

## 行波技术的工程应用和仿真测试

# Engineering application and simulation test of traveling wave technology

中国·许昌开普检测研究院股份有限公司  
国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心  
国家智能微电网控制设备及系统质量监督检验中心  
国家电动汽车充换电系统质量监督检验中心

周鹏鹏

2019年10月

**开普检测** 是国家认可的独立第三方检测实验室，开普检测一直以来始终坚持“速度、微笑、帮助客户成功”的服务理念，致力于研究电力系统保护与控制设备、智能微电网控制设备、电动汽车充换电设备的国际前沿检测技术与试验方法，为电力系统产品质量保证提供专业的检测服务。

#### ◆ 国家质检资质

国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心  
国家智能微电网控制设备与系统质量监督检验中心  
国家电动汽车充换电系统质量监督检验中心

#### ◆ 公共服务资源

中文核心期刊：《电力系统保护与控制》杂志  
全国量度继电器和保护设备标准化技术委员会 秘书处  
中国电器工业协会继电保护及自动化设备分会 秘书处  
中国电工技术学会电力系统控制与保护专业委员会 秘书处  
中国电工技术学会电动汽车充换电系统与试验专业委员会 秘书处

#### ◆ 关键人力资源

中原学者、国家科技进步一等奖获得者：姚致清  
国际IEC/TC95主席、IEC托马斯爱迪生奖获得者：李亚萍

# 报告内容

一、概述 Overview

二、直流线路的行波保护 TWP for HVDC line

三、CVT测量的行波定位 CVT based TWFL

四、CT测量的行波定位 CT based TWFL

五、配电网行波选线 TWLS of distribution

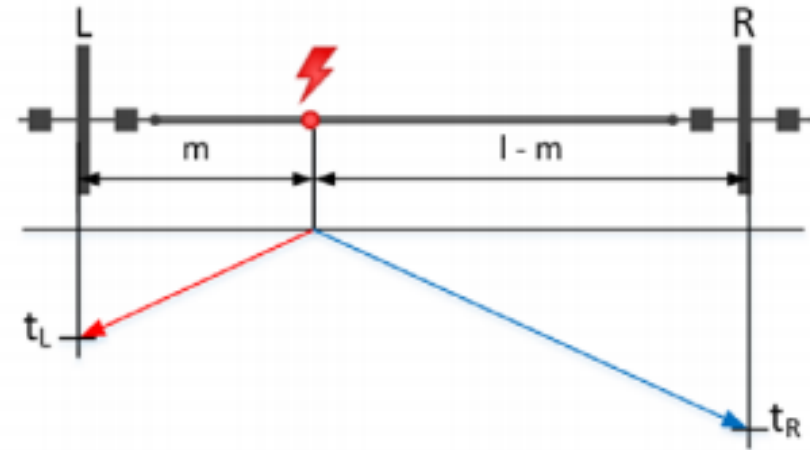
## 行波识别技术 Traveling wave technology

电力系统的故障识别可分为工频法、暂态法和行波法，行波法经过时间的沉淀，已经在多个工程领域获得了应用。直流线路的行波保护、CVT测量的行波定位、CT测量的行波定位、配电网行波选线是四个比较成熟的应用场景。

Fault identification of power system can be divided into power frequency method, transient method and traveling wave method. Traveling wave method has been applied in many engineering fields after years precipitation. Traveling wave protection for HVDC line, traveling wave fault location measured by CVT, traveling wave fault location measured by CT, and traveling wave line selection of distribution network are four mature application scenarios.

# 行波测距原理 TWFL technology

阻抗测距的精度受到多种因素的影响：例如电压和电流的测量误差、弧光电阻、负荷电流、线间互感、整定值误差等。行波定位只基于精确的波头时标，因此可以实现高精度定位，并基本不受串补电容影响。



**Two-end TWFL based on first arrival**

$$m = \frac{1}{2}(l + (t_L - t_R))v$$

Fault location based on impedance has a limited accuracy due to measurement errors of voltage and current, arc resistance, superimposed load flow, mutual coupling with parallel line, incorrect settings, etc. TWFL solely depends on the precise arrival time stamps, so high precision for fault location is possible.

在实际应用中，一般应利用电流行波故障测距，同时以双端行波测距法为主，辅助以单端行波测距法或其他方法。



## 行波数据采集单元 TW recording unit


行波数据采集单元采集交直流输电线路故障前后包含工频的暂态信号数据，并上传到行波测距分析主站。采样频率最大为36MHz。最大配置时（24通道），最高数据采集频率1.5MHz，行波测距分辨率100m。

The traveling wave recording unit collects the TW signal including power frequency before and after the fault of the ac/dc transmission line and upload it to the traveling wave location analysis master station. The maximum sampling frequency is 36MHz. At the maximum configuration (24 channels), the highest acquisition frequency is 1.5mhz, and the traveling wave location resolution is 100m.



# 四种应用对比 Comparison of four applications

**easy**



	电压等级 kV Voltage Level	线路长度 km Line Length	行波时间 us Travel Time
直流线路的行波保护 TWP for HVDC line	500, 660, 800, 1100	1500	5000
CVT测量的行波定位 CVT based TWFL	220, 330, 500, 1000	400	1333
CT测量的行波定位 CT based TWFL	110, 220.....	150	500
配电网行波选线 TWLS of distribution	10, 35	10	33

**hard**

## 测试方法对比 Comparison of test methods

	测试方法 Test Method	特点 Feature
静态注入 Inject Pulse	在电压或电流中注入定时脉冲 Inject timed traveling wave pulses for current or voltage	用于校准 calibration
回放波形 Playback	用EMTP软件产生行波文件 Using EMTP software to produce high frequency wave	只能产生有限长度的数据 only for a short time wave data
实时仿真 RT Simulation	用小步长或FPGA实时仿真 Using small step or FPGA to simulate in real time	最方便的闭环测试方法 most convenient closed-loop testing



# 报告内容

一、概述 Overview

二、直流线路的行波保护 TWP for HVDC line

三、CVT测量的行波定位 CVT based TWFL

四、CT测量的行波定位 CT based TWFL

五、配电网行波选线 TWLS of distribution

# 直流线路模型 HVDC line model

行波保护必须具有选择性:

