

**A3 – Equipos de Alta Tensión****SISTEMA VOLANTE PARA LA MEDICIÓN DE TENSIONES EN ESTACIONES TRANSFORMADORAS DE AT UTILIZANDO SENSORES DE CAMPO ELÉCTRICO**

GASTÓN MAYER*
IITREE FI-UNLP
Argentina

FERNANDO ISSOURIBEHERE
IITREE FI-UNLP
Argentina

JUAN BARBERO
IITREE FI-UNLP
Argentina

GUSTAVO BARBERA
IITREE FI-UNLP
Argentina

Resumen – En este artículo se analiza la aplicación de Sensores de Campo Eléctrico (SCE), desarrollados por el IITREE-FI-UNLP, para la medición de tensiones en el rango de 5 Hz a 10 MHz. Basándose en mediciones realizadas sobre instalaciones reales, se propone un método para incorporar (de manera complementaria) estos dispositivos en Estaciones Transformadoras de Alta Tensión. De esta manera se podría cubrir parcialmente la carencia, respecto de su respuesta en frecuencia, de los tradicionales transformadores de tensión (TV), utilizados en las Subestaciones y contemplando particularmente la potencial necesidad de obtener mediciones de Calidad de Servicio y transitorios de maniobra.

Palabras clave: SENSOR DE CAMPO ELÉCTRICO, ARMÓNICAS, FLICKER, ESTACIÓN TRANSFORMADORA, MEDICIÓN DE TENSIÓN

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, gran parte de la normativa internacional no brinda especificaciones sobre los Transformadores de Tensión (TV) más allá de la frecuencia industrial [1]. Esto ha hecho que prácticamente cualquier tipo de evento que contenga componentes de frecuencia fuera de 50 Hz sea distorsionado, o no visible a la salida de los TV. Los TV más utilizados en Estaciones Transformadoras de Alta Tensión (AT) y Extra Alta Tensión (EAT) son los del tipo inductivo y los de tipo capacitivo sintonizado, particularmente estos últimos en sistemas de EAT. Dadas las características de estos transductores resulta de suma importancia el conocimiento previo de sus limitaciones, en especial al momento de obtener conclusiones sobre anomalías en la tensión. En este marco, y dada la constante incorporación en las redes de cargas alineales, sumado a la incorporación de generación eólica y fotovoltaica, estas últimas constituidas en parte con electrónica de potencia, es que no debería pasarse por alto la necesidad del monitoreo y posterior control de las perturbaciones inyectadas a la red.

En el IITREE-FI-UNLP se han desarrollado Sensores de Campo Eléctrico (SCE) para la medición de tensión. Estos sensores fueron utilizados por el IITREE en diversas instalaciones de alta tensión, con fines de diagnóstico, tanto en la medición de armónicos y flicker como en el registro de transitorios de alta velocidad de varios MHz. A partir de la experiencia obtenida se realizará un análisis teórico-práctico de la factibilidad de utilizar estos sensores como un sistema de medición secundaria para monitoreo de perturbaciones. En este marco, se hará una reseña de algunas mediciones realizadas, destacando la metodología y el alcance de las mismas, así como también el principio de funcionamiento de los SCE.

* Calle 48 y 116, (B1900AMF) La Plata, Bs. As. Argentina – hgmayer@iitree-unlp.org.ar

2 MEDICIONES CON SENSORES DE CAMPO ELÉCTRICO

2.1 Generalidades

La corriente que circula entre las placas de un capacitor de placas planas paralelas que se encuentra inmerso en un campo eléctrico – como se muestra en la Fig. 1 – está dada por:

$$i_c(t) = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot A \cdot E \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

Donde:

ε_0 : Permitividad del espacio libre = $8,854 \times 10^{-12}$ [F/m]

A : Área de las placas [m^2]

E : Magnitud del campo eléctrico [V/m]

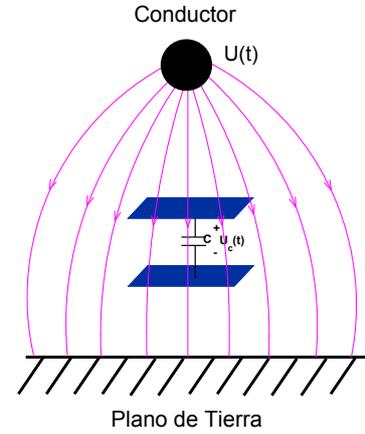


Fig. 1. Esquema básico del SCE.

