



Metodología para ejecución de pruebas eléctricas con sistemas resonantes de alta tensión

Daniel Limas Lesmez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica

Bogotá DC, Colombia

2023

Metodología para ejecución de pruebas eléctricas con sistemas resonantes de alta tensión

Daniel Limas Lesmez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a):

PhD. Francisco José Román Campos

Línea de Investigación:

Energía y electromagnetismo – Alta tensión

Grupo de Investigación:

Grupo de Compatibilidad Electromagnética EMC-UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de eléctrica y electrónica

Bogotá, Colombia

2023

“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration.”

Nikola Tesla

Esto es dedicado:

A mi madre en el mundo, a mi padre en el cielo.

Siempre he creído que es más difícil de tantos talentos escoger uno, que solo tener uno y explotarlo al máximo. Así que explótalo hoy mismo porque mañana no sabemos en qué plano, situación o lugar estaremos.

Daniel Limas Lesmez

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Daniel Limas Lesmez

Fecha 09/11/2023

Fecha

Agradecimientos

A través de mi camino en el mundo profesional de la extra alta tensión expreso mi gratitud a todos los colegas y docentes que han brindado su conocimiento, que grano a grano me han aportado. Quiero expresar mi gratitud a quienes apoyaron mi recorrido: en esta oportunidad a mi director, ingeniero Francisco José Román, por creer en mí y darme continuamente su acertada orientación, colega y Doctor en ingeniería que admiro por su trabajo y conocimientos. Al ingeniero Carlos Sánchez, que me brindó su ayuda abriendo el camino de la docencia durante el posgrado, como docente becario del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia. A mis compañeros de trabajo en el mundo de las pruebas eléctricas que me apoyaron y aconsejaron con seguir con los estudios de posgrado, específicamente a mi colega Cristian Medina quien me enseñó parte de los sistemas resonantes y con quien compartimos conocimientos para llegar a ser los mejores profesionales en el campo de pruebas eléctricas. Y sin ser menos importante, parte de mi vida personal, mi mejor amigo y colega Pablo Emilio junto con su familia que han dado su voto de confianza en mí.

Obviamente, este trabajo de grado dedicado a mi padre que me enseñó parte de este mundo de la electricidad que desde el cielo me acompaña, a mi madre que jamás ha dejado de creer en mí en cada paso que di desde que era un pequeño.

A todas las personas que de una u otra forma han aportado en mi vida, experiencias únicas que son bastantes y nombrarlas a cada una tomaría más de 1729 páginas.

Resumen

Este documento presenta los resultados de un trabajo investigativo y experimental, donde se complementa con la experiencia del autor, sobre el sistema de alta tensión para pruebas de aislamiento eléctrico en un transformador de potencia como objeto bajo prueba, siendo uno de los principales elementos del sistema eléctrico de potencia. En una primera fase se desarrolla una caracterización de los sistemas de alta tensión para pruebas eléctricas, al tener claros los 2 tipos de sistemas que se utilizan en este trabajo, se procede a realizar un modelo del aislamiento eléctrico del transformador. Por medio de cálculos y valores experimentales de laboratorio, se obtienen los resultados de capacitancia del aislamiento eléctrico dentro del transformador. Mediante el software Matlab-Simulink® se realizan 2 simulaciones de los 2 tipos de sistemas resonantes de alta tensión, con el fin de analizar el comportamiento en tiempo real de las variables eléctricas en un transformador de potencia como objeto bajo prueba, después se realiza una guía para aplicar una prueba de tensión aplicada basado en normativa internacional, un procedimiento paso a paso, teniendo en cuenta todos los parámetros importantes en cuestión de seguridad y aplicabilidad. Finalmente, se realizan las pruebas en laboratorio utilizando uno de los sistemas resonante de alta tensión (ACRL) para poder contrastar los resultados de simulación con los obtenidos en laboratorio.

Todo lo anterior con el fin, a futuro, de predecir valores y comportamientos de los sistemas antes de realizar pruebas de tensión aplicada en fábrica o sitio y así, minimizar el riesgo de daño por excesos de tensión eléctrica y corriente, siendo este el principal aporte del documento presente en la ingeniería eléctrica.

Palabras clave: Sistemas resonantes, alta tensión, pruebas eléctricas, transformador de potencia, ACRL, ACRF, capacitancia, aislamiento eléctrico, subestaciones eléctricas.

Abstract

Methodology for the execution of electrical tests with high voltage resonant systems.

This document presents the results of a research and experimental work, complemented with the author's experience, focused on the high voltage resonant system used for electrical insulation testing in power transformers, being an important equipment of electrical power systems. The initial stage of this work deals with the characterization of the high voltage systems used in electrical tests, distinguishing between the two types of systems presented in this study, ACRF (variable frequency) and ACRL (variable inductance). A model of the transformer electrical insulation is then developed by combining theoretical calculations with laboratory experiments to obtain accurate transformer insulation capacitance values. Subsequently, using Matlab-Simulink® software, real-time simulations of both high-voltage resonant systems were performed, allowing us to analyze the electrical variables inside the power transformer under test conditions. Next, a complete guide for the application of the applied voltage test based on international standards is provided, offering a step-by-step procedure that carefully considers essential parameters related to safety and technical requirements. To conclude this work, the results of theoretical calculations were compared with the results of laboratory tests using one of the high voltage resonant systems, the ACRL system. Finally, it is concluded that this final master's work serves as a tool to predict values and behaviors of real resonant systems before performing applied voltage tests in factory or site and thus, minimize the risk of damage due to excess voltage and current, being this the main contribution of this paper in electrical engineering.

Keywords: Resonant systems, high voltage, electrical testing, power transformer, ACRL, ACRF, capacitance, electrical insulation, electrical substations.

Glosario

- **ACR:** (HVAC Test Systems Based on Resonant Circuits): Sistemas de prueba de alta tensión AC basados en circuitos resonantes. Estos sistemas se utilizan para realizar pruebas eléctricas de alta tensión en equipos como transformadores y subestaciones GIS, entre otros. Con el fin de evaluar su aislamiento eléctrico.
- **ACRF:** Sistema de pruebas de alta tensión basado en circuito resonante de frecuencia variable. Este sistema se utiliza para evaluar el aislamiento eléctrico y ofrece la capacidad de variar la frecuencia de prueba mediante electrónica de potencia y, permiten realizar pruebas en una variedad de condiciones.
- **ACRL:** Sistema de pruebas de alta tensión basado en circuito resonante a frecuencia fija y de inductancia variable. Este sistema se utiliza para evaluar el aislamiento eléctrico. Es particularmente útil cuando se necesita una frecuencia industrial.
- **CIGRE:** (Conseil International des Grands Réseaux Électriques) Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas. Una organización técnica global que se enfoca en la ingeniería eléctrica y la gestión de redes eléctricas.
- **DFR:** es una técnica de prueba avanzada utilizada en el campo para determinar el contenido de agua en el aislamiento de celulosa sólida del aislamiento de papel de aceite y detectar fallas de aislamiento y contaminación del aislamiento. El contenido de humedad en el aislamiento sólido se deriva de pruebas de campo y modelos matemáticos, y una fuente de base de datos se compara con los límites dados para el aislamiento seco, moderadamente húmedo y extremadamente húmedo en IEC 60422.
- **FAT:** (Factory Acceptance Test) Prueba de Aceptación en Fábrica. Una prueba realizada en equipos de sistemas eléctricos para verificar que cumplan con las especificaciones antes de ser enviados al sitio de uso.

- **IEC:** (International Electrotechnical Commission) Comisión Electrotécnica Internacional. Organización que publica estándares internacionales para la electricidad y la electrónica.
- **IEEE:** (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Una asociación profesional que publica estándares en una variedad de campos técnicos, incluyendo la ingeniería eléctrica.
- **IHM:** (Interfaz Hombre-Máquina) Es la interfaz a través de la cual los operadores humanos interactúan con máquinas, sistemas y dispositivos electrónicos.
- **NTC:** (Norma Técnica Colombiana) Es el acrónimo de Norma Técnica Colombiana, que hace referencia a un conjunto de estándares técnicos y de calidad desarrollados y publicados por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) en Colombia.
- **PLC:** (Programmable Logic Controller): Controlador Lógico Programable. Es un dispositivo electrónico utilizado en automatización industrial para controlar sistemas y procesos.
- **SAT:** (Site Acceptance Test) Prueba de Aceptación en Sitio. Similar a la FAT, pero realizada en el lugar de instalación para verificar que el equipo funcione según lo previsto, verificando si hubo complicaciones en el transporte desde fábrica hacia el sitio de su uso.
- **Um:** Tensión Máxima en Equipos. Es un término que se usa en normativas eléctricas para denotar la tensión máxima permisible en un equipo.
- **VFSR:** (Variable Frequency Series Resonant): Sistema de pruebas resonante en serie de frecuencia variable. Es el equipo que convierte la señal de la fuente de alimentación de frecuencia industrial a una señal de alimentación en frecuencia necesaria para estar en resonancia, en una conexión en serie.
- **VLF:** (Very Low Frequency): Frecuencia Muy Baja. Se utiliza en pruebas de alta tensión para simular condiciones de operación de equipos eléctricos a frecuencias más bajas que las de la red eléctrica normal.

