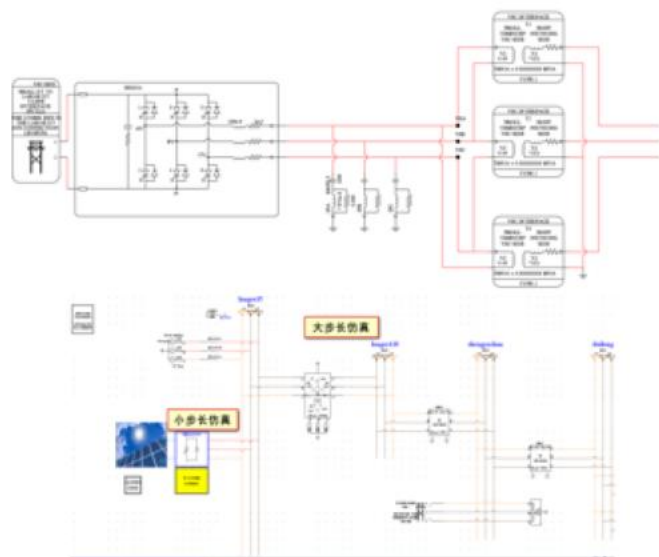
(2) 风电机组、光伏本体及控制保护系统电磁暂态建模

基于南瑞研发的风机变流器逻辑，搭建了双馈、直驱两种类型风电机组模型。包括一次电气回路模型，详细考虑二次变流、变桨等控制。为准确体现风电机暂态特性，建立Chopper、Crowbar等保护电路模型以及相应的低电压穿越控制。

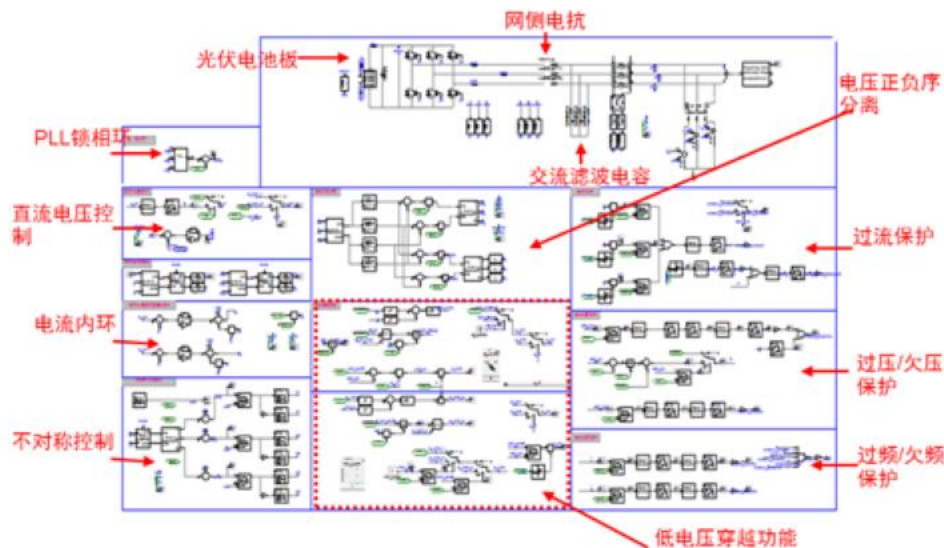


二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

基于南瑞研发的光伏变流器控制逻辑，搭建了光伏电站实时仿真详细数字模型。一次侧为基于VSC的换流器模型，2 μ s小步长仿真；二次控制系统包含SPWM调制、交流电压控制、直流电压控制、MPPT跟踪控制、低电压穿越控制、电压正负序分离及D/Q轴解耦控制等关键功能模块。



光伏场站的一次小步长模型

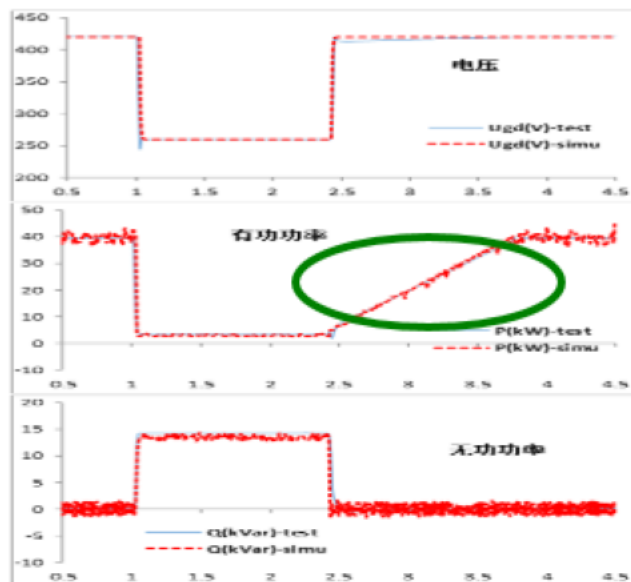
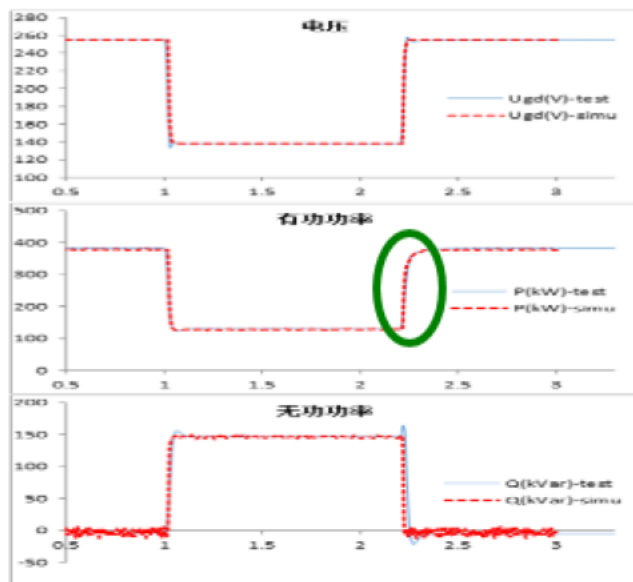


光伏场站的二次控制模型

光伏机组及其控制系统的电磁暂态建模

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

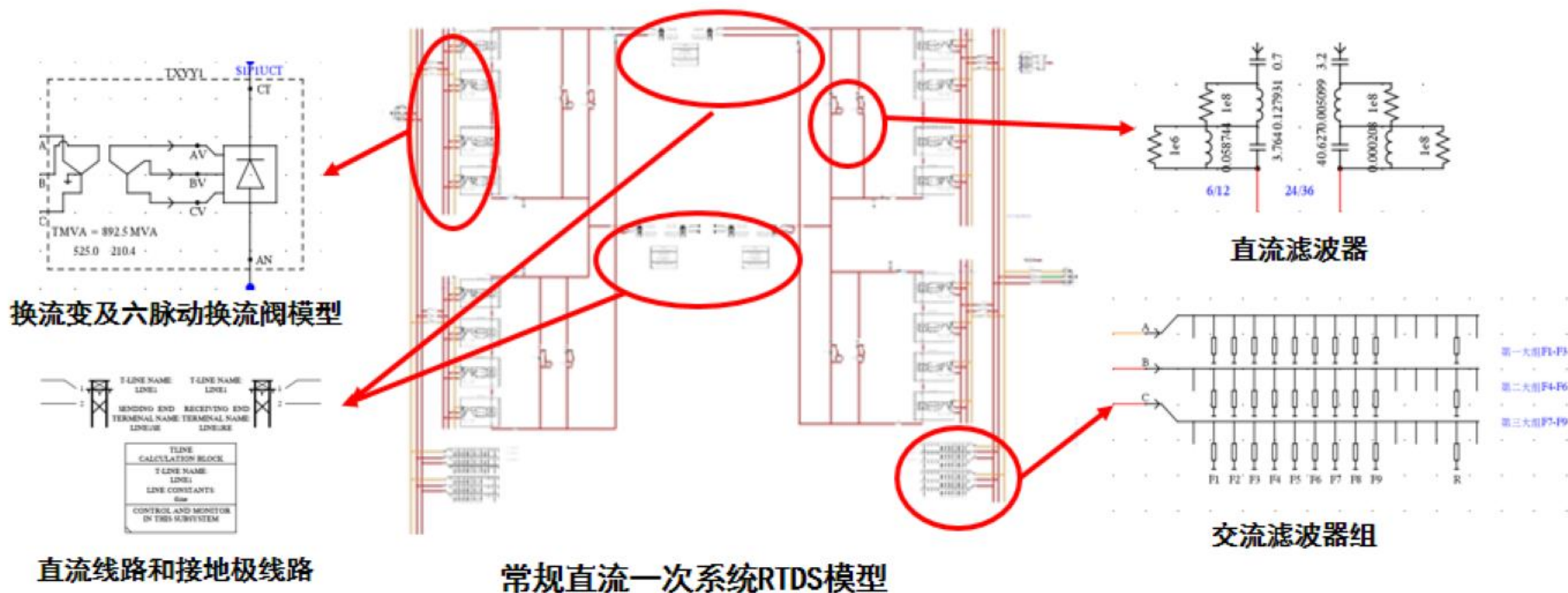
在此基础上，基于藏中电网扰动实测数据，通过参数修改得到了市场占有率较高的阳光、华为两类光伏逆变器控制器数字模型。搭建的实时数字仿真模型与逆变器控制器实物响应曲线高度一致，能够准确反映华为与阳光两个光伏逆变器控制器在低电压穿越控制模式以及穿越后的机组功率恢复特性方面的差异。



二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

(3) 直流输电系统精准化建模

根据特高压直流工程的成套说明书，建立直流一次系统详细模型，包括换流变压器、六脉动换流器、平波电抗器、多组交(直)流滤波器、直流线路和接地极线路以及交直流场开关等设备。



二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

采用与直流控保系统高度一致的纯数字模型/模块化仿真装置来模拟直流二次系统。在此基础上，根据实验验证的需要增加极间功率转带、直流FC控制、直流功率受端调制及连续调制、以及直流紧急功率速降联切滤波器控制等模块；建立了与特高压直流配套安控工程完全一致的ft3通信协议模型。

