



国家电网  
STATE GRID

国网冀北电力有限公司  
STATE GRID JIBEI ELECTRIC POWER COMPANY LIMITED

# RTDS系统在柔性配网中的应用

王晓斐

国网冀北电科院

2019年 10月



国家电网  
STATE GRID

国网冀北电力有限公司  
STATE GRID JIBEI ELECTRIC POWER COMPANY LIMITED

# 目录

1

柔性配网工程概况

2

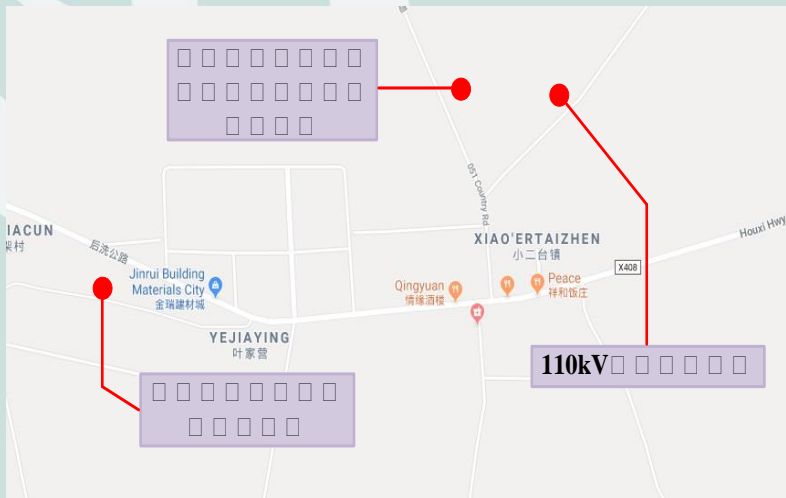
RTDS数模仿真及总结



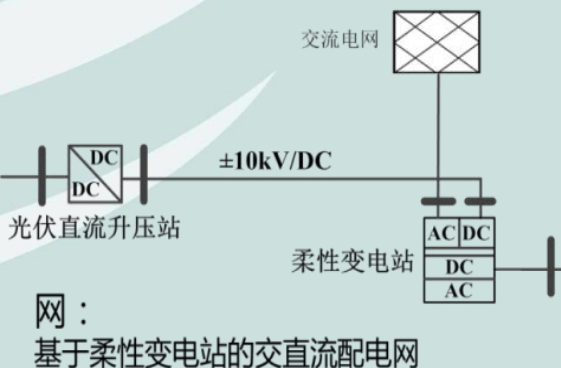
## □ 柔性变电站及交直流配电网示范工程（柔性配网示范工程）

柔性变电站及交直流配电网示范工程是为了应对日益增长的分布式能源和用户个性化供电需求，对未来配电网发展模式的一次探索。

工程融合了最新的电力电子技术和信息技术，**其核心是基于柔性变电站的交直流配电网技术。**



源：  
光伏电站——  
典型直流电源



网：  
基于柔性变电站的交直流配电网



荷：  
数据中心——  
典型直流负荷



国家电网  
STATE GRID

国网冀北电力有限公司  
STATE GRID JIBEI ELECTRIC POWER COMPANY LIMITED

# 柔性变电站定义

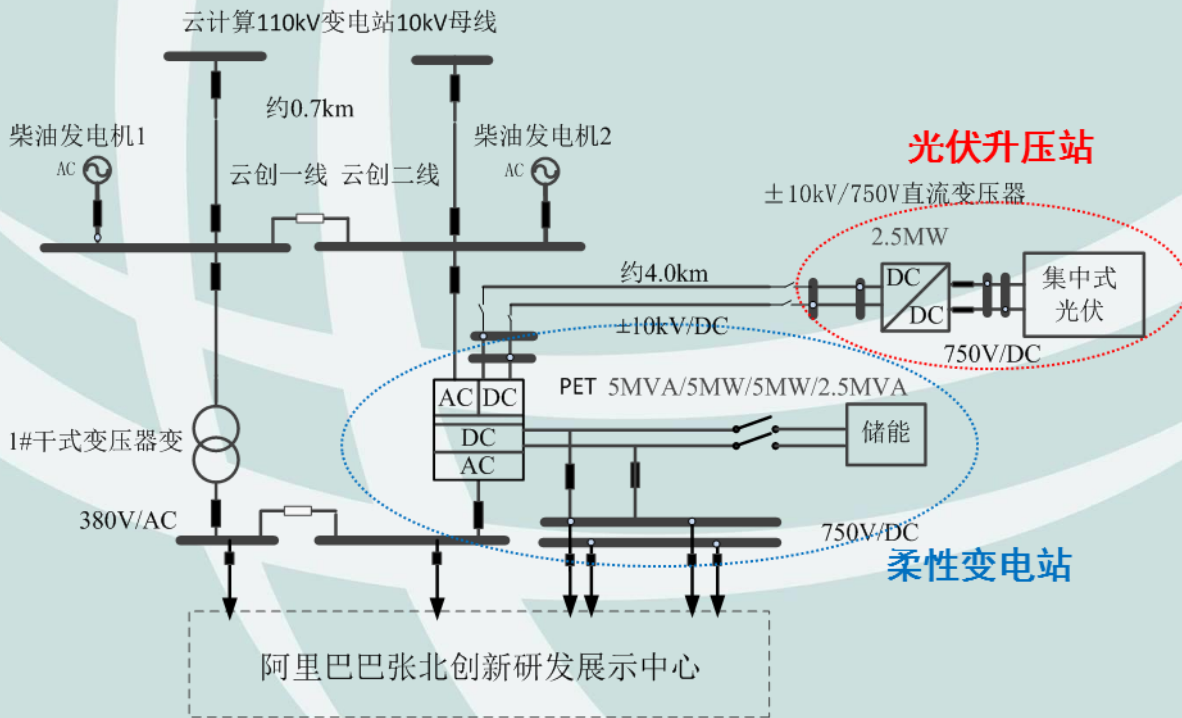
## □ 柔性变电站定义

柔性变电站是电力电子广泛应用的新一代变电站，以电力电子换流阀替代传统的变压器、断路器、无功补偿等多种一次设备。具备多种交、直流柔性接口，实现分布式电源、交直流负荷的即插即用，避免多级变换，减少损耗；具备潮流柔性控制能力，实现源-网-荷间功率潮流的最优分配、故障隔离与电网自愈功能；具备一站多能特点，减少交直流配电网设备种类和数量，从而降低设备投资和运维费用，减少占地面积。





- 源：交流电源接入云计算110kV变电站10kV交流母线。新能源电源为亿利光伏扶贫电站，建设直流升压站一座，容量为2.5MW。
- 荷：阿里巴巴张北创新研发展示中心，负荷总计2.5MW。
- 网：建设柔性变电站一座，依靠四端口（AC10kV/DC±10kV/DC750V/AC380V）的多功能交直流电力电子变压器（简称PET）实现源网荷的互联，容量为5MVA/5MW/5MW/2.5MVA