Contenido

	Pág.
<u>Resumen</u>	<u>VII</u>
<u>Abstract</u>	<u>VIII</u>
<u>Glosario</u>	<u>IX</u>
<u>Contenido</u>	<u>XI</u>
<u>Introducción</u>	<u>1</u>
<u>1. Caracterización de sistemas resonantes de alta tensión</u>	<u>4</u>
1.1. Sistemas resonantes de alta tensión.....	4
1.2. Sistema de frecuencia variable (ACRF).....	10
1.3. Sistema de inductancia variable con frecuencia fija (ACRL).....	17
1.4. Comparación entre sistemas ACRF y ACRL, para simulación.....	23
1.5. Requerimientos mínimos de potencia para suplir al sistema resonante.....	24
<u>2. Modelo del aislamiento eléctrico del transformador de potencia trifásico de 2 devanados</u>	<u>27</u>
2.1. Modelo del transformador de potencia visto desde el aislamiento eléctrico.....	27
2.2. Prueba de medición de la capacitancia de aislamiento y del factor de disipación ($\tan \delta$)..	34
2.3. Calculo teórico de valores de capacitancia del aislamiento del transformador	38
2.4. Resultados experimentales con equipo de prueba	45
2.5. Cálculos previos en caso de utilizar un sistema ACRF	48
<u>3. Simulaciones de sistemas resonantes de alta tensión para pruebas eléctricas con Simulink Matlab®</u>	<u>50</u>
3.1. Simulación de sistema resonante de alta tensión con frecuencia variable mediante Simulink- Matlab®.....	50
3.2. Simulación de sistema resonante de alta tensión con frecuencia fija e inductancia variable mediante Simulink- Matlab®.....	59
<u>4. Guía para la prueba de tensión aplicada a un transformador de potencia mediante un sistema resonante de alta tensión</u>	<u>67</u>
4.1. Descripción de la prueba de tensión aplicada a un transformador de potencia	67
4.2. Preparación para el personal ejecutor de la prueba	69
4.3. Preparación de la prueba de tensión aplicada a un transformador de potencia	70

4.3.1.	Procedimiento de seguridad para el personal ejecutor de la prueba durante la prueba de tensión aplicada.....	71
4.4.	Ensayo, procedimiento y requerimientos	71
4.4.1.	Equipo utilizado para pruebas de laboratorio en el transformador de potencia	71
4.4.2.	Procedimiento de ejecución de la prueba eléctrica.....	72
4.5.	Lecturas de resultados y flujogramas.....	76
5.	<u>Comparación de datos reales de laboratorio con datos de simulación</u>	78
5.1.	Análisis de datos obtenidos de capacitancia del aislamiento eléctrico.....	80
5.1.1.	Modelo de incertidumbre tipo A.....	81
5.1.2.	Modelo de incertidumbre tipo B.....	82
5.2.	Montaje experimental y toma de datos	84
5.3.	Resultados del modelo de simulación en Simulink- Matlab®.....	87
5.3.1.	Resultados del modelo con sistema ACRF en Simulink- Matlab®.....	87
5.3.2.	Resultados del modelo con sistema ACRL en Simulink- Matlab®.....	91
5.4.	Comparación de los datos obtenidos de las simulaciones con los datos tomados de la interfaz IHM del sistema resonante	95
6.	<u>Conclusiones y discusiones.....</u>	97
6.1.	Discusión.....	97
6.2.	Conclusiones.....	100
	<u>Bibliografía.....</u>	101
	<u>Contribuciones</u>	107
	<u>Anexo A: capítulo 1</u>	109
A.1.	Certificado de manejo de sistema resonante en serie de alta tensión.....	109
	<u>Anexo B: capítulo 2</u>	110
B.1.	Valores completos de capacitancia en transformador de potencia	110
	<u>Anexo C: Comparativo de normas IEC, IEEE y NTC</u>	112
C.1.	Comparativo de tolerancias de aceptación de resultados respecto a los diferentes tipos de pruebas en transformador de potencia.....	112
C.2.	Comparativo de tolerancias de aceptación de resultados FAT con SAT	120
C.3.	Clasificación de pruebas de un transformador de potencia según: IEEE, IEC y NTC.....	121

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Propiedades típicas de aislamientos sólidos. Tomado de estándar IEC 60076-14:2013.....	40
Tabla 2-2. Propiedades típicas de aislamientos líquidos. Tomado de estándar IEC 60076-14:2013.....	40
Tabla 2-3. Datos resumen de capacitancia en lado de alta tensión.....	45
Tabla 2-4. Datos resumen de capacitancia en lado de baja tensión.....	46
Tabla 2-5. Datos de comprobación cruzada global calculada entre devanados.....	46
Tabla 2-6. Comparación de datos calculados y reales medidos.....	46
Tabla 4-1. Niveles de tensión de prueba a partir de tensión nominal máxima operación del transformador de potencia.	74
Tabla 4-2. Requerimiento de claridad en distancias de seguridad.	75
Tabla 5-1. Repetibilidad de medida de capacitancia con instrumento CPC100.....	81
Tabla 5-2. Datos de deriva, resolución y repetibilidad de las medidas.	83
Tabla 5-3. Comparación de datos obtenidos en simulación y datos medidos durante prueba real en lado HV del transformador.	96
Tabla 5-4. Comparación de datos obtenidos en simulación y datos medidos durante prueba real en lado LV del transformador.....	96

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas y griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
V	Tensión eléctrica o Voltaje	V
i	Intensidad de corriente eléctrica	A
f	Frecuencia eléctrica	Hz
R	Resistencia eléctrica	Ω
C	Capacitancia eléctrica	F
L	Inductancia eléctrica	H
G	Conductancia	S
\vec{E}	Campo eléctrico	V/m
ε	Permitividad eléctrica	F/m
l	Longitud	m

Lista de abreviaturas, notaciones y acrónimos

Abreviatura	Término
<i>AC</i>	Corriente Alterna (Alternating Current).
<i>ACRF</i>	Circuitos Resonantes de Frecuencia Variable
<i>ACRL</i>	Circuitos Resonantes de Frecuencia Fija Sintonizados por Inductancia Variable
<i>CIGRE</i>	International Council on Large Electric Systems
<i>DC</i>	Corriente Directa (Direct Current)
<i>DUT</i>	Objeto bajo prueba (Device Under Test)
<i>FAT</i>	Pruebas de aceptación en fábrica (Factory Acceptance Test)
<i>FD</i>	Factor de disipación
<i>FP</i>	Factor de potencia
<i>GIS</i>	Subestación con Aislamiento en Gas SF6 (Gas Insulated Substation)
<i>GST</i>	Ejemplar de prueba puesto a tierra (Grounded Specimen Test)

Abreviatura	Término
<i>HVAC</i>	Corriente Alterna en Alta Tensión (High Voltage Alternating Current)
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>IGBT</i>	Transistor Bipolar de Puerta Aislada (Insulated-Gate Bipolar Transistor)
<i>SAT</i>	Pruebas de aceptación en sitio (Site Acceptance Test)
<i>Tan δ</i>	Tangente delta
<i>UHV o EAT</i>	Extra Alta Tensión (Extra-High Voltage)
<i>Um</i>	Tensión máxima rms entre 2 conductores para el cual está diseñado el cable y accesorios
UST	Ejemplar de prueba NO puesto a tierra (Ungrounded Specimen Test)
<i>VFSR</i>	Sistema de ensayo resonante en serie de frecuencia variable (Variable Frequency Series Resonant)
VLF	Muy baja frecuencia (Very Low Frequency)

Introducción

Este documento muestra la importancia que tienen las pruebas eléctricas en la verificación del aislamiento eléctrico mediante 2 tipos de sistemas resonantes de alta tensión, uno con frecuencia variable e inductancia fija y, otro con inductancia variable con frecuencia fijada al valor industrial (50 o 60 Hz). Estas pruebas eléctricas se pueden aplicar en diferentes elementos que componen el sistema eléctrico: cables de potencia subterráneos, módulos de subestación GIS, transformadores de potencia, entre otros.

