

Mediciones de sincronismo GOOSE en una subestación IEC 61850 usando un analizador de señal híbrido y distribuido

Helgo Müller / Chris Viljoen / David Magongo, NamPower, Namibia

Resumen

En el entorno de protección, automatización y control, el sincronismo de las señales de control y medición es de suma importancia. Esto se refiere principalmente a crear instancias, transmitir, leer y responder a tales señales. Este sincronismo debe ser preciso y confiable, y requiere una coordinación cuidadosa a fin de eliminar cualquier ambigüedad en el diseño, operación, mantenimiento y localización de fallas de un sistema.

Con las soluciones basadas en IEC 61850, esta coordinación se ha convertido en una tarea muy interesante que también plantea algunos retos. Las señales se extienden a través del dominio físico (señales de tensión/corriente, contactos de relé, etc.), y del dominio virtual (GOOSE y SV). Ambos dominios tienen igual importancia y se influyen entre sí de manera directa e indirecta.

Además, hay que tener en cuenta factores como las variables e impredecibles cargas de la red, a veces incluso la falta de disponibilidad de secciones, conexiones deficientes, etc. Especialmente cuando nos aventuramos en territorios menos frecuentados, como la señalización distribuida geográficamente, los mensajes GOOSE a través de redes WAN o incluso VPN, los retos del determinismo y el sincronismo con los que encontramos son cada vez más complejos.

Aquí surge la pregunta: ¿cómo puede medirse y evaluarse correctamente el sincronismo en sistemas que van de unos pocos a centenares de dispositivos? Hay que capturar y analizar los parámetros de sincronismo tanto del dominio físico como del virtual, a menudo distribuidos a través de una multitud de diferentes ubicaciones de redes lógicas y eléctricas, lo que constituye un reto en sí mismo cuando se trabaja con sistemas distribuidos.

Este artículo se adentra en el campo de las mediciones híbridas y arroja algo de luz sobre el qué, el porqué y el cómo.

En conclusión, se realizaron y se analizaron mediciones de sincronismo de extremo a extremo. El método utilizado, aunque aún en su infancia y sin pulir, demostró ser eficaz y produjo una valiosa información sobre el desempeño de la red, cómo se propagan las señales, el determinismo, la robustez, el desempeño de ruta redundante, etc.

1 La cuestión del sincronismo

El sincronismo correcto de eventos y señales en una subestación eléctrica y en su entorno es de vital

importancia cuando de lo que se trata es de operar con seguridad y eficacia una red de transmisión eléctrica. En las subestaciones modernas basadas en la norma IEC 61850, la cantidad de este tipo de eventos y señales puede superar fácilmente las magnitudes que la observación y comprensión humanas pueden manejar y mantener.

Por tanto, ha sido necesario desarrollar métodos y plataformas que simplifiquen y (al menos en determinada medida) automaticen la recopilación, análisis, presentación y coordinación de eventos y señales en el dominio del tiempo. Este requisito se complica aún más por el hecho de que, con la norma IEC 61850, los eventos y señales pueden coexistir como entidades físicas (eléctricas) y como entidades virtuales (datos). Todos ellos contienen información importante unas veces estructurada y otras veces no. Hay que consolidar y relacionar correctamente entre sí estos bits y unidades especialmente con respecto a sus parámetros exactos de sincronismo.

2 ¿Por qué es importante el sincronismo?

Aunque es bastante obvio por qué es importante conocer, comprender y coordinar los parámetros exactos de sincronismo en una subestación, vale la pena analizarlo.

Lo primero en que pensamos, por supuesto, son las funciones de protección, control y automatización. Estas deben configurarse y probarse correctamente para que funcionen conjuntamente como un sistema en armonía. Su secuenciación, los tiempos de reacción y los límites de funcionamiento dependen todos en gran medida del tiempo.

Esta dependencia del tiempo también es algo que se tiene muy en cuenta en las pruebas de aceptación en fábrica. Tanto los proveedores como los clientes necesitan comprobar que se cumplen las especificaciones y los requisitos.

