



国家电网
STATE GRID

许继集团有限公司
XJ GROUP CORPORATION

许继直流RTDS实时仿真 应用介绍

许继直流输电分公司

2019年10月



1

许继直流简介

2

RTDS实时仿真工程应用

3

RTDS实时仿真科研应用

4

RTDS纯数字控保模型研究

5

离线仿真PSCAD的支撑



1

许继直流简介

2

RTDS实时仿真工程应用

3

RTDS实时仿真科研应用

4

RTDS纯数字控保模型研究

5

离线仿真PSCAD的支撑



一、许继直流简介

1. 简介

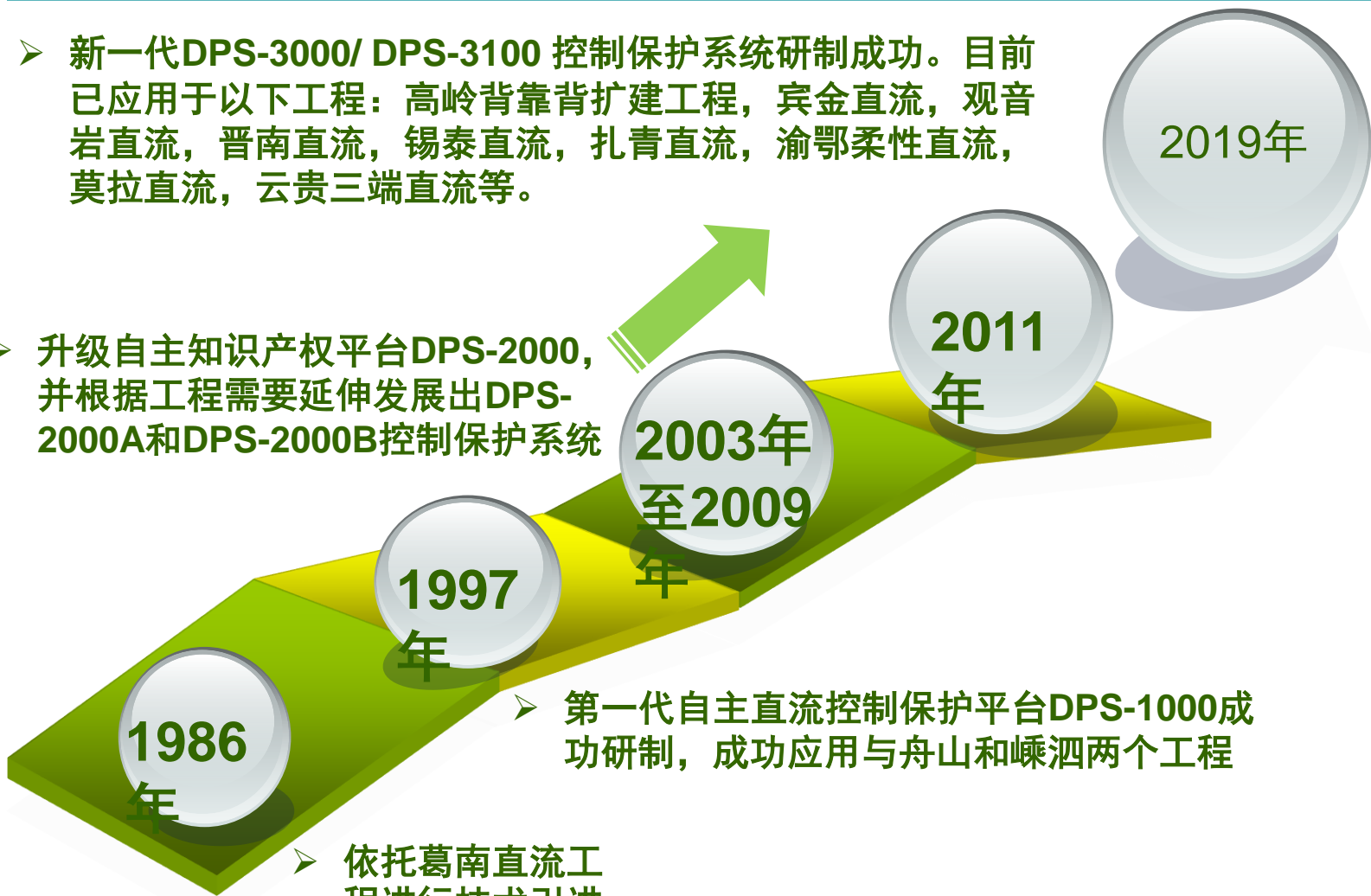
- 许继集团是国内唯一一家能够提供完整特高压/超高压直流输电换流阀、成套控制保护、成套水冷设备、直流场设备的企业。先后承担了二十几个不同类型的直流输电工程的相关设备的研制、试验、生产制造、现场试验等工作。
- 直流输电分公司承担直流工程中控保设备的制造、调试，控保算法的理论研究、实际应用等相关工作。



一、许继直流简介

2. 许继直流控保装置发展历程

- 新一代DPS-3000/ DPS-3100 控制保护系统研制成功。目前已应用于以下工程：高岭背靠背扩建工程，宾金直流，观音岩直流，晋南直流，锡泰直流，扎青直流，渝鄂柔性直流，莫拉直流，云贵三端直流等。
- 升级自主知识产权平台DPS-2000，并根据工程需要延伸发展出DPS-2000A和DPS-2000B控制保护系统
- 第一代自主直流控制保护平台DPS-1000成功研制，成功应用与舟山和嵊泗两个工程
- 依托葛南直流工程进行技术引进





3. 许继购买RTDS仿真设备历程

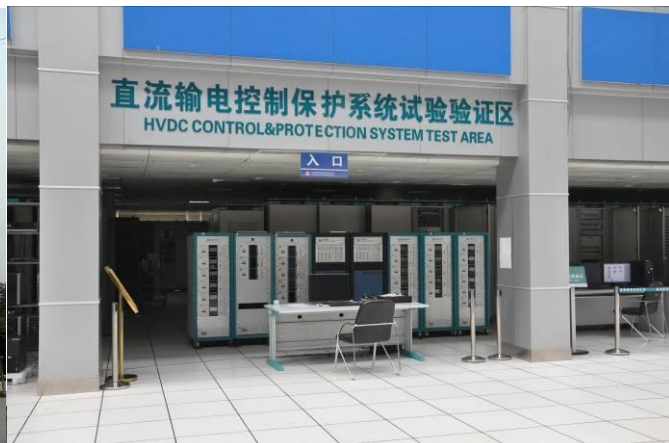
- 1998年，首次购买4个rack；硬件配置TPC, WIC
- 2003年，二次购买4个rack；硬件配置3PC,WIF
- 2006年，对首次购买的4个rack进行硬件升级为GPC和WIF
- 2009年，购买5个rack；硬件配置GPC,GTWIF
- 2011~2016年，购买14个rack；硬件配置PB5, GTWIF
- 2017~至今，购买3个Novacor-chassis



一、许继直流简介

4. 许继直流试验环境

- ◆ 拥有大型直流仿真试验中心和配套仿真设备，可以同时进行多个直流工程控制保护设备的整体功能性能试验和相关研究任务。





5. 厂内主要RTDS试验平台

- 高岭/宁东/三沪RTDS试验研究平台
- 宾金/晋南RTDS试验研究平台
- 锡泰/扎青RTDS试验研究平台
- 渝鄂柔直工程RTDS试验研究平台
- 直流配电网RTDS试验研究平台
- 白鹤滩工程前期研究RTDS试验平台
- 莫拉工程FPT试验平台
- 云贵三端工程FPT试验平台
- 陕武工程FPT试验平台



