

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS
CANALES Y PUERTOS



**Detección de defectos en devanados de
excitación de máquinas síncronas con
sistema de excitación indirecta.**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Miguel Ángel Pardo Vicente

Ingeniero Industrial

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos Canales y Puertos

Doctorado en Sistemas de Ingeniería Civil

**Detección de defectos en devanados de
excitación de máquinas síncronas con
sistema de excitación indirecta.**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Miguel Ángel Pardo Vicente
Ingeniero Industrial

Bajo la dirección de:
Dr. José Ángel Sánchez Fernández

Madrid, 2024

Título: Detección de defectos en devanados de excitación de máquinas síncronas con sistema de excitación indirecta.

Autor: Miguel Ángel Pardo Vicente.

Programa de Doctorado: Doctorado En Sistemas de Ingeniería Civil.

Dirección de tesis:

Dr. José Ángel Sánchez Fernández, Profesor Titular, Universidad Politécnica de Madrid.

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Agradecimientos.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, José Ángel, por su orientación, paciencia y apoyo durante todo el proceso de investigación. Sin su ayuda hubiera sido imposible llegar hasta aquí.

Agradezco de manera muy especial a mi familia, en particular a mi padre, que desafortunadamente no se encuentra entre nosotros, a mi esposa Ana y a mis hijos Pablo y Sofía por su comprensión y estímulo durante estos años. Su apoyo moral y emocional fue mi principal ayuda en los momentos de dificultad.

A mi buen amigo Carlos, que siempre, de forma desinteresada, me ha apoyado y ayudado para continuar hacia adelante, buscando soluciones a todas las dificultades planteadas.

Por último, a todas las personas que han participado dando soporte tanto para la fabricación en taller de componentes utilizados en los ensayos, Valentín, José Luis, como para la publicación de artículos Kumar y José Manuel.

A todos vosotros, mi más sincero agradecimiento.

Abstract.

The most commonly used electrical machine for the generation of electrical energy is the synchronous machine. This machine, in order to generate electrical energy, requires that its rotor, which is rotating, be fed with direct current.

To supply the rotor of a synchronous machine with direct current, a configuration widely used in the 1910s and following years, was to couple to the main shaft of the machine a direct current generator (exciter) with sufficient power to supply the rotor of the main generator.

In this configuration, the DC current generated in the exciter field exits through a mechanical commutator and brushes installed on its rotor and is connected via slip rings and brushes to the rotor of the main generator.

Therefore, two machines are coupled by their shafts rotating at synchronous speed, each using brushes and slip rings to connect to each other. The dust on these brushes (graphite) when worn, together with oil vapours from the bearings, generates a conductive environment which must be removed periodically to avoid untimely damage to the machines. This cleaning means hours of machine downtime and maintenance costs.

To reduce the above, another configuration, also widely used in the electricity generators park, is to supply the rotor of the main generator with direct current through slip rings and brushes, taking energy from the generation busbar (alternating current), previously transforming it into direct current by means of thyristor bridges (static excitation). In this configuration, the direct current machine (exciter) and its commutator are eliminated, but brushes are still used to power the main rotor, with the maintenance requirements indicated above.

If it is really desired to eliminate the brushes in a synchronous machine arrangement, there is a configuration called brushless, in which a specially manufactured auxiliary synchronous machine (the armature is in the rotor), called an exciter, coupled to the same shaft, is used. This exciter generates electrical energy to power the rotor of the main machine which, by means of rotating diodes fixed to the shaft, transforms the alternating current generated in the armature winding of the exciter into direct current. The exciter has sufficient power for the entire overhead current of the main rotor.

This type of configuration does not require using brushes, eliminating maintenance and downtime for cleaning and replacement of the brushes.

In any of the currently existing configurations, the excitation system is a system isolated from earth. Therefore, the only consequence of a first fault is to reference the system to earth, but a second fault causes significant damages to the generator due to imbalances in the magnetic field. These imbalances manifest themselves in significant vibrations in the machine which, if not detected in time, could seriously damage the machine. For this reason, it is common practice to install earth fault protections on the rotor.

Protection for brushed machines is simple and consists mainly of detecting the current flow between the rotor and earth.

In brushless machines, where there is no access point to the rotor, it is more complex. Current protection systems for this type of excitation use an auxiliary ring with its brushes to access the rotor and inject an electric current to detect leakage current to ground. As it is a brush system for measurement only, not many brushes are necessary and they can be motorized, being connected only when a measurement is required (2 or 3 times a day).

In this thesis is a novel system for detecting earth faults without the need to use a brush system is presented. The system is based on a rotating sensor placed on the shaft of the machine. This sensor will allow continuous monitoring of the rotor.

The second objective of this thesis is to develop a location ground fault method, once it occurs. In synchronous machines, the number of poles is a function of the rotation speed. In hydraulic machines, whose rotational speed is usually low, the generator has a large number of poles. Discerning whether the fault is occurring on the AC or DC side, and if it is on the rotor, identifying the damaged pole, can mean a very considerable saving in the unavailability of the unit during repair.

The use of the rotary sensor will make it possible to detect earth faults without the need for brushes. It also allows knowing if the fault happens on the AC side or on the DC side. If it happens on the DC side, it is possible to identify whether it is on one half or the other.

To locate the damaged pole more precisely, a brush should be used to access the neutral point of the brushless armature.

Resumen.

La máquina eléctrica más utilizada para la generación de energía eléctrica es la máquina síncrona. Esta máquina, para generar energía eléctrica, requiere que su rotor, que está en rotación, sea alimentado en corriente continua.

Para alimentar en corriente continua el rotor de una máquina síncrona una configuración muy usada en los años 1910 y siguientes, fue acoplar al eje principal de la máquina, un generador de corriente continua (excitatriz), con potencia suficiente para alimentar el rotor del generador principal.

En esta configuración, la corriente continua generada en la excitatriz se conecta mediante anillos rozantes y escobillas al rotor del generador principal.

Por tanto, se dispone de dos máquinas acopladas por sus ejes girando a la velocidad de sincronismo y utilizando cada una de las escobillas y anillos rozantes para conectarse entre sí. El polvo de estas escobillas (grafito) al desgastarse, unido a vapores de aceite de los cojinetes, genera un ambiente conductor que debe de ser eliminado periódicamente si no se quiere ocasionar daños intempestivos en las máquinas. Esta limpieza son horas de indisponibilidad de la máquina y costes de mantenimiento.