El crecimiento anual de la demanda energética por parte de los sectores comerciales, industriales y residenciales obligan a las empresas del sistema eléctrico mundial a mantener una óptima operación de cada uno de los elementos que lo componen en los diferentes niveles de tensión: extra alta tensión (EAT), alta tensión (AT) y media tensión (MT). El incremento de la demanda lleva a la expansión de este sector mediante la construcción de nuevas subestaciones, la modernización de las redes eléctricas existentes o el mantenimiento de los activos del sistema de potencia. Para garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos eléctricos y así disminuir su probabilidad de falla, se deben realizar pruebas eléctricas a estos equipos, por ejemplo, en subestaciones eléctricas tipo AIS (Air Insulated Substation) o GIS (Gas Insulated Substation). Los equipos eléctricos básicos de un sistema de potencia son: interruptores de potencia, transformadores de potencia, transformadores de instrumentos y los cables de potencia. Durante las distintas fases de operación de estos equipos: pre-comisionamiento, comisionamiento, de operación y mantenimiento hasta llegar al final del ciclo de vida útil, se requiere la aprobación de su buen funcionamiento. Igualmente, y sin ser menos importante, se deben considerar las pruebas de aceptación realizadas en laboratorios de fábricas, en donde se producen los equipos para el sector eléctrico.

En el mundo, los laboratorios de ensayos eléctricos industriales son fundamentales para el desarrollo de sistemas eléctricos. En estos laboratorios, los fabricantes pueden garantizar la calidad de sus productos de acuerdo con estándares internacionales, para el caso de pruebas eléctricas en alta tensión se requieren equipos robustos. Estos equipos deben ser capaces de suministrar una gran potencia al objeto bajo prueba. Sin embargo, debido a sus precios elevados y dimensiones considerables, pocos laboratorios pueden adquirirlos. Se pueden encontrar equipos de esta magnitud en Colombia en pocas universidades y pocas empresas fabricantes o dedicadas a ensayos eléctricos de alta tensión.

Las pruebas eléctricas verifican la integridad de los equipos en fábrica (FAT) o en sitio (SAT), esta última ayuda a detectar posibles daños, afectaciones físicas debidas al transporte, luego de estas pruebas, se realiza un análisis de los resultados que permiten tomar acciones preventivas o correctivas previas a la energización de estos equipos. Las pruebas que realiza el fabricante garantizan que el producto suministrado cumple con los estándares internacionales antes de ser llevado al sitio que puede ser: subestaciones eléctricas, centrales de generación, entre otros.

En la normativa para ensayos dieléctricos se encuentran las pruebas de: impulso tipo rayo, impulso tipo maniobra, tensión aplicada, tensión inducida y medición de descargas parciales. Este documento abordará a profundidad la prueba de tensión aplicada y para ello se utiliza un sistema resonante de alta tensión teniendo como objeto bajo prueba un transformador de potencia, esto con el fin de verificar su nivel de integridad de aislamiento eléctrico. Probar la integridad y el funcionamiento adecuado de un sistema eléctrico es una tarea ardua que requiere probar todos sus componentes principales para garantizar el rendimiento óptimo de cada uno de estos.

Un punto de partida para la realización de este trabajo de grado, donde se utilizaría el equipo resonante de alta tensión, fue la creación del primer campo de pruebas para pre-cualificación de cables subterráneos especificado en la norma IEC 60840:2020 en la Universidad Nacional de Colombia. Esta norma especifica los métodos de prueba y los requisitos para las pruebas

de los sistemas de cables de alimentación, solo los cables y solo los accesorios, para instalaciones fijas y para tensiones nominales superiores a 30 kV ($U_m = 36$ kV) y hasta 150 kV ($U_m = 170$ kV). Para la creación del mencionado campo de pruebas de ensayos eléctricos en cables de potencia se adquiere el equipo resonante de alta tensión. Sin embargo, este sistema resonante se puede utilizar para realizar pruebas a otros equipos de las subestaciones eléctricas, como es el caso que se analiza en este trabajo de grado, en el cual se describen las pruebas de los transformadores de potencia mediante sistemas resonantes de frecuencia variable o inductancia variable. En este trabajo se desarrollaron simulaciones que permiten predecir el comportamiento de la prueba, con el fin de evitar posibles daños del sistema resonante en una prueba real. Las simulaciones permitieron encontrar los valores aproximados de la frecuencia de resonancia o el valor de la inductancia en el momento de la resonancia, a partir del valor de la capacitancia del objeto bajo prueba.

A partir de los estándares internacionales y de la caracterización de los tipos de sistemas resonantes de alta tensión, se presenta una guía clara para realizar la prueba de tensión aplicada a un transformador de potencia con el sistema tipo ACRL. El transformador bajo prueba será modelado para establecer sus características propias y obtener el modelo final que se empleará en las simulaciones.

Considerando las características del sistema resonante de la Universidad Nacional, que es un sistema modular y teniendo en cuenta que solo tiene un módulo reactor inductivo, se pueden considerar ensayos eléctricos a tensiones hasta 250 kV y a una potencia de salida cercana a los 750 kVA.

Los resultados de este documento buscan determinar los lineamientos técnicos de calidad para las pruebas de aislamiento al aplicar tensión a los transformadores de potencia trifásicos.

1. Caracterización de sistemas resonantes de alta tensión

1.1. Sistemas resonantes de alta tensión

En este capítulo se aborda de forma general una introducción a los sistemas de pruebas de alta tensión para enfocar en los sistemas resonantes de alta tensión de onda AC, teniendo 2 sistemas: uno de frecuencia variable y otro de inductancia variable.

La creación de equipos de pruebas para alta tensión inicia a principios del siglo XX. En este momento, el uso de alta tensión era netamente para la transmisión de energía eléctrica, así como la distribución de esta, pero no para equipos o sistemas de pruebas eléctricas. Con el pasar del tiempo se desarrollaron equipos eléctricos de mayor capacitancia a tensiones más elevadas con mención especial a los cables poliméricos, también se construyeron aparatos de medición entre los que se pueden incluir transformadores de potencial inductivo, voltímetros electrostáticos, divisores capacitivos, condensadores de gas comprimido y separadores esféricos normalizados. En la década de 1980 se da un paso importante con sistemas de prueba cuya capacidad de generar alta tensión para pruebas, llegaron a transmisión de clase 800kV. En los sistemas de prueba se empleaban tipos de reactancia inductiva para fuentes de alta tensión. Actualmente, se están desarrollando fuentes de prueba para AC que utilizan frecuencia variable con inductores fijos en comparación con las de inductores variables a frecuencia fija (industrial). Estos diseños presentan ventajas específicas para probar la nueva generación de cables eléctricos de alta tensión y de gran longitud instalada. (Sarria Panesso, 2015)

En cuanto a los desafíos futuros y los esfuerzos que se están haciendo para mejorar los sistemas de pruebas y de medición en AC se pueden destacar la calibración de sistemas de medición de referencia de nivel EAT, la calibración de sistemas de ensayo VLF, los métodos de

comprobación de linealidad en rango EAT y los requerimientos de fuentes AC para gama EAT.

