Aplicaciones de calidad de energía sincronizada

Bill Dickerson, P.Eng.

Introducción

Las mediciones de fasores sincronizados (sincrofasores), hechas a partir de unidades de medición fasorial o PMU (del inglés, Phasor Measurement Unit), han sido ampliamente aceptadas para mediciones de área amplia en la red eléctrica. Son importantes porque permiten comparar datos de diferentes ubicaciones como si hubiesen sido tomados por un solo instrumento, con todos los canales muestreados al mismo tiempo. Esto es posible por la sincronización de las PMUs usando un sistema de distribución de tiempo común, típicamente GPS pero también es posible usando métodos como protocolo de tiempo preciso IEEE-1588.

Tener los datos sincronizados es importante, porque permite medidas como las variaciones del ángulo de fase a lo largo de un área amplia. Este documento mostrará que dicha sincronización también es deseable para datos de calidad de energía, y de hecho es necesaria para mediciones donde los datos están siendo comparados o usados para cálculos y los datos se originan en lugares diferentes.

El estándar actual IEC 61000-4-30 es comúnmente usado cuando se hacen mediciones de calidad de energía, armónicos en particular. Este estándar fue escrito primeramente para determinar si se cumple con requerimientos legales de calidad de energía, y como tal se enfoca en medidas hechas en un solo lugar. Sí describe el significado de estampado de tiempo de las mediciones, para agregar secuencias de medidas, y de hecho impone requerimientos específicos para el método de medida. Veremos aquí que estos requerimientos no son adecuados para las mediciones de armónicas hechas en ubicaciones diversas, cuando una aplicación intenta hacer cualquier clase de determinación del desempeño de la calidad de energía en un área amplia.

Observaciones similares pueden hacerse para otras medicones de calidad de energía, tales como flícker. Las mediciones de flícker se especifican en IEC 61000-4-15, y mientras este estándar sugiere un diagrama de bloque para el medidor de flícker, no impone unos requerimientos normativos para los métodos. De hecho, cualquier método que cumpla con los estándares de desempeño, puede ser usado. Esto provee flexibilidad adicional, pero el hecho fundamente al todavía permance: se requiere sincronización para un área amplia.

Medidas sincronizadas vs estampado de tiempo

'Mediciones sincronizadas' son: medidas hechas sustancialmente en momentos idénticos en tiempo en diferentes ubicaciones o equipos. Por instancia, la PMU (de acuedo al estándar IEEE C37.118.1) genera una estimación de fasores exactamente al tope del segundo (por ejemplo, estimando los parámetros de la señal por xx.00000 veces por segundo), .y cada T_S después. $T_S = 1/F_S$, donde F_S es la razón de repote, típicamente igual a la frecuencia nominal del sistema, o la mitad de ella (por ejemplo, 25 ó 50/s para un sistema de 50 Hz, y 30 ó 60/s para un sistema de 60 Hz). Esto se hace usando la data recogida en un intervalo controlado por un reloj sincronizado con una fuente de tiempo de estándar reconocido, típicamente UTC. Dado que todos las PMUs están sincrionzadas a la misma fuente de tiempo, harán medidas al mismo punto de tiempo con una pequeña tolerancia. Esta pequeña tolerancia es típicamente mejor que un microsegundo.

Cuando se hacen c§lculos de esta forma, por ejemplo a 50 Hz y 50 reportes por segundo, la PMU provee una estimaci· n precisa, sincronizada, de la magnitud fundamental y §ngulo de fase por tantas veces xx.0000, xx.0200, xx.0400...xx.9800, para todos los segundos xx. Esto es cierto para todas las PMUs, as² configuradas , en todos los puntos en la red. As², la data puede ser colectada en una locaci· n central, y entonces hacer comparaciones y an§lisis. En esencia, el grupo de PMUs haciendo esas medidas pueden ser vistas como un solo instrumento, haciendo todas sus medidas un momento de tiempo id®ntico.

