

## ENERGÍA

# TXpand™, la solución de transformador resistente a la rotura

La formación de arcos internos en transformadores en baño de aceite puede tener consecuencias catastróficas. Diseñada utilizando una metodología numérica, la solución TXpand de ABB, que incluye un diseño optimizado del depósito y una selección de componentes más seguros, puede mitigar los efectos de la mayoría de los eventos de formación de arcos internos.



01 Pese a las medidas de diseño orientadas a evitar la formación de arcos internos en los transformadores, siempre hay un riesgo residual de que se produzcan y de que se rompa el depósito. ABB ha desarrollado y optimizado su solución de transformador resistente TXpand específicamente para el sector eléctrico con vistas a mitigar las consecuencias de la formación de arcos internos.

02 Características de TXpand.



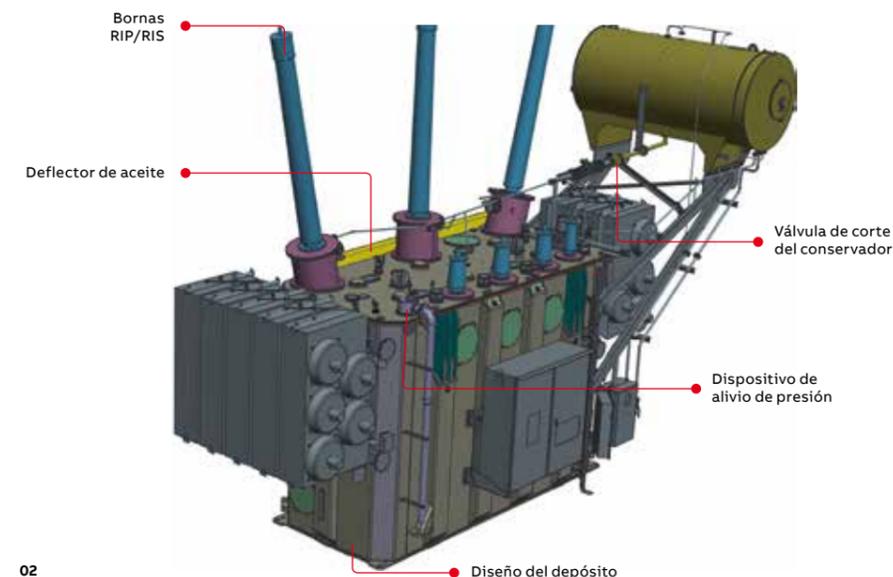
**Samuel S. Brodeur**  
ABB Inc.  
Varenes, Canadá

samuel.s.brodeur@ca.abb.com



**Huan M. Dinh**  
ABB Inc.  
Lexington, KY,  
Estados Unidos

huan.m.dinh@us.abb.com



02

Los transformadores en baño de aceite son componentes críticos de la red eléctrica que funcionan continuamente en condiciones adversas. Aunque baja (en torno al 1 % por año de servicio del transformador [1]), la tasa de fallos importantes de estos transformadores no puede despreciarse, especialmente porque las consecuencias de estos fallos (derrames importantes de aceite, incendios y daños colaterales) pueden ser catastróficas.

Un arco interno de baja impedancia en equipos eléctricos en baño de aceite calienta y vaporiza el aceite circundante para crear una burbuja de gas. Este efecto no es el mismo que el de una explosión química, que requiere una mezcla explosiva de combustible y oxidante. Por este motivo, los sistemas de prevención de explosiones, como los discos de rotura normalmente utilizados en aplicaciones petroquímicas, rara vez se utilizan en los transformadores.

ABB ha desarrollado y optimizado la solución TXpand específicamente para mitigar los efectos de la formación de arcos internos en los transformadores →1.

