

同步相量测量技术在配网态势感知的应用

袁智勇

南方电网科学研究院有限责任公司

2020年12月27日



知识产权声明

本文件的知识产权属南方电网公司所有。对本文件的使用及处置应严格遵循南方电网公司有关规定或获取本文件的合同及约定的条件和要求。未经南方电网公司事先书面同意，不得对外披露、复制。

Intellectual Property Rights Statement

This document is the property of and contains proprietary information owned by CSG and/or its related proprietor. You agree to treat this document in strict accordance with the terms and conditions of the agreement under which it was provided to you. No disclosure or copy of this document is permitted without the prior written permission of CSG.



同步相量测量算法提升技术



同步相量测量装置及性能测试



同步相量测量技术示范应用



技术应用展望

■ PMU技术的主要应用

监测-辨识-分析

- ✓ 动态监测、三大数据源、状态估计
- ✓ 发电机、变压器、线路和负荷参数在线辨识
- ✓ 在线低频振荡监视与分析、在线扰动识别
- ✓ 电压稳定在线监视、暂态稳定在线监视、故障定位

保护控制

- ✓ 广域保护、广域阻尼控制
- ✓ 低频减载、源网荷协调控制

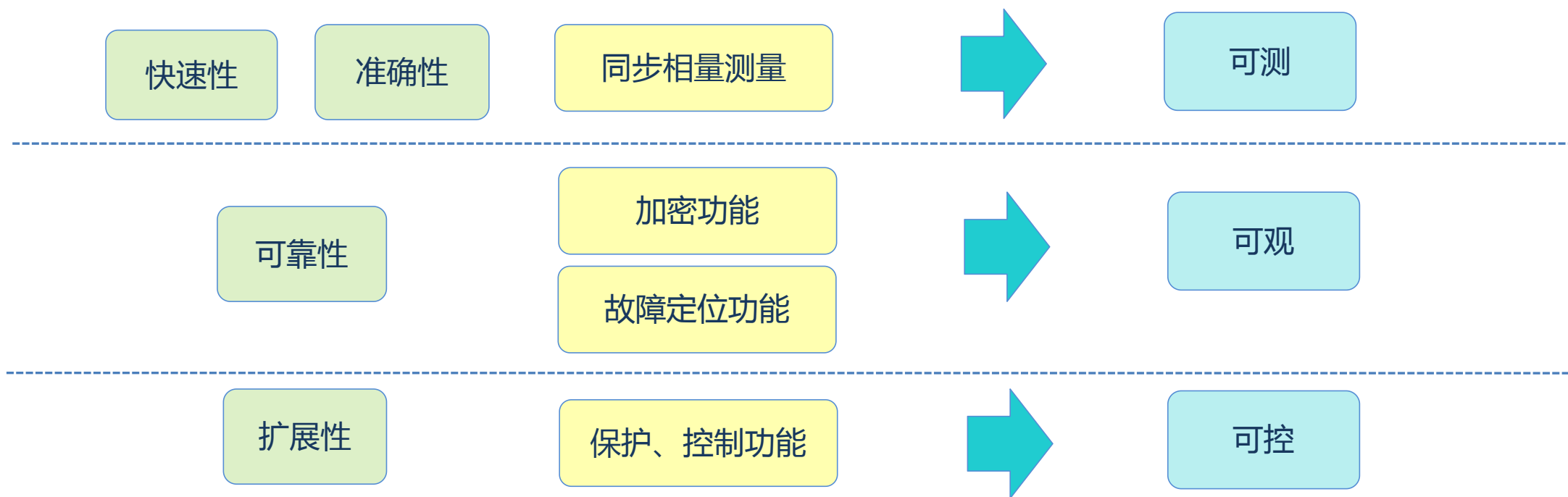
配电网

- ✓ 配电网的状态估计、故障定位和测距
- ✓ 孤岛及系统振荡检测、实时控制

(一) 同步相量测量技术概况

■ PMU技术在配电网应用的要求

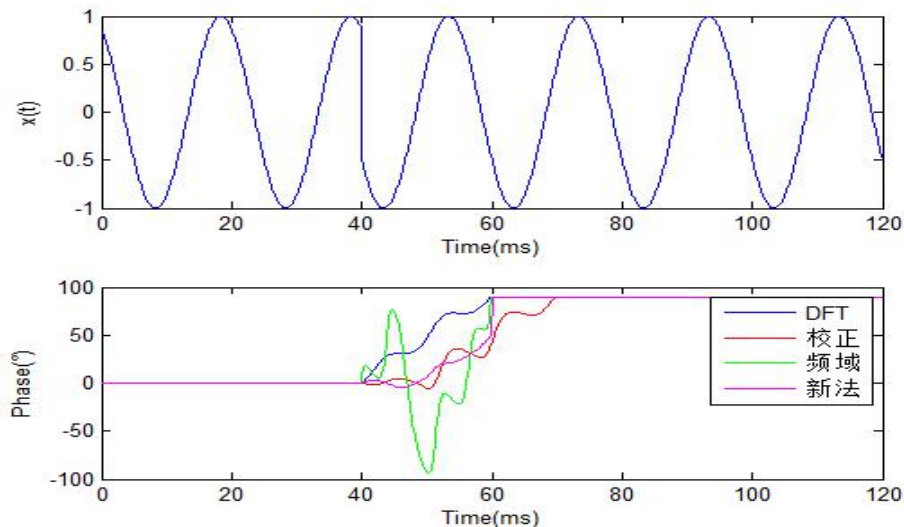
- ✓ **准确性方面**，可以抑制间谐波、衰减分量等干扰，准确获取同步相量、频率和频率变化率；
- ✓ **快速性方面**，阶跃响应速度快，同时具有快速跟踪电压电流幅值变化；
- ✓ **可靠性方面**，配网环境恶劣，提出更高要求，算法不误切也不拒切，通信安全可靠；
- ✓ **扩展性方面**，兼容微机保护、电能质量监测、DTU、FTU和TTU等传统装置的扩展要求。



■ 目前PMU算法的特点

准确类算法：

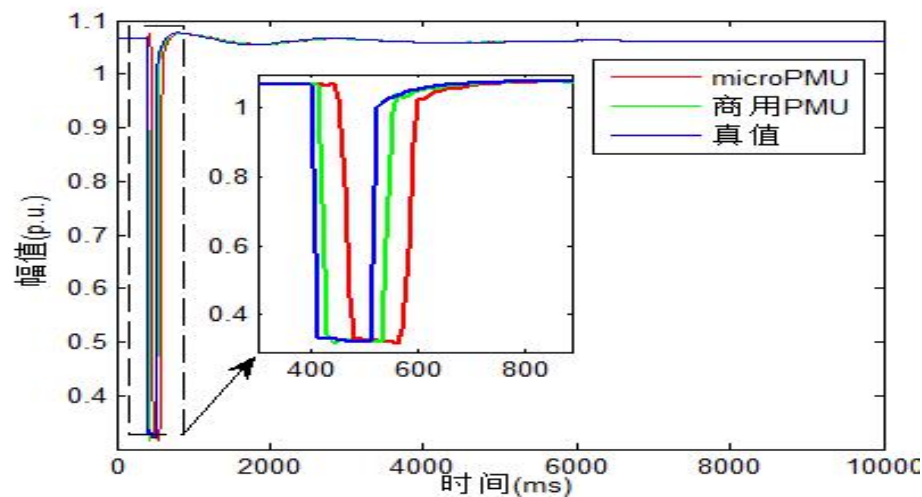
- 基于DFT修正算法—幅值波动时难以满足精度要求
- 自适应EKF—难以同时满足快速性要求
- 基于多级滤波器算法—难以同时满足快速性要求
- M级FIR滤波器—难以同时满足快速响应性能要求



- ✓ 传统准确类算法阶跃响应时间较长
- ✓ 快速类算法波动较大，误差较大

快速类算法：

- 离散傅里叶变换法—频率偏差时难以满足精度要求
- 频域动态模型的算法—对噪声谐波抑制能力弱
- 小波变换法—难以满足高噪声谐波间谐波下相角精度
- P级FIR滤波器—难以同时满足谐波噪声下精度要求



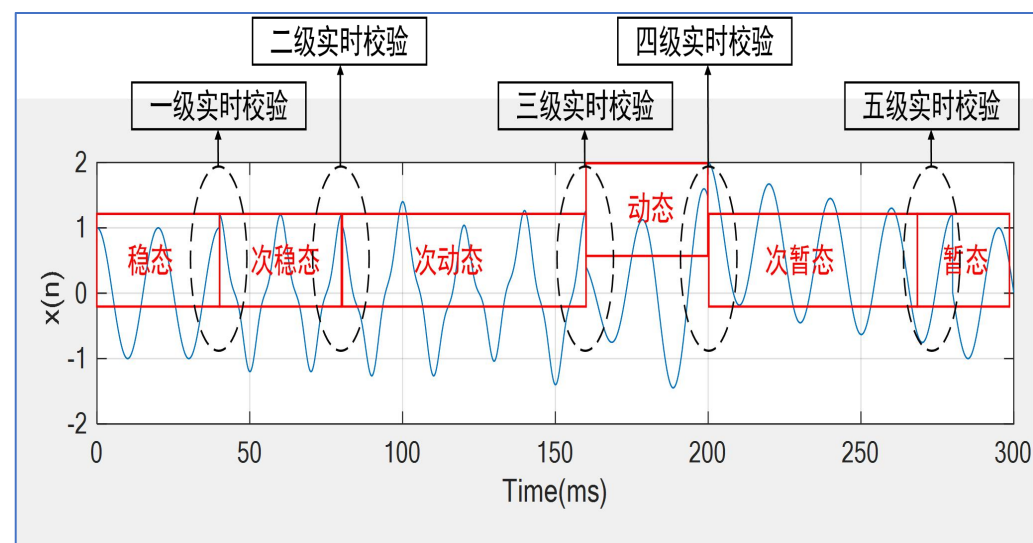
- ✓ 国外高精度商用PMU在阶跃过程中有超调，且动态响应时间较长

(二) 配电网同步相量测量算法提升技术

■ 考虑配电网信号状态的算法提升技术路线

- **谐波、间谐波、衰减直流分量信号建模**：解决谐波、间谐波、衰减直流分量对相量准确计算产生的干扰
- **改进小波变换等多种算法自适应切换**：实现快速阶跃响应

电力信号状态	稳态	次稳态	次动态	动态	次暂态	暂态
校验算法	默认	一级实时校验	二级实时校验	三级实时校验	四级实时校验	五级实时校验
传感器	计量用传感器	计量用传感器	测量用传感器	测量用传感器	保护用传感器	保护用传感器
采样率	低	底	中	中	高	高
窗函数	矩形窗	矩形窗	Hanning窗	Hanning窗	Rife_vincent窗	Rife_vincent窗
窗长度	4	4	2	2	1	1/2
相量算法	稳态算法	考虑谐波稳态算法	考虑间谐波动态算法	考虑幅频调制动态算法	考虑衰减直流分量暂态算法	考虑阶跃响应的暂态算法