Las mediciones de calidad de energ²a pueden ser hechas de esta forma tambi®n, pero requieren un instrumento dise¶ado para trabajar de estar forma. Un analizador de calidad de energ²a, a¼n si est§ sincronizado al UTC, no hace esto. De hecho, si ® implementa IEC 61000-4-7, o si no lo hace. El requerimiento de sincronizaci· n en IEC 61000-4-30 permite un error hasta de un ciclo a – 20 ms en 50 Hz y 16.667 ms en 60 Hz – porque cada medida comienza al cruce por cero de la componente fundamental de esa locación. Como las medidas de PMU claramente muestran, el ángulo de fase de la fundamental varía a lo largo de la red. Las medidas de ángulo de armónicos, por ejemplo, hechos con este nivel de sincronización pueden ser no útiles para la comparación entre múltiples analizadores de calidad de energía (PQ).

Muchos equipos hacen medidas usando lo que en efecto son métodos libres, y luego aplican estampado de tiempo al resultado. Esta aproximación es problamente adecuada cuando se comparan datos de calidad de energía agregados y entre una distribuidora y el cliente por regulación o cumplimiento de contrato, pero no es suficiente para las aplicaciones discutidas aquí.

Introducir la noción de mediciones de calidad de energía sincronizadas con precisión hace posible la captura y análisis del comportamiento dinámico de los disturbios de calidad de energía a ratas más rápidas que la práctica actual, de 10 a 50 ó 60 mediciones por segundo, o incluso más rápidas.

IEC 61000-4-7

Este estándar ha estado en el área por muchos años, y de hecho fue previamente conocido como IEC 1000-4-7, antes que IED renumerara las estándares. Versiones anteriores de este estándar vagamente ajustaban requerimientos del desempeño, y no estandarizaban en particular un método. Esta aproximación permite la mayor flexibilidad y provee la oportunidad que nuevas técnicas sean desarrolladas tomando tecnología de punta.

Versiones posteriores de este estándar, sin embargo, se enfocan en obtener mediciones comparables usando diferentes instrumentos para especificar que las medidas de armónicos pueden usar una ventana de datos nominal de 200 ms, con una ponderación uniforme (ventana rectangular). Esta ventana requiere comprimir ya sea 10 (50 Hz) o 12 (60 Hz) ciclos completos de la frecuencia de la señal de entrada, realmente esto va a ser sólo 200 ms exactos cuando cuando la frecuencia de la potencia se la nominal. Además requiere que la primera ventana de medida de una secuencia debe iniciar en el primer cruce de cero de la frecuencia fundamental siguiendo el tope del segundo; como hemos estado viendo con sincrofasores, las ventanas tan definidas no coinciden en locaciones diferentes.

El propósito de una ventana de 10 ó 12 ciclos con ponderación rectangular es para minimizar el error que resulta en el análisis FFT del fenómeno de Gibbs, cuando el número de ciclos en un intervalo no sea un entero. Este error causa la emisión de un espectro de señales y complica el análisis de resultados.

Implementado perfectamente, este método puede funcionar bien. Sin embargo, bajo condiciones dinámicas este método con frecuencia falla al seguir la frecuencia de la señal perfectamente (si profundiza hay cualquiera de estas cosas - ¿cuál es la frecuencia cuando está cambiando?). El resultado es que la emisión de espectros todavía ocurre. Además, los armónicos en el sistema de potencia no son múltiplos exactos de la fundamental – Ellos pueden ser el resultado de mecanismos (tales como motores subsíncronos) que crean "amónicos muy próximos: éstos rotan en fase relativa a el armónico. Otros métodos reducen el problema de la emisión de señales, y cómo veremos estos métodos son más adecuados para análisis de calidad de energía sincronizada.

La noción de sincronización fue introducida en IEC 61000-4-30 hace muchos años con el ánimo de hacer una comparación entre los resultados medidos con dos intrumentos posibles. Esto fue un aspecto serio en aquellos días. En esencia, los dos instrumentos fueron supuestos para hacer mediciones en los mismos ciclos y dado que la data puede ser agregada por más de 3 segundos y 10 minutos, los errores de sincronización de 20ms (un ciclo de línea) no son aceptables. Esto fue una mayor mejora en esta época.

