

Unidades de medición fasorial (PMUs)

Hernando Díaz

Universidad Nacional de Colombia

30 de marzo de 2012



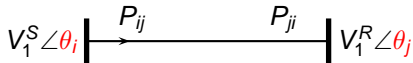
- Unidades de Medición Fasorial (PMU) miden ángulos de fase
- Recordamos la importancia de los ángulos de fase
- Describimos el principio de funcionamiento del PMU
- Mostramos algunas aplicaciones

Transmisión AC, influenciada por ángulos de fase de V

Magnitudes de V casi constantes

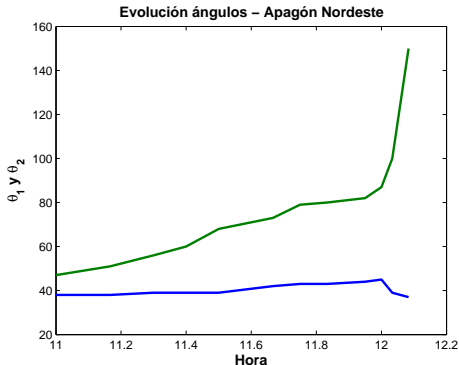
Potencia transmitida

$$P_{ij} \approx \frac{V_i V_j}{X} \sin(\theta_i - \theta_j)$$



- Normalmente sólo se requieren ángulos relativos (diferencias angulares)
- Ángulos no se miden (sólo magnitudes)

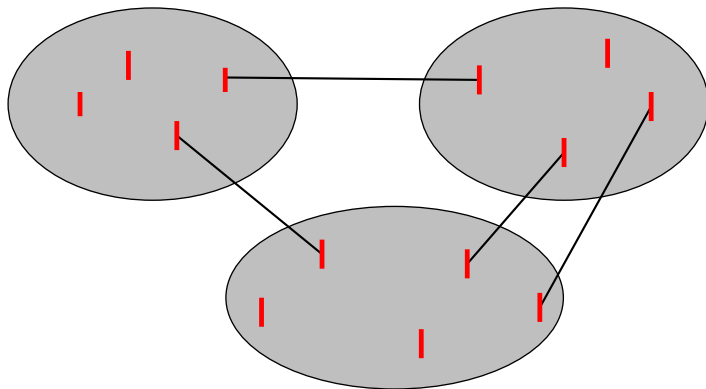
Fasores pueden ser estimados de mediciones instantáneas



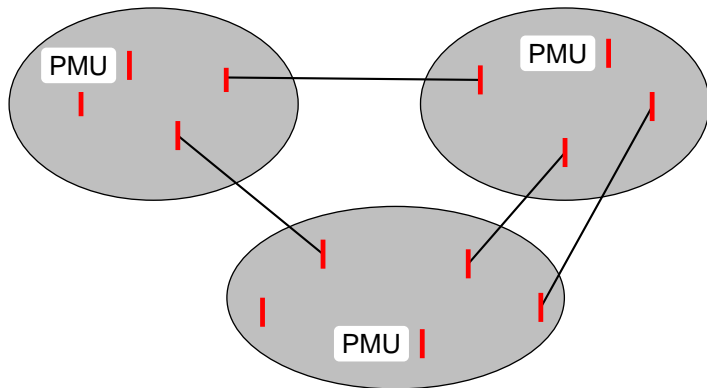
¡Si se hubieran medido los ángulos, se habría detectado la tendencia 30 minutos antes!

¿Y qué pasó con los estimadores de estado?

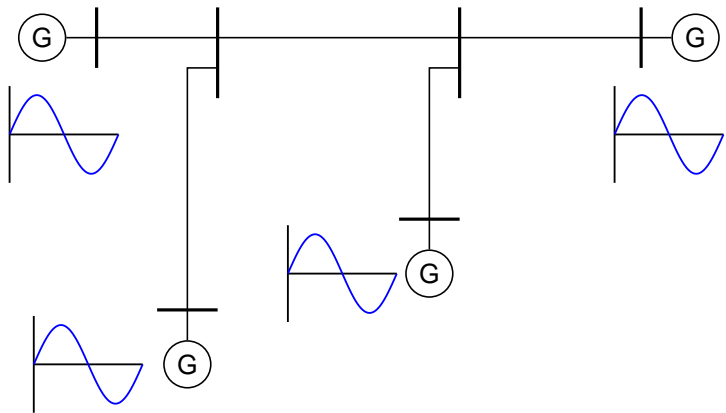
Estimadores de estado solo dan información local