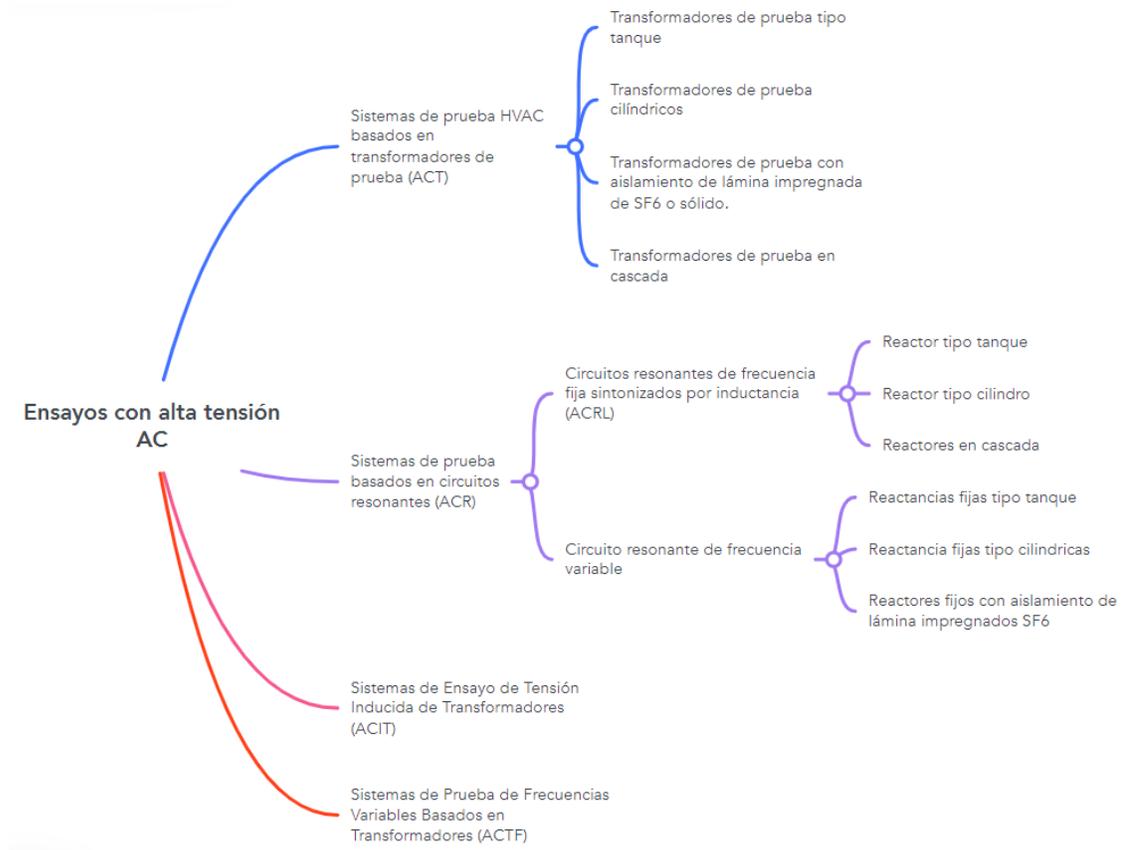


Figura 1-1. Clasificación de los sistemas de alta tensión AC para pruebas eléctricas. (Elaboración del autor, 2023)

Para este documento se hará énfasis en los sistemas resonantes (ACR) en serie de:

1. Sistema de frecuencia variable con reactancia fija tipo cilíndrica y,
2. El sistema sintonizado por inductancia (inductancia variable) reactor tipo cilindro.

La decisión de escoger estos 2 sistemas es por su acceso a estos, en Colombia. Ambos equipos se han manejado por parte del autor de este documento y se ha certificado con los fabricantes (Ver Anexos). Estos sistemas también se pueden clasificar de acuerdo con la conexión del

transformador de excitación y el reactor inductivo: en serie o en paralelo. Cuando el sistema de alta tensión tiene conexión en paralelo, el transformador de excitación se conecta en paralelo con la reactancia de alta tensión, y su uso es principalmente para pruebas con capacitancias en el objeto bajo prueba muy altas, con tensiones menores a 110 kV, por ejemplo, bancos de condensadores. En la conexión del sistema en paralelo, debido a la conexión del transformador de alta tensión, la tensión de prueba puede ser perturbada por los armónicos, cosa que no sucede en los sistemas conectados en serie junto a la ventaja de obtener una onda sinusoidal fina.



Figura 1-2. Disposición física de los equipos que componen un sistema resonante de alta tensión, sistema de frecuencia variable en una subestación. (Elaboración del autor, 2022)

2. Modelo del aislamiento eléctrico del transformador de potencia trifásico de 2 devanados

El objeto bajo prueba de este documento, como se ha descrito, es el transformador de potencia trifásico, el cual es una maquina eléctrica estática que convierte la electricidad AC de cierto nivel de tensión a otro nivel de tensión. Una de las etapas más importantes en el diseño de una maquina AC es el aislamiento de sus devanados, si falla ocurre una falla en el aislamiento de la maquina esta se cortocircuita y, su arreglo saldría muy costoso.

En este capítulo, se abordarán aspectos cruciales relacionados con el modelo de aislamiento eléctrico en transformadores de potencia trifásicos de 2 devanados. Inicia por explorar los cálculos teóricos que definen este modelo, centrándose en la representación de las capacitancias en los diversos aislamientos eléctricos internos del transformador. A continuación, se examina el proceso de obtención de los valores de capacitancia a través de la prueba de tangente delta, utilizando equipo especializado para esta prueba. Posteriormente, se lleva a cabo una comparación rigurosa entre los valores teóricos y los valores reales medidos, lo que proporciona una visión crítica de la precisión del modelo propuesto. Finalmente, se realiza un análisis estadístico de los datos, lo que permite obtener conclusiones fundamentales sobre el modelo usado del aislamiento eléctrico en estos transformadores de potencia.

2.1. Modelo del transformador de potencia visto desde el aislamiento eléctrico

Teniendo en cuenta que la prueba que se realiza en este documento es tensión aplicada, una prueba dieléctrica, ésta evalúa directamente el aislamiento en el objeto bajo prueba. Por lo anterior, en el transformador de potencia trifásico bajo prueba, es importante conocer los

Terciario-Tierra, la capacitancia Primario-Secundario, la capacitancia Primario-Terciario y la capacitancia Secundario-Terciario.

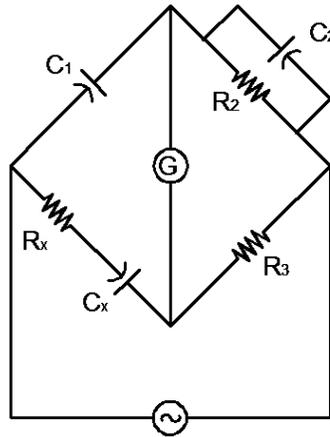


Figura 2-6. Puente de Schering, usado para medida de capacitancia y factor de disipación.
(Purkait et al., 2013)

Para realizar estas pruebas, en un transformador de 2 devanados, se realizan las siguientes conexiones: todos los terminales de línea de AT se conectan entre sí y se etiquetan como High Voltage (H); todos los terminales de línea de BT se conectan entre sí y se etiquetan como Low Voltage (L); y una conexión a un terminal de tierra, normalmente una conexión al tanque del transformador, que se etiqueta como Ground (G).

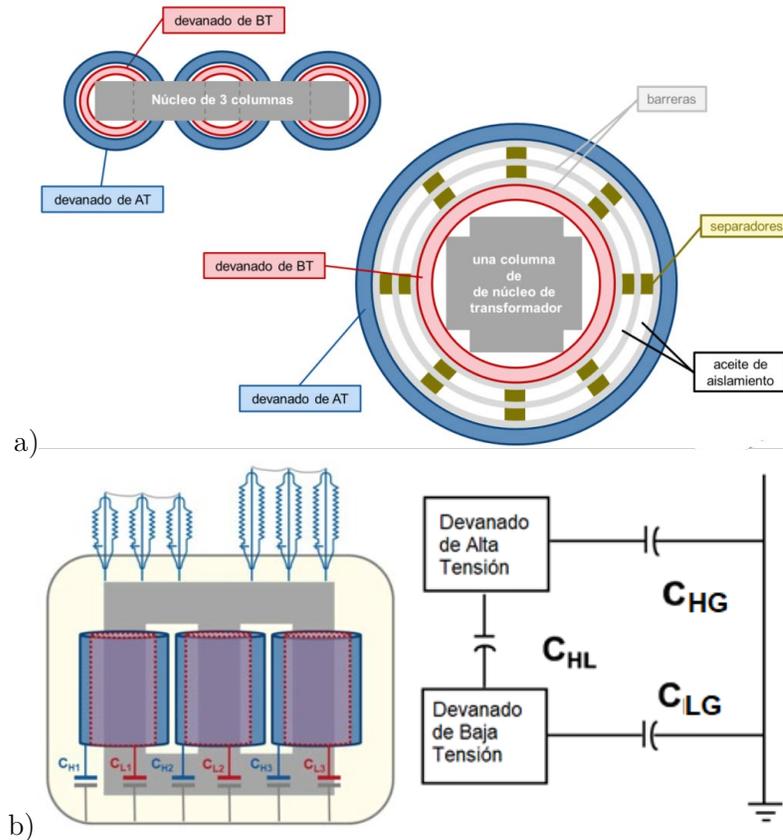


Figura 2-7. a) Representación eléctrica de las capacitancias del aislamiento eléctrico de un transformador de 2 devanados. b) Se muestran las capacitancias en paralelo tanto para baja (rojo) como alta tensión (azul). (© Omicron electronics, 2023)