Estos requerimientos del IEC 61000-4-7 y -4-30 fundamentalmente se excluyen haciendo mediciones de calidad de energía verdaderamente sincronizadas (aun si la sincronización del equipo es significativamente mejor que un cliclo de línea). Como la experiencia con PMUs lo ha mostrado, la frecuencia varía en diferentes puntos de la red. Adicionalmente, aún cuando la frecuencia es lo suficientemente estable, que pueda ser considerada constante, (esto es, para un período de tiempo normalmente pequeño), el ángulo de fase es diferente para diferentes locaciones. Las medidas sincronizadas para los cruces de cero y usando un número entero de ciclos serán inevitablemente hechas sobre intervalos diferentes y diferentes ubicaciones.

El resultado final es que el 61000-4-7 es probablemente aceptable para aparatos cuya función es determinar el cumpliento de requerimientos regulatorios para calidad de energía en un solo punto de la interconexión. Su uso es limitado, prácticamente no existe, para mediciones que son usadas para entender el desempeño del sistema a lo lagro de un área extensa, donde analizadores de PQ separados son necesarios para hacer las medidas.

Modificationes a 61000-4-7 y -4-30 para aplicaciones síncronas

Hemos implementado un método en nuestro analizador PMU/PQ Power Sentinel Modelo 1133A que evita los problemas causados por tener un número no entero de ciclos en las ventanas de medida, y nos permite usar métodos de medidas realmente sincronizadas. De hecho, nosotros usamos el mismo muestreo de datos que usamos para las mediciones de PMU. Estos muestreos serán tomados al mismo instante, a lo largo del área de medida y aún alrededor del mundo, en cada uno y todos los aparatos PMU/PQA (con un error muy pequeño, de ~200 ns o menos).

Arbiter Systems, Inc. · E-mail: intl@arbiter.com · Internet: https://www.arbiter.com
Latin Americal: Cell: (507) 6522 5290 · Europe: +31 6 54 99 77 53

El 1133A usa sobreposición, ventanas de datos de 100ms (cada una conteniendo 1024 muestras), usando ponderación Hann de la ventana de datos. La ventana Hann es una ventana coseno elevado:

$$W = 0.5 - 0.5\cos(2\pi \cdot x);$$

donde x varía de cero a uno desde el inicio hasta el final de la ventana. Esta ventana tiene la característica deseable que cuando resultados de mediciones subsecuentes son agregados, cada muestra de datos tiene unidad de ponderación en el resultado de la suma, excepto para los 50 ms en el inicio y final de la primera y última ventana. Las colas iniciales y finales tienen la misma forma que la función de ventana original: un medio coseno, para la ventana Hann.

El Dr. Andrew Roscoe llama a este proceso 'teselado'. Este término es tomado de mosaicos, y en gráficas de cómputo cuando se colocan recuadros de imágenes para crear ilusión de 3D. Esto involucra la construcción de una medición más larga añadiendo resultados junto a una serie de pequeñas medidas. Este proceso puede ser aplicado repetidamente, por ejemplo, para agregar datos sobre ventanas de 3 segundos y de 10 minutos. Las ventanas usadas para desarrollar teselado requieren ciertas propiedades. Tales ventanas mantienen la característica deseable de teselado sobre intervalos más y más largos, cuando los datos son agredados apropiadamente.

La ventana rectangular o uniforme, y una cascada (convulsión) de dos ventanas rectagulares -la ventana triangular o Bartlett, también el filtro clase P en el estándar IEEE C37.118.1 para sincrofasores – son otros ejemplos de funciones de ventanas teniendo esta propiedad. Las ventanas que comparten esta propiedad tienen una expansión Fourier en la cual todos términos de frecuencia de orden par tienen magnitud cero, excepto para el término DC. Términos de orden par reenforzan en sí una agregación, donde los términos impares se cancelan; así como lo hace la Hamming y Bartlett, pero no la Blackman -incluyen un componente de segundo orden que crea una onda de la ponderación de los puntos cuando se agregan.

Otra forma de decir esto es que para cada punto de la función de ventana W(n) for n = 0...N/2, if W(n) + W(n +N/2) = K con K una constante (idealmente 1), luego la ventana tiene propiedad de teselado. Para una función de ventana a ser usada con la FFT, N es generalmente una potencia de 2; pero que esto no es requerido para que esta observación sea cierta. Varias ventanas no tienen la propiedad de teselado; pero son muchas las que sí.