La detección de fallas es otro aspecto importante en el que la información sobre el sincronismo y también la sincronización exacta son significativas. Cuando las cosas empiezan a ir mal, hay que presentar y analizar correctamente la secuencia de eventos y señales para poder localizar las fallas.

Pero también hay necesidades más sutiles de información precisa y confiable sobre el sincronismo. El monitoreo de estado, por ejemplo, puede beneficiarse enormemente de datos precisos de sincronismo sobre el desempeño del equipo con el fin

de indicar los requisitos incipientes de mantenimiento o cuestiones similares.

3 Cómo capturar los datos del sincronismo

Como se indicó anteriormente, la captura de eventos y señales dentro del dominio del tiempo debe realizarse en las señales eléctricas y en las virtuales. Con las señales virtuales definidas por la norma IEC 61850, su captura en esencia significa capturar paquetes de red de datos.

Por lo tanto, en principio, se requiere un dispositivo que pueda

- capturar señales eléctricas analógicas y binarias
- capturar y analizar paquetes de datos
- poner una marca de tiempo en todas las señales y eventos a partir una fuente de tiempo extremadamente exacta, por ejemplo el Precision Time Protocol (PTP) de la norma IEEE 1588.

Para los fines de este estudio, se eligió el equipo DANE0 400 de OMICRON como un dispositivo adecuado. El equipo DANE0 400:

- captura paquetes de datos de red
- captura señales eléctricas analógicas y binarias
- utiliza PTP para la sincronización
- almacena los datos
- proporciona herramientas para analizar los datos y eventos sincronizados
- proporciona acceso a usuarios locales y en red
- puede proporcionar al usuario acceso en red sin interferir con la LAN de la subestación, por lo que no interfiere con otras comunicaciones críticas de la subestación



Figure 1: DANE0 400 de OMICRON

4 El banco de pruebas

Para conocer adecuadamente el equipo DANE0 400 y las tareas de medición que nos ocupan, se preparó un banco de pruebas en una estación de transmisión en el oeste de Namibia. Esta estación fue elegida específicamente porque forma parte de un sistema de

transmisión eléctrica que consta de cuatro subestaciones conectadas en anillo con Ethernet de fibra óptica formando un bus de estación distribuido, pero con todo el sistema a la vista desde una única red de estaciones. En la figura 2 se muestra un esquema de la interconexión de las estaciones. T1 se utilizó para configurar el equipo de prueba.

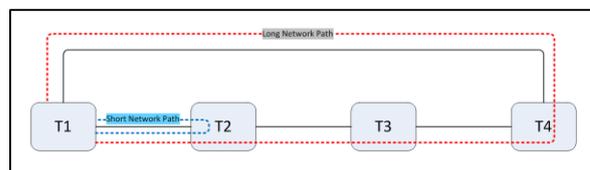


Figure 2: Rutas de la red de la estación

Esta configuración permite realizar pruebas localmente en T1, pero también brinda la oportunidad de probar los tiempos de propagación de la red a través de diferentes rutas, indicadas con "Ruta de red corta" y "Ruta de red larga".

El equipo utilizado para realizar las pruebas se muestra en la figura 3. Consiste en:

- Unidad IO: utilizada para conmutar un pulso de CC que finalmente dispara todo el evento de prueba.
- Un par de unidades ISIO 200: enlazadas en la red, para transportar la entrada desde la unidad IO a la primera unidad ISIO 200 través de la red y provocar un impulso de salida correspondiente en la segunda ISIO 200.
- DANE0 400: utilizado para registrar el pulso de entrada, el pulso de salida correspondiente, así como el tráfico GOOSE relacionado en la red.
- Computadora portátil: utilizada para disparar el pulso de la unidad IO y para el control y la interconexión del dispositivo DANE0 400 a través de la red.
- Conmutador Ethernet administrado: como parte de la infraestructura de red de la subestación, el conmutador transporta todo el tráfico relevante y proporciona los paquetes de datos a DANE0 400.

