

PMU: *Phase Measurement Units*

## Equipos para medidas precisas de fase en tensión corriente para redes inteligentes

En el pasado, estas medidas resultaban de difícil precisión, tanto por la medida eléctrica en sí como por la precisión de los algoritmos de cálculo y, sobre todo, por la referencia de reloj, necesaria para poder comparar fases entre magnitudes ubicadas en lugares muy distantes geográficamente. Actualmente, los sincrofasores (también conocidos como PMU: *Phase Measurement Units*) se están dotando de referencias a una coordenada universal de tiempo (UTC: *Universal Time Coordinated*) muy precisa común para el sincronismo, como es la señal GPS (*Global Positioning System*), con un rango de error conocido y pequeño.

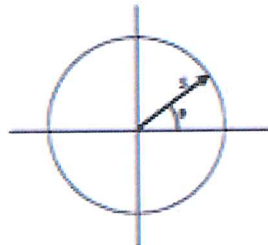
Los PMU miden básicamente las magnitudes de tensión y corriente en lugares dispersos de las redes de transporte y distribución eléctricas. Estos equipos son muy útiles para estimar dinámicas de estabilidad de la red eléctrica. En una coyuntura de red eléctrica inteligente (*smart grid*), con una fuerte penetración de energías renovables y el vehículo eléctrico, actualmente estos equipos están en auge.

Los PMU constituyen una tecnología emergente en los sistemas eléctricos de potencia que presentan varias ventajas para el análisis y medida de grandes sistemas eléctricos (WAMS: *Wide Area Measurement Systems*), protección y control (WAMPAC).

### Cómo operan

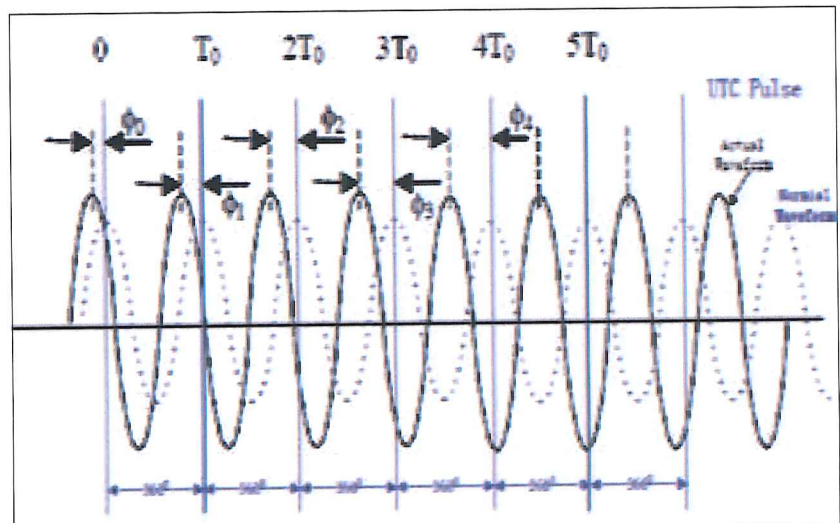
Un PMU puede medir formas de onda tensión corriente en redes de 50/60 Hz, dependiendo de la frecuencia nominal, típicamente a una velocidad cercana a las 50 muestras por ciclo sincronizada con la señal temporal GPS, digitalizándose por cada fase. Estos equipos miden en una ventana de temporal de un ciclo de la frecuencia fundamental y proporcionan la muestra sincronizada de alta velocidad con una precisión

de 1 microsegundo, mediante la utilización de un oscilador de enganche de fase (PLL: *Phase-Lock Oscillator*), junto con la referencia del sistema GPS. Las medidas fasoriales con



definición temporal precisa se pueden transmitir a un receptor local o remoto como un concentrador de datos de fasores (PDC: *Phasor Data Concentrators*) habitualmente ubicado en una subestación.

Los PDC son utilizados en los sistemas WAMS, tanto para estudios off-line como en aplicaciones a tiempo real. Junto con los PMU, son considerados como uno de los equipos de medida más importantes en los sistemas de potencia del futuro, gracias su capacidad única



■ Referencias fasoriales para ondas sinusoidales con la representación vectorial.



de muestrear señales de tensión y corriente analógicas de forma síncrona con un reloj GPS, así como a su capacidad de calcular la componente fasorial correspondiente en una gran variedad de ubicaciones.

