

Diseño de un Registrador de Frecuencia de Línea con PMU

Design of a Line Frequency Recorder with PMU

Presentación: 13 y 14 de septiembre de 2023

Germán Hachman

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia
hachger@gmail.com

Emanuel Bernardi

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco
ebernardi@sanfrancisco.utn.edu.ar

Resumen

Las unidades de medición fasorial constituyen un recurso tecnológico que permite la medición con gran precisión del estado dinámico del sistema eléctrico de potencia. Los avances técnicos y las investigaciones en este campo facilitan la obtención de sincrofasores de tensiones o corrientes de forma precisa. Como consecuencia, este proyecto se basa en el diseño e implementación de un equipo de bajo costo, utilizando el método de la detección de cruce por cero para el cálculo de la frecuencia y de la fase, ajustando el cristal interno de un microcontrolador por medio de la base de tiempo de un GPS, el cual posibilita el registro de la frecuencia de la red eléctrica, la generación del sincrofasor de tensión de línea y el envío de esta información a un concentrador, donde se reciben las mediciones de los diferentes sincrofasores distribuidos en distintas partes de la red eléctrica, para luego evaluar y controlar la operación del sistema de potencia.

Palabras clave: sincrofasor, registrador, frecuencia, fase.

Abstract

The phasor measurement units are a technological resource that allows the measurement of the electric power system dynamics, with high accuracy. Technical advances and research in this field make it easier to obtain precise voltage or current synchrophasors. As a consequence, this project is based on the design and implementation of a low cost equipment, using the zero crossing detection method for the frequency and phase calculation, adjusting the internal crystal of a microcontroller by means of a GPS time base, which makes it possible to register the frequency of the electrical network, the generation of the line voltage synchrophasor and the sending of this information to a concentrator, where the measurements of the different synchrophasors distributed in different parts of the electrical network are received, to later evaluate and control the operation of the power system.

Keywords: synchrophasor, recorder, frequency, phase.

Introducción

El comportamiento dinámico de la frecuencia en una red eléctrica es uno de los aspectos más importantes de un sistema de potencia, y constituye un indicador del desequilibrio entre la generación y la carga del sistema. Por este motivo, en las últimas décadas, se han desarrollado redes de monitoreo de frecuencia que consisten de múltiples registradores de perturbaciones de frecuencia conectados en lugares estratégicos de forma que permitan analizar el estado del sistema eléctrico. En la actualidad, estos sistemas de medición de grandes áreas WAMS (del inglés, Wide Area Measurement Systems) han evolucionado alrededor del mundo para alcanzar las crecientes necesidades de toda clase de aplicaciones relacionadas con la estabilidad del sistema eléctrico (Xu, 2006).

La mayoría de los sistemas de monitoreo actuales se basan en la medición del fasor, que permite representar la amplitud y la fase de una señal sinusoidal como un número complejo, brindando un medio sencillo para

analizar circuitos lineales excitados por fuentes senoidales. Las unidades de medición fasorial PMU (del inglés, Phasor Measurement Unit) son dispositivos desarrollados y comercializados desde la década de 1980. Estos son capaces de representar en forma fasorial la tensión o la corriente, permitiendo definir el estado de la red de potencia mejorando las prestaciones de ésta (Lozano et al., 2012). De cualquier forma, para obtener esta valiosa información sobre la dinámica de los sistemas de potencia, es necesario un amplio número de PMU conectadas a la red eléctrica, las cuales son costosas de fabricar y mantener.

Por otro lado, para medir la frecuencia y obtener los fasores de forma sincronizada se incorporan técnicas de sincronización con sistemas de posicionamiento global GPS (del inglés, Global Position System) (Dana & Penrod, 1990), los cuales brindan la oportunidad de monitorear dichos valores en tiempo real en un área amplia.

En particular, cuando las PMU están sincronizadas con GPS se denominan sincrofasores, los cuales se encuentran definidos en la norma C37.118 (IEEE Standard, 2011) que establece las mediciones de fasores sincronizados usados en aplicaciones del sistema de potencia y métodos para cuantificar y garantizar las mediciones (Schweitzer & Whitehead, 2017).