### TXpand

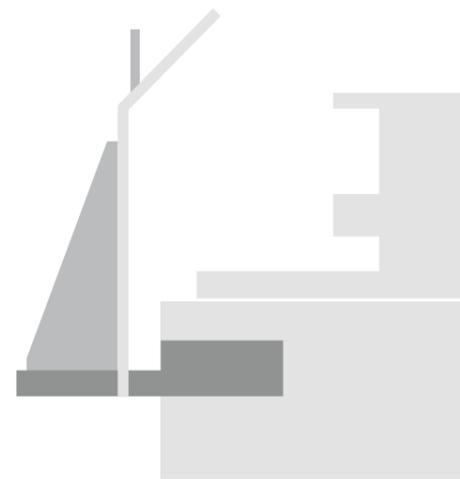
Una estrategia para reducir el riesgo de incendios debe contemplar varias medidas de protección eléctrica, siendo la más importante de ellas la inclusión de un interruptor automático de acción rápida para limitar la duración del fallo y, por lo tanto, la cantidad de energía que se inyecta en la

zona del fallo. La mitigación también debe incluir un diseño de transformador que complemente las contramedidas eléctricas. TXpand incluye cinco de estas medidas →2.

### Diseño del depósito

Un estudio de Hydro-Québec sobre su red de 735 kV reveló que en 50 de 74 fallos importantes, la rotura del depósito era la causa principal de los vertidos de aceite y, por tanto, del riesgo de incendio [2]. Este tipo de peligro puede gestionarse mediante el diseño del depósito resistente a la rotura aquí propuesto. La filosofía es contener una energía de arco específica absorbiendo la energía del fallo mediante la deformación plástica del depósito. El correspondiente diseño del depósito es el núcleo de la solución TXpand. TXpand se ha desarrollado mediante un cuidadoso análisis y modelización para hacer más flexibles las áreas más rígidas y más fuertes los puntos más débiles. Los puntos estratégicos de rotura permiten controlar hasta los fallos más impredecibles.

La filosofía es contener una energía de arco específica absorbiendo la energía del fallo mediante la deformación plástica del depósito.



03a



03b

### Bornas RIP/RIS

Los fallos de las bornas de papel impregnado en aceite (OIP) provocan el mayor número de incendios después de los fallos internos del transformador [1]. El estudio de Hydro-Québec mencionado anteriormente mostró que estos fallos de bornas eran la segunda causa principal de los vertidos de aceite (18 casos de los 74 fallos) [2]. El uso de bornas de papel impregnado en resina (RIP) o sintético impregnado en resina (RIS) puede mitigar el riesgo de vertidos graves de aceite, incendios y roturas del revestimiento porcelánico durante la formación de arcos internos.

### Válvula de corte del conservador

La válvula de corte del conservador se monta en el tubo de aceite que une el conservador y el depósito. La válvula permite el flujo de aceite en ambas direcciones pero cierra y activa una alarma si el caudal supera un determinado límite. En caso de fallo de la borna o rotura del tanque principal, la válvula de corte debería evitar el vertido de aceite desde el conservador y prevenir contribuir a un incendio.

### Dispositivo de alivio de presión (PRD)

Un PRD es una válvula accionada por resorte que se utiliza para liberar la presión interna después de que la deformación del depósito haya consumido la energía del arco. A la salida del PRD hay una tubería instalada para guiar el aceite y el gas correctamente hasta el sistema de contención base.

### Deflector de aceite

La quinta de las medidas de mitigación del diseño del transformador se refiere al punto estratégico de rotura, diseñado para estar en la soldadura de la cubierta del transformador. Dado que durante un breve periodo de tiempo podría expulsarse una

mezcla de aceite caliente y gas, puede instalarse un deflector de aceite en los puntos estratégicos de rotura para desviar la corriente y evitar vertidos que afecten a la seguridad del personal →3.

### ¿Qué hay detrás del diseño del depósito?

La formación de arcos en el aceite se ha estudiado durante muchas décadas y se ha aprendido mucho sobre la ciencia de este fenómeno. Por ejemplo, se sabe que la energía del arco depende de la máxima corriente disponible, la duración del arco (que es corta si la protección eléctrica es eficiente) y la tensión del arco. A partir de un caso registrado en el sistema de HydroQuébec de 735 kV, se observó un efecto de presión de la burbuja de gas circundante sobre la tensión [3] y se propuso una ecuación más precisa para calcular la tensión del arco, el más evasivo de los parámetros a medir.