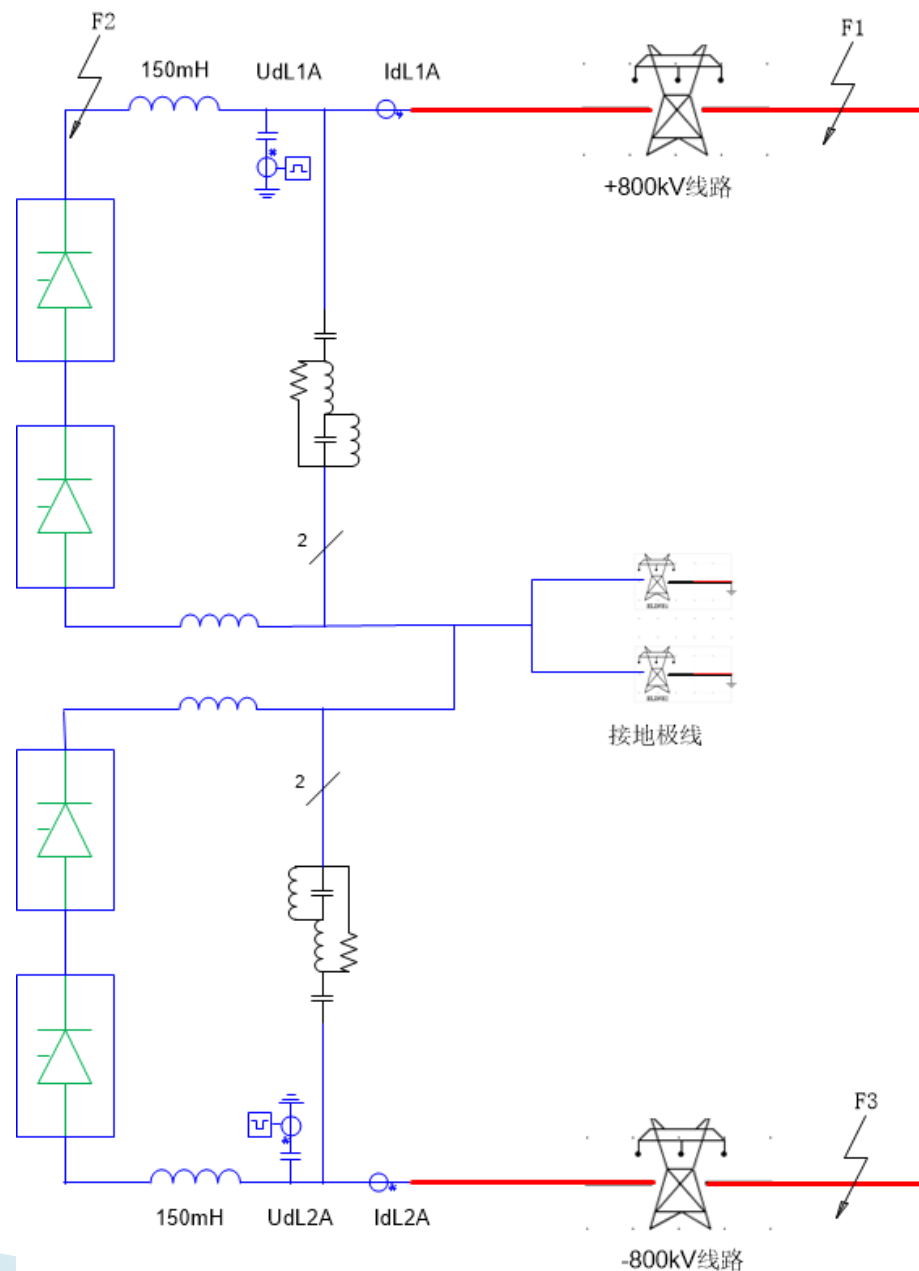
能够区分区内和区外故障 (F1和F2)

能够区分本线和临线故障 (F1和F3)

Traveling wave protection must be selective:

Ability to distinguish between in-area and out-of-area faults (F1 and F2)

Able to distinguish between local line and adjacent line faults (F1 and F3)



