



Por:
Emile Nasrallah,
Ingeniero, Especialista
en Interruptores

Fouad Brikci,
Ph.D., Zensol
Automation Inc.

Stéphan Perron,
Hydro-Québec
profesor

Contactos de Apertura/Cierre en Interruptores de Potencia

PREFACIO

La interrupción de los circuitos eléctricos de potencia siempre ha sido una función esencial, especialmente en el caso de sobrecargas o de cortocircuitos cuando se hace necesaria la interrupción inmediata del flujo de la corriente como una medida de protección.

En un principio, los circuitos se podían romper con sólo separar los contactos en el aire además de extraer el arco eléctrico resultante a tal longitud que no pueda ser mantenida.

Este medio de interrupción pronto se volvió inadecuado y se tuvieron que desarrollar dispositivos especiales llamados interruptores automáticos.

El problema básico ha sido de controlar y apagar o extinguir el arco de alta potencia, el cual ocurre necesariamente al separar los contactos de un interruptor automático cuando se abren circuitos de elevada corriente.

Dado que los arcos generan una gran cantidad de energía calórica, a menudo destructiva para los contactos del interruptor, la tecnología tenía que hallar maneras de limitar la duración del arco y desarrollar contactos que puedan soportar el efecto del arco una y otra vez.



Fig 1 Representación del arco, mostrando la columna del arco de plasma y el desgaste del contacto

En el presente artículo hallará una descripción resumida de los diferentes diseños para contactos de apertura/cierre hallados en los interruptores automáticos modernos de potencia y los factores claves que influyen su arquitectura y el material elegido.

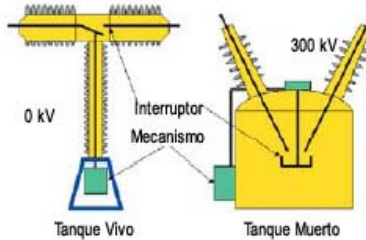


Fig 2 Representación del Interruptor automático de Tanque Vivo y de tanque Muerto

INTRODUCCIÓN

Desde su inicio, los científicos basaron su investigación en explorar las capacidades de los medios de extinción disponibles. Por lo tanto, los interruptores automáticos se han clasificado de esa manera.

Los ambientes de extinción del arco son numerosos.

Históricamente, debería mencionarse que el agua pura ha sido usada por algún tiempo en Europa. El arco produce gases, vapor e hidrógeno, los cuales son efectivos como el vapor y el hidrógeno del aceite para extinguir los arcos, pero problemas de aislamiento ha limitado el uso de este medio y actualmente los interruptores automáticos ya no usan esta técnica.

Para el propósito de este artículo, limitaremos nuestra búsqueda a los más populares: Aceite, Aire Comprimido, SF6 y vacío.

CATEGORÍAS DE INTERRUPTORES AUTOMÁTICOS

El desarrollo de la investigación de los interruptores automáticos ha explorado los medios disponibles y ha logrado una serie de diseños de interruptores automáticos, pero la mayoría cae en cuatro categorías principales:

INTERRUPTOR AUTOMÁTICO DE ACEITE

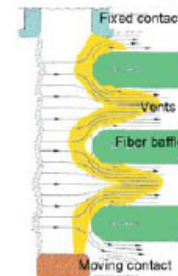


Fig 3 Representación del arco eléctrico en interruptor automático de aceite

En los interruptores automáticos de aceite, el arco es drenado en el aceite dentro de un compartimiento especial de la cámara de interrupción llamada la olla de explosión (explosion pot). El intenso calor del arco descompone al aceite y produce gases, compuestos principalmente de hidrógeno, generando una alta presión, la cual produce el flujo del fluido a través del arco y fuera de la olla de explosión a través de sus rejillas de ventilación situadas en las paredes. De esta manera se extiende la columna del arco y aleja su energía hasta su extinción total. Ver la Figura 3.

A tensiones de transmisión por debajo de 345 kV, los interruptores de aceite solían ser muy populares. Éstos han ido gradualmente perdiendo terreno a los interruptores de sople de gas tales como los interruptores automáticos de

INTERRUPTOR AUTOMÁTICO DE SOPLO DE AIRE

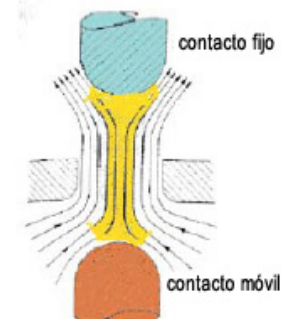


Fig 4 Representación del arco eléctrico en interruptor automático de sople de aire

soplo de aire y los interruptores automáticos de SF6.