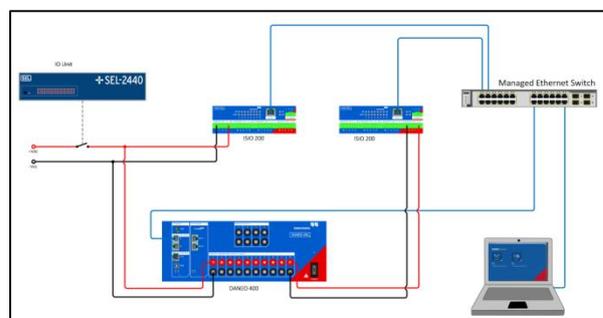


Figure 3: Equipo usado

En principio, esta configuración se puede dividir en dos capas, una capa eléctrica y una capa de red:

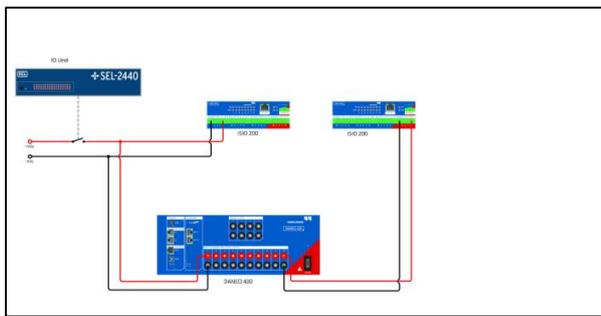


Figure 4: Capa eléctrica

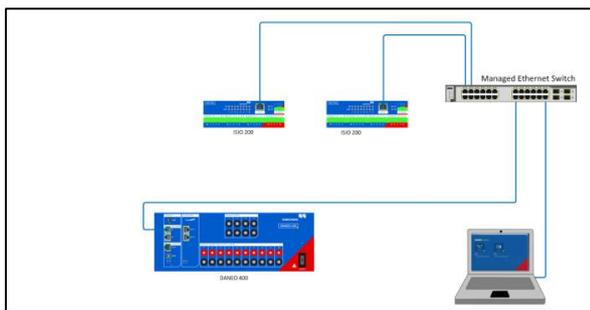


Figure 5: Capa de red

Como puede verse en la figura 4 y la figura 5, DANEO 400 monitorea ambos dominios, por lo que es un dispositivo de prueba totalmente híbrido.

5 Conceptos de medición

A pesar de que el énfasis de las mediciones se pone en el sincronismo (propagación y retardos de la señal) de los mensajes GOOSE específicamente, la configuración de la prueba captura inherentemente el sincronismo del procesamiento de señales y de la respuesta del dispositivo. Se demostró que esto era beneficioso para el estudio especialmente cuando se tiene en cuenta la viabilidad de aplicar los hallazgos en sistemas de protección, automatización y control (PAC) reales.

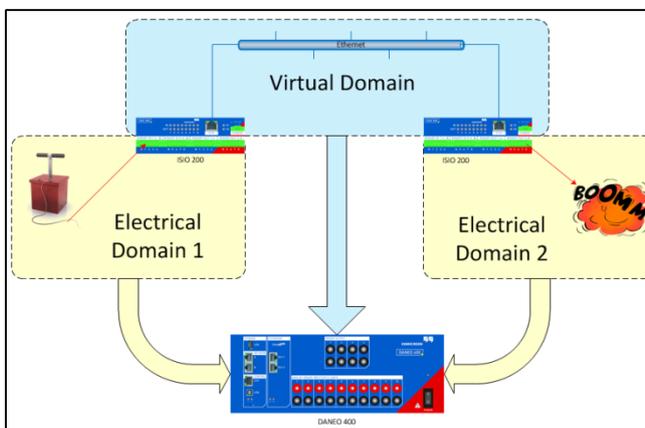


Figure 6: Diferentes dominios: eléctrico y virtual

El desafío es medir los tiempos de los estímulos comparados con los de respuesta en diferentes dominios (figura 6), es decir, los dominios eléctrico y virtual (red). Como ya se ha indicado, DANEO 400 es un dispositivo especialmente diseñado para el análisis de sistemas de esta naturaleza.

