

Power Transformer Diagnosis Using FRA and Fuzzy Sets

J. C. Gonzales, *Student Member, IEEE* and E. E. Mombello, *Senior Member, IEEE*

Abstract— This paper presents a novel method for failure detection and interpretation in power transformers using Frequency Response Analysis (FRA). Mathematical indexes are used for failure detection. The performance of the most used mathematical indexes is evaluated and the most sensitive for frequency response analysis is selected. An approach based on a suitable codification of response frequency bands is proposed for failure classification. A novel characteristic of this work is the application of Fuzzy Sets to represent the mathematical index limits for failure detection. The proposed method has been validated using two different case studies, and the diagnosis results obtained for them show a good agreement with the real failures.

Keywords— power transformer, frequency response analysis, fuzzy sets, mathematic index, frequency bands.

I. INTRODUCCIÓN

EN el área temática del diagnóstico de transformadores de potencia, FRA es una de las técnicas más prometedoras, debido a su enorme sensibilidad a ligeras deformaciones en los devanados, que con el tiempo pueden traducirse en fallas más severas [1]-[4], [5].

Se han realizado muchas investigaciones aplicando esta técnica, proponiendo el empleo de indicadores matemáticos, para la detección de fallas [6]-[7] y definición de regiones de frecuencia para la interpretación de fallas [8], [9]. Estos indicadores son básicamente modelos matemáticos que cuantifican diferencias correlacionadas o no entre curvas FRA comparables [6], [7], [10]-[11]. A continuación se mencionan algunos indicadores matemáticos que comúnmente se emplean en la práctica.

Los diferentes trabajos referidos a indicadores matemáticos empleados en FRA [10]-[11] muestran que el Coeficiente de Correlación (CC), la Desviación Efectiva (DE), el índice Min-Max (MM) y Factor Relativo (FR), son los más comúnmente usados y poseen buenas características cuando se quieren evaluar diferencias entre registros FRA. En las publicaciones previas [7], [9], se muestra que la sensibilidad y la correcta evaluación de los indicadores matemáticos dependen de la banda de frecuencia en la cual se realiza la evaluación. La adecuada selección de dicho rango frecuencial puede conducir a un incremento en la sensibilidad para detectar fallas.

Asimismo, algunas entidades y trabajos relacionados a interpretación de fallas con FRA, [8], [9], [12], muestran que es posible identificar fallas en función de su influencia en las distintas regiones de frecuencia. Sin embargo, un método adecuado y automático no ha sido establecido hasta ahora,

debido a la gran complejidad que representa interpretar una falla a partir de cambios en la respuesta en frecuencia.

En el presente artículo se muestra una metodología novedosa para interpretar fallas mediante mediciones de respuesta en frecuencia FRA, empleando conjuntos difusos para representar los límites de detección de falla y su posterior interpretación de la falla específica.

El artículo está estructurado como sigue. En la sección II, se establece el esquema general de la metodología. En la sección III se evalúan los diferentes indicadores matemáticos empleados en FRA. En la sección IV se muestra el método de interpretación propuesto y en la sección V se lo reformula mediante la aplicación de la teoría de conjuntos difusos. En la sección VI se plantea el procedimiento de cálculo, procediendo a la validación de la metodología propuesta en la sección VII. Finalmente en la sección VIII se presentan las conclusiones y aportes del trabajo.

II. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta está estructurada según se indica en la Fig. 1. La metodología consta de dos módulos:

A. Módulo de detección de falla.

En este módulo se definen los rangos de frecuencia en los cuales se evalúa el indicador matemático. Se definen los límites de falla mediante conjuntos difusos con el fin de representar adecuadamente las incertidumbres entre una posible falla y la condición normal.

B. Módulo de interpretación de fallas.

Este módulo está estructurado en función de fallas que han sido tipificadas por expertos, definiendo regiones de frecuencia y la influencia que tienen las diferentes fallas. Se establece una codificación para las distintas regiones de frecuencia y para cada tipo de falla, según la severidad de los desplazamientos en la función de transferencia, por ejemplo deformación ligera o deformación severa. Cada código representa los límites de falla, expresados mediante conjuntos difusos, según se mencionó en el módulo de detección de falla.

III. EVALUACIÓN DE INDICADORES MATEMÁTICOS PARA FRA

En esta sección se evalúan las propiedades de los indicadores matemáticos CC, MM, FR y DE, a partir de los cuales se elige el indicador matemático empleado en la metodología propuesta.