Para reducir lo anteriormente descrito, otra configuración, también muy utilizada en el parque de generación eléctrica, es alimentar en corriente continua el rotor del generador principal a través de anillos rozantes y escobillas, tomando energía de la barra de generación (alterna), transformándola previamente en corriente continua mediante puentes de tiristores (excitación estática). En esta configuración se elimina la máquina de corriente continua (excitatriz) y su colector de delgas, pero se siguen utilizando escobillas para la alimentación del rotor principal, con las necesidades de mantenimiento anteriormente indicadas.

Si realmente se desea eliminar las escobillas en la disposición de la máquina síncrona, existe una configuración denominada *brushless* en la que se emplea una máquina síncrona auxiliar de fabricación especial (el inducido está en el rotor), llamada excitatriz, acoplada al mismo eje. Dicha excitatriz genera energía eléctrica para la alimentación del rotor de la máquina principal que, mediante diodos rotativos fijados en el eje, transforman la corriente alterna generada en el devanado inducido de la excitatriz en corriente continua. La excitatriz tiene potencia suficiente para toda la corriente de techo del rotor principal. Este tipo de configuración no requiere del uso de escobillas eliminando los mantenimientos y las paradas para la limpieza y sustitución de las escobillas.

En cualquiera de las configuraciones existentes en la actualidad, el sistema de excitación es un sistema aislado de tierra. Por tanto, un primer fallo lo único que ocasiona es referenciar el sistema a tierra, pero un segundo fallo ocasiona daños importantes en el generador por desequilibrios en el campo magnético. Dichos desequilibrios se manifiestan con vibraciones importantes en la máquina que, si no se detectan a tiempo, pudieran dañarla gravemente. Por este motivo, es práctica habitual instalar protecciones de falta a tierra en el rotor.

La protección para máquinas con escobillas es simple y consiste principalmente en la detección de la circulación de corriente entre el rotor y tierra.

En las máquinas brushless, donde no se dispone de un punto de acceso al rotor, es más complejo. Los sistemas de protección actuales para este tipo de excitaciones utilizan un anillo con sus escobillas para acceder al rotor e inyectar una corriente eléctrica para detectar derivaciones a tierra. Al ser un sistema de escobillas solamente para medida, no son necesarias muchas escobillas y éstas pueden estar motorizadas, conectándose únicamente cuando se desea medir (2 o 3 veces al día).

Lo que se presenta en esta tesis es un sistema de detección de faltas a tierra sin necesidad de utilizar sistema de escobillas mediante un sensor rotativo calado en el eje de la máquina. Este sensor va a permitir una monitorización en continuo del rotor.

El segundo objetivo de esta tesis es desarrollar un método para la localización de la avería una vez que se produzca. En las máquinas síncronas el número de polos es función de la velocidad de rotación. En máquinas hidráulicas, cuya velocidad de rotación suele ser baja, el generador dispone de un importante número de polos. El discernir si la falta se está produciendo en el lado de alterna o de continua, y en el caso de estar en el rotor, identificar el polo dañado, puede suponer un ahorro muy considerable de indisponibilidad del grupo durante la reparación.

El uso del sensor rotativo va a permitir detectar faltas a tierra sin necesidad de escobillas. También permite conocer si la falta se produce en el lado de alterna o en el lado de continua. Si se produce en el lado de continua se puede identificar si es en una mitad o en otra.

Para la localización con más precisión del polo dañado se tendría que hacer uso de una escobilla para tener accesible el punto neutro del inducido de la brushless.

Tabla de Contenido.

Agradecimientos.	iv
Abstract.	v
Resumen.	vii
Tabla de Contenido.	9
Lista de Figuras.	11
Lista de Tablas.	14
1. Introducción general.	15
1.1. Defectos en máquinas síncronas.....	22
1.2. Estado del arte en protecciones tierra rotor.	29
1.3. Protección tierra rotor. Máquinas con rotor accesible.	31
1.3.1. Protecciones Eléctricas.	34
1.3.2. Detección mediante relés de inyección de corriente continua.	35
1.3.3. Relé inyección de corriente Alterna.	37
1.3.4. Relé inyección pulsos de frecuencia ajustable.	38
1.4. Protección tierra rotor. Máquinas brushless.	39
1.5. Estado del arte en sistema de medida de corriente.	40
1.5.1. Efecto Hall.....	40
1.5.2. Bobina Rogowski.....	45
1.5.3. Medida de corriente por fibra óptica.	47
1.6. Objetivo de la tesis.	53
1.7. Resumen de Publicaciones.	54
2. Metodología.	57
3. Publicaciones.	81
3.1. Artículo A1: On-Line Rotor Ground Fault Location Method for Brushless Synchronous Machines.....	81
3.2. Artículo A2: AC/DC Current Sensor for Rotating Applications.	92
3.3. Artículo A3: Contactless Rotor ground Detection Method for Brushless Synchronous Machines Based on a AC/DC Rotating Current Sensor.....	112
4. Discusión general.	129
4.1. Resultados.....	129

4.2. Conclusiones y futuras líneas de investigación.	146
5. Referencias.	149
6. Anexos.	156
6.1. Artículo conferencia.	156
6.2. Patentes.	163

Lista de Figuras.

Figura 1.1. Máquina síncrona excitación indirecta con excitatriz de corriente continua.	21
Figura 1.2. Máquina síncrona excitación Brushless.	21
Figura 1.3 Clasificación de daños (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].	23
Figura 1.4 Daños de aislamiento analizados (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].	25
Figura 1.5 Daños térmicos (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].	25
Figura 1.6. Daños mecánicos (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].	26
Figura 1.7. Máquina síncrona excitación estática.	32
Figura 1.8. Máquina síncrona excitación indirecta. Excitatriz de corriente continua.	33
Figura 1.9. Deteccion de falta a tierra. Tipo puente.	34
Figura 1.10 Deteccion falta a tierra mediante inyeccion de corriente alterna.	35
Figura 1.11. Deteccion mediante relés de inyeccion de corriente continua.	36
Figura 1.12. Detección faltas a tierra mediante inyección de corriente alterna.	38
Figura 1.13. Detección de falta a tierra mediante inyección de pulsos.	39
Figura 1.14. Efecto Hall.	41
Figura 1.15. Reluctancia en función del entrehierro.	42
Figura 1.16. Medida de corriente mediante sensor Hall.	43
Figura 1.17. Principio de funcionamiento bobina Rogowski.	46
Figura 1.18. Esquema sistema de detección utilizado para la medida de corriente.	49
Figura 2.1. Máquina para ensayo.	58
Figura 2.2. Configuración máquina síncrona para ensayo.	58
Figura 2.3. Puntos accesibles de la máquina.	60
Figura 2.4. Lógica simplificada para detección y localización de defectos.	61
Figura 2.5 Excitatriz y rotor maquina ensayo.	62