Los sincrofasores proveen una nueva forma de analizar pequeñas y grandes perturbaciones en un sistema de potencia, posibilitando su aprovechamiento en aplicaciones de estimación de estado, control y protección, esquemas que han sido estudiados durante años aunque su implementación en sistemas reales es reducida actualmente (Quintanilla, 2005).

Es por ello que el equipo que se propone en este trabajo pretende ser económico, midiendo frecuencia, tensión, y la fase de la red sincronizada mediante GPS para luego ser enviada a un concentrador PDC (del inglés, PMU Data Concentrator) para su posterior análisis y comparación con mediciones de otros registradores del mismo tipo que estén monitoreando el estado del sistema de potencia. Un bosquejo de esta implementación se muestra en la Figura 1.

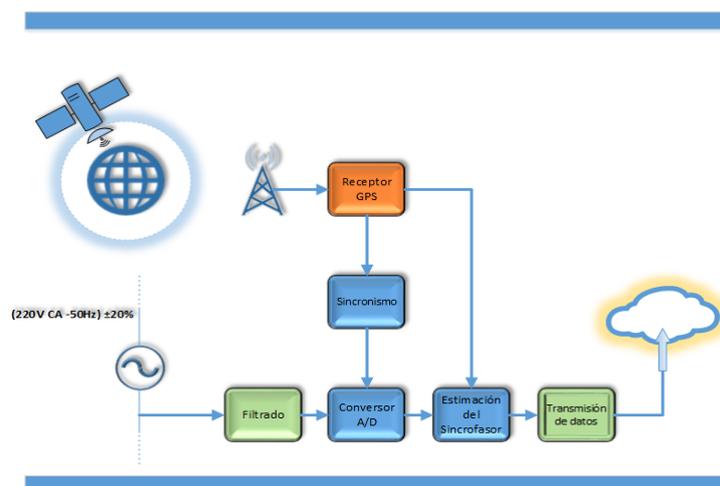


Figura 1. Esquema del PMU.

Estado del Arte

Desde hace ya varias décadas el registro de la frecuencia, potencia, tensión, y ahora los sincrofasores, han constituido un método apropiado para analizar las redes eléctricas. Sin embargo, en la actualidad, aparece en escena el concepto de las redes inteligentes (*smart grid*), que junto con la creciente generación de energía renovable se integra a la red eléctrica presentando un nuevo desafío para mantener la seguridad de los sistemas de potencia. De aquí surgen numerosas publicaciones respecto a las PMU, sincrofasores, las redes inteligentes y su integración para la seguridad del sistema eléctrico (Makarov et al., 2012, Messina et al., 2017, Shi et al., 2012, entre otros). Donde los autores recorren todos los aspectos relacionados a los algoritmos y técnicas para la concreción de las PMU, sincrofasores, el análisis de los datos que brindan estos equipos, como así también la aplicación a las redes inteligentes.

Propuesta

En cuanto a las prestaciones del equipo se establecen las siguientes consideraciones:

- Medir la frecuencia de la señal cada medio ciclo.
- Medir frecuencia con una resolución menor a 2 mHz entre 48 Hz y 52 Hz.
- Medir la amplitud con una resolución menor o igual al 2% entre 53 VCA y 264 VCA.
- La fase se obtendrá a partir del pulso por segundo entregado por un GPS y se calcularán 10 o 25 valores de fase por segundo. Los valores obtenidos tienen que estar sincronizados en tiempo con una precisión

menor o igual a 1 ms y cada uno de los valores obtenidos tendrá una estampa de tiempo que corresponde a la hora en coordenadas de tiempo universal UTC (del inglés, Universal Time Coordinated) en que se tomó la muestra.

- Estos valores deben ser visualizados en tiempo real y almacenados en dos tipos de registros. Uno considerado lento, con intervalos configurables de entre 1 y 60 s. El otro llamado rápido, que escribe los valores obtenidos cuando ocurre una perturbación, este registro rápido debe tener la capacidad de prefalla configurable (de 0 a 1000 muestras), y una de pos-falla también configurable (de 0 a 6000 muestras). La determinación de que hay una falla se realiza a través de alarmas configurables por límite. Esto es, se definirán valores como límites inferior y superior para la frecuencia de la señal de la red.