Resumiendo, la información de sincronismo obtenida es (de la figura 7):

- Tiempo entre el mensaje GOOSE publicado y el mensaje GOOSE recibido, t_{G-A} hasta t_{G-B} igual a Δt_G (retardo de propagación de la red),
- El sincronismo del "dominio eléctrico", Δt_{E-G} , es la suma de:
 - El impulso eléctrico hasta el mensaje GOOSE publicado, t_{E-A} hasta t_{G-A} (tiempo de procesamiento del dispositivo),
 - Mensaje GOOSE recibido hasta la salida/respuesta eléctrica t_{G-B} hasta t_{E-B} (tiempo de respuesta del dispositivo),
- De forma inherente, toda la respuesta del sistema es una combinación de la "propagación eléctrica" (retardos de la salida de arranque/contacto de la bobina del relé electromecánico, etc.) y la propagación de la red, t_{E-A} hasta t_{E-B} igual a Δt_E (respuesta del sistema).

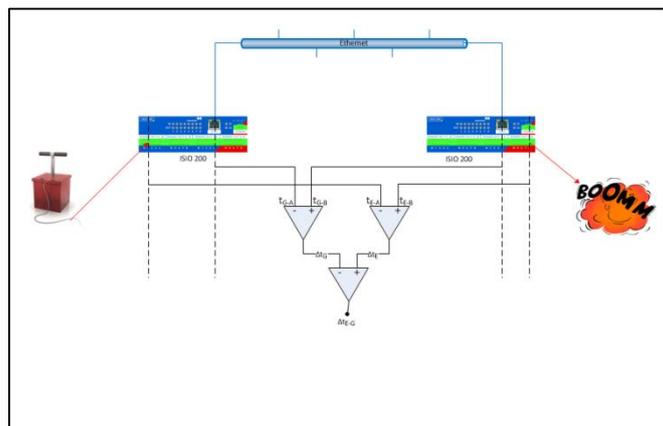


Figure 7: Sincronismo conceptualizado

6 Escenarios de prueba

Invariablemente, los sistemas PAC pueden considerarse como sistemas de tipo "local" o "distribuido", es decir, sistemas que comparten una única ubicación geográfica o red o que están distribuidos en varias ubicaciones geográficas o redes. Afortunadamente la separación geográfica no implica necesariamente la segregación de la red. El primer escenario de prueba descrito aquí es un sistema "local", mientras que el segundo escenario es una combinación híbrida de los dos tipos de sistemas, una red individual/local y geográficamente distribuida.

El escenario de prueba "local" se representa en la figura 8. Esta prueba se realizó en una sola subestación y todos los impulsos y respuestas

medidos fueron capturados desde dentro del sistema PAC de la subestación real puesta en servicio. Sin embargo, en un esfuerzo por lograr la mínima interferencia con el sistema PAC se decidió conectar dos dispositivos ISIO 200 de OMICRON al sistema de la subestación y la infraestructura relacionada (tanto la red como la planta física) para proporcionar los impulsos y respuestas de prueba (figura 3).