1

许继直流简介

2

RTDS实时仿真工程应用

3

RTDS实时仿真科研应用

4

RTDS纯数字控保模型研究

5

离线仿真PSCAD的支撑



二、RTDS实时仿真工程应用

RTDS实时仿真工程应用

十余个直流工程控保系统的FPT、DPT试验验证：

宁东±660kV直流

三沪II回±500kV直流

贵广II回±500kV直流

糯扎渡特高压直流

高岭背靠背直流

溪浙±500kV特高压直流

观音岩±500kV直流

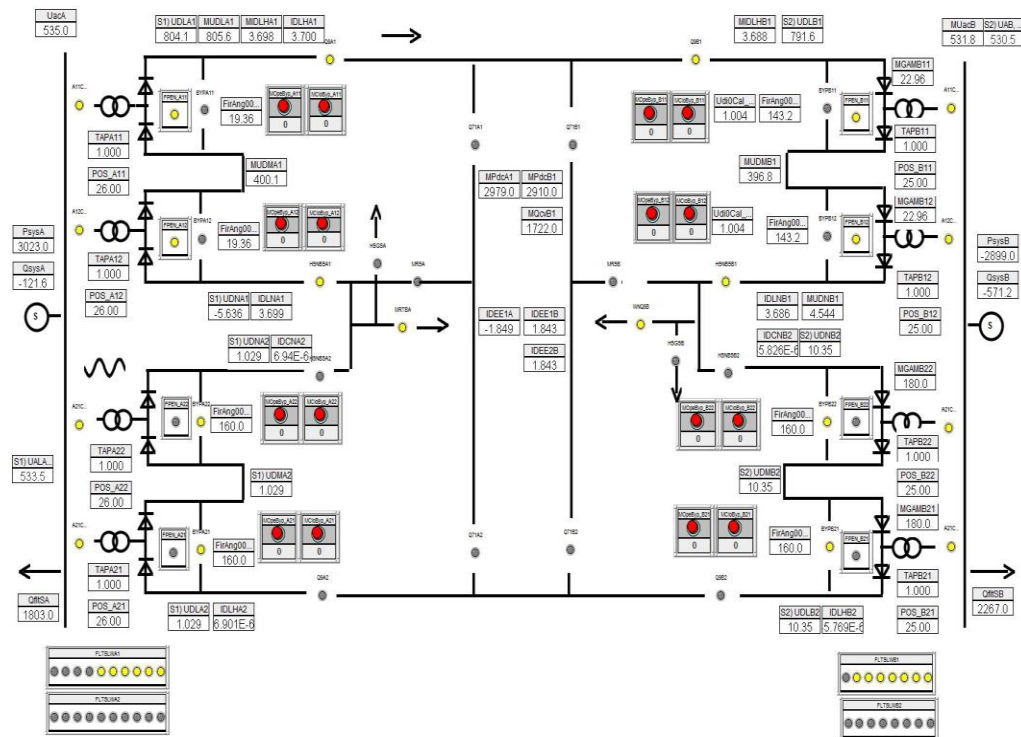
晋北±800kV特高压直流

锡泰±800kV特高压直流

扎青±800kV特高压直流

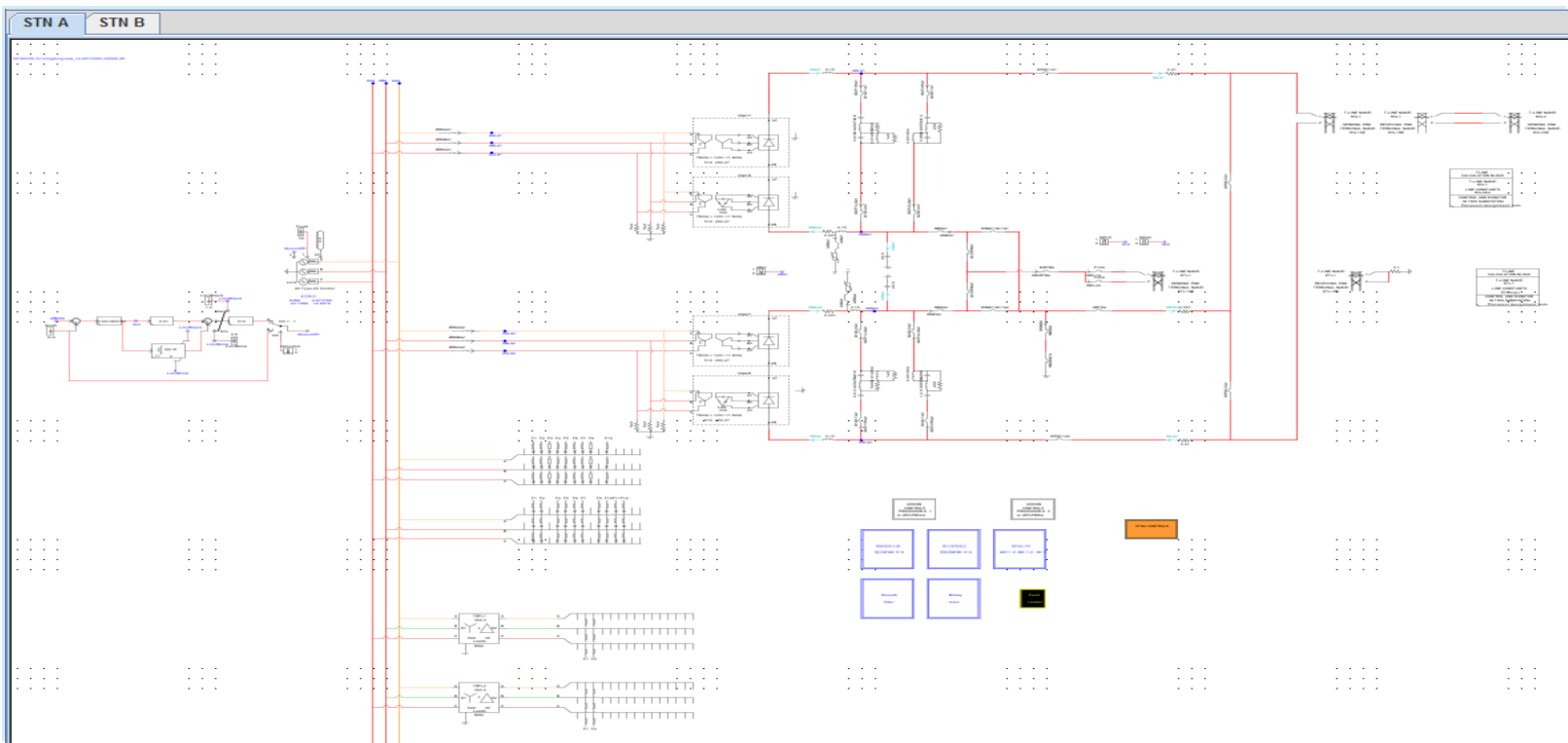
渝鄂±420kV背靠背柔性直流

....





莫拉工程RTDS-FPT闭环调试试验



巴基斯坦默蒂亚里-拉合尔±660kV直流输电工程，是2015年5月习近平主席访问巴基斯坦期间签署中巴经济走廊项目中的优先实施项目，是“一带一路”战略重点工程，是巴基斯坦国内第一条高压直流输电线路，也是目前巴基斯坦国内电压等级最高、输电距离最长、输送容量最大的输电线路。该项目是落实国家“一带一路”战略，推动中巴经济走廊建设的重要举措。本工程输电距离约878km，额定功率4000MW，额定电压±660kV，额定电流3030A，计划2021年3月双极建成投产。许继集团承担了默蒂亚里换流站、拉合尔换流站控制保护系统、换流阀及测量装置的供货任务。



二、RTDS实时仿真工程应用

云贵三端工程RTDS-FPT闭环调试试验



►云贵互联直流工程送端新建500kV禄劝换流站，新建1回±500kV直流线路，接入已建成的高肇直流高坡换流站，形成云南禄劝换流站-贵州高坡换流站-广东肇庆换流站三端直流（简称“禄高肇直流”）。



云贵三端工程RTDS-FPT闭环调试试验

新技术攻关和研制

本工程是国内首次将两端常规直流改造为三端常规直流，禄高肇三端直流的三站容量相同，因此系统方式多样，运行方式复杂，包括**6**种两端方式，**2**种三端方式，还具有极性反转等功能，控制保护目前无成熟经验。从**FPT**预实验阶段开始，攻坚组对这些新技术进行了针对性的测试。

（1）高坡站极性转换控制

在顺控、解闭锁、**HVDC**保护等大类试验时，充分考虑高坡站作为整流站和逆变站运行时的控制功能

（2）多端功率协调控制特性

在直流故障、稳定控制功能、线路故障等大类的试验时，充分设计了二送一和一送二方式下，不同换流站退出时的功率转换策略，并同时考虑过负荷限制

（3）第三站在线投退

在解/闭锁大类试验中，充分考虑了两端运行，第三站的投退控制功能及特性的测试



云贵三端工程RTDS-FPT闭环调试试验

(4) 三站的站间通信传输与高坡站极性反转时的通信自动切换逻辑

在解闭锁、稳态运行、功率升降等大类试验时，充分验证工程单回通信链路故障时的信号转发、通信“孤岛”等情况下的站间通信功能

(5) 共用接地极、金属回线方式下的站内接地点

在金属-大地转换、线路故障等试验大类中，充分考虑不同运行方式下的站内接地点转换的控制响应

(6) 高坡站极性转换区、汇流母线区域保护配置

对高坡站的故障点进行了特殊的配置，并设计了相关的试验

(7) 高坡极性反转后，保护的适应性

在线路故障重启动大类试验中，考虑了高坡站整流和逆变运行时，保护配置的正确性

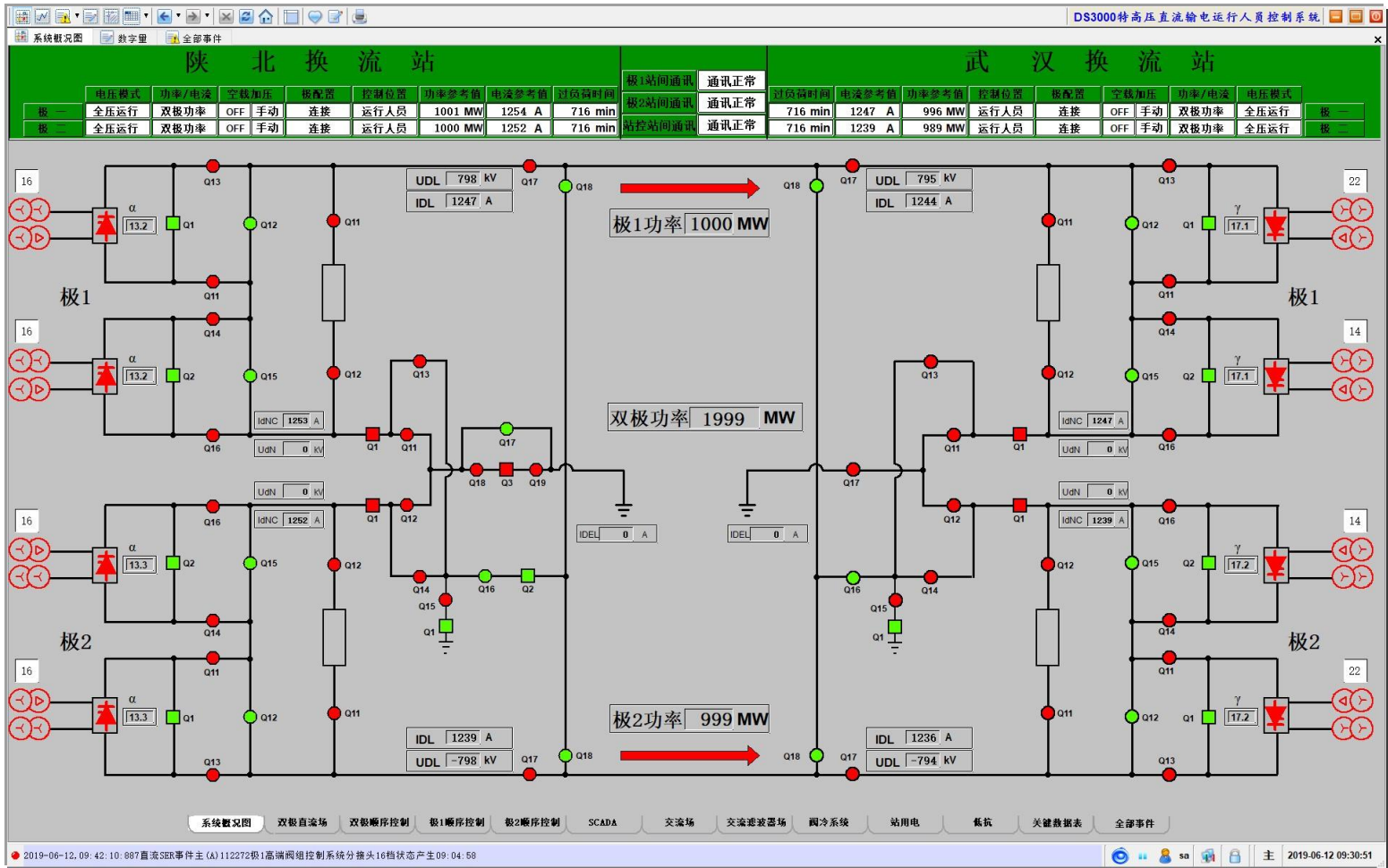
(8) 三端线路故障重启动配合

在线路故障重启动大类试验中，考虑了二送一、一送二以及两端运行时，故障重启的控制响应与三站配合的正确性



二、RTDS实时仿真工程应用

陕武工程RTDS-FPT闭环调试试验



▶ 陕北~湖北±800kV特高压直流输电工程额定输送功率为8000MW，额定直流电压±800kV，起点陕西省榆林地区，落点湖北省武汉地区，工程计划2020年投产。陕北换流站通常为整流站运行，武汉换流站通常为逆变站运行。



1

许继直流简介

2

RTDS实时仿真工程应用

3

RTDS实时仿真科研应用

4

RTDS纯数字控保模型研究

5

离线仿真PSCAD的支撑

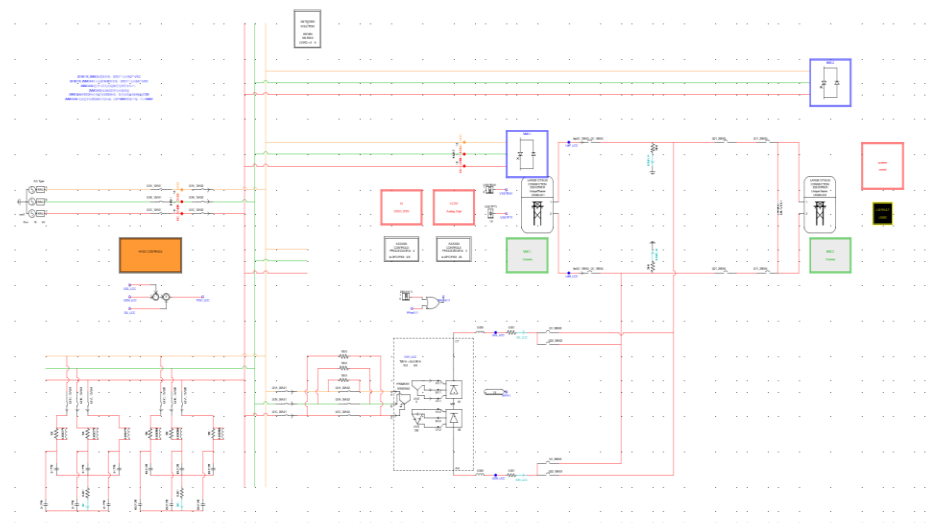
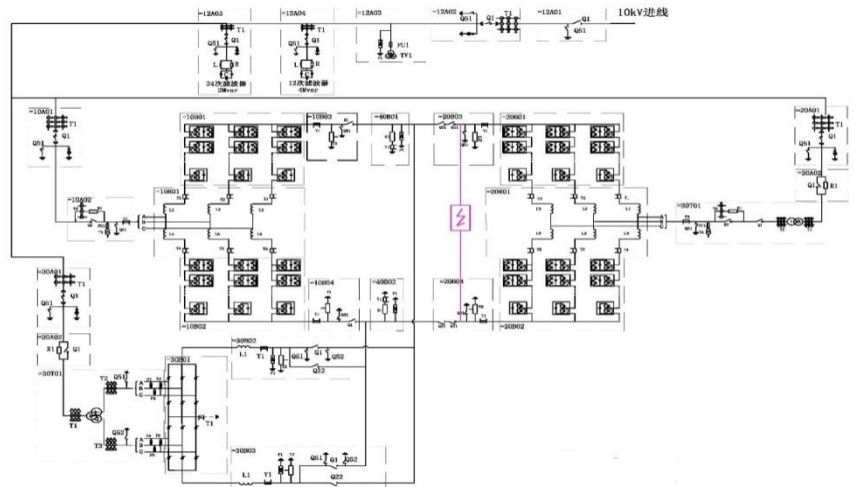