Estas mediciones se realizan normalmente a tensiones prueba de 12 kV o inferiores, a la frecuencia de alimentación o cerca de ella. La Figura 2-7 b) presenta las capacitancias en el aislamiento, donde:

- C_{HG} : Es el aislamiento eléctrico que existe entre el devanado de alta tensión y los elementos del transformador puestos sólidamente a tierra, como el núcleo y el caparazón. Esto incluye el aislamiento activo de los bushings y de los devanados de alta tensión y, la celulosa (papel y madera) con el aceite aislante.
- C_{HL} : Es el aislamiento eléctrico que existe entre los devanados energizados de alta tensión y baja tensión. Esto incluye el aislamiento activo de los bushings y de los

3. Simulaciones de sistemas resonantes de alta tensión para pruebas eléctricas con Simulink Matlab®

En este capítulo, sin ser menos importantes los demás capítulos, se presenta el principal aporte que da este trabajo de grado por parte de su autor: las simulaciones de los 2 tipos de sistemas resonantes que existen, uno con frecuencia variable teniendo inductancia y capacitancia fija, mientras en el otro, se varía la inductancia en un reactor, pero con capacitancia y frecuencia fija de la red monofásica. Con el fin de predecir los valores de inductancia o de frecuencia en el sistema resonante de alta tensión, la simulación del sistema ACRF se enfocará en modificar la frecuencia para determinar la frecuencia de resonancia del sistema de alta tensión, mientras que la del sistema ACRL se centrará en la variación del valor de inductancia hasta alcanzar el punto de resonancia deseado. Estas simulaciones son fundamentales para prever y controlar con precisión los parámetros eléctricos cuando se evalúa un objeto bajo prueba en el contexto de pruebas de alta tensión.

Para ello, se realiza el modelo de simulación de los 2 sistemas en el software Simulink-Matlab®, para una interfaz mucho más real e interactiva.

3.1. Simulación de sistema resonante de alta tensión con frecuencia variable mediante Simulink- Matlab®

Este sistema se caracteriza por poder tomar de una red trifásica su alimentación y por medio de electrónica de potencia en la consola de control VFSR, se convierte una onda AC trifásica a una onda AC monofásica. A esta red AC monofásica se conecta un transformador de excitación, el cual elevará los niveles de tensión y limitará la corriente que pasará por el reactor inductivo. Al conectar la capacitancia del divisor de medida en paralelo con la del

objeto bajo prueba, se buscará la frecuencia de resonancia en la que, gracias al factor de calidad Q , se amplificará la tensión sobre el objeto bajo prueba, con el fin de someterlo a la prueba de tensión aplicada, con la cual se verificará la integridad del aislamiento eléctrico del objeto bajo ensayo.

Con este sistema se pueden realizar pruebas en:

- Cables XLPE para niveles de tensión 10 kV hasta los 500 kV, mediante la prueba de tensión aplicada.
- Módulos de subestación GIS para niveles de tensión 66kV hasta los 500 kV, mediante la prueba de tensión aplicada y la medición de descargas parciales.
- Transformador de potencia para niveles de tensión superiores a 5 kV, monofásicos o trifásicos, mediante la prueba de tensión aplicada y la medición de descargas parciales.

La simulación de este sistema se realizó en el software Simulink - MATLAB® tal y como se observa en la Figura 3-1, donde en la parte superior se ven los valores y en su parte inferior, los bloques de conexión del sistema (cada equipo que compone el sistema).

Para compilar esta simulación es necesario conocer los siguientes parámetros: inductancia del reactor del sistema, capacitancia del divisor del sistema, capacitancia del objeto bajo prueba, voltaje de prueba y la frecuencia inicial en la que el sistema buscará la frecuencia de resonancia.

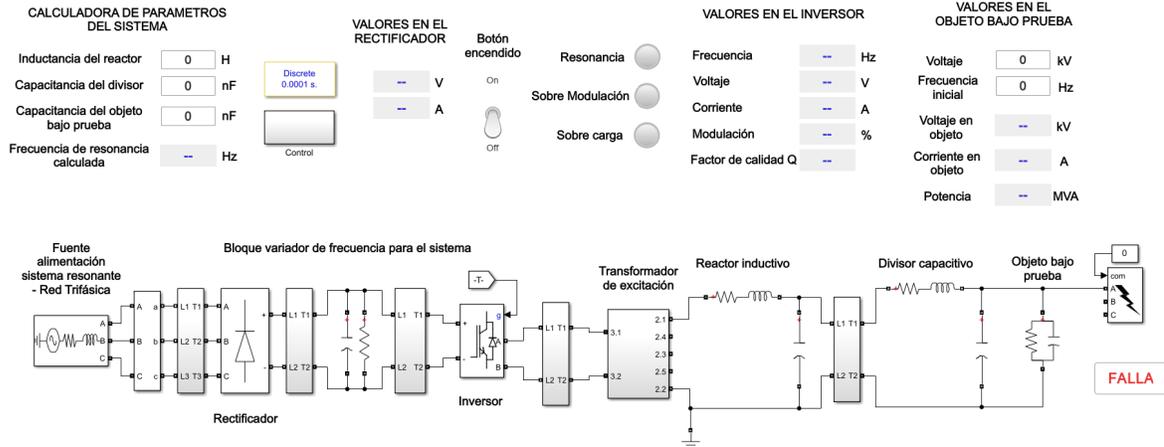


Figura 3-1. Esquema del circuito simulado de sistema resonante de frecuencia variable en Simulink - MATLAB®

Antes de empezar a ejecutar la simulación es conveniente explicar cada uno de sus componentes. La fuente de alimentación conectada a la red, corresponde al bloque que se muestra en la figura 3-2, el cual simula un generador de 380 voltios (voltaje al que funciona según el fabricante) con frecuencia variable entre 50 o 60 Hz. Su conexión es en estrella, con neutro puesto sólidamente a tierra.

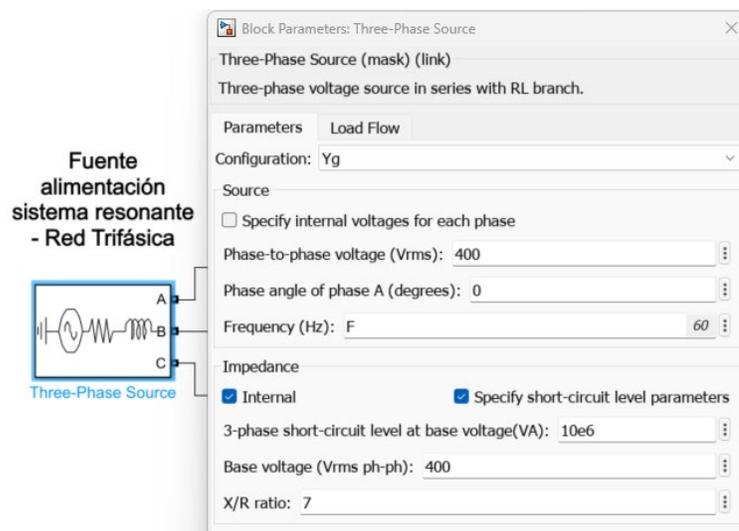


Figura 3-2. Esquema y datos del generador del sistema resonante de frecuencia variable en Simulink - MATLAB®

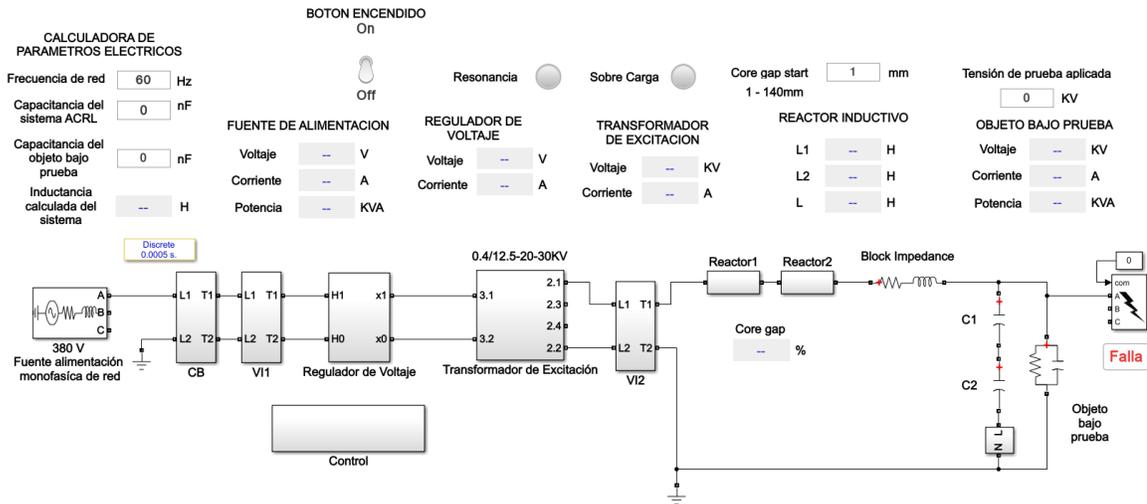


Figura 3-13. Esquema del circuito simulado de sistema resonante de frecuencia fija e inductancia variable en Simulink - MATLAB®