Figura 2.6. Circuito equivalente alterna	63
Figura 2.7. Circuito equivalente corriente continua.....	63
Figura 2.8. Modelo Simulación.....	64
Figura 2.9. Sensor rotativo de corriente. a) Rotor, b) estator.	65
Figura 2.10. Sensor de corriente rotativo. Distribución de flujos y tensiones inducidas.....	66
Figura 2.11. Densidad de flujo con sensor alimentado a 50 mA con CC.	67
Figura 2.12. Forma de onda sensor alimentado a 8,35 mA con CC.	68
Figura 2.13. FFT de sensor alimentado a 8,35 mA con CC	68
Figura 2.14. Densidad de flujo con sensor alimentado a 60 mA con CA a 450Hz.....	69
Figura 2.15. Forma de onda sensor alimentado a 12 mA con CA a 450Hz	70
Figura 2.16. FFT de sensor alimentado a 12 mA con CA a 450Hz.....	70
Figura 2.17. Forma de onda para 22 mA de AC a 450Hz + 10 mA de DC.	71
Figura 2.18. FFT de la tensión inducida en el sensor alimentado a 22 mA con AC a 450Hz + 10 mA DC.	71
Figura 2.19. Tensión inducida en el sensor con 3 mA CC.....	72
Figura 2.20. Descomposición FFT de la respuesta del sensor a 3 mA.....	73
Figura 2.21. Respuesta del sensor a CA de 450Hz y 0,8 mA.	73
Figura 2.22. Descomposición FFT respuesta del sensor a CA de 450Hz y 0,8 mA.	74
Figura 2.23. Respuesta del sensor a CA de 450Hz y 0,6 mA y CC de 1 mA	75
Figura 2.24. Descomposición FFT respuesta del sensor a CA 0,6 mA y CC 1 mA.....	75
Figura 2.25. Máquina completa para pruebas	75
Figura 2.26. Esquema de conexionado de la máquina de ensayos con sensor.....	76
Figura 2.27. FFT tensión inducida en el sensor máquina funcionando sin defectos.....	77
Figura 2.28. Tensión inducida en el sensor, posición 0% y $R_f = 0\Omega$ (a) forma de onda, (b) FFT.	78
Figura 2.29. Tensión inducida en el sensor, posición AC y $R_f = 1K\Omega$ (a) forma de onda, (b) FFT.	78
Figura 2.30. Tensión en sensor para diferentes resistencias de defecto y posiciones.....	79

Figura 4.1. Forma de onda medido en resistencia para defecto en AC. $R_f = 2k\Omega$, $V_{exc} = 3,35V$	130
Figura 4.2. Forma de onda de la tensión en R_g de una falta en 0% (polo negativo)	131
Figura 4.3. Forma de onda de la tensión en R_g de una falta en 50%.....	131
Figura 4.4. Forma de onda de la tensión en R_g de una falta en 100% (polo positivo)	132
Figura 4.5. Respuesta del sensor midiendo corriente continua.....	136
Figura 4.6. Respuesta del sensor midiendo corriente alterna.	136
Figura 4.7. Tensión inducida en el sensor alimentado con 3 mA DC.....	137
Figura 4.8. FFT Tensión inducida en el sensor alimentado con 3 mA DC.	137
Figura 4.9. Tensión inducida en el sensor alimentado con 0,8 mA, 450 Hz.....	138
Figura 4.10. FFT tensión inducida en el sensor alimentado con 0,8 mA, 450 Hz.	138
Figura 4.11. Tensión inducida en sensor alimentado 1 mA DC + 0,6 mA 450 Hz.	139
Figura 4.12. FFT Tensión inducida en sensor alimentado 1 mA DC + 0,6 mA 450 Hz.....	139
Figura 4.13. Tensión U_s inducida en sensor ante una falta en la posición 0%; $R_f = 0 [\Omega]$; (a): forma de onda; (b) FFT.	141
Figura 4.14. Tensión U_s inducida en sensor ante una falta en AC; $R_f = 1 k\Omega$; (a): forma de onda; (b) FFT.....	142
Figura 4.15. Tensión U_s inducida en sensor antes faltas en 0%,25%,50%,75%,100%. Máquina sin carga.	143
Figura 4.16. Tensión U_s inducida en sensor antes faltas en 0%,25%,50%,75%,100%. Máquina en carga (50% P_n).	144

Lista de Tablas.

Tabla 1-1. Comparativa sistemas de medida [73].....	52
Tabla 4-1. Tensión (V_{dc}) medida en R_g para diferentes defectos	133
Tabla 4-2. Ensayos con máquina sin defectos	143

1. Introducción general.

La primera máquina de corriente alterna (CA) fue desarrollada por el ingeniero e inventor Nikola Tesla [1], una figura clave en la historia de la electricidad y la ingeniería.

A finales del siglo XIX, en un periodo de grandes avances tecnológicos, Tesla trabajó incansablemente en la creación y perfeccionamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica que estuvieran basados en el uso de corriente alterna.

Su dedicación en este campo fue fundamental para la adopción generalizada de la corriente alterna en la generación y distribución de electricidad en todo el mundo. Uno de los hitos más significativos y clave en este desarrollo tecnológico fue la introducción de lo que se conoce como el "sistema polifásico".

Este sistema utilizaba generadores de corriente alterna polifásica, los cuales eran capaces de generar múltiples corrientes que estaban desfasadas entre sí, permitiendo una transmisión más eficiente y efectiva de la energía eléctrica.

El 16 de mayo de 1888, un día histórico para la ingeniería eléctrica, Nikola Tesla presentó su revolucionario sistema polifásico durante una conferencia técnica celebrada en el American Institute of Electrical Engineers (Instituto Estadounidense de Ingenieros Eléctricos). En esa importante conferencia, Tesla describió detalladamente los principios fundamentales de su sistema y explicó cómo podría ser utilizado para la transmisión de energía eléctrica a largas distancias, marcando así un antes y un después en el campo de la ingeniería eléctrica y la distribución de energía.