三、RTDS实时仿真科研应用

乌东德±10.5kV试验系统RTDS实时仿真研究

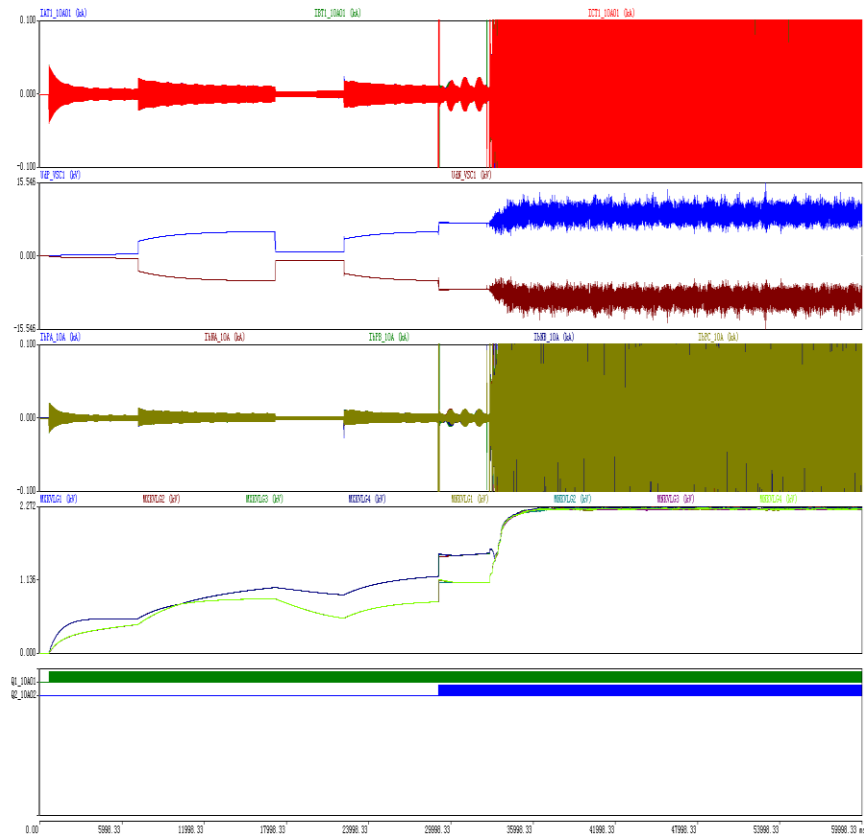
▶本项目来源于南方电网公司科技项目技术创新平台类“特高压多端混合直流控制保护系统试验研究平台建设”的采购；提供的控制保护系统能够满足±10.5kV三端样机平台的完整控制、保护功能及运行试验、检测需求；平台采用对称单极单阀组接线，由一端21MW常规直流和两端66MW柔性直流组成。

▶以此平台为原型，建立了RTDS仿真模型，该模型根据RTDS仿真的要求对一次系统有所化简，该简化不会对交、直流系统动态性能的检测造成影响。通过接口板卡与直流控制保护系统形成闭环，以满足直流保护控制系统测试需求。

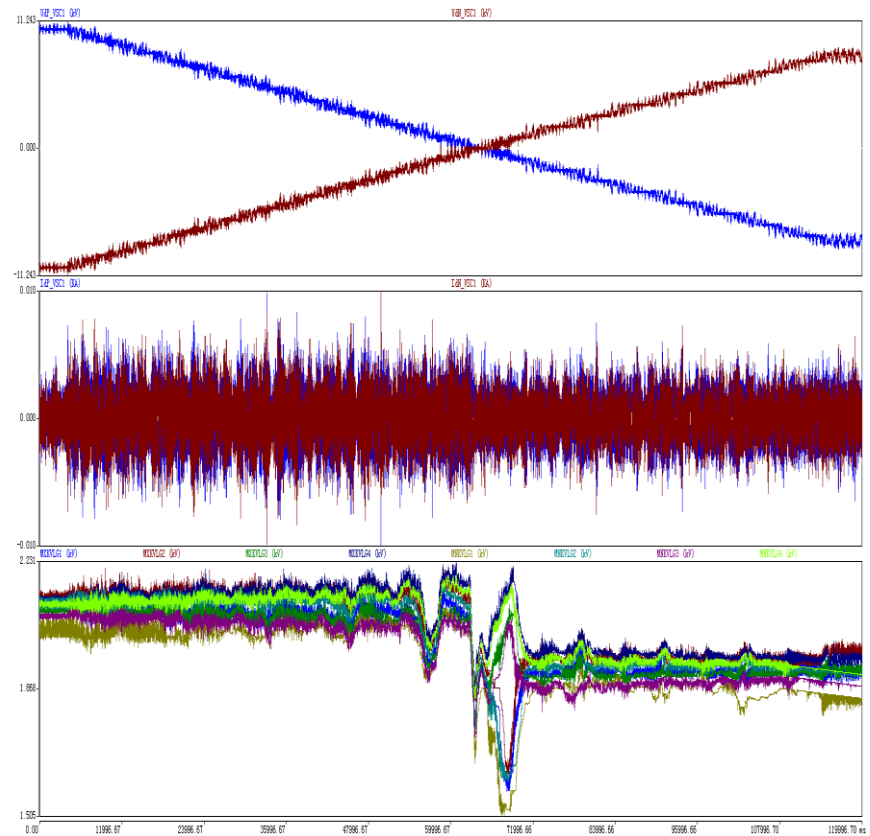




乌东德±10.5kV试验系统RTDS实时仿真研究



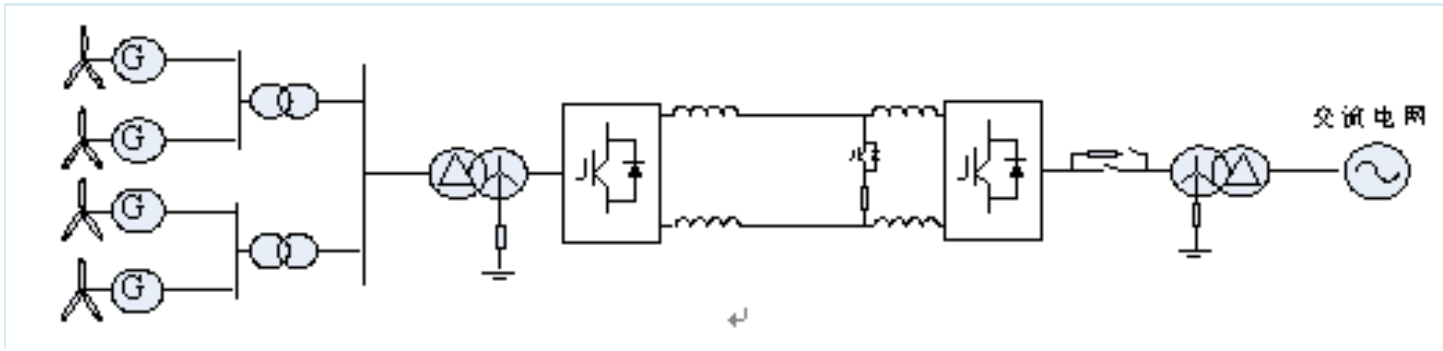
➤VSC交流侧充电试验;



➤极性反转试验;



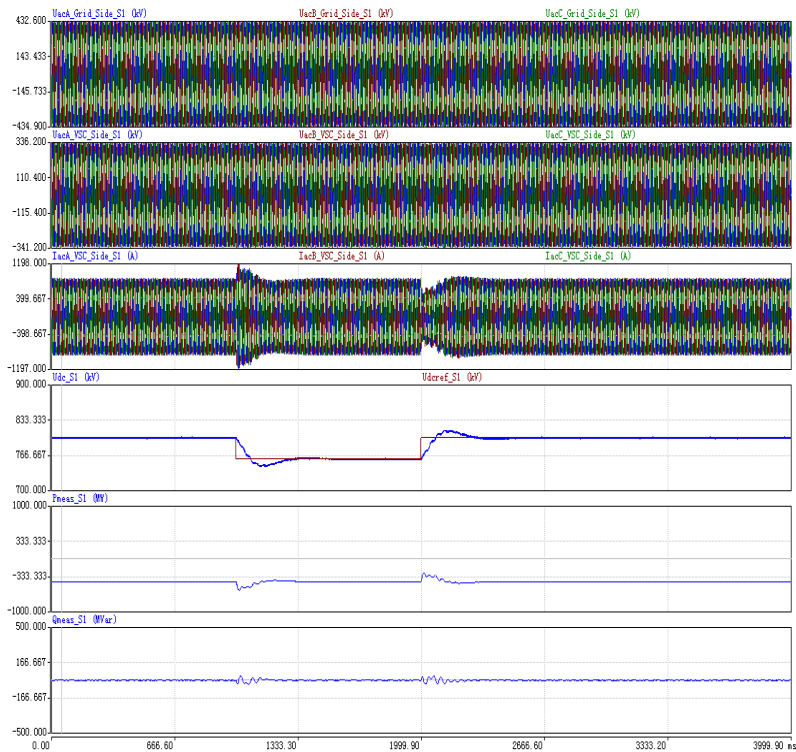
海上风电项目RTDS实时仿真研究



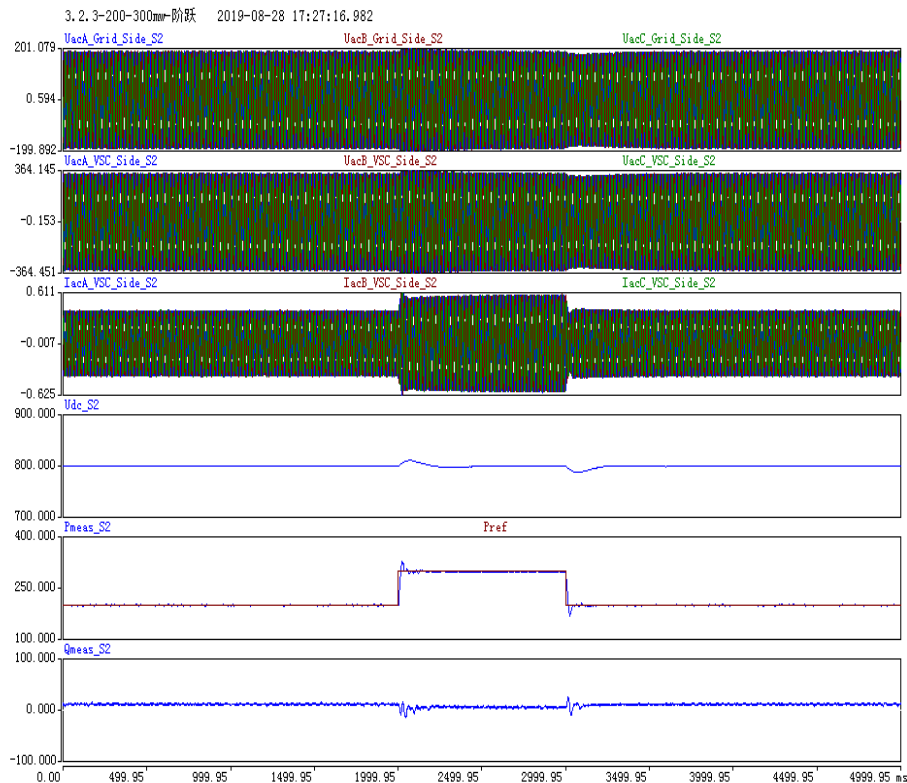
- ▶利用厂内的渝鄂柔直仿真平台，对三峡如东海上风电柔性直流输电示范项目控制保护系统的稳态和暂态功能及性能进行了仿真验证；
- ▶实验项目有：有功功率控制、无功功率控制、交流电压控制、内环电流控制、直流电压阶跃、有功功率阶跃、无功功率阶跃等试验。实验结果表明我方控制保护系统能够满足三峡如东海上风电柔性直流输电示范项目技术规范书的要求