En los interruptores automáticos de soplo de aire, el aire se comprime hasta altas presiones. Cuando los contactos se separan, se abre una válvula a chorro para descargar el aire en alta presión al ambiente, creando así un flujo de muy alta velocidad cerca del arco para disipar la energía.

INTERRUPTOR AUTOMÁTICO DE SF6

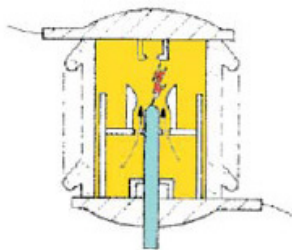


Fig 5 Representación de la cámara del interruptor de SF6 en el interruptor de SF6 tipo puffer

Se aplica el mismo principio en los interruptores automáticos de SF6, con el SF6 como el medio en vez del aire. En el interruptor automático de SF6 "puffer", el movimiento de los contactos comprime el gas y fuerza que fluya a través de un orificio en la cercanía del arco. Ambos tipos de interruptores automáticos de SF6 han sido desarrollados para sistemas de transmisión EHV (extra alta tensión).

INTERRUPTOR AUTOMÁTICO DE VACÍO

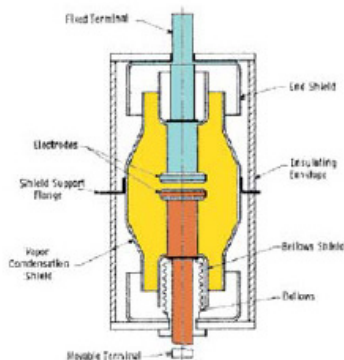


Fig 6 Representación de la cámara del interruptor de vacío en el interruptor automático de vacío

El interruptor automático de vacío usa la rápida recuperación dieléctrica y la alta resistencia dieléctrica del vacío. Un par de contactos se sellan herméticamente en una cubierta de vacío.

El movimiento actuante se transmite a través de los fuelles hacia el contacto móvil. Cuando se separan los contactos, se produce un arco y lo soporta el vapor metálico que hierve de los electrodos. Las partículas de vapor

se expanden hacia el vacío y se condensan en superficies sólidas. A la corriente cero natural desaparecen las partículas del vapor, y se extingue el arco. Se pueden construir interruptores automáticos de vacío de hasta 242 kV.

CONTACTOS DE APERTURA/CIERRE

El corazón del interruptor automático es el elemento de conmutación. Es aquí donde toma lugar la extinción del arco. Consiste principalmente de los contactos de apertura/cierre y del medio de interrupción. Las funciones de los contactos de apertura/cierre se pueden reducir a:

- Conducir la corriente eléctrica cuando se cierra el interruptor.
- Soportar el efecto destructivo del arco cuando se produce la interrupción.

Generalmente, los contactos de apertura/cierre tienen una parte estacionaria y una móvil. Al hacer que la parte móvil toque la parte estacionaria, fluye una corriente eléctrica y se cierra el interruptor.

Al llevar al contacto móvil lejos del contacto estacionario, se desarrolla un arco eléctrico y al apagarlo se detiene la corriente que fluye y se abre el interruptor.

El diseño del contacto y la elección de los materiales están afectados en gran medida a la energía del arco, la duración y las reacciones químicas que puedan ocurrir con el medio ambiente bajo el efecto del arco.

Para entender estos elementos cruciales, es necesario revisar las características del arco eléctrico.

ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico es un fenómeno natural. A pesar de su naturaleza destructiva, es de gran uso para la conmutación de la corriente en los interruptores automáticos. Actúa como una impedancia variable con valor cero cuando el interruptor automático está cerrado y de infinito cuando el interruptor automático está abierto.

ARCO DE ALTA PRESIÓN

Usado en interruptores automáticos de soplo (soplo de aire, SF6 y de aceite). Los caracteriza una gran generación de calor y duraciones relativamente largas. También pueden generar la deposición de subproductos sólidos que pueden afectar la conductividad de los contactos.

ARCO EN VACÍO

Usado en los interruptores de vacío. Están limitados y de corta duración. No

ocasionan la deposición de subproductos.

ARQUITECTURA DE CONTACTO

PARA ARCOS DE ALTA PRESIÓN:

Los contactos tienen que soportar el calor del arco sin daño excesivo. Para ello sólo se necesita tener buenas propiedades de conducción.