Posteriormente, en la década de 1890, Tesla trabajó con el industrial y empresario George Westinghouse para implementar su sistema polifásico en la construcción de la primera planta hidroeléctrica del mundo a gran escala en las Cataratas del Niágara, conocida como "Niagara Falls Power Company" [2] en 1896.

La planta hidroeléctrica de las Cataratas del Niágara, un proyecto de ingeniería y tecnología que demostró con éxito la viabilidad y eficiencia del sistema de corriente alterna en la generación y transmisión de electricidad a largas distancias. Esta instalación no solo fue un logro técnico, sino que también marcó un hito trascendental en la historia de la electricidad, destacándose como un ejemplo

pionero que contribuyó significativamente a la adopción generalizada de la corriente alterna en sistemas de energía eléctrica en todo el mundo.

La exitosa operación de esta planta hidroeléctrica convenció a ingenieros y empresarios de que la corriente alterna era el método más eficiente y práctico para la generación y transmisión de electricidad a grandes distancias, superando así las limitaciones de los sistemas de corriente continua que se usaban en esa época. Esta notable instalación no solo proporcionó electricidad a vastas áreas, sino que también inspiró la construcción de muchas otras plantas hidroeléctricas en diversas partes del mundo, acelerando así la electrificación global.

Por máquina síncrona se entiende aquellos convertidores electromecánicos rotativos que, al girar a una velocidad constante y proporcional a la frecuencia de la red eléctrica donde están conectados, tienen la capacidad de transformar la energía mecánica en eléctrica, funcionando por tanto como generadores, o de transformar la energía eléctrica en mecánica, operando como motores [3].

Cuando la máquina síncrona funciona regulando tensión sin aportar ni absorber potencia activa se dice que funciona como compensador síncrono. Las centrales eléctricas de bombeo es un claro ejemplo del funcionamiento de la máquina eléctrica en sus tres modos de funcionamiento. Éstas centrales están constituidas por un grupo binario (máquina hidráulica-máquina síncrona). En las horas punta del día donde la demanda es alta y por tanto el precio de la energía también, estas centrales turbinan vertiendo energía eléctrica a la red. En esta situación la máquina síncrona funciona como generador, y la máquina hidráulica como turbina.

En las horas valle donde la demanda nacional es baja y por lo tanto el precio de la energía también, estas centrales de bombeo absorben energía eléctrica de la red comportándose como consumidor de energía eléctrica. En esta situación la máquina síncrona se comporta como motor eléctrico y la máquina hidráulica como bomba.

Cuando se requiere ajuste de la tensión en el nudo de interconexión de estas plantas la máquina síncrona se puede comportar como compensador síncrono aportando potencia reactiva a la red o absorbiéndola si fuera necesario. En esta situación la máquina síncrona se comporta como compensador síncrono y la máquina hidráulica puede estar en modo turbina o bomba, pero siempre con el rodete desanegado para no absorber o generar potencia activa.

Las máquinas síncronas, al igual que cualquier otro tipo de máquina, están constituidas por un devanado inductor, el cual, en el caso de las grandes máquinas industriales, está ubicado en el rotor y es alimentado por corriente continua, y por un devanado inducido trifásico, situado en el estator. Ambos devanados están concatenados por un campo magnético, lo que permite la conversión eficiente de energía en cualquiera de las dos direcciones mencionadas. Este tipo de máquinas es esencial en numerosas aplicaciones industriales y de generación de energía, destacándose por su capacidad de mantener una velocidad constante bajo diversas condiciones de carga, lo cual es crucial para la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos.

Al alimentar el inductor, que está ubicado en el rotor, con una corriente continua, la velocidad de giro del rotor solo puede ser la velocidad de sincronismo, la cual está determinada por la relación entre la velocidad de sincronismo y la frecuencia de la red eléctrica a la que está conectada. Esta relación es igual al número de pares de polos del rotor.

En cuanto a la geometría del rotor, las máquinas síncronas se pueden clasificar en dos categorías principales: las máquinas de polos salientes y las máquinas de rotor cilíndrico. Las máquinas de polos salientes son típicamente de baja velocidad y se utilizan principalmente como generadores síncronos acoplados a turbinas hidráulicas.

Por otro lado, las máquinas de rotor cilíndrico pueden girar a velocidades más elevadas estando diseñadas para ser acopladas directamente a turbinas de gas y vapor propias de centrales térmicas (vapor o ciclo combinado) y nucleares.

Esta tesis se centra en un uso muy importante de las máquinas síncronas, que es su funcionamiento como generadores de energía eléctrica. Estos generadores son acoplados rígidamente a través de sus ejes a turbinas hidráulicas, cuya velocidad de rotación es relativamente baja, oscilando entre 375 y 750 revoluciones por minuto (rpm) cuando hablamos de turbinas Pelton, y hasta 75 revoluciones por minuto (rpm) si hablamos de turbinas Kaplan.

Las turbinas de vapor y/o gas, cuya velocidad de rotación es significativamente más alta, alcanzando hasta 3000 rpm.

En el primer caso, debido a la baja velocidad de rotación, se requiere un gran número de polos, lo que hace que el diámetro del rotor sea considerablemente

mayor que en el segundo caso, donde la velocidad de rotación es alta y se necesita un menor número de polos.

Como es conocido que la potencia asignada a una maquina es proporcional a su volumen, los turbogeneradores utilizados en centrales térmicas de ciclo combinado se construyen con un diámetro más bien pequeño y una longitud axial grande. En esta configuración más común la maquina es de eje horizontal y de rotor cilíndrico. De esta forma se consigue reducir la fuerza centrífuga a la que están sometidos los polos del rotor.

En el caso de plantas hidráulicas, donde la velocidad de rotación es menor los generadores se construyen con un gran diámetro y poca longitud. No es extraño encontrarse con generadores cuyo diámetro es mayor que su longitud.

Como se ha indicado anteriormente, el inductor se encuentra ubicado en el rotor y debe ser alimentado con corriente continua para funcionar adecuadamente.

Tradicionalmente esta alimentación de corriente continua procede de una dinamo o excitatriz (generador de corriente continua) que está acoplado al eje de la maquina girando a la misma velocidad que el generador principal.

Esta máquina de corriente continua [4], fue desarrollada en el periodo comprendido entre 1820 y 1880. El objetivo fue buscar un generador de energía cuya corriente fuera similar a la pila galvánica.

El desarrollo de esta máquina de continua se centró durante mucho tiempo en buscar la forma de transformar corriente alterna inducida en una espira en corriente de polaridad constante (corriente continua).