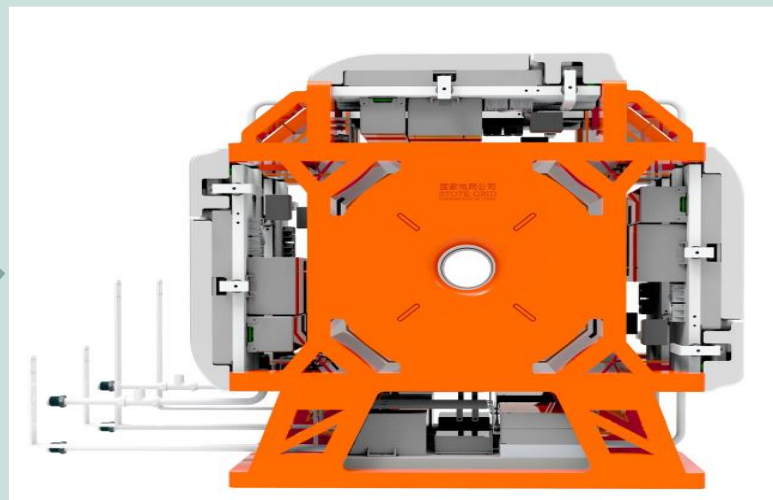
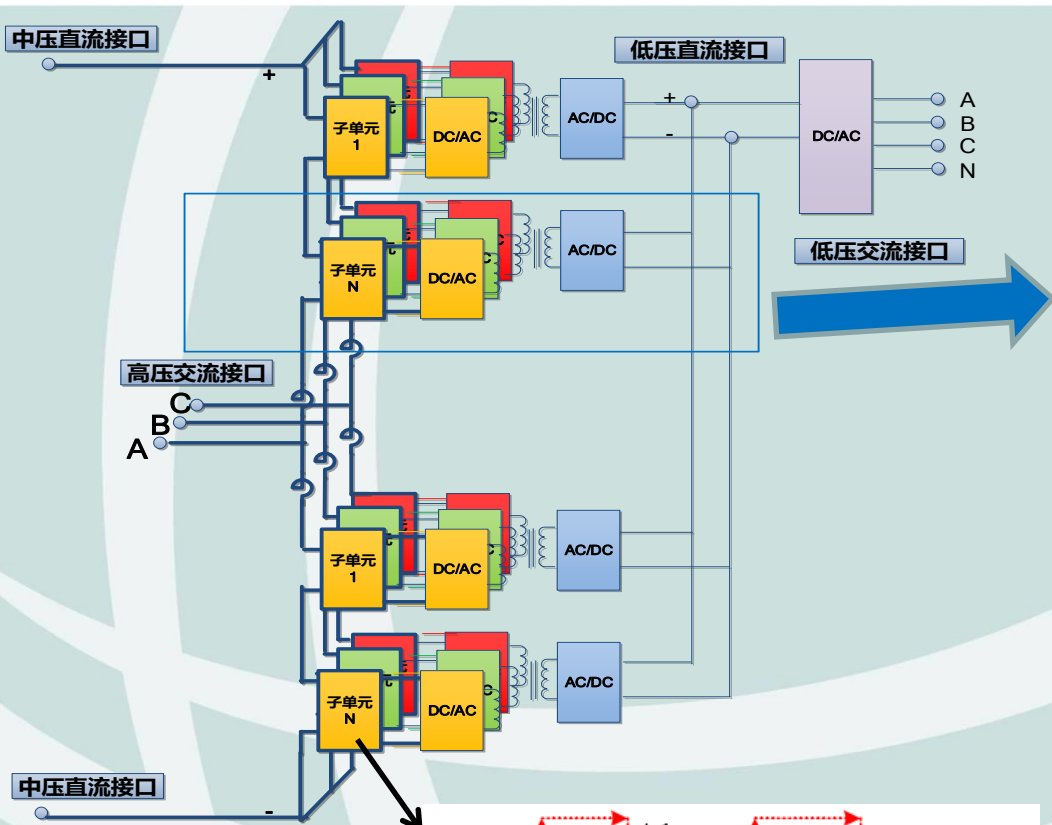


- 柔性变电站核心设备—多功能交直流电力电子变压器（PET）具有直流故障截断能力，考虑直流线路故障快速恢复选择配置快速隔离开关。
- 为配合PET的故障闭锁功能，提供闭锁期间功率支撑，结合负荷情况，750V直流母线配置1.5MW容量的超级电容。
- 由于10kV交流和直流侧无磁路隔离，交直流中性点等电位，不允许直流侧单极运行，因此直流系统采用伪双极结构。

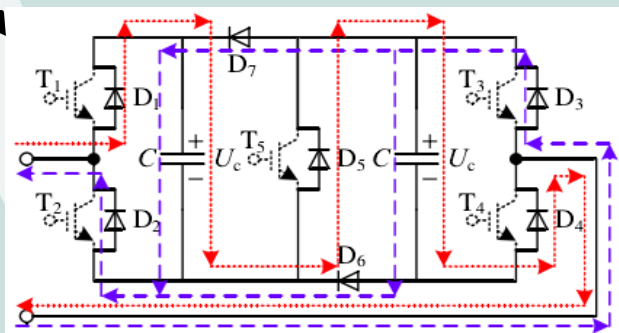




# 多功能交直流电力电子变压器结构



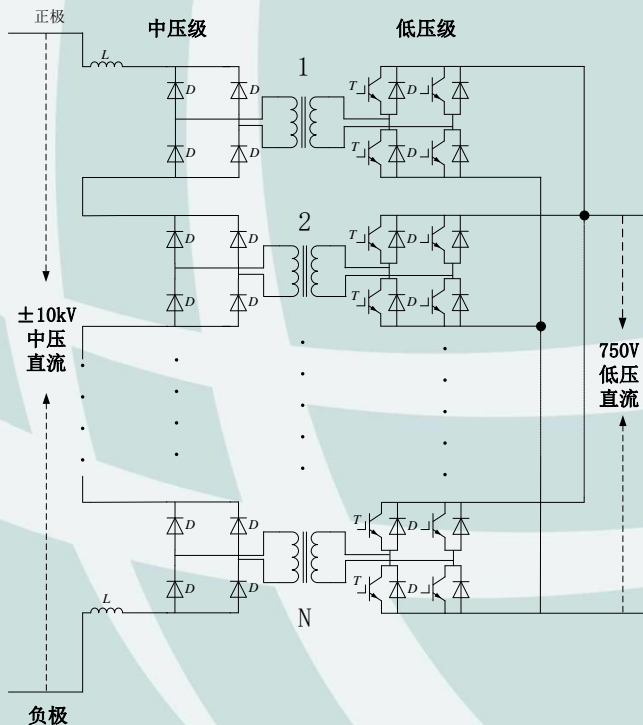
双箔位子模块 (CSDM) 结构, 隔离直流故障, 减少直流断路器配置



- 基于三相高频变压器耦合的波动功率相间自平衡主电路拓扑, 波动功率经高频变换后, 通过高频变压器相互抵消, 子单元上无波动功率。
- 结构上采用高压侧和低压侧750V模块环绕高频变压器的紧凑型布置 (如上图)。

# 光伏升压变结构

- 直流升压变采用DC750V/DC±10kV变换，高压侧选用二极管，低压选用IGBT器件，确保功率不会反送。
- 直流升压变采用定直流电压控制；低压直流母线所连的光伏电池板采用最大功率跟踪（MPPT）控制；确保光伏电站最大可能的功率外送。



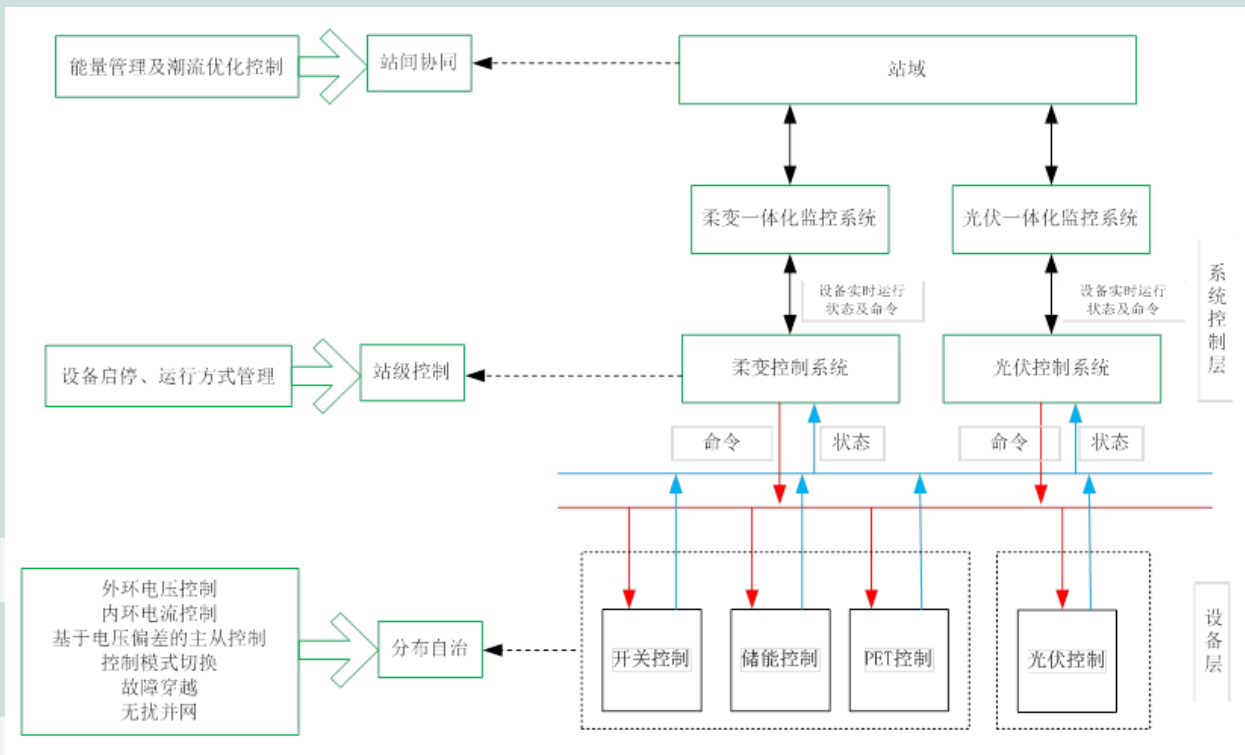
直流升压变压器拓扑结构

主要参数	单位	参数值
额定容量	MVA	2.5
额定损耗	%	≤3
<b>中压直流网侧</b>		
额定电压	kV DC	±10
最大工作电压	kV DC	±11
额定工作电流	A	125
<b>低压光伏侧</b>		
输出额定直流电压	kV DC	0.75
输出电压波动范围	kV DC	0.65 ~ 0.85
额定输入电流	kA	3.333
<b>IGBT器件参数</b>		
额定电压	V	1700
额定电流	A	600
子模块/桥臂数量	个	20
单个子模块容量	kW	125
低压侧子模块电容值	μF	500