El tungsteno y las aleaciones de tungsteno tienen buenas propiedades de resistencia al arco pero menor conductividad. El cobre y la plata tienen mayor conductividad pero relativamente pobres propiedades de resistencia al arco.

Los contactos también tienen que superar la deposición de los subproductos que pueden convertirse en un problema si no se limpian antes que se construya una capa aislante.

Los tipos de contactos que se encuentran comúnmente en estos tipos de dispositivos son:

CONTACTOS DESLIZANTES

Como su nombre lo indica, el contacto móvil y el estacionario se tocan en el cierre y se deslizan uno del otro a una cierta distancia antes de detenerse a una posición cerrada. Al abrirse, se deslizan hacia afuera hasta lograr su separación y la ignición del arco. La acción de deslizamiento ayuda a limpiar los subproductos depositados para hacer un mejor contacto en el cierre.

Este tipo de contacto usualmente separa el rol de la resistencia al arco del rol de transporte de la corriente, usando contactos basados en aleaciones de tungsteno llamados contactos de arco que diseñan para cerrar primero y separar al abrirse y están sometidos al arco. El rol de transporte de la corriente se atribuye a los contactos de cobre revestido de plata o de cobre llamados contactos principales. Estos contactos no están sometidos al arco y por lo tanto no son erosionados por éste.

EJEMPLOS DE DISEÑOS

Los diseñadores han trabajado arduamente para lograr diseños eficaces para explotar estos principios.

En el interruptor automático de aceite tipo KSO de General Electric, el contacto estacionario es un anillo de dedos de contacto de cobre (o con enchapado de plata) con resortes donde dos de ellos tienen una punta de tungsteno (ver la Figura 7).



Fig 7 Contacto tulipán en el interruptor de aceite

El contacto móvil es una varilla sólida de cobre (o con enchapado de plata) donde la parte superior está hecha de tungsteno (ver la Figura 7a).

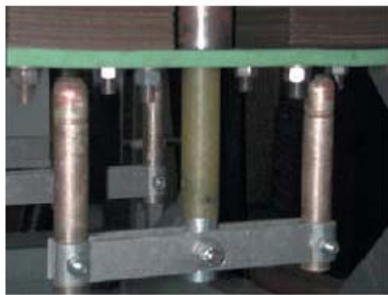


Fig 7a Varilla de contacto en el interruptor de aceite

En el interruptor automático de soplo de aire tipo PKV de Dell-Alsthom,



Fig 8 Módulo del interruptor de soplo de aire PKV

el contacto estacionario es un contacto con forma de tulipán con dedos de contacto hechos de cobre con enchapado de plata, donde dos de estos contactos son dedos de contacto de arco hechos de tungsteno. El contacto móvil es un tubo de cobre con enchapado de plata con la parte superior hecho de tungsteno (ver la Figura 8a).

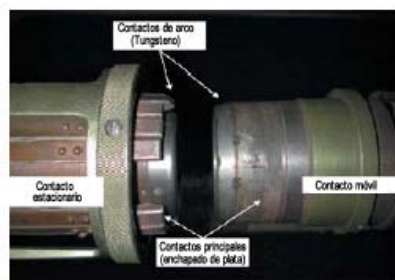


Fig 8a Contactos tulipán en el interruptor automático de soplo de aire PKV



Fig 8b Contactos mostrados en el Arco Cerrado partiendo de un paso de la posición Abierta

El interruptor automático de soplo de aire tipo DLF de ABB usa contactos de tope moldeados específicamente para lograr estos resultados.



Fig 9 Módulo del interruptor de soplo de aire DLF

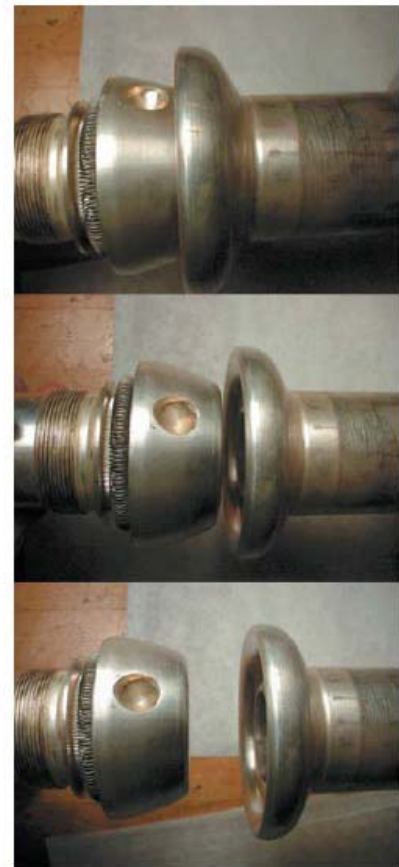


Fig 9a Contactos mostrados con el Arco Cerrado partiendo de un paso de la posición Abierta