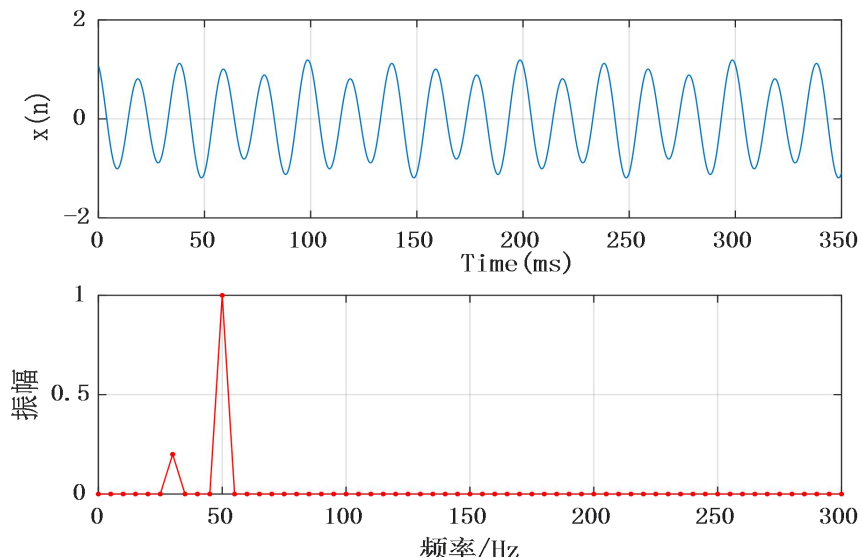


■ (1) 间谐波识别与信号建模——方法

基于FFT频谱扫描的间谐波识别

$$x(t) = a \cos(2\pi f_0 t + \pi/6) + 0.2a \cos(2\pi f_1 t)$$

间谐波频率，取30Hz

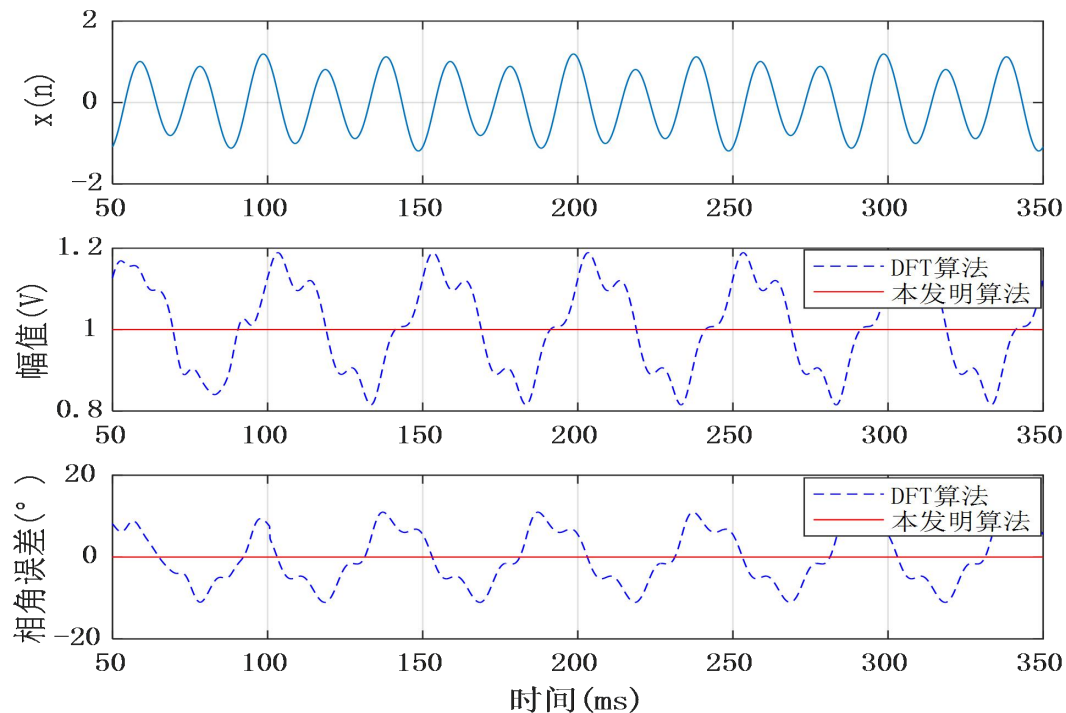
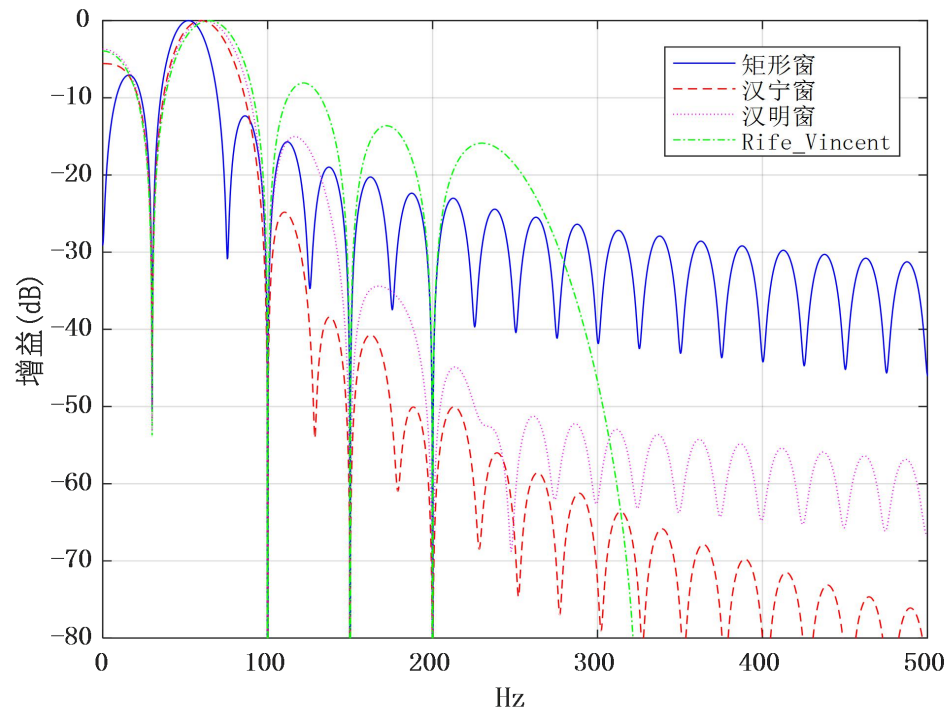


在模型中增加谐波间谐波

$$\mathbf{X}_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (R_0 \cos(\frac{2\pi n \alpha_0}{N}) - I_0 \sin(\frac{2\pi n \alpha_0}{N}) + Q(n)) \cdot h(n) e^{-jg_k \frac{2\pi}{N} n}$$
$$Q(t) = \sum_{i=1}^H \lambda_i \cos(2\pi \alpha_i f_0 t + \phi_i)$$

解决配网谐波间谐波丰富的问题

■ (1) 间谐波识别与信号建模——滤波效果及仿真结果

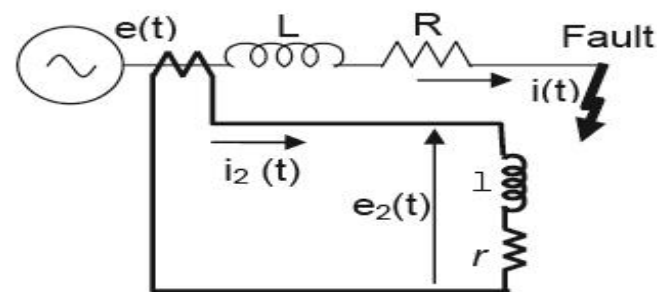


含30Hz陷波功能的各窗函数幅频响应曲线

$$x(t) = a \cos(2\pi f_0 t + \pi/6) + 0.2a \cos(2\pi f_1 t)$$

■ (2) 衰减直流分量识别算法

- 方法一：通过电力系统参数计算辨识、已有经验值，推导出系统的衰减直流分量的时间常数 T_c



- 方法二：相邻三数据窗算法计算衰减直流分量的时间常数 T_c

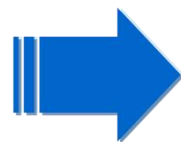
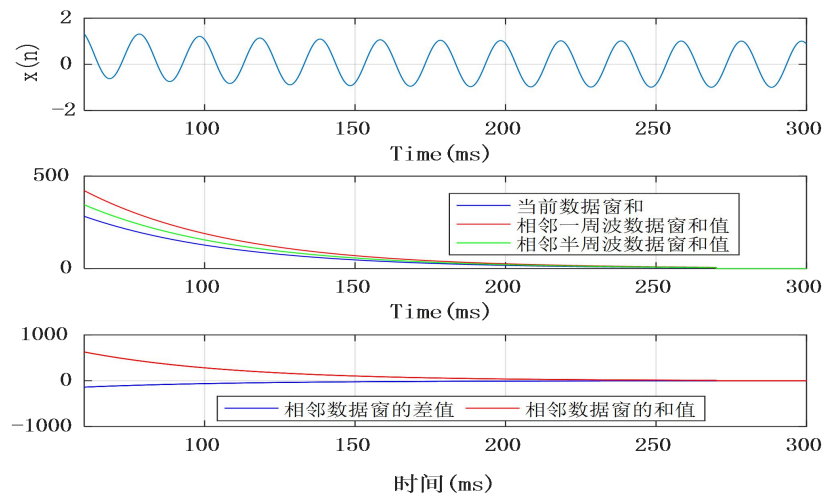
✓ 数据窗和值是否大于相邻 $2 \cdot k \cdot \pi$ 的数据窗的和值

$$S_{\Sigma} - S'_{\Sigma} = C' \left(1 - e^{-l/(Nf_0 T_c)} \right) \frac{1 - e^{-NT_s/T_c}}{1 - e^{-T_s/T_c}} > 0 \quad S_{\Sigma} > S'_{\Sigma}$$

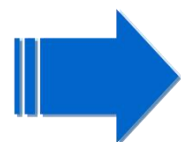
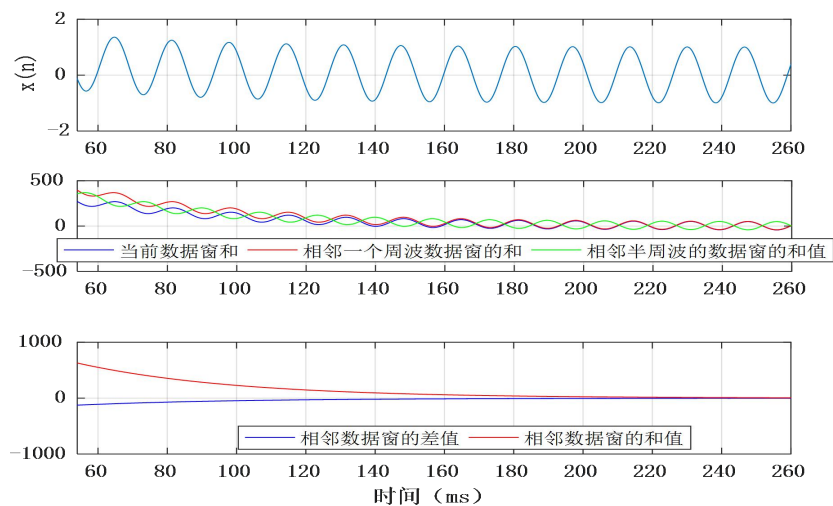
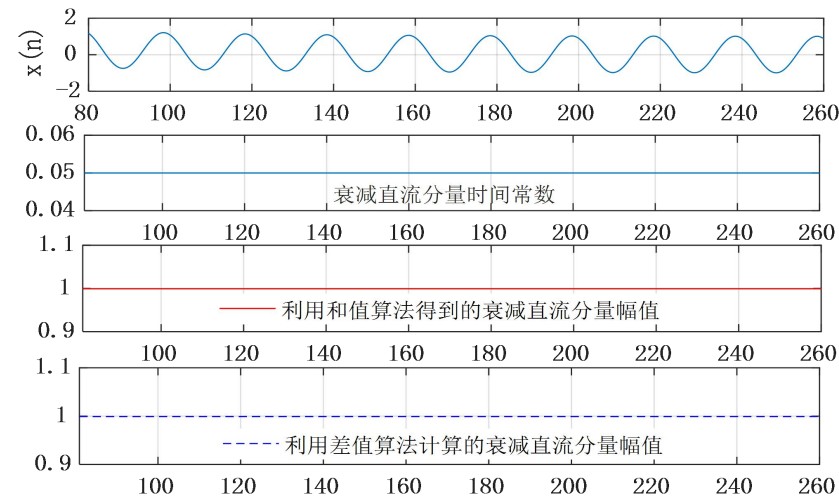
✓ 和值与差值计算的衰减直流分量相等

$$C' = \frac{(1 - e^{-T_s/T_c}) \cdot (S_{\Sigma} - S'_{\Sigma})}{(1 - e^{-l/(Nf_0 T_c)}) (1 - e^{-NT_s/T_c})} = C'' = \frac{(1 - e^{-T_s/T_c}) \cdot (S_{\Sigma} + S''_{\Sigma})}{(1 + e^{-l/(Nf_0 T_c)}) (1 - e^{-NT_s/T_c})}$$