# 示范工程控制系统

- 采用**分层优化**控制方法，控制系统结构设计为系统层、设备层双层配置。
- 系统层包含柔性变电站和光伏直流升压站两套控制系统以及站域控制，主要包括**设备启停控制、运行方式管理、能量管理及潮流优化控制**等功能。
- 设备层接收系统控制层指令，实现具体设备的控制与监视。实现变电站内各种设备的正常运行、换流站无扰并网、控制模式的转换等稳态控制功能，以及**针对交流系统扰动进行故障穿越，针对直流系统故障与保护装置进行配合实现故障穿越以及快速恢复等暂态控制功能**。

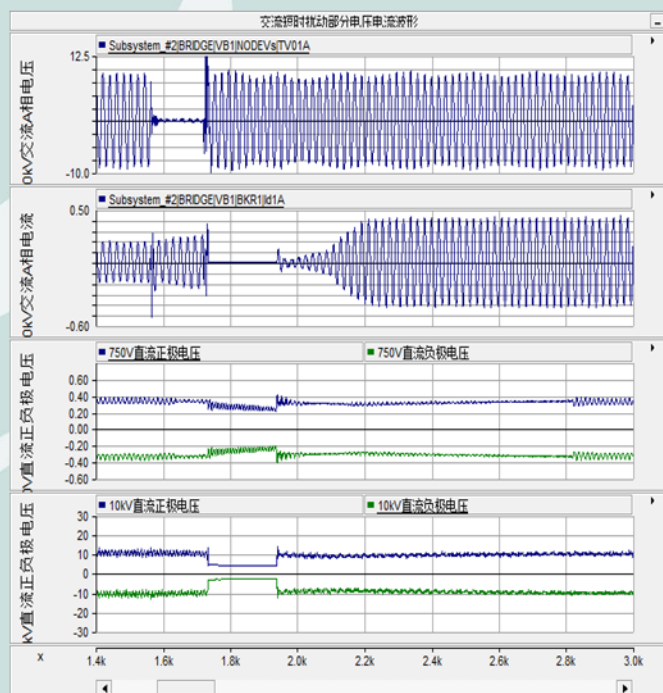
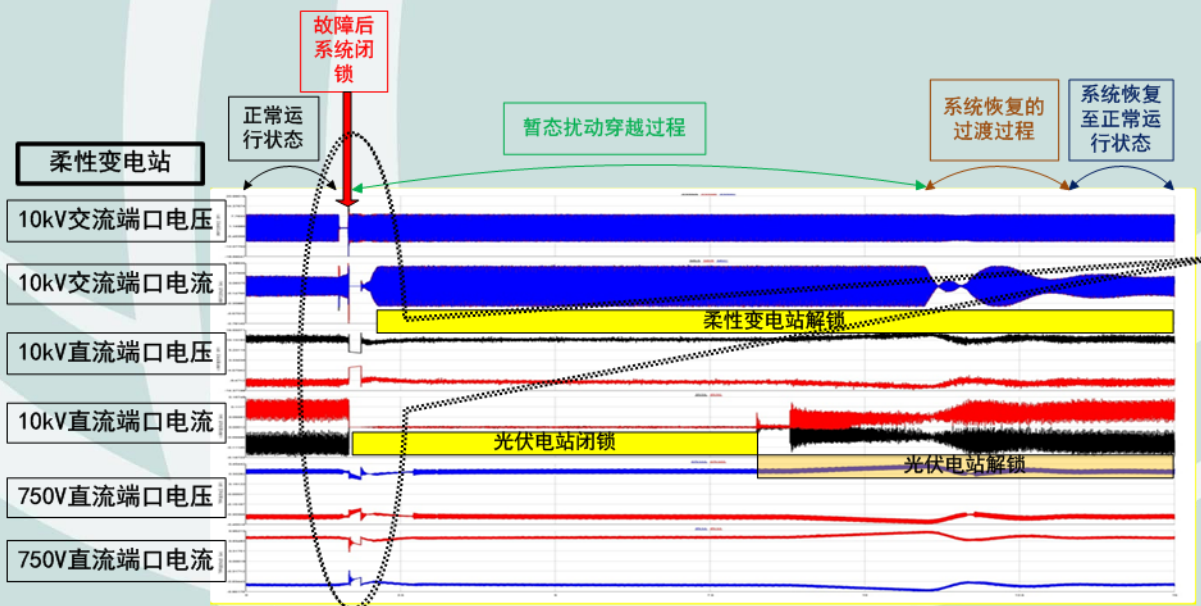






# 交流扰动短时故障穿越

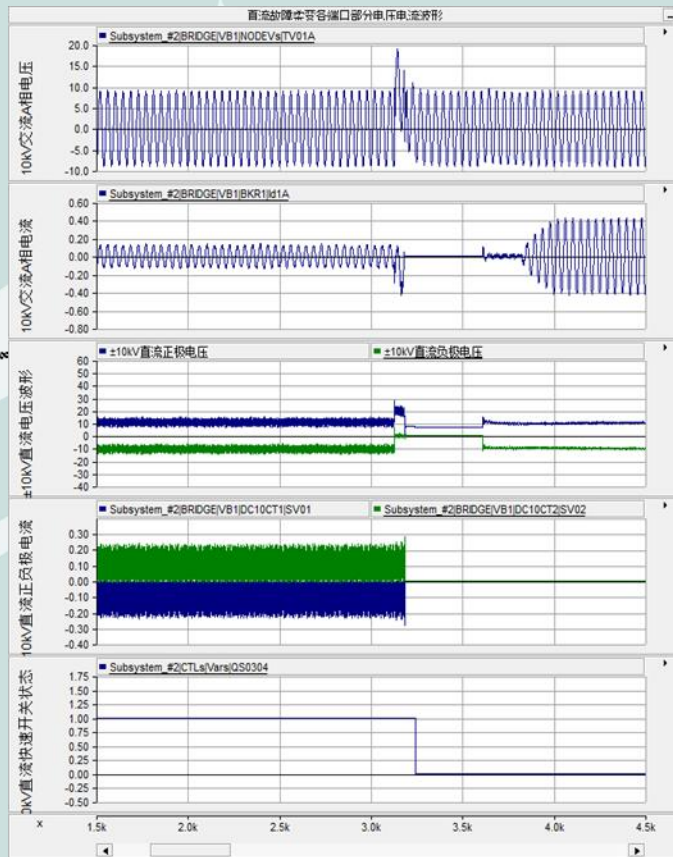
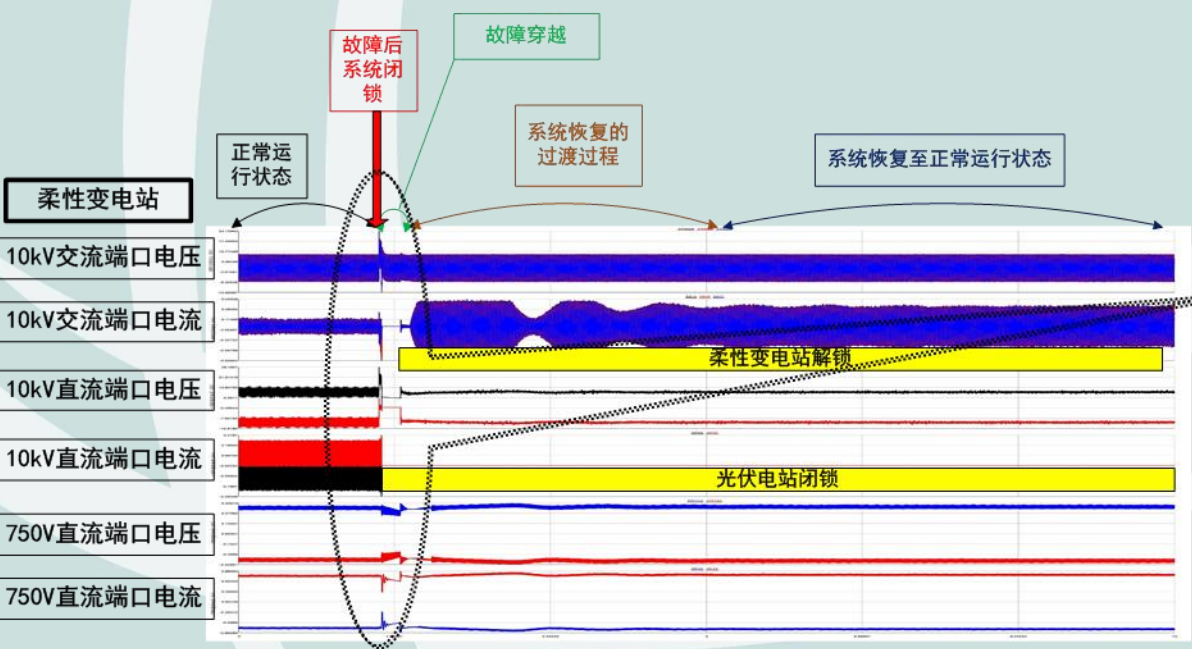
- 运行工况：柔变完成启动，工作在稳压模式，低压侧满载，光伏出力2.2MW；
- 模拟交流系统暂态扰动：云计算变电站110kV母线故障（三相短路），持续150ms；