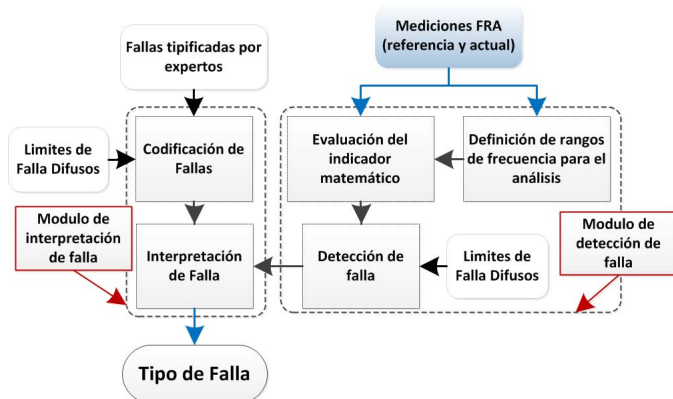


Figura 1. Metodología propuesta para la interpretación de fallas.

A. Análisis de indicadores matemáticos para FRA.

Para la selección del indicador matemático apropiado se deben considerar principalmente tres factores: a) la sensibilidad a los desplazamientos cuando se comparan dos curvas FRA; b) los rangos de frecuencia en los cuales puede ser empleado y c) la posibilidad de representarlo mediante números difusos.

Para los indicadores matemáticos CC y MM se concluye lo siguiente:

El indicador CC y MM son adecuados cuando los desplazamientos medidos no están correlacionados; además, el índice MM es sensible a desplazamientos correlacionados. El rango de valoración es de 0 a 1. Pueden ser empleados en cualquier banda de frecuencia; sin embargo no se ha establecido valores límites indicativo de falla [7], [10].

1. Factor Relativo (FR).

Este indicador es empleado por la norma de la República de China, estando los procedimientos y métodos de cálculo establecidos en [13]. Esta normativa aplica como criterio de detección de fallas, los límites indicados en la Tabla I.

TABLA I. RELACIÓN DE FR Y EL GRADO DE DEFORMACIÓN DEL DEVANADO.

GRADO DE DEFORMACIÓN	FACTOR RELATIVO RF
Severa	$R_{LF} < 0.6$
Obvia	$1 > R_{MF} \geq 0.6$ o $R_{MF} < 0.6$
Ligera	$2.0 > R_{LF} \geq 1$ o $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
Condición Normal	$R_{LF} \geq 2.0$, $R_{MF} \geq 1$ y $R_{HF} \geq 0.6$

Los rangos de frecuencia en los cuales se aplica este índice son: R_{LF} , para la región de 1 kHz hasta 100 kHz; R_{MF} , en regiones de 100 kHz hasta 600 kHz; y, R_{HF} para la región de 600 kHz hasta 1 MHz.

Este indicador puede ser fácilmente representado por medio de conjuntos difusos, según los valores de la Tabla I. Sin embargo, su aplicación está limitada a las bandas de frecuencias fijas mencionadas anteriormente.

2. Desviación Efectiva (DE).

Este indicador matemático es empleado por la Electric Power Research Institute (NCEPRI) y forma parte de las herramientas de análisis de equipamientos de medición FRA de Omicron Electronics [14]. La expresión para el cálculo está dada por:

$$DE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{1i} - y_{2i}) \right)^{1/2} \quad (1)$$

Este indicador es muy sensible a deformaciones ligeras. Los rangos de valoración de falla están indicados en la Tabla II.

TABLA II
FACTORES DE EVALUACIÓN DE DEVANADOS.

NIVEL DISTORSIÓN	Factor de Evaluación dB
Condición Normal	$DE < 3.5$
Distorsión Ligera	$3.5 < DE < 7$
Distorsión Grave	$DE > 7$

Los rangos de frecuencia en los cuales este índice puede ser aplicado son: Para devanado de alta tensión, entre 10 kHz y 515 kHz; devanados de baja tensión, entre 10 kHz y 600 kHz; y, devanados terciarios, entre 10 kHz y 700 kHz.

Al igual que en el caso del índice FR, este puede ser fácilmente representado por medio de conjuntos difusos, según los valores de la Tabla II. En este caso, a diferencia del indicador FR, la definición de los límites de falla es única para un gran rango de frecuencias.

B. Selección del indicador matemático adecuado.

La metodología requiere que un indicador matemático que pueda ser empleado en un rango amplio de frecuencia, debiendo asimismo estar establecidos los valores límites de detección de falla. En función de las características anteriormente descritas, se verifica que los indicadores FR y DE cumplen favorablemente los requisitos a, b y c, mencionados en el punto A. Para la selección del indicador con mejores propiedades, se realizó un análisis empleando diferentes mediciones FRA en transformadores con falla. Se eligieron dos casos, los cuales se indican en la Tabla III. El caso 1 corresponde a un caso de falla de tipo eléctrico (corto circuito a tierra) y el segundo caso de falla de tipo mecánico (inclinación del conductor).