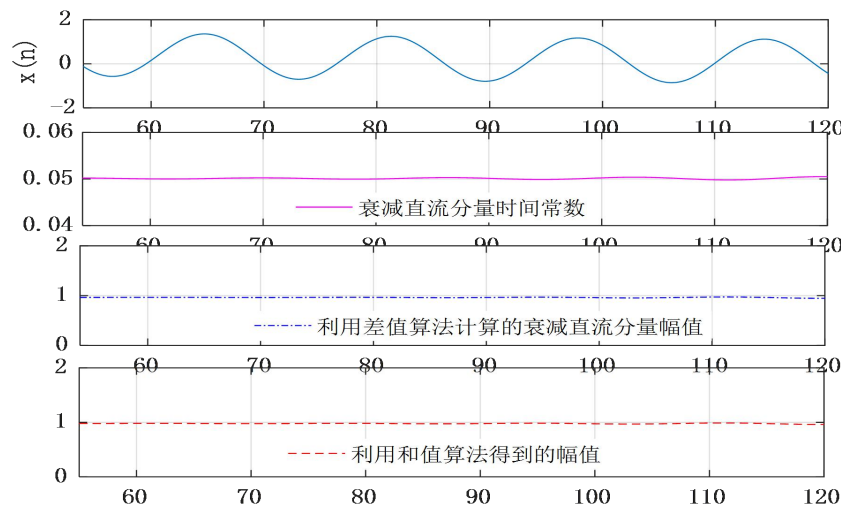
■ (2) 衰减直流分量识别算法——衰减直流分量时间常数获取



额定频率



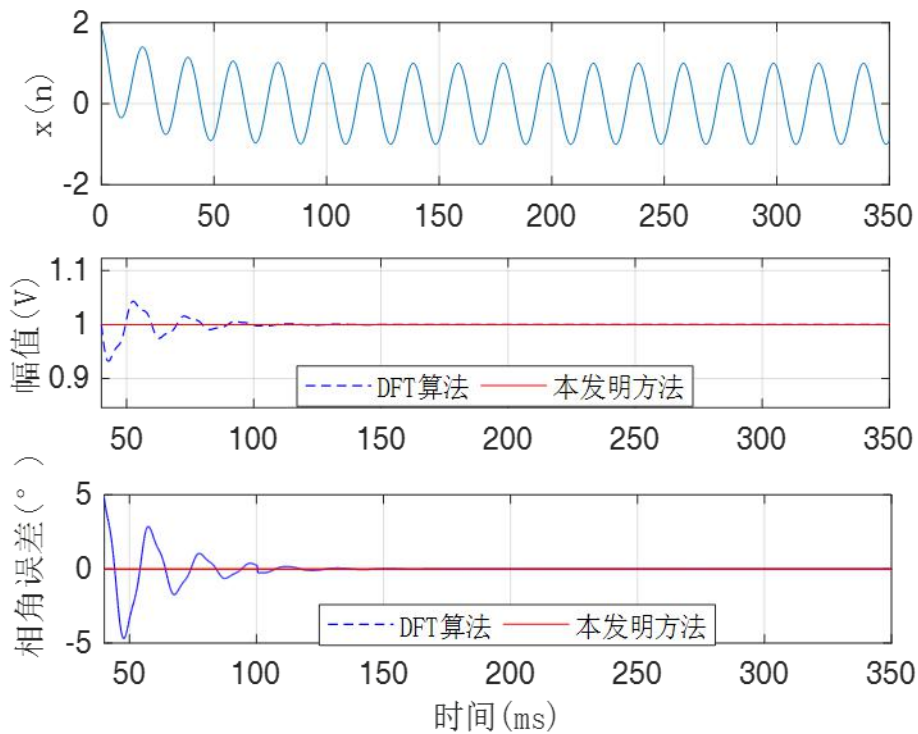
5Hz频率偏差



三特定数据窗的和值及相互和值和差值

通过和值与差值得到的衰减分量幅值

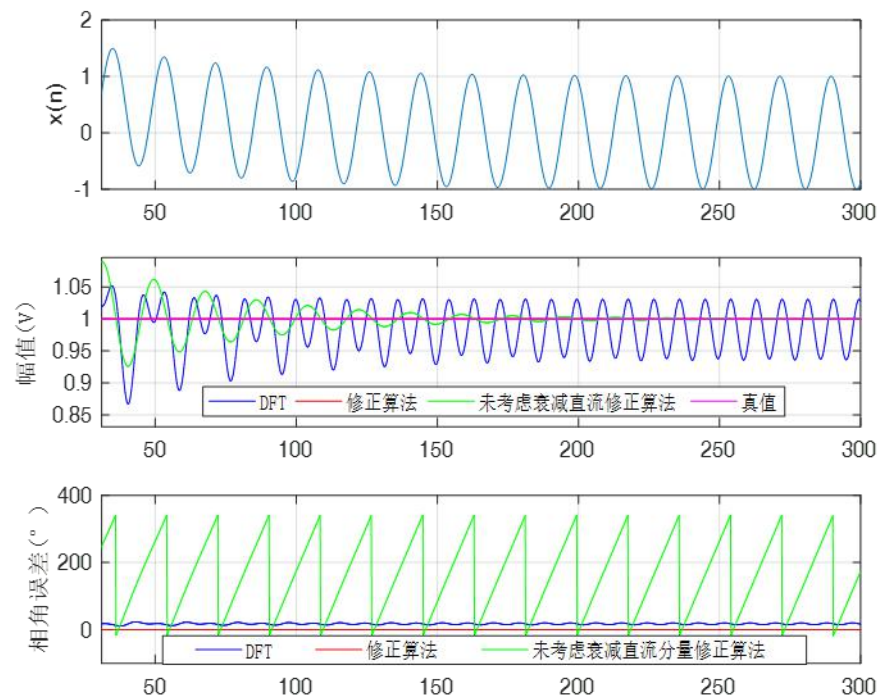
■ (2) 衰减直流分量识别算法——仿真分析结果



$$x(t) = a \cos(2\pi f_0 t + \pi/6) + a e^{-tT_s/T_c}$$

额定频率

衰减时间常数为20ms的衰减直流分量



$$x(t) = a \cos[2\pi(f_0 + 5)t + \pi/6] + a e^{-tT_s/T_c}$$

5Hz频率偏差

■ (3) 间谐波、衰减直流分量等抑制方法

$$x(t) = P(t)e^{j2\pi f_0 t} + P^*(t)e^{-j2\pi f_0 t} + Q(t) + R(t)$$

$$Q(t) = \sum_{i=1}^H \lambda_i \cos(2\pi\alpha_i f_0 t + \phi_i) \quad R(t) = C'e^{-t/T_c}$$

信号模型中增加谐波、间谐波、衰减直流



解决谐波、间谐波、衰减直流分量问题

$$\mathbf{X} = a_c e^{j\theta_c} = a e^{j\theta_0} \cdot e^{j \frac{\theta_1(N-1)}{2Nf_0}} \cdot A \cdot (1 + e^{-jC} \cdot B)$$

$$f_c = f_0 + \theta_1 / (2\pi)$$

$$\alpha_0 = f_c / f_0$$

中心频率自适应调整



解决频率偏差下精度问题

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_h(0) \\ x_h(1) \\ \vdots \\ x_h(N-1) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_k = [\mathbf{M}_{k0} \quad \mathbf{N}_{k1} \quad \mathbf{N}_{k2} \quad \cdots \quad \mathbf{N}_{kK}]$$

$$x_h(n) = h(n) \cdot x(n) \quad \mathbf{N}_{k\bar{i}} = \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cos \frac{2\pi\alpha_i n}{N} \cos \frac{2\pi n g_k}{N} & -\sum_{n=0}^{N-1} h(n) \sin \frac{2\pi\alpha_i n}{N} \cos \frac{2\pi n g_k}{N} \\ -\sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cos \frac{2\pi\alpha_i n}{N} \sin \frac{2\pi n g_k}{N} & \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \sin \frac{2\pi\alpha_i n}{N} \sin \frac{2\pi n g_k}{N} \end{bmatrix}$$

增加合适窗函数和窗长度FIR滤波器



抑制配网噪声丰富问题

■ (3) 间谐波、衰减直流分量等抑制方法——仿真分析结果

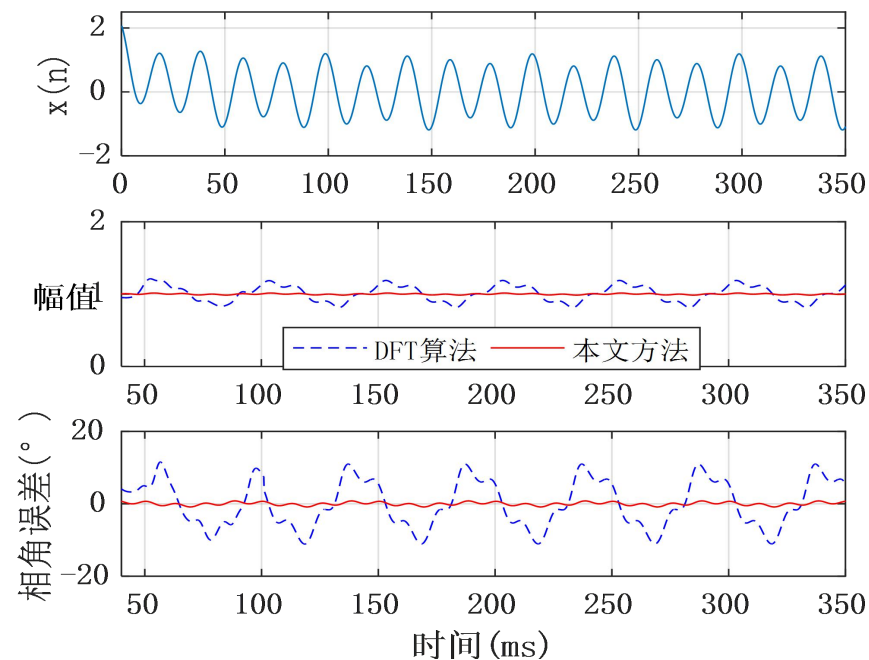
$$x(t) = a \cos(2\pi f_0 t + \pi/6) + a e^{-tT_s/T_c} + 0.2a \cos(2\pi f_1 t)$$

衰减时间常数为20ms

初始幅值为1

间谐波幅值为0.2

间谐波频率为30Hz



含有间谐波和衰减直流分量的测试分析

(二) 配电网同步相量测量算法提升技术

■ (4) 阶跃响应改进算法——应用要求

- ✓ 当前国家电网和南方电网标准对PMU的幅值相角的阶跃响应时间要求为70ms
- ✓ 继电保护国家行业标准对速断的要求是40ms，差动保护为35ms
- ✓ 限制了PMU与含保护功能类装置的融合

Q/CSG1203052-2018 南方电网相量测量装置 (PMU) 技术规范[S]. 广州: 南方电网公司, 2018



6.8.9 阶跃响应

交流信号发生 10%幅值阶跃, 相量幅值跃变时刻(达到阶跃量的 90%)的延迟不超过

70ms。交流信号发生 10°相角阶跃, 相量相角跃变时刻(达到阶跃量的 90%)的延迟不超过 70ms。

Q/GDW 11202.6-2014 智能变电站自动化设备检测规范 第6部分: 同步相量测量装置[S]. 北京: 国家电网公司, 2015.