# 直流故障穿越

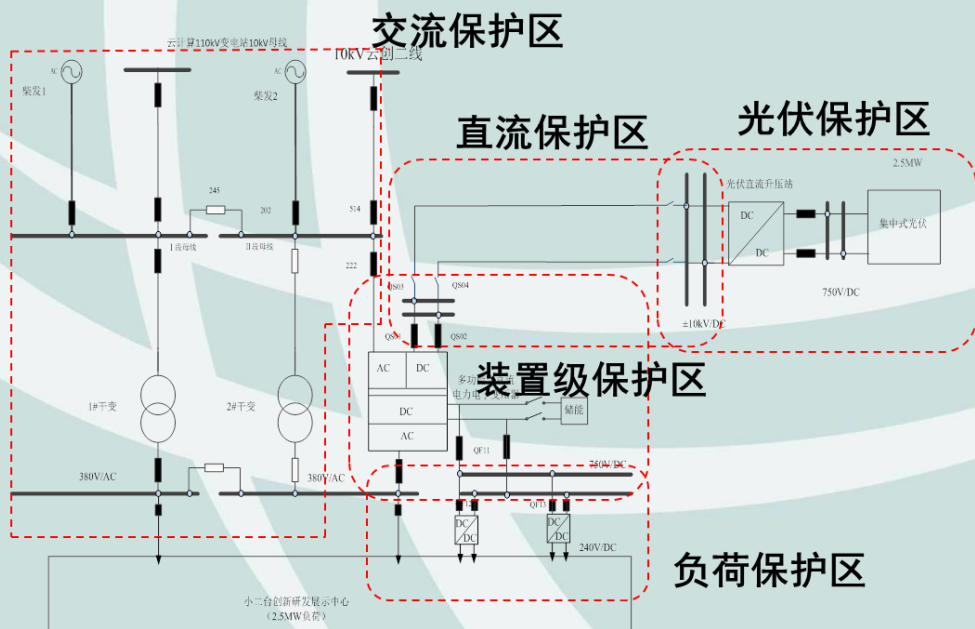
- 运行工况：柔变完成启动，工作在稳压模式，低压侧满载，光伏出力2.2MW；
- 模拟直流线路故障： $\pm 10\text{kV}$ 直流线路负极接地永久故障；





# 示范工程保护结构

- 示范工程保护配置遵循**就近就简、分区重叠**的基本原则。
- 针对**交直流耦合**，**单一保护无法快速准确动作**的问题，通过各区域保护相互配合实现各区域故障的快速检测及隔离。特别是在高压直流接地故障中，采用**基于模块电压、桥臂电流突变量、直流极对地电压**为复合判据，实现了故障快速判别，判别时间缩短至3.5ms



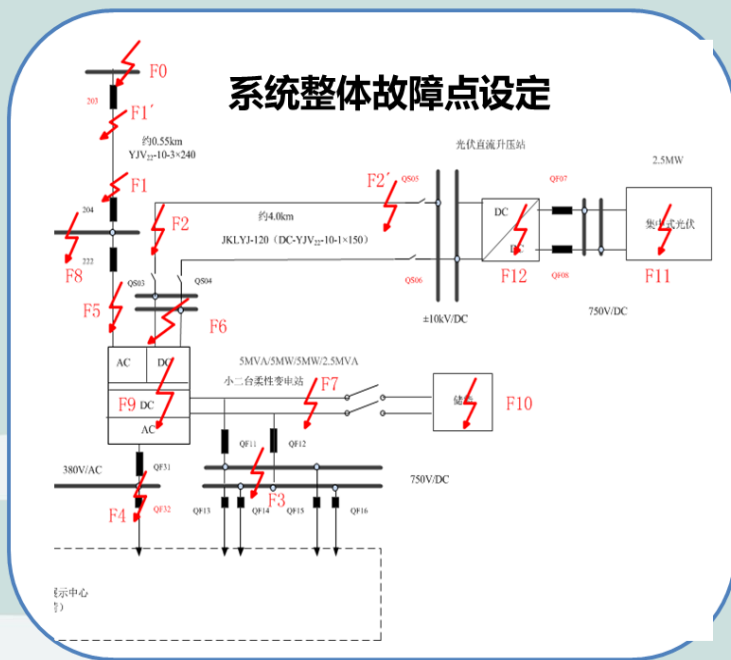
区域	保护配置	装置	安装位置
交流保护区	光纤纵联差动保护	线路测控保护装置	110kV变电站
	过电流保护、接地选线		110kV变电站
直流保护区	直流过压保护、交流过压保护	柔性变电站保护装置	柔性变电站
	低压过流保护		柔性变电站
	直流电压不平衡保护、直流过电压保护、直流低电压保护		柔性变电站
	交流分量过压保护		柔性变电站
光伏及直流升压站保护区	孤岛保护	外部保护装置	柔性变电站
	(直流升压站) 过流保护、过电压保护	光伏直流升压站保护装置	光伏直流升压站
负荷保护区	低压过流保护	柔性变电站保护装置	柔性变电站站
	750V断路器脱扣单元保护	断路器自带保护	
	380V断路器脱扣器保护	断路器自带保护	
装置级保护区	桥臂过流保护	柔性变电站保护装置	柔性变电站
	模块过压和过流保护 (VBC)	阀控装置	



# 控制保护系统数模检测试验方法

针对示范工程中5类重要设备，梳理出的12项难点，开展26种不同故障研究。

故障点	
F0 (云计算变电站10kV母线)	F7 (PET750V引线)
F1 (10kV交流线路近柔变端)	F8 (柔性变电站10kV母线)
F1' (10kV交流线路远柔变端)	
F2 (10kV直流线路近柔变端)	F9 (PET内部故障)
F2' (10kV直流线路远柔变端)	
F3 (750V母线)	F10 (储能设备)
F4 (380V负荷线路)	F11 (光伏电池板)
F5 (PET10kV交流引线)	F12 (光伏电站DC/DC升压变压器)
F6 (PET10kV直流引线)	