TABLA III. CÁLCULO DE INDICADORES MATEMÁTICOS.

FRECUENCIA	Caso 1		Caso 2	
	DE	FR	DE	FR
Banda 1	2.486	3.999	0.914	5.623
Banda 2	5.424	2.735	0.892	5.651
Banda 3	1.110	3.671	2.926	3.226
Banda 4	0.764	4.737	3.843	0.474
Banda 5	0.890	4.524	3.499	1.842
Banda 6	1.022	4.270	1.772	3.818

El cálculo de los indicadores se realizó en las siguientes bandas de frecuencia: banda 1, para el rango de frecuencia 20 Hz a 1 kHz; banda 2, para la década de frecuencia 1 kHz a 10 kHz; banda 3, 10 kHz a 50 kHz; banda 4, 50 kHz-100 kHz; banda 5, 100kHz a 500 kHz; y, banda 6, 500 kHz a 1 MHz.

Las bandas de frecuencia mencionadas fueron seleccionadas de modo de considerar rangos cortos de frecuencia, los cuales, según estudios realizados [7]-[11], ayudan a incrementar la sensibilidad de los indicadores matemáticos. Los rangos de frecuencia empleados en este análisis son solo referenciales; sin embargo, cualesquiera sean los rangos que se elijan, cuando se trata de comparar la sensibilidad de los indicadores, los resultados obtenidos son totalmente válidos y concluyentes.

Los resultados en la Tabla III muestran que el indicador matemático DE es el más sensible, puesto que detecta falla en

los dos casos de mediciones analizados, y no así en el caso del indicador FR. Por tanto, en este trabajo se empleará el indicador matemático DE.

C. Análisis del desempeño optimo del indicador DE.

Para analizar la sensibilidad del indicador DE ante cambios en la región de frecuencia, se considera un caso de estudio, que es una medición de respuesta en frecuencia de un transformador de 100 MVA_550/230 kV, en la fase R del devanado HV (medición en fases homólogas), como se indica en la Fig. 2. De la comparación de estas curvas se evidencia posible falla en el rango de frecuencia 300 Hz a 10 kHz.

Se han realizado dos cálculos diferentes para el análisis: El primero se realizó para la banda de frecuencia propuesta por la NCEPRI, es decir en la banda 10 kHz-515 kHz. El segundo, para las regiones de frecuencia 20-100 Hz, 100 Hz-10 kHz, 10-100 kHz y 100 kHz-1 MHz, es decir por décadas de frecuencia. Asimismo, se ha realizado un cálculo alternativo dentro de la región 100 Hz- 10 kHz, en la banda donde efectivamente se muestran los desplazamientos, es decir entre 400 Hz-7 kHz.

El resultado para el primer cálculo fue DE=4.49, que corresponde a deformación ligera, según la Tabla II. Para el segundo cálculo, cuyos resultados se indican en la Fig. 2, se debe resaltar el valor calculado en la región de frecuencia 100 Hz-10 kHz, donde en principio se tienen dos valores; DE=4.41 para la década de frecuencia y DE=5.11 para el sub-rango 400 Hz-7 kHz. Estos resultados muestran que la sensibilidad del indicador matemático depende de la banda de frecuencia en el que se evalúa, y presenta mayor sensibilidad cuando se evalúa exclusivamente en la región de frecuencia afectada. Por tanto, para el caso ejemplo analizado, se selecciona el valor calculado de DE=5.11 para la región de frecuencia 100 Hz-10 kHz.

IV. CODIFICACIÓN DE REGIONES DE FRECUENCIA DEFINIDAS POR EXPERTOS PARA INTERPRETACIÓN DE FALLAS

El rango de medición de respuesta en frecuencia es normalmente entre 20 Hz y 1 MHz.

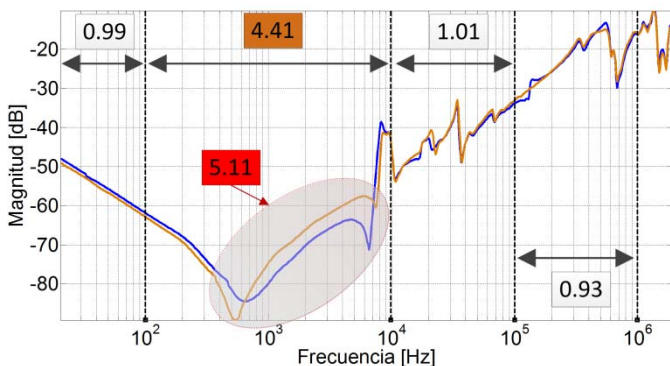


Figura 2. Cálculo de la DE en diferentes regiones de frecuencia.