海上风电项目RTDS实时仿真研究



➤陆上海上同时解锁，风机500MW，陆上直流电压下阶跃0.05pu；

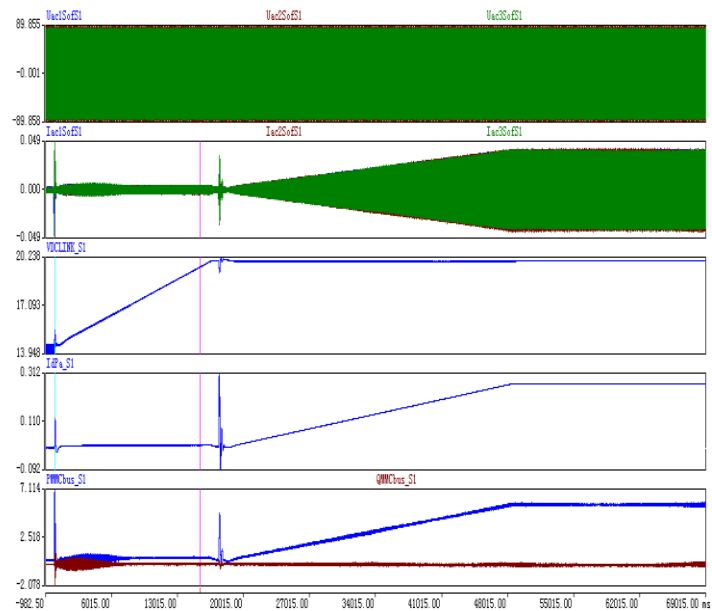
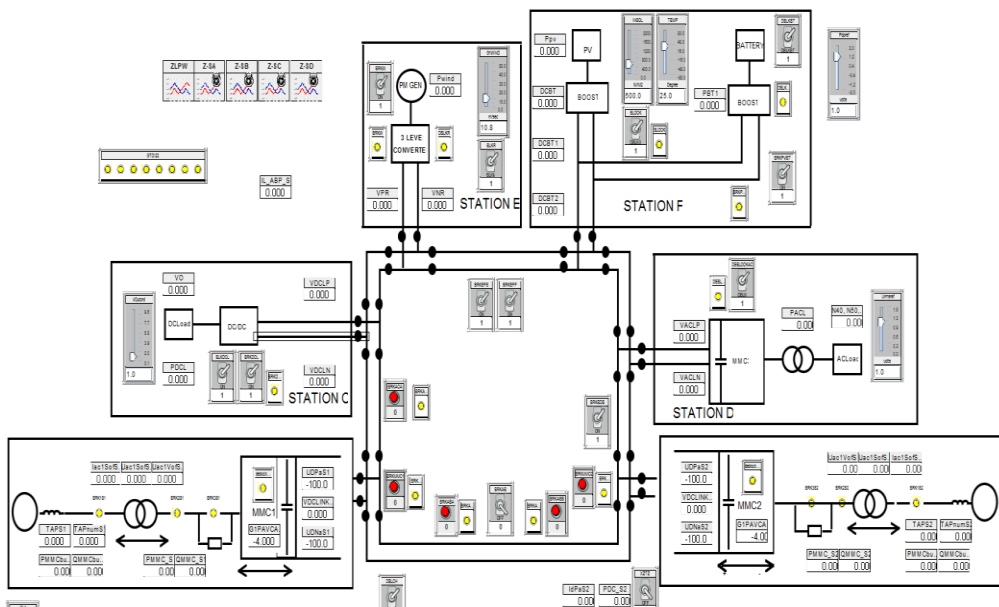


➤陆上海上同时解锁，风机200MW功率解锁，100MW上阶跃；



三、RTDS实时仿真科研应用

直流配网项目RTDS实时仿真研究



- ✓ 搭建了包含柔直流站、风电、光伏、储能、负荷的六端直流环网模型；
- ✓ 解决了多端协调控制、故障定位等关键技术；
- ✓ 完成了直流配电网控制保护样机DFP-350鉴定试验。



1

许继直流简介

2

RTDS实时仿真工程应用

3

RTDS实时仿真科研应用

4

RTDS纯数字控保模型研究

5

离线仿真PSCAD的支撑



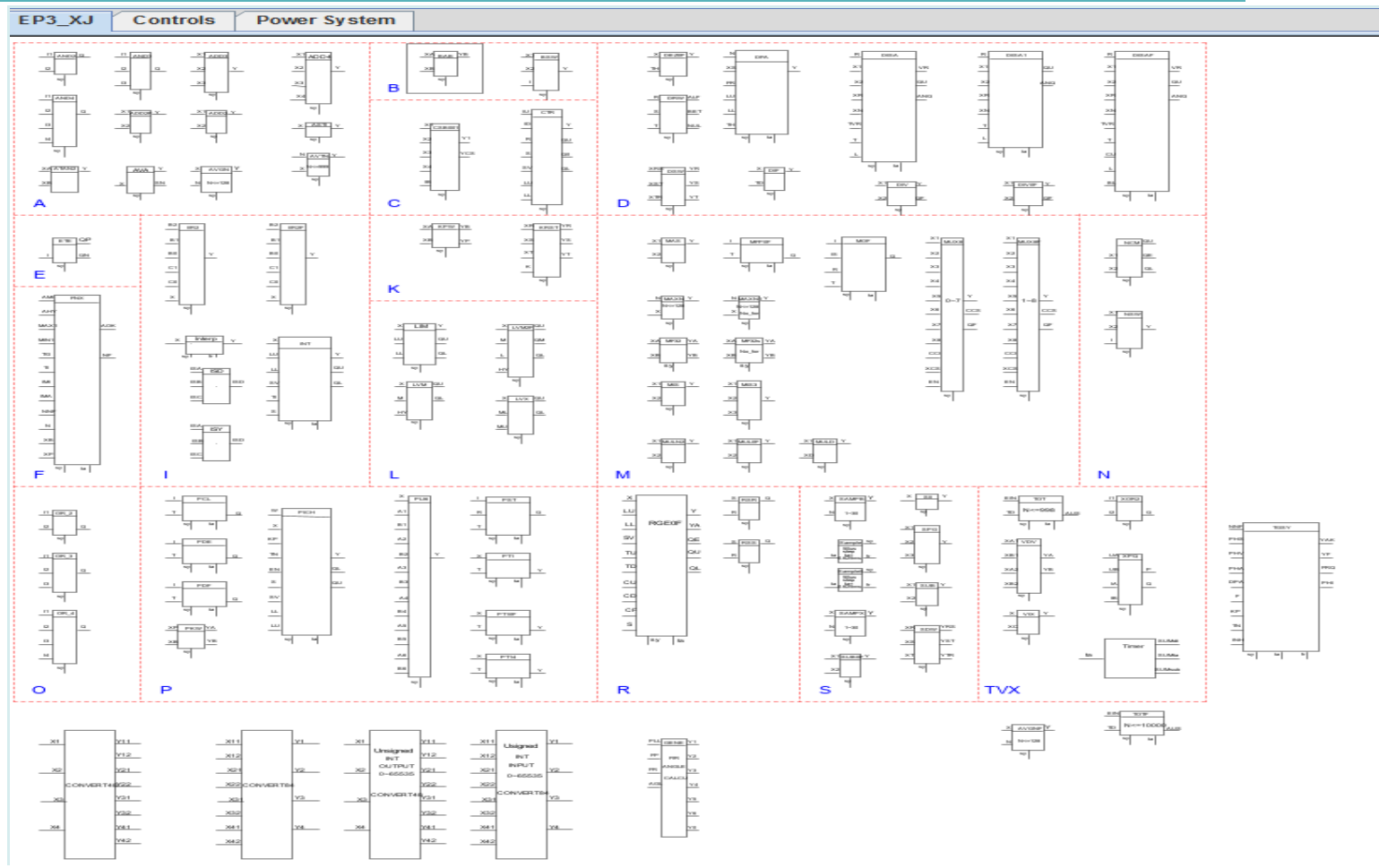
搭建相关直流工程模型的目的和意义

- 提高控保算法等验证效率
- 辅助FPT工程调试
- 含直流系统大规模电网的搭建
- 换流变保护、交流滤波器保护等验证试验



四、RTDS纯数字控保模型研究

和实际工程程序功能块对应的标准库



►利用cBuilder功能，对实际工程中用到的核心功能块，进行一比一建模；



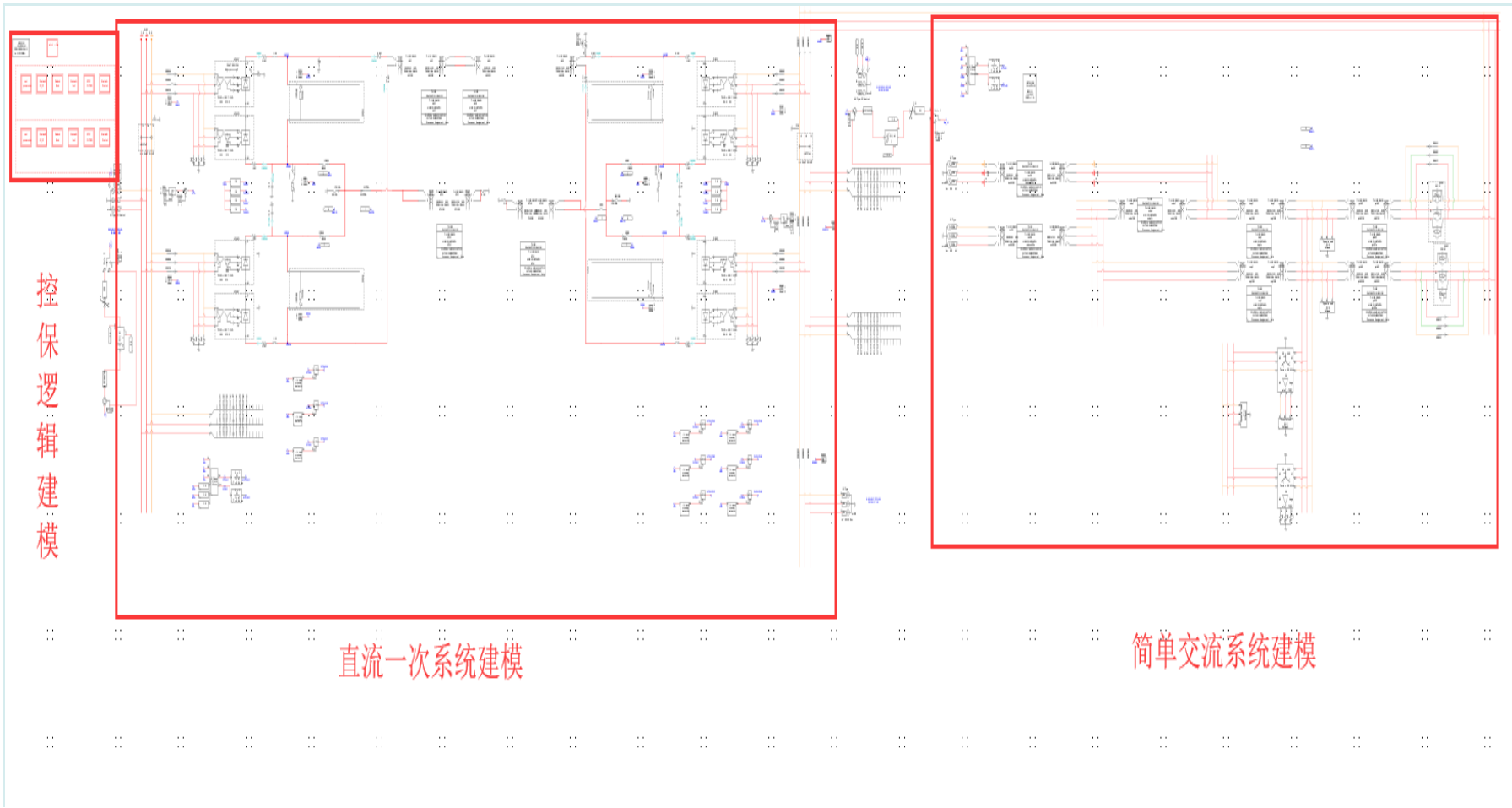
对实际工程程序移植的原则

- 核心功能一比一移植；
- 冗余功能删除；
- 根据目的不同，对上层控制功能进行合理简化；
- 删除不必要控制功能；
- 交流滤波器控制功能简化；
- 分接头控制功能简化；
- 信号传输流程简化；
- 通过特殊引脚，对运行周期进行控制；



