

行波测距高精度数字仿真实验研究平台 开发与应用

——蔡海青



南方电网科学研究院

2019.10.17



研究背景及意义

主要研究内容

仿真验证与应用

下一步研究计划

行波故障定位装置的应用情况

- 南方电网行波测距配置要求：
 - 500kV及以上系统的交流线路、220kV长度超过50km或多单位维护的交流线路应配置集中式行波测距装置；
 - 其它220kV巡线困难的交流线路宜装设行波测距装置。
 - 直流线路应按双重化配置两套不同设备供应商的行波测距装置。

- 硬件缺陷：AD、CPU、电源、GPS、通信等模块损坏
- 原理缺陷：行波测距拒动
- 软件问题：双回线选线错误、设备内部设置不合理
- 其他：GPS信号丢失

项目对解决行波测距问题的意义

- 针对行波测距存在的**测距精度不高或测距失败问题**，南网公司提出制定整改措施，切实提高行波测距装置故障定位精度，并**统筹考虑完善装置技术标准、研究入网测试手段等工作**。

行波测距装置试验检测平台：

- 发现行波测距装置的技术缺陷
- 检测行波测距装置精度及可靠性
- 可靠的行波测距装置的运行检测、入网检测
- 为电网系统的安全稳定提供技术支撑

**精准定位故障位置，快速处理故障
和恢复供电，提高供电可靠性**





研究背景及意义

主要研究内容

仿真验证与应用

下一步研究计划

技术路线

行波测距仿真试验平台

评价标准

标准

数据

硬件平台

硬件

模型

a. 适应行波测距的特性，适应主流产品，适应实际电网需求
b. 具体模型和试验内容

a. 试验覆盖面vs试验时间
b. 线路长度、线路类型、故障距离、故障类型、初相角、过渡电阻等

a. 高频率：工频~行波；阶跃的上升/下降时间至少小于3.3us
b. 大功率：30A电流，100V电压
c. 高通道同步性
d. 长时间播放能力

a. 能涵盖行波传播全过程
b. 反映真实的故障波形

本项目需达到的目标

研究内容和难点

充分考虑实验室环境和现场环境的差异，区分行波测距装置本身缺陷和试验环境带来的问题；解决试验环境对试验结果的影响。

一次系统及传输通道上各个元件的行波特性：线路、CT、二次传输电缆、汇控箱、高抗、其他二次设备仪用CT

高频率和大功率之间的矛盾；设备体积、通道数量和散热性之间的矛盾；稳定性和扩展性之间的矛盾

难点

有效性测试

硬件平台

准确掌握行波测距装置运行情况能够全面反映行波装置运行特性的关键点：
 测距原理的选取
 测距误差精度的确定
 测距启动门槛的要求

测试数据库

企业标准规范

具有普遍意义和代表性的测试模型和测试数据库，能够兼顾测试完整性和试验时间有限性的矛盾

硬件开发-行波校验仪

难点	解决方案	效果
高频电流、电压信号的播放	电流：快速驱动设计+四个大功率MOSFET管并联输出设计 电压：两个 $V_{DS}=500V$ 的MOSFET管并联输出	30A , 350kHz 100V , 350kHz
高采样频率数据文件播放	双ARM嵌入式Linux为核心、集成FPGA、6路16位高速高精度DA（10M转换频率） 不足10M采样率的文件采用拉格朗日插值法	产生采样率10MHZ的高精度模拟信号
大功率电流输出对电路的影响	数字信号与模拟信号之间采用磁隔离的方式进行隔离	避免了大功率电流对数字信号的影响，避免了每个功放模块之间输出的共模电压差
长时间播放	FPGA扩展DDR3容量512M，可以下载存储大量数据，故障前数据循环播放	可以回放时长超过500ms的故障波形（不包含故障前循环数据）
高同步性	内部同步、GPS同步、开入开出同步等	同一装置通道间同步误差 $<0.2\mu s$ 不同装置通道间同步误差 $<0.4\mu s$
适用于多种原理故障定位装置测试（电流、电压、保护测距一体化）	多台装置灵活组合：6电流、3电压+3电流、3电压	各台装置间通过同步信号组成平台，适应各种原理测试

硬件开发-行波校验仪

- (1) 支持Comtrade等格式波形文件回放功能；
- (2) 支持读取Comtrade等格式波形文件，并进行相关图像操作；
- (3) 支持多种故障波形回放触发方式：手动、重复、GPS、B码、开关量等；
- (4) 多机支持同步输出功能，能够完成单端测距、双端测距、电压型行波测距、电流型行波测距等的校验；
- (5) 支持连接RTDS模拟小信号输入；



硬件开发-行波校验仪

行波校验仪主要参数

电流功放		高速D/A转换	
输出电流幅值	50A	输出采样率	10MHz
电流输出功率	1500VA	采集端口	
电流幅值精度	误差 $\leq 0.5\%$	端口数量	6个
电流输出带宽	350kHz	采集范围	10V
阶跃响应特性	阶跃响应时间 $< 2\mu s$	接口参数	
电压功放		计算机接口	以太网口
输出电压幅值	150V	GPS接口	天线、IRIG-B码
电压幅值精度	误差 $\leq 0.5\%$	开关量接口	1对快速开入, 1对快速开出
电压输出带宽	500 kHz	电源	
阶跃响应特性	阶跃响应时间 $< 2\mu s$	额定电压	220V, -10% ~ +10%
输出同步性指标		工作环境条件	
单台装置间同步误差	$< 0.2\mu s$	环境温度	-10°C ~ +45°C
多台装置间同步误差	$< 0.5\mu s$	相对湿度	不大于90%