Este rango de frecuencia puede ser dividido principalmente en tres regiones de frecuencia; baja frecuencia LF, media frecuencia MF y alta frecuencia HF. Para el mejor desempeño del indicador matemático, las bajas y altas frecuencias se subdividen en las siguientes subregiones; LF₁ y LF₂ para las bajas frecuencias, HF₁ y HF₂ para las altas frecuencias [7]-[8]-

[9].

Para interpretar un falla, se requiere definir una relación entre las distintas fallas tipificadas por expertos y la influencia que tienen en las diferentes regiones de frecuencia [8]-[9]. En este trabajo se establecen como regiones para el cálculo las décadas de frecuencia ya introducidas en el punto C de la sección II: LF₁ para la región 20 Hz-100 Hz, LF₂ para 100 Hz-10 kHz, MF para 10 kHz-100 kHz y HF₁ entre 100 kHz y 1 MHz.

Si bien publicaciones previas y publicaciones de otros autores [7]-[8]-[9], muestran que es conveniente definir estas regiones de frecuencia en forma dinámica, en los análisis de este artículo se definirán como regiones fijas, considerándose suficiente para los propósitos del trabajo que pretende mostrar la formulación del método difuso de interpretación.

A. Codificación de rangos de frecuencia para la interpretación de fallas con FRA.

En las tablas IV y V se indican las diferentes fallas a las cuales el análisis FRA es sensible. Asimismo, en ellas se muestra el grado de influencia que tienen las distintas fallas en las diferentes regiones de frecuencia. La estructura básica y la idea general de la codificación indicada en las tablas IV y V, se ha basado en la metodología presentada en la norma IEC y la IEEE para la detección de fallas insipientes en transformadores de potencia, mediante el análisis de gases disueltos y la codificación de relación de gases [15].

En estas tablas se empleó la siguiente codificación para fallas eléctricas y mecánicas, según el grado de deformación:

C_i(DE) = C₀ si (DE<3.5), para condición normal.

C_i(DE) = C₁ si (3.5<DE<7), para distorsión ligera.

C_i(DE) = C₂ si (DE>7), para distorsión grave.

TABLA IV. FALLAS TÍPICAS DE TIPO ELÉCTRICO.

TIPO DE FALLA	LF ₁	LF ₂	MF	HF ₁	HF ₂
(1) CC entre espiras	C ₂	C ₁	C ₁	C ₀	C ₀
(2) CC devanado y núcleo	C ₂	C ₁	C ₀	C ₀	C ₀
(3) Núcleo no aterrado	C ₀	C ₁	C ₀	C ₀	C ₀
(5) Circuito abierto	C ₂	C ₂	C ₂	C ₁	C ₁
(5) Guías acortadas	C ₀	C ₂	C ₀	C ₀	C ₀
(6) CC a tierra	C ₀	C ₁	C ₀	C ₀	C ₀

TABLA V. FALLAS TÍPICAS DE TIPO MECÁNICO.

TIPO DE FALLA	LF ₁	LF ₂	MF	HF ₁	HF ₂
(7) Pandeo devanado	C ₀	C ₁	C ₂	C ₁	C ₀
(8) Inclinación conductor	C ₀	C ₀	C ₁	C ₁	C ₀
(9) Colapso axial	C ₀	C ₀	C ₂	C ₂	C ₀
(10) Pérdida sujeción	C ₀	C ₀	C ₀	C ₂	C ₀
(11) Guías deformadas	C ₀	C ₀	C ₀	C ₀	C ₂
(12) Sin falla	C ₀	C ₀	C ₀	C ₀	C ₀

En las tablas IV y V, las regiones de frecuencia son las décadas de frecuencia establecidas al principio de esta sección. El indicador DE se evalúa en cada una de las regiones de frecuencia así definidas.

B. Interpretación de fallas con FRA.

Las fallas eléctricas y mecánicas tipificadas, dadas en las tablas IV y V, quedan caracterizadas por los vectores de codificación dados en las ellas, siendo los elementos de dichos vectores los códigos C_i definidos para cada falla específica. Los