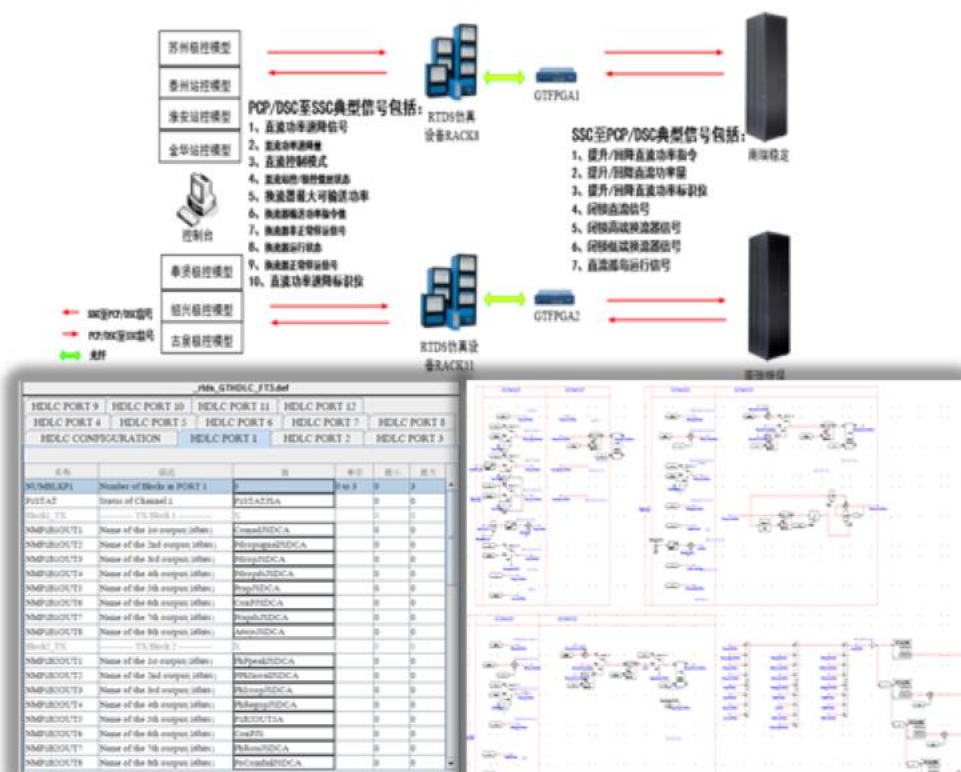
直流名称	事故前功率(MW)	事故前可提升量(MW)	提升量(MW)	数据来源	有效性
锦苏	2903	210	0	通道A	有效
复奉	5959	190	159	通道A	有效
宾金	7436	100	67	通道A	有效
贵绍	4321	100	74	通道A	有效
龙政	2000	90	60	通道A	有效
葛南	1126	20	11	通道A	有效
宜华	2035	90	60	通道A	有效
林枫	2769	90	56	通道A	有效
锦淮	0	0	0	通道A	无效
锦淮	0	0	0	通道A	无效
锦淮	0	0	495	通道A	无效

目标提升680MW，实际提升495MW，误差27%

直流名称	事故前功率(MW)	事故前可提升量(MW)	提升量(MW)	数据来源	有效性
锦苏	2071	210	0	通道A	有效
复奉	6033	190	190	通道A	有效
宾金	7391	100	100	通道A	有效
贵绍	4203	100	101	通道A	有效
龙政	2791	90	09	通道A	有效
葛南	1120	20	20	通道A	有效
宜华	2792	90	90	通道A	有效
林枫	2001	90	09	通道A	有效
锦淮	0	0	0	通道A	无效
锦淮	0	0	0	通道A	无效
锦淮	0	0	679	通道A	无效

目标提升680MW，实际提升679MW，误差0.15%

考虑直流线路及换流阀动态损耗特性的受端直流调制效果



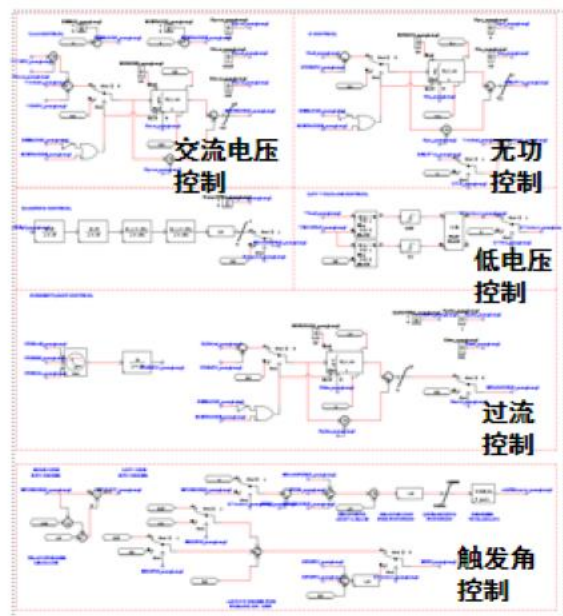
直流ft3通信模型

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

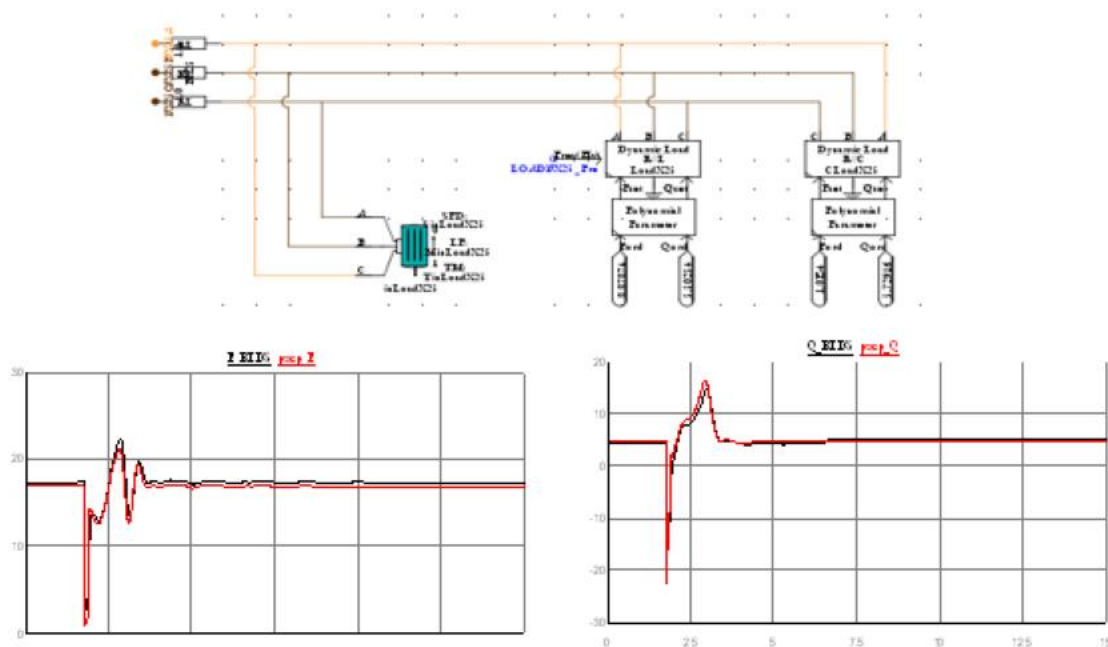
(4) 其它元件

依托实际工程/控制器实物，建立了串补、SVC、SVG等FACTS设备模型。

建立了综合负荷及其转矩控制模块、SLM综合负荷模型。充分利用机电暂态仿真程序提供的潮流计算结果、模型参数文件，计算负荷模型元件的初始化变量或参数，保障自定义负荷元件模型动态响应的准确性。



藏中夺底SVC控制系统模型

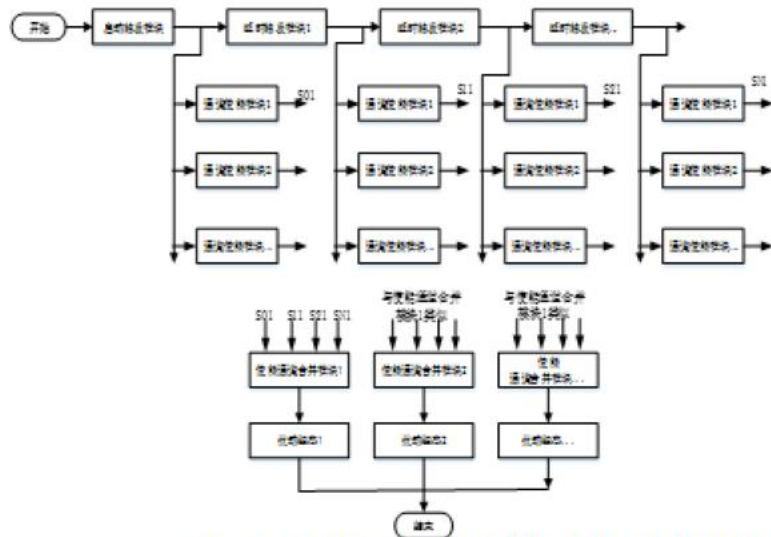


综合负荷的RTDS模型及响应对比

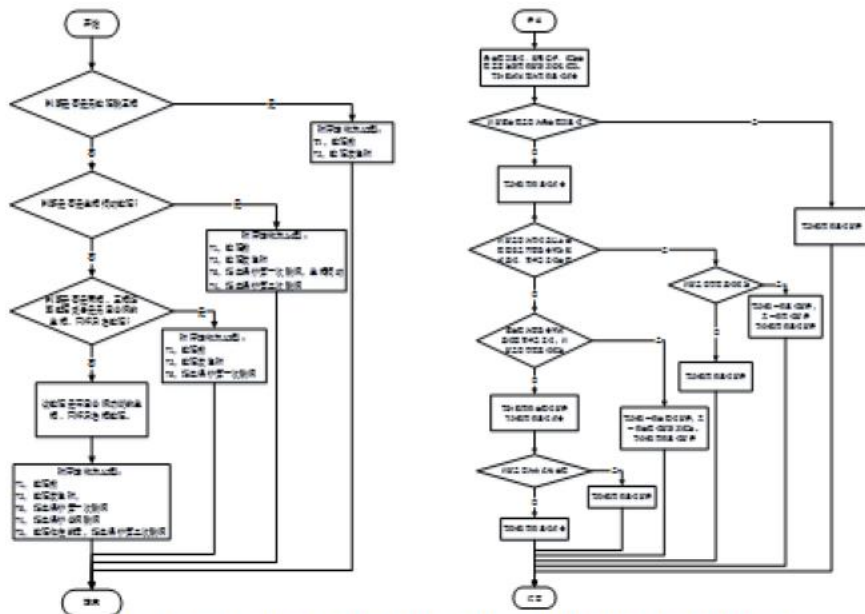
二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