硬件开发-行波校验仪

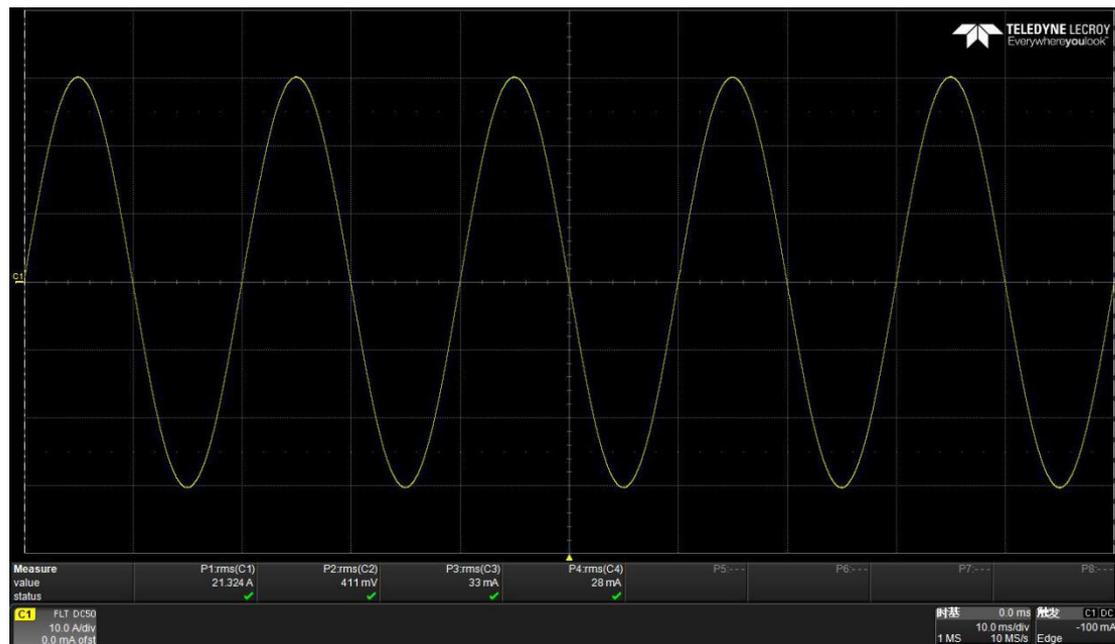
行波校验仪上位
机软件

- (1) 支持Comtrade格式记录的数据文件；
- (2) 可在数据文件记录的电流通道的中，选择实际各个通道下载的数据内容；
- (3) 可通过设置各个通道的比例系数来调整输出电流幅值；
- (4) 对播放的数据可以定义输出范围，通过定义故障前时间和扩展倍数实现故障前波形循环播放。

硬件开发-行波校验仪

行波校验仪测试-精度测试

通道	给定电流值	测试值	误差 (%)
I1	0.707A	0.704A	-0.42
	3.536A	3.543A	0.19
	7.072A	7.074A	0.029
	21.22A	21.324A	0.49

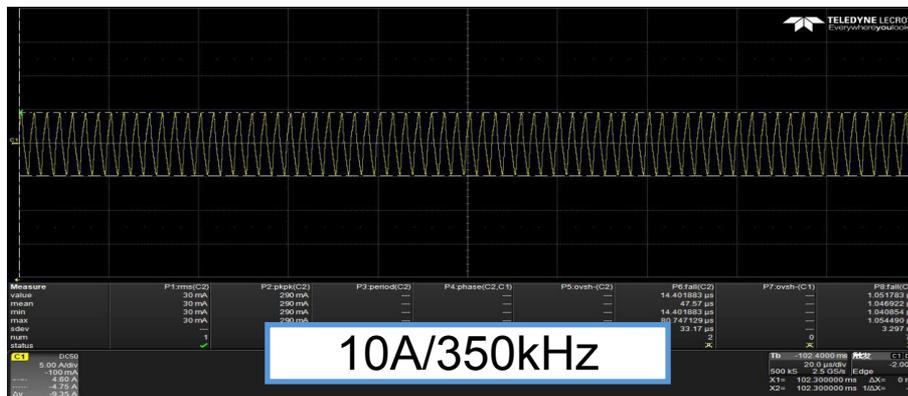


- 行波测距校验仪播放标准 50Hz 正弦波数据文件
- 10A 及以下电流值用高精度电流表测试
- 30A 电流用高速示波器观测
- 在 0~30A 范围内，行波测距校验仪的误差低于 $\pm 0.5\%$ 。