Iniciando la descripción de izquierda a derecha de la figura 3-13, se presenta la fuente de alimentación, que en el caso del equipo real es monofásico de 380V_{AC}, tal como se observa en la Figura 3-14:

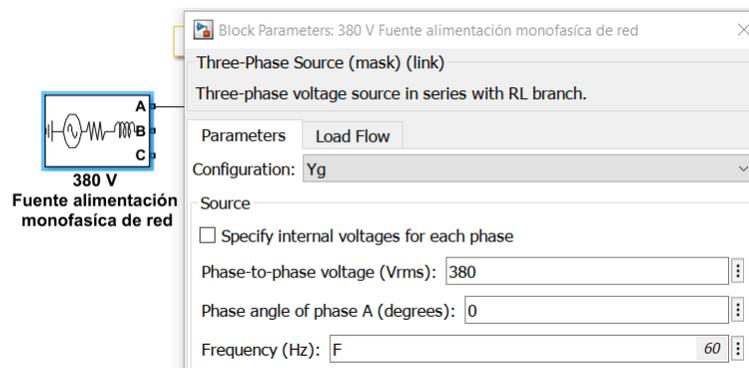


Figura 3-14. Esquema y datos del generador del sistema resonante ACRL en Simulink - MATLAB®

Regulador de Voltaje, mostrado en la Figura 3-15, se conecta a la fuente y su función principal es asegurar la estabilidad y precisión de las pruebas de alta tensión. Este equipo permite mantener una tensión constante y controlada en el objeto bajo prueba, lo cual es fundamental para garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados de las pruebas dieléctricas.

4.5. Lecturas de resultados y flujogramas

Finalmente, este tipo de prueba es “pasa o no pasa”, quiere decir, la prueba se considera satisfactoria si no se evidencian colapsos o caída de tensión durante esta. El sistema resonante ACRL con interfaz IHM, mostrará los parámetros eléctricos de:

- Tensión aplicada en el objeto bajo prueba.
- Corriente que circula en el devanado del reactor inductivo y objeto bajo prueba.
- Tiempo de ejecución de la prueba.

A continuación, se muestra un flujograma de las pruebas de capacitancia y tensión aplicada en un transformador de potencia.

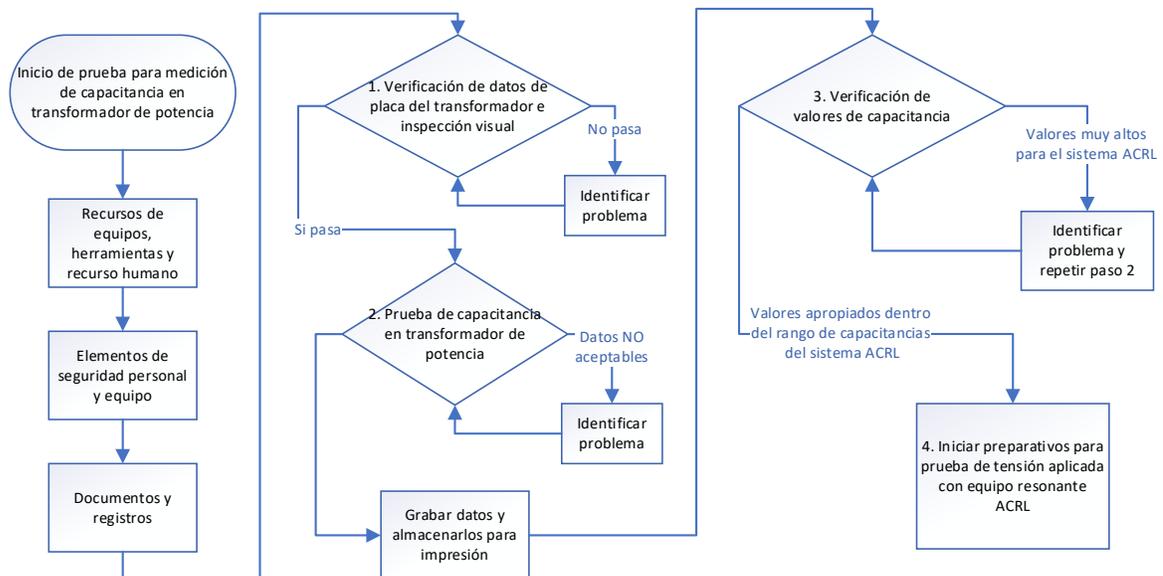


Figura 4-2. Flujograma de prueba de capacitancia en un transformador de potencia trifásico con aislamiento en aceite. (Elaboración del autor, 2023)

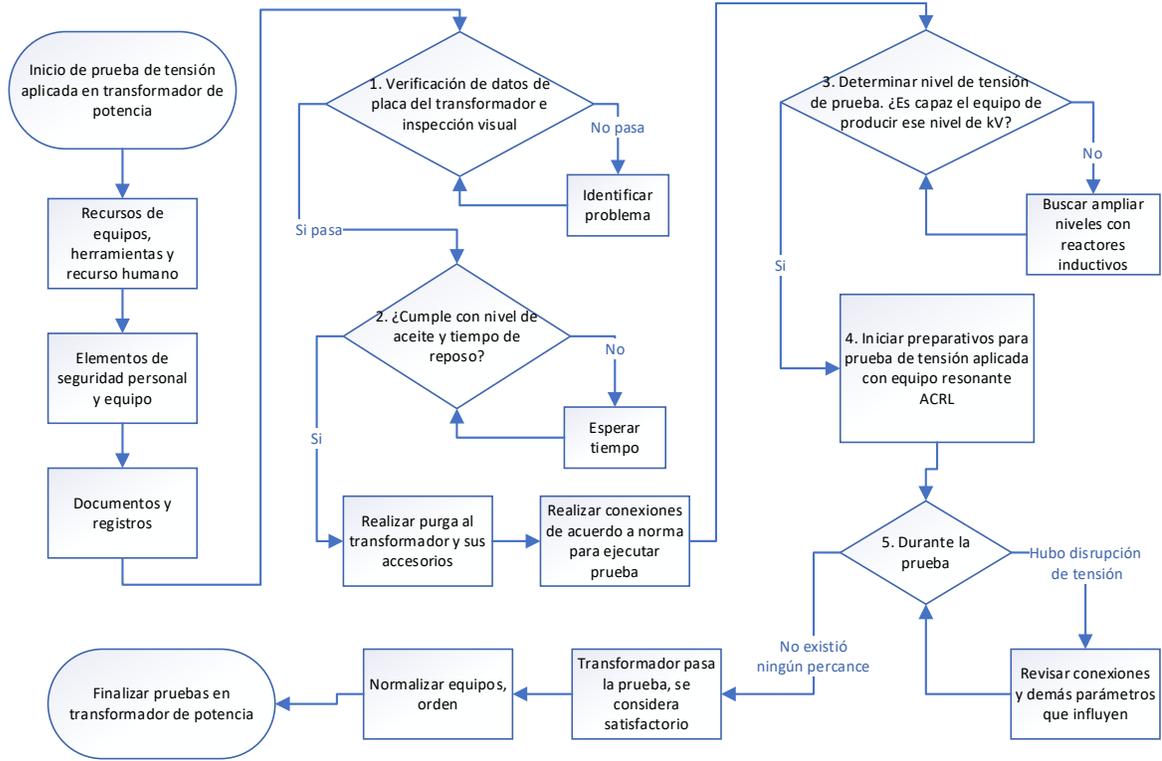


Figura 4-3. Flujoograma de prueba de tensión aplicada en un transformador de potencia trifásico con aislamiento en aceite. (Elaboración del autor, 2023)

6. Conclusiones y discusiones

6.1. Discusión

El uso de los sistemas resonantes ACRL y ACRF en las pruebas de tensión aplicada en transformadores de potencia ofrece información valiosa sobre el estado del sistema de aislamiento del transformador. Considerando específicamente las pruebas de capacitancia y factor de disipación se puede discutir los siguientes resultados:

- Las pruebas de capacitancia: La medición de la capacitancia es un aspecto esencial para evaluar el estado del sistema de aislamiento. Mediante la medición de la capacitancia, se puede evaluar la integridad del aislamiento, identificar posibles problemas como la humedad o la degradación y controlar los cambios a lo largo del tiempo. Las pruebas ACRL y ACRF permiten determinar la capacitancia indirectamente mediante el análisis de las frecuencias resonantes y las corrientes asociadas.
- Pruebas del factor de disipación: El factor de disipación, también conocido como tangente delta, mide las pérdidas dieléctricas en el sistema de aislamiento. Indica la eficacia del aislamiento para conservar la energía eléctrica y puede utilizarse para detectar problemas como la humedad, la contaminación o el envejecimiento del aislamiento. Las pruebas con sistemas ACRL y ACRF permiten determinar el factor de disipación, analizando la relación de fase entre la tensión aplicada y la corriente resultante a la frecuencia de resonancia.
- Valor diagnóstico: Las pruebas con sistemas ACRL y ACRF proporcionan una valiosa información de diagnóstico sobre el estado del sistema de aislamiento. Mediante el análisis de las frecuencias, corrientes y tensiones resonantes, es posible detectar cambios en la capacitancia y el factor de disipación, que pueden indicar degradación del aislamiento u otros problemas. Estas pruebas pueden ayudar a identificar fallos

potenciales, evaluar el envejecimiento del aislamiento y orientar las decisiones de mantenimiento y reparación.

- Sensibilidad a los defectos de aislamiento: Los sistemas ACRL y ACRF han demostrado ser muy sensibles a los defectos del aislamiento, incluso en sus primeras etapas. Pueden detectar la rotura localizada del aislamiento, la actividad de descargas parciales y otras anomalías que no pueden identificarse fácilmente con los métodos de prueba convencionales. Esta sensibilidad permite un mantenimiento proactivo y ayuda a prevenir fallos catastróficos.
- Pruebas complementarias: Las pruebas con los sistemas ACRL y ACRF se utilizan a menudo junto con otras técnicas de diagnóstico, como las pruebas de resistencia del aislamiento, las mediciones de descargas parciales y las inspecciones visuales. Cada método proporciona información del estado del aislamiento y su combinación mejora la evaluación global proporcionando una comprensión más completa del estado del transformador.

En conclusión, el uso de sistemas resonantes ACRL y ACRF en las pruebas de tensión aplicada en transformadores de potencia, junto con las mediciones de capacitancia y factor de disipación, ofrece información valiosa sobre el estado del sistema de aislamiento. Estas pruebas permiten detectar posibles problemas, evaluar la degradación del aislamiento y tomar decisiones informadas para las actividades de mantenimiento y reparación. Cuando el uso de los sistemas resonantes ACRL y ACRF se combinan con otras técnicas de diagnóstico, contribuyen a una evaluación completa del estado del transformador y ayudan a garantizar su funcionamiento fiable.

- El factor de calidad Q de un sistema resonante de frecuencia variable es superior al de un sistema de inductancia variable, debido a que el diseño de un reactor fijo permite reducir pérdidas parasitas por flujo magnético y, por ello, se reducen las pérdidas.

-
- En temas logísticos, el reactor inductivo no variable es mucho más sencillo, compacto, robusto y de un transporte más fácil y económico que uno de inductancia variable, fundamentalmente por sus componentes adicionales.
 - Un aumento de la permitividad eléctrica del aislamiento en papel, con un valor constante de la permitividad del líquido, provoca una disminución del esfuerzo del campo eléctrico en el aislamiento de papel y un aumento de la intensidad en el líquido. Se trata de una situación típica de los sistemas aislantes estratificados en serie, formados por materiales con diferente permitividad eléctrica. Como se ha mencionado, en este caso, las pérdidas dieléctricas disminuyen. Esto se debe al hecho de que la disminución del campo eléctrico en el papel, es mucho mayor que el aumento de la intensidad en el líquido aislante eléctrico. Una situación similar se produce cuando aumenta la permitividad eléctrica del líquido, con una constante del papel. Entonces, el esfuerzo causado por el campo eléctrico en el papel aumenta, y disminuye en el líquido. La permitividad eléctrica del aislamiento de papel y del líquido aislante eléctrico tiene un efecto ambiguo sobre el valor de las pérdidas dieléctricas en el transformador. Este efecto debe estar relacionado con el esfuerzo del campo eléctrico en los materiales aislantes individuales, que depende de la relación de permitividad eléctrica de los mismos. La permitividad eléctrica del aislamiento de papel tiene un impacto clave en el valor de las pérdidas dieléctricas. Con el aumento de la permitividad eléctrica del aislamiento de papel, el esfuerzo causado por el campo eléctrico en este aislamiento disminuye, lo que se traduce en una disminución de las pérdidas dieléctricas en todo el transformador.

6.2. Conclusiones

- Este trabajo de grado contribuye significativamente a la creación de una herramienta esencial, previa a la utilización de sistemas resonantes de alta tensión, como ACRL y ACRF. Esta herramienta proporciona medidas precisas y en tiempo real de variables críticas, incluyendo: frecuencia, inductancia, corriente, voltaje y potencia. Al permitir una configuración precisa del sistema antes de cualquier prueba real, en fábrica o en sitio, se evita el riesgo de daños graves tanto al objeto bajo prueba como al propio sistema resonante AT. Estas simulaciones brindan una visión clara del monitoreo de variables eléctricas en cada componente del sistema, desde la potencia necesaria para su funcionamiento hasta la potencia a la que se somete el objeto bajo prueba.
- La metodología propuesta es un recurso valioso, que proporciona una guía clara para el cálculo teórico del modelo del aislamiento eléctrico interno, en transformadores trifásicos. Su enfoque sencillo, objetivo y de fácil comprensión es fundamental para futuros proyectos relacionados. A pesar de su simplicidad, el modelo propuesto del aislamiento eléctrico demuestra una notable aproximación a las medidas con equipos especializados de capacitancia. Los resultados revelan un error absoluto significativamente bajo, indicando que este modelo es replicable y tendrá un impacto significativo en el campo de la ingeniería eléctrica de alta tensión.
- Los modelos propuestos en Simulink-MATLAB[®], muestran si los sistemas resonantes de alta tensión, ACRL o ACRF, entran en estado de sobrecarga o sobre-modulación, esto contribuye significativamente a la toma de decisiones de la configuración de los equipos del sistema utilizado, con el fin de evitar daño en los sistemas reales.

Bibliografía

- © COMSOL. (2023). *Computation of losses in a three-phase power transformer*. Application ID: 54471. <https://www.comsol.com/model/computation-of-losses-in-a-three-phase-power-transformer-54471>
 - © HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH. (2023a). *AC test systems with variable frequency*. <https://www.highvolt.com/en/productdetail/ac-test-systems/wrm#v-pills->
 - © HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH. (2023b). *HVAC Power frequency resonant test system*. <https://www.highvolt.com/en/productdetail/ac-test-systems/wrm#v-pills->
 - © Megger. (2023). *Mediciones del factor de potencia disipación a la frecuencia de 1 Hz en aislamientos impregnados*. <https://youtu.be/JOVvH3ryk14>
 - © Omicron electronics. (2023). *Offline Testing on Power Transformers*. <https://www.omicronenergy.com/en/application/offline-testing/power-transformer/>
 - © PowerHV. (2023a). *AC resonant test system (variable frequency)*. https://www.powerhv.com/pages/product_info_series/5_8_99_147-Variable-frequency-resonant-system.html
 - © PowerHV. (2023b). *AC resonant test system (variable inductance)*. https://www.powerhv.com/pages/product_info_series/5_8_99_145-AC-resonant-test-system.html
 - © Sieyuan Electric Co. (2023). *Variable frequency series resonant test system*. <https://en.sieyuan.com/68/34/>
 - © VOLTAMP POWER SAOC | Voltamp Omán. (2023). *CORE COIL ASSEMBLY*. <https://voltampoman.com/facilites-voltamp-power-llc/>
- Acosta, J., Amortegui, F., Escobar, A., Leon, L., & Rivera, S. (2020). Design and implementation of prototype for XLPE cable aging test. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 36. <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2020.07.002>