(5) 交直流电网复杂故障场景建模

大电网安全稳定控制系统闭环实验仿真故障场景多、类型杂（对称或非对称短路、无故障跳闸、直流闭锁、功率速降等），通常需要模拟逻辑较为复杂的交直流相继故障。通过对故障时序、断路器控制时序的分解，开发了一种支持交直流相继扰动的模块化故障仿真模型。



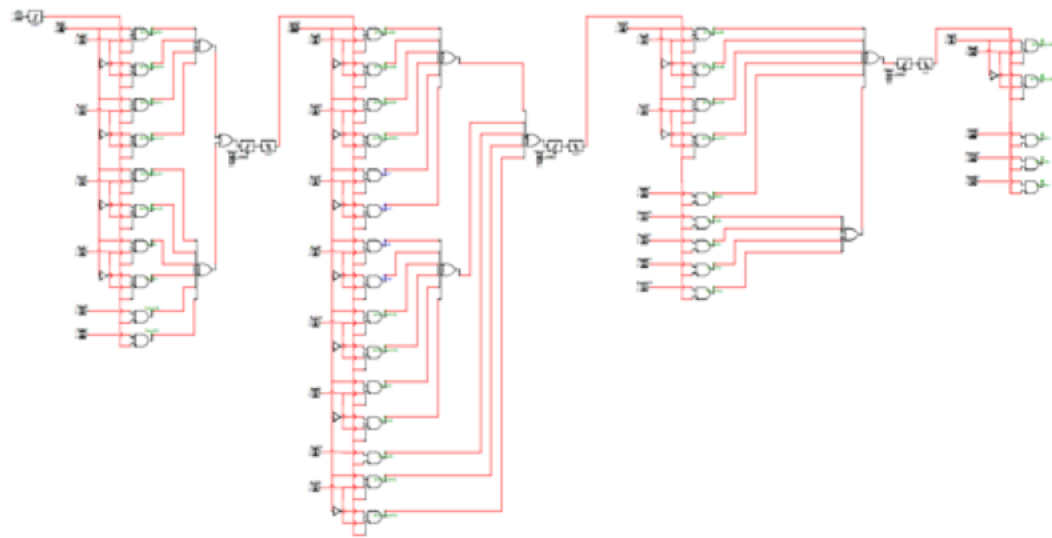
面向实时仿真的相继扰动模型结构图



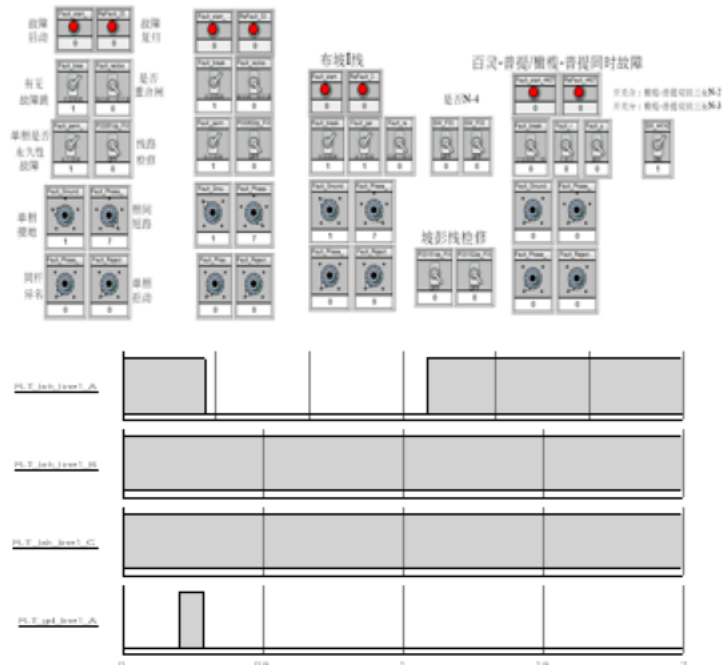
交流系统故障时序控制与断路器时序控制

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

开发的相继扰动模块化模型已经在多个大区交直流电网安全稳定控制系统硬件在环实验验证中得到应用。通过在RTDS运行监控界面的简单操作，可实现多个故障仿真的相继触发，并灵活控制故障触发时刻和断路器的开断状态。



支持交直流相继故障的RTDS自定义模型



西南RTDS实验环境的故障触发界面

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

2、硬件在环控制系统组件重构——既能快速构建，又易于维护

传统“一实验、一平台”的硬件在环构建方法，适用于小规模系统测试或装置级功能测试，难以适用于大区电网安全稳定控制系统硬件在环实验。结合大电网安全稳定控制系统工程特点和实验验证的具体需求，针对传统实验方法的不足，提出了基于组件重构的大电网安全稳定控制系统闭环验证实验软硬件接口设计方案。

常规的硬件在环实验环境构建方法应用于大电网安全稳定控制系统在环实验时的缺陷：

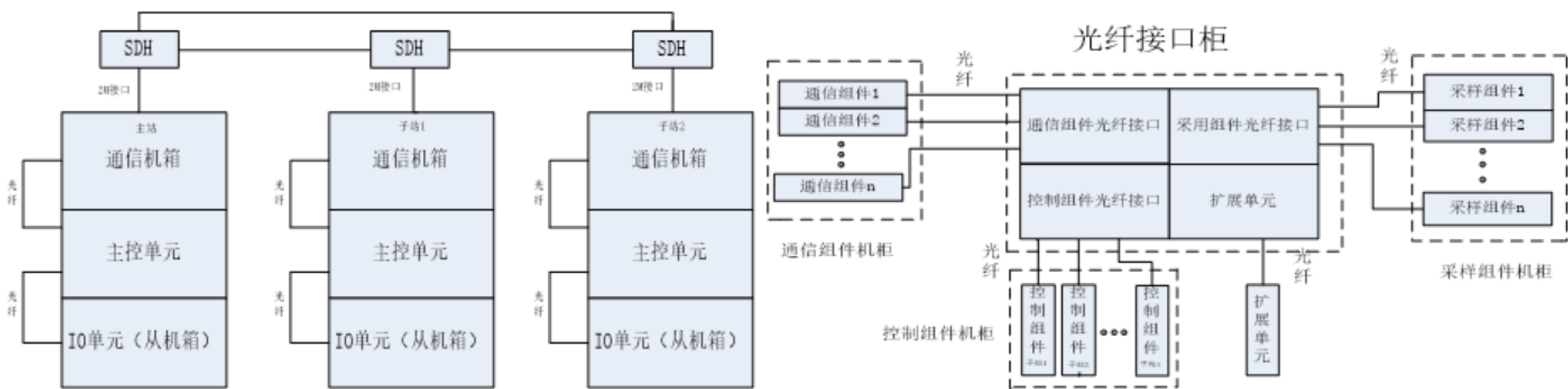
- ❑ 平台构建工作量大
- ❑ 装置间接线复杂，耗时长
- ❑ 辅助仿真设备资源投资大
- ❑ 实验环境难以长期维护



二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

(1) 功能组件重构

引入模块化的设计理念，将现有机柜进行分解，同一类功能组件重新组合构成控制机柜、采样机柜、通信机柜。设计光纤接口柜来汇聚各个机柜中组件的连接光口，在光纤接口柜中通过光纤跳线实现不同组件的灵活组合。



基于组件重构的大电网安全稳定控制系统闭环验证实验接口设计方案示意图

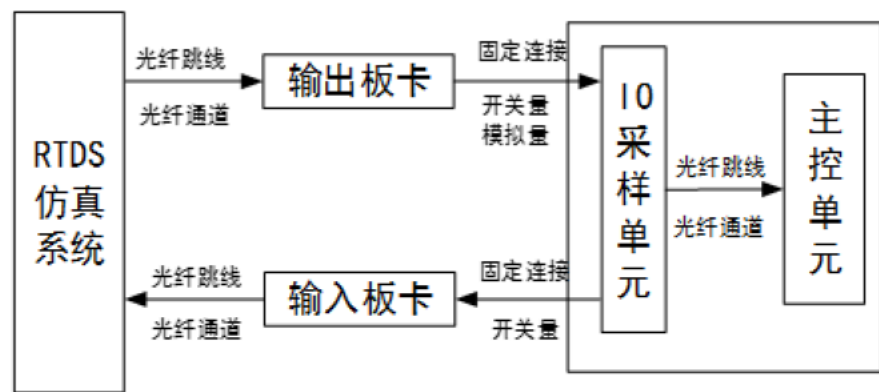
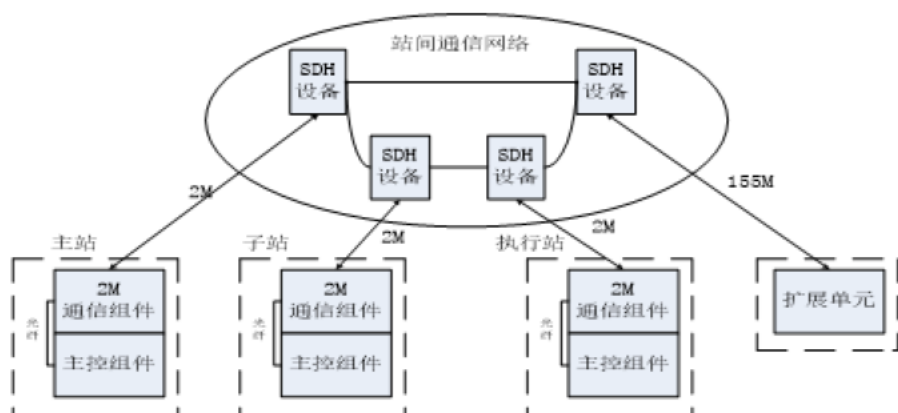
二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