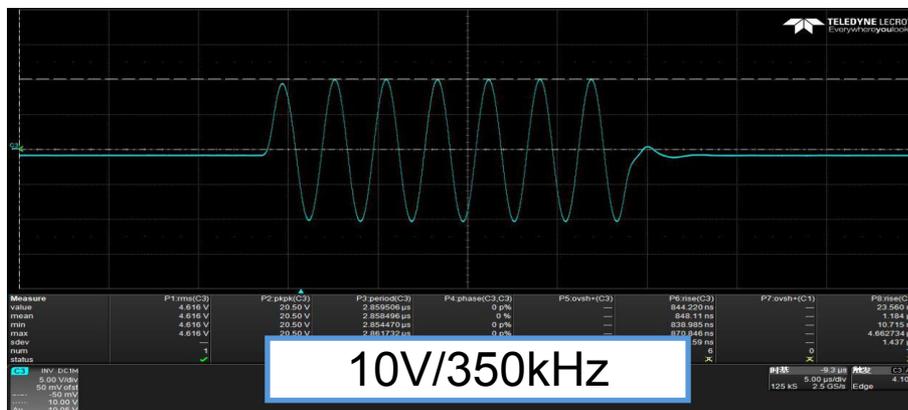
硬件开发-行波校验仪

行波校验仪测试-宽频信号播放测试

- 电流通道：行波测距校验仪播放10A幅值，频率50Hz~350kHz波形



- 电压通道：行波测距校验仪播放60V/50Hz~1kHz，10V/100kHz~350kHz波形



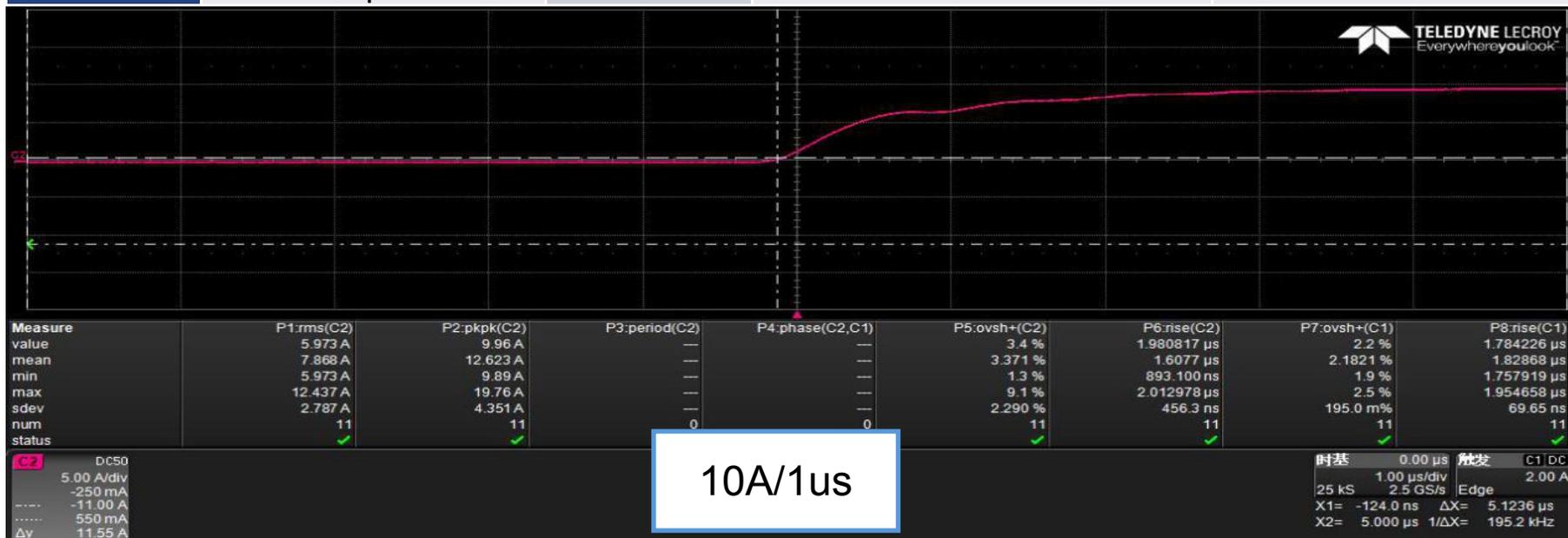
试验结果表明：波形无明显失真。

硬件开发-行波校验仪

行波校验仪测试-阶跃测试

- 利用行波测距校验仪播放阶跃数据文件，电流阶跃为10A/20A，电压阶跃为60V，上升时间为1 μ s、2 μ s、3 μ s。

幅值	上升时间	通道	测试值 (μ s)	超调量 (%)
10A	1 μ s	I1	1.76	2.67
	2 μ s		1.65	2.80
60V	3 μ s	U1	2.144	4.7
	2 μ s		1.203	6.367

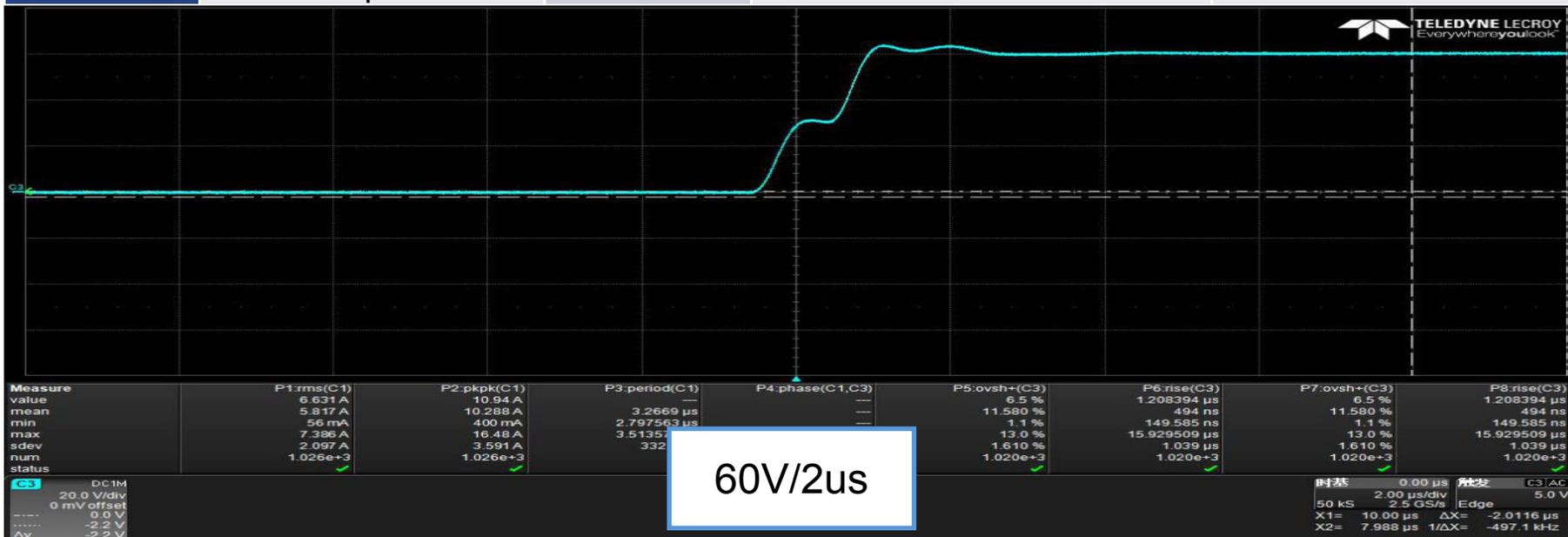


硬件开发-行波校验仪

行波校验仪测试-阶跃测试

- 利用行波测距校验仪播放阶跃数据文件，电流阶跃为10A/20A，电压阶跃为60V，上升时间为1 μ s、2 μ s、3 μ s。

幅值	上升时间	通道	测试值 (μ s)	超调量 (%)
10A	1 μ s	I1	1.76	2.67
	2 μ s		1.65	2.80
60V	3 μ s	U1	2.144	4.7
	2 μ s		1.203	6.367



硬件开发-行波校验仪

行波校验仪测试-通道同步性测试

- 利用行波测距校验仪在2个电压、电流通道同时播放同一个阶跃波形文件，



硬件开发-行波校验仪

行波校验仪输出波形比对测试

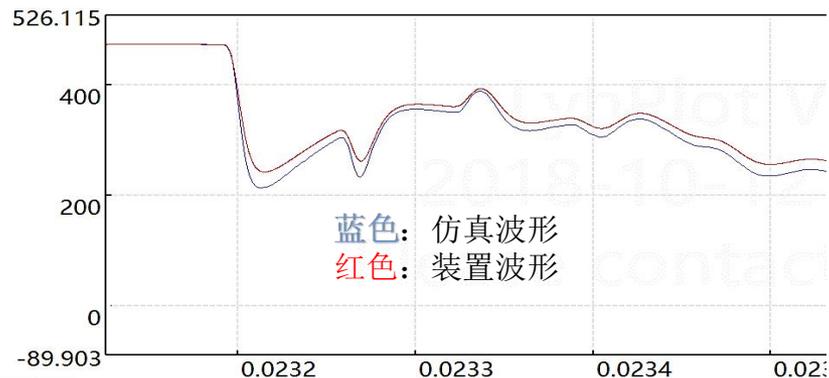
- 对输电线路故障监测装置开展测试
- 蓝色：仿真模型输出
- 红色：测距装置采集
- 播放的行波仿真数据包含丰富的高频分量，较好地检测行波特性