### Es fundamental conocer bien la ciencia del propio depósito.

La composición química del arco se ha investigado desde 1953, principalmente para aplicaciones de interruptores. Los autores de cinco estudios publicados coinciden en que la tasa de generación de gas del arco es lineal y la temperatura en la zona de reacción es de unos 2000 °K [1]. En el marco de un amplio programa experimental de transformadores de distribución combinado con simulaciones numéricas, se concluyó que un factor de conversión de gas a volumen de 85 cc/kJ a temperatura y presión estándar coincide bien con la realidad [4]. Esta generación de gas del arco se utiliza en la siguiente expresión para caracterizar la presión acumulada en un depósito de transformador [3].

—  
03 Al estar dirigido hacia la pared externa del tanque y hacia abajo, el deflector de aceite evita que el aceite ponga en peligro al personal.

03a Situación normal.

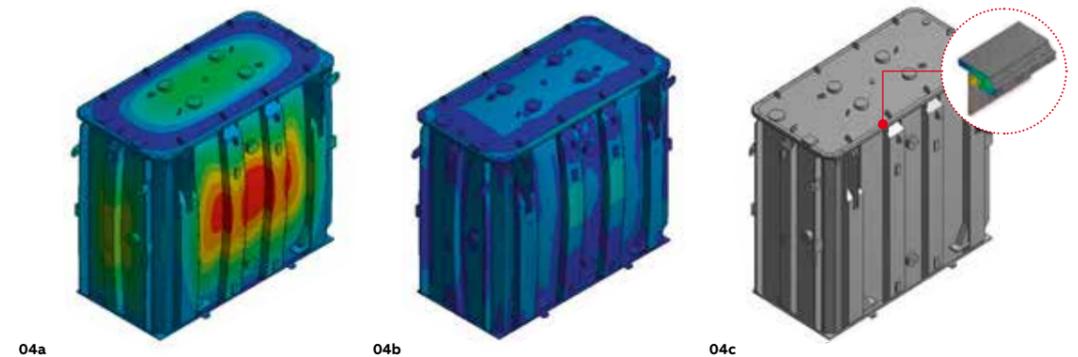
03b Con el flujo de aceite expulsado desviado.

—  
04 Proceso de análisis numérico del depósito.

04a Desplazamiento (flexibilidad del tanque).

04b Esfuerzo (evaluación global de la resistencia).

04c Regiones críticas (puntos de rotura del depósito).



04a

04b

04c

La ecuación tiene un factor de amplificación dinámico que es una relación entre la presión dinámica localizada y la presión constante final. Este efecto dinámico se observó en los experimentos con transformadores con explosiones químicas en recipientes especiales [5] y en un extenso estudio experimental numérico con inyección a alta presión [3].

$$P_s = F \left[ 100 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{kE}{100C}} - 50 \right]$$

Ps: presión calculada del depósito (kPa)

E: nivel de energía del fallo a soportar (kJ)

k: factor de conversión de energía del arco (5,8 x 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/kJ)

C: coeficiente de expansión del depósito (m<sup>3</sup>/kPa)

F: factor de amplificación dinámica

Es fundamental conocer bien la ciencia del propio depósito. La importancia del coeficiente de expansión del depósito por lo que respecta a la presión interna del depósito se determinó por primera vez en 1959, en el marco de experimentos en depósitos de transformadores rectangulares bañados en aceite sometidos a descargas repentinas de nitrógeno, y se confirmó simultáneamente mediante estudios numéricos [6,7]. Sin embargo, las características de resistencia de los depósitos eran prácticamente desconocidas, por lo que en 2011 Hydro-Québec y ABB iniciaron una investigación exhaustiva sobre este tema. A lo largo de más de cinco años de investigación, se desarrolló una metodología numérica para analizar el comportamiento del depósito del transformador en el dominio del plástico, hasta el punto de rotura. Estos resultados numéricos se han validado mediante aproximadamente 40 experimentos destructivos.

Todos los parámetros numéricos, tales como la simplificación geométrica, el tamaño de malla, el tipo de elemento, el elemento de contacto, las condiciones de contorno y el análisis de resultados, se calibraron a través de este proceso experimental. Estos años de aprendizaje produjeron simulaciones numéricas con resultados precisos de desplazamiento y, por lo tanto, el coeficiente de expansión del depósito y, en última instancia, las características de resistencia del depósito →4.