En consecuencia, para lograr un equipo económico, solo se realizará la medición de la frecuencia, tensión y fase sincronizada en un canal de tensión y se utilizarán métodos sencillos para el cálculo de estos valores a diferencia de los equipos comerciales que utilizan métodos más elaborados como pueden ser la transformada de Fourier discreta DFT (del inglés, Discrete Fourier Transform) y la transformada de Taylor-Fourier TFT (del inglés, Taylor-Fourier Transform), que surgen de un modelo de fasor constante y polinómico, respectivamente, o estimadores basados en un problema de optimización convexa semi-infinita CSIP (del inglés, Convex Semi-Infinite Programming), que además incluyen otros tipos de mediciones, así como también, más canales de medición. Por lo tanto, se busca que este equipo se conecte de manera sencilla en cualquier lugar, ya sea en una subestación, represa, o por qué no, al tomacorriente de un usuario final determinado, permitiendo de este modo tener muchos de estos equipos dispersos en lugares estratégicos de forma que contribuyan a la monitorización del estado del sistema eléctrico.

Desarrollo

Como se mencionó previamente la propuesta de este trabajo es el diseño y construcción de un equipo (prototipo) económico, capaz de funcionar como registrador de frecuencia, agregándole la capacidad de actuar como las PMU sincrofasor y de enviar los datos del sincrofasor a un concentrador PDC. Cabe aclarar, que si bien es posible calcular sincrofasores de tensión o corriente, para este prototipo solo se obtendrá el valor del "sincrofasor de tensión". En la corriente se suelen percibir distorsiones en la forma onda, más aún con niveles de tensión bajo, algo que para el método de detección de cruce por cero puede traer inconvenientes.

Elección de *Hardware*

Para la elaboración de prototipo se utilizó una placa de desarrollo FRDM-K64 (MCU MK64FN1M0VLL12), que posee una alta capacidad de procesamiento con posibilidad de realizar operaciones de punto flotante, incorpora también los periféricos adecuados de comunicación para este prototipo como son la conexión USB (del inglés, Universal Serial Bus) y Ethernet, un conversor ADC de 16 bits con entrada diferencial, apropiado para medir la tensión de la señal de entrada. También se utilizó una Raspberry PI 3a+ con una pantalla táctil LCD de 3.5 pulgadas como interfaz para el usuario, como dispositivo de sincronización se eligió un GPS - UBLOX 6, el cual se consigue fácilmente, además se agregaron circuitos para el acondicionamiento de la señal y detección de cruce por cero.

Medición de Frecuencia

Para la medición de frecuencia se usó un detector de cruce por cero ZCD (del inglés, Zero Crossing Detector), realizado con un circuito en configuración comparador. El tiempo transcurrido entre flancos se utiliza para obtener la frecuencia de la red los cuales se conectan a las entradas digitales con posibilidad de detección de flancos del microcontrolador MK64FN1M0VLL12 de la placa de desarrollo FRDM-K64.

Medición de Fase

Para la obtención de la fase se utiliza el reloj de tiempo real implementado por *firmware* y que es ajustado con la base de tiempo del GPS, esto es, se sincroniza y ajusta el reloj mediante uno externo con mejor precisión, para esto se utiliza el pulso por segundo PPS (del inglés, Pulse per Second) del GPS que tiene una precisión superior al reloj del microcontrolador.

La fase se obtiene cada 20 ms, y se calcula utilizando el último valor de frecuencia obtenido, junto con el valor del tiempo medido desde flanco ascendente de la señal de entrada al instante en que ocurre el N.20 ms (con N desde 0 a 49) de cada segundo. Este tiempo multiplicado por la frecuencia de la señal y 360° nos da la fase instantánea respecto del reloj sincronizado en la que ocurre el flanco ascendente para cada período de 20 ms.

Luego, este valor de fase se ajusta según la norma establecida por la IEEE para sincrofasores (IEEE Standard, 2011). La Figura 2 se extrae de la norma IEEE, en donde se indica la manera establecida para calcular la fase. Como se ve en la norma se mide el ángulo respecto a la cresta del semiciclo positivo de la señal.