A2: BP1UDL/kV@playback

Y1: 469.488 Y2: 469.488

SDL7601-
B1UDL@xb_peer_1180217_2018-10-
11_143216_591076558 - 副本

Y1: 469.799 Y2: 469.89



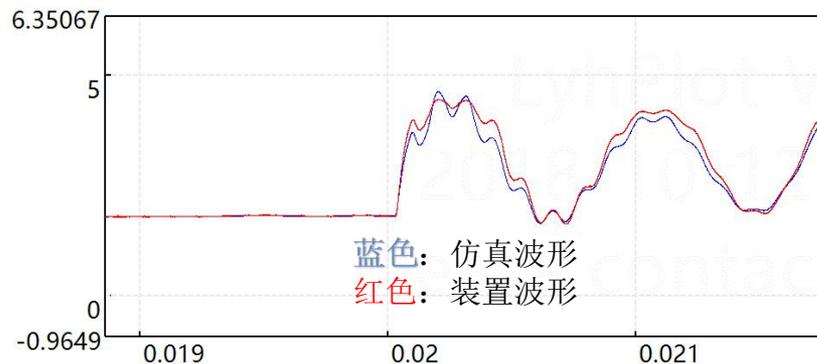
逆变侧电压

A3: AP1IDL/kA@playback

Y1: 1.79792 Y2: 1.79298

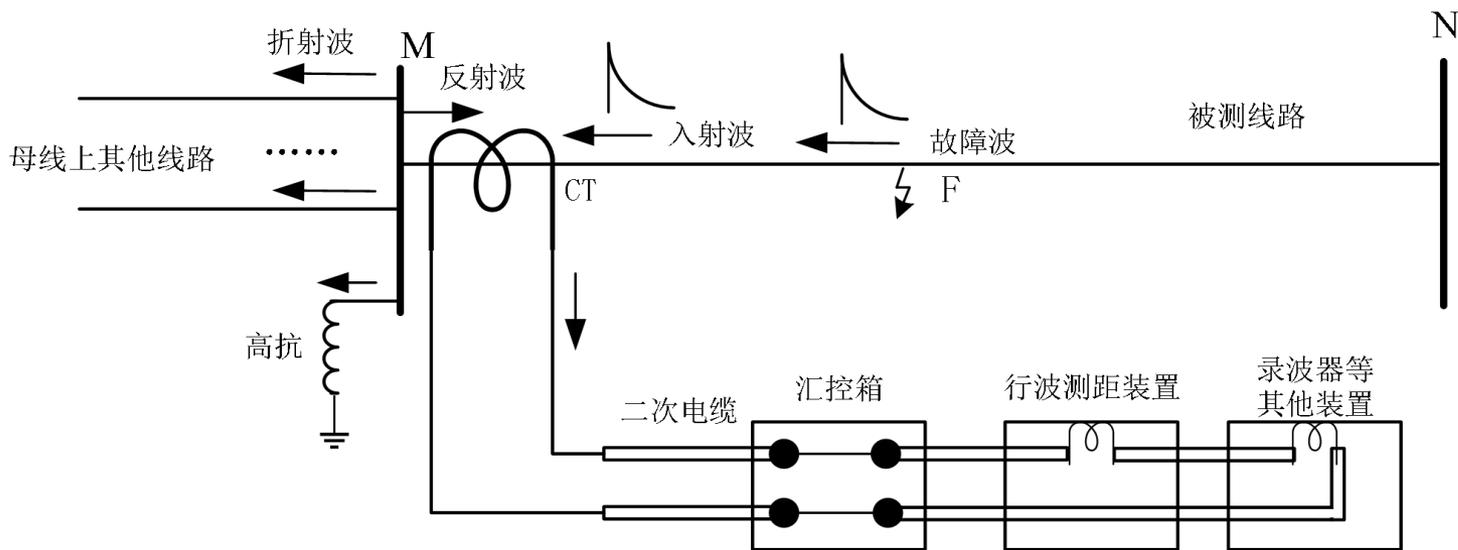
SDL7601-
A1IDL@xb_local_1180215_2018-10-
11_143216_591076558 - 副本

Y1: 0 Y2: 0



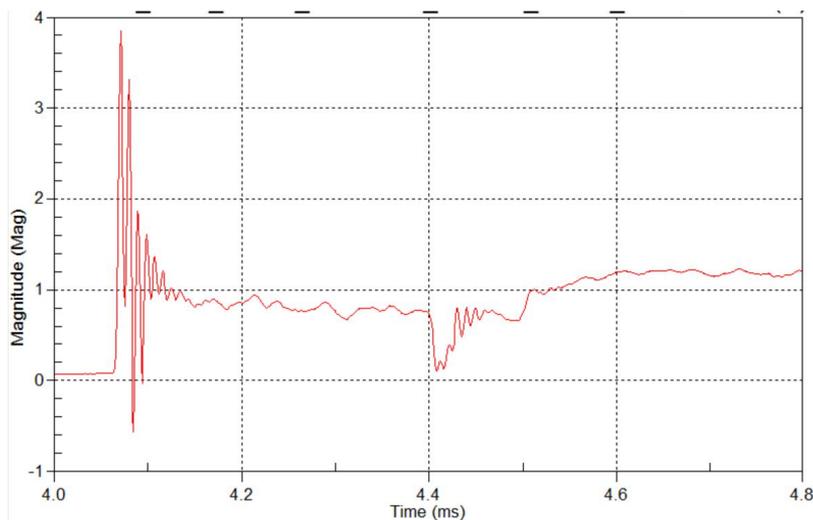
整流侧电流

仿真模型

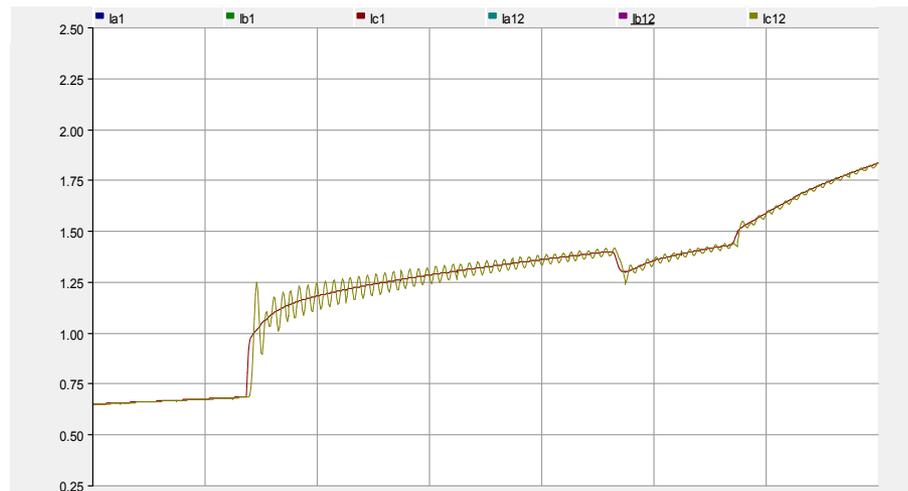


- **线路**：布线方式（水平/三角）、线路挂高、土壤电阻率、线路换位情况、弧垂对行波传播均有影响；采用实际工程线路参数（青山甲、乙线）
- **CT**：高频衰减，使行波波头变缓
- **二次电缆**：电流行波经二次电缆后发生高频振荡
- **高抗**：对行波波头幅值影响大、对波头陡度无影响
- 以**汇控箱**为代表的超短线路：对行波波头无影响
- 测距装置串联的**其他装置**仪用互感器：对行波波头及后续折反射无影响