表 6 相角阶跃响应时间要求

阶跃类型	传输速率 次/秒	响应时间 ms			
		幅值	相角	频率	频率变化率
相角阶跃	25	280	280	560	560
相角阶跃	50	140	140	280	280
相角阶跃	100	70	70	280	280

DL/T 1075-2016 保护测控装置技术条件 [S]. 北京: 中国电力企业联合会标准化管理中心, 2016



5.4.1.4 时间整定误差

时间整定误差要求如下:

- 固有动作时间应不大于 40ms。对过量动作功能施加 1.5 倍动作整定值, 欠量动作功能施加 0.7 倍动作整定值进行测试。
- 对差动保护功能施加 2.0 倍动作值进行测试, 固有动作时间应不大于 35ms。

■ (4) 阶跃响应改进算法——实现

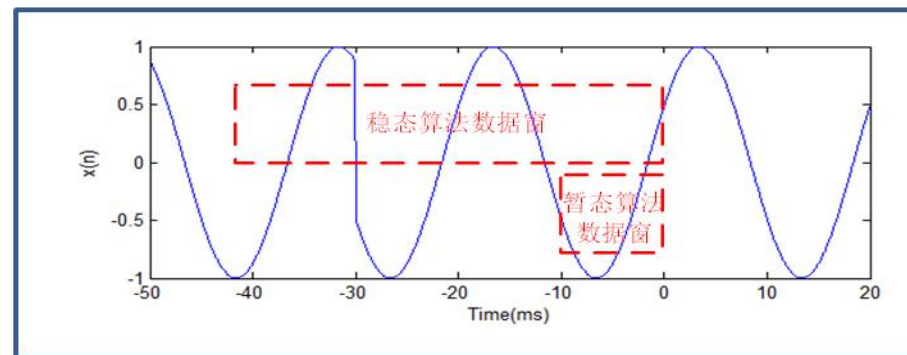
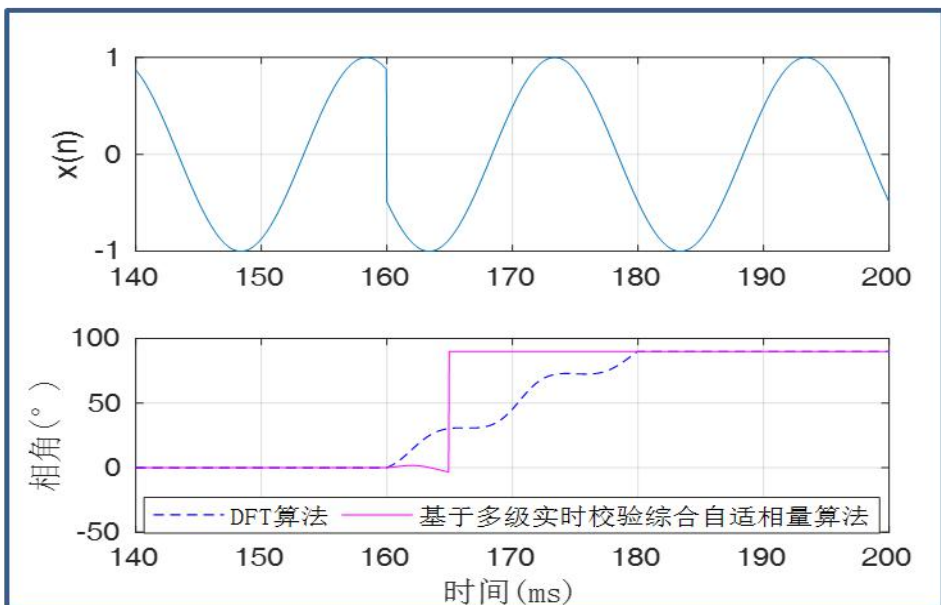
$$x(t) = P(t)e^{j2\pi f_0 t} + P^*(t)e^{-j2\pi f_0 t} + Q(t)$$

$$P(t) = a(t)e^{j\theta(t)}$$

$$Q(t) = \sum_{i=1}^H \lambda_i \cos(2\pi \alpha_i f_0 t + \phi_i)$$

信号建模考虑谐波等

含谐波和间谐波动态模型



$$W_j f(k) = \frac{1}{2j^2} \sum_{i=1}^{j-1} \left\{ \begin{aligned} & i^2 \cdot [f(k+2j-i) - f(k-2j+i)] \\ & + (4ij - 3i^2) \cdot [f(k+i) - f(k-i)] \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2} [f(k+j) - f(k-j)]$$

改进小波变换切换策略

解决高精度和快速响应的矛盾

■ (5) 基于多级自校验和多重自切换的自适应相量算法

- ✓ 传统算法通过一个算法解决电力系统复杂的电能质量环境下各种问题，受时频分析不确定性原理等条件限制，难以满足配电网的综合要求
- ✓ 为解决传统的PMU算法无法解决快速性和准确性这对矛盾，提出自适应类相量算法来同时解决快速性和准确性问题

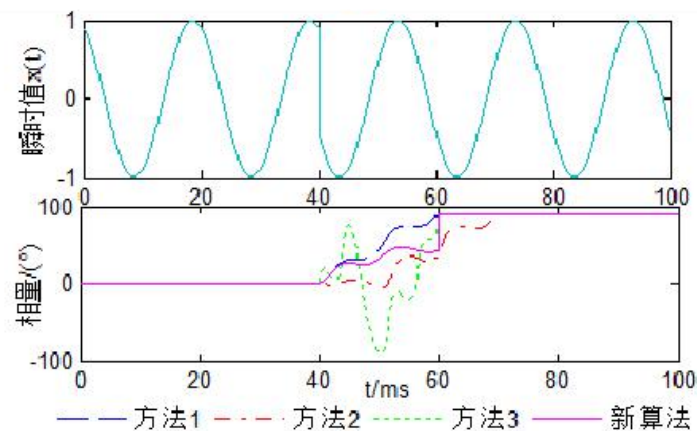
反推校验算法

反推各采样点的理论计算值，并与实际测得的点进行比较

$$x_c(n_i) = a \cos(\theta_0 + \frac{n_i \theta_1}{N f_0} + \frac{2\pi n_i}{N})$$
$$\varepsilon = \sum_{i=1}^L |x_c(n_i) - x_m(n_i)|$$

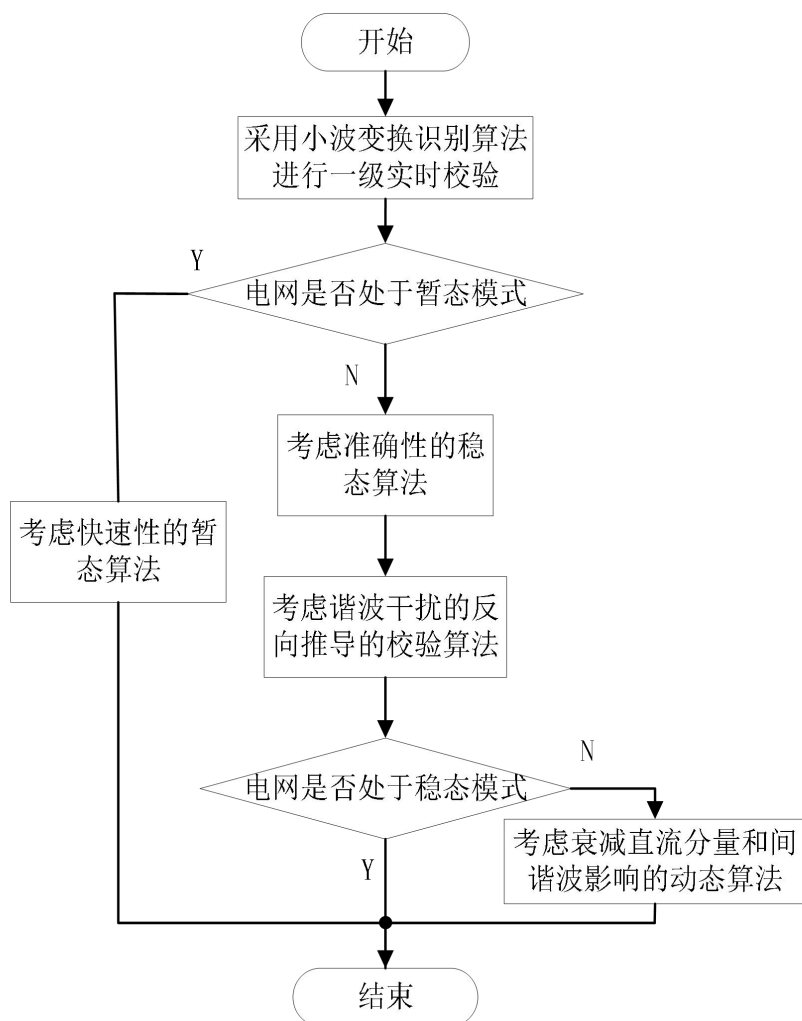
若总偏差较小，则校验通过

$$x(t) = \begin{cases} a \cos(2\pi f_0 t + \pi/6), & t < 40ms \\ a \cos(2\pi f_0 t + \pi/6 + \pi/2), & t \geq 40ms \end{cases}$$

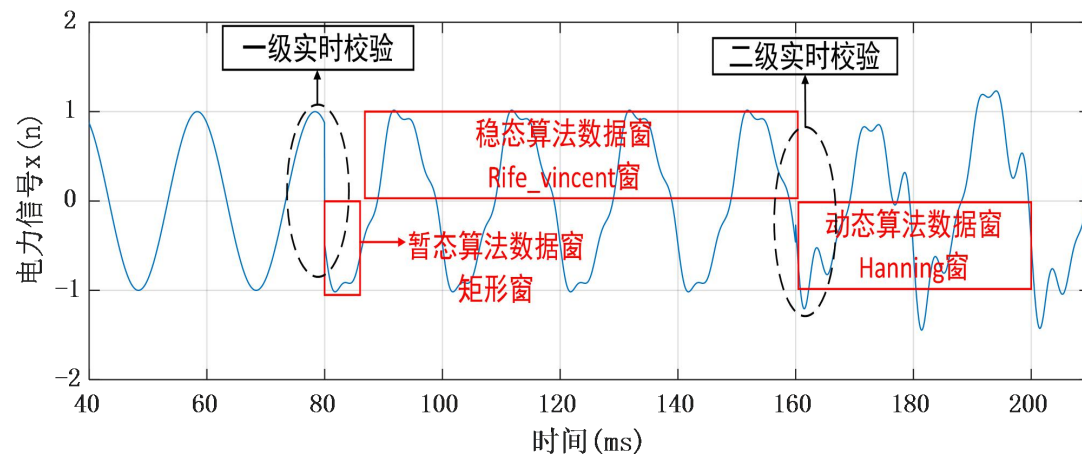


- ✓ 表明所提校验算法的正确性，在暂态过程中可以自适应切换计算模式

■ (5) 基于多级自校验和多重自切换的自适应相量算法



电力状态	稳态	动态	暂态
校验算法	二级实时校验	二级实时校验	一级实时校验
传感器	测量用传感器	测量用传感器	保护用传感器
采样率	低	中	高
窗函数	矩形窗	Hanning窗	Rife_vincent窗
窗长度	4	2	1/4
相量算法	稳态算法	动态算法	暂态算法





同步相量测量算法提升技术



同步相量测量装置及性能测试



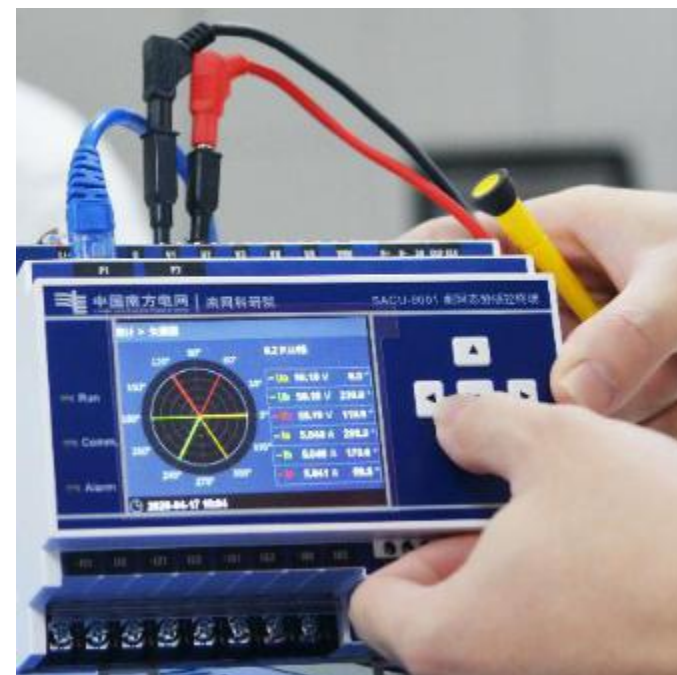
同步相量测量技术示范应用



技术应用展望

(一) 配电网同步相量测量装置 (配网PMU)