En el Modelo 1133A, proveemos resultados agregados de 20 ventanas una vez por segundo, iniciando con el inicio en el tope del segundo previo y terminando con uno centrado en el tope del segundo actual. (Estos resultados pueden ser agregados adicionalmente en aplicaciones de software). La agregación es desarrollada por el promedio de la raíz cuadrada del módulo de cada armónico en juego de 20 datos. El ángulo de fase absoluto (es decir, relativo al tope del segundo UTC, como para sincrofasores) está determinado como el argumento (arcotangente) del dato para la ventana centrada al tope del segundo actual. Un total de 600 números se proveen cada segundo: la fase absoluta y la magnitud para cada uno de los 50 armónicos, para todos estos seis canales. (La fase relativa entre la tensión y corriente pueden ser fácilmente encontrada por la substracción de la fase del armónico de tensión y corriente. La fase absoluta no puede ser encontrada usando lo opuesto, como con un analizador de estándar de calidad de energía.)

La ventana Hann (como la mayoría de las funciones excepto la ventana rectangular o uniforme) disminuye a cero (o para algunas ventanas, a un número pequeño) al final de la ventana. Esto es lo que minimiza el problema de la emisión de la señal causado por un número no entero de ciclos fundamentales en la ventana de medición. La emisión resulta en efecto de la trasiente causda por el salto el cual aparecería cuando la ventana de datos se repite. La FFT en efecto presume que la información la ventana es un ejemplo representativo (periodo) de una secuencia periódica que inicia en la infinidad negativa y continúa a la infinidad positiva. Si los puntos al inicio y al final de la ventana no conectan parecidamente, se genera un paso, y este paso tiene un espectro de frecuencia de dc al infinito. Estos componentes de frecuencia adicionales causan la emisión del espectro como aparece a la salida del análisis espectral de Fourier.

La ventaja de usar ponderación con una función de ventana es que el mayor lóbulo del espectro resultante es ampliado. Esto es una consecuencia de todos los filtros de ponderación, y de hecho entre más grande sea la supresión de la emisión de señal debido al fenómeno de Gibbs provisto por una función de ventana, más es ampliado el lóbulo principal del espectro resultante. Una sumatoria simple junto con el total energía en el espectro ampliado resultante puede compensar esto. Esto es tres bins en el caso de la ventana Hann. O la función de transferencia exacta para la función de ventana a frecuencias nominales puede ser determinada y usada para una corrección más precisa. Sin embargo, los requerimientos de precisión de armónicos impuestos por los estándares (5% de la magnitud de armónico) no requieren este nivel de corrección, y el método más simple es suficiente. Estos estándares son adecuados igualmente en este asunto en particular, dado que en el sistema de potencia, las magnitudes de armónicos son bastante variables sobre las bases segundo a segundo.

Para la ventana Hann, una señal al centro del bin de frecuencia (es decir, una señal de 50 Hz para una ventana de 100 ó 200 ms) será emitida en tres bins: la esperada más las dos adyacentes. La ventana Blackman comúnmente usada, la cual tiene aún más rechazo de emisión de señal, emite el espectro en cinco bins. Otro, filtro menos común tal como Nutall 4-términos (7 bins), provee aún más salida de rechazo de banda con el costo de una señal de emisión más amplia. .

Para nuestros propósitos, determinamos que la ventana Hann es la óptima para esta aplicación, porque provee suficiente rechazo de los efectos de emisión debido al fenómeno de Gibbs, y provee beneficio adicional de ponderación uniforme de las muestras de entrada durante la agregación; las ventanas Blackman y Nutall no lo hacen.

Note que también la medición de interarmónicos es significativamente mejorada con esta aproximación, dado que estas señales no son armónicamente relacionadas a la fundamental y el método de número entero de ciclos fundamentales en general no proveerá reducción de la emision de espectro de interarmónicos no relacionados. Este efecto es bastante severo para la ventana uniforme. La ponderación con una función de ventana trabaja probablemente bien para todas las señales, sin importar su relación a la frecuencia fundamental o al ancho de la ventana.