Habitualmente, los fasores se estiman a partir de muestras digitales de formas de onda AC. Para asegurarse de que todos los fasores sincronizados disponen de la misma referencia, el estándar define un ángulo de sincronismo como *el ángulo de fase instantánea relativo a la función coseno a la frecuencia nominal del sistema sincronizada con UTC*. Este ángulo se define de 0° cuando se tiene el máximo de la forma sinusoidal medida justo en el instante de transición del segundo UTC (1 pulso cada segundo de la señal de tiempo), y de -90° cuando se tiene el cruce de cero positivo en la transición del segundo UTC" (picos 0, T<sub>0</sub>, 2T<sub>0</sub>, etc.).

El fasor obtenido a partir de la definición anterior es una unidad estimada, de forma que se necesita una forma para evaluar el error, para asegurarse que todas las unidades de medida de fases del sistema están dentro del rango de precisión. La IEEE C37.118 introduce el concepto de error de vector total (TVE: *Total Error Vector*) [1] limitado al valor del 1%:

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}}$$

donde  $r$  e  $i$  son la parte real e imaginaria respectivamente,  $X_r(n)$  y  $X_i(n)$  son los valores medidos, dados por el dispositivo de medida, y  $X_r$ ,  $X_i$ , son los valores teóricos de la señal de entrada en el instante de tiempo de la medida [2]. Esta medida debe poder ayudar a detectar la presencia de componentes de la señal diferentes a la frecuencia fundamental del sistema de potencia.

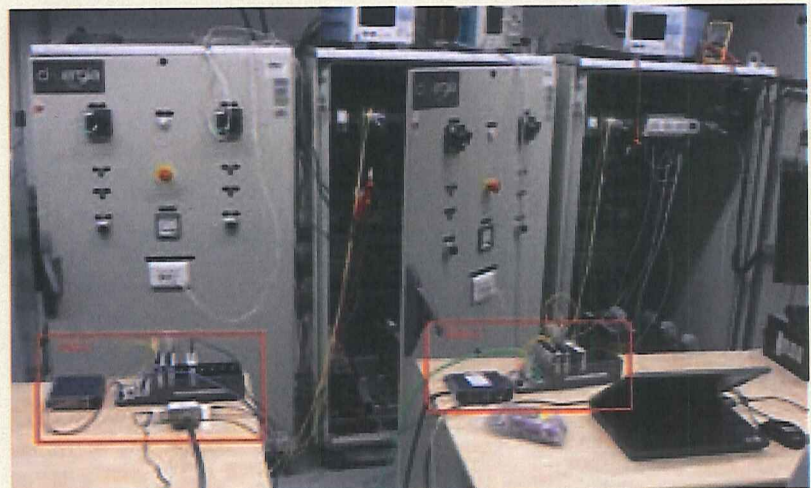
### Fabricantes

En la actualidad existen unos 20 fabricantes de PMU, como ABB, Arbiter Systems, SEL, Macrodyne, GE MultiLin y Qualitrol, entre otros, con más de 50 modelos diferentes en el mercado. Aunque la base de la medida sincronizada del fasor puede

## Proyecto IREC: desarrollo de herramientas flexibles de procesamiento de datos de PMU

El Instituto de Investigación para la Energía de Cataluña (IREC) está realizando un proyecto de investigación a nivel europeo con el grupo de investigadores del laboratorio *SmartTS Lab*, perteneciente al instituto KTH (*Royal Institute of Technology*). En este proyecto se diseñan y desarrollan herramientas de control y monitorización para sistemas de potencia que presentan oscilaciones indeseadas de potencia eléctrica. En concreto, se evalúa como caso práctico la incidencia que ocurrió en diciembre de 2010 en *Oklahoma Gas and Electricity (OG&E)*, en la cual se produjeron oscilaciones sub-síncronas de potencia en el sistema de transmisión ocasionadas por dos parques eólicos adyacentes que registraron un episodio de intensos vientos. Se demuestra que casos como este precisan de una monitorización sincronizada de fasores, y los PMU se presentan como una solución tecnológica a dicha monitorización. Así mismo, este caso es extrapolable al sistema eléctrico europeo, ya que las fuentes de energía intermitentes (solar, eólica) son responsables en muchas ocasiones de este tipo de oscilaciones y su penetración en el sistema eléctrico es cada vez mayor.

El proyecto consiste en el desarrollo de herramientas flexibles de



■ Instalación de PMU en el laboratorio de emulación del IREC.

ser la misma para diferentes PMU del mercado, la implementación del algoritmo de medida puede ser algo diferente entre modelos [3]. Los fabricantes son libres de utilizar variables como el tamaño de la ventana de medida, o la velocidad de muestreo, que puede suponer unas pequeñas diferencias entre las medidas finales de parámetros en tiempo real de los diferentes equipos, motivo para considerar la valoración de los errores mencionados anteriormente.