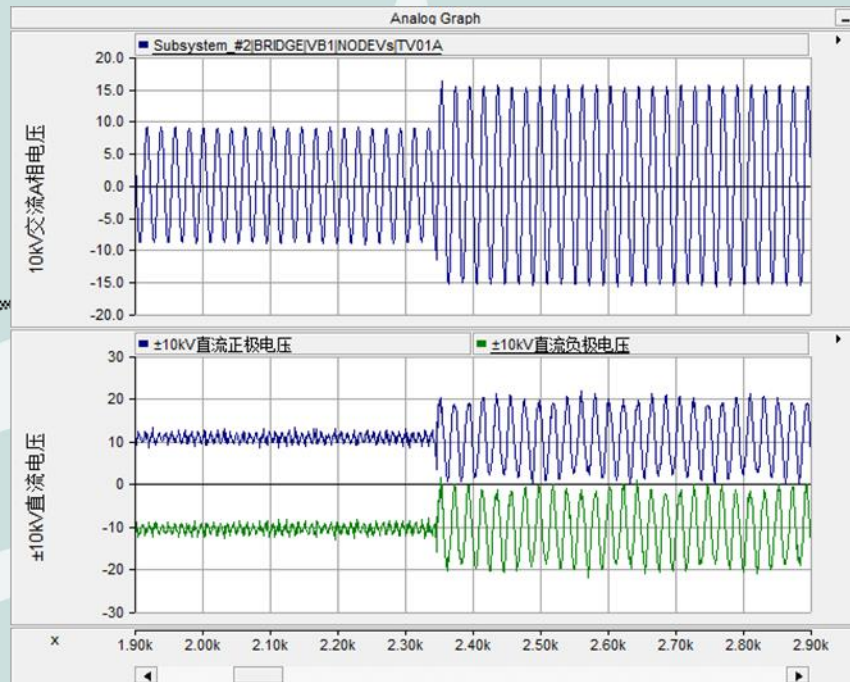
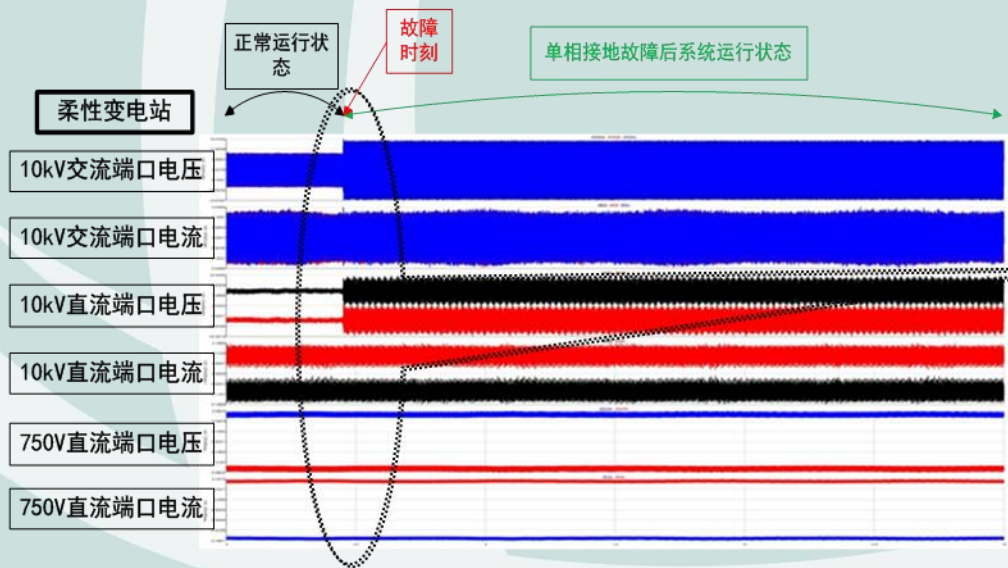
主要试验项目
顺序启停控制试验
稳态性能试验
系统谐波及不平衡试验
暂态扰动穿越试验
系统故障重启试验
金属性及过渡电阻故障试验
N-2故障试验
电压/电流互感器断线试验
交流系统频率偏移试验
交流系统电压阶跃试验





# 交直流耦合特性处理

- 运行工况：柔变完成启动，工作在稳压模式，低压侧满载，光伏出力2.2MW；
- 故障类型：**10kV交流线路单相接地永久故障；**

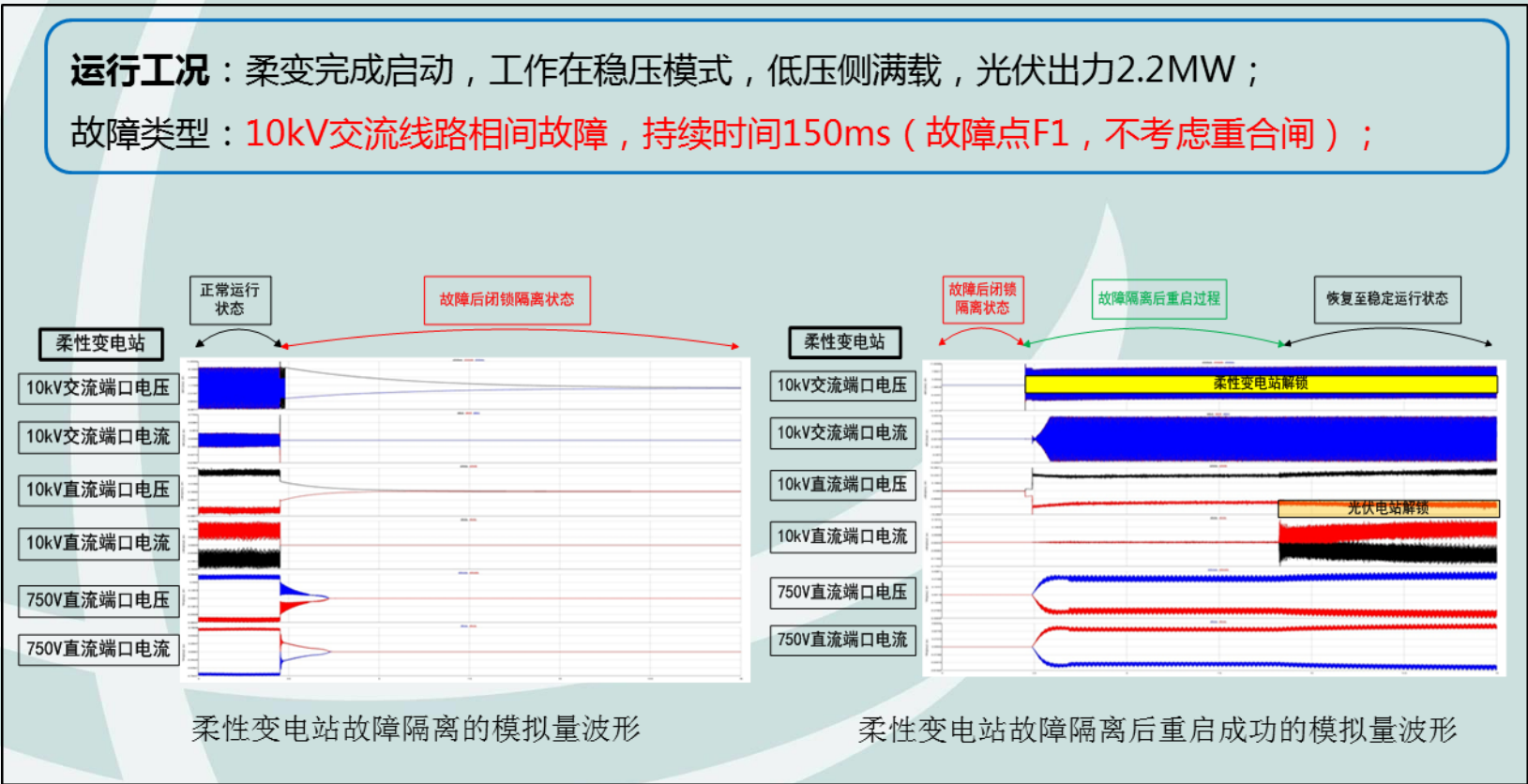
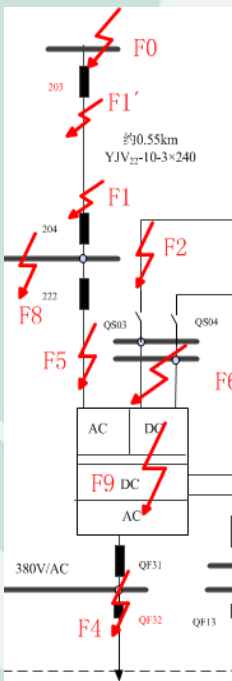




# 交流故障识别及恢复

**运行工况：**柔变完成启动，工作在稳压模式，低压侧满载，光伏出力2.2MW；

**故障类型：**10kV交流线路相间故障，持续时间150ms（故障点F1，不考虑重合闸）；



（故障点F8）柔变10kV交流母线相间故障的故障特征与上述左边波形类似。其属于柔性变电站停运的故障，在交流线路故障隔离后，10kV备自投装置合于故障，柔性变电站退出运行，跳开变压器四侧的开关。