四、RTDS纯数字控保模型研究

观音岩工程RTDS纯数字控保模型应用

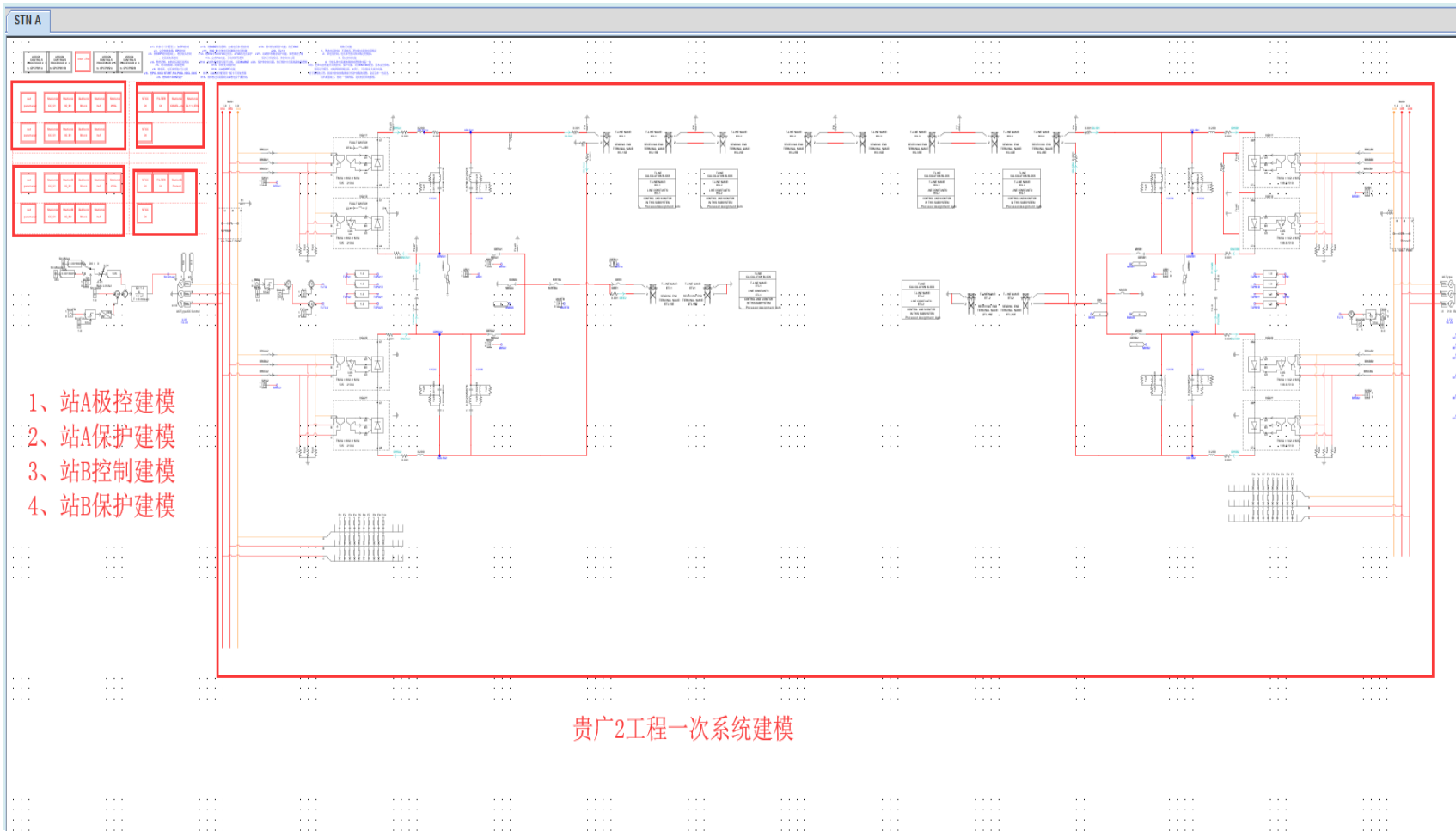


➤单rack，完成直流一次系统、核心控制逻辑、简单保护逻辑和简单交流系统建模；仿真步长约70us；目的接入大网使用；



四、RTDS纯数字控保模型研究

贵广2工程RTDS纯数字控保模型应用

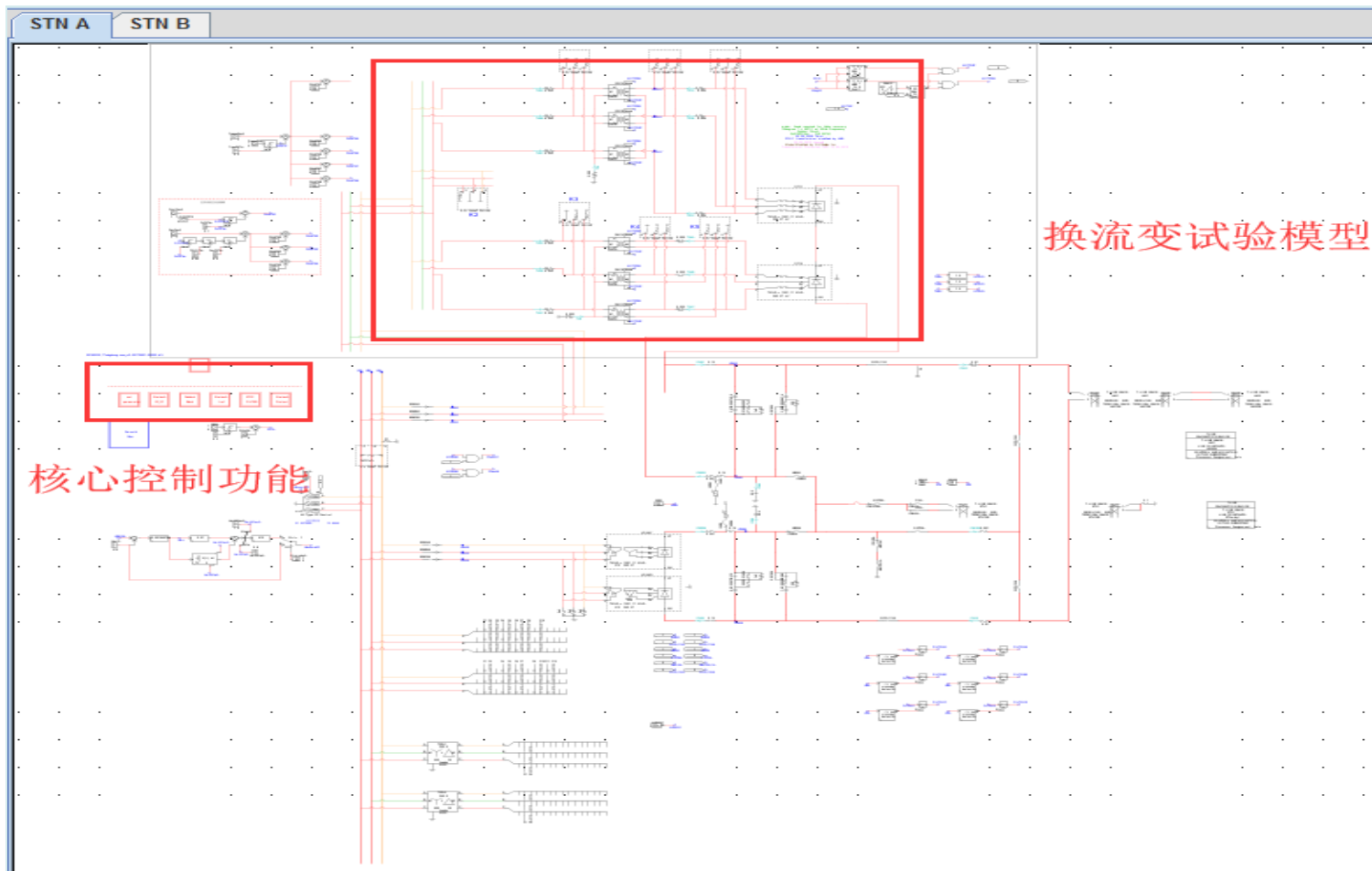


➤单rack，完成直流一次系统、核心底层控制逻辑、简化上层逻辑、保护逻辑功能；仿真步长约100us；目的全面验证控保性能；



四、RTDS纯数字控保模型研究

莫拉工程RTDS纯数字控保模型应用

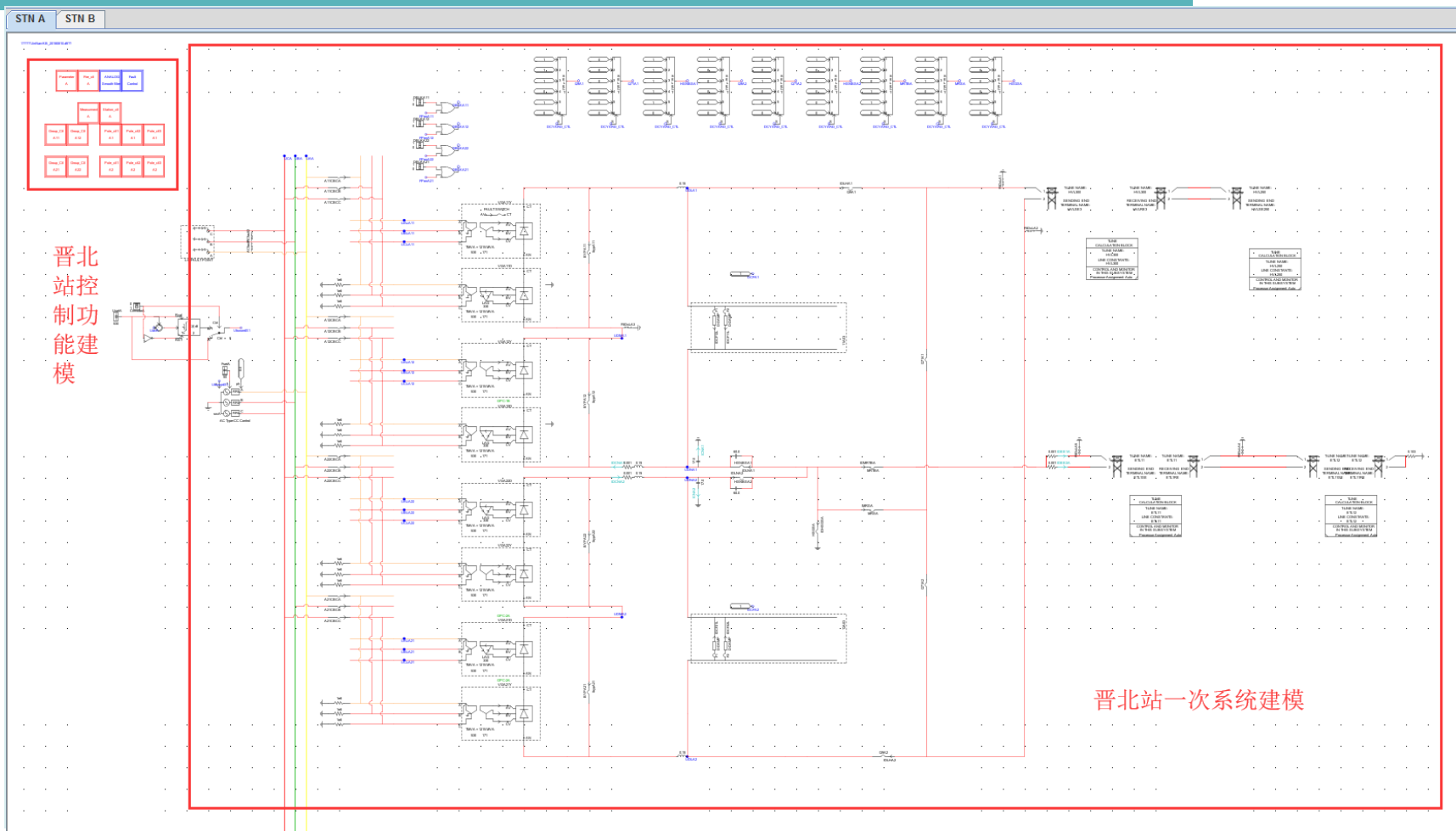


- ▶双rack，和实际FPT试验配置一致；仅移植核心控制功能，对换流变试验模型提前验证，加速FPT试验进展；仿真步长约60us；



四、RTDS纯数字控保模型研究

晋南工程RTDS纯数字控保模型应用

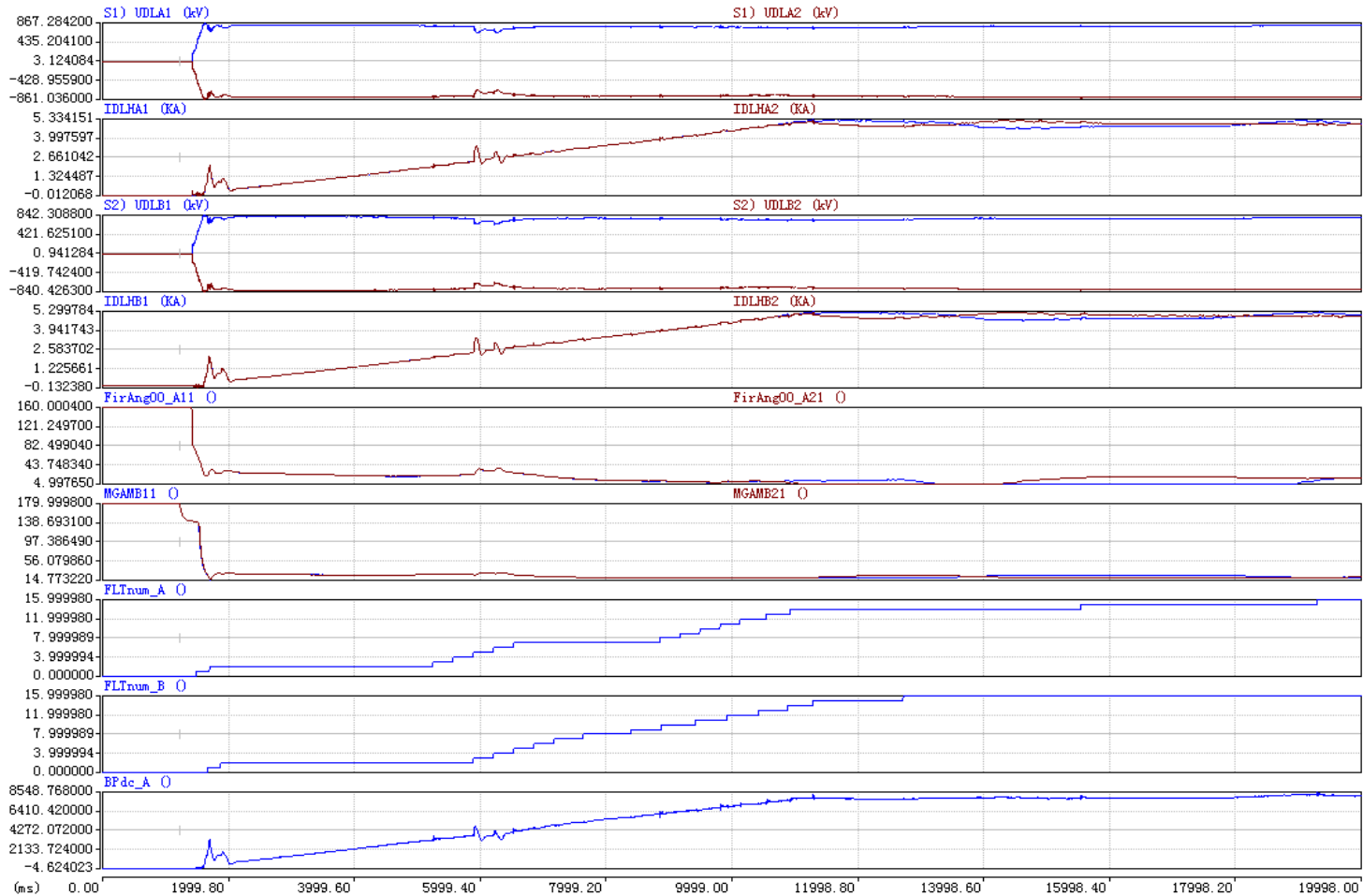


- ▶ 双rack，和实际FPT试验配置一致；双极控制功能移植比较全面；可验证阀组投退、PPT、过负荷等功能；仿真步长约120us；



四、RTDS纯数字控保模型研究

晋南工程RTDS纯数字控保模型应用