La primera idea del colector de delgas encargado de la rectificación “mecánica” de la tensión inducida en el rotor de la máquina fue en 1831 y se debe a Pixxi.

La máquina de corriente continua como actualmente se conoce y que alimente de al rotor del generador síncrono se debe a Gramme y se construyó en 1867.

Zenobe Theophile Gramme [4] fue un técnico belga de formación eminentemente autodidacta. En 1867 obtuvo una patente por una máquina de corriente alterna y en 1869, dos años después patentó la famosa dinamo.

La capacidad de potencia de la excitación principal depende directamente de la potencia del generador síncrono, también conocido como alternador. Generalmente, la potencia requerida por el devanado de excitación es bastante reducida en comparación con la potencia total asignada a la máquina. Por ejemplo, se requieren potencias para las excitaciones de unos 25kW para alternadores de 1MVA (aproximadamente el 2,5% de la capacidad del generador) y para grandes generadores síncronos (500MVA) es suficiente sistemas de excitación de unos 2500kW (0,5% de la capacidad del generador) [5].

La tensión asignada de estos sistemas de excitación varía típicamente entre los 100 y los 600 voltios, siendo estos devanados de excitación, de baja tensión [6]. Dependiendo del sistema de excitación, las máquinas síncronas pueden ser de excitación estática o de excitación indirecta.

En las máquinas con excitación estática, la corriente continua necesaria para alimentar el rotor se obtiene directamente de la red eléctrica, rectificándola mediante puentes de tiristores [7]. A diferencia de los sistemas de excitación estática [8] [9], en las máquinas con excitación indirecta, la corriente continua se obtiene mediante una máquina auxiliar llamada excitatriz [4]. Existen diferentes tipos de excitatrices, incluyendo máquinas de corriente continua, máquinas síncronas convencionales y máquinas síncronas de imanes permanentes.

Dentro de las excitaciones indirectas, actualmente la más utilizada es la que emplea una máquina síncrona con un puente de diodos rotativos como excitatriz. Este tipo de excitatriz no requiere de escobillas ni anillos, lo cual es una de las razones principales de su uso. Se conoce comúnmente como "brushless", o sin escobillas en inglés.

En el caso de excitación estática [10] y excitación indirecta con excitatrices de corriente continua, para la alimentación del rotor, que está en rotación, se requiere el uso de anillos rozantes y escobillas. Sin embargo, en las máquinas brushless con diodos rotativos, no se necesitan anillos ni escobillas, lo que reduce significativamente los costes de mantenimiento, el coste de reposición de escobillas, el coste de mecanizado de anillos, el coste de indisponibilidad durante los tiempos de mantenimiento y el coste de limpieza de los equipos de excitación debido a la suciedad producida por el grafito de las escobillas.

Para generadores con potencias inferiores a 1 MVA, la tensión inducida en bornas del generador es de 400 voltios, lo que permite conectarlos directamente a la red de baja tensión. En el caso de potencias medias, se utilizan tensiones de unos 5 a

6.6 kilovoltios (kV), y para altas potencias, la tensión puede variar entre 11 y 20 kV. Las máquinas síncronas tienen una amplia variedad de aplicaciones debido a sus características particulares. Permiten aportar energía reactiva a la red eléctrica para mantener los valores de tensión en el nodo de interconexión con la red de transporte dentro de los valores asignados.

Asimismo, la frecuencia de la corriente alterna generada por una máquina síncrona está directamente relacionada con su velocidad de giro, y esta velocidad debe mantenerse constante. Este control de frecuencia es fundamental para mantener la estabilidad en las redes eléctricas. Debido a todas las razones mencionadas anteriormente, este tipo de máquinas son las más utilizadas para la generación de energía eléctrica en la actualidad. Entre los sistemas de excitación analizados, hoy en día se tiende a utilizar la excitación indirecta con excitatrices de corriente alterna y diodos rotativos o tipo brushless. Estas máquinas no requieren anillos rozantes ni escobillas para alimentar el rotor. La principal ventaja de la eliminación de las escobillas y los anillos rozantes es la reducción de los costes de mantenimiento, que incluyen el coste de reposición de escobillas, el coste de mecanizado de anillos, el coste de indisponibilidad durante los tiempos de mantenimiento y los costes de limpieza de los equipos de excitación debido a la suciedad producida por el gafito de las escobillas.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema simplificado de una máquina síncrona con excitación indirecta que utiliza una excitatriz de corriente continua y anillos rozantes. Este esquema incluye un generador de corriente continua (excitatriz) cuyo inductor se encuentra en el estator y es alimentado por un regulador de tensión [11]. La corriente inducida en el rotor pasa por un colector de delgas (conmutador) y, mediante escobillas en el propio colector, se alimentan unos anillos de excitación. Estos anillos de excitación están unidos al rotor del generador síncrono, lo que permite la transmisión de la corriente continua necesaria por su funcionamiento.

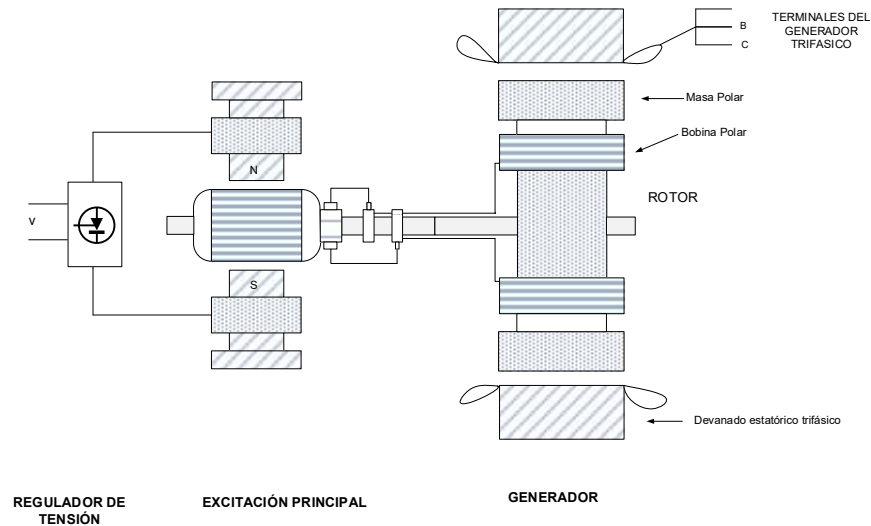


Figura 1.1. Máquina síncrona excitación indirecta con excitatriz de corriente continua.