国家电网  
STATE GRID

国网冀北电力有限公司  
STATE GRID JIBEI ELECTRIC POWER COMPANY LIMITED

# 目录



1 柔性配网工程概况

---



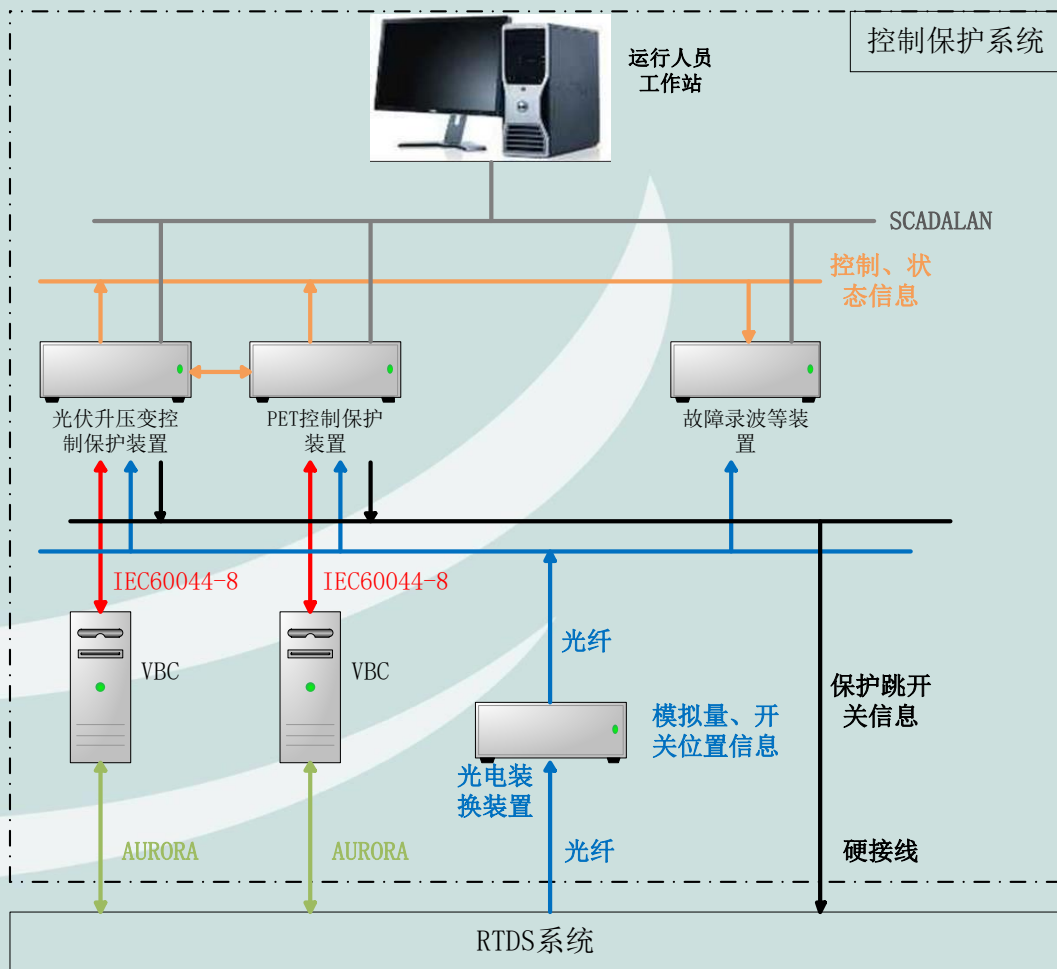
2 RTDS数模仿真及总结

---



## □ 试验目的

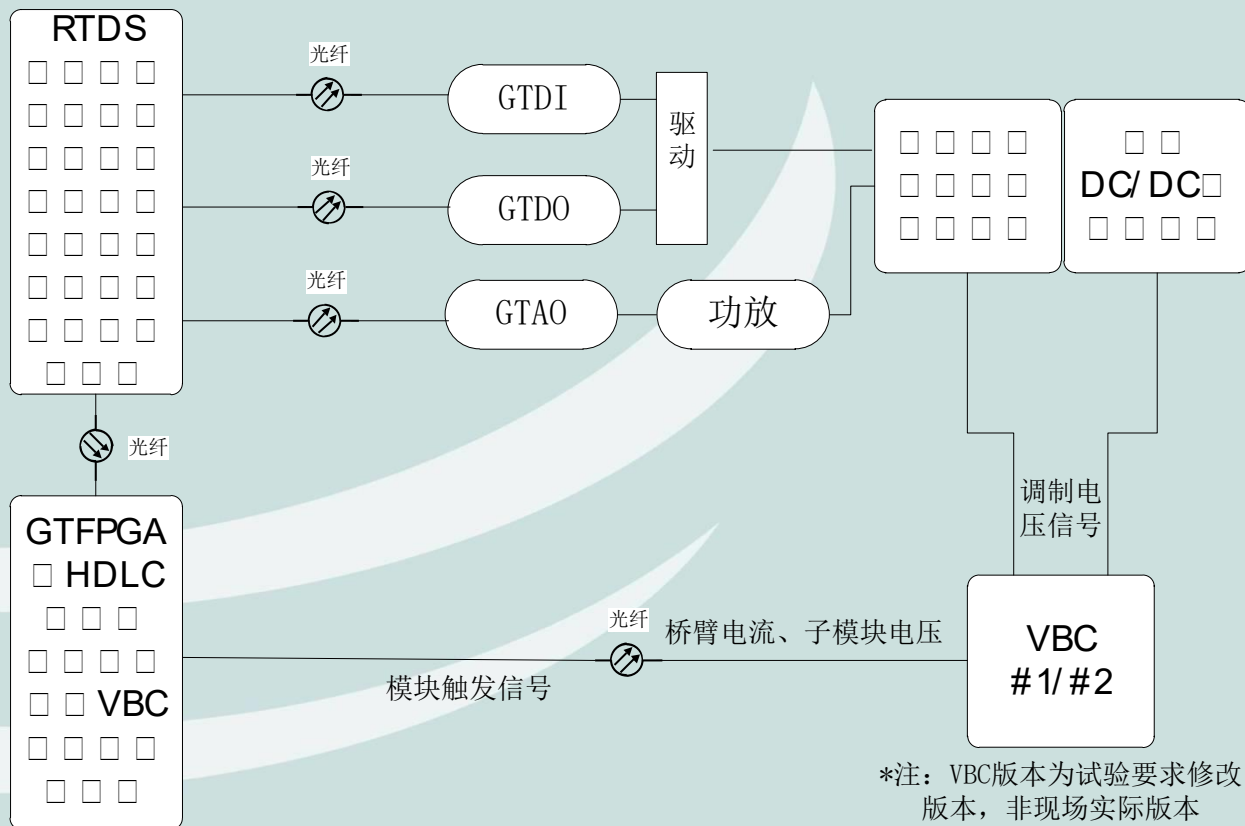
利用RTDS数模检测的形式对工程控制保护系统的装置软件功能以及系统控保装置之间的配合进行校验，完善控制保护结构的设计以及装置的软件逻辑。



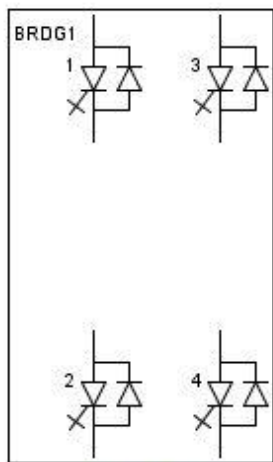


# 试验平台信号接口示意图

- GTHDLC实现RTDS和多功能交直流电力电子变压器和光伏DC/DC升压变压器VBC阀控装置的通信。
- GTA0实现模拟量输出，GTDO实现开关量输出，GTDI实现开关量输入。
- 多功能交直流电力电子变压器一次拓扑、光伏电池板、BOOST升压电路、光伏电站DC/DC升压变压器一次拓扑、交流断路器、直流快速开关和交直流线路等一次设备在实时数字仿真系统（RTDS）中模拟。