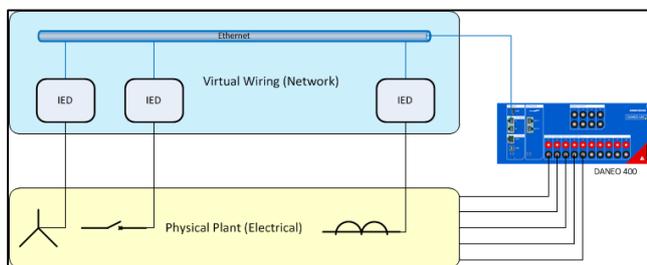


Figure 8: Escenario de prueba "local"

Para el escenario de prueba "distribuido" (figura 9) fue necesario que el equipo de prueba estuviera configurado simultáneamente en la primera subestación (utilizada en el escenario de prueba "local") y en una segunda subestación a aproximadamente 20 km de la primera. Esto requería configurar el acceso remoto al equipo de prueba en la primera subestación. De nuevo y como para el escenario de prueba "local", se consiguió una intrusión mínima en el sistema mediante el uso de los dos dispositivos ISIO 200 con la excepción de que se utilizó un solo dispositivo por subestación para interconectarse con la planta física y virtual.

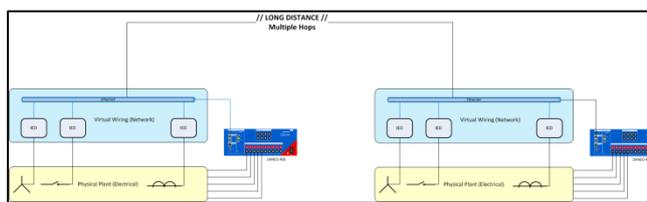


Figure 9: Escenario de prueba "distribuido"

7 Mediciones y resultados reales

Los resultados obtenidos para el escenario de prueba "local" fueron los siguientes:

- Impulso hasta GOOSE, t_{E-A} hasta t_{G-A} (tiempo de procesamiento de ISIO 200 incluido el antirrebote de entrada), $|t_{E-A} - t_{G-A}| = 1.125 \text{ ms}$ (figura 10)
- GOOSE hasta respuesta eléctrica t_{G-A} hasta t_{E-B} , $|t_{G-A} - t_{E-B}| = 4.275 \text{ ms}$ (figura 11)

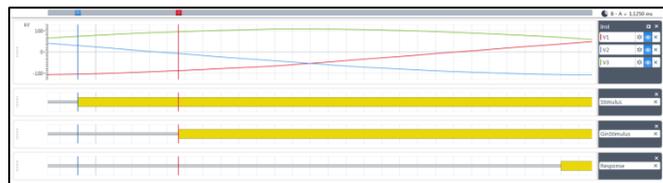


Figure 10: Impulso hasta GOOSE

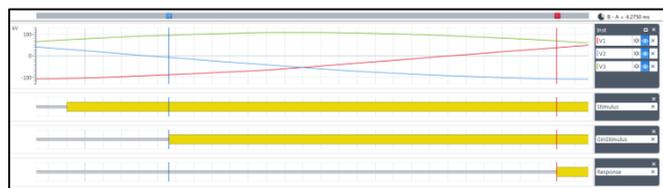


Figure 11: GOOSE hasta respuesta

El retardo de respuesta desde GOOSE hasta la respuesta eléctrica se ve influido principalmente por el tiempo de funcionamiento del relé de salida del contacto de salida de la unidad ISIO 200. No tuvimos en cuenta el efecto del retardo de propagación dentro de la red local, ya que ambos, DANE0 e ISIO estaban conectados al mismo conmutador de red y se suponía que el retardo de red local era insignificante.

El subsiguiente escenario de prueba "distribuido" demostró que esta suposición era válida. Se mostrará que el tiempo de funcionamiento del relé de salida de ISIO 200 constituye el grueso de la medida 4.275 ms y que el retardo de propagación GOOSE en la red local es insignificante en comparación con estos valores. Además, se observó un notable nivel de repetibilidad durante la prueba.