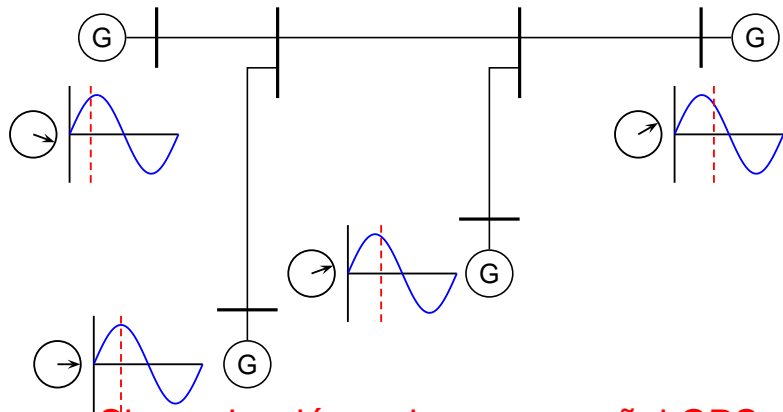
Estimadores de estado solo dan información local



Ángulos de fase requieren medidas sincronizadas



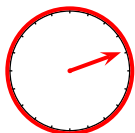
Ángulos requieren medidas sincronizadas



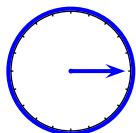
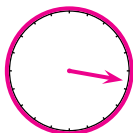
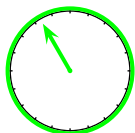
Sincronización se logra con señal GPS

Mediciones de ángulos permiten visión global

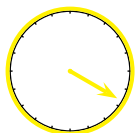
Yumbo



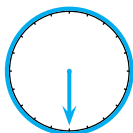
San Carlos Sabanalarga



Jamondino

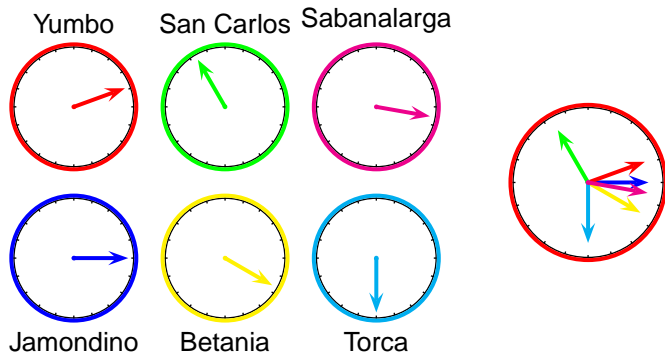


Betania

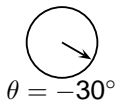
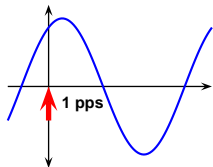
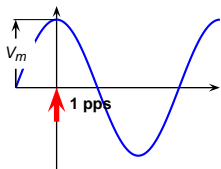


Torca

Mediciones de ángulos permiten visión global



Sincrofasores



Sincrofasores se definen con respecto a una onda coseno, sincronizada con respecto a un pulso de 1 pps.

θ es ángulo de fase instantáneo.