En la Figura 1.2 se puede ver una máquina síncrona con excitación brushless [5]. En este caso el colector de delgas (conmutador) se sustituye por un puente de diodos rotativos [12] fijado en el propio eje, no siendo necesario el uso de las escobillas de grafito.

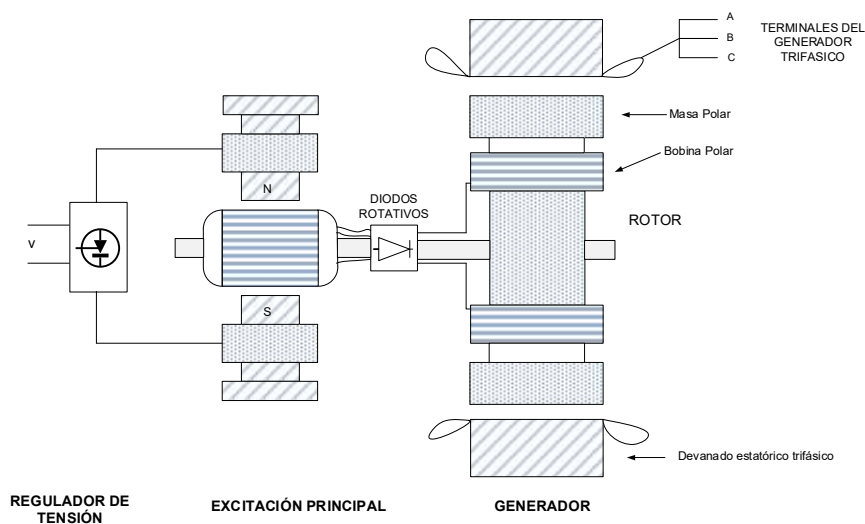


Figura 1.2. Máquina síncrona excitación Brushless.

1.1. Defectos en máquinas síncronas.

Hasta la fecha, se han publicado numerosos estudios estadísticos detallados sobre las diversas causas de fallos en máquinas rotativas [13]. Estos estudios han sido elaborados por diferentes investigadores y organizaciones especializadas en el análisis de fallos de equipos electromecánicos. En esta sección, se repasan exhaustivamente las principales causas de fallos en los generadores síncronos de potencia [14], considerando diversos factores y condiciones operativas.

Uno de los estudios más relevantes en este ámbito es el realizado por el grupo de trabajo WG A1.10 de CIGRE [15]. Este estudio se centró en una muestra representativa de 1199 generadores hidráulicos, todos ellos con una potencia superior a los 10 MVA y un tiempo de operación que supera los 10 años. La finalidad de este estudio fue identificar y clasificar los distintos tipos de fallos que se producen en estos generadores, proporcionando una visión clara y detallada de las causas y consecuencias de dichos fallos.

En el mencionado estudio, se llevó a cabo una clasificación minuciosa de los 69 incidentes reportados, que representan fallos específicos en los generadores hidráulicos analizados. Esta clasificación se basa en los daños encontrados [16] en los generadores durante su funcionamiento, proporcionando información valiosa sobre la naturaleza y la gravedad de los fallos. Además, el estudio también se enfoca en identificar la causa raíz de cada uno de estos incidentes, lo que permite entender mejor los factores que contribuyen a estos fallos y cómo pueden ser prevenidos o mitigados.

La figura 1.3 del estudio ilustra de manera gráfica la distribución de los incidentes reportados, categorizándolos según el tipo de daño y la causa raíz identificada. Esta representación visual facilita la comprensión de los patrones y tendencias en los fallos de los generadores síncronos de potencia, proporcionando una herramienta útil para los ingenieros y técnicos que trabajan en el mantenimiento y la operación de estos equipos. La identificación de las causas raíz es especialmente importante, ya que permite desarrollar estrategias efectivas para mejorar la fiabilidad y eficiencia de los generadores, minimizando el riesgo de fallos futuros.

En resumen, el estudio del grupo WG A1.10 de CIGRE sobre los generadores hidráulicos de potencia ofrece una visión comprensiva y detallada de las causas de

fallos en estos equipos, contribuyendo de manera significativa al conocimiento y la prevención de fallos en máquinas rotativas. La información proporcionada por este estudio es muy importante para la industria, ya que permite a los profesionales del sector tomar decisiones informadas y desarrollar prácticas de mantenimiento más efectivas, garantizando así la continuidad y eficiencia de la generación de energía.

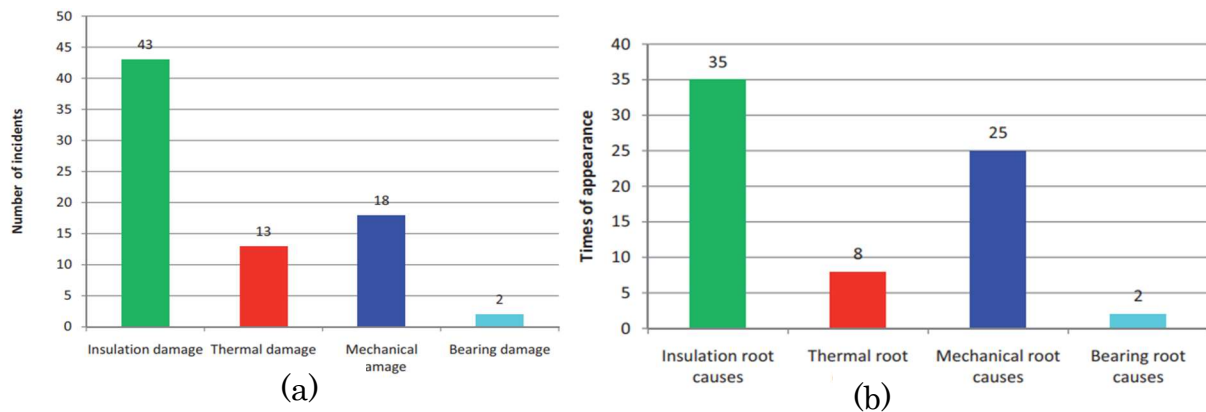


Figura 1.3 Clasificación de daños (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].

Los 69 incidentes reportados se han clasificado en cuatro categorías principales: daños de aislamiento, daños térmicos [17], daños mecánicos y daños en cojinetes. Cada una de estas categorías se refiere a un tipo específico de daño que puede ocurrir en los generadores síncronos de potencia, y la clasificación permite una comprensión más detallada de los problemas que afectan a estos equipos.