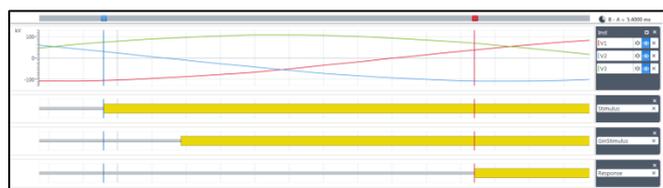


Figure 12: Respuesta total de todo el sistema probado

La figura 12 muestra el desempeño de la respuesta y el sincronismo de todo el sistema sometido a prueba, $|t_{E-A} - t_{E-B}| = 5.4 \text{ ms}$. Teniendo en cuenta que la mayoría de los retardos de sincronismo procede del funcionamiento del relé de antirrebote de entrada y salida de ISIO 200 y que los retardos de propagación de la red son insignificantes, es impresionante observar que se consiguieron los tiempos con regularidad en esta región. Esto produjo un desempeño satisfactorio del sistema.

En cuanto al escenario de prueba "distribuido", este brindó la oportunidad única de evaluar el sincronismo de los mensajes GOOSE y la propagación de la red en términos de cuándo se publica un mensaje GOOSE en una red y cuándo "aparece" ese mismo mensaje GOOSE en una segunda red

(distante). Para esta medición se utilizó la función de medición de retardo de propagación de DANE0, donde cientos de estas mediciones se combinan en un histograma. Es importante tener en cuenta que también para esta prueba era crucial tener una fuente de sincronización estable, precisa y confiable en ambas ubicaciones. Para lograr este objetivo se utilizó el reloj Grandmaster OMICRON OTMC 100 PTP.

Este escenario brindó la oportunidad de evaluar también el desempeño rutas/trayectorias de red redundantes entre las dos ubicaciones. Por lo tanto, esta medición del retardo de propagación produjo dos conjuntos de resultados de desempeño del sistema. En el primer caso se evaluó la ruta más directa de la red. La figura 13 muestra los resultados. Se midió un retardo medio de $148.8 \mu\text{s}$ para 504 paquetes capturados. Se observó un valor atípico en $200 \mu\text{s}$ que era aceptable y se encontraba dentro de las tolerancias de diseño del sistema.



Figure 13: Retardos de propagación de la ruta de red directa

A continuación, se evaluó la ruta redundante "más larga" y se descubrió un desempeño satisfactorio dado el gran aumento de la cantidad de saltos de red implicados. Los resultados se muestran en la figura 14. Se midió un retardo medio de $476.48 \mu\text{s}$ para 556 paquetes capturados. Se observó un valor atípico en $658 \mu\text{s}$ que era aceptable y se encontraba dentro de las tolerancias de diseño del sistema.



Figure 14: Retardos de propagación de la ruta de red redundante

En general, ambos sistemas en promedio lograron desempeños de sincronismo por debajo de $500 \mu\text{s}$ y aportaron una contribución insignificante a los retardos de sincronismo de la respuesta total del sistema. La figura 15 muestra la medición del desempeño general del sistema desde el impulso hasta la respuesta.

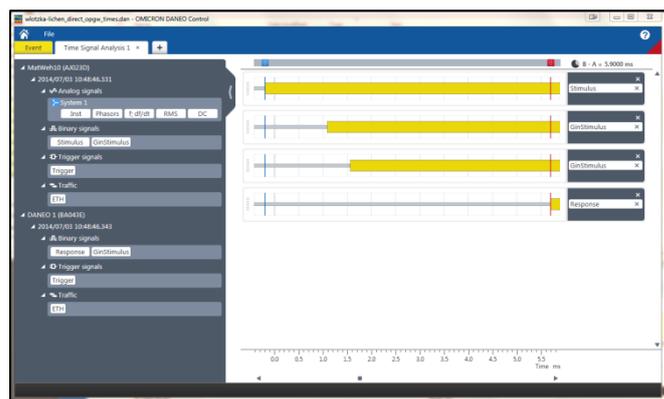


Figure 15: Medición de la respuesta general del sistema "distribuido"

Al comparar el resultado del escenario de prueba "distribuido" con el del escenario de prueba "local" se observa que el retardo de propagación de la red es, a todos los efectos, insignificante. Se compara 5.4 ms con 5.9 ms y la diferencia es aproximadamente $500 \mu\text{s}$, como respaldaban las conclusiones del estudio de retardo de propagación de la red. Esto está dentro de la tolerancia de diseño del sistema que se especifica como retardo sub 1 ms entre subestaciones. Esto se ve respaldado por la figura 16 que muestra el retardo de propagación de mensajes GOOSE reales (como en la figura 15) medidos para la ruta de red redundante y que resultaron ser $474 \mu\text{s}$.