En el interruptor automático de SF6 tipo HPL de ABB, para los contactos



Fig 10 Interruptor automático de SF6 tipo HPL

principales, el contacto estacionario tiene la forma de tulipán con dedos de contactos hecha de cobre con enchapado de plata, mientras que el contacto móvil es un tubo de cobre con enchapado de plata. El contacto de arco está completamente separado del contacto principal. El contacto estacionario es una varilla de tungsteno y la móvil tiene forma de tulipán que consta de dedos de contacto de tungsteno (ver la Figura 10a).

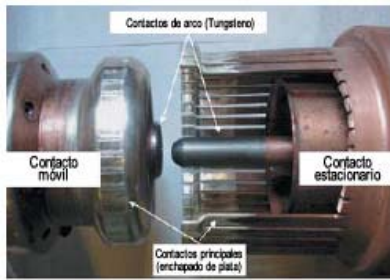


Fig 10a Contactos tulipán en el interruptor automático de SF6

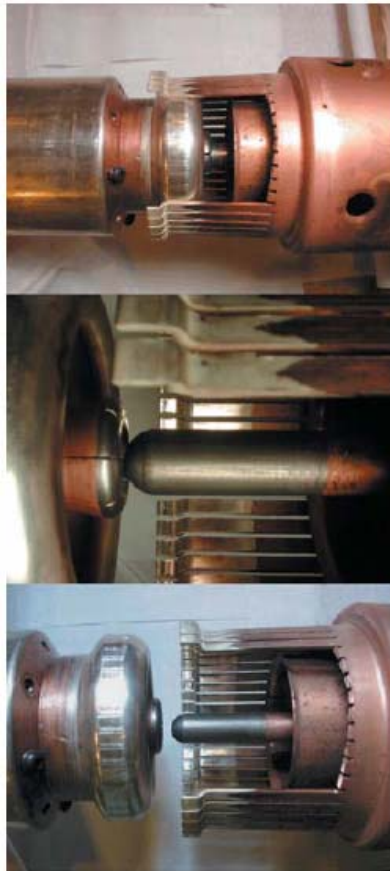


Fig 10b Contactos mostrados con el Arco Cerrado partiendo de un paso de la posición Abierta

Todos estos contactos tienen una acción de limpieza cuando el contacto móvil queda insertado en el contacto estacionario como vemos por las huellas de esta acción en la Figura 11.

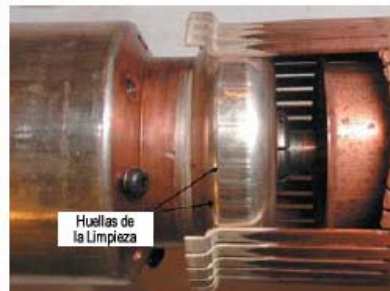


Fig 11 Se muestran las huellas de la limpieza en los contactos de SF6

PARA ARCOS EN VACÍO: ninguna de las condiciones anteriores están presentes. Dos placas de material conductor pueden constituir los contactos móviles y estacionarios. Generalmente necesitamos separarlos a una corta distancia (3 mm hasta 20 mm).

En un interruptor automático de vacío, los interruptores de vacío se usan para interrumpir y establecer la carga y las corrientes de falla. Cuando los contactos en el interruptor de vacío se separan, la corriente a ser interrumpida inicia una descarga de arco de vapor metálico y fluye a través del plasma hasta su próxima corriente cero. Luego se extingue el arco y el vapor del metal conductor se condensa sobre las superficies del metal en cuestión de microsegundos. Como resultado, el esfuerzo dieléctrico en el interruptor automático aumenta muy rápidamente.

Las propiedades del interruptor de vacío dependen en gran medida del material y la forma de los contactos.