En la Figura 1.3 (b) pueden verse la clasificación en función de la causa raíz de los incidentes reportados: causa raíz debido a problemas de aislamiento, causa raíz debido a problemas térmicos, causa raíz debido a problemas mecánicos y causa raíz debido a fallos en cojinetes.

En la Figura 1.4 (a), se presenta una subdivisión detallada de los daños de aislamiento, que son los más numerosos, con un total de 43 incidentes. Esta subdivisión se realiza en función del tipo de daños ocurrido dentro del generador. Los daños de aislamiento pueden ocurrir en diversas partes del generador, como los devanados del estator o el rotor, y cada tipo de daño tiene implicaciones diferentes para el mantenimiento y la reparación del equipo. La identificación precisa del lugar de los daños de aislamiento es crucial para implementar las medidas correctivas adecuadas y prevenir futuros incidentes.

La causa raíz principal para este tipo de daños es el envejecimiento del aislamiento, siendo lógicamente los más estresados, los aislamientos estáticos al tener que soportar altas tensiones.

De manera similar, en las Figuras 1.5 y 1.6, se realiza una subclasificación de los daños térmicos y mecánicos. Los daños térmicos se refieren a los problemas causados por el sobrecalentamiento de componentes del generador, lo cual puede ser resultado de una variedad de factores como la sobrecarga, la falta de refrigeración adecuada o fallos en los sistemas de control de temperatura. La subclasificación de los daños térmicos permite entender mejor las causas específicas y las áreas afectadas, facilitando así la implementación de soluciones específicas para evitar el sobrecalentamiento en el futuro.

La principal causa raíz de este tipo de daños es el fallo en los sistemas de refrigeración.

Por otro lado, los daños mecánicos incluyen una amplia gama de problemas físicos que pueden afectar al generador, desde desgastes y roturas en componentes móviles hasta fallos estructurales. La subclasificación de estos daños en la Figura 1.6 ayuda a identificar los tipos específicos de problemas mecánicos que se presentan con mayor frecuencia y permite desarrollar estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo más efectivas.

La principal causa raíz de los daños mecánicos son los problemas de fatiga que se concentran principalmente en los polos rotóricos.

En cuanto a los daños en cojinetes, no se realiza ninguna subclasificación debido a que el número de incidentes reportados en esta categoría es muy pequeño. Los cojinetes son componentes cruciales que permiten el movimiento suave y eficiente de las partes móviles del generador, y aunque los incidentes de fallos en cojinetes son menos frecuentes, su impacto puede ser significativo. A pesar de la falta de subclasificación, es importante monitorear estos componentes regularmente para asegurar su correcto funcionamiento y prevenir fallos mayores.

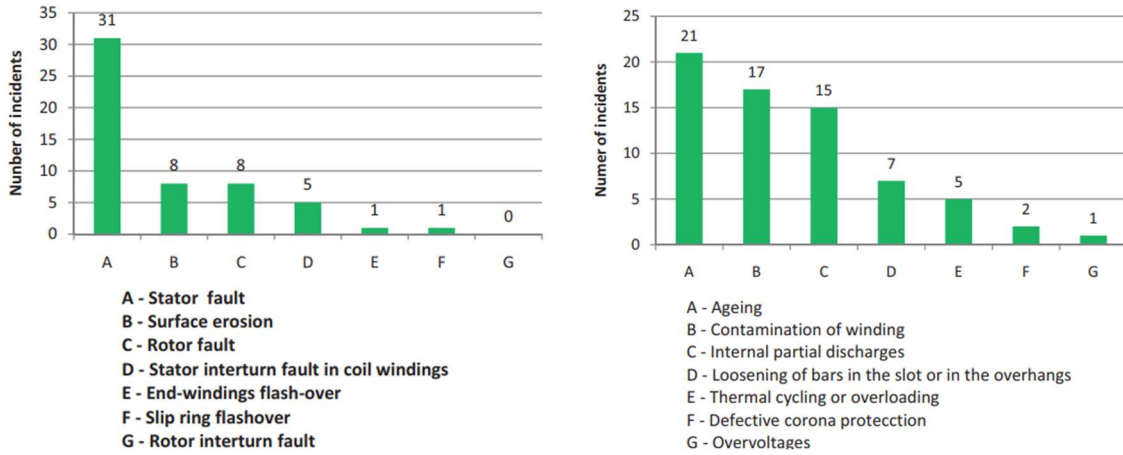


Figura 1.4 Daños de aislamiento analizados (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].

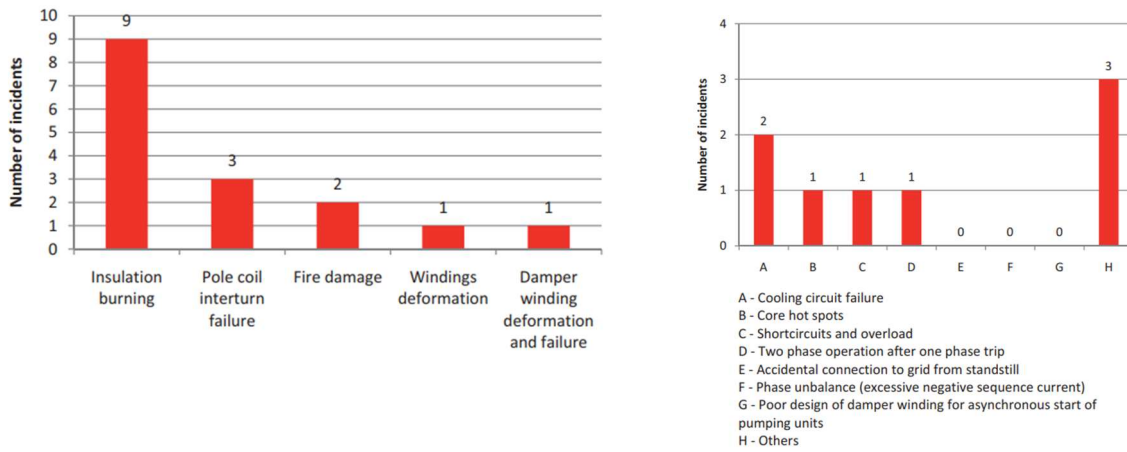


Figura 1.5 Daños térmicos (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].