# 行波保护原理 TWP Principle

采样率: 10kHz

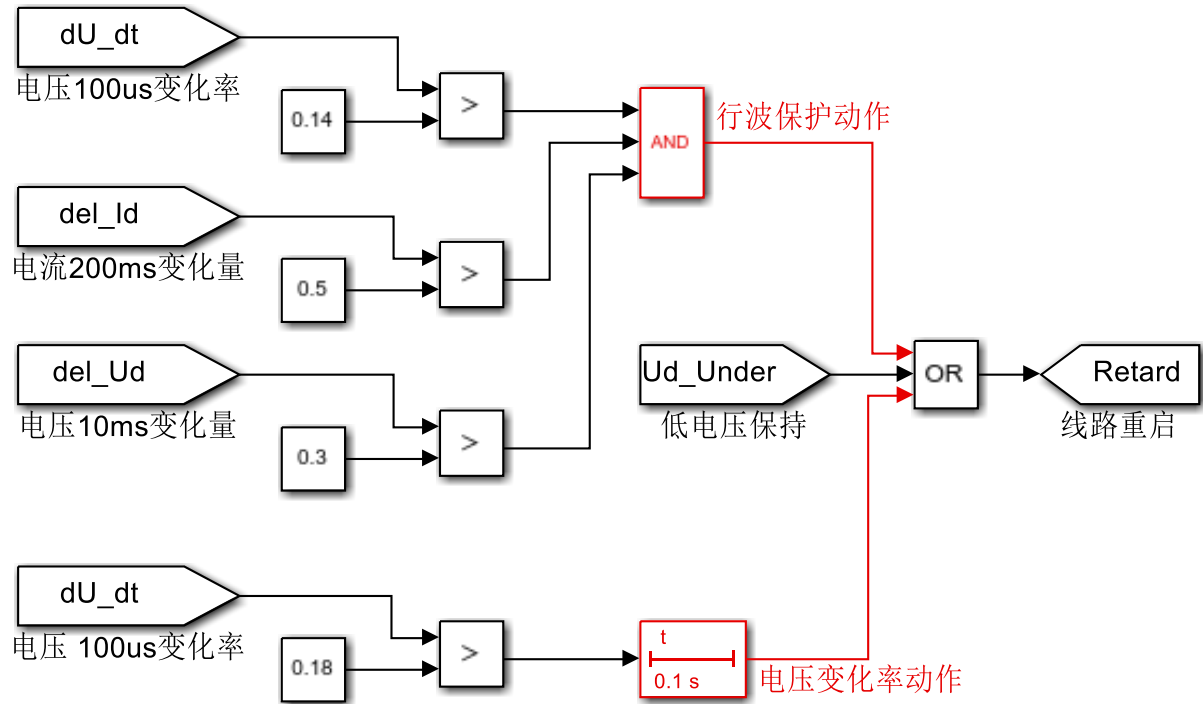
动作时间: 约5ms

动作处理: 线路重启

Sample rate: 10kHz

Trip time: about 5ms

Action : line restart

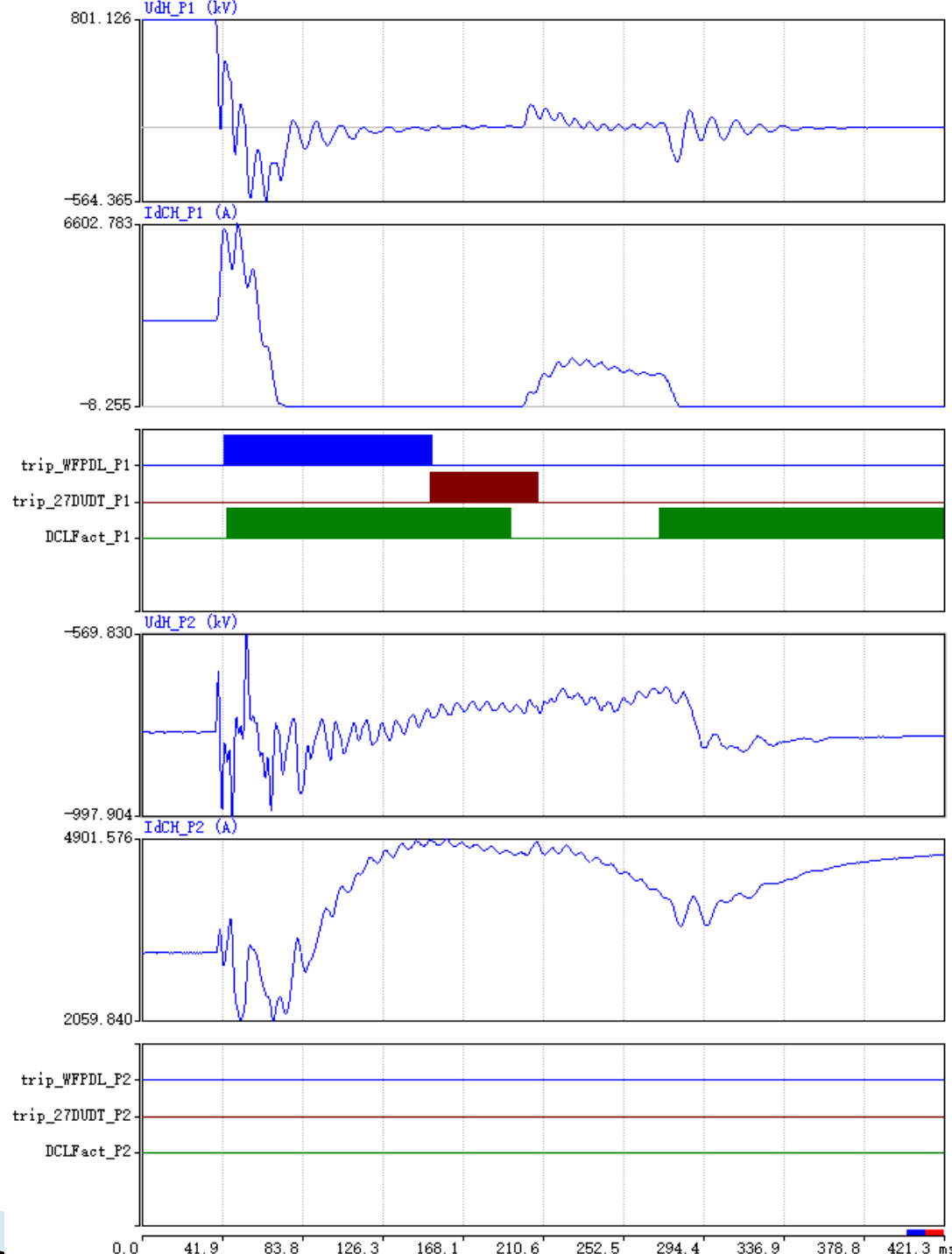


# 直流线路接地 DC line fault

整流侧动作情况	WFPDL 5ms 27dU/dt 113ms
逆变侧动作情况	WFPDL 4ms 27dU/dt 113ms

应用难点：保护定值由仿真试验确定，而非精确理论计算。

The protection setting is obtained by simulation test, rather than exact theoretical calculation.