(2) 采样模块标准化设计

通过对装置小幅改造，实现仿真设备板卡与装置采样回路直连。将仿真设备板卡按一定比例组合在采样机柜中，并将板卡与采样组件的端口固定连接，构成标准化采样模块。

(3) 站间通信组网设计

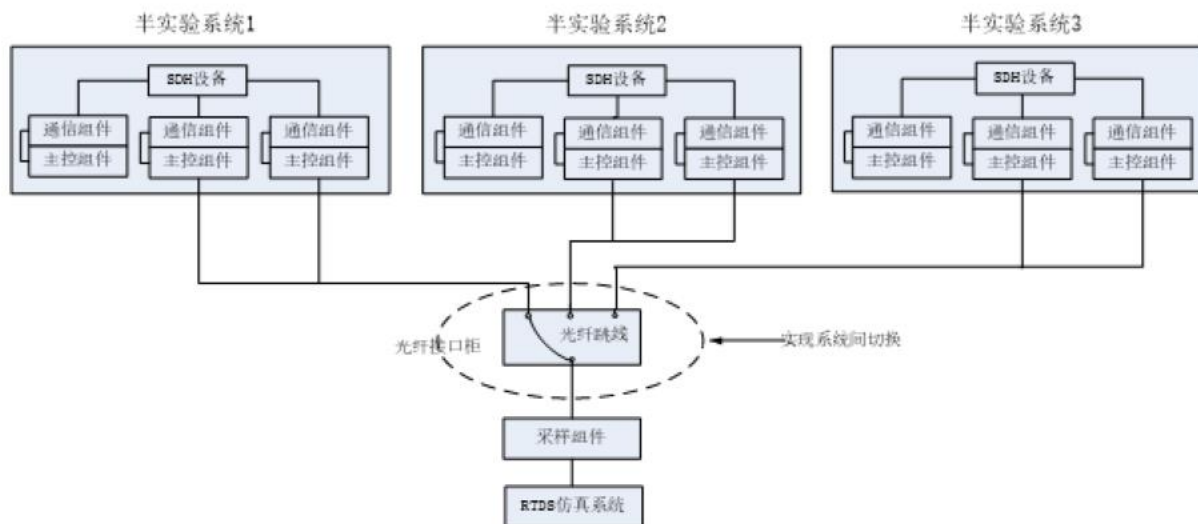
将通信组件的2M接口接入SDH设备，多个SDH设备组成通信网络，实验系统站间通信的连接只需在控制台通过SDH控制软件进行调整配置相应的业务，避免了人工接线工作，提高工作效率。



二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

(4) 多实验系统灵活切换

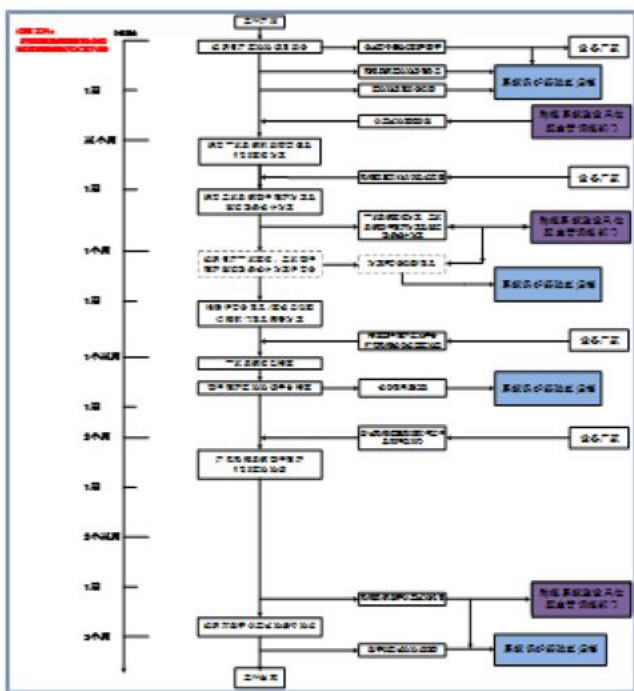
为了克服“一实验、一平台”技术的实验环境保留与多系统灵活切换问题，提出依托模块化设计在实验室构建多个由控制组件与通信组件构成的半实验系统并长期保存；同时配置了部分由采样组件与仿真设备板卡组成的采样模块。在光纤接口柜上将采样模块接入半实验系统就组成了完整的实验系统。调整采样组件的跳线，打通相应的半实验系统就完成了不同控制系统在环实验验证环境的切换。



二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

3、实验验证流程标准化——避免盲目，有章有法

配合国网公司方式、保护等相关部门完善《国家电网公司安全稳定控制系统管理实施细则》和《国调直调安全稳定控制系统控制策略和定值管理规定》，规范系统保护实验室在安控系统建设与运行阶段的职责，明确实验室出具的实验报告成为系统保护投运的必要条件。建立《系统保护实验室安全稳定控制系统实验验证流程管理细则》，实现控制系统硬件在环实验验证工作有章可循，步步留痕。



04. 验收阶段

建设单位会同主管调控部门组织验收。若有不符项，会议纪要签发后一个月内完成整改。

02. 试验平台构建

策略讨论会纪要签发后两月内，实验室完成模型搭建和平台准备工作。

新建：建设单位

改造：主管单位

03. 数字仿真试验

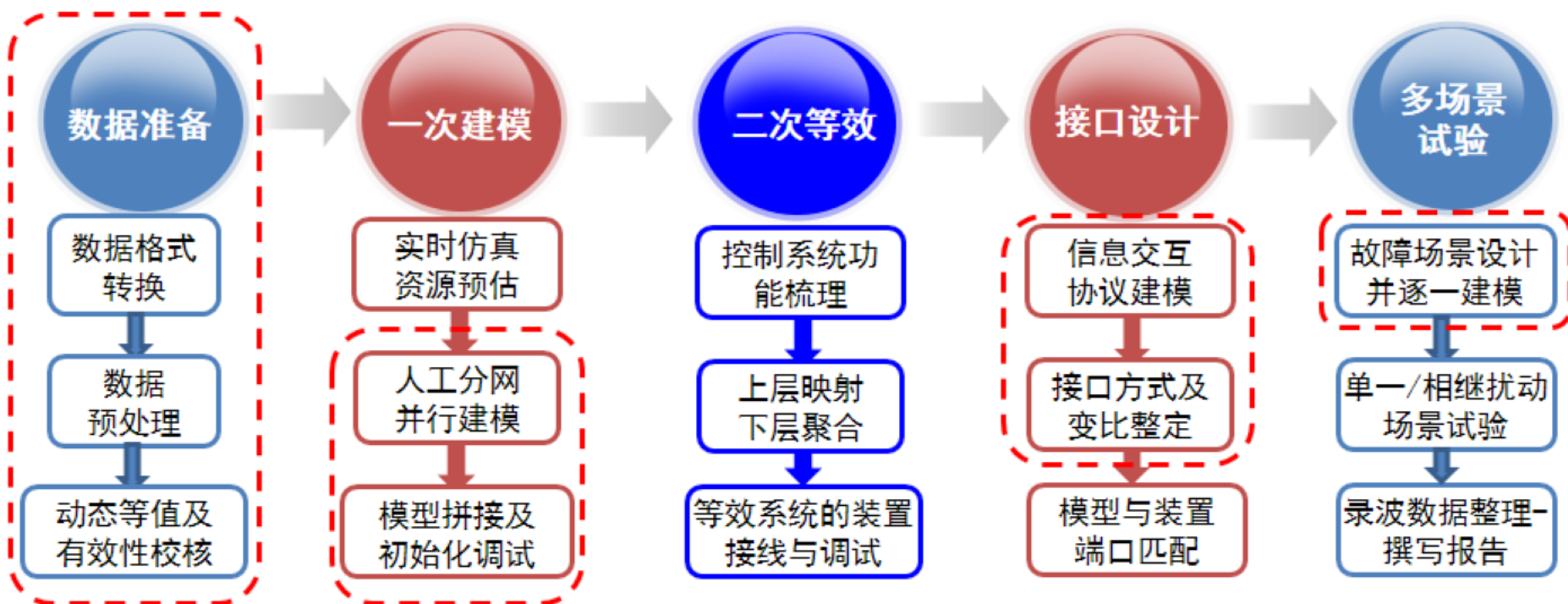
厂内调试和联调完成后一月内，组织安控设备厂家完成数字仿真实验，出厂验收前三天提交正式实验报告至建设单位。

01. 仿真实验建模参数

建设单位会同主管调控部门在设计联络会后两周内启动策略讨论会；策略讨论会后两周内，建设单位提供相关参数。

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

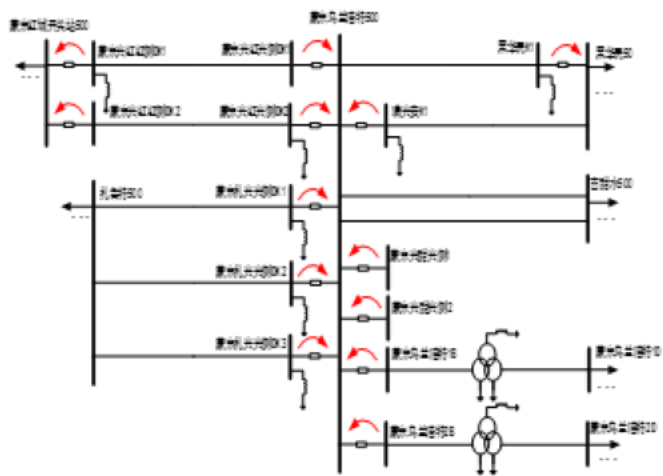
与基于理想电源信号的装置级功能性试验验证相比，控制系统级硬件在环实验在一次电网建模复杂性、二次系统硬件在环规模性、场景验证丰富性方面均有极大提升。建立了包括建模数据准备、一次电网RTDS建模及调试、二次控制系统等效、软硬件接口设计、多故障场景试验等五大步骤在内的标准工作流程。