Si se conecta un capacitor C_B entre las placas paralelas, y si éste no se encuentra influenciado por el campo eléctrico E – como se muestra en la Fig. 1 – la magnitud del potencial desarrollado está dado por:

$$u_c(t) = \frac{1}{C_B} \int i_c(t) dt = \frac{1}{C_B} \int \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot A \cdot E \cdot \cos(\omega t) dt = \frac{\varepsilon_0 A}{C_B} E \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Esta relación es independiente de la frecuencia, por lo que si se producen variaciones en la magnitud del campo eléctrico, las mismas se reflejarán en el potencial. De forma general:

$$u_c(t) = k_E \cdot e(t) \quad (3)$$

Por otra parte, el campo eléctrico $e(t)$ en un punto entre dos conductores de un sistema eléctrico es consecuencia de una diferencia de potencial $u(t)$, como se aprecia en la Fig. 1. La relación entre ambos es una constante lineal k_G que depende exclusivamente de la geometría de la instalación.

$$e(t) = k_G \cdot u(t) \quad (4)$$

Si el potencial a través del capacitor C_B se mide, amplificándolo G_V veces resulta:

$$u_m(t) = G_V \cdot u_c(t) \quad (5)$$

Finalmente, se puede concluir que si se mide el potencial $u_m(t)$, relacionado con el potencial a través del capacitor C_B , entonces el potencial eléctrico $u(t)$ se puede obtener como:

$$u(t) = \frac{u_m(t)}{G_V \cdot k_E \cdot k_G} \quad (6)$$

Donde:

$u(t)$: Potencial a determinar [V].

$u_m(t)$: Potencial medido con el SCE [V].

G_V : Ganancia de tensión entre la salida del SCE y el equipo de medición [V/V].

k_E : Constante de transducción del SCE = $\varepsilon_0 A / C_B$ [m].

k_G : Constante dependiente de la geometría de la instalación física completa [1/m].

Para el caso en que se midan perturbaciones de tensión referidas a la frecuencia fundamental, es decir por ejemplo armónicas y flicker, no es necesario conocer las constantes G_V , k_E y k_G , siendo suficiente con verificar la linealidad e independencia en frecuencia.

En el caso de sistemas trifásicos, el potencial de cada conductor tenderá a ser influenciado por el de las cargas de todos los conductores y los coeficientes de potencial α que dependen de la geometría del sistema.

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \alpha_{13}q_3 \\ U_2 &= \alpha_{21}q_1 + \alpha_{22}q_2 + \alpha_{23}q_3 \\ U_3 &= \alpha_{31}q_1 + \alpha_{32}q_2 + \alpha_{33}q_3 \end{aligned} \Rightarrow [U] = [\alpha] \cdot [q] \quad (7)$$

Por otro lado, el campo eléctrico en un punto “a” alrededor de un conductor está dado por la superposición de cargas de todos los conductores. La magnitud de este campo eléctrico es proporcional a las cargas a través de los coeficientes k que también dependen de la geometría. Esto último puede ser expresado como:

$$E_a = k_{a1}q_1 + k_{a2}q_2 + k_{a3}q_3 \quad (8)$$

De esta forma, si se quisiera determinar el valor de la tensión U_1 del conductor 1, midiendo con el SCE el campo eléctrico presente en el punto “a”, entonces este punto debería estar tan próximo como sea posible respecto del conductor 1, de manera tal de medir solo el campo influenciado por el potencial del conductor 1. Esto significa que los factores k tienden a ser proporcionales a los factores α y el campo eléctrico resulta así directamente proporcional a la tensión sobre el conductor, U_1 .