### Prueba en transformadores de potencia grandes

Se diseñó y fabricó un transformador a escala completa de 330 kV y 210 MVA equipado con una maqueta de pieza activa de acuerdo con las reglas de diseño del TXpand [8]. Este depósito lleno de agua fue sometido a una inyección de aire presurizado equivalente al gas producido en el aceite por una energía de arco de 20 MJ. Esta alta liberación de energía es, hasta donde sabe ABB, la más alta jamás alcanzada. El depósito se expandió según las predicciones de las simulaciones numéricas de ABB y el depósito absorbió toda la energía inyectada sin ninguna rotura →5. El PRD tardó más de 5 s en liberar la presión interna del depósito, que es bastante lento en comparación con lo que dura un fallo de tres ciclos (50 ms).

—  
Todos los parámetros numéricos se calibraron mediante un proceso experimental.



06

En una segunda prueba se inyectó una presión más alta, con la intención de provocar la rotura del tanque. Incluso si se crea la burbuja de gas en el fondo del depósito, el depósito se rompe en el punto de estratégico rotura previsto por la simulación numérica, es decir, en la soldadura de la cubierta del depósito.

#### Prueba del transformador SSVT

Las técnicas de simulación del TXpand, desarrolladas para transformadores de potencia, se aplicaron a un transformador de tensión de servicio (SSVT) de nivel básico de impulso (BIL) de 650 kV, cuyo volumen del depósito interno es una centésima parte el de un transformador de potencia. Este análisis dio lugar a varios cambios de diseño para mejorar la resistencia del depósito frente a la formación de arcos internos. En 2017 se probó un conjunto completo de SSVT con una corriente de fallo interno de 40 kA para 300 ms de conformidad con la norma IEC 61869-1 2007 para el máximo grado de protección (etapa 2 y clase II) →6. El SSVT superó con éxito todos los requisitos de la prueba: el depósito resistió la presión, no se observó ninguna expulsión ni fragmentación y los PRD evacuaron el aceite en unos 5 s. Este experimento demostró que la potente metodología numérica desarrollada para los transformadores de potencia grandes puede reducirse para los SSVT.

—  
05 Prueba de presión del depósito de transformador de 330 kV.

05a Antes del evento de fallo interno.

05b Después del evento de fallo interno.

06 Prueba de fallo interno del SSVT (40 kA para 300 ms).

—  
La solución TXpand se basa en una metodología numérica, un conocimiento profundo de la generación de gas por la formación de arcos y muchos años de investigación y desarrollo.

#### TXpand es simple, eficiente y rentable

La solución TXpand se basa en una metodología numérica, un conocimiento profundo de la generación de gas por la formación de arcos y muchos años de investigación y desarrollo. Los experimentos tanto en grandes transformadores de potencia como en SSVT han demostrado la eficacia de TXpand. En colaboraciones con clientes, TXpand se ha descrito como sencillo, eficiente y rentable. ABB dispone ahora de una tecnología probada que reduce considerablemente las consecuencias de un arco interno en un transformador. También podría utilizarse un transformador más seguro como punto de partida a partir del cual se podría iniciar una revisión de los costes y riesgos del costoso sistema de contención del aceite base de la subestación. ●



05a



05b

#### Referencias

[1] Cigré, "Guide for Transformer Fire Safety Practices – Working Group A2.33," Cigré – Technical Brochure 537, 2013.

[2] M. Foata, "Power Transformer Fire Risk assessment," Cigré, Sydney, Australia, 2008.

[3] M. Foata and J.-B. Dastous, "Power transformer tank rupture prevention," Cigré, Paris, 2010.

[4] J.-B. Dastous and M. Foata, "Analysis of Faults in Distribution Transformers with MSC/PISCES-2DELK," MSC World User's Conference, Los Angeles, 1991.

[5] T. Kawamura et al., "Prevention of Tank Rupture Due to Internal Fault of Oil Filled Transformers," Cigré session, Paris, 1988.

[6] M. Foata and G. Khouzam, "Power Transformer Tank Rupture," Canadian Electrical Association, Engineering and Operating Division, Toronto, 1994.

[7] R. E. Kothmann and D. G. Thompson, "Power Transformer Tank Rupture: Risk Assessment and Mitigation," EPRI, 1995.

[8] S. Brodeur and J.-B. Dastous, "Design and Testing of an Arc Resistant Power Transformer Tank," IEEE Transactions on Power Delivery, 2019. (Paper still in review by IEEE.)