仿真模型



现场波形

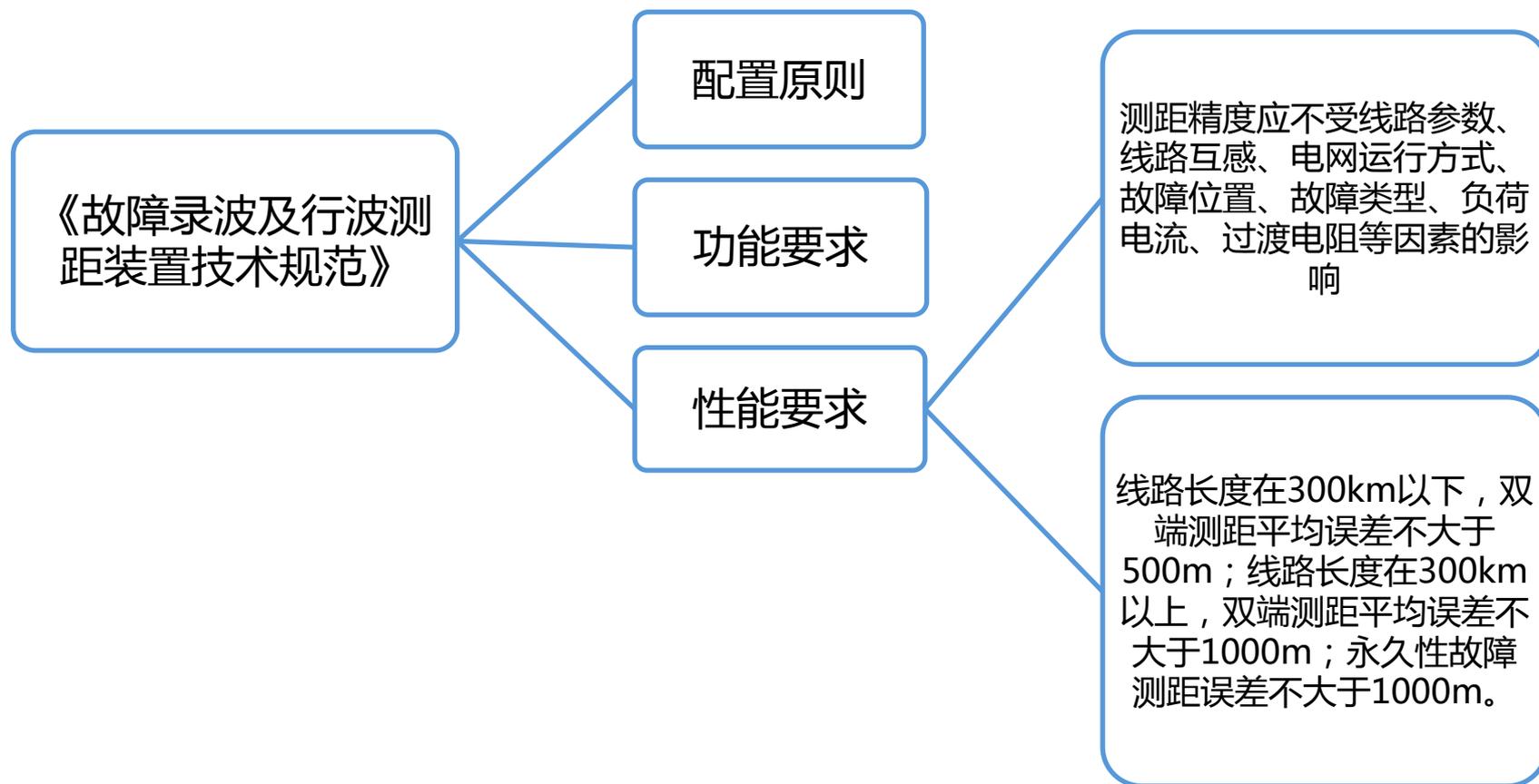


红色：未经CT和二次电缆的一次侧结果，本项目研究前，其他模型能够达到的结果

黄色：经过CT和二次电缆的波形图，本项目的研究成果

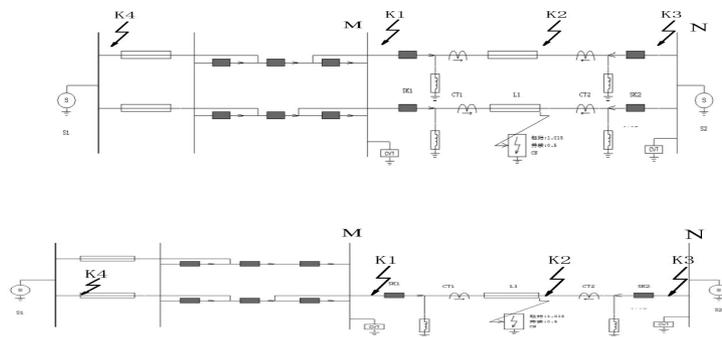
- 仿真模型能够准确地模拟初始波头和第一个折反射波头间隔时间
- 能够模拟故障初始波头后的振荡情况
- 仿真模型较好地模拟了现场行波传播情况