Pulso 1 pps proviene de unidad GPS

Fasores pueden ser estimados de mediciones instantáneas

Serie de Fourier de $u(t)$:

$$u(t) = c_0 + \sum_{k=0}^{\infty} [c_k \sin(k\omega_0 t) + s_k \cos(k\omega_0 t)]$$

con

$$c_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(\tau) d\tau$$

$$c_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(\tau) \cos(k\omega_0 \tau) d\tau, \quad k = 1, 2, \dots$$

$$s_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(\tau) \sin(k\omega_0 \tau) d\tau, \quad k = 1, 2, \dots$$

Fasores pueden ser estimados de mediciones instantáneas

Usando Transformada Discreta de Fourier (DFT), las integrales se aproximan por sumas:

Señal $u(t)$ se muestrea N veces durante el período T ; es decir, $\Delta T = T/N$,

$$\begin{aligned}c_1 &= \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(\tau) \cos(\omega_0 \tau) d\tau \\ &\approx \frac{2\Delta T}{N\Delta T} [u(t_0) \cos(\omega_0 t_0) + u(t_1) \cos(\omega_0 t_1) + \cdots \\ &\quad + u(t_{N-1}) \cos(\omega_0 t_{N-1})]\end{aligned}$$

Fasores pueden ser estimados de mediciones instantáneas

Definiendo,

$$v_n = \frac{2}{N} \cos \left(n \frac{2\pi}{N} \right) \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

entonces,

$$c_1 = \begin{bmatrix} v_0 & v_1 & \cdots & v_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t_0) \\ u(t_1) \\ \vdots \\ u(t_{N-1}) \end{bmatrix}$$

Fasores requieren valores RMS:

$$C_1 = [V_0 \quad V_1 \quad \cdots \quad V_{N-1}] \begin{bmatrix} u(t_0) \\ u(t_1) \\ \vdots \\ u(t_{N-1}) \end{bmatrix}$$

Análogamente,

$$S_1 = [W_0 \quad W_1 \quad \cdots \quad W_{N-1}] \begin{bmatrix} u(t_0) \\ u(t_1) \\ \vdots \\ u(t_{N-1}) \end{bmatrix}$$

donde,

$$V_n = \frac{\sqrt{2}}{N} \cos \left(n \frac{2\pi}{N} \right) \quad W_n = \frac{\sqrt{2}}{N} \sin \left(n \frac{2\pi}{N} \right)$$

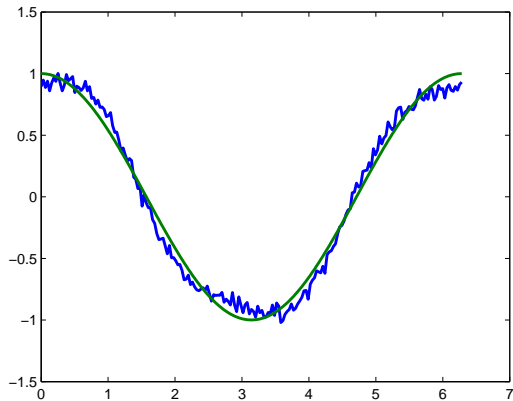
Fasores pueden ser estimados de mediciones instantáneas

El fasor de frecuencia fundamental, obtenido a partir de las N mediciones de la variable $u(t)$, está dado por:

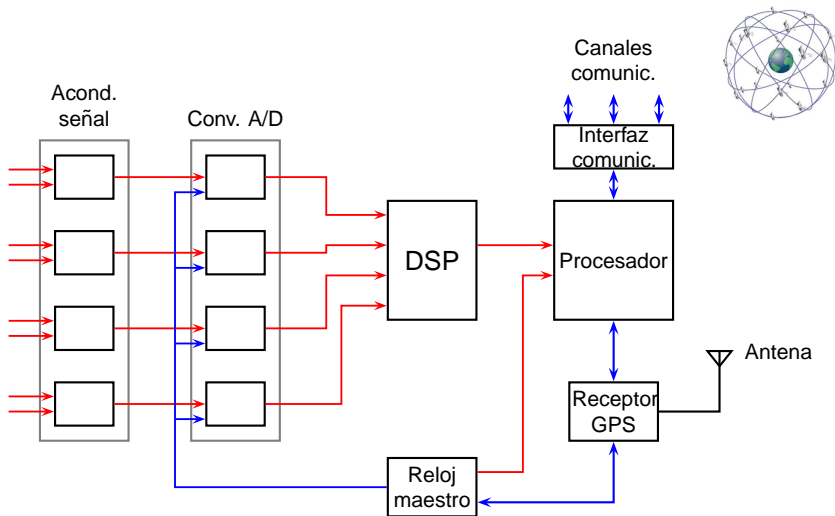
$$U = C_1 + jS_1$$

En sistemas trifásicos, se usa la componente de secuencia positiva (filtrado adicional)