También se debe tener en cuenta que si solo uno de los conductores está energizado y los otros se encuentran desenergizados, las mediciones de campo eléctrico realizadas en cualquier punto serán proporcionales a la tensión del conductor energizado. La constante de proporcionalidad, en este caso, sería α_{11}/k_{a1} .

De esta manera, si lo que se pretende es determinar valores absolutos de tensión, se hace necesario realizar una calibración por postprocesamiento de los valores medidos de tensión, detectando situaciones particulares como las mencionadas en párrafos anteriores y teniendo en cuenta el valor de tensión fundamental, obtenido a través del uso de transformadores de tensión.

2.2 Descripción del equipamiento

Actualmente, el equipamiento en uso completo consiste básicamente de tres SCE desarrollados para este tipo de tareas, soportes adecuados para los mismos, fibras ópticas para vincular a cada SCE con el transductor señal óptica/tensión y un instrumento de medición de tensión o registrador del tipo oscilográfico. El SCE utilizado posee las siguientes características:

- *Ancho de Banda: 5 Hz to 10 MHz @ -6 dB.*
- *Planicidad: ± 3 dB.*
- *Tiempo de retardo: 600 ns.*
- *Rangos disponibles: $\pm 4,5$ kV/m, ± 7 kV/m, $\pm 15,4$ kV/m, ± 45 kV/m, ± 70 kV/m, ± 154 kV/m.*
- *Alimentación: NiMH baterías.*
- *Tiempo de operación continua: 8 Horas.*
- *Dimensiones: 150 mm x 150 mm x 100 mm.*
- *Peso: 2,3 Kg.*

El transductor señal óptica/tensión convierte la señal lumínica analógica enviada por el SCE en una señal de tensión a su salida (conector coaxil, BNC). Este transductor, a su vez, tiene las siguientes características:

- *Máximo nivel de salida: $\pm 2,5$ V pico.*
- *Impedancia de carga: 50 Ω .*
- *Tensión de alimentación: 220 V ± 10 %, 50 Hz.*
- *Consumo: 15 VA.*
- *Dimensiones: 150 mm x 150 mm x 100 mm.*
- *Peso: 1,6 Kg.*

El sistema normalmente se completa con la conexión de un registrador u otro equipo que permita la visualización, registro y/o análisis de la señal medida. De esta forma, tomando los recaudos necesarios en cuanto a la adaptación de los niveles de señal, es posible conectar un osciloscopio, un registrador rápido, un equipo de analizador de calidad de servicio o incluso un voltímetro.

3 EXPERIENCIAS DE MEDICIÓN EN CAMPO

3.1 Medición de calidad de servicio utilizando un SCE.

Las características no invasivas de este método de medición lo hacen particularmente ideal para situaciones en las que no sea posible acceder a una conexión directa de instrumental en la instalación. Es así que se han realizado experiencias de monitoreo de la calidad de servicio bajo líneas de 132 kV y 220 kV. En este caso, al final del sistema, se colocó un analizador de calidad de servicio con el fin de verificar niveles de armónicas y flicker. En la Fig. 2 se muestra la disposición del SCE sobre el techo de un vehículo bajo las líneas de 220 kV que se vinculan con una importante Estación Transformadora de la Provincia de Buenos Aires. El resto del sistema de medición se instaló dentro del vehículo.



Fig. 2. Ubicación del sistema de medición usando SCE bajo línea de 220 kV.

Paralelamente a la medición utilizando el SCE, se instaló un equipo de calidad de servicio en bornes de un Transformador de Medición de Tensión perteneciente a la Estación Transformadora. En esta oportunidad interesó particularmente a verificación de los niveles de armónicas 5ª y 7ª. En la Fig. 3 se muestran gráficos comparativos de los valores medidos por sendos sistemas, expresados en porcentaje de la fundamental.