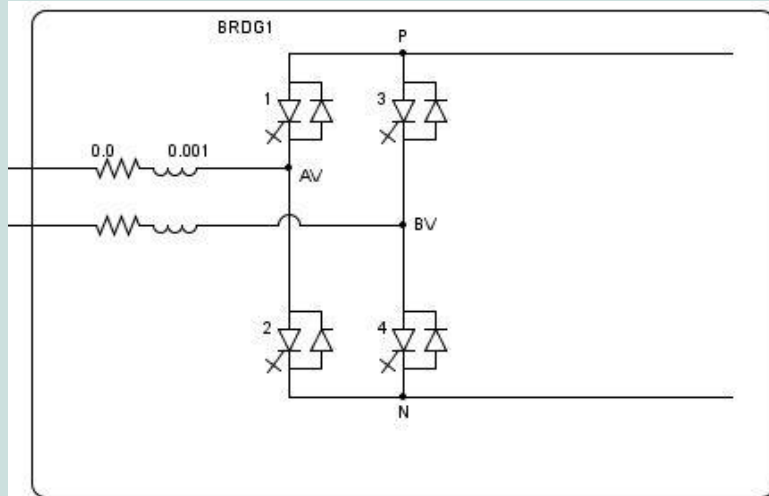
\*注：VBC版本为试验要求修改版本，非现场实际版本



TWO LEVEL VSC



RTDS小步长系统VSC单体模块



LOW LOSS TWO LEVEL VSC



RTDS小步长系统VSC低损模块

- ❑ 选用RTDS小步长系统中分立器件完成PET换流部分模型搭建。换流阀部分由实际的48级等效简化为4级结构。
- ❑ 1) RTDS小步长子系统允许的元件数量、节点数量均有限，因此须将电力电子变压器阀拆解为几个部分建立在不同的RTDS小步长子系统；
- ❑ 2) RTDS小步长子系统之间通过均匀传输线进行电气连接，引入额外的小电容和电感，造成电力电子变压器特性失真，因此在RTDS硬件资源充足的情况下，仍需对电力电子变压器阀部分做简化处理，尽量减少均匀传输线数量。

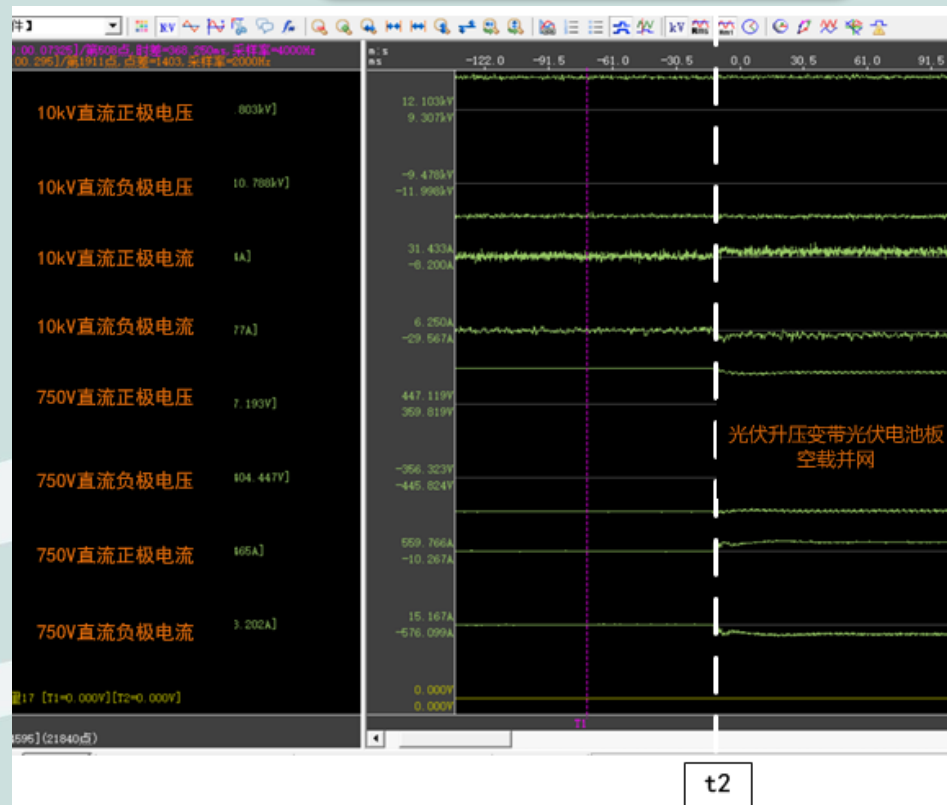
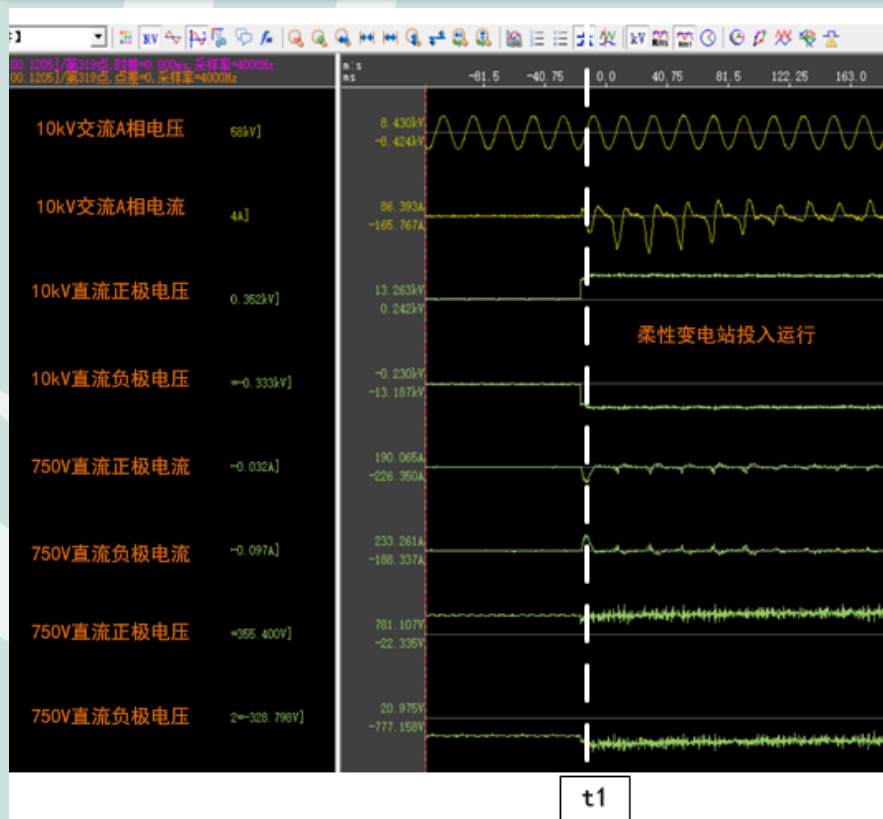