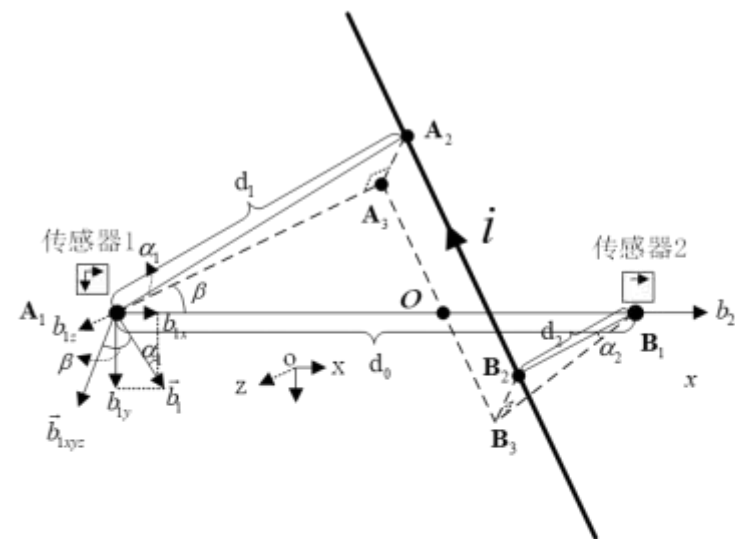
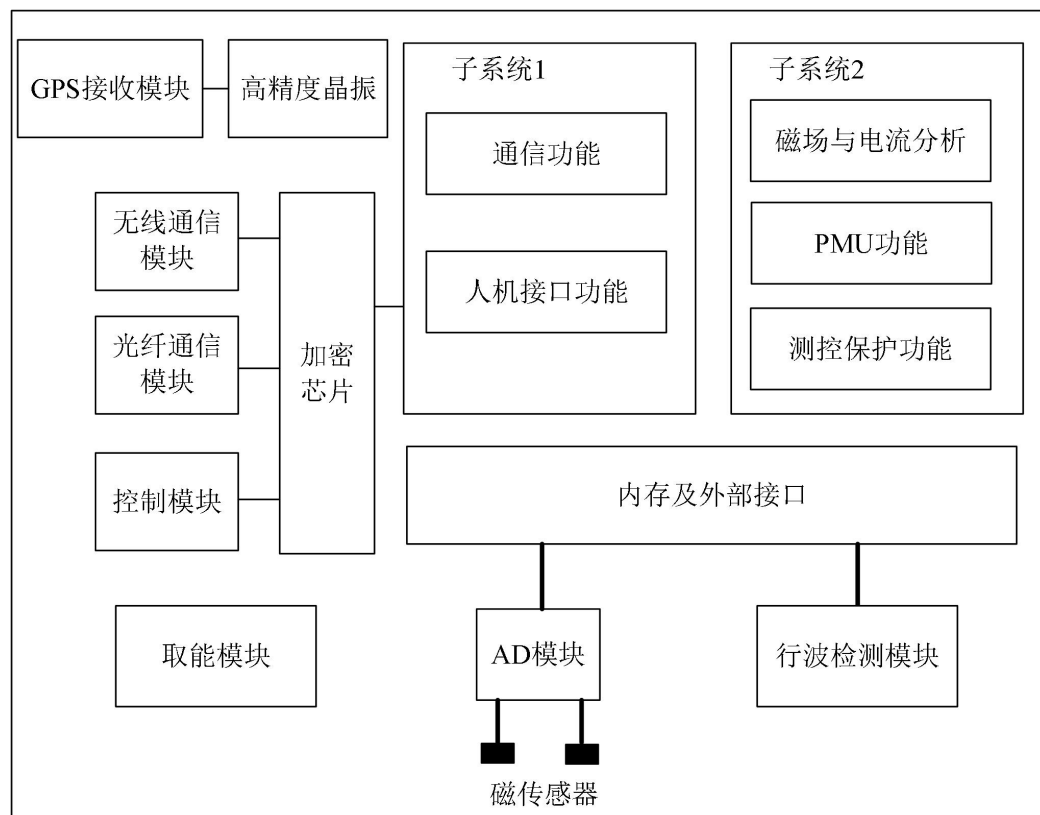
- 集成度高的配网自动化终端，具有很好的快速性、准确性、可靠性和扩展性
 - ✓ 尺寸：300mm*180mm*100mm
 - ✓ 电源：24V/48V或110V/220V
 - ✓ 开关量：12路DI+7路DO
 - ✓ 通信：以太网/3G/4G/5G通信
 - ✓ 模拟量：3路测量+4路保护CT
 - ✓ 授时：B码/IEEE-1588/卫星/5G
 - ✓ 功能：支持同步相量测量，数据加密，行波检测，协调控制
 - ✓ 人机交换：液晶显示



(一) 配电网同步相量测量装置 (配网PMU)

● 新一代配网PMU装置方案

- ✓ 高精度、宽频带、快响应、低温漂、低成本、小体积、宽应用
- ✓ 可带电安装、无需外接电流互感器、无需与高压导线电气连接、无需外接电源模块



基于单轴和两轴磁传感器电流测量原理

$$i = d_0 \cdot \frac{2\pi}{\mu_0 \sin \alpha_1} \cdot \frac{b_{1x}}{\cos \alpha_1 + \sqrt{\frac{b_{1x}}{b_2} - \sin^2 \alpha_1}}$$

(二) 配电网同步相量测量装置测试

● PMU装置测量误差的来源

1、GPS装置的对时误差，标准及常用GPS装置的对时精度为1us (0.018°)

2、CT/PT：按照《GB 1207-2006 电磁式电压互感器》最高即0.1级，相角误差是5' (0.0833°)

3、AD：通常采用的是16位AD，分辨率是： $\frac{1}{65536} = 1.5259 \times 10^{-5}$

4、算法部分(间谐波)：

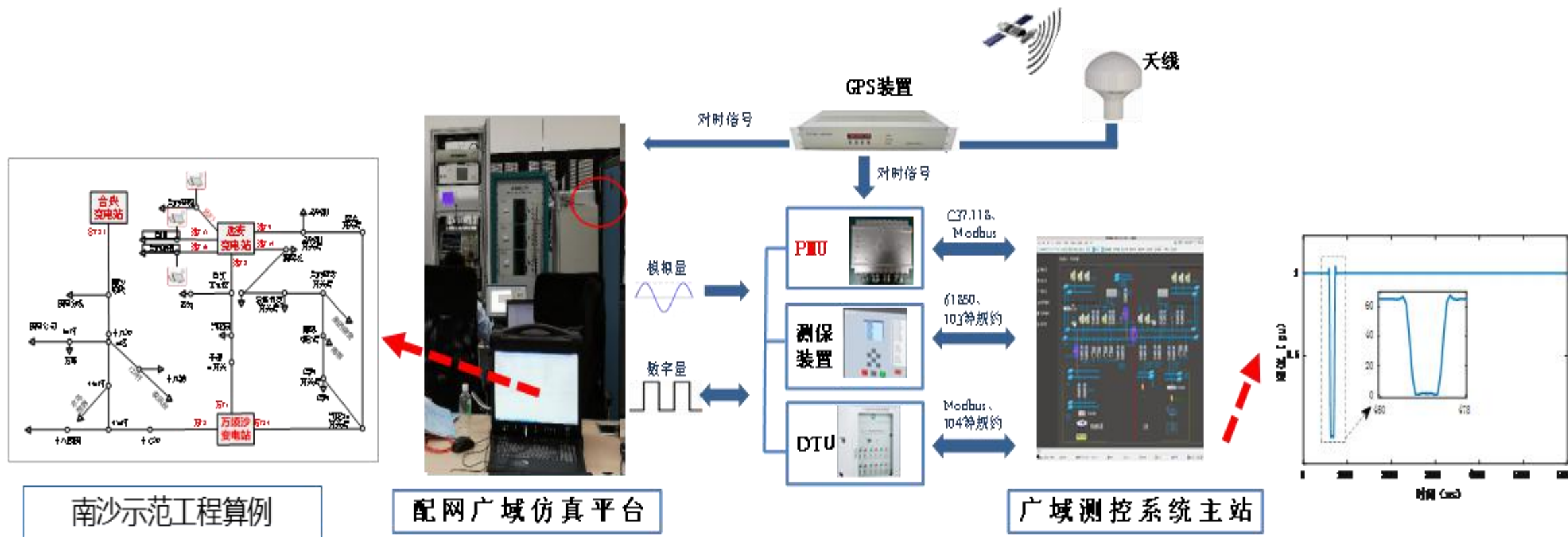
传统算法无法抑制间谐波的影响

20%间谐波影响				
算法		DFT	传统DFT修正	传统频域算法
角度误差(°)	最大误差	-5.4794	6.0664	-22.6731
	平均绝对误差	2.3781	2.3562	10.1791
	均方根误差	2.8398	2.8723	11.8762
幅值误差(%)	最大误差	7.7318%	7.9688%	31.8416%
	平均绝对误差	3.5256%	3.4922%	14.4857%
	均方根误差	4.1260%	4.0394%	16.9444%