Fasores pueden ser estimados de mediciones instantáneas



PMU — Hardware



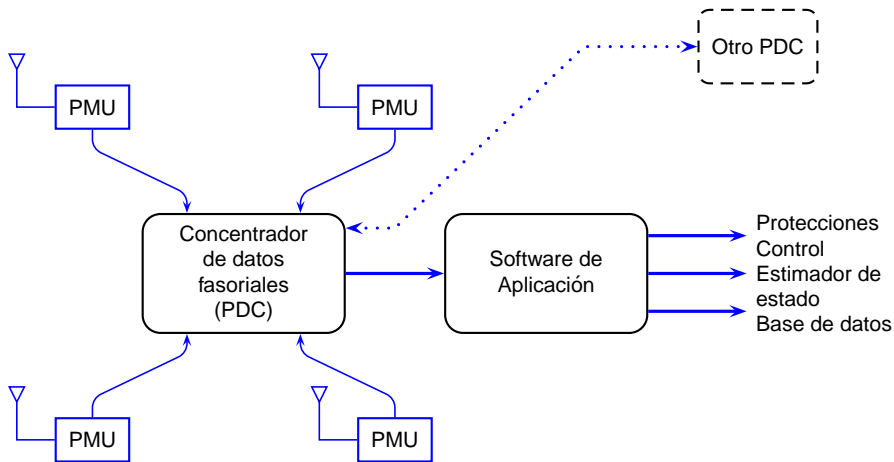
Estándar de Sincrofasores — IEEE C37.118 2005

- Medida del sincrofasor
 - Definición de fasor y sincrofasor
 - Etiqueta de tiempo
 - Sincronización en el tiempo
- Requerimientos de medida y límites de precisión
 - Estimación de sincrofasores
 - Límites de precisión

Estándar de Sincrofasores — IEEE C37.118 2005

- Formato de los mensajes
 - Estructura del mensaje
 - Protocolos de comunicación en tiempo real
- Anexos
 - Códigos CRC — *Cyclic Redundancy Check*
 - Etiquetado de tiempo y respuesta transitoria
 - Ejemplos de mensajes
 - Fuentes de tiempo de sincronización
 - Pruebas de evaluación para los PMUs
 - Evaluación del TVE
 - Definición de mensajes de GPS en protocolos de comunicación estándar

Sistema de medición fasorial



Puede ser difícil transmitir los datos

- Datos se generan muy rápido

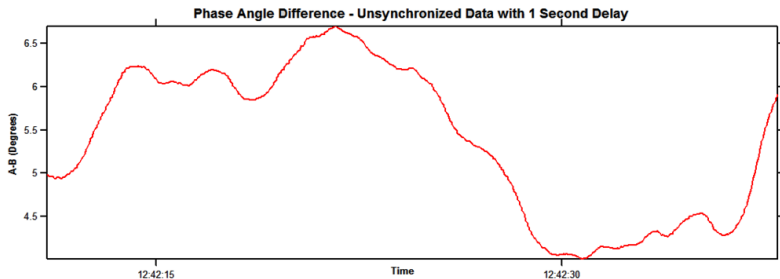
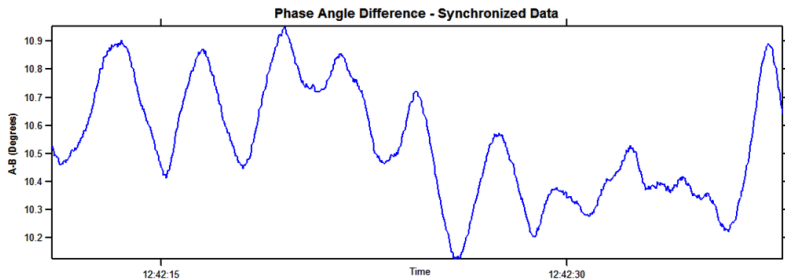
$$48 \frac{\text{bytes}}{\text{muestra}} \times 30 \frac{\text{muestra}}{\text{seg}} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \times 30 \frac{\text{día}}{\text{mes}}$$