Con esta modificación a los requerimientos de IEC 61000-4, podemos proveer medición de armónicos que tengan la misma característica como medidas de PMU: hechas para ventanas centradas exactamente al tope del segundo a partir de cada 50 ms. Esto será cierto, dentro de los límites de desempeño de sincronización del Modelo 1133A, para todos los equipos localizados en cualquier parte del mundo. Además, la medición de armónicos cumplen con el IEC 61000-4 en todo lo relacionado al desempeño.

Flícker (IEC 61000-4-15); Sags/Swells/Interrupciones (IEC 61000-4-30)

Todo lo dicho aquí acerca de la teoría de las mediciones, y lo que describimos abajo acerca de las aplicaciones, también aplica para flícker y si vamos al caso, a sags, swells e interrupciones. Estas mediciones deben ser hechas usando data sincronizada, y algoritmos de medición deben preservar esa sincronización. Hemos seguido esta aproximación en nuestro Modelo 1133A, y sugerimos que otros fabricantes deban promover la misma interoperabilidad.

El flícker es medido usando un modelo complejo para estimar la molestia humana causada por las variaciones de la amplitud de la señal de potencia. Este modelo, especificado en 61000-4-15, incluye respuesta de impulso inifinito (IIR) que tiene tiempos de decaimiento grandes; sin embargo, hemos encontrado que los datos de percepción instantánea del flícker pueden ser significativamente comparados entre instrumentos y locaciones usando muestras de datos sincronizacos. A pesar de la ofuscación introducida por el modelo relativametne complejo de procesamiento de señal, mejoras significantes resultan de la sincronización.

Sags, swells, e interrupciones, como armónicos 61000-4-7, también usan cruces por cero para iniciar la medición. La definición de estas deficiencias no fácilmente permiten ventanas de medición idénticas a lo largo de la red, peor usando muestras sincronizadas permite determinación precisa del tiempo de orcurrencia de los sags, swells e interrupciones.

Aplicaciones

Propagación de los disturbios de calidad de energía

Existe el deseo de entender cómo se propagan los disturbios de calidad de energía a través de la red eléctrica, de ambas formas: localmente y en un área amplia. Esto es básicamente una medida de la transimpedancia, por ejemplo: el radio de una tensión medida en una ubicación remota, causada por una corriente inyectada en un determinado punto:

$$Z_T = \frac{V_{meas}}{I_{inj}}$$

Para hacer esta medición con precisión, ambos: la corriente inyectada y la tensión resultante (los cuales son cantidades complejas, es decir, tienen magnitud y fase) deben ser medidas en el mismo intervalo, usando la misma escala de tiempo. Esto requiere medidas sincronizadas. Estas mediciones pueden ser hechas por cualquiera de los disturbios descritos anteriormente: armónicos, flícker, y sag/swells/interrupciones. (Note que el Arbiter 1133A provee medidas de flícker en ambos canales: corriente y tensión – el estándar aplica solamente para mediciones de tensión; pero con la medición de flícker en corrientes (cargas) inducidas, este mismo método puede aplicarse al flícker también, habilitando medición de transimpedancia.)

Muchas consideraciones prácticas son probables para adentrarnos en el problema cuando se hacen estas medidas. Especialmente, el desarrollo de un ANOVA (análisis de varianza) puede, con bastantes variables independientes y suficiente información, separar las varias contribuciones de calidad de energía de diferentes fuentes en la red. Está por verse cuántos diferentes puntos de medición serán requeridos, y por cuánto tiempo dura un intervalo de observación. Sin embargo, con mediciones sincronizadas existe la posibilidad de separar los efectos.

Arbiter Systems, Inc. · E-mail: intl@arbiter.com · Internet: https://www.arbiter.com
Latin Americal: Cell: (507) 6522 5290 · Europe: +31 6 54 99 77 53

Otra contribución potencial de las medidas sincronizadas es que los métodos de auto y correlación cruzada pueden ser usados si los datos son medidos usando números complejos (es decir, incluyendo ángulo de fase - no simples magnitudes). Mediciones complejas requieren sincronización; mediciones no sincronizadas no proveen información de fase útil. Las técnicas de correlación cruzada pueden proveer más poder que los métodos ANOVA de estadística tradicional.