Durante todo su desarrollo, han sido usados varios tipos de material de contacto. En este momento se acepta que una aleación de cobre cromado libre de oxígeno es el mejor material para los interruptores automáticos de alta tensión. En esta aleación, el cromo se distribuye a través del cobre en la forma de granos finos. Este material combina las características de una buena extinción del arco con una reducida tendencia al soldado del contacto y una baja supresión de corriente cuando se conmuta la corriente inductiva. El uso de este material especial hace que la supresión de la corriente se limite a unos 4 á 5 amperios.

Con corrientes por debajo de 10 kA, el arco de vacío se quema como una descarga difusa. A altos valores de corriente, el arco cambia a una forma constrictiva con un punto anódico. Un arco constrictivo que se mantiene en un sólo punto por demasiado tiempo puede sobrefatigar térmicamente los contactos a tal grado que no se puede garantizar la desionización de la zona de contacto a corriente cero.

Para superar este problema, la raíz del arco puede hacerse de tal forma que se mueva sobre la superficie de contacto.



Fig 12 Contactos butt de corta distancia, 9.5 mm. usados en el interruptor de vacío en el interruptor automático de vacío

Para lograr esto, se ha dado forma a los contactos, como se ve en la Figura 12, de modo que la corriente fluya a través de ella lo que hace que se establezca un campo magnético que se encuentra en perpendicular al eje del arco. Este campo radial ocasiona que la raíz del arco rote rápidamente alrededor del contacto resultando en una distribución uniforme del calor sobre su superficie. Los contactos de este tipo son llamados electrodos de campo magnético radial y son usados en la mayoría de interruptores automáticos para aplicaciones de media tensión.

Ha llegado un nuevo diseño para los interruptores en vacío, en la que al conmutar el arco desde un estado de difusión a uno constrictivo se realiza sometiendo al arco a un campo magnético axial. Dicho campo se puede suministrar conduciendo la corriente del arco a través de una bobina dispuesta adecuadamente fuera de la cámara de vacío. Alternativamente se puede suministrar este campo diseñando el contacto para darle el camino requerido del contacto. Dichos contactos son llamados electrodos de campo magnéticos axiales.

Este principio tiene ventajas cuando la corriente de cortocircuito excede a los 31.5 kA.

PRUEBAS

Los contactos de apertura/cierre requieren ser probados periódicamente para evaluar su condición. Estos contactos deben mantener sus buenas propiedades conductoras cuando los contactos están completamente cerrados. Las propiedades conductoras pueden ser afectadas por el desgaste mecánico debido a la fricción en la operación o al desgaste eléctrico ocasionado por el arco eléctrico.

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONTACTO:

El mejor método para probar la resistencia de contacto es aplicar la ley de Ohm. Consiste en aplicar una corriente, usualmente de 100 amperios,

y medir la caída de tensión en voltios a través de los contactos cerrados. Luego se calcula la resistencia dividiendo la tensión entre la corriente. El valor resultante se lee en micro ohmios, donde 1 micro ohmio es igual a 10^{-6} ohmios.

Este tipo de medición se usa en todo tipo de contactos.

RESISTENCIA DINÁMICA DEL CONTACTO:

Para algunos interruptores automáticos, especialmente aquellos que usan una boquilla de arco para dirigir el flujo del medio de apagado (por ejemplo en los interruptores automáticos de SF6 tipo puffer, ver la Figura 10b), el desgaste de los contactos de arco, si es excesivo, puede afectar la capacidad de apagado de arco del interruptor, teniendo como consecuencia su destrucción.

De modo que la evaluación del contacto de arco no se puede realizar con solamente medir la resistencia de contacto de la forma clásica descrita previamente. Se desarrolló un nuevo método llamado resistencia dinámica de contacto. Consiste en medir la resistencia de contacto como se describió antes pero de forma continua a medida que el contacto se mueve desde el primer contacto hasta su posición completamente cerrada. Este método permite medir la longitud del contacto de arco y compararlo a un valor medido cuando estaba nuevo, lo cual ayuda a determinar su estado de erosión.

Es importante tener en cuenta que este método no se aplica a los contactos tipo tope (butt).

RESUMEN

El arco eléctrico juega un rol importante en la elección del material y la forma de los contactos de interrupción y de establecimiento.

En los arcos de alta presión, se genera un intenso calor, los cuales tienen que resistir los contactos y mantener sus propiedades conductivas. Esto se logra usando aleaciones de tungsteno y cobre o cobre revestido de plata y con la forma de tulipán para los contactos.