# 报告内容

一、概述 Overview

二、直流线路的行波保护 TWP for HVDC line

三、CVT测量的行波定位 CVT based TWFL

四、CT测量的行波定位 CT based TWFL

五、配电网行波选线 TWLS of distribution

# CVT测量行波原理 CVT measurement model

大步长非实时 → 离线分析

MainStep non Realtime

小步长 2us: 电阻开关

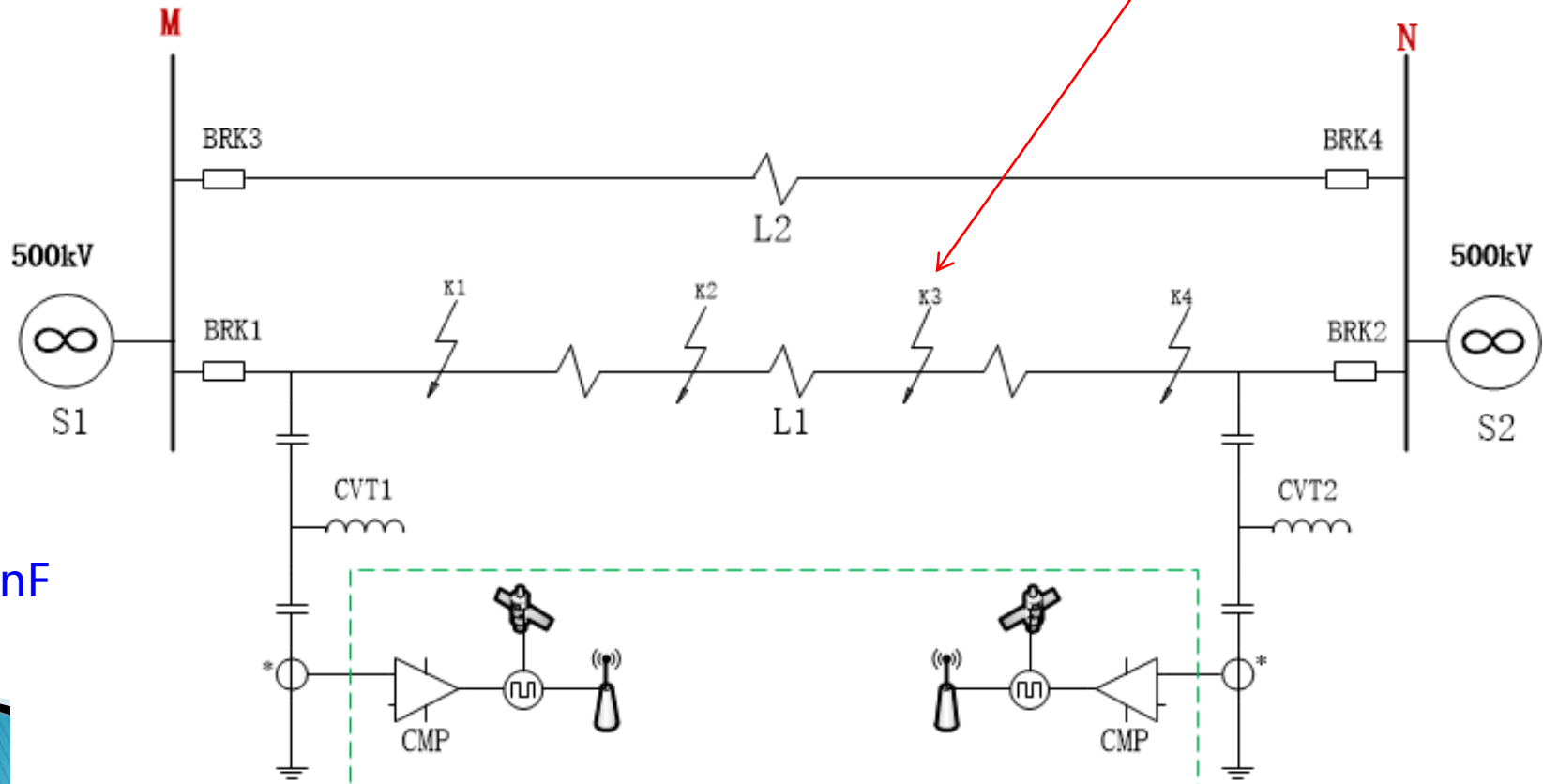
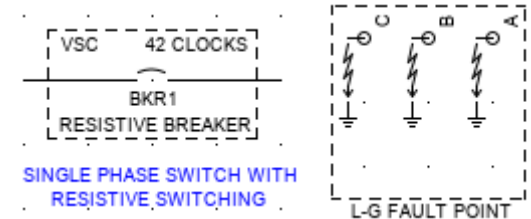
SmallStep 2us: Resistive BRK