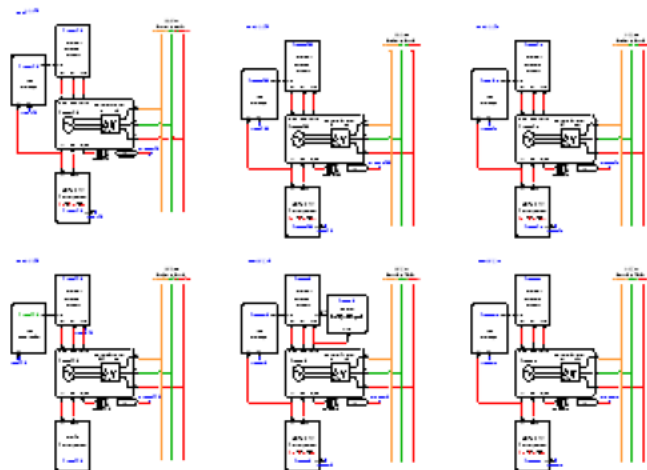
二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

4、实验任务自动化——解放人力，提高效率

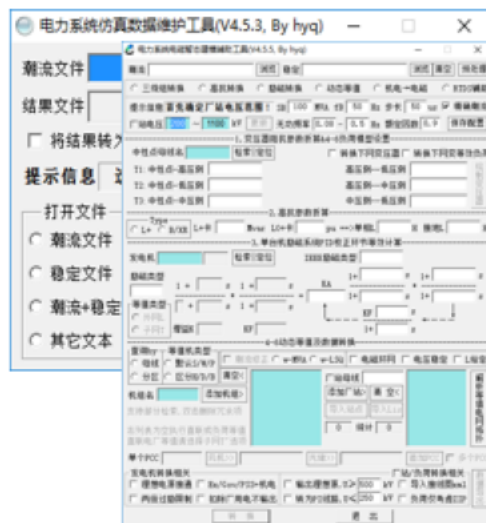
为了解决纯粹依靠人工方法在方式数据预处理、等值计算、一次系统建模等方面效率低下、易出错的弊端，开发机电数据自动预处理、动态等值、电磁暂态建模自动转换（To PSCAD/RSCAD）等工具，大大提高工程实验验证的效率和自动化水平。



某500kV站内小支路合并预处理示意图



一次性输出的某大区电网发电机模型



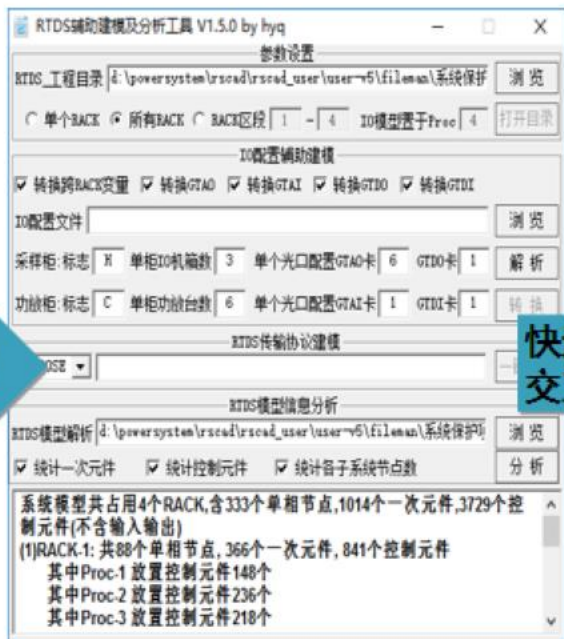
RTDS建模辅助工具

二、大电网安控系统硬件在环实验环境构建相关工作

为提高输入输出接口建模效率，根据系统保护实验室的实际布局，将软硬件信息交互的内容固化为标准方案；并据此开发了自动化的软硬件接口自动建模程序，使繁杂的输入输出接口建模工作的耗时由数十人天降至秒级，效率提升显著。

地址	名称	地址	名称	地址	名称
400	400	400	400	400	400
401	401	401	401	401	401
402	402	402	402	402	402
403	403	403	403	403	403
404	404	404	404	404	404
405	405	405	405	405	405
406	406	406	406	406	406
407	407	407	407	407	407
408	408	408	408	408	408
409	409	409	409	409	409
410	410	410	410	410	410
411	411	411	411	411	411
412	412	412	412	412	412
413	413	413	413	413	413
414	414	414	414	414	414
415	415	415	415	415	415
416	416	416	416	416	416
417	417	417	417	417	417
418	418	418	418	418	418
419	419	419	419	419	419
420	420	420	420	420	420
421	421	421	421	421	421
422	422	422	422	422	422
423	423	423	423	423	423
424	424	424	424	424	424
425	425	425	425	425	425
426	426	426	426	426	426
427	427	427	427	427	427
428	428	428	428	428	428
429	429	429	429	429	429
430	430	430	430	430	430
431	431	431	431	431	431
432	432	432	432	432	432
433	433	433	433	433	433
434	434	434	434	434	434
435	435	435	435	435	435
436	436	436	436	436	436
437	437	437	437	437	437
438	438	438	438	438	438
439	439	439	439	439	439
440	440	440	440	440	440
441	441	441	441	441	441
442	442	442	442	442	442
443	443	443	443	443	443
444	444	444	444	444	444
445	445	445	445	445	445
446	446	446	446	446	446
447	447	447	447	447	447
448	448	448	448	448	448
449	449	449	449	449	449
450	450	450	450	450	450
451	451	451	451	451	451
452	452	452	452	452	452
453	453	453	453	453	453
454	454	454	454	454	454
455	455	455	455	455	455
456	456	456	456	456	456
457	457	457	457	457	457
458	458	458	458	458	458
459	459	459	459	459	459
460	460	460	460	460	460
461	461	461	461	461	461
462	462	462	462	462	462
463	463	463	463	463	463
464	464	464	464	464	464
465	465	465	465	465	465
466	466	466	466	466	466
467	467	467	467	467	467
468	468	468	468	468	468
469	469	469	469	469	469
470	470	470	470	470	470
471	471	471	471	471	471
472	472	472	472	472	472
473	473	473	473	473	473
474	474	474	474	474	474
475	475	475	475	475	475
476	476	476	476	476	476
477	477	477	477	477	477
478	478	478	478	478	478
479	479	479	479	479	479
480	480	480	480	480	480
481	481	481	481	481	481
482	482	482	482	482	482
483	483	483	483	483	483
484	484	484	484	484	484
485	485	485	485	485	485
486	486	486	486	486	486
487	487	487	487	487	487
488	488	488	488	488	488
489	489	489	489	489	489
490	490	490	490	490	490
491	491	491	491	491	491
492	492	492	492	492	492
493	493	493	493	493	493
494	494	494	494	494	494
495	495	495	495	495	495
496	496	496	496	496	496
497	497	497	497	497	497
498	498	498	498	498	498
499	499	499	499	499	499
500	500	500	500	500	500