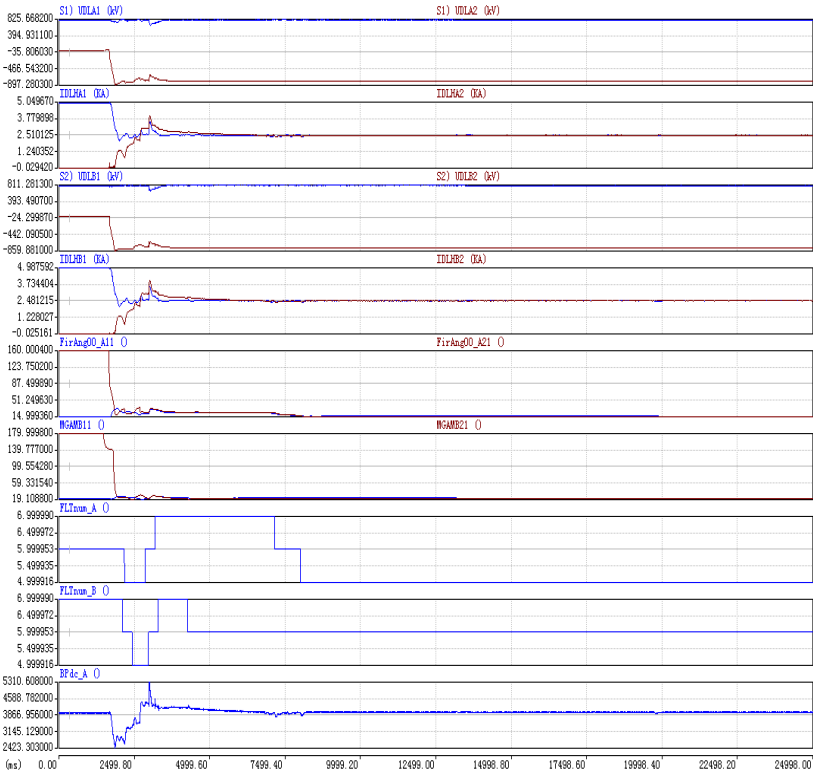


➤双极解锁波形；10s完成双极功率升到额定功率，相比实际控保装置，效率明显；

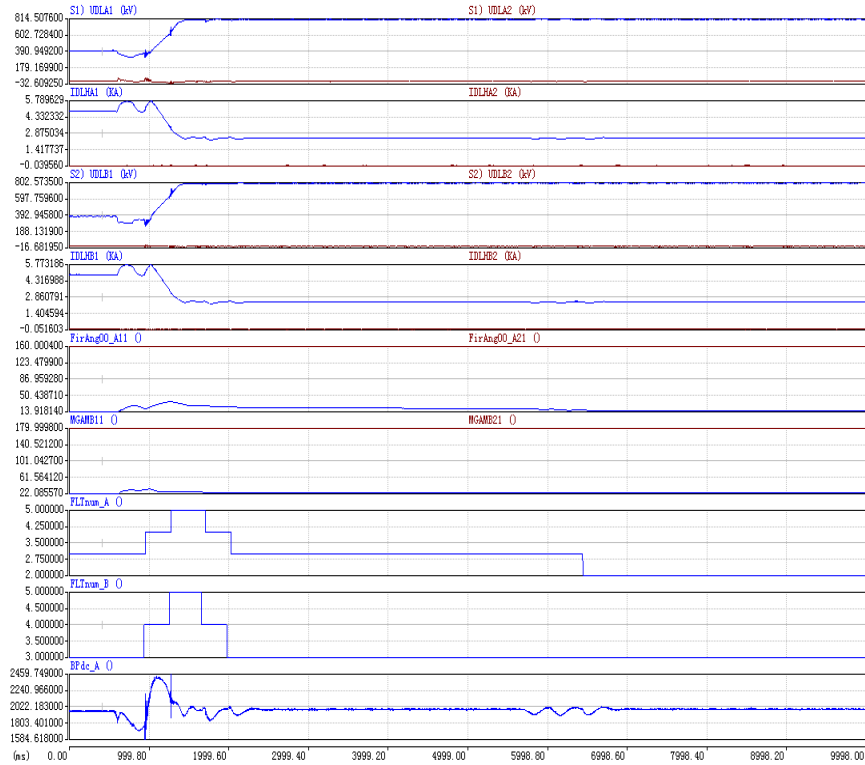


四、RTDS纯数字控保模型研究

晋南工程RTDS纯数字控保模型应用



➤极1解锁，解锁极2，PPT功能验证；



➤极1阀组1解锁，解锁阀组2，第2阀组投入功能验证；



四、RTDS纯数字控保模型研究

下一步计划

- 对比实际工程程序和波形，进一步完善现有各种类型模型；
- 根据用户要求，进行实现不同目地的工程模型定制；
- 设法提高现有模型的运行效率；
- 对控制功能进行标准化整理，方便后续**RTDS**纯数字控保模型的搭建；
- 探寻实际工程程序直接转化成**RTDS**纯数字控保模型的路径。



1

许继直流简介

2

RTDS实时仿真工程应用

3

RTDS实时仿真科研应用

4

RTDS纯数字控保模型研究

5

离线仿真PSCAD的支撑



五、离线仿真PSCAD的支撑

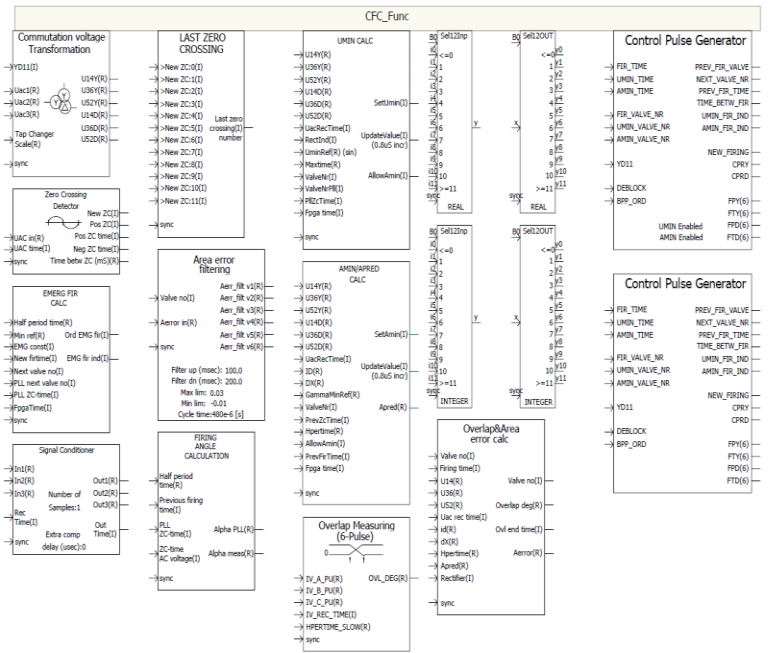
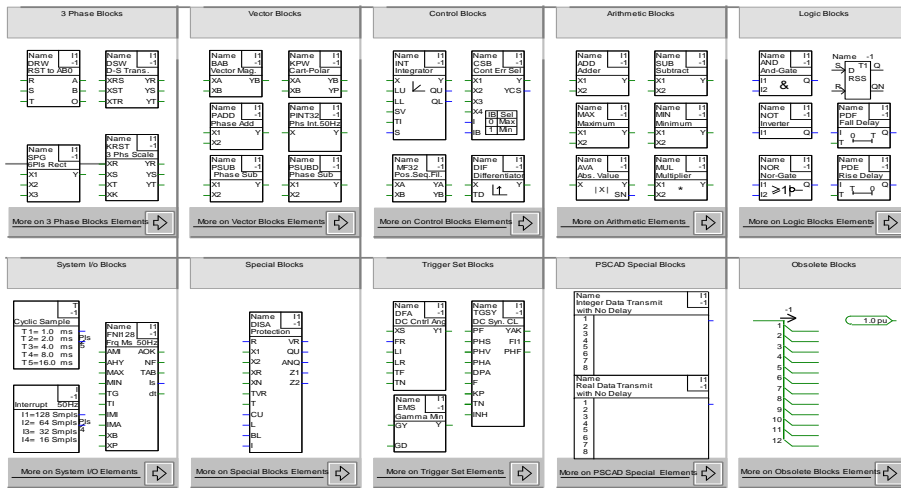
对直流工程和各种科研项目研究，除了搭建RTDS实时仿真平台，通常也会搭建离线仿真PSCAD平台。两种平台仿真结果互相验证、互相支撑。