Estimación de impedancia de línea

La estimación de impedancia de línea es una parte útil de la comprensión de cómo se propagan los disturbios de caldiad de energía. La impedancia de la línea puede ser estimada a la frecuencia fundamental usando mediciones de PMU, pero ¿qué se puede decir de las frecuencias armónicas? Claramente la impedancia puede ser muy diferente a esas frecuencias más altas que la fundamental, si por ninguna otra razón que en la mayoría de los casos la impedancia de línea es dominada por la inductacia de los cables de las líneas de transmisión, y la reactancia de esta inductancia se incrementa con la frecuencia. Sin embargo, hay otros efectos que mantienen esta relación de ser una linear simple, tal como contribuciones de la capacitancia inter-cable de cables subterráneos, bancos de capacitores de gran tamaño, y otras compensaciones de VAR y equipos controladores de la estabilidad de la tensión, para nombrar algunos.

La impedancia de línea también puede ser calculada haciendo mediciones de puntos separados geográficamente. Sin embargo, esto solo es posible si los valores complejos (tensión y corriente, posiblemente también flujos de potencia) son hechos usando una referencia de tiempo consistente, así que las diferencias de fase resultantes son significantes. Para frecuencias armónicas, este requerimiento es aún más crítico que para la fundamental: un error de tiempo resultante en un error de fase de un grado de la fundamental (medible pero probablemente tolerable) causará un error de 50 grados en la armónica 50 – pasándolo en todas las mediciones pero no útiles. Una imprecisión de 200 ns producirá una imprecisión de ángulo de fase adicional de 0.18 grados a 2.5 kHz, la 50th armónica de 50 Hz. Este nivel de desempeño es más necesario si mediciones útiles van a ser hechas en estas frecuencia de armónicos. (Este requerimiento también aplica a otros equipos de la cadena de medición, transductores de corriente y voltaje. Esto no es un requerimiento trivial, tampoco; aunque es la razón de creer que puede ser satisfecho a través una cuidadosa selección y posiblemente calibración de los transductores.

Claramente, para una estimación de impedancia de línea en frecuencias de armónico, las mediciones deben ser hechas con cuidado controlando la sincronización entre varios analizadores. Analizadores de calidad de energía de libre muestreo (o aquéllos sincronizados solamente al nivel requerido por el IEC 61000-4-30) proveerán resultados que son para todos los propósitos aleatorios (es decir, inservibles) cuando tratan de desarrollar la estimación de impedancia de línea usando mediciones de diferentes locaciones, o aún entre diferentes instrumentos en la misma locación.

Resumen

Este documento ha discutido por qué mediciones sincronizadas, como se practican ampliamente ahora en las unidades de medición de fasores (PMU), son también importantes para el análisis de la calidad de energía. Los estándares existentes son de alguna forma problemáticos en este aspecto, especialmente para armónicos donde, siguiendo con confianza el método especificado, excluyen el uso de técnicas apropiadas. Además, para todas las mediciones, los estándares IEC 61000-4 sugieren que una muy pequeña pérdida de tiempo de sincronización es aceptable, y muchos equipos presumiblemente no tienen un desempeño mejor que este requerimiento. Como demostramos, el requerimiento para mediciones precisamente sincronizadas en ubicaciones separadas geográficamentes, para aplicaciones tales como aquellas que discutimos aquí, es aproximadamente de cinco órdenes de magnitud más demandante que los estándares sugeridos (es decir, s 200 ns vs. 20 ms).

Este documento ha descrito los métodos desarrollados por Arbiter Systems, Inc. para desarrollar mediciones de calidad de energía sincronizadas usando métodos similares a aquéllos usados en las PMUs. Estos métodos necesariamente difieren de los estándares internacionales aceptados, pero las variaciones son justificadas por estas aplicaciones y no excluyen el cumplimiento con los requeriemientos de los estándares (solamente los detalles de los métodos de medición son diferentes).

Reconocimientos

Muchas gracias a Jean-Pierre Braun de METAS en Suiza, a Gert Rietveld y Helko van den Brom, ambos de VSL en los Países Bajos, y a Andrew Roscoe de la Universidad de Strathclyde en Escocia, por sus revisiones y sugerencias, las cuales ayudaron a mejorar este documento significativametne. Sus contribuciones son gratamente reconocidas.