导入接口建模程序



快速生成交互模型



大电网安全稳定控制系统闭
环验证实验信息交互方案

自主开发的接口建模辅助工具

基于RTDS的信号输入输出模型

目 录

01 背景介绍

02 大电网安控系统硬件在环实验环境构建 相关工作介绍

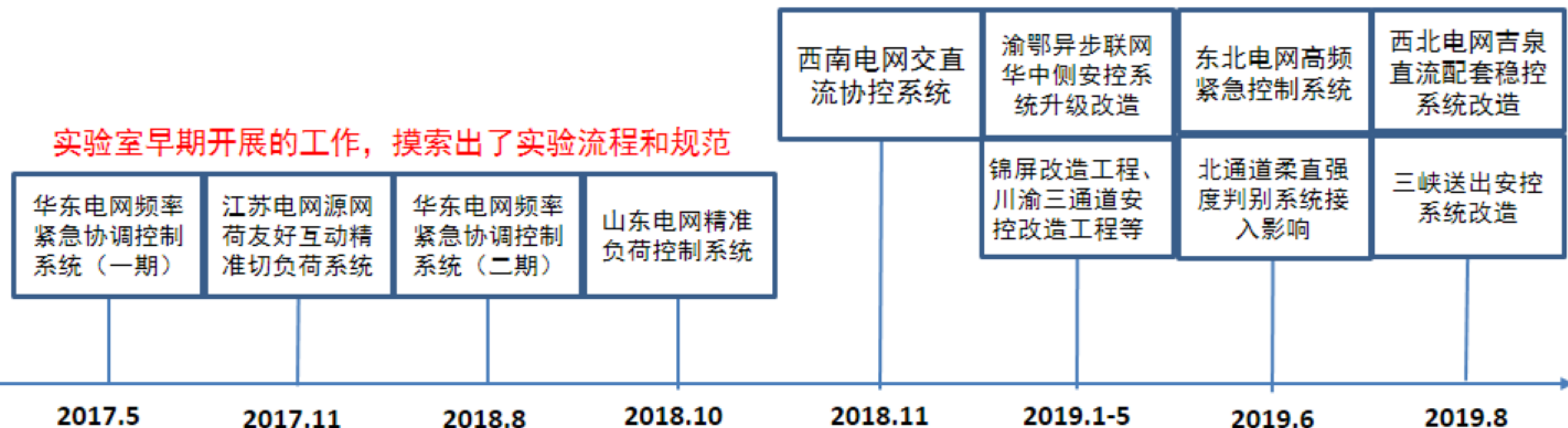
03 实际安控系统工程验证案例

04 总结与展望

三、实际工程验证案例介绍

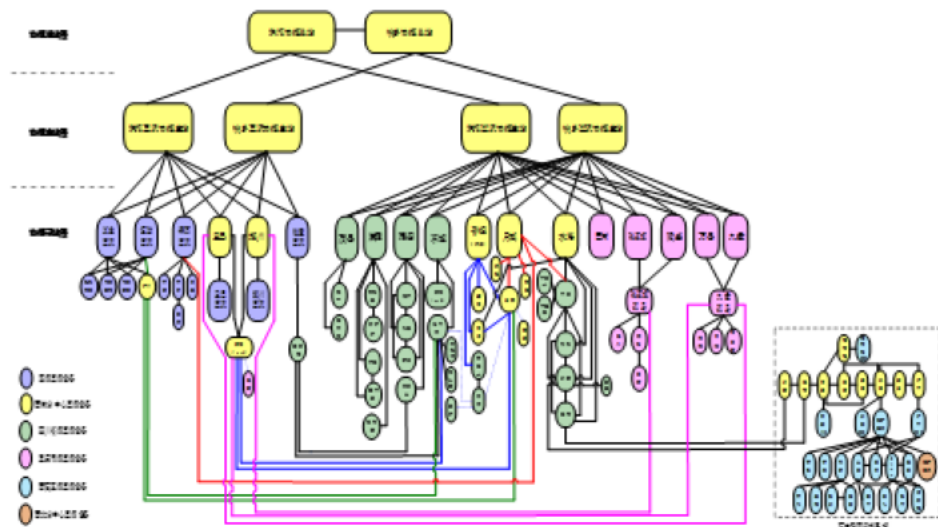
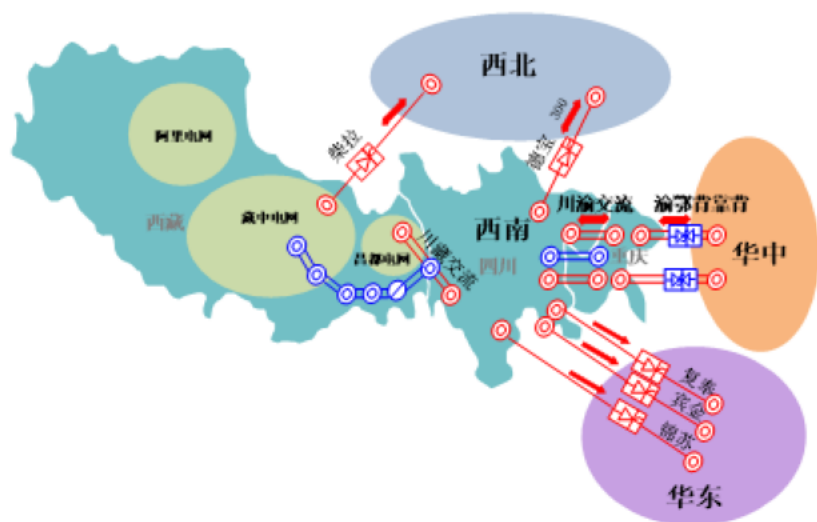
至2019年8月底，实验室团队完成了多项大区电网安全稳定控制系统工程或重大安控工程的硬件在环实验。累计开展了100余个故障场景、260余次试验验证，协调相关厂家多次进行系统版本升级，提升了安全稳定控制系统的运行可靠性，全力保障电网安全稳定运行。

实验室早期开展的工作，摸索出了实验流程和规范



三、实际工程验证案例介绍

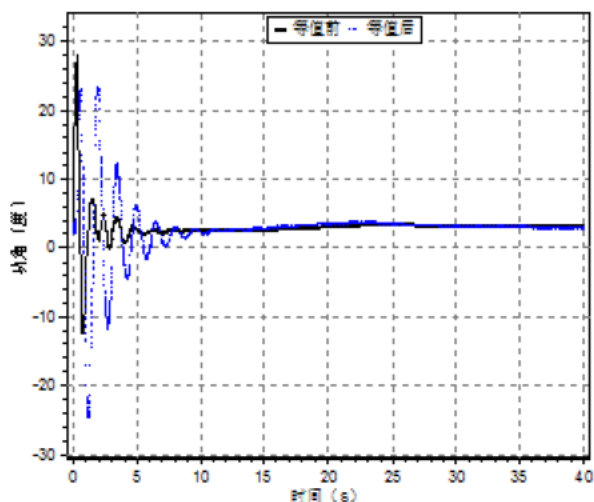
西南电网交直流协控系统硬件在环实验，是系统保护实验室成立以来完成的控制系统最复杂、软硬件资源投入最多（占用15个NovaCor，一次性接入稳控装置140余台套）的大电网安全稳定控制系统硬件在环实验验证。



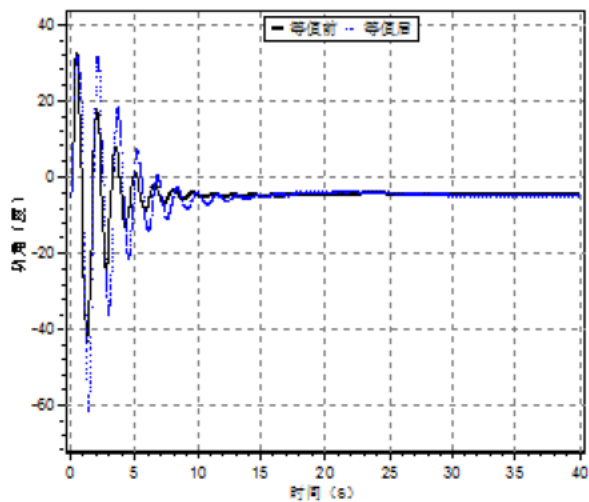
西南电网交直流协控系统是保障西南电网与华北-华中异步联网后，西南水电可靠送出和电网安全稳定运行的系统保护工程。

三、实际工程验证案例介绍

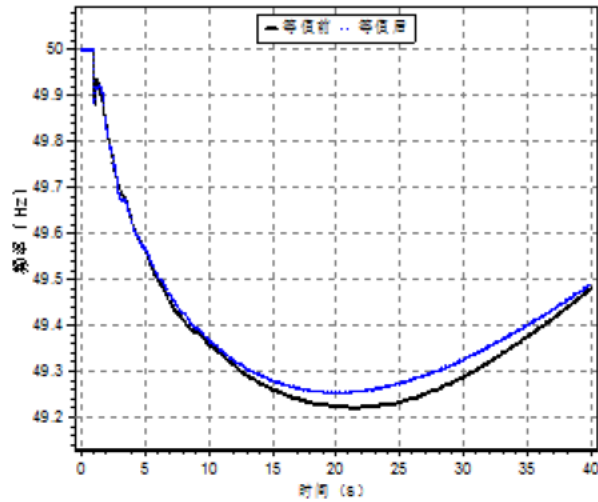
基于西南分中心提供的运行方式数据，为保全西南电网水电送出通道短路故障下的功角稳定特征和落点直流闭锁故障下的频率稳定特征，对电网进行动态等值。等值系统保留了西南电网全部的500kV交流网架和落点7回直流；等值前后各省网机组容量、惯量、旋备容量及调节特性保持不变，省间电网潮流/直流馈入功率保持不变。等值后规模约为原规模的1/5~1/10（母线/线路/变压器:1/10，机组:1/5）。



等值前后N-1故障，机组功角



等值前后N-2故障，机组功角

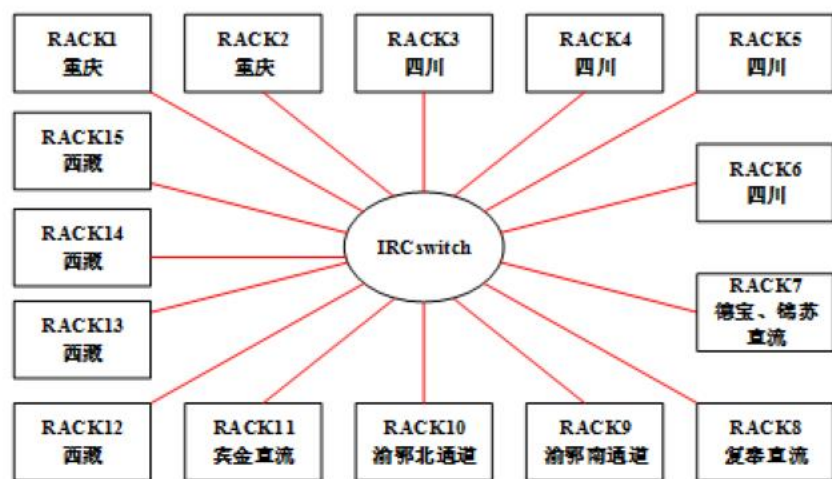


德宝直流双极闭锁，系统频率

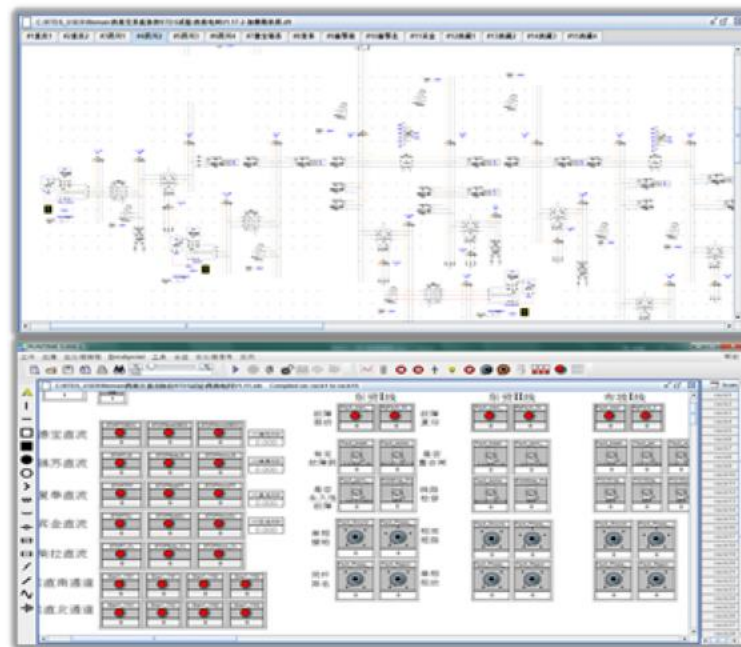
三、实际工程验证案例介绍

基于等值后电网数据，在RTDS平台上建立与之严格一致的实时仿真模型，并相对均衡地分配在15个NovaCor上，其中交流系统占用10个，直流系统占用5个。多个NovaCor之间通过IRCswitch总线进行通信。