- Son 3.73GB por mes por cada medidor
- Con 300 medidores se requiere almacenar 1.2TB
- Los requisitos de ancho de banda pueden ser muy grandes
- Existen tecnologías para lograrlo

Errores de medición

- Errores de medición de magnitudes: atenuación a frecuencia nominal
- Errores de medición de fase: **muy importantes**
 - Error en señal GPS
 - Retardos en señal: variables con frecuencia de la señal
- Frecuencia variable durante eventos (efecto estroboscópico)

Efecto de la sincronización



PMUs en estimación de estado

El objetivo fundamental del estimador de estado es determinar los ángulos de fase:

- Podría hacerse innecesario el estimador de estado (si se pueden medir los ángulos)
- Ángulos de todos los nodos se pueden calcular a partir de algunos datos de PMUs
- Pueden combinarse medidas de potencia y de PMUs para estimar todos los ángulos
- PMUs permiten identificar mediciones erróneas o faltantes

Estimación de frecuencias locales

La frecuencia instantánea en el nodo k se define por:

$$\omega_k(t) := \frac{d\theta_k(t)}{dt}$$

- Presenta algún retardo
- Condiciones dinámicas cambian estimación
- Se puede calcular de $u(t)$ usando Transformada de Hilbert
- Se puede estimar de mediciones en tomacorriente

Oscilaciones de baja frecuencia

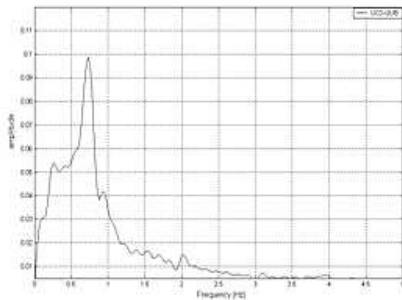
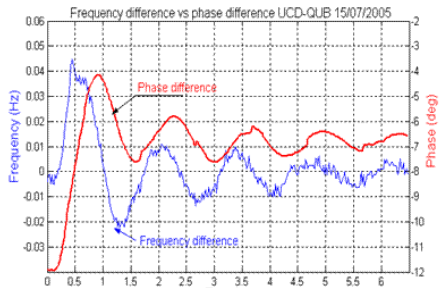
Usando un modelo dinámico, por ejemplo,

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2D\frac{d\delta}{dt} + \omega^2\delta = s_0 + \sum_{i=1}^k s_i(t_i)$$

se ajusta la respuesta ante perturbaciones s_i , para estimar parámetros D (amortiguamiento) y ω (frecuencia natural).

Hay otros enfoques (Prony, etc.)

Oscilaciones de baja frecuencia



Estabilidad transitoria

- Ángulos son los que determinan la estabilidad
- Si se pueden medir, es posible predecir para dónde van
- Se puede hacer análisis de coherencia y hallar pocos generadores equivalentes
- Predecir ángulos de equivalentes

Implementación en Colombia

- XM ha desarrollado un prototipo experimental de PMU
- Varias empresas (XM, Codensa, EPM, etc.) han adquirido e instalado PMUs.
- Proyecto SIRENA: Sistema de Respaldo Nacional ante Eventos de Gran Magnitud
 - Detectar, prevenir y mitigar los *blackouts*
 - Sistema para detectar y mitigar el efecto de eventos de rara ocurrencia

Conclusiones

- Mediciones fasoriales brindan visión global del estado de un sistema
- PMUs parecen ser el futuro de la medición en sistemas de potencia
- Muchas aplicaciones deberán ser reformuladas para usar datos de PMUs
- Varias mediciones se pueden hacer en laboratorios u oficinas

- Mediciones fasoriales brindan visión global del estado de un sistema
- PMUs parecen ser el futuro de la medición en sistemas de potencia
- Muchas aplicaciones deberán ser reformuladas para usar datos de PMUs
- Varias mediciones se pueden hacer en laboratorios u oficinas

¿PREGUNTAS?

¡GRACIAS!