(二) 配电网同步相量测量装置测试

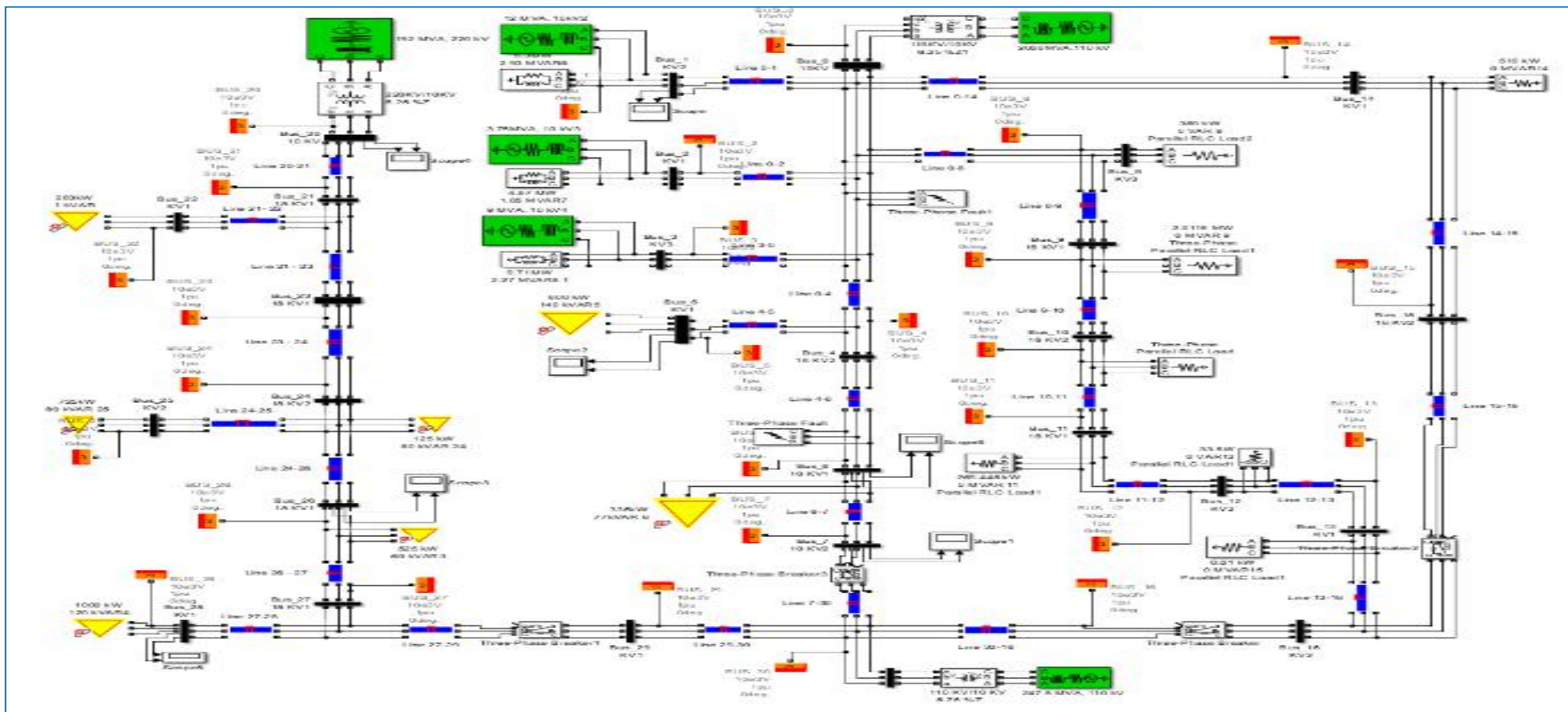
● 配网PMU装置测试平台搭建

- ✓ 基于RT-LAB和RTDS的配网广域测试平台，可以利用示范工程典型算例，并接入控制器和PMU装置，实现PMU装置的动模测试及高级应用的功能测试



(二) 配电网同步相量测量装置测试

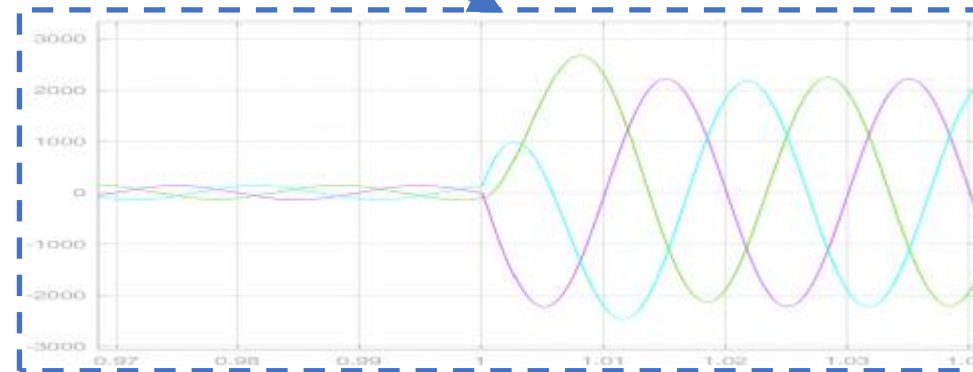
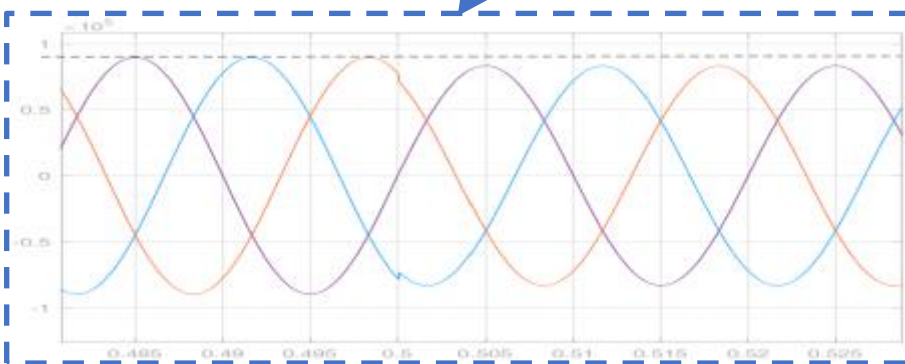
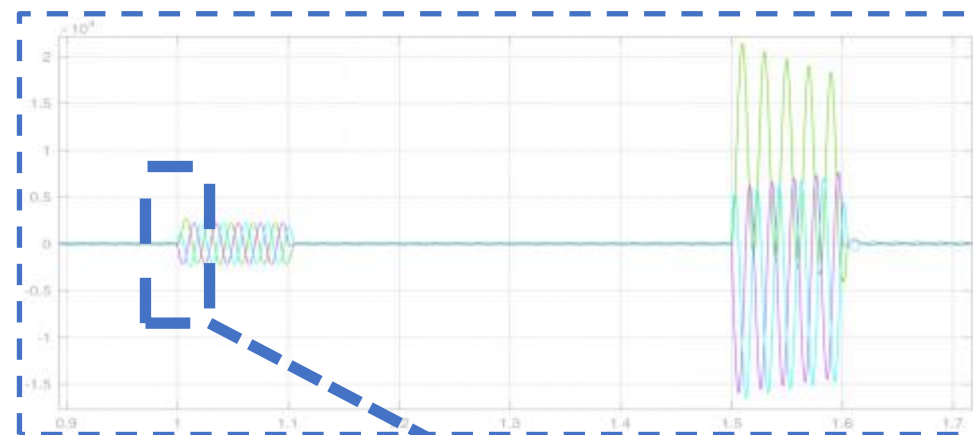
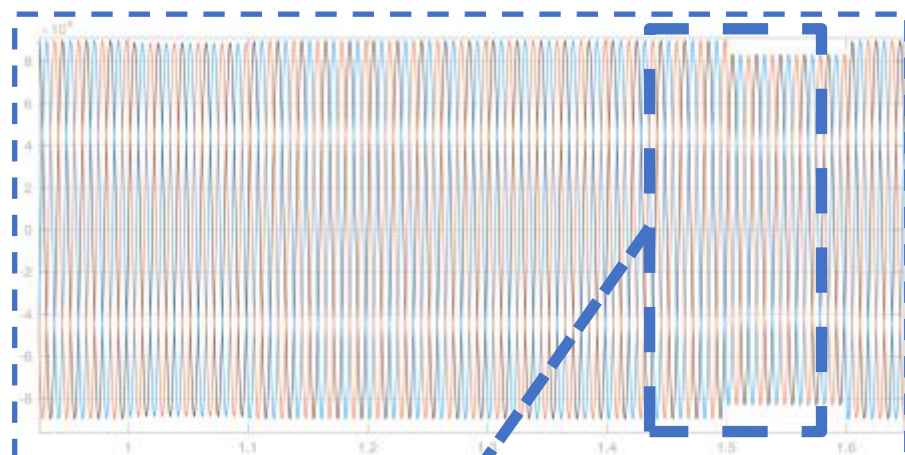
- 搭建基于RT-LAB的配电网广域测量控制硬件在环实时仿真测试平台，建立基于实际配电网的典型测试算例



(二) 配电网同步相量测量装置测试

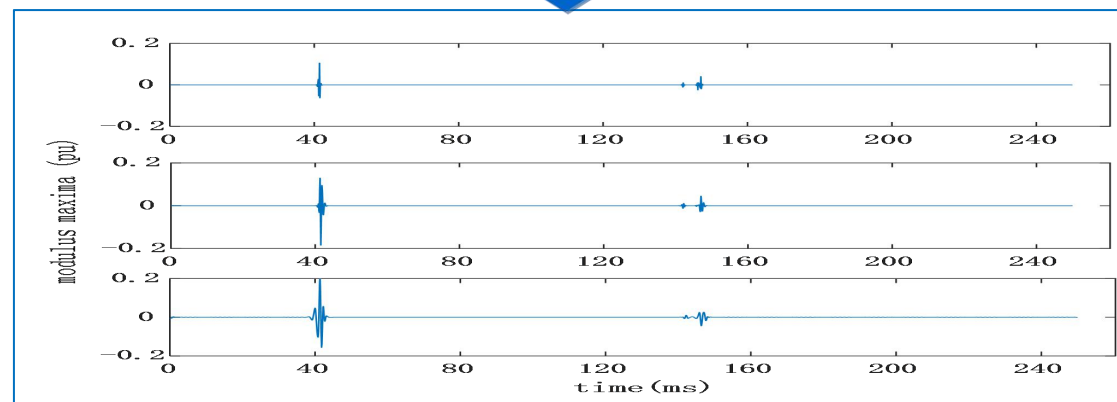
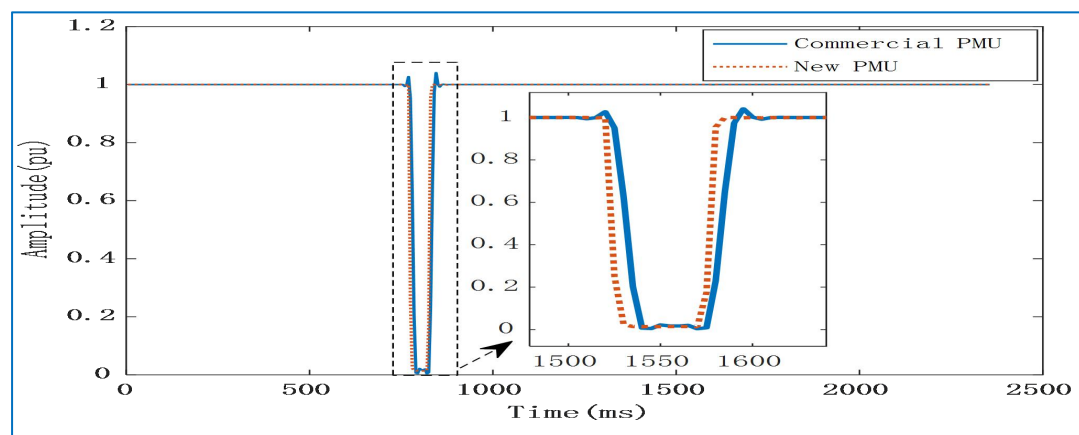
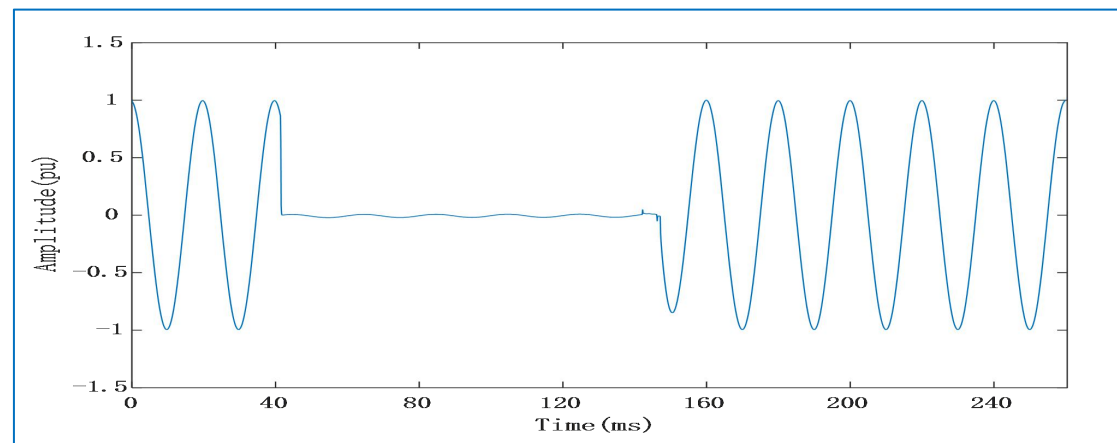
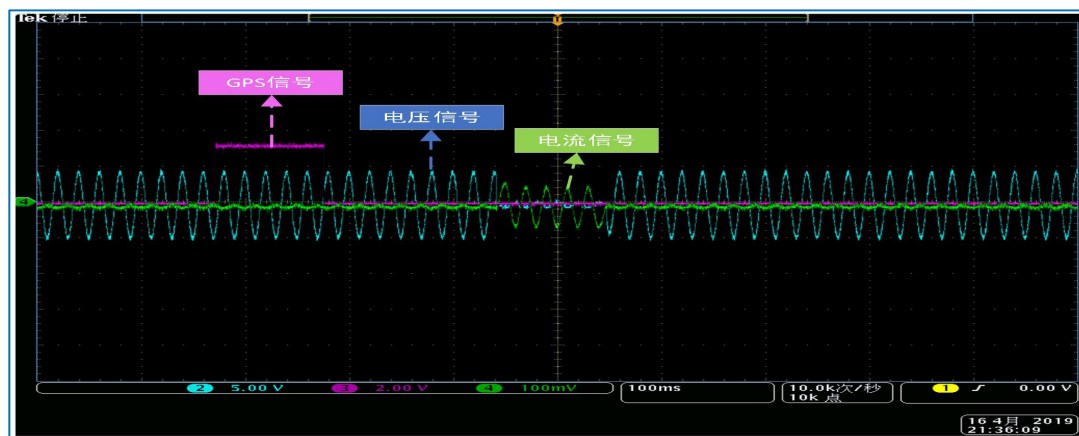
● RT-LAB硬件在环仿真结果