测试标准



测试标准

模型



中国南方电网有限责任公司行波测距装置送样检测标准（2016版）

中国南方电网有限责任公司故障测距屏(行波测距)到货抽检标准（2016版）

检测项目

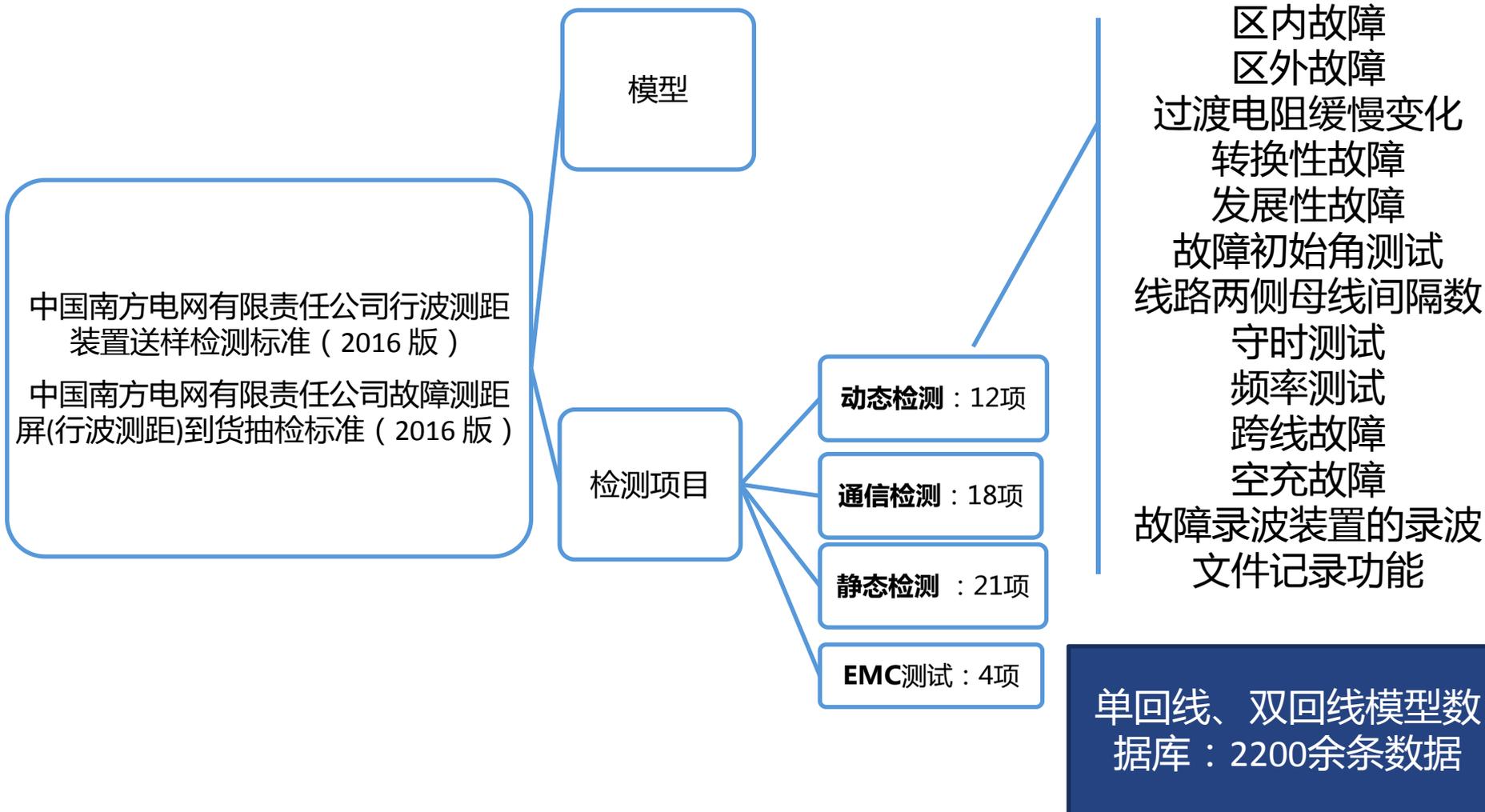
动态检测：12项

通信检测：18项

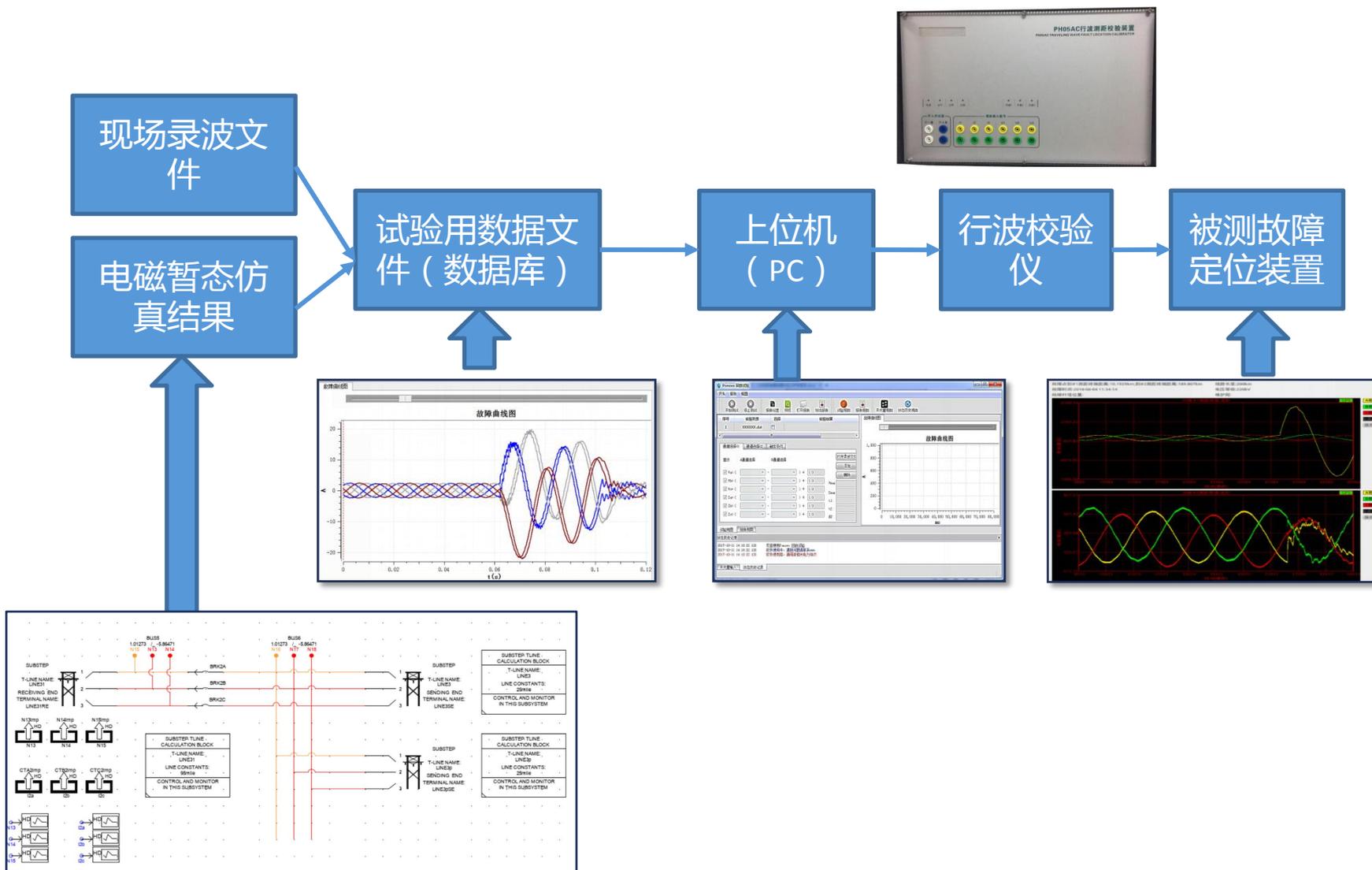
静态检测：21项

EMC测试：4项

测试标准



行波测距测试平台





● 研究背景及意义

● 主要研究内容

● 仿真验证与应用

● 下一步研究计划

平台验证与应用测试