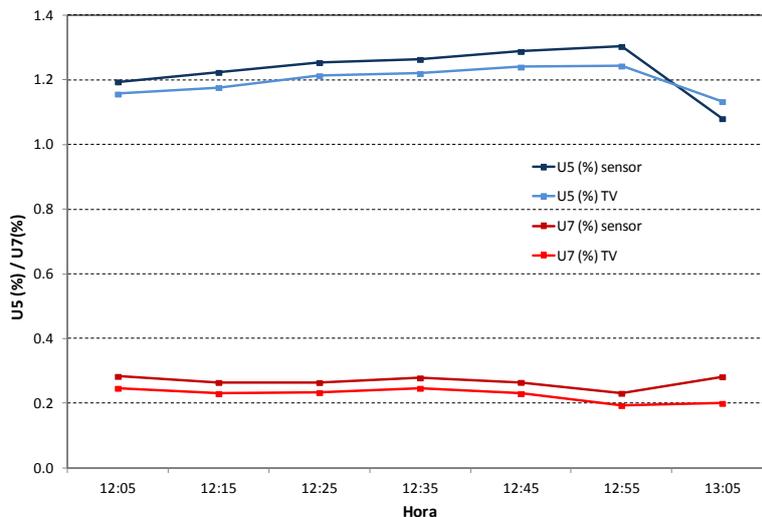


Fig. 3. Comparación entre mediciones directa (con TV) y con SCE en línea de 220 kV.

Como se observa, los valores medidos se mostraron muy cercanos, con uno u otro método, con diferencias relativas de aproximadamente el 4%.

En la Fig. 4 se muestra, de modo similar, algunas de las mediciones realizadas bajo una línea simple terna de 132 kV vinculada a un parque eólico ubicado en la Patagonia Argentina, utilizando el mismo sistema que en el caso tratado anteriormente.

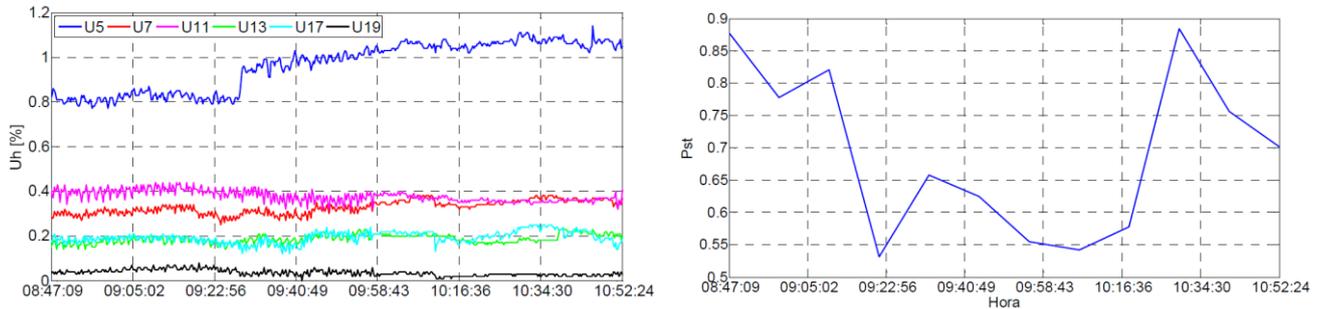


Fig. 4. Gráfico de armónicas (izquierda) y Flicker (derecha).

Se pueden observar dos registros tomados a lo largo de aproximadamente dos horas en los que se visualizan algunas armónicas impares y el nivel de Pst (indicador de flicker) presente en las líneas de 132 kV durante el pleno funcionamiento del Parque Eólico.