- ✓ 在1s的时候，珠江工业开关房至汽配园开关站末端发生三相短路
- ✓ 在1.5s时，远安F16的远安变电站至美的冰箱首端发生三相短路



(二) 配电网同步相量测量装置测试

- 对基于所研发算法的同步相量测量装置和主流同步相量测量装置，开展比对测试
- 我们算法为核心设计的装置性能优于主流商用装置，能满足实际应用要求





同步相量测量算法提升技术



同步相量测量装置及性能测试



同步相量测量技术示范应用



总结及展望

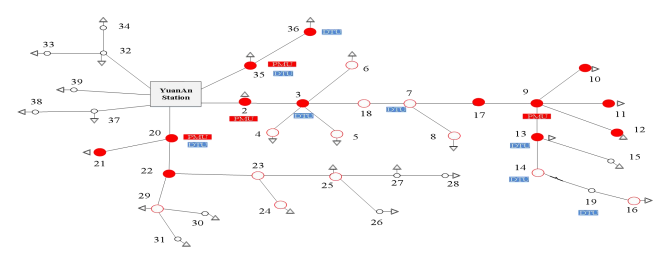
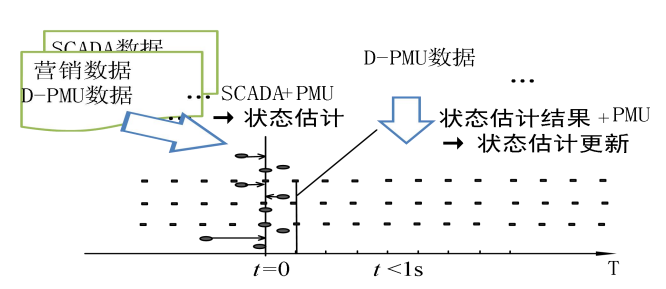
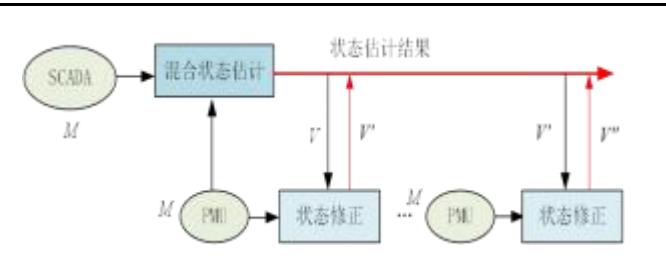
(一) 配网PMU的特点

● 配网与主网PMU技术对比

	主网	配网
配置原则	500kV变电站、220kV变电站220kV主变侧、发电厂、STATCOM站点、直流换流站	变电站主变低压侧、变电站馈线侧、光伏等 新能源井网点、充电桩、配电房、重要负荷、杆塔
基本功能	集中在监测，应用于WAMS	需要兼顾传统DTU、FTU、测控保护的功能，需支持同时采集测量CT和保护CT电流，需 支持快速的阶跃响应功能 ，需支持 接收并执行控制指令 功能。
通信	有线	需支持无线通信，需支持对数据进行加密功能，由于对带宽和流量较敏感，所以 需支持可变传送速率 。
对时	采用站内统一时钟提供的基准信号进行对时	受条件限制需 内置GPS和北斗多源授时 模块进行对时，或者 5G授时
准确度	对精度有较高要求	线路距离普遍较短，加上更靠近负荷侧导致噪声复杂严重，所以对同步相角的精度较主网要求更高。同时受大功率非线性冲击负荷等产生的间谐波等干扰严重，对 间谐波等干扰抑制 要求更高。
电源	安装于变电站内，一般从直流屏取电，取电较方便	安装环境苛刻，可能 从站用变、PT和备用电池 取电，所以还需支持 直流24/48V 电源
装置尺寸及防护等级	主网是安装在变电站标准屏柜中，标准机箱，户内安装，所以对温度、防水、防尘要求相对较低。	配网则安装于配电房的开关柜、壁挂式机柜内，甚至是杆塔上，所以对同步相量测量装置的 体积要求更小，可靠性要求更高，防护等级要求更高

● 基于多源信息自适应动态配网状态估计

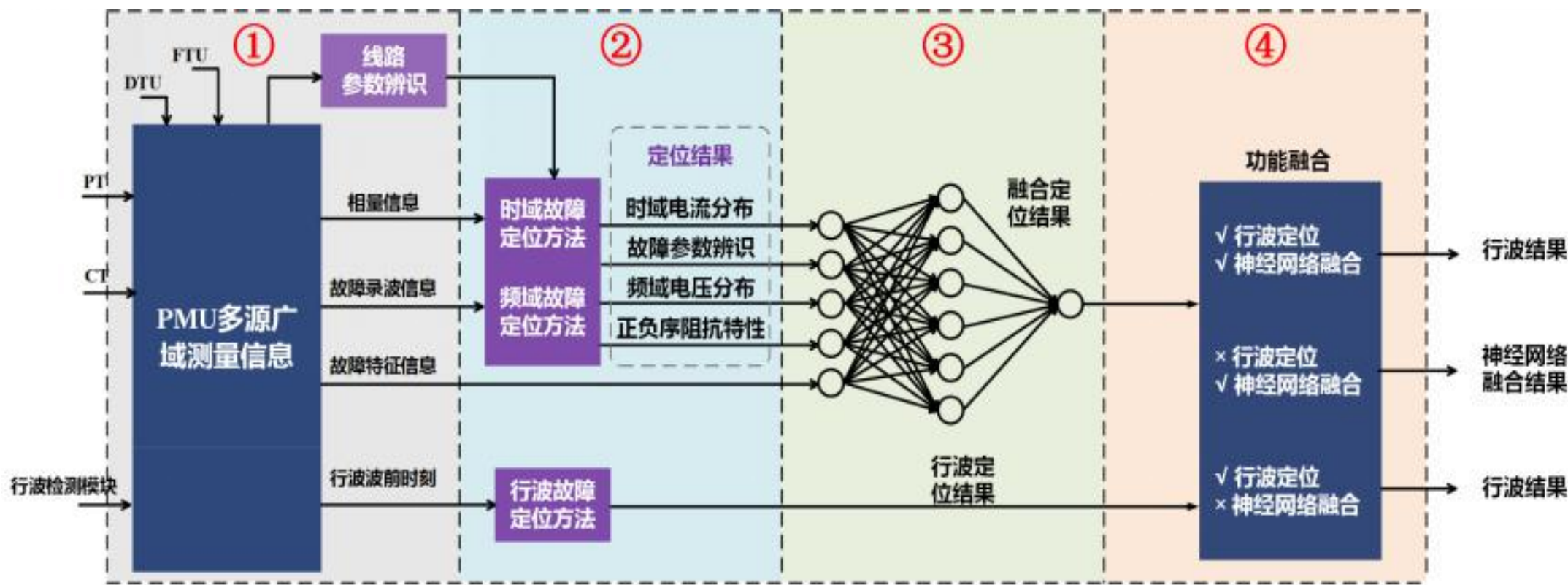
- ✓ 基于不同应用场景与目标的配电网自适应状态估计方法

自适应状态估计	量测不足	鲁棒状态估计		转化为动力学系统的稳定平衡流形
	量测充足	高精度状态估计		初点取上一个时刻的解+更新D-PMU数据
		极快速状态估计		仅使用D-PMU数据进行局部极快速刷新

(二) 配网PMU应用示范场景

● 基于多源同步量测信息的配电网故障定位方法

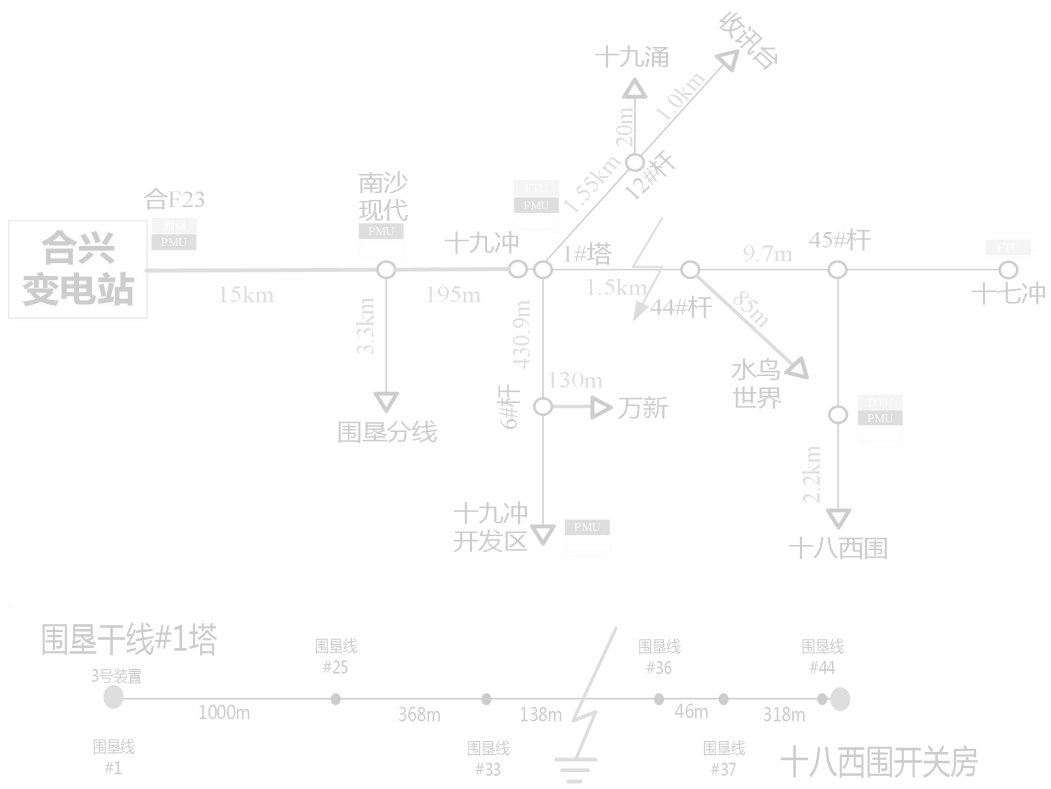
- ✓ 基于PMU多源广域测量信息，融合多种时频域定位方法，实现优势互补，提升对运行工况的适应能力；协同行波定位方法，实现高精度故障定位。