分别对超高压和山大研发的输电线路故障监测装置、中电普瑞行波测距装置进行了应用测试

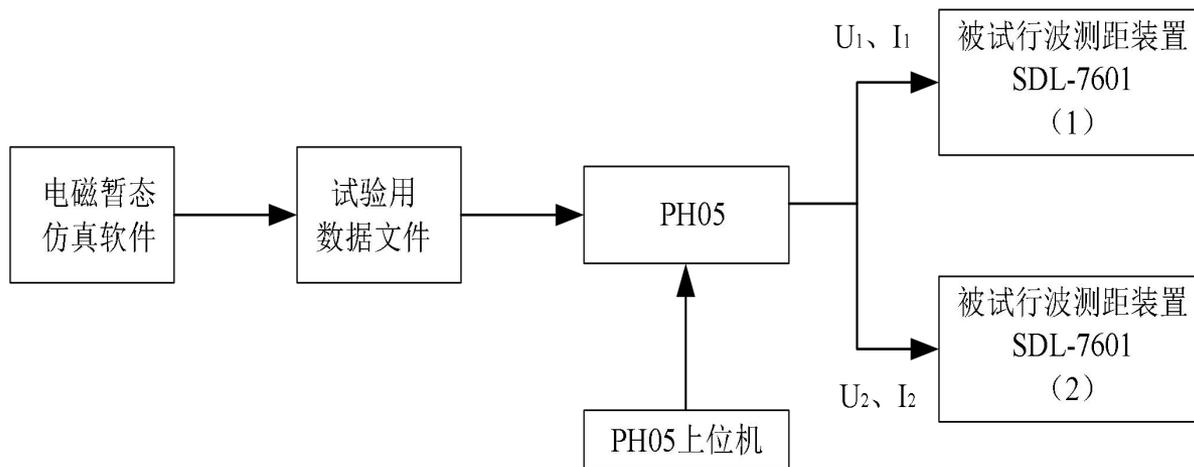
- 采用天广直流模型，线路全长960km，双极大地回线满功率运行，电流1800A，电压500kV。
- 仿真步长设置为1us。
- 录波量包括极1的线路电压及线路电流AP1UDL、AP1IDL、BP1UDL、BP1IDL。



平台验证与应用测试

测试平台

平台结构示意图



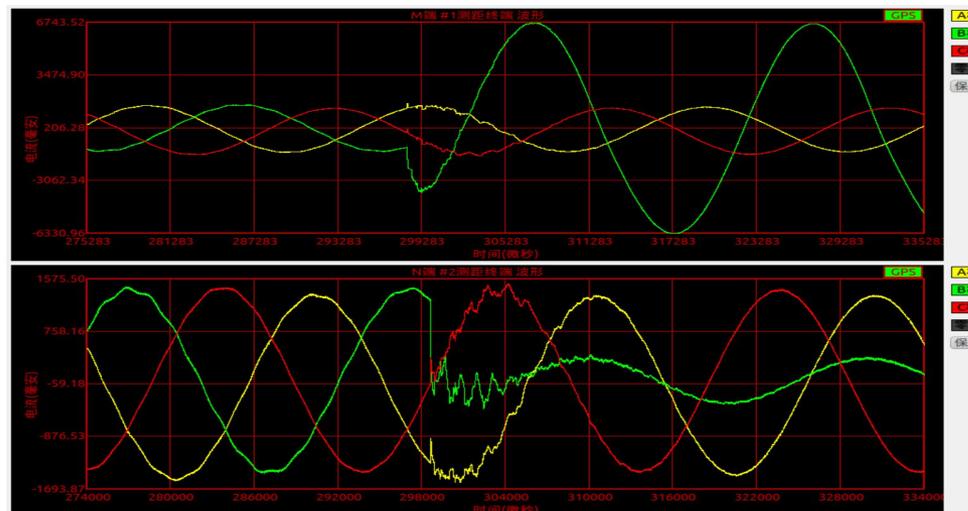
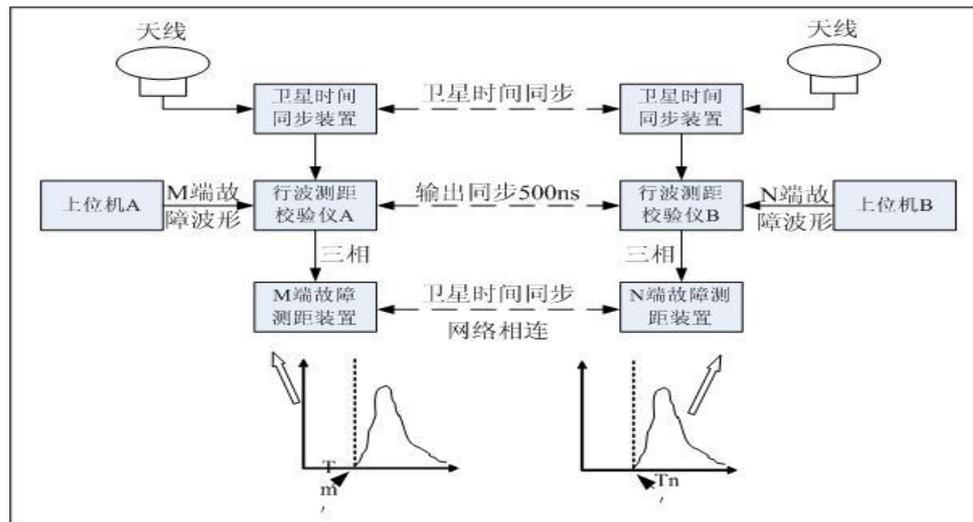
平台实际图