3.2 Medición de transitorios utilizando SCE

El sistema de medición de tensión a través del sensado del campo eléctrico ha sido probado con éxito en el caso de transitorios de maniobras en Estaciones Transformadoras de Alta Tensión, donde las frecuencias involucradas llegan a ser de algunos MHz. En la Fig. 5 se muestra la disposición adoptada para la medición de transitorios de maniobra en una Estación Transformadora de 500 kV. En esta imagen se observa el SCE debajo de una de las fases y montado sobre una pértiga aislante fija empleando un trípode. De esta forma fue posible minimizar la influencia de las otras fases y obtener el perfil de tensión originado ante la apertura y cierre de seccionadores.



Fig. 5. Disposición del SCE.

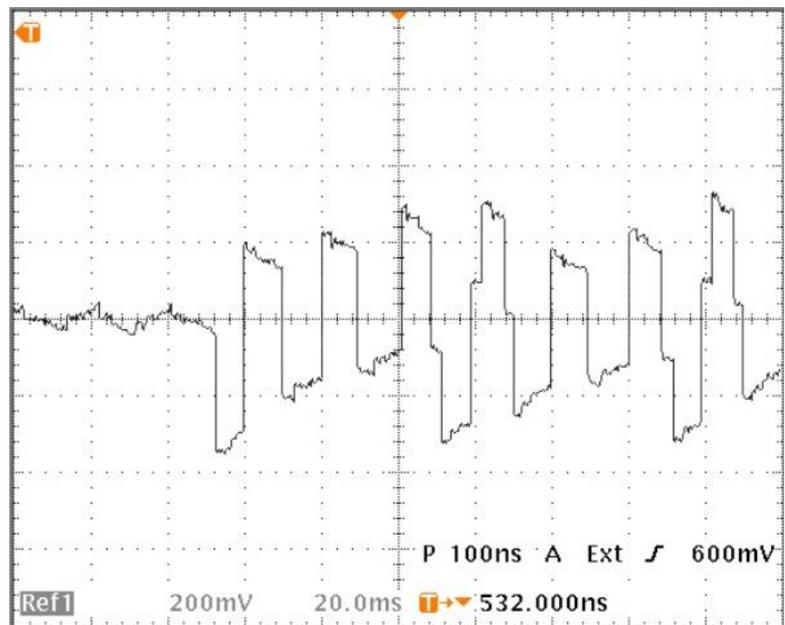


Fig. 6. Registro de tensión durante cierre de seccionador.

En la Fig. 6, por otra parte, se muestra uno de los registros de tensión obtenidos ante la apertura de un seccionador de 500 kV de la fase correspondiente a la del SCE. Con estos registros, entre otras cosas, fue posible realizar un modelo de la instalación y reproducir el origen de la falla producida en un TI.

3.3 Acoplamiento indeseados en la medición

En los casos descritos anteriormente, y como se comentara al comienzo del artículo, la utilización de este método de medición implica la posibilidad de acoplamiento indeseados con otras fases de la misma línea y, en algunas situaciones particulares, también con otras líneas próximas. De esta forma por ejemplo, si se realiza una medición de armónicas, el único sensor utilizado recibiría como fuente de campo eléctrico a cada una de las tres fases y, dependiendo de la disposición de los conductores de la línea, la influencia de las otras dos fases puede ser morigerada, tal es el caso de las líneas coplanares horizontales o de las barras en una Estación Transformadora.

Se puede decir entonces que la tensión obtenida a partir del uso del SCE es una composición de las tensiones presentes en cada una de las tres fases de la línea:

$$\dot{U}_m = k_1(\dot{U}_{R1} + \dot{U}_{Rh}) + k_2(\dot{U}_{S1} + \dot{U}_{Sh}) + k_3(\dot{U}_{T1} + \dot{U}_{Th}) \quad (9)$$

Donde:

$\dot{U}_{R1}, \dot{U}_{S1}, \dot{U}_{T1}$: Valores de tensión fundamentales para cada fase.

$\dot{U}_{Rh}, \dot{U}_{Sh}, \dot{U}_{Th}$: Tensiones armónicas para cada fase.