valores posibles de los mismos son C_0, C_1 y C_2 . El método de cálculo establece que el número de elementos del vector es igual al número de regiones de frecuencia definidas (5 regiones). La metodología de clasificación consiste en realizar una comprobación de todas las fallas tipificadas dadas en las tablas IV y V, comparando la coincidencia de los vectores de codificación de cada una de ellas con el vector de codificación de la medición actual, para chequear la existencia de una falla tipificada determinada. Esta operación se puede realizar empleando un vector de interpretación, cuyos elementos C_{ki} son códigos de valoración de falla y son números lógicos (1 ó 0), y que permite interpretar una falla específica si el vector de codificación evaluado coincide con alguno de los dados en las tablas IV o V. En la tabla VI se presenta un ejemplo de cálculo, donde se muestra la comprobación de la posible existencia de falla tipificada de tipo mecánico “Pérdida de Sujeción” (ver tabla V, índice de falla $k=10$). Se calculan primeramente los cinco códigos de la medición actual a través de la evaluación del índice DE por rango de frecuencia y se comprueba la concordancia de los mismos con la falla tipificada k que se está analizando. En toda región de frecuencia en la que se detecte concordancia de código, el correspondiente elemento del vector de interpretación se hace $C_{ki}=1$, de otro modo se fija en $C_{ki}=0$. Luego de haber establecido todos los valores binarios de los elementos del vector, se calcula la combinación de los mismos, que es el producto de sus elementos. Si el resultado es $F(k)=1$, se interpreta que existe la falla tipificada k bajo análisis. En el caso del ejemplo se detecta que existe falla de tipo mecánico “Pérdida de Sujeción”, según se indica en la Tabla VI.

TABLA VI. EJEMPLO ANALÍTICO.

Procedimiento	LF ₁	LF ₂	MF	HF ₁	HF ₂
Combinación-F _{SFRA} (4)	C ₀	C ₀	C ₀	C ₂	C ₀
Calculo-DE	0	0	0	7.5	0
Valoración-Código	C ₀ (0)	C ₀ (0)	C ₀ (0)	C ₂ (7.5)	C ₀ (0)
Valor Binario-Código	1	1	1	1	1

Según la definición del vector de interpretación, la interpretación de fallas se realiza mediante el empleo de la ecuación (2), que considera las fallas eléctricas y mecánicas de las Tablas IV y V, respectivamente. Es decir, la operación de clasificación de una falla como una de las fallas tipificadas se efectúa mediante el producto de los códigos del vector de interpretación, que a su vez depende del vector de codificación de la medición actual, calculado a partir de los valores de DE en cada región de frecuencia evaluada.

La certeza de la interpretación mediante la ecuación (2) es tanto mayor cuanto más adecuada es la tipificación de las fallas y la forma como son establecidos los límites de severidad de las mismas. Para realizar una correcta interpretación de fallas mediante el empleo de esta ecuación, se la debe reformular mediante la teoría de conjuntos difusos, tal como se indica en el siguiente apartado.

$$F(k) = \prod_{i=1}^5 C_{ki}(DE_i) \tag{2}$$

$k = 1, 2, \dots, n$

donde k es el índice de falla usado en las Tablas IV y V (n

fallas).

V. TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE FALLAS.

Un conjunto difuso expresa el grado de pertenencia al mismo, que tiene cada uno de los elementos. Por ejemplo, el conjunto difuso A en X puede definirse como el conjunto de pares ordenados expresados según la ecuación (3).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \tag{3}$$

Donde $\mu_A(x)$ es la función de pertenencia (membresía) al conjunto difuso.

A. Funciones de membresía para los Códigos de valoración de falla.

Como se vio anteriormente, la detección de fallas se realiza mediante el empleo de rangos de valoración del indicador DE, definidos en la tabla II [13]. Para poder hacer una correcta interpretación de fallas empleando teoría de conjuntos difusos se deben representar adecuadamente las incertidumbres de los umbrales de detección y severidad de una falla, y posteriormente realizar la clasificación mediante una ecuación similar a (2).

Existen múltiples alternativas para representar los límites de falla, siendo los más comunes los siguientes conjuntos difusos: Triangulares, Trapezoidales y tipo Demi-Cauchí. Con el fin de seleccionar la función de membresía que represente adecuadamente los límites de detección de falla, se realiza una comparación de las características de las funciones anteriormente mencionadas, tal como se indica en la Fig. 3.

Para la selección se evalúan las siguientes propiedades: a) la función de membresía debe tener un núcleo “AN1”, donde los valores calculados tengan una función de membresía “1”; b) para valores calculados próximos al límite de falla “AN2”, la función de membresía debe ser la mínima posible, con el fin de ser conservadores en la discriminación de una posible falla o condición normal.

La función de membresía que satisface las propiedades a) y b) es la función tipo Demi-Cauchí y es la función de membresía a emplearse en este trabajo. Una función de membresía tipo Demi-Cauchí descendente está definida según la ecuación (4). En la expresión en su forma ascendente, la pertenencia es igual a 1 para $r \geq A$. En la ecuación (4), los valores de A y a , son determinados en función del tipo de rango de valoración que define los límites de falla.