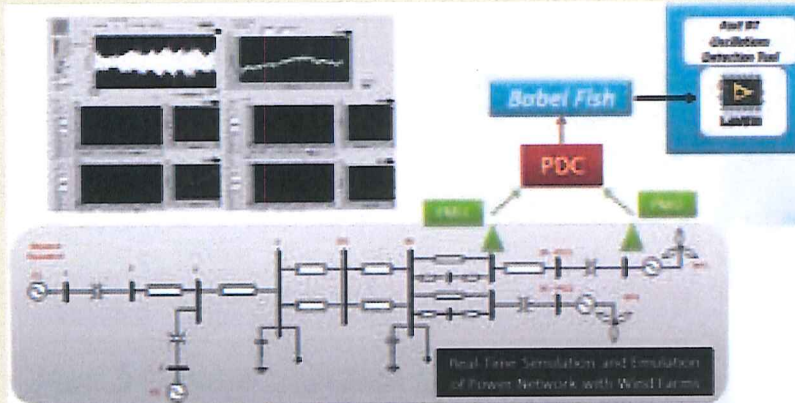
### Comunicaciones

Para complementar la parte de comunicaciones, se considera la IEC 61850

como un estándar sustancialmente desarrollado para subestaciones, utilizado para comunicar equipos tanto en tiempo real como no-real. Esta norma tiene una posible aplicación en la transmisión de datos e información de PMU según el estándar IEEE C37.118 publicado para PMU el 2005 [1]. La utilización de la IEC 61850 para comunicaciones del sistema de transmisión ya se trata en la IEC 61850-90-1 en el contexto de comunicaciones entre subestaciones.

La parte 5 del estándar de la IEC cubre las necesidades de sincronismo y precisiones temporales en los datos enviados, tema esencial en





■ Esquema del suceso de Oklahoma y entorno LabVIEW para detección de oscilaciones de potencia.

procesado de datos de PMU para la toma de decisiones en tiempo real en aplicaciones ad hoc, las cuales no existen en el mercado. Estas herramientas se han validado para el caso de Oklahoma testeándolas en el entorno de emulación que ofrece el IREC en el laboratorio de microrredes de Barcelona. Esta instalación de baja tensión con capacidad de hasta 200 kVA ha permitido replicar dichos fenómenos a pequeña escala. En este caso, se han configurado dos equipos cRIO de *National Instruments* como PMU y se han integrado en un entorno de LabVIEW.

Los PMU instalados en el IREC miden la tensión y la corriente generada por dos equipos emuladores programados para reproducir físicamente las oscilaciones de potencia que experimentaron los parques eólicos de Oklahoma. En la primera fase del proyecto se ha desarrollado el entorno LabVIEW para la detección de dichas oscilaciones.

En la segunda fase del proyecto, actualmente en curso, se está diseñando un sistema de control en tiempo real que permita la eliminación de oscilaciones sub-síncronas mediante equipos *Flexible AC Transmission System* (FACTS) aprovechando funcionalidades del sistema desarrollado en la primera fase. Dicho sistema de control se implementará también en las instalaciones del IREC programando uno de los emuladores como FACTS. Adicionalmente, en esta fase está previsto utilizar un emulador adicional como punto de conexión de un parque eólico y un FACTS al resto de la red eléctrica. Dicha red eléctrica estará emulada con impedancias equivalentes de línea, permitiendo validar la contribución del FACTS a la mejora de la respuesta dinámica del sistema eléctrico.

la automatización de subestaciones. Así se describen las diferentes necesidades de comunicaciones entre cliente/servidor, GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*) y *Sampled Values*. Con los métodos estandarizados IEC 61850 GOOSE, valores binarios, valores medidos así como otros elementos de datos se pueden intercambiar entre diferentes relés siempre que cumplan con el estándar IEC 61850 a nivel de sistemas de protección. El comportamiento en tiempo real de GOOSE es muy importante para la mensajería rápida, como el disparo, re-enganches, etc. de sistemas, y se

trata en la IEC 61850.

El comité de estándares IEEE ha revisado el estándar existente IEEE 1344 para sincrofasores y recientemente ha publicado el *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems C37.118-2005*, que pretende especificar los estándares de medida, el método de cuantificación de la medida, test y necesidades de certificación para verificar precisiones, así como el protocolo y formato de los datos a transmitir [1].