(二) 配网PMU应用示范场景

● 基于多源同步量测信息的配电网故障定位方法——现场试验

- ✓ 基于无人机人工配网广域相间短路试验，成功实现了故障精确定位，定位误差均 < 150m



(二) 配网PMU应用示范场景

● 配电网源-网-荷快速协调控制技术

- ✓ 提出了馈线级负荷功率控制方法，基于D-PMU信息采用预调节-实时控制策略进行源荷快速跟踪

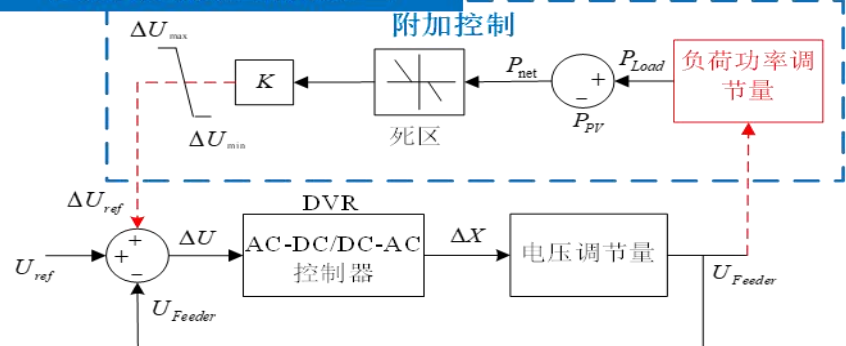
基于MPC的预调度模型

目标 min 下网点功率偏差+DVR调节量

约束条件 (1)配网基本潮流约束；(2)下网点功率波动率；
(3)电压合格率约束；(4)负荷功率约束

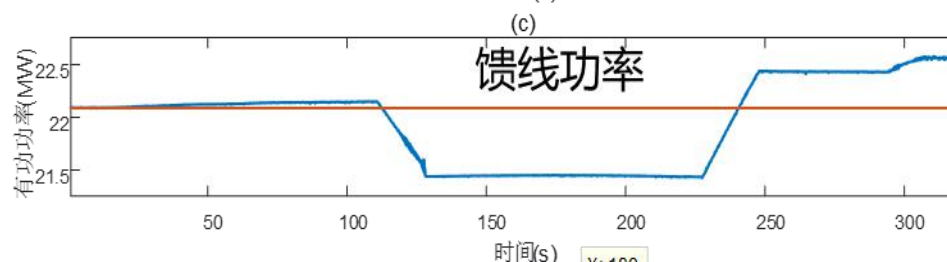
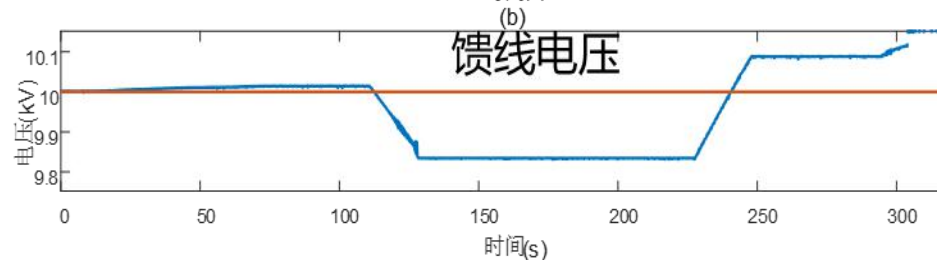
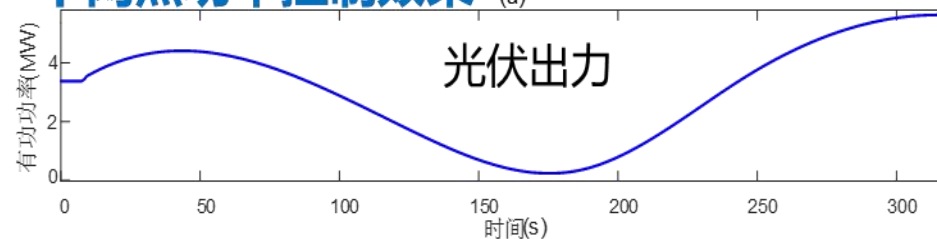
t时刻预测t+N₁时刻PCC预测值，并求解t至t+N_u-1时刻的控制量

实时反馈控制模型



利用PMU实时获取下网点功率以及馈线电压信息，在线计算DVR调压量

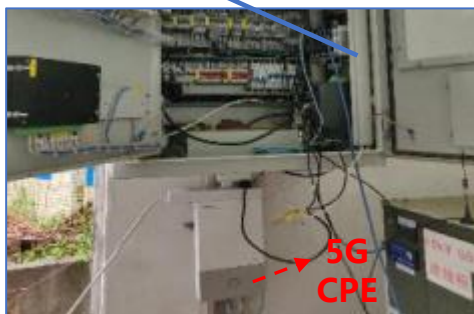
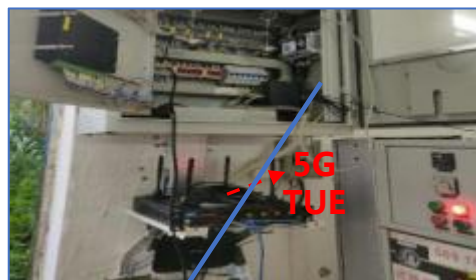
下网点功率控制效果 (a)



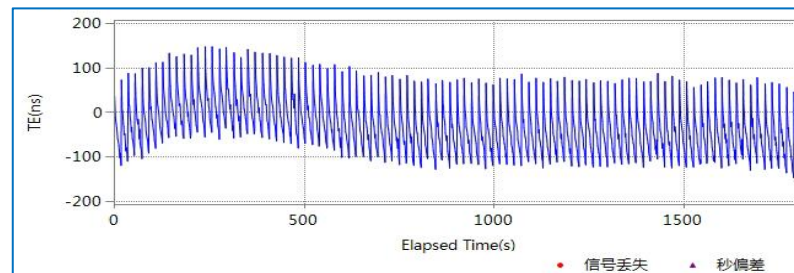
(二) 配网PMU应用示范场景

● 融合5G的配网同步相量测量技术

- ✓ 2020年9月，在南沙明珠湾示范区，完成首例适应多供应商5G模块的配电网同步相量测量装置现场应用验证

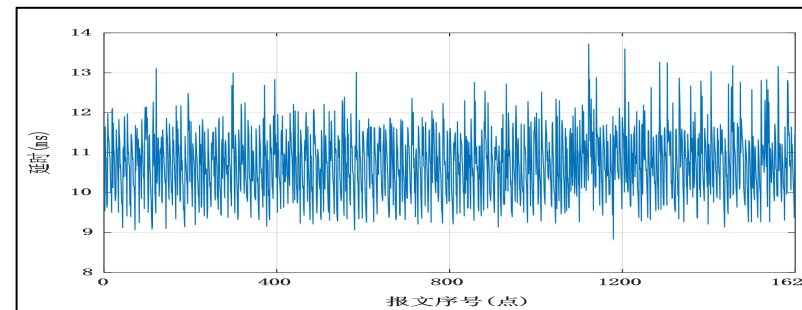


百纳秒级高
精度授时



为基本测量同步相量提供精确时标，为高精度故障精确定位提供可能，降低停电时间，提升供电可靠性

十毫秒级低
延时高可靠
通信



为源-网-荷协调控制提供基础，改善配电网电压质量，提供优质经济的电能；为电网与用户供需互动提供了更快速更有效的互动方式



同步相量测量算法提升技术



同步相量测量装置及性能测试

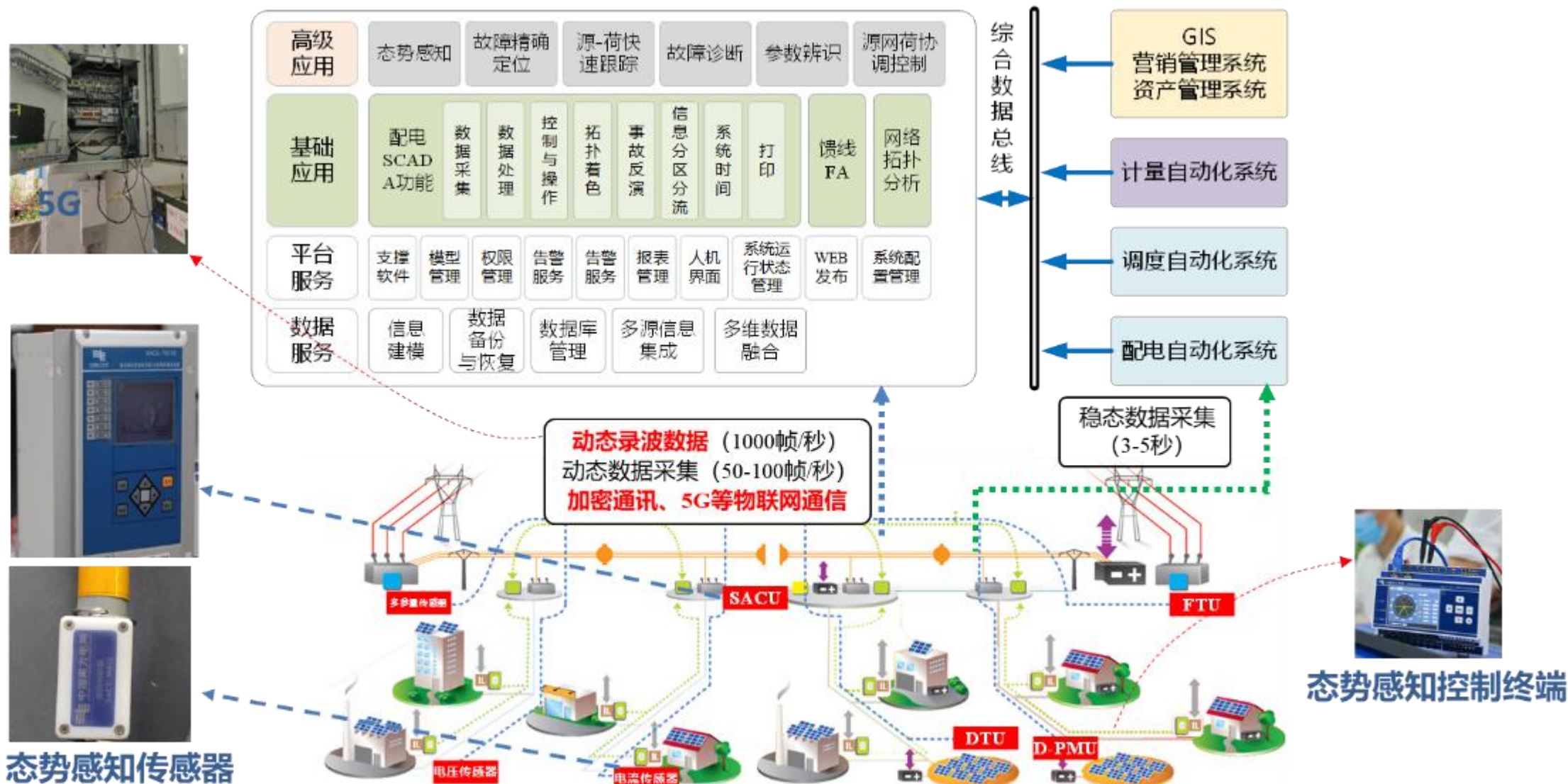


同步相量测量技术示范应用



技术应用展望

(一) 配电网态势感知与控制系统



● 电子电气技术的发展

- ✓ 实现基于电磁场量测的挂贴式的PMU
- ✓ 与高级应用功能融合，功能下放的智能配网PMU

● 信息与通信技术的发展

- ✓ 5G通信技术，解决GPS、解决低延时、确定性传输、端到端通信等难题
- ✓ 低功耗远距离通信

● 电网技术的发展

- ✓ 电网的测量和控制体系将由目前的局部单点、低频疏松的特点向全面泛在、准确时标、高频密集、智能复合的方向演进

(三) PMU在未来配网态势感知领域的应用

配网PMU

态势感知及状态估计

新能源的随机冲击和负荷的动态波动，对配电网的安全可靠运行带来了新的挑战。需要以高精度和快响应的PMU为基础，适用于配电网的**新一代状态估计和态势感知系统**。同时PMU带有高速准确的同步信息，将会大大提高**暂态电压分析以及谐波源定位**的精度。

态势感知协调控制技术

考虑配电网电动汽车和大规模分布式电源（光伏、风机等）接入及用户与电网的供需互动，基于PMU的同步实时数据与分布式电源、柔性负荷、用电营销等**系统信息融合的协调控制技术**。基于系统侧与分布式电源侧的PMU实时量测值的检测方法，将实现准确实时的**孤岛检测及协调控制**。

态势感知保护技术

传统故障诊断和定位技术是基于电流幅值，并综合多点的量测结果来确定故障点，但系统中需要的量测节点众多，且各节点不具备同步性，仅能利用故障电流的幅值信息。而同步相量测量装置的引入，增加了**行波信息、高速率的量测数据和同步相角**等信息，可以实现广域保护及故障精确定位。

谢谢！



万家灯火
南网情深
A Myriad of Twinkling Lights
Great Rapport of CSG