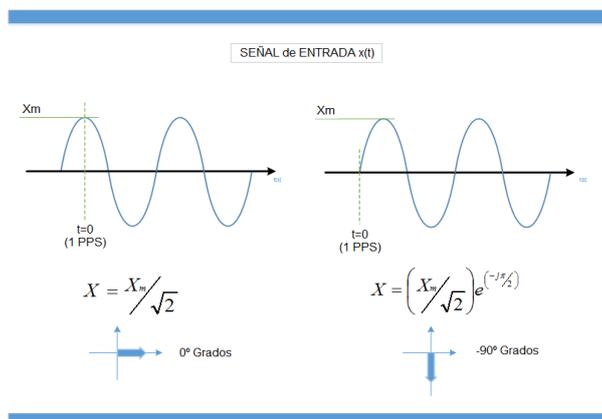


Figura 2. Convención para el cálculo del fasor IEEE (IEEE Standard, 2011).

Sincronización del tiempo

Para sincronizar el tiempo y de esta forma ajustar el reloj de tiempo real implementado en el microcontrolador se hace uso del GPS, este último envía mensajes una vez por segundo, entre estos mensajes se filtran dos que tienen la información necesaria, el mensaje que contiene los datos de posicionamiento y estado GGA y el de tiempo ZDA del protocolo de la Asociación Nacional de Electrónica Marina NMEA (del inglés, National Marine Electronics Association) (Betke, 2001). Estos mensajes nos brindan información respecto al estado, posicionamiento y hora del GPS. Del mensaje GGA se obtiene si el GPS está en modo FIX, modo que indica que el GPS encontró la cantidad de satélites adecuados para asegurar una hora y posicionamiento estable, y del mensaje ZDA se obtiene la hora correspondiente al PPS actualmente entregado por el GPS.

Si el GPS se encuentra en las condiciones adecuadas, es decir, asegura un valor de tiempo sincronizado, entonces el PPS se utiliza para medir la frecuencia real del cristal que se encuentra conectado al microcontrolador y también, para ajustar el reloj configurado.

Firmware y Software

La construcción del *firmware* para el microcontrolador fue pensada utilizando una arquitectura de 3 capas (Código de Aplicación - *Middleware* - *Drivers* - *Hardware*).

Los *drivers* y *middleware* para la configuración de todos los componentes utilizados del microcontrolador se obtuvieron de la versión 2.9.0 del conjunto de librerías para desarrollo, conocidas también como SDK (del inglés, Software Development Kit), disponibles para el entorno de desarrollo integrado MCUXpresso de NXP. Con estas librerías se realizaron todos los componentes del *firmware*.

Los valores adquiridos y calculados de tensión, frecuencia, y fase en el microcontrolador se envían a la Raspberry PI donde son visualizados y evaluados para detectar niveles límites, realizar los registros correspondientes, y empaquetarlos para ser enviados a un PDC, esto último siguiendo la norma IEEE para sincrofasores (IEEE Standard, 2011) que establece el formato para los paquetes y la frecuencia en la que son reportados, el cual puede ser configurado en 10, 25 o 50 paquetes por segundo FPS (del inglés, Frames per second) según se indica en la norma. Esta norma también establece diferentes tipos de mensajes, de los cuales se usan solo dos, el paquete de configuración 2 y el paquete de datos.

El *software* implementado fue pensado para utilizarse tanto bajo el sistema operativo Windows como en Linux. Para eso se utilizó como plataforma a Qt, el cual es un entorno de desarrollo de *software* de plataforma cruzada (o multiplataforma) para la producción de aplicaciones de escritorio, celulares, tabletas, y sistemas embebidos. Qt, que hoy en día es mantenido por *Qt Group Plc*, nos permite traducir y compilar el código con mínimos cambios entre los distintos sistemas operativos.

Ensayos

A continuación, se presentan una serie de pruebas para validar el correcto funcionamiento del equipo. En el ensayo para verificar la medición en frecuencia se inyectó una señal senoidal con distintos valores de frecuencia.