SubStep 2us: 线路模型

SubStep 2us: **Fre-Phase**

FGPA TWRT

FGPA TWRT → GTAO



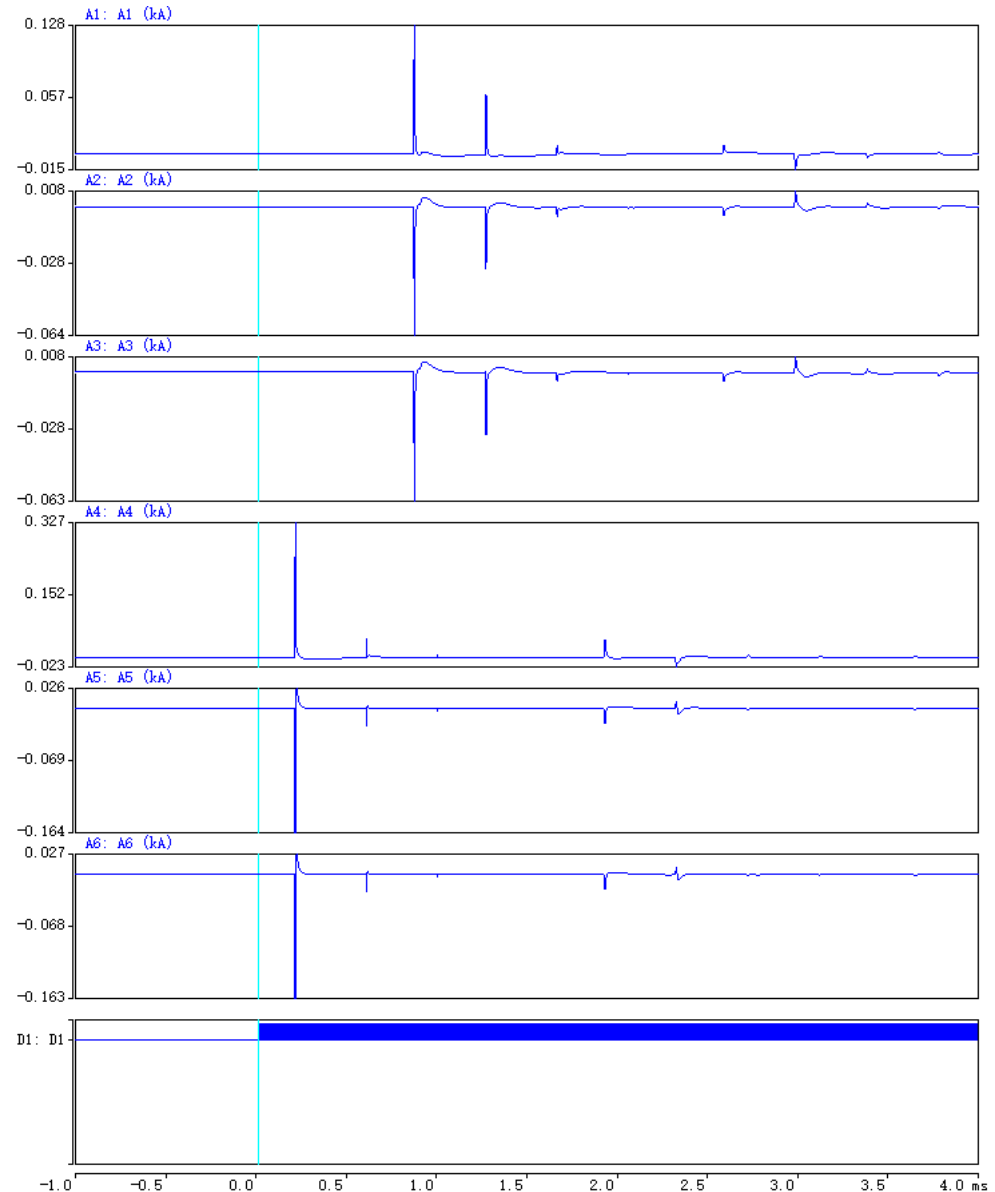
5nF 120nF

# CVT测量行波定位 CVT measurement TWFL

应用难点:

- 1.需要增加测量CT及同轴电缆
- 2.比较电压根据经验值设定

1. Additional measurement CT and coaxial cable is required
- 2.The comparison voltage is set according to the empirical value