La aplicación de esta función de membresía al caso de límites de falla definidos en la tabla II, específicamente C_0 ($DE < 3.5$), resulta en los parámetros $A=0.93$ y $a=0.70$, siendo una función tipo descendente.

$$\mu_d(r) = \begin{cases} 1 & \text{Para } r \leq A \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{A-r}{a}\right)^2} & r > A \end{cases} \tag{4}$$

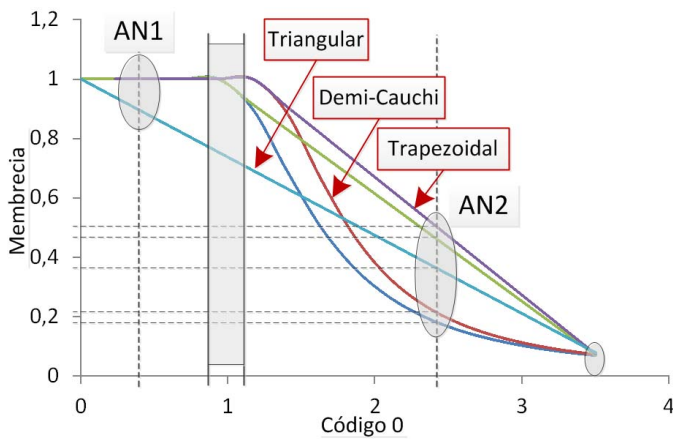


Figura 3. Funciones de membresía para la representación del Código "C₀".

Los valores de los parámetros A y a son resultado de un compromiso que depende del criterio del experto para definir el núcleo de la función de membresía. De esta manera, para cada rango de valoración de falla (código), se pueden definir funciones de membresía de este tipo que permitan realizar un cálculo adecuado (interpretación de falla) mediante una expresión equivalente a la ecuación (2).

Los parámetros obtenidos para el resto de los códigos son: C₁(3.5<DE<7), con parámetros A=4.20 y a=0.18, para la función ascendente y A=5.60 y a=0.37 para la función descendente; C₂(DE>7), con parámetros A=8.63 y a=0.43 para la función ascendente. La representación de los límites de detección y severidad de la falla están indicados en la Fig. 4.

B. Interpretación de fallas empleando conjuntos difusos.

Habiendo representado los límites de detección y severidad de la falla mediante funciones de membresía tipo Demi-Cauchy, la propuesta de realizar interpretación de fallas mediante la ecuación (2) se hace más conveniente. Para el caso de operación con conjuntos difusos, la interpretación de fallas es realizada según la ecuación (5), que es una extensión de la ecuación (2).

La reformulación de esta ecuación mediante conjuntos difusos se basa en el principio de extensión de la teoría de conjuntos difusos, donde el producto se transforma en una operación de intersección.

$$F(k) = \bigcap_{i=1}^5 C_{ki}(DE_i) \quad (5)$$

$k=1,2,...n$

La ecuación (5) se emplea para evaluar la diversidad de fallas dadas en las Tablas IV y V y otras que puedan ser incorporadas al conjunto. Para determinar si la falla diagnosticada en la evaluación es un tipo de falla específica, se emplea el operador unión (máximo) de conjuntos difusos, que opera sobre los resultados de todas las fallas típicas consideradas, tal como se expresa en la ecuación (6).

$$F_{SFRA} = \max(F(k)) \quad (6)$$

$k=1,2,...n$

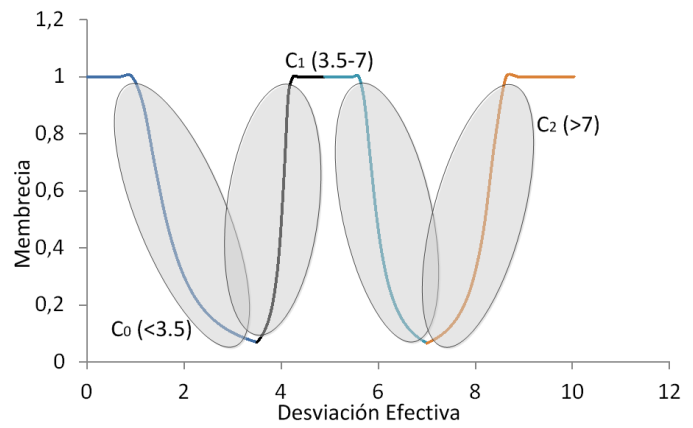


Figura 4. Membresía asignados para los rangos de valoración de la Desviación Efectiva.