另外，搭建了交直流单一/相继故障场景模型，类型涵盖交流线路三永、同杆异名相、无故障跳、直流闭锁（单极/双极/单端）、功率速降等。



西南电网交直流协控系统硬件在环实验
仿真计算资源分布图



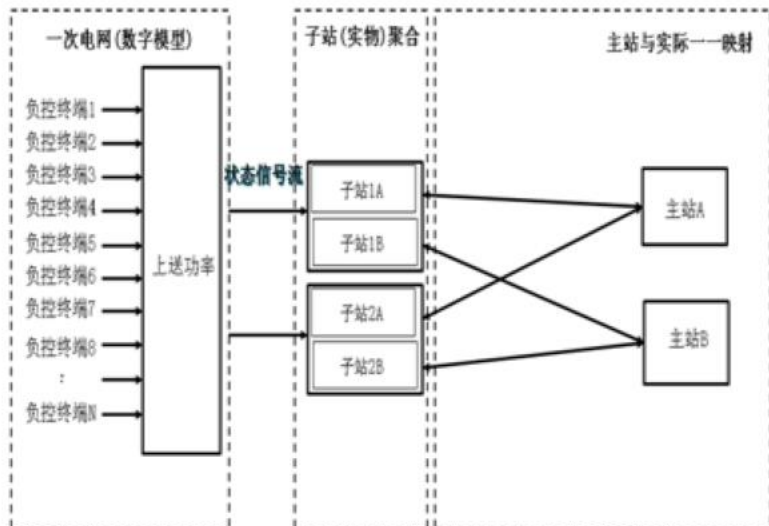
基于RTDS的西南电网仿真模型

三、实际工程验证案例介绍

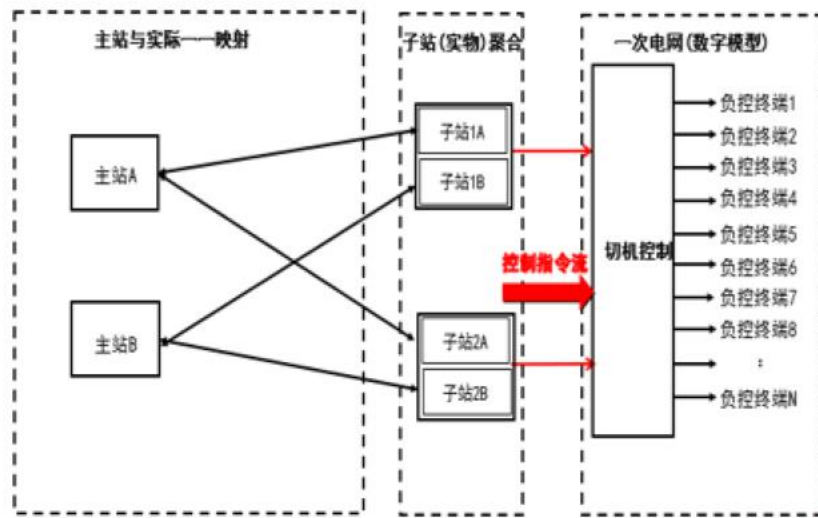
2、西南电网交直流协控系统硬件在环实验环境构建

受实验资源及场地等多种因素的限制，实验室环境下无法按1:1原则搭建控制系统工程，需要对控制系统进行简化。为了保全整个控制系统的架构特点、控制逻辑及功能，提出了“上层映射，下层聚合”的大电网安全稳定控制系统功能等效方法：

- (1) 保障上层总站收取信息在底层聚合前后不变，不影响总站的控制决策；
- (2) 底层聚合后仍能覆盖所有的控制类型，实现总站控制逻辑验证的全覆盖。



状态信号流程图

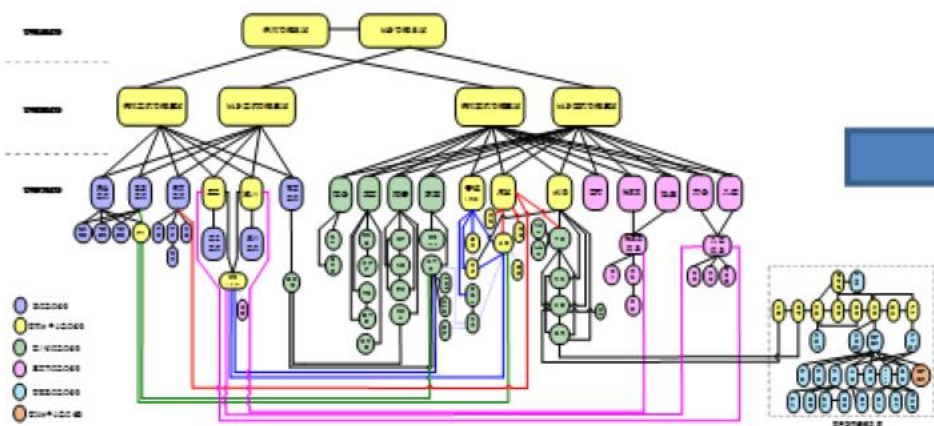


控制指令图

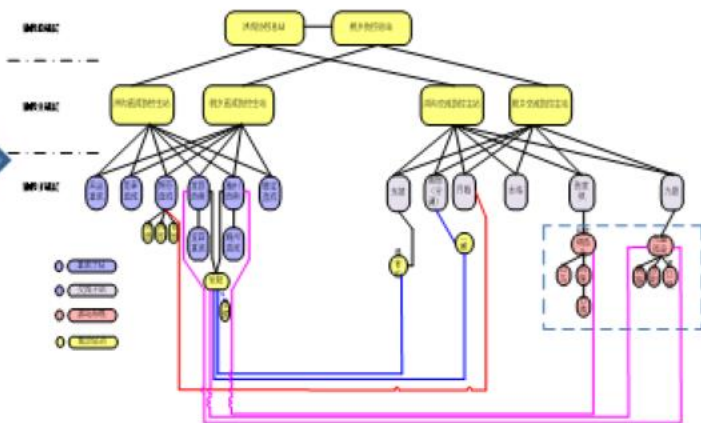
三、实际工程验证案例介绍

通过梳理西南电网交直流协控系统功能，确定保留洪沟、桃乡双总（主）站及通信架构、保留6个直流子站，并在12个交流子站中有针对性选择7个交流子站，建立硬件在环实验环境。

基于组件重构技术，将37个控制站点的主控机箱、IO机箱、通信机箱分别组柜，并与一次电网实时仿真模型通过光纤接口柜的跳线组合形成闭环通路。



西南电网交直流协控系统架构图



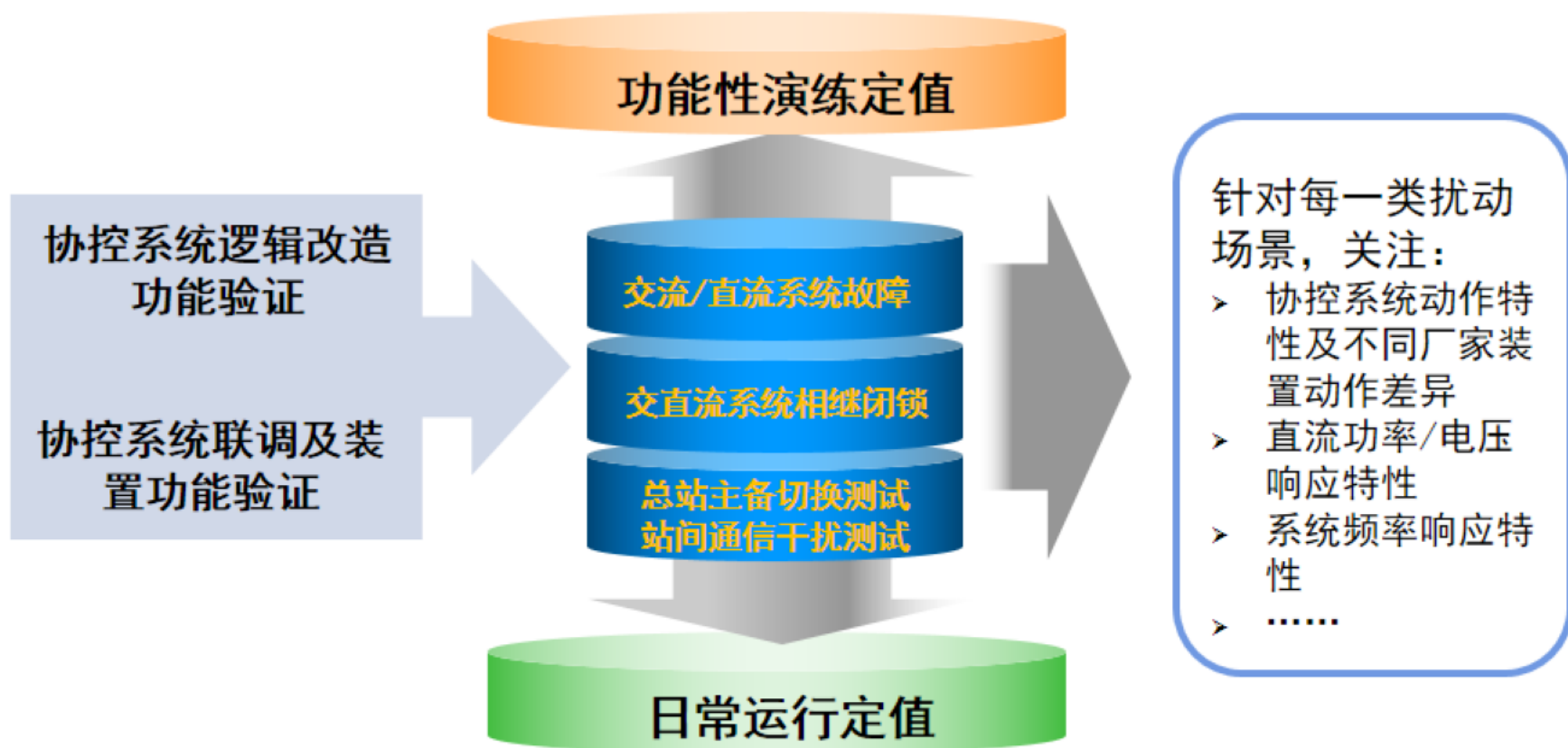
西南电网交直流协控系统功能等效后架构图

基于等值后的电网模型和等效系统制定的实验信息交互方案，包括**2000余个**模型量/开关量信息置信息以及**6条**直流超**500个**变量的ft3通信协议信息。