En los arcos en vacío, la elección del material es crucial para limitar las emisiones de vapores y favorecen su condensación dentro de microsegundos, de otro lado se destruyen los contactos. La aleación de cobre cromado libre de oxígeno es el mejor material para los interruptores

automáticos de alta tensión y se usa comúnmente la forma de tope (butt) para los contactos.

BIBLIOGRAFÍA

El presente artículo se basa en nuestra experiencia personal.

- Power circuit breaker theory and design, editado por C.H. Flurscheim, revised edición 1982;
- Circuit Interruption theory and techniques, editado por Thomas E. Browne Jr., edición 1984;
- Contact material, Proc. 9th Int. Conf. Electr. Contact phenom./24th Holm Conf. Electr. Contacts, IIT, Chicago, Septiembre 1978, páginas 81-86.
- JK. Lemelson, The failure of closed heavy current contact pieces in insulating oil at high temperature, Proc. 6th Int. Conf. Electric contact phenom., IIT, Chicago, Junio 1972, páginas 252-258;
- R. Holm and E. Holm, Electric Contacts: Theory and Application, Springer-Verlag, New York, 1967, páginas 89, 136, 161, 438;
- COMPARISON BETWEEN VACUUM AND SF6 CIRCUIT BREAKER FOR MEDIUM VOLTAGE en <http://www.panickker.net/article6.htm>
- Circuit breaker: Definition and Much More de Answers.com Science and Technology Encyclopedia.

Acerca de los Autores

Stéphan Perron, profesor de Hydro-Québec en mantenimiento de interruptores automáticos de alta tensión
Stéphan Perron enseña mantenimiento y resolución de problemas en Interruptores Automáticos de Alta Tensión y Termografía por más de 7 años en el Centro de Competencia de Hydro-Québec ubicado en Saint Antoine des Laurentides, QC, Canadá. Desarrolló su experiencia trabajando por el lado del mantenimiento de Interruptores Automáticos de Alta Tensión de Hydro-Québec por 18 años. Sus especialidades son los interruptores automáticos marca ABB (modelos SFE, HPL, ELF y DLF), de GE (modelos KSO, AT) y todos los instrumentos de pruebas relacionados, así como los seccionadores VBM de Joslyn, el manejo y el comportamiento del gas SF6 y la interpretación de las lecturas termográficas (Nivel 1) de los interruptores. Stéphan Perron tiene un

grado DEC en Electrónica de CEGEP St Jérôme, QC, Canadá.

Emile Nasrallah es un ingeniero eléctrico especializado en el mantenimiento de interruptores de potencia. Luego de su graduación en 1984, trabajó como un ingeniero en el campo. En 1990 se unió al fabricante mundial de interruptores GEC ALSTOM como ingeniero especialista en campo. En 1997 se convirtió en el gerente en la división de interruptores de SF6 de MT y AT de ALSTOM, siendo responsable del soporte técnico, mantenimiento y entrenamiento para los interruptores de SF6. En 2001 se volvió en gerente de la división de interruptores de sople de aire para AREVA. Estuvo a cargo del programa de restauración de interruptores de sople de aire (PK y PKV) en conjunto con Hydro-Quebec e implantó un sistema único de administración para el programa (un promedio de 35, 735 kV PK interruptores de sople de aire por año). En 2005 se unió a General Electric Company de Canadá como un especialista Senior de interruptores y está a cargo de la división de interruptores del centro de servicio de Montreal, responsable del programa de reemplazo y de refabricación para interruptores en aceite.

El Dr. Fouad Brikci es el presidente de Zensol Automation Inc. Él fue el primero en introducir el concepto de equipos de prueba verdaderamente computarizados en el campo de los analizadores de interruptores automáticos. Como profesor universitario en Ecole Polytechnique, Algeria y como investigador del CNRS LAAS en Francia, el Dr. Brikci ha desarrollado su experiencia en los campos de la electrónica, la automatización y la ciencia de la computación. La mayoría de sus actividades se dirigieron a las aplicaciones industriales de las computadoras. Entre sus logros se encuentra el desarrollo de sistemas de medición completamente computarizados para el control de calidad en la fabricación de interruptores, los laboratorios y los servicios de mantenimiento de las empresas eléctricas. El Dr. Brikci cuenta con el grado de PhD en Electrónica y un Master en Ciencias en EEA (electrónica, electrotécnica y automatización) de la Universidad de Bordeaux, Francia.

<http://www.zensol.com>
email : zensol@zensol.com

Fouad Brikci, Zensol Automation Inc.