- CIGRE. (2002). *Technical Brochure 254: Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers*.
- CIGRE Study Committee A2: Transformers. (2022). *Transformer and Reactor Procurement* (G. M. Bastos, T. Breckenridge, M. Lamb, T.-L. MacArthur, & S. Ryder, Eds.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80469-5>
- García, B., Urquiza, D., & Burgos, J. C. (2016). Investigating the influence of moisture on the 2FAL generation rate of transformers: A new model to estimate the DP of cellulosic insulation. *Electric Power Systems Research*, 140, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.036>
- Gnanasekaran, D., & Chavidi, V. P. (2018). *Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4870-8>
- Gockenbach, E., W.Hauschild, S.Schierig, Muhr, M., Lick, W., & Berlijn, S. (2007, octubre). *Challenges on the measuring and testing techniques for UHV AC and DC equipment*. https://www.researchgate.net/publication/230952440_Challenges_on_the_measuring_and_testing_techniques_for_UHV_AC_and_DC_equipment
- Hart, D. W. (2005). *Electrónica de potencia* (1a ed.). Prentice Hall.
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019a). Basics of High-Voltage Test Techniques. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 17–87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_2
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019b). *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6>
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019c). High-Voltage Test Laboratories. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 413–450). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_9
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019d). High-Voltage Testing on Site. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 451–506). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_10

-
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019e). Introduction. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 1–15). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_1
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019f). Measurement of Dielectric Properties. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 253–270). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_5
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019g). Partial Discharge Measurement. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 169–251). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_4
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019h). Tests with Combined and Composite Voltages. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 401–411). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_8
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019i). Tests with High Alternating Voltages. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 89–167). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_3
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019j). Tests with High Direct Voltages. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 271–309). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_6
- Hauschild, W., & Lemke, E. (2019k). Tests with High Lightning and Switching Impulse Voltages. En *High-Voltage Test and Measuring Techniques* (pp. 311–399). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97460-6_7
- Herrera, F., Amórtégui, F., León, L., Escobar, A., & García, R. (2020). Desarrollo del primer campo de pruebas para cables subterráneos de transmisión y distribución como herramienta para la gestión y evaluación de activos. *XXII Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos*. https://www.researchgate.net/publication/344365333_Desarrollo_del_Primer_Campo_de_Pruebas_para_Cables_Subterraneos_de_Transmision_y_Distribucion_como_Herramienta_para_la_Gestion_y_Evaluacion_de_Activos?enrichId=rgreq-e551a9583d8d550df5f313ab043ec3c0-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM0NDM2NTMzMztBUzo5MzkzMDcwO

DI3MTUxNDFAMTYwMDk1OTY2ODg4Nw%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf

NTC 836:2019 Electrotecnia. niveles de aislamiento y ensayos para transformadores sumergidos en líquido refrigerante, Pub. L. No. 836 (2019).

NTC 837:2023 Transformadores. Ensayo del dieléctrico., Pub. L. No. 837 (2023).

IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors, Pub. L. No. C57.152-2013 (2013). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6544533>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2013). IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. *IEEE Std 4-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995)*, 1–213. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6515981>

IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.00-2021 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2015) 1 (2022). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9690124>

IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.90-2021 (Revision of IEEE Std C57.12.90-2015) 1 (2022). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9707753>

IEC 60270:2000 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, Pub. L. No. TC 42 (2000).

IEC 60076-1:2011 Power transformers - Part 1: General, Pub. L. No. TC 14 (2011).

IEC 60076-3:2013 - Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air, (2013).

Power transformers - Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials, Pub. L. No. IEC 60076-14 (2013).

Koch, M. (2008). *RELIABLE MOISTURE DETERMINATION IN POWER TRANSFORMERS* [PhD.]. Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart.

- Kuffel, E., Kuffel, J., & Zaengl W.S. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3634-6.X5000-X>
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). Overvoltages, testing procedures and insulation coordination. En *High Voltage Engineering Fundamentals* (pp. 460–508). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-075063634-6/50009-5>
- Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2017). *Transformer Engineering* (2a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13011>
- Limas, D., & Medina, C. (2023, octubre). Dificultades de pruebas en sitio para la medición de descargas parciales en subestaciones GIS y transformadores de potencia. *XXI Conferencia Doble Latinoamericana*. <https://web.cvent.com/event/75ea9b1e-b781-432a-bc58-bba332737249/websitePage:04499f2c-afe9-410d-a08b-a28f68fa3091>
- Limas, D., & Román, F. (2023, septiembre). Utilización de sistemas resonantes para pruebas eléctricas en elementos de subestaciones eléctricas. *Jornadas técnicas de transmisión*. <https://www.cno.org.co/content/jornadas-tecnicas-de-transmision-2023-agenda-dia-2>
- Maller, V. N., & NAIDU, M. S. (1981). *Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF6 and Vacuum*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-03238-0>
- Megger®. (2023). *BOLETÍN DE GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR (TLM): Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia*. https://www.artec-ingenieria.com/pdf/TransformerBulletinTLM/Castellano/TLM6_Bulletin_Power_Factor_es_V02.pdf
- Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE 2013, (2013). <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/bitstream/handle/123456789/2440/6052.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pagger, E. P., Pattanadech, N., Uhlig, F., & Muhr, M. (2023). *Biological Insulating Liquids*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22460-7>

- Purkait, P., Biswas, B., Das, S., & Koley, C. (2013). Schering Bridge. En *Electrical and Electronics Measurements and Instrumentation* (1a ed., Vol. 1, pp. 231–232). McGraw Hill Education.
- Rafiq, M., Chengrong, L., & Lv, Y. (2019). Effect of Al₂O₃ nanorods on dielectric strength of aged transformer oil/paper insulation system. *Journal of Molecular Liquids*, *284*, 700–708. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.04.041>
- Rao, U. M., Fofana, I., & Sarathi, R. (2022). *Alternative liquid dielectrics for high voltage transformer insulation systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Sadiku, M. (2018). *Elements of Electromagnetics* (7a ed.). Oxford University Press.
- Sarria Panesso, L. M. (2015). *Diseño de un sistema de costos aplicado al laboratorio de alta tensión (LAT) de la Universidad del Valle - Sede Meléndez de la ciudad Santiago de Cali*. <https://hdl.handle.net/10893/17112>
- Siegert, L. A. (2002). Alta tensión y sistemas de transmisión. En *Book* (2a ed.). Editorial Limusa S.A. De C.V.
- Song, F., & Tong, S. (2022). Comprehensive evaluation of the transformer oil-paper insulation state based on RF-combination weighting and an improved TOPSIS method. *Global Energy Interconnection*, *5*(6), 654–665. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.12.007>
- Wadhwa, C. L. (2017). *Electrical Power System* (7a ed.). New Age International.
- Zhang, M., Lei, S., Liu, H., Shen, Y., Liu, J., Shi, Y., Jia, H., & Li, L. (2022). Research on nonlinear characteristics for frequency domain dielectric response of transformer oil-paper insulation. *Measurement*, *204*, 112103. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112103>
- Zhu, F., & Yang, B. (2021). *Power transformer design practices*. CRC Press.

Contribuciones

Presentación oficial en jornada técnica de transmisión 2023. Bogotá, Colombia.

(Limas & Román, 2023)

10 11:55 am - 12:25 pm

Utilización de sistemas resonantes para pruebas eléctricas en elementos de subestaciones eléctricas - Daniel Limas / Francisco Román - Universidad Nacional



**JORNADAS TÉCNICAS
DE TRANSMISIÓN 2023**

Agosto 24 y 25 Bogotá

HOTEL HILTON GARDEN INN

CERTIFICADO

El Comité de Transmisión
del CNO certifica que

DANIEL LIMAS LESMEZ

Asistió como conferencista a las Jornadas del Comité de Transmisión realizada los días 24 y 25 de agosto de 2023 en el hotel Hilton Garden Inn en la ciudad de Bogotá



Presentación oficial personal en conferencia latinoamericana Doble. Medellín,
Colombia en el año 2023. (Limas & Medina, 2023)



Anexo A: capítulo 1

A.1. Certificado de manejo de sistema resonante en serie de alta tensión

Sieyuan 思源电气股份有限公司 TEL: 86-21-61610900
SIEYUAN ELECTRIC CO., LTD. FAX: 86-21-61610900
Web: www.syec.com.cn
中国上海市闵行区华宁路 3399 号 No.3399, Hua'ning Rd, Minhang Dist., Shanghai, 201108 P.R.C

Training Qualification Certificate

MR: Daniel Limas Lesmez

From May 5, 2022 to May 13, 2022, it took part in the field operation, equipment use and maintenance of the series resonant complete sets of devices studying and training, and was tested and qualified.

Hereby certify!

SIEYUAN ELECTRIC CO., LTD

May 13, 2022