# 示范工程顺控启动波形

柔性变电站经站控后台顺控启动，启动过程较为平滑，冲击较小



光伏升压变带光伏电池板空载并网



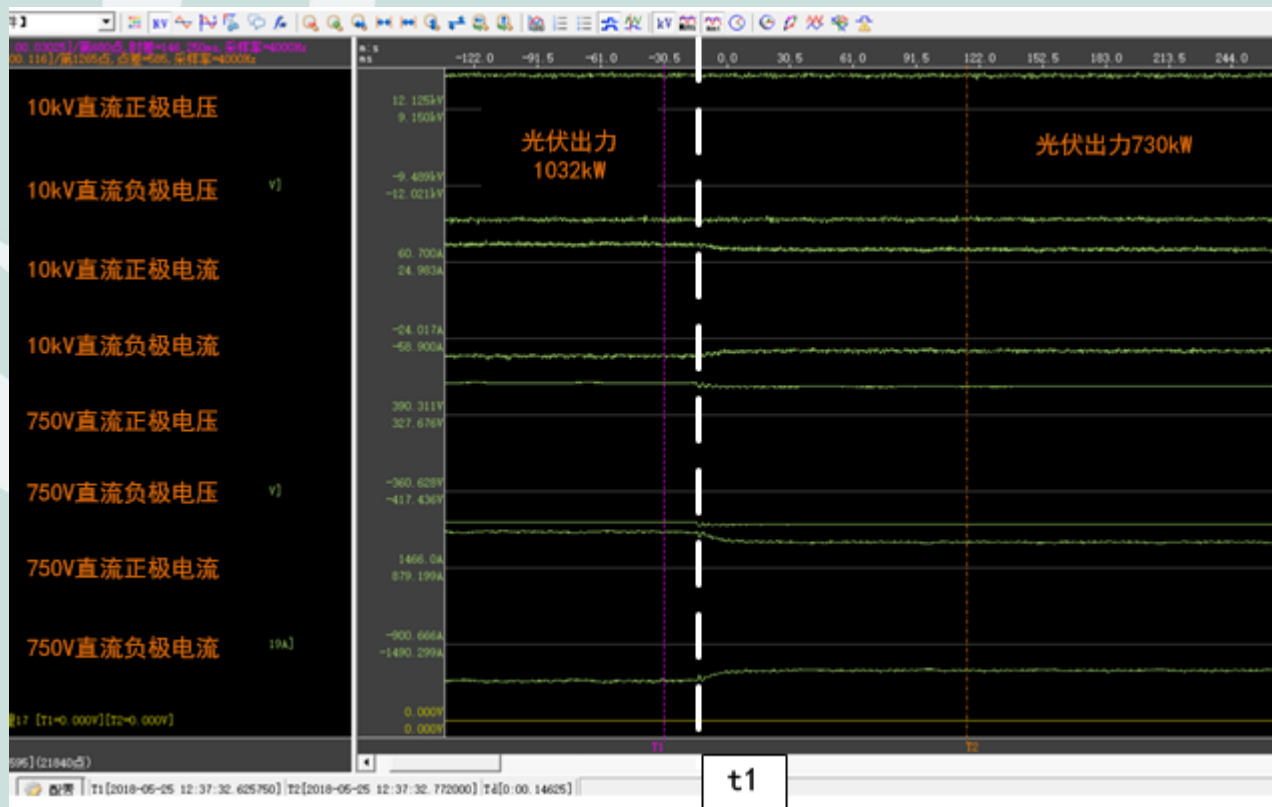
T1时刻，柔变正式并网投入运行

T2时刻，光伏升压变带光伏电池板空载并网



## 光伏电站功率突降试验

--光伏升压变的出力稳定运行在1032kW，做功率下阶跃试验，将出力降至730kW。



从左图看，T1时刻，光伏出力变动，在整个过程中光伏升压变快速控制直流电压，维持系统稳定。

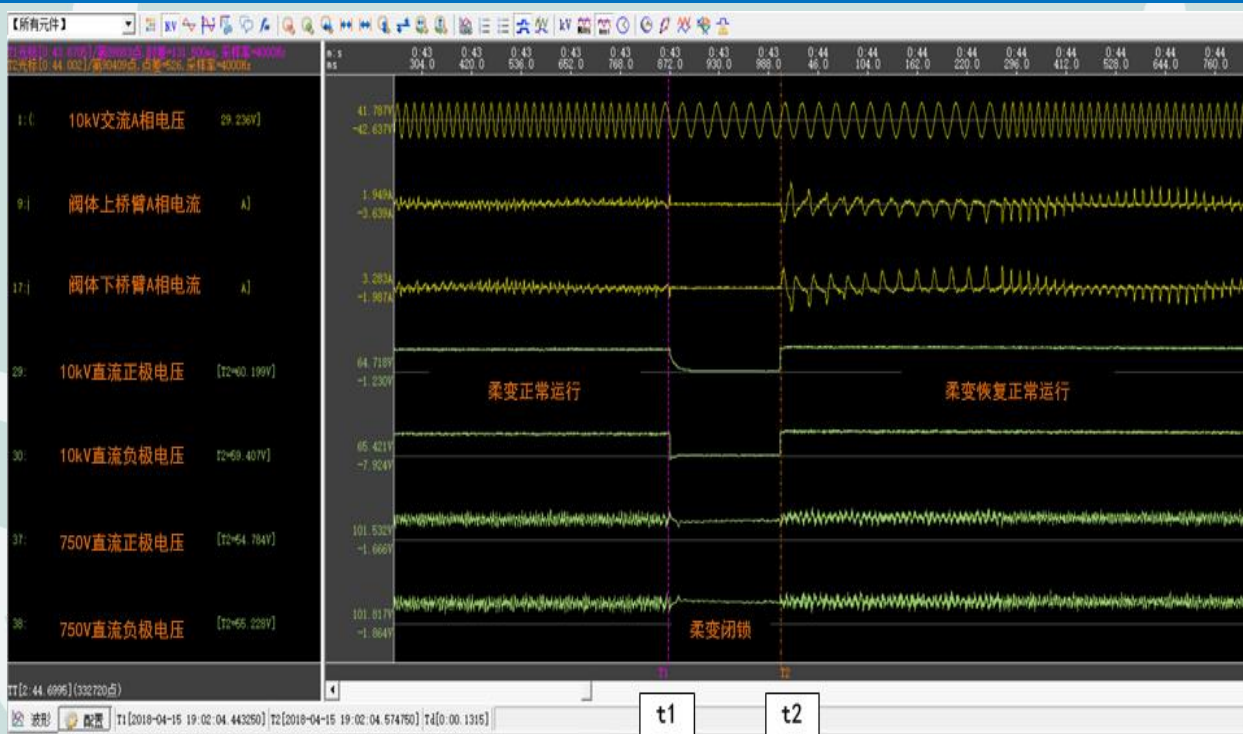




# 交流扰动故障穿越波形

在受到**短时扰动**等情况下，柔性变电站会进入**故障穿越状态**。

--系统进入**短时闭锁状态**，控制保护系统持续判定满足**重启条件一定时间**后，完成**短时重启**。重启过程中由**超级电容器**为负荷供电，保证交直流负荷的不间断供电。



**T1时刻，柔变闭锁；经131.5ms，在T2时刻完成重启，恢复供电**



# 示范工程运行问题汇总

直流快速隔离开关运行异常情况如下：

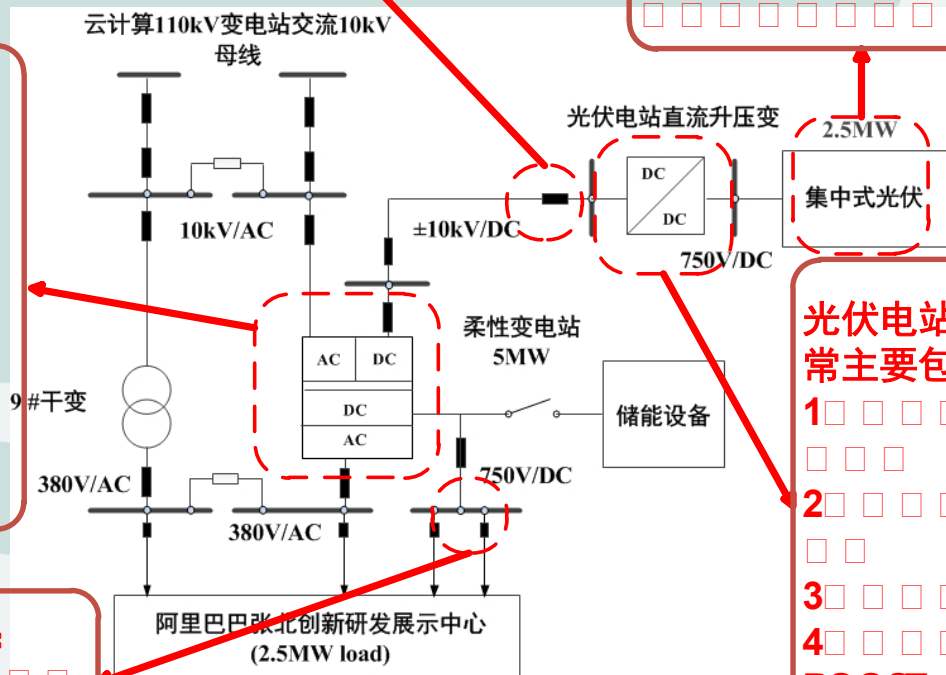
- 1  ± 10kV
- D512

光伏电站BOOST升压装置运行异常情况如下：

- 1  BOOST
- 
- 2  ± D311
- 

多端口PET运行异常：

- 1
- 
- 2
- 
- 3
- 
- 4  CT
- 
- 



光伏电站直流升压变运行异常主要包括以下几类：

- 1
- 
- 2
- 
- 3
- 4
- BOOST

直流750V及240V端口谐波：

- 1
-



## □ 总结

RTDS系统数模仿真能够对电力电子设备控制保护装置的功能方面进行较好的优化，能够基本满足功能测试的要求，从而实际工程的正常投运提供良好的基础。

## □ 期许

1) 配网系统作为电网的终端，面临的应用场景复杂多变，因此换流装置的拓扑结构更加灵活多变，用到小步长系统中分立功率器件搭建模型的几率较大，因此希望能够降低这些模型在运行中的计算损耗；

2) 配电网的网架结构较弱，大小步长之间均匀传输线引入的电感电容对系统的影响较大电网系统大，因此希望能够去掉大小步长系统之间的均匀传输线；

3) 在示范工程控制保护测试过程中，RTDS系统同换流装置阀控的通信除了包含电平信号外，还需要反馈换流阀的状态等信息，现有的AURORA通信协议不能完全满足实际要求，因此希望能在通信的兼容性方面进一步改进。



国家电网  
STATE GRID

国网冀北电力有限公司  
STATE GRID JIBEI ELECTRIC POWER COMPANY LIMITED

**汇报完毕！**

**谢谢！**