- 5.1 PSCAD自定义模块非实时仿真
- 5.2 PSCAD纯数字准实时仿真平台

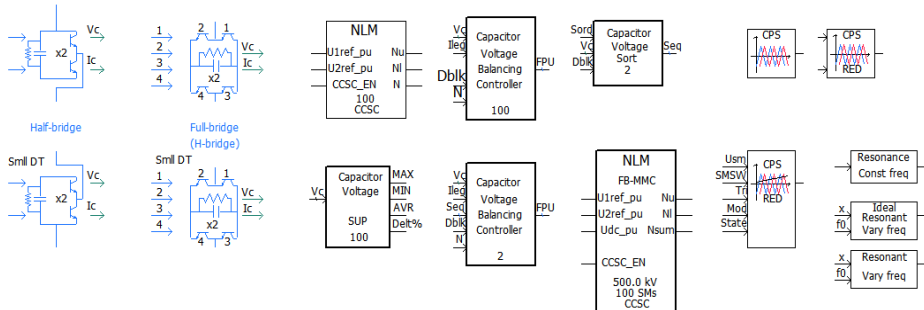


五、离线仿真PSCAD的支撑

5.1 PSCAD自定义模块非实时仿真



西门子技术路线功能块库



ABB技术路线功能块库

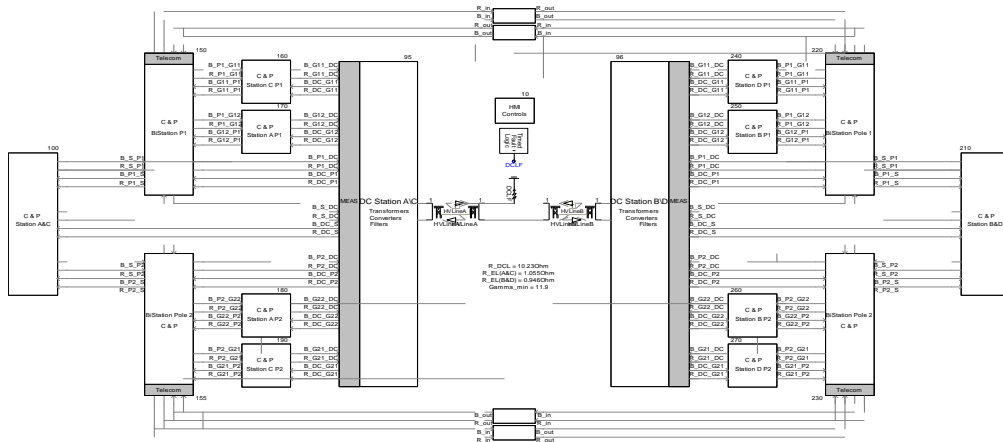
- 根据工程模块，开发对应的自定义模块；
- 简化工程程序，搭建控制保护系统；
- 根据需要修改逻辑，验证算法；

柔性直流功能块库

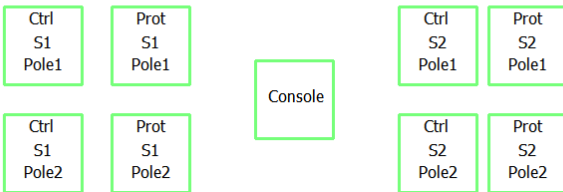
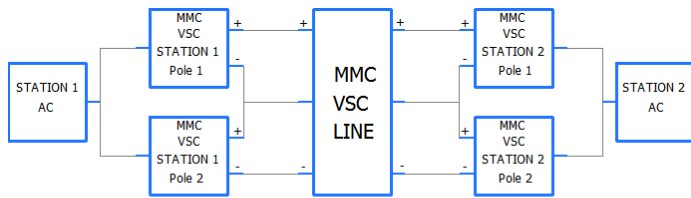


五、离线仿真PSCAD的支撑

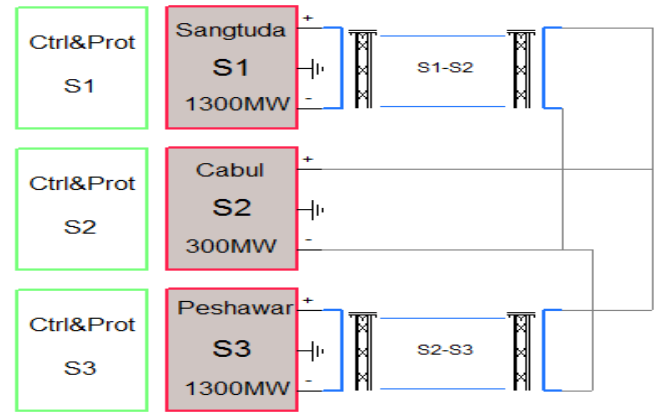
5.1 PSCAD自定义模块非实时仿真



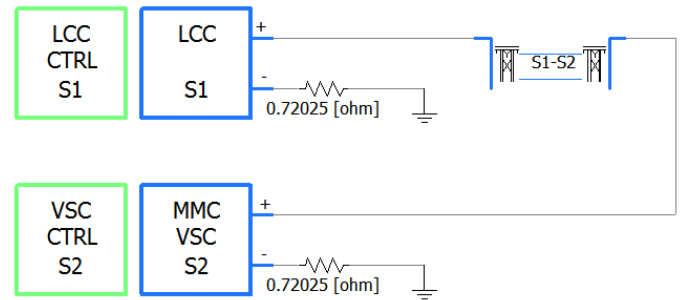
特高压直流工程仿真模型



MMC多端柔性仿真模型



LCC并联多端仿真模型



混合直流仿真模型



五、离线仿真PSCAD的支撑

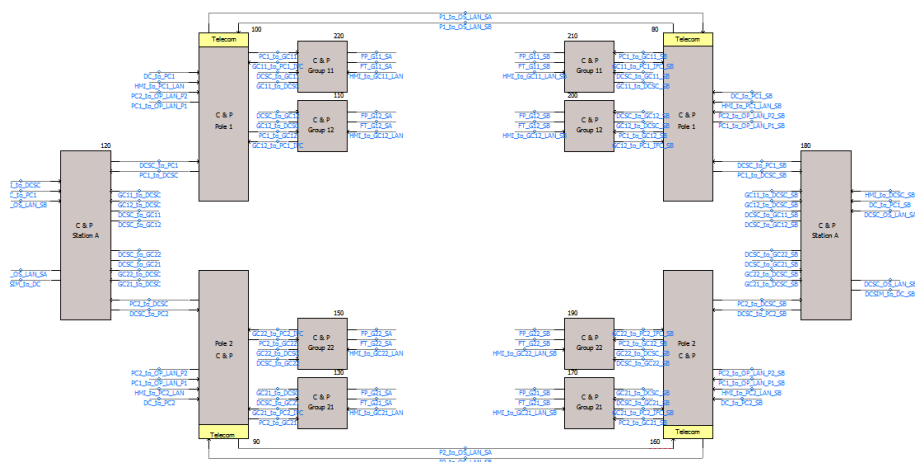
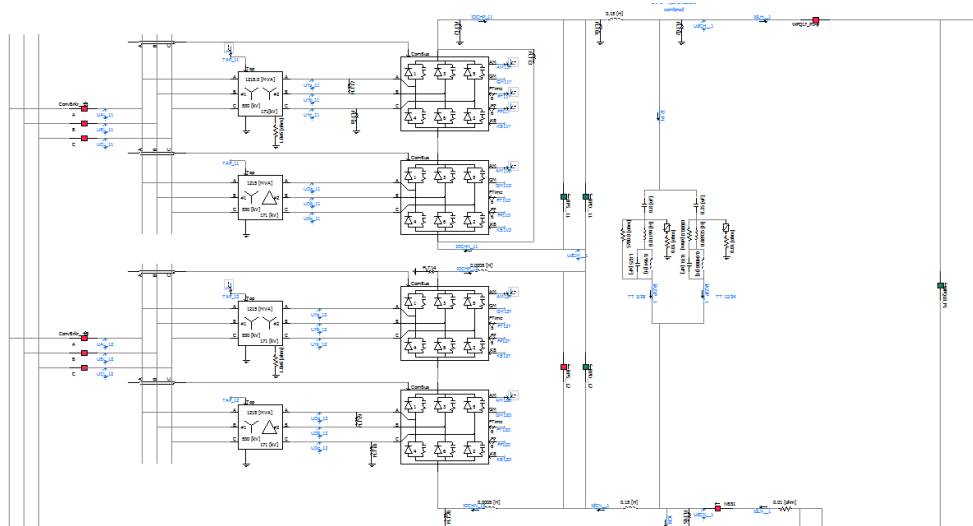
5.2 纯数字准实时仿真平台

基于PSCAD 仿真软件开发了一套高精度的纯数字准实时仿真平台，具有如下特点：

1、PSCAD控制保护模型由控保工程程序无缝转换而来，与实际工程完全一致；

2、实现工程运行人员监控平台与直流仿真模型接口，人机交互非常友好。

3、实现了控制保护模型与主回路模型的并行仿真，大幅提升了仿真运行速度。





五、离线仿真PSCAD的支撑

5.2 纯数字准实时仿真平台

5.2.1. 工程控制保护程序转化为控保模型

实际工程有多达40余台控制保护装置，需要对每台装置分别建模。为此开发了由工程程序直接生成c代码工具，可直接利用工程程序。同时对任务调度、FPGA中软件算法、脉冲触发等相关硬件逻辑进行了等效建模，从而准确模拟这些功能。

通过对单台装置对应的入口函数的调用实现该装置功能的模拟。

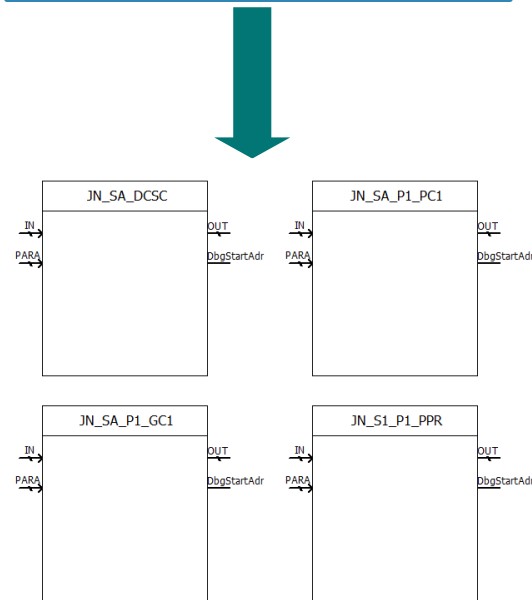
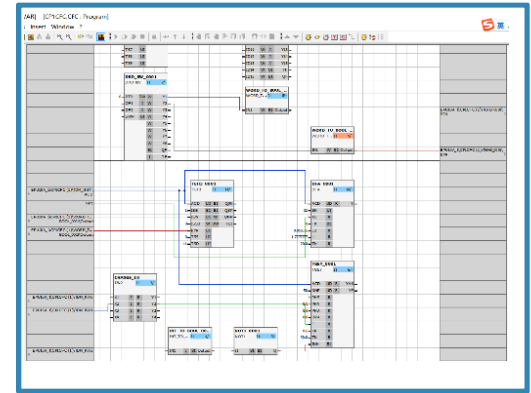
PSCAD可调用C文件

```
pFbCC_C1_TNA300_g->X1 = CC_C1_T1_CC_C1_LL140_Y;
pFbCC_C1_TNA300_g->X2 = 1.66667;
pFbCC_C1_TNA300_g->I = 0;
FB_NSW(pFbCC_C1_TNA300_g); /*TNA300*/

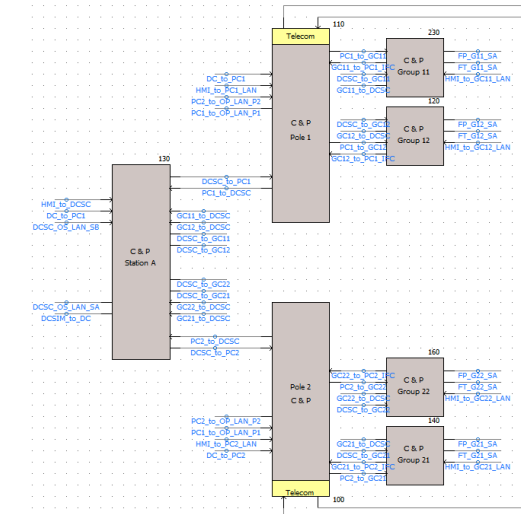
pFbCC_C1_CON20_g->ACD = CC_C1_EXTCON_373;
pFbCC_C1_CON20_g->SN = 32;
pFbCC_C1_CON20_g->XS = pFbCC_C1_ALPHA50_g->Y;
pFbCC_C1_CON20_g->FR = pFbCC_C1_TG_FR_g->Q;
pFbCC_C1_CON20_g->LU = pFbCC_C1_LU15_g->Y;
pFbCC_C1_CON20_g->LL = pFbCC_C1_TNA300_g->Y;
pFbCC_C1_CON20_g->TH = 20.0;
FB_DFA(pFbCC_C1_CON20_g); /*CON20*/

CC_C1_EXTCON_398 = pFbCC_C1_CON20_g->Y;
```