\dot{U}_m : Tensión medida con el SCE [V].

k_1, k_2 and k_3 : Constantes de acoplamiento relacionadas con la geometría del conjunto instalación-SCE.

Resolviendo las ecuaciones, la relación entre la tensión armónica medida y la real (ambas referidas a la fundamental) queda descrita básicamente por:

$$\left| \frac{\dot{U}_h}{\dot{U}_1} \right|_{medida} = \left| \frac{\dot{U}_h}{\dot{U}_1} \right|_{real} \cdot \frac{k_1 + k_2 e^{-jh120^\circ} + k_3 e^{jh120^\circ}}{(k_1 + k_2 e^{-j120^\circ} + k_3 e^{j120^\circ})} \quad (10)$$

De esta forma, para un sistema que contiene armónicas desde el orden 2 al 6 pueden simularse diferentes situaciones, dadas por distintos valores de acoplamiento. En este sentido, la Tabla I muestra los resultados obtenidos al simular este caso para tres conjuntos de coeficientes k arbitrarios, mientras que la amplitud de los armónicos se mantuvo fija:

TABLA I. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Número de armónico [h]	Secuencia del armónico [h]	Amplitud Real [%]	Tensión medida [%] $k_1 = 1$ $k_2 = 0.66$ $k_3 = 0.33$	Tensión medida [%] $k_1 = 1$ $k_2 = 0.25$ $k_3 = 0.125$	Tensión medida [%] $k_1 = 1$ $k_2 = 0.1$ $k_3 = 0.05$
2	-	1	1	1	1
3	0	2	6.86	3.34	2.48
4	+	1	1	1	1
5	-	10	10	10	10
6	0	1	3.43	1.67	1.24

Los resultados obtenidos muestran una correcta medición de aquellas componentes de secuencia positiva y negativa, pero no así las de secuencia cero, cuyos valores resultan ser siempre mayores a los reales para el correspondiente armónico (tal es el caso de 3° y 6° armónica). Por otro lado se observa que estas componentes de frecuencia cero son altamente dependientes del posicionamiento del sensor (coeficiente k).

4 MONITOREO TRIFÁSICO EN ESTACIONES TRANSFORMADORAS

Utilizando el mismo criterio de las experiencias volcadas en los párrafos anteriores, es posible la colocación móvil, fija o semifija del SCE en lugares adecuados de Estaciones Transformadoras de alta tensión de manera de expandir las prestaciones (el rango de frecuencia) de los transformadores de medición de tensión (TV) propios de la instalación. De esta forma, ubicando tres sensores en la zona de barras, por ejemplo, y cada uno de ellos debajo de una fase, y a la mayor altura que permitan las distancias de seguridad, permitiría un desempeño correcto si se lograra desafectar el acoplamiento parásito de las fases adyacentes a cada sensor.

Para ello se analizará un ejemplo simplificado (se considera una medición sobre solo dos fases) sobre la base de un registro efectuado durante la operación de cierre de un interruptor en una instalación GIS (Gas Insulated Switchgear) y línea aérea de 500 kV con sendos SCE ubicados en la salida de la línea y bajo las fases R y T.

En la Fig. 7 se muestra el registro de la tensión obtenido con los sensores, donde en particular se encuentra señalado el momento de cierre, en el cual se observa claramente la aparición primero de la tensión sobre la fase T que refleja un valor de tensión sobre el otro SCE debido a la ya comentada influencia cruzada de los campos eléctricos. Al cerrarse la fase R no se refleja ninguna alteración sobre el registro del sensor de la fase T.