# CVT测量行波定位装置 CVT based TWFL

采样率：无需采样

线路数：10条

分辨率：150m

Sample rate: no need

Line count: 10

Location error: 150m





# 报告内容

一、概述 Overview

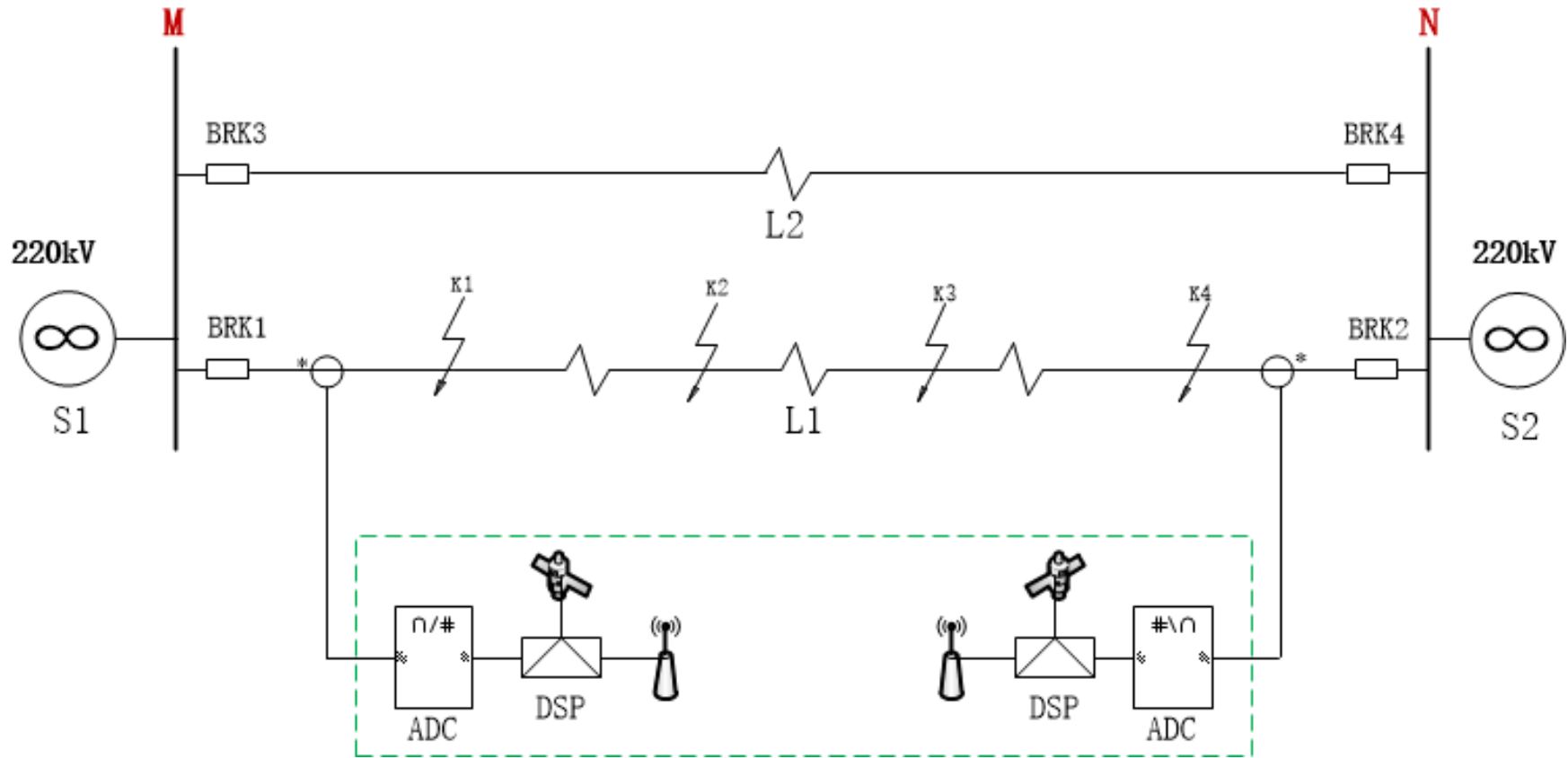
二、直流线路的行波保护 TWP for HVDC line

三、CVT测量的行波定位 CVT based TWFL

四、CT测量的行波定位 CT based TWFL

五、配电网行波选线 TWLS of distribution

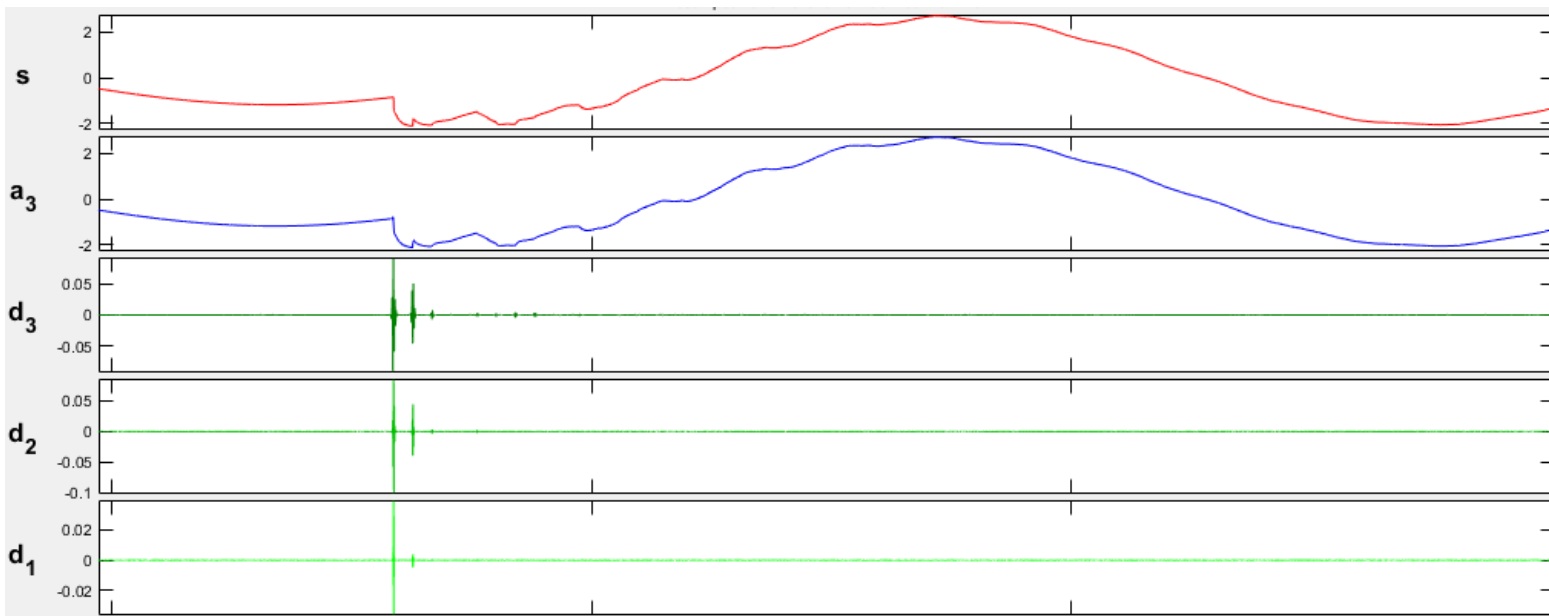
# CT测量行波定位模型 CT measurement model



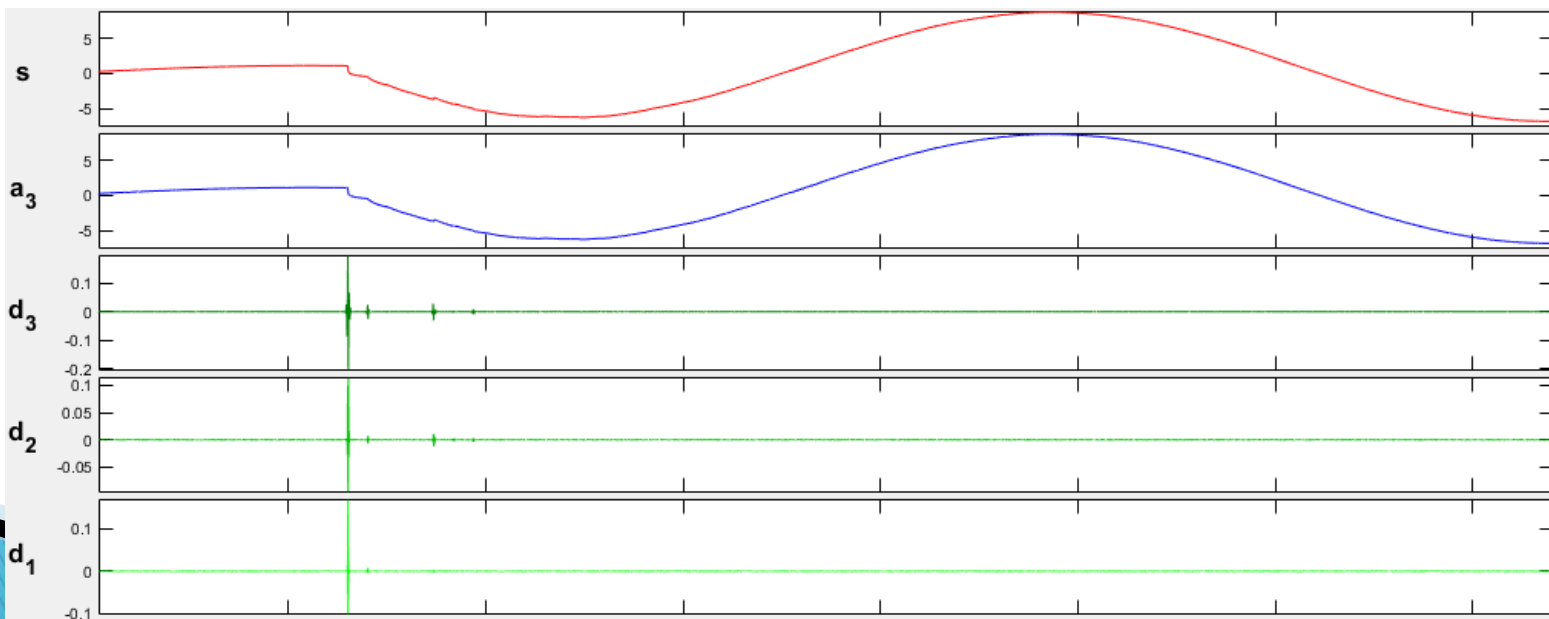
应用难点：模极大值算法  
modules maxima algorithm

# 小波变换算法 Wavelet transform algorithm

db5 level3  
M phase A



db5 level3  
N phase A



衰减畸变  
dispersion effect

# CT测量行波定位装置 CT based TWFL

采样率：1MHz

线路数：4条

分辨率：150m

Sample rate: 1Mhz

Line count: 4

Location error: 150m



# 报告内容

一、概述 Overview

二、直流线路的行波保护 TWP for HVDC line

三、CVT测量的行波定位 CVT based TWFL