En algunas evaluaciones, los valores difusos obtenidos mediante (5), y por tanto (6), resulta en valores pequeños (próximos al 0), que sin embargo indican una falla específica, por lo que es aconsejable normalizar los valores resultantes con referencia a la suma de los valores parciales de cada tipo de falla, según la ecuación (7).

$$F_{SFRA-N} = \frac{F_{SFRA}}{\sum_{k=1}^n F(k)} \quad (7)$$

Procedimiento de cálculo

La forma de evaluar funciones de transferencia mediante la metodología propuesta se establece mediante el siguiente procedimiento:

1. Definir regiones de frecuencia para el cálculo: LF₁, LF₂, MF, HF₁ y HF₂. Para el caso del artículo por décadas de frecuencia.
2. Calcular el indicador DE en cada región de frecuencia definida. En el caso de detectarse anomalía, hacer un segundo cálculo, pero ahora estrictamente en la sub-banda con anomalía. Se utilizan los mayores valores obtenidos en el caso de las regiones de frecuencia donde se realizó el segundo cálculo.
3. Con los valores obtenidos en 2, valorar la pertenencia a los conjuntos difusos que representan los códigos: C₀, C₁, C₂.
4. Valorar las fallas de las tablas IV y V, usando la ecuación (5). La valoración será según la combinación de los códigos (C₀, C₁, C₂) en las diferentes regiones de frecuencia, para así obtener la combinación que represente mejor la falla.
5. Identificar el tipo de falla usando las ecuaciones (6) y (7).

VI. IMPLEMENTACIÓN

La validación de la metodología para la detección e interpretación de falla será realizada mediante dos casos de estudio: El primer caso, ya analizado parcialmente en el punto C de la sección III, corresponde a un transformador con falla tipo eléctrico; y, el segundo caso corresponde a mediciones de un transformador con falla tipo mecánico.

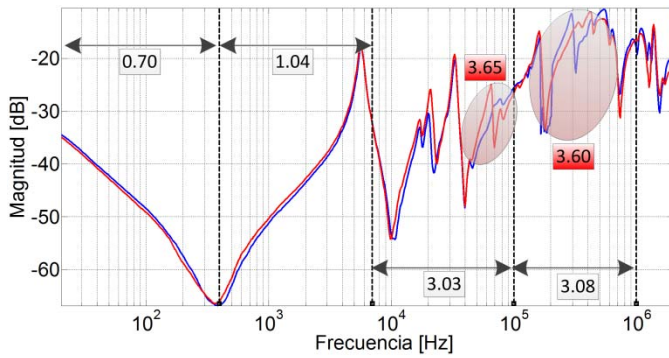


Figura 5. Caso 2 para validación.

A. Caso 1

Este primer caso ya fue presentado en la sección III punto C y Fig.3, donde los resultados del cálculo del indicador DE son los siguientes:

$$DE_{LF1}=0.99; \quad DE_{LF2}=5.11; \quad DE_{MF}=1.01; \quad DE_{HF1}=0.93; \\ DE_{HF2}=0.92$$

Según el procedimiento descrito en la sección anterior VI, para los puntos 3, 4 y 5, los resultados son los siguientes:

$$F(3)=\min(C_0(0.99),C_1(5.11),C_0(1.01),C_0(0.93),C_0(0.92)) \\ =\min(0.993, 1, 0.988, 1, 1)=\mathbf{0.988}$$

$$F(6)=\min(C_0(0.99),C_1(5.11),C_0(1.01),C_0(0.93),C_0(0.92)) \\ =\min(0.993, 1, 0.988, 1, 1)=\mathbf{0.988}$$

Los resultados anteriores, que son iguales, se normalizan según la ecuación (7) y resulta en:

$$F_{SFRA-N}=\mathbf{0.483}.$$

Estas fallas, según la tabla IV de fallas eléctricas, son las fallas de **“núcleo no aterrado y/o corto circuito a tierra”**. Este resultado, es acorde a la inspección visual del transformador, que fue **“corto circuito a tierra”**.

B. Caso 2

Este caso corresponde a un transformador de 100 MVA y 550/230/14 kV, con mediciones de fases homologas en la fase R, tal como se indica en la Fig. 5.

Según los puntos 1 y 2 del procedimiento de cálculo, los resultados de la evaluación del indicador DE son:

$$DE_{LF1}=0.70; \quad DE_{LF2}=1.04; \quad DE_{MF}=3.65; \quad DE_{HF1}=3.60; \\ DE_{HF2}=2.46$$

$$F(8)=\min(C_0(0.70),C_0(1.04),C_1(3.65),C_1(3.60),C_0(2.46)) \\ =\min(1.0, 0.97, 0.105, 0.09, 0.203)=\mathbf{0.09}$$

Normalizando este resultado según la ecuación (7) resulta en:

$$F_{SFRA-N}=\mathbf{0.464}.$$

Esta falla, según la tabla V de fallas mecánicas, es la falla de **“Inclinación del conductor”**. Este resultado, es acorde a la inspección visual del transformador.