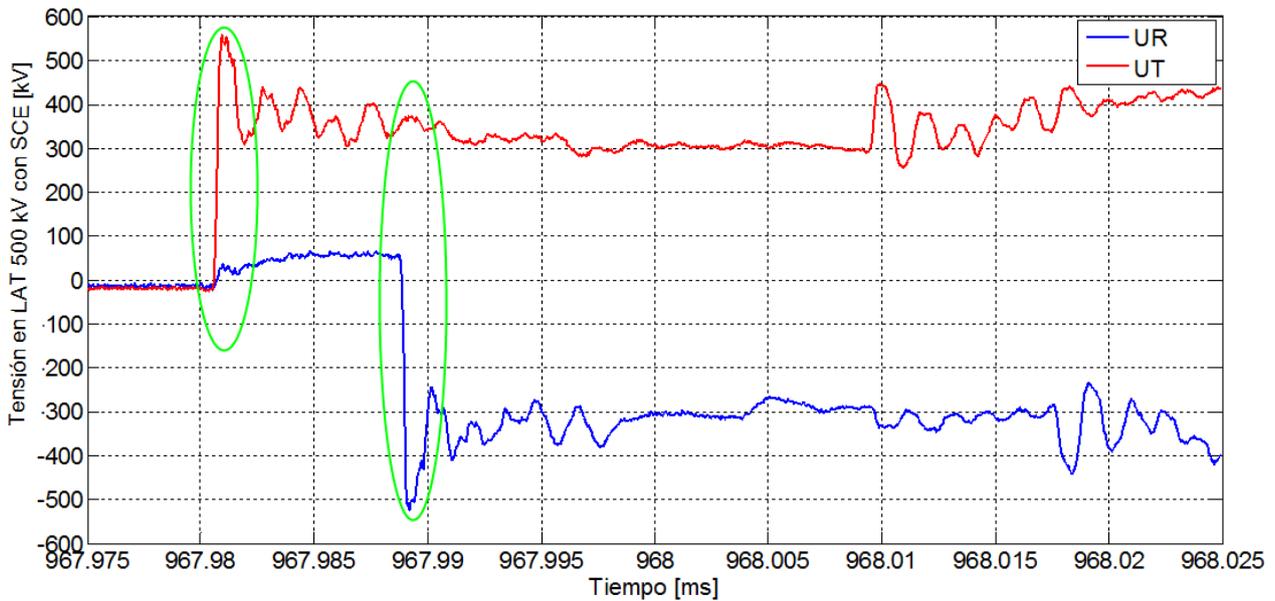


Fig. 7. Registro de tensiones en las fases R y T a través de SCE.

De esta manera, midiendo apropiadamente, el salto de tensión en la fase R resulta ser de 543,5 kV y el salto de tensión espurio de 49,9 kV. En otras ocasiones, las descargas y arcos producidos durante la operación de interruptores y seccionadores también posibilitan, dado su bajo coeficiente de simultaneidad, la determinación del grado de perturbación producido en los SCE de una fase por acción de las otras.

De forma similar a lo expresado en los casos tratados con anterioridad en este artículo, se puede generar una expresión matricial donde no solo se incluyan las constantes de transducción involucradas, sino también las relacionadas con la geometría y con el acoplamiento espurio ya mencionado. La expresión para el caso general trifásico quedaría como:

$$\begin{aligned} U_{R'} &= k_{R'R}U_R + k_{R'S}U_S + k_{R'T}U_T \\ U_{S'} &= k_{S'R}U_R + k_{S'S}U_S + k_{S'T}U_T \\ U_{T'} &= k_{T'R}U_R + k_{T'S}U_S + k_{T'T}U_T \end{aligned} \quad (11)$$

Donde $U_{R'}$, $U_{S'}$ y $U_{T'}$ son los valores de tensión obtenidos a la salida de los sistemas de medición con SCE para cada una de las fases, U_R , U_S y U_T son los respectivos valores de tensión reales presentes en cada fase y k_{iR} , k_{iS} y k_{iT} son los coeficientes de desacoplamiento.