四、CT测量的行波定位 CT based TWFL

五、配电网行波选线 TWLS of distribution

比较各条线路的暂态零模行波，有三种基本选线方法：

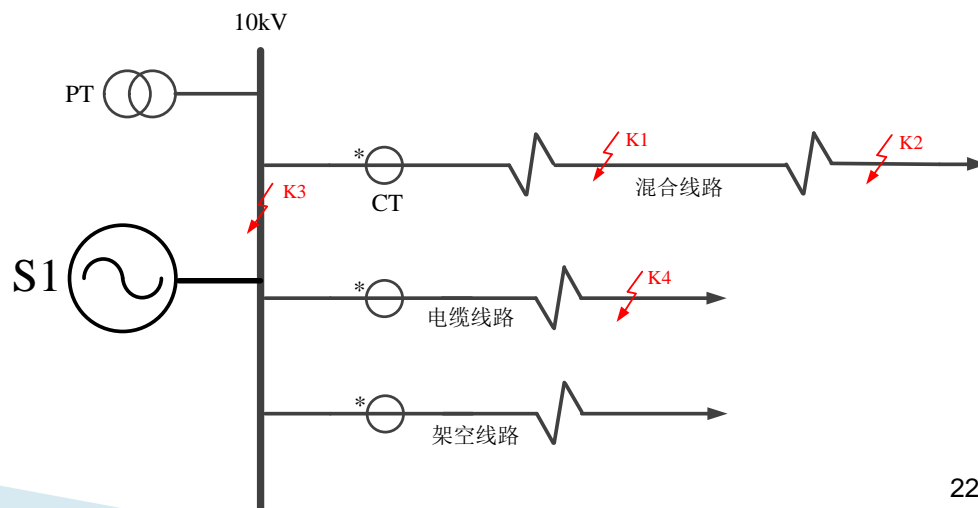
- 1) 行波电流幅值比较：幅值最大者被选定为故障线路；
- 2) 行波电流极性比较：与其它线路极性相反的选定为故障线路；
- 3) 行波电流方向法：与电压导数极性相反的选定为故障线路。

By comparing the transient zero-mode traveling wave of each line, there are three basic selection methods:

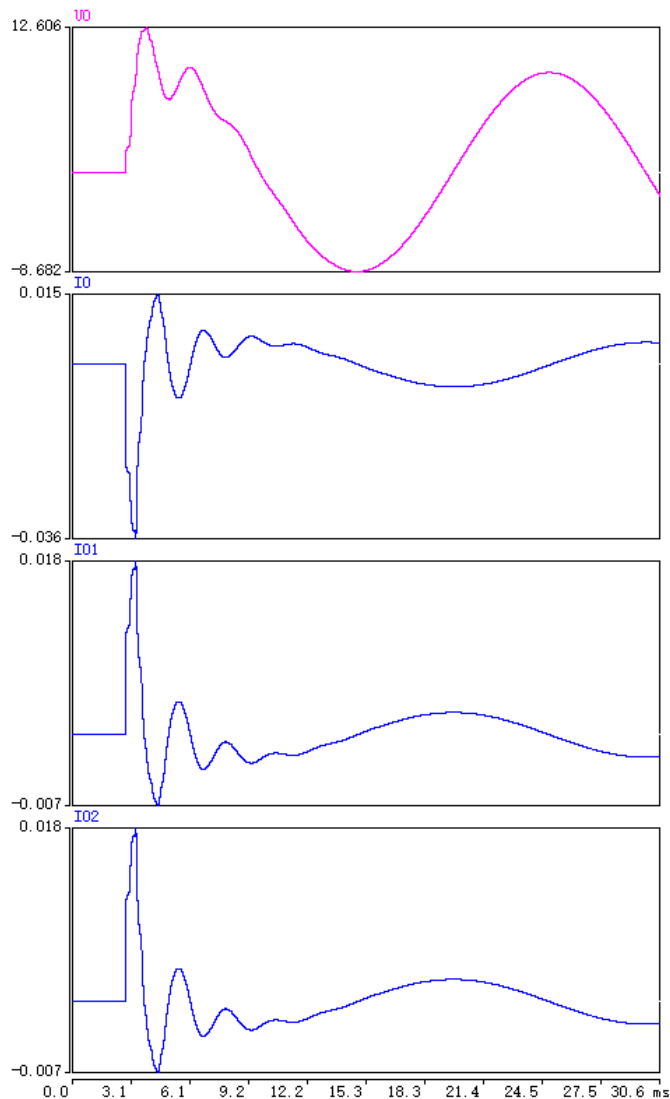
- 1) comparison of amplitude of traveling wave current: the line with the largest amplitude is selected;
- 2) comparison of travelling wave current polarity: the line with the opposite polarity of other lines is selected;
- 3) traveling wave current direction method: the line with opposite polarity is selected.

小电流选线一直是未能很好解决的难题：

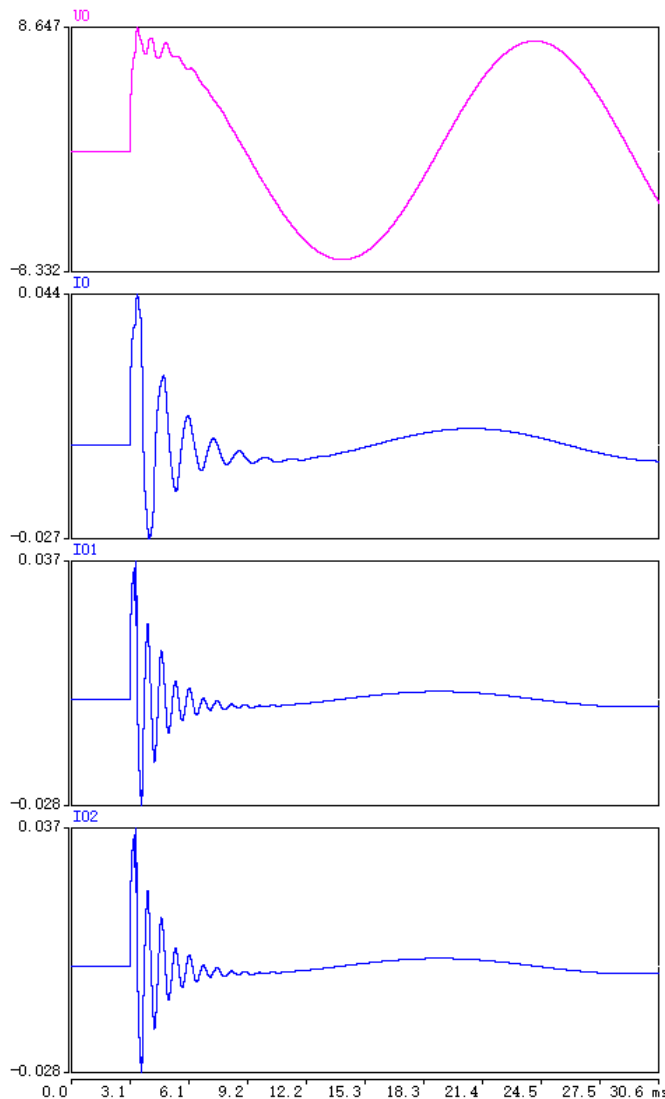
1. 稳态法：零序电流比相、零序有功分量
2. 注入法：高频电流、改变消弧线圈
3. 首半波：初始极性、频谱分析