En primer lugar se ingresa una señal de 50.000 Hz. Luego se cambia la frecuencia en ± 1 mHz para obtener 50.001 Hz y 49.999 Hz. La Figura 3 muestra las imágenes de la medición del equipo para los valores de frecuencia propuestos.



Figura 3. Ensayo frecuencia, (izq) 50.000 Hz y (der) 50.001 Hz.

Este mismo ensayo se realizó llevando la frecuencia inyectada a 52.000 Hz y 48.000 Hz, para después variar ± 1 mHz, y se obtuvieron resultados similares a los que se dieron para cuando se inyectaron 50.000 Hz, observando que el equipo puede discriminar adecuadamente 1 mHz en el rango de frecuencias de 48.000 Hz a 52.000 Hz.

Por otro lado, para verificar la sincronización y la medición de fase se montaron dos equipos registradores y se les inyectó, una señal de 50.000 Hz. Para este ensayo se necesitó también de un programa PDC que sincronice los datos recibidos. Debido a la escasa disponibilidad de software de este tipo en freeware (OpenPDC) y que estos no nos permiten tener una gráfica en tiempo real de los datos que llegan desde los equipos registradores, se decidió construir uno propio (denominado PDChge) para recibir la información de al menos dos registradores, para luego decodificar los mensajes según la norma IEEE para sincrofases, sincronizar los datos recibidos y graficarlos. Este programa nos permite ver la evolución de la frecuencia y la fase, y así calcular la diferencia de fase registrada, la cual se debe realizar en forma sincronizada. En primer lugar se sincroniza la fase de las señales generadas por el generador de señales en 0° , como se muestra en la Figura 4, donde se observa que la medición de la fase de ambos equipos registradores es prácticamente la misma, con una diferencia menor a 1° .

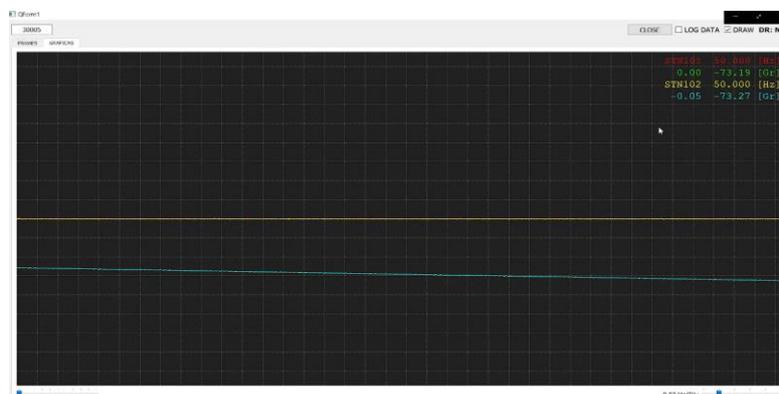


Figura 4. Señales sincronizadas con 0° de desfase en PDChge. (eje X = tiempo, eje Y = frecuencia y fase)

Seguidamente se realizó otro ensayo, variando la fase entre las señales generadas. En primer lugar se desfasa la señal de un canal en 1° y 30° , y luego se realiza lo mismo con el otro canal, de esta forma se busca observar que la diferencia de fase cambia de signo según sea el canal que se desfase. En la figura 5 se muestran las imágenes de los resultados obtenidos al variar la fase. La Figura 5a muestra la diferencia de 1° en la inyección de la señal y la Figura 5b muestra la diferencia de fase calculada de forma sincronizada de algunos ensayos propuestos (Véase los últimos valores de la derecha, los cambios anteriores se deben al ajuste de la nueva fase en el generador de señales).