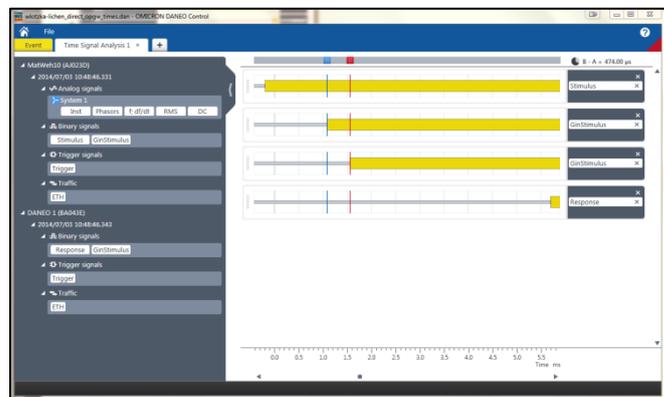


Figure 16: Retardo de propagación en la red de mensajes GOOSE

8 Futuras pruebas

Como ya se ha descrito, las pruebas se realizaron dentro de una única red lógica. Es intención de los autores explorar las posibilidades de enrutamiento de los mensajes GOOSE y evaluar el desempeño del sistema en estas condiciones. Las posibilidades que se derivan de hacer esto son:

- Los sistemas de monitoreo, protección y control de red de área amplia (WAMPAC) con mensajería GOOSE integrada entre subestaciones.
- Enrutamiento selectivo de mensajes GOOSE.

- Extensión de la funcionalidad de sistema PAC inteligente a las denominadas redes inteligentes (SMART grids).
- Evaluación de arquitecturas/sistemas de red con respecto al desempeño del sistema basado en la norma IEC 61850.
- Expansión de las funcionalidades de control y monitoreo de sistemas SCADA convencionales.

9 Conclusión

El estudio de desempeño demostró que es posible determinar los parámetros de diseño y las especificaciones de desempeño para sistemas IEC 61850. Las tecnologías actuales permiten la composición de los sistemas IEC 61850 que se integren a la perfección y que operen de confiablemente en entornos de subestaciones. Estos sistemas muestran un funcionamiento y desempeño cercano al determinista.

En el dominio de la red/virtual se descubrió que la cantidad de saltos de red es el principal factor que contribuye a los retardos de propagación de la red. Estos retardos, sin embargo, siguen siendo insignificantes en comparación con los retardos de "propagación eléctrica" en el dominio eléctrico, ya que el sistema de la red está diseñado para mantener los retardos de propagación en la región por debajo de 1 ms. Una vez conocidos estos retardos a partir de los resultados medidos, es posible predecir con bastante precisión los desempeños esperados para los sistemas diseñados posteriormente basándose en esta información.

Las rutas principales y redundantes (y, en consecuencia, la totalidad de los sistemas redundantes) pueden evaluarse de forma individual. Esto proporciona una información inestimable que en última instancia describe el desempeño global de todo el sistema. Al final todo se reduce a los requisitos y especificaciones de diseño que componen la solución final elaborada. Hay establecer primero metas realistas, prácticas y lógicas que proporcionen una solución IEC 61850 aceptable en la práctica.

Autores

Helgo Müller (helgo.muller@nampower.com.na)

Chris Viljoen (chris.viljoen@nampower.com.na)

David Magongo

(david.magongo@nampower.com.na)

OMICRON es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 140 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.

Para obtener más información, documentación adicional e información de contacto detallada de nuestras oficinas en todo el mundo visite nuestro sitio web.