Considerando ahora el registro bifásico se puede escribir la expresión:

$$\begin{aligned} U_{R'} &= k_{R'R}U_R + k_{R'T}U_T \\ U_{T'} &= k_{T'R}U_R + k_{T'T}U_T \end{aligned} \quad (12)$$

Con el conocimiento de los saltos medidos de tensión que se visualizaron en la Fig. 7, se puede replantear el sistema de ecuaciones (12) de manera de obtener los coeficientes k , necesarios como parámetro de vinculación entre la tensión medida a la salida del sistema de sensores y la tensión real presente. Es así como, por ejemplo, los coeficientes k del segundo término de (12) tendrán los siguientes valores:

$$\begin{bmatrix} k_{R'T} \\ k_{T'T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 49,9kV / 543,5kV \\ 543,5kV / 543,5kV \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,09 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

En forma análoga se procede con los coeficientes del primer término, dando como resultado:

$$\begin{aligned} U_{R'} &= U_R + 0,09U_T \\ U_{T'} &= U_T \end{aligned} \quad (14)$$

Para realizar la calibración anterior sólo sería necesario contar con los valores relativos a la salida del sensor tras lo cual es necesario ajustar la constante de transducción, realizando una medición a 50 Hz y comparando los valores medidos con los obtenidos de un transformador de medida (TV) de la instalación. Para el caso dado se observa que la ubicación del sensor de la fase T resultó apropiada, mientras que el de la fase R recibió un 9% de influencia del campo eléctrico producido por la fase T.

5 CONCLUSIONES

De la experiencia obtenida desde algunos años a la fecha se pueden realizar los siguientes comentarios sobre la metodología de medición de tensiones utilizando SCE en Estaciones Transformadoras de alta tensión:

- Con una instalación adecuada, el sistema de SCE, posibilita obtener resultados que complementan la función de los transductores de tensión ya instalados en las subestaciones, cuyo funcionamiento resulta correcto, en general, solo más allá de unas decenas o cientos de Hz por encima de los 50 Hz.
- La vinculación del sensor propiamente dicho mediante fibra óptica, le otorga aislación galvánica y mejora sus características de compatibilidad electromagnética con otros dispositivos e instalaciones próximas.
- Se pueden lograr mediciones de fenómenos de varios MHz, posibilitando de esta manera no solo la visualización y registro de la calidad de servicio (armónicas, flicker, etc.) sino también la de fenómenos rápidos que pueden ocasionar malfuncionamiento de equipos o reflejar el mal funcionamiento de equipos (por ej. seccionadores, interruptores, etc.).
- Como desventaja, la utilización de este sistema implica mantener la configuración geométrica de la instalación y despejado el espacio entre el SCE y el conductor correspondiente, lo cual incluye la aparición de agua, nieve o polvo en exceso.

6 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Klatt, J. Meyer, M. Elst, P. Schegner. “*Frequency Responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz*”. Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010.
- [2] M. D. Del Pozo, D. A. Esteban, P. E. Issouribehere, G. Barbera. “*Field measurements and modelling of high frequency transients during disconnect switch operations in EHV Substations. Assessment of their effects on Current Transformers*”. A3-207. CIGRE 2010.
- [3] P. E. Issouribehere, D. A. Esteban, F. Issouribehere, G. Barbera. “*Measurements of disturbances produced by power electronic devices on EHV overhead lines using Electric Field Sensors*”. C4-104. CIGRE 2012.
- [4] J.L. Agüero, P.E. Issouribehere, D.A. Esteban, F. Issouribehere, G.A. Barbera, G. Mayer. “*Impact of large wind farms on Power Quality. First experiences gained in the Argentinian Power System*”. C4-102. CIGRE 2014.
- [5] R. Bianchi, B. Barbieri, F. Issouribehere, G. Mayer. “*Voltage Transient Measurements using Electric Field Sensors and ATP Modelling of a 500 kV GIS Station*”. C4-205. CIGRE 2018.
- [6] CIGRE WG D1.03, TB 519. “*Very fast transient overvoltages (VFTO) in gas-insulated UHV substations*”. Paris, France: CIGRE Technical Brochure, 2012.