VII. CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha propuesto una nueva metodología de interpretación de falla para FRA mediante el empleo de teoría de conjuntos difusos, donde la formulación ha permitido representar adecuadamente los límites de detección y severidad de falla. Las funciones de membresía adoptados para la metodología son del tipo Demi-Cauchy.

Se ha formulado un método de interpretación que tiene como base aquellas fallas tipificadas por expertos, así como los procedimientos rutinarios que estos emplean durante el diagnóstico.

Mediante el empleo de casos reales de medición, se ha determinado que la sensibilidad del indicador DE incrementa en la medida que se definen bandas de frecuencia adecuadas para el cálculo, siendo el óptimo cuando se avalúa estrictamente en aquellas bandas con anomalías.

Se ha validado la metodología mediante dos casos reales de falla con resultados satisfactorios, mostrando así la eficacia de la metodología para la interpretación de fallas específicas.

REFERENCIAS

- [1] E. Dick, C. Erven, “Transformer Diagnosis testing by Frequency Response Analysis”, IEEE transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-97, No 6, November 1978.
- [2] H. Firooz and M. Kharezi, “Frequency Response Analysis-Low Frequency Characteristic and Fault Diagnosis on Power Transformer”, 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9. 2010.
- [3] S. A. Ryder, “Diagnosis Transformer Fault Using Frequency Response Analysis”. IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2003.
- [4] Doble Engineering F. J., “SFRA and shorted turns”. SFRA Resource Center 2003.
- [5] Doble Engineering F. J., “SFRA and Hoop Buckling”. SFRA Resource Center 2003. [5a].
- [6] S. A. Ryder, “Methods for comparing frequency response analysis measurements”, Conference records of the 2002 IEEE International symposium on electrical insulation, Boston, MA USA, April 2002.
- [7] J. C. Gonzales and E. E. Mombello, “Detection of failures within Transformers by FRA using Multiresolution Decomposition”. IEEE PES Transaction on Power Delivery, Vol.29, June 2014.
- [8] J. Velasquez, D. Kolb, “Identification of Transformer-specific Frequency Sub-bands as basis for a Reliable and Automatic Assessment of FRA Results”, Conference Proceeding of CMD, 2010.
- [9] J. C. Gonzales and E. E. Mombello, “Automatic Detection of Frequency Ranges of Power Transformer Transfer Functions for Evaluation by Mathematical Indicators”. IEEE PES T&D LA 2012. Montevideo, Uruguay. September 2012.
- [10] H. Firooz and M. Shishehchian, “Frequency Response Analysis-Condition Assessment of Power Transformer Using Mathematical and Statistical Criteria”, Proceeding of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China. July 2009.
- [11] J. Secue, “Metodología para el diagnóstico de fallas en los devanados del transformador de potencia en base al análisis de respuesta en frecuencia”, doctoral thesis, Universidad Nacional de San Juan, 2009.
- [12] CIGRE-Working Group A.2.26, “Mechanical-Condition Assessment of transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)”. April 2008.
- [13] The Electrical Power Industry Standard of People’s Republic of China, “Frequency response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”. December 14th, 2004.
- [14] Omicron Electronics, “FRAnalyzer Manual del Usuario”. 2006.
- [15] R. R. Rogers, “IEEE and IEC Codes to Interpret incipient fault in transformers, Using Gas in oil Analisis”. IEEE Transaction on electrical Insulation, October 1978.



Jimmy Cesar Gonzales Arispe (S) was born in Cochabamba, Bolivia on April 26, 1984. He received the electrical engineering degree from Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Bolivia, in 2006. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from Universidad Nacional de San Juan, Argentina in 2012. He is currently working at Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), as part of post-doctoral position financed by Centro Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).



Enrique Esteban Mombello (IEEE M'95-SM'00) was born in Buenos Aires, Argentina, in 1957. He received the B.S. degree in electrical engineering and the Ph.D. degree in electrical engineering in 1982 and 1998, respectively from Universidad Nacional de San Juan. He has more than 20 years of experience in research projects which include topics like electrical transients and resonance processes within transformers as Researcher of the National Council of Technical and Scientific Research (CONICET, Argentina). He has worked from 1989 to 1991 at the High Voltage Institute of RWTH, Aachen, Germany. He is presently at the Instituto de Energia Electrica of the University of San Juan, Argentina, as a Lecturer and Researcher since 1982. His main fields of interest are design, modeling and diagnostics of power transformers, asset management, transformer life management, electromagnetic transients in electric machines and networks, modeling of equipment, corona losses in overhead transmission lines, low frequency electromagnetic fields.