三、实际工程验证案例介绍

3、西南电网交直流协控系统硬件在环实验验证

构建了5大类50余种实验场景，详细模拟了从一次电网大功率扰动发生并触发协控系统动作，各级站点协调控制后电网频率逐步恢复的闭环过程，全方位验证西南电网交直流协控系统的功能可靠性、控制策略有效性、多故障场景下控制信息层间交互及执行的准确性。



三、大电网安控系统硬件在环实验的效果

通过大电网安全稳定控制系统硬件在环实验验证，发现了厂内功能性测试无法（或难以）发现的一些问题，在控制系统投运前提前排除系统在架构设计、控制策略等方面的一些隐患。

控制系统硬件在环试验发现的问题

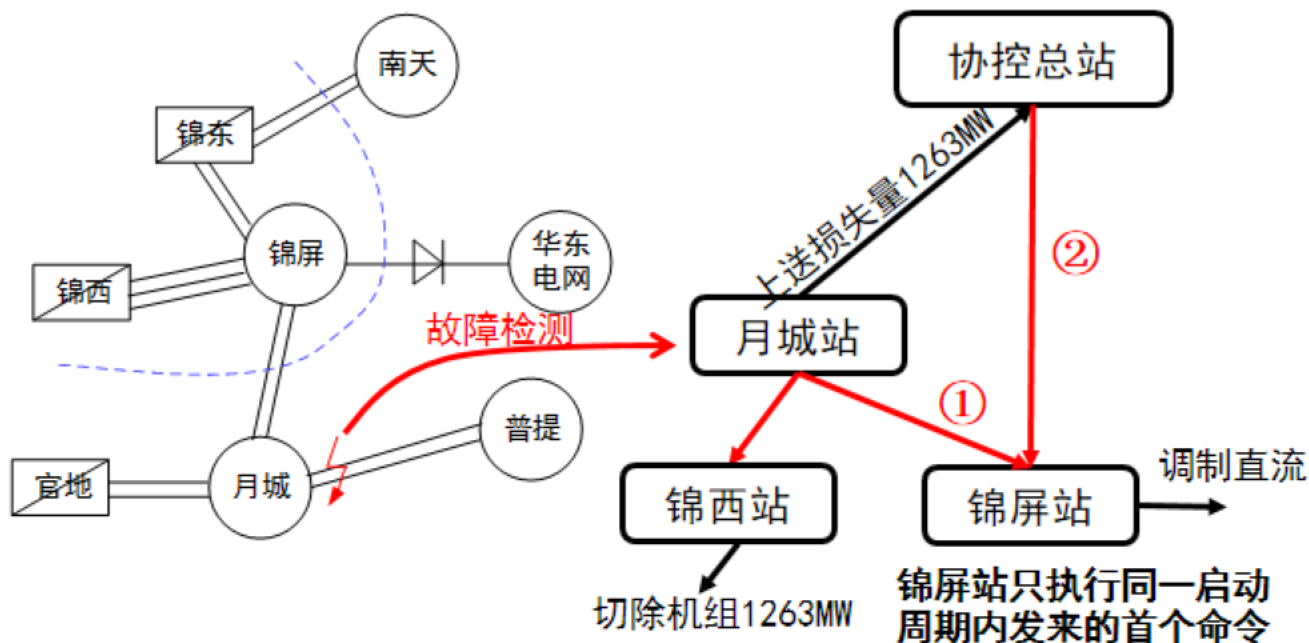
编号	分类	问题说明	备注
1	厂内测试无法复现	直流相继较长时间闭锁，子站与总站对于同一启动周期的返回确认机制不同，导致过控	厂内测试无法提供一次系统频率响应
2		就地低频功能未对直流是否具备可调能力进行判断，会向不具备调制能力直流发送命令，造成欠控	厂内测试无法提供一次系统频率响应
3	厂内测试复现难度大	交直流相继闭锁，区域稳控和协控总站相继向某直流下达直流调制命令，但直流配套稳控仅执行一次	厂内实验需同时构建区域稳控和协控系统测试平台
4	厂内测试可复现，但忽略电网稳定影响	交流故障后调制直流，尔后该直流闭锁，可能造成控制对象重叠；而且，现有稳控系统均认为直流损失量为交流故障前的直流运行功率。	厂内测试只能验证装置动作正确，无法评估动作效果

三、大电网安控系统硬件在环实验的效果

第一类：常规厂内测试虽能实现，但平台构建条件限制多，实施难度大。控制系统硬件在环实验可充分利用实验室多家安控厂商设备集中、多个关联安控系统实验场景易于构建的优势，开展“全功能覆盖”的系统级实验。

实验中发现并排除控制子站不能正确兼顾不同方向、不同层级下达的控制指令，导致控制失效的问题。

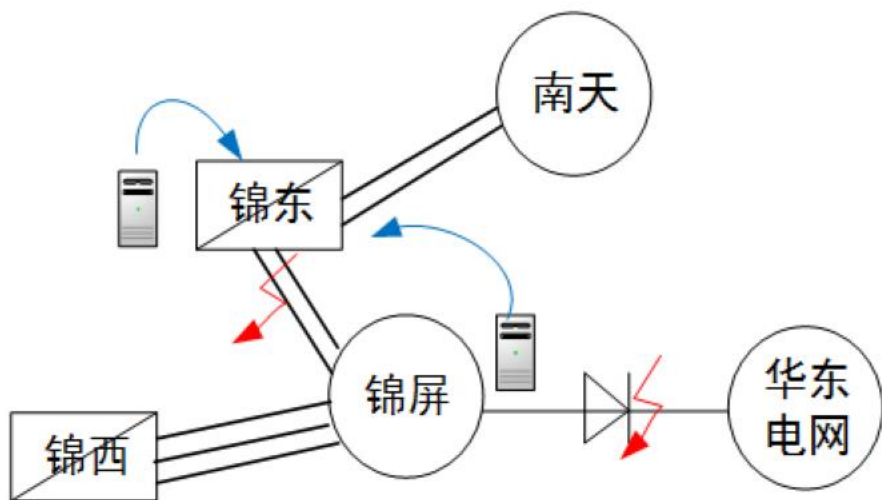
问题描述：月城站区域稳控与西南协控均具备触发锦苏直流调制功能。若发生月城-普提双线N-2故障，且月城站稳控投入“调制锦苏直流”功能压板，可能导致锦苏直流在同一启动周期内陆续收到月城站和协控总站发来的调制命令，但锦屏站只执行前者，忽略协控总站后来发的调制命令；同时，月城上送总站的损失量为切机总量，未扣除月城发至锦苏的直流调制量。



三、大电网安控系统硬件在环实验的效果

第二类：针对传统厂内测试无法做到一次电网精确模拟，难以复现控制系统动作为与一次电网动态响应耦合的基因性缺陷，充分利用实验“硬件在环，仿真闭环”的优势，发现控制系统隐患。

实验发现多个区域安控系统控制对象重叠、控制量计算与电网实际情况不符问题。



锦苏直流近区拓扑示意图

问题1：多个安控子系统的控制对象重叠

孤立设计的锦东安控与锦苏直流配套稳控，均存在故障后切除锦东机组的控制策略。若发生锦东线路三永和锦苏直流闭锁相继故障，会出现控制对象重叠。

问题2：判定直流闭锁功率损失量与实际不符

现有安控系统设计均在首个故障发生时，锁定故障前200ms时刻监测量。当交流故障后触发直流调制，尔后直流闭锁，则认为直流闭锁造成的功率损失为调制前的输送功率。

问题3：主子站对于电网或事件识别判据不协调导致的控制过量风险

直流双极间隔20s相继闭锁，主站第一个事件后5s返回（一个启动周期），而子站因辅助判据不满足未返回。主站识别为相继事件，子站识别为同一事件。

目录

01

背景介绍

02

大电网安控系统硬件在环实验环境构建
相关工作介绍

03

实际安控系统工程验证案例

04

总结与展望

四、总结与展望

电网安全关乎社会稳定和能源安全，是电网头等大事。安全稳定控制系统的可靠运行是保障电网安全稳定的关键。国网公司指示我们要以国际一流标准，把实验室建设好、运行好。

为更好发挥实验室生产支撑和高端引领作用，实现公司对实验室的定位与发展目标。在国家电网公司指导下，实验室正在着手建立大电网安全稳定控制监控管理系统，实现大电网安控系统的集中监视、预警和可靠性评估；正在加快建设风光储半实物硬件在环实验平台，为研究电力电子化电力系统特性机理提供支撑。

系统保护实验室将以支撑大电网及其安全稳定控制系统的可靠运行为己任，不忘初心、牢记使命、责任在肩、砥砺前行；并与各位同行专家一道，共同推动大电网实验验证技术发展！



**感谢聆听
恳请指正！**