## 混合线路接地



## 母线接地



9个因素 (可组合)

- 1.故障初始角
- 2.故障持续时间
- 3.故障类型
- 4.故障过渡电阻
- 5.谐波含量
- 6.故障位置
- 7.故障相
- 8.线路参数不平衡
- 9.互感器误差

9 factors (may combined)

1. Initial fault Angle
2. Failure duration
3. Fault type
4. Fault arc resistance
5. Harmonic content
6. Fault location
7. The fault phase
8. Unbalanced line
9. Transformer error

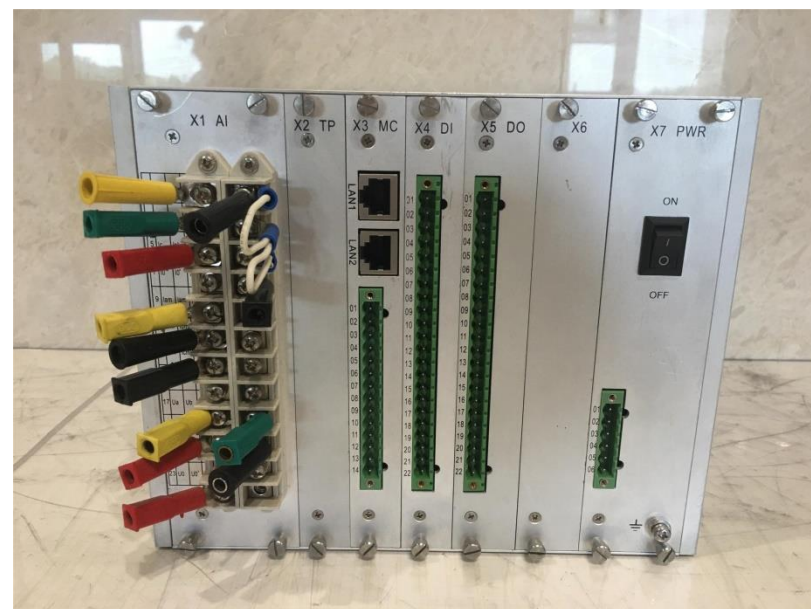
选线正确率90%

# 配电网行波保护装置 TWLS device

采样率: 2MHz

线路数: 1条

判断方向: 可选跳闸



Sample rate: 2Mhz

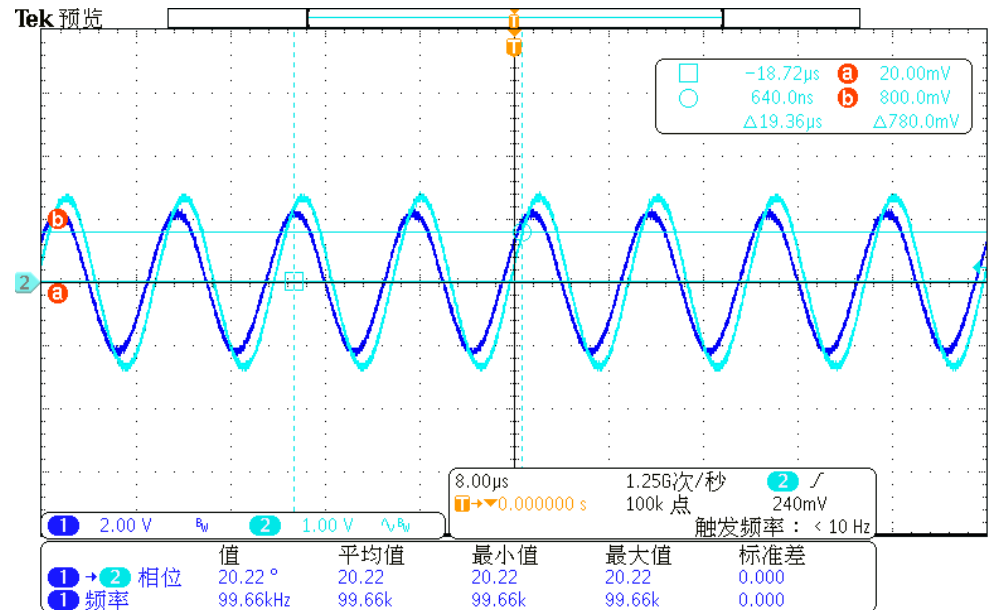
Line count: 1

Direction judgment: optional trip



# 高频功放 High frequency amplifier

带宽 > 100kHz 50/40Arms



## 总结 Conclusion

特点	应用
行波信号的强弱和初相角及弧光电阻相关 The amplitude of travelling-wave signal is related to the fault angle and arc resistance	可集成到传统工频保护作为补充 Can be integrated into the phasor based protection as a supplement
行波信号采样率很高，并且需要高精度定时 Traveling wave signal requires high sampling rate and high precision timing	高速高分辨的模数芯片，北斗/GPS High speed high resolution ADC chip, BD-2/GPS
行波提取算法复杂，计算量大 The traveling wave extraction algorithm is complex, needs lots of calculation	研究自适应的小波变换 The adaptive wavelet transform is required

**谢谢各位专家！**