平台验证与应用测试

开展基本功能测试和性能测试。

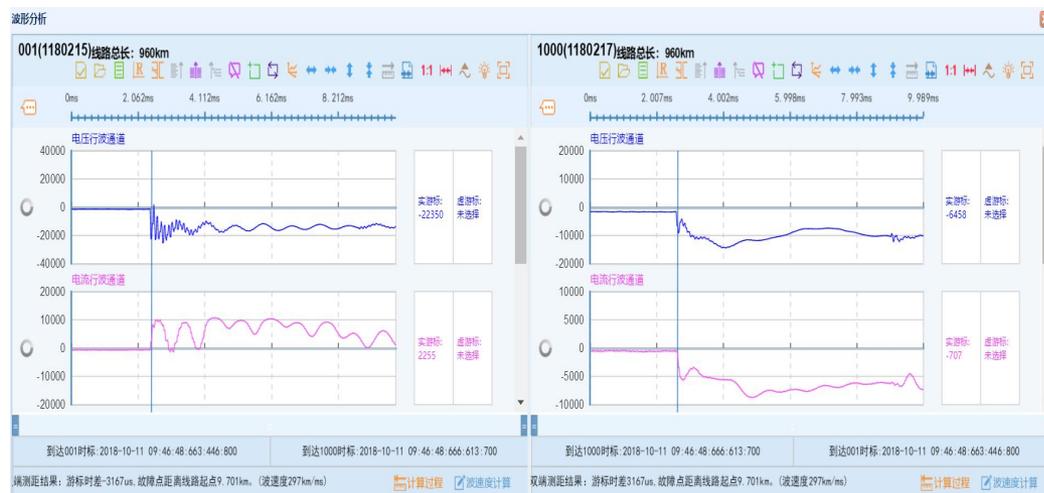
- **基本功能测试**包括：正常运行、通信试验；断电试验；数据存储检验；测距结果测试；采样频率测试；时间误差测试；故障检测启动单元测试；通道精度测试**9项指标**。
- **行波测距精度测试**包括在单回线和同杆并架双回线情况下的：区内故障、区外故障、过渡电阻缓慢变化、转换性故障、发展性故障、故障初始角测试、线路两侧母线间隔数、守时测试、频率测试、跨线故障等**10项指标**。



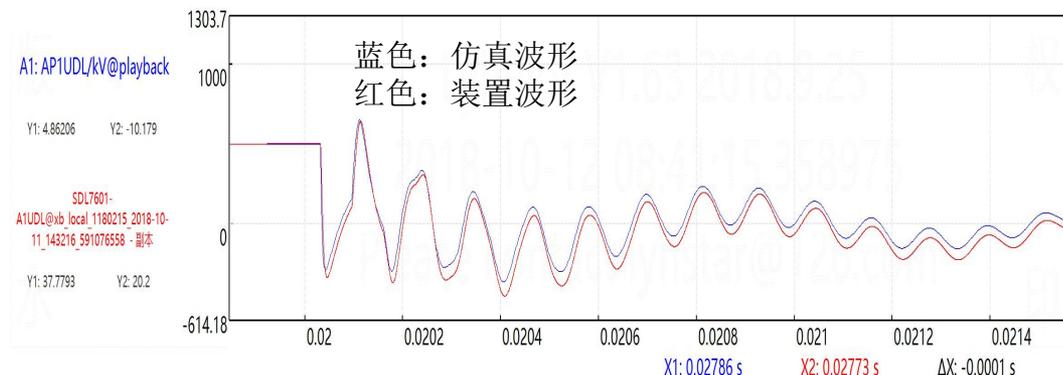
平台验证与应用测试

测试结果

- 共计**380项**试验，充分验证了平台的**准确性和可靠性**。
- 发现和解决行波测距装置多项问题：**电流超限发生畸变导致测距不准、转换和发展性故障装置无法捕捉第二次故障波头、失去GPS信号后对时误差**等。



高频分量录波图



整流侧电压对比



研究背景及意义

主要研究内容

仿真验证与应用

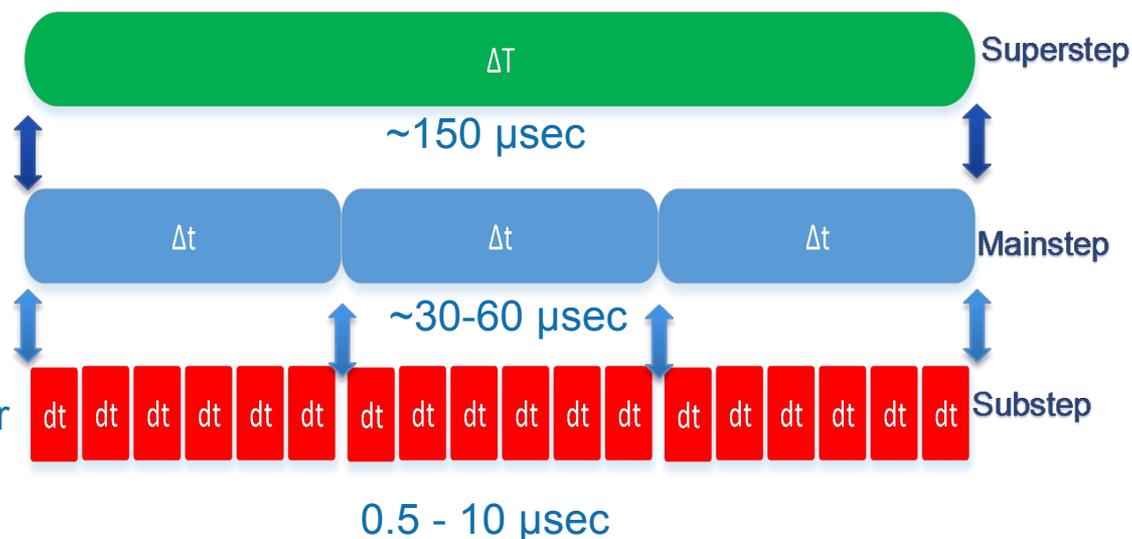
下一步研究计划

RTDS最新Substep技术介绍

Features

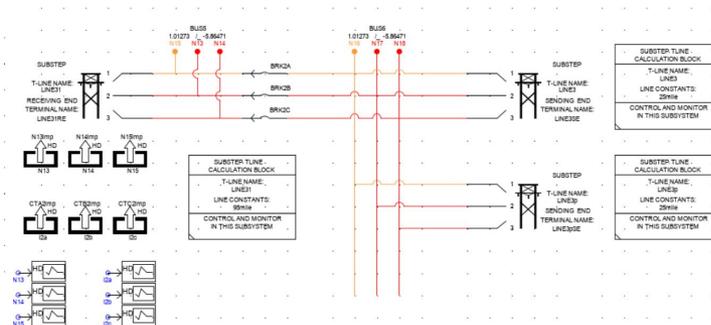
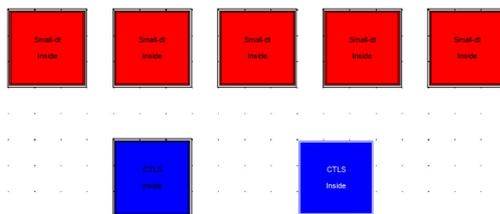
- Substep is only available on NovaCor hardware platform
- Each Substep network requires a full core
- Substep time step = $1/N$ * main step time step
- Full decomposition allows accurate representation of non linear elements (surge arrestors, transformer and machine saturation)
- No interface lines required for use of resistive switching
- Multiple Substep networks allowed
- IO cards supported (excluding GTNET)

Multirate Simulation



RTDS最新技术应用计划

利用Substep技术
，将行波测距模型
划分成多个子模块

2.3 μsec 

- 实现RTDS与行波测距装置的**实时闭环测试**
- 大幅度提升**测试效率和准确性**
- 进一步**优化仿真步长**



行波检验仪



行波测距装置



谢谢！