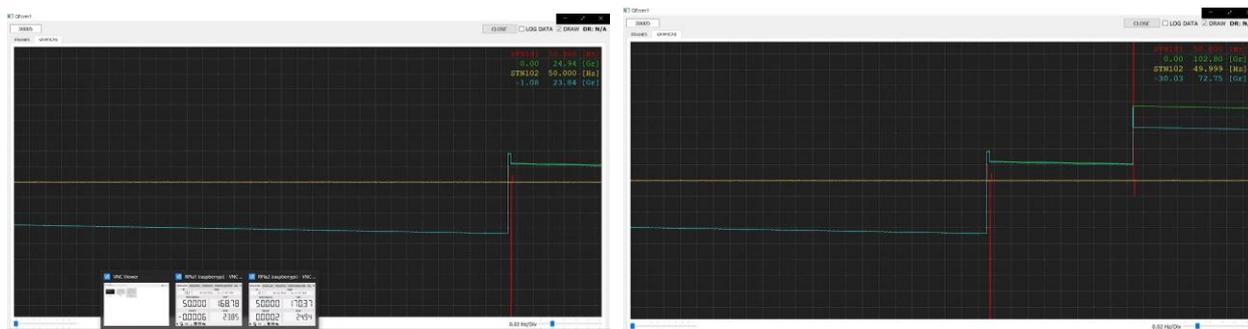


Figura 5. Señales sincronizadas desfasadas, (izq) 1 ° y (der) 30 °, en PDChge.

Conclusiones

El equipo registrador de frecuencia y sincrofasor diseñado y evaluado en los diferentes ensayos realizados, logró una precisión mejor a ± 2 mHz en todo en el rango de frecuencia desde 48 Hz a 52 Hz. Como sincrofasor con distintos desfases propuestos a dos equipos registradores sincronizados a los cuales se le inyecta la misma señal, se ve que la diferencia en la fase medida respecto al tiempo sincronizado es menor a 2° . Los ensayos de medición de tensión y registro ante perturbaciones de frecuencia resultaron satisfactorios alcanzando los requisitos propuesto para el prototipo, logrando mediciones con una precisión mejor al 2% en el valor de la tensión y almacenando información de perturbaciones de frecuencia. Esto es, obteniendo todas las muestras de pre-falla y pos-falla configuradas en el *trigger*, generando los archivos correspondientes de la perturbación.

El prototipo podría funcionar de forma autónoma sin necesidad de una mini PC, de hecho hace todos los cálculos de frecuencia y fase, solo falta agregar la generación del paquete para el sincrofasor y la comunicación vía Ethernet o WiFi para reportar los valores del sincrofasor a algún concentrador de datos. Esto último parece una solución adecuada y muy económica, la cual podría permitir colocar este equipo en muchos lugares y así obtener una mejor imagen en tiempo real del comportamiento del sistema eléctrico.

Referencias

- Betke, K. (2001). The NMEA 0183 protocol. USA: National Marine Electronics Association.
- Dana, P. H., Penrod, B. M. (1990). The role of GPS in precise time and frequency dissemination. *GPS World*, 1(4), 38-43.
- IEEE Standard Association. (2011). IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, in IEEE Std C37. 118.1-2011.
- Lozano, C. A., Ramirez, S. L., Castro, F. (2012). Unidades de medición fasorial (PMU). *El Hombre y la Máquina*, (38), 66-74.
- Makarov, Y. V., Du, P., Lu, S., Nguyen, T. B., Guo, X., Burns, J. W., Pai, M. A. (2012). PMU-based wide-area security assessment: concept, method, and implementation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1325-1332.
- Messina, F. J., Vega, L. R., Galarza, C. G. (2017). Estimación de Sincrofasores en Redes Eléctricas Inteligentes: de Modelos a Restricciones de Diseño. *Elektron*, 1(2), 79-90.
- Quintanilla, R. (2005, October). Sistemas de Transporte Inteligentes-Medición Sincronizada de Fasores. In *Congreso IEEE* (pp. 27-28).
- Schweitzer, E. O., Whitehead, D. E. (2009, March). Real-world synchrophasor solutions. In *2009 62nd Annual Conference for protective relay engineers* (pp. 536-547). IEEE.
- Shi, D., Tylavsky, D. J., Logic, N. (2012). An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1575-1583.
- Xu, C. (2006). *High accuracy real-time GPS synchronized frequency measurement device for wide-area power grid monitoring* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Zhang, L., Abur, A. (2012, May). Impact of tuning on bad data detection of PMU measurements. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies* (pp. 1-5). IEEE.