#### Aplicaciones

Los PMU tienen muchas aplicaciones en los sistemas de potencia [4]

[5]. Estas difieren en función del número de equipos instalados.

Algunas aplicaciones como la monitorización de oscilaciones inter-área, visualización de la red, tratamiento de la congestión o detección del modo isla para las energías renovables, típicamente no necesitarían de muchos PMU.

En cambio, otras aplicaciones como estimación de estados, monitorización de estabilidad en tensión, protección, validación de modelos o análisis post-perturbación, necesitan cantidades sustanciales de PMU para disponer de suficiente información para la aplicación considerada.

Algunos de los países líderes en la instalación de estos equipos son USA y China, con centenares de equipos instalados. En Europa se han instalado en Suiza, Escandinavia, Croacia e Italia, principalmente para detectar las oscilaciones inter-área. En Rusia se han instalado para monitorizar la red de transporte. En otros países como Brasil, India o México y en Europa, se usan solo en proyectos de investigación.

Para el desarrollo de las redes inteligentes [6], los PMU son básicos como fuente de información de datos de fase, sobre todo en condiciones dinámicas, dadas sus ventajas de medida en tiempo real, que permiten detectar perturbaciones instantáneas en la red para ser enviadas a los operadores locales. El sincronismo común de tiempo es un elemento principal en aplicaciones *smart grid*; en este sentido, el estándar IEEE 1588 será un elemento definitorio que permite especificar aspectos de sincronismo precisos sobre redes de comunicaciones.

El alto crecimiento dramático de la potencia de procesamiento de la señal en hardware y la disponibilidad de redes de comunicaciones amplias e interconectadas favorecen la oportunidad de explorar nuevos conceptos para la protección y control de sistemas de potencia. Precisamente se están investigando y desarrollando nuevos algoritmos que utilizan la información procedente de múltiples componentes y sistemas de potencia, que podrían proporcionar ventajas significantes respecto a los sistemas



## Bibliografía

- [1] C37.118 - 2005 - IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.
- [2] K. E. Martin, *Standard for Synchrophasors for Power Systems*, IEEE PC37.118, V.5.6, Oct. 2004.
- [3] J. Depablos y V. Centeno, *Comparative testing of synchronized phaser measurement units*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 1, pp. 948-954, 2004.
- [4] J. S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*, Springer, 2008.
- [5] P. Zhang, *Phasor Measurement Unit (PMU) Implementation and Applications*, EPRI Electric Power Research Institute, 2007.
- [6] R. Q. Adánez, *Sistemas de Transporte Inteligentes - Medición Sincronizada de Fasores*, España 2005.

actuales basados en medidas de un único componente en un único emplazamiento.

Aunque el PMU se puede considerar como un equipo electrónico inteligente (IED: *Intelligent Electronic Devices*) independiente de la subestación o encontrarse incluido en un relé de protección individual, su funciones están separadas de las propias del sistema de protección

local para evitar el conflicto entre los dos tipos de sistemas.

### Perspectivas de los PMU

Los PMU facilitan la búsqueda de soluciones innovadoras a los problemas tradicionales de las compañías eléctricas y ofrecen a los ingenieros de los sistemas de distribución de energía facilidades a explotar en los desarrollos futuros, como el

control de fenómenos dinámicos desde una estación central para la toma de decisiones apropiadas; con el sincronismo GPS permiten el análisis de perturbaciones con la toma de instantáneas precisas del estado del sistema; permiten también el modelado de redes eléctricas, así como implementar un sistema de protección avanzado de protecciones o utilizar un sistema de control con realimentación a distancia.

### Agradecimientos

El proyecto realizado en el IREC en colaboración con la universidad de Suecia KTH, agradece a la institución europea del KIC-Innoenergy, su soporte para la realización del proyecto KIC-Smart Power.

**Ignasi Cairó, Gerard Del Rosario, Albert Ruiz, José Luis Domínguez, Luigi Vanfretti, Iyad Al Khatib, Maxime Baudette, Almas Shoib Muhammad**

# GuíasGTP

BUSCADOR PROFESIONAL  
DE MARCAS Y PRODUCTOS

Buscador inteligente  
Plataforma multimedia  
(Videos, catálogos, etc...)

Anuncios destacados  
visibilidad total para su empresa

150.000 productos    16 sectores    100.000 empresas

[www.guiasgtp.com](http://www.guiasgtp.com)

 Grupo Tecnipublicaciones  
AGENCIACIÓN DE PUBLICIDAD PROFESIONAL

912 972 000 | [info@guiasgtp.com](mailto:info@guiasgtp.com)