工程可视化图形编辑工具



控制保护自定义模块



直流输电控制保护模型



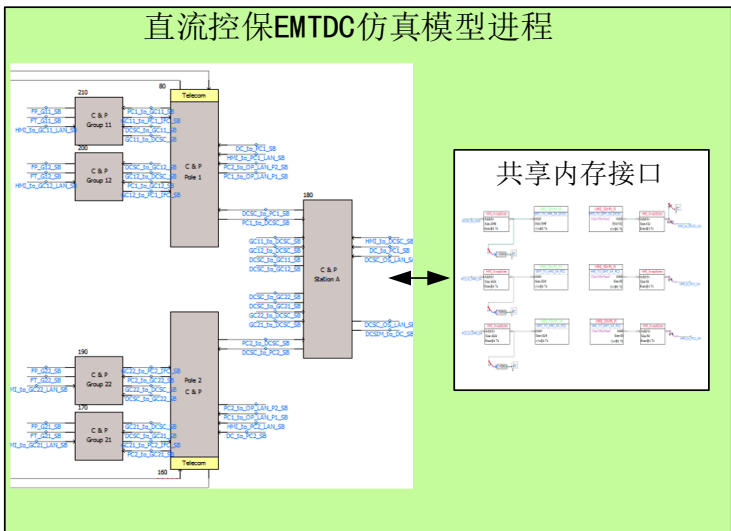
五、离线仿真PSCAD的支撑

5.2纯数字准实时仿真平台

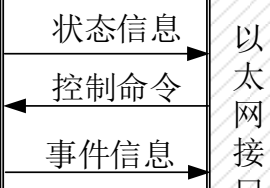
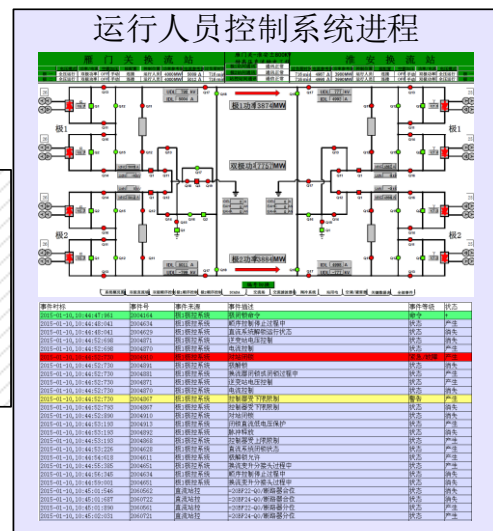
5.2.2. 工程运行人员监控平台与直流仿真模型交互

运行人员监控平台可以给控制保护下发指令，同时接收控制保护系统状态。
采用共享内存机制代替实际工程中控制保护与运行人员监控平台之间的以太网通讯方式，对原有通讯规约进行改造，精确模拟这些功能。

直流系统仿真工作站



OWS工作站



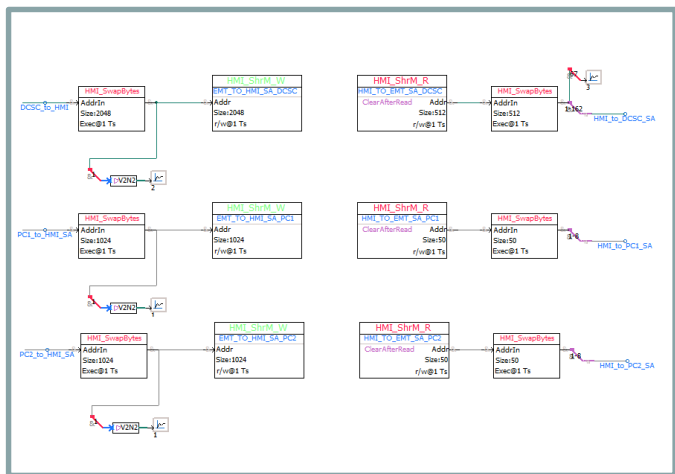


五、离线仿真PSCAD的支撑

5.2 纯数字准实时仿真平台

5.2.2. 工程运行人员监控平台与直流仿真模型交互

通过对控制保护系统的事件产生机制等效模拟，在控制保护模型中实现了上送事件的功能。



事件时标	类型	主/从	事件号	事件来源	事件描述	事件等级	状态
2018-06-13, 18:02:43:312	直流SER事件	主(A)	144277	极2高端阀控系统	分接头21档	状态	消失
2018-06-13, 18:02:43:312	直流SER事件	主(A)	154277	极2低端阀控系统	分接头21档	状态	消失
2018-06-13, 18:02:43:312	直流SER事件	主(A)	124277	极1低端阀控系统	分接头21档	状态	消失
2018-06-13, 18:02:46:048	直流SER事件	主(A)	144081	极2高端阀控系统	顺序控制自动控制模式	命令	产生
2018-06-13, 18:02:46:048	直流SER事件	主(A)	154081	极2低端阀控系统	顺序控制自动控制模式	命令	产生
2018-06-13, 18:02:46:048	直流SER事件	主(A)	124081	极1低端阀控系统	顺序控制自动控制模式	命令	产生
2018-06-13, 18:02:46:048	直流SER事件	主(A)	114081	极1高端阀控系统	顺序控制自动控制模式	命令	产生
2018-06-13, 18:02:49:124	直流SER事件	主(A)	124617	极1低端阀控系统	极控制锁阀组	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:124	直流SER事件	主(A)	114617	极1高端阀控系统	极控制锁阀组	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:144	直流SER事件	主(A)	124524	极1低端阀控系统	顺控启动过程中	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:144	直流SER事件	主(A)	114524	极1高端阀控系统	顺控启动过程中	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:176	直流SER事件	主(A)	124519	极1低端阀控系统	热备用状态	状态	消失
2018-06-13, 18:02:49:176	直流SER事件	主(A)	114519	极1高端阀控系统	热备用状态	状态	消失
2018-06-13, 18:02:49:190	直流SER事件	主(A)	225441	直流站控系统	投入绝对最小滤波器组	命令	产生
2018-06-13, 18:02:49:258	直流SER事件	主(A)	124604	极1低端阀控系统	触发脉冲释放	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:258	直流SER事件	主(A)	114604	极1高端阀控系统	触发脉冲释放	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:254	直流SER事件	主(A)	104170	极1极控系统	解锁双阀组命令	命令	产生
2018-06-13, 18:02:49:288	直流SER事件	主(A)	124520	极1低端阀控系统	解锁运行状态	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:288	直流SER事件	主(A)	124524	极1低端阀控系统	顺控启动过程中	状态	消失
2018-06-13, 18:02:49:288	直流SER事件	主(A)	114520	极1高端阀控系统	解锁运行状态	状态	产生
2018-06-13, 18:02:49:288	直流SER事件	主(A)	114524	极1高端阀控系统	顺控启动过程中	状态	消失

PSCAD仿真模型中SER事件产生功能与接口

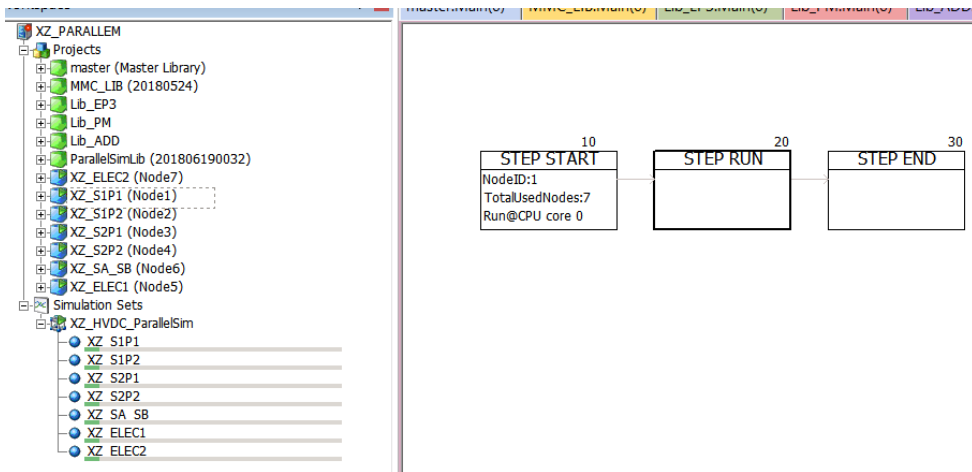
运行人员监控平台事件产生



5.2 纯数字准实时仿真平台

5.2.3. 直流仿真模型的并行计算

由于所搭建控制保护模型较为复杂，以一个特高压直流输电工程为例，运行1s控制保护模型，通常需要20s左右的仿真时间。为了提升控制保护模型的运行速度，基于共享内存和信号量机制开发了同步模块和通信模块，把多个控制保护模块分布到属于一个仿真集的多个仿真工程中，从而充分利用多核心CPU的运算能力，提升仿真速度。



进程 97% CPU 使用率 131% 最大频率

名称	PID	描述	状态	线程数	CPU	平均 CPU
XZ_ELEC1.exe	15320	XZ_ELEC1.exe	正在运行	1	12	10.80
XZ_ELEC2.exe	16032	XZ_ELEC2.exe	正在运行	1	12	10.65
pscad.exe	5076	Power Systems Si...	正在运行	49	12	10.24
XZ_S2P1.exe	19396	XZ_S2P1.exe	正在运行	1	7	5.61
XZ_S1P2.exe	18488	XZ_S1P2.exe	正在运行	1	7	5.42
XZ_S1P1.exe	5360	XZ_S1P1.exe	正在运行	1	7	5.74
XZ_S2P2.exe	15680	XZ_S2P2.exe	正在运行	1	7	5.53
XZ_SA_SB.exe	17844	XZ_SA_SB.exe	正在运行	1	5	3.86

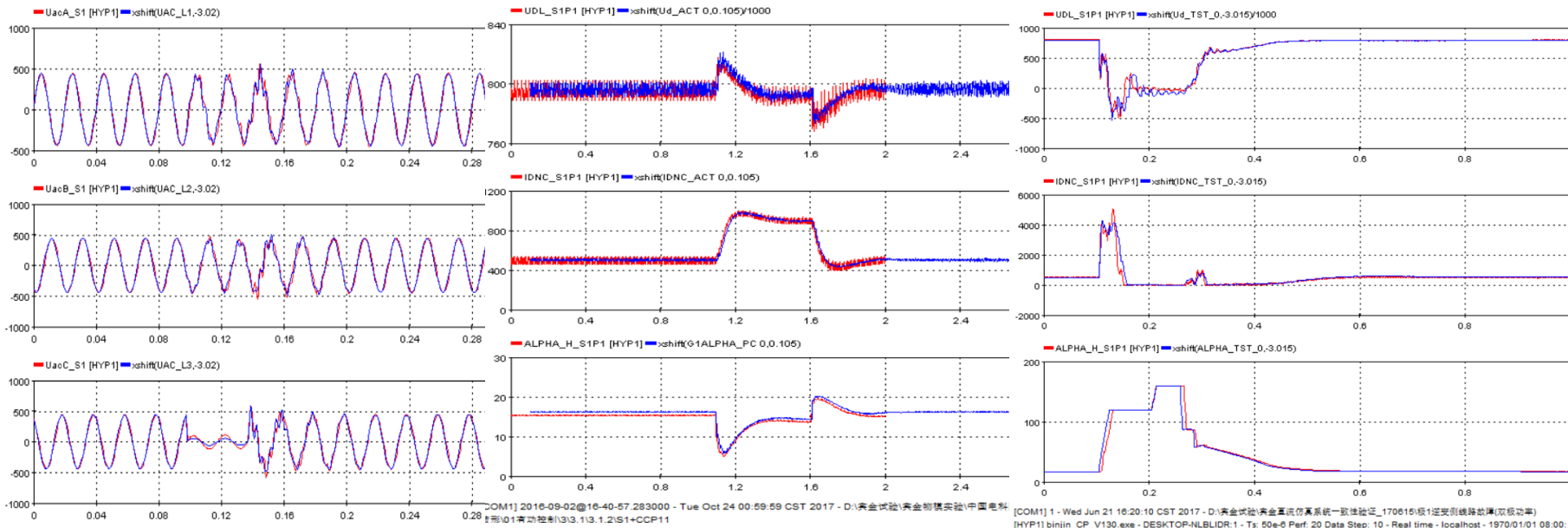


五、离线仿真PSCAD的支撑

5.2 纯数字准实时仿真平台

5.2.4. 仿真结果的准确性

为了验证该仿真平台的准确性，进行了大量仿真试验，并进行与现场波形的对比，仿真试验结果与现场波形非常接近（红色为现场波形，蓝色为仿真波形）。



交流母线单相接地故障

动态响应-电流阶跃试验

直流线路故障



国家电网
STATE GRID

许继集团有限公司
XJ GROUP CORPORATION

感谢您的关注！

奉献清洁能源
建设和谐社会



许继集团