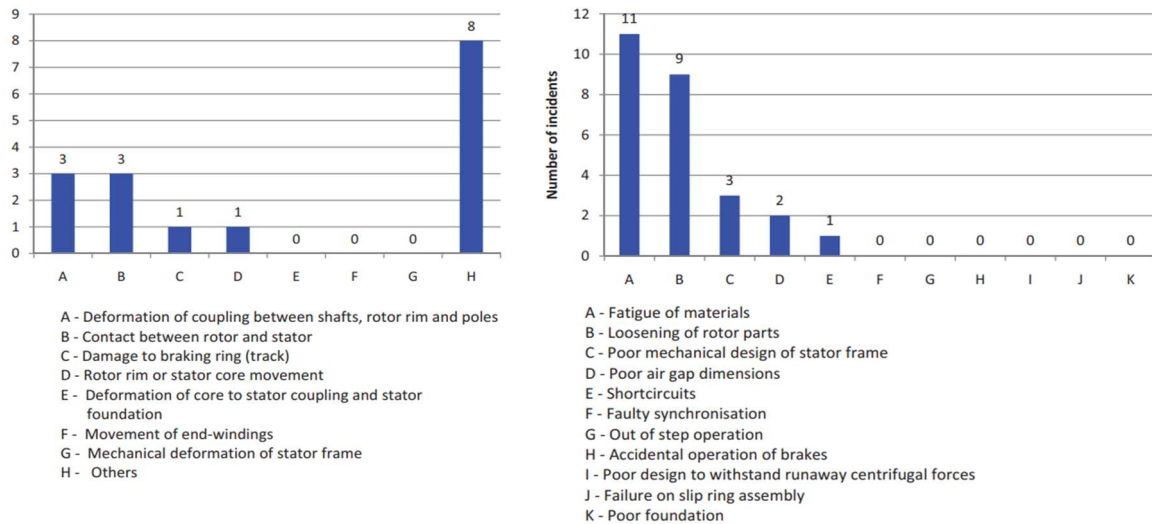


Figura 1.6. Daños mecánicos (a) y causa raíz (b) de fallo en generadores hidráulicos según WG A1.10 de CIGRE [15].

El problema de los defectos en rotores de máquinas síncronas [18], como se puede ver en las gráficas anteriores, puede tener diversas causas y manifestaciones [19]. La presencia de defectos en los rotores es una cuestión compleja que afecta la operación y la eficiencia de estas máquinas, y es crucial entender las múltiples facetas de estos problemas para abordarlos adecuadamente.

A continuación, se describen algunos posibles problemas asociados con defectos en rotores de máquinas síncronas, explicando en detalle cada uno de ellos:

1. **Desequilibrio del rotor [20]:** El desequilibrio del rotor puede ocurrir debido a irregularidades en la distribución de masa del rotor. Esta falta de equilibrio puede causar vibraciones excesivas durante la operación de la máquina, lo que a su vez puede llevar a también a fallos en los cojinetes y otros componentes críticos de la máquina. El desequilibrio puede ser provocado por la acumulación de suciedad, errores durante el proceso de fabricación, o fallos en la puesta en marcha.
2. **Fallos en los devanados del rotor [21]:** Los devanados del rotor son susceptibles a una variedad de problemas eléctricos, como defectos en las conexiones [22], cortocircuitos entre espiras [23], y defectos a tierra [24]. Estos problemas suelen ser consecuencia del deterioro del aislamiento que protege los devanados [25]. Los fallos en los devanados pueden afectar

significativamente el rendimiento de la máquina síncrona y, en casos extremos, pueden provocar el disparo del sistema, resultando en una interrupción del servicio eléctrico.

3. **Problemas en las masas polares** [26]: Los rotores de las máquinas síncronas están equipados con polos que generan el campo magnético necesario para su operación [27]. Cualquier defecto en estos polos [28], como grietas, deformaciones, o desplazamientos, puede causar graves problemas operativos. Estos defectos pueden ser resultado de esfuerzos mecánicos excesivos, fatiga del material o problemas durante la fabricación. La presencia de tales defectos puede provocar la salida de servicio de la máquina, ya que comprometen la integridad del campo magnético generado.
4. **Desalineación**: La desalineación entre el rotor y el estator puede provocar rozamiento y desgaste prematuro de los componentes. Esto puede ser causado por una instalación incorrecta, problemas en los sistemas de soporte como cojinetes, o eventos operativos anormales que desajustan las partes. La desalineación no solo genera desgaste mecánico, sino que también puede causar vibraciones que afectan la estabilidad y eficiencia de la máquina.
5. **Problemas de lubricación**: La falta de lubricación adecuada en los cojinetes del rotor [29] puede resultar en un aumento de la fricción y el desgaste. Esto no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también reduce la vida útil de la máquina. Una lubricación insuficiente puede deberse a un mantenimiento inadecuado, selección incorrecta de lubricantes, o fallos en el sistema de lubricación.
6. **Problemas de altas temperatura**: El sobrecalentamiento del rotor [30] puede ser causado por problemas en el sistema de refrigeración o por una carga excesiva. Este sobrecalentamiento puede provocar la degradación del aislamiento y otros componentes críticos, comprometiendo la integridad del rotor [31]. Las altas temperaturas pueden afectar adversamente los materiales aislantes y los componentes mecánicos, acelerando su desgaste y reduciendo la vida útil de la máquina.

7. **Corrosión:** La corrosión de los componentes del rotor es un problema especialmente preocupante en ambientes corrosivos. La corrosión puede debilitar la estructura del rotor, afectando su funcionalidad y aumentando la probabilidad de fallos. Este problema puede ser mitigado mediante el uso de materiales resistentes a la corrosión y mediante la implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas para controlar el ambiente operativo.

Los defectos anteriormente citados en el rotor de las máquinas síncronas [32] pueden tener varias consecuencias y problemas operativos [33]. A continuación, se describen algunos de los problemas comunes asociados con defectos eléctricos en el rotor de máquinas síncronas:

1. **Desequilibrio de Corriente:** Defectos eléctricos, como cortocircuitos entre espiras en los devanados del rotor [34], pueden dar lugar a un desequilibrio de corrientes [35]. Este desequilibrio puede afectar negativamente el rendimiento de la máquina y generar vibraciones no deseadas, que a su vez pueden causar daños adicionales a los componentes de la máquina.
2. **Calentamiento excesivo:** Los defectos eléctricos pueden causar una mayor resistencia en los circuitos del rotor [36], lo que puede conducir a un calentamiento excesivo. El sobrecalentamiento puede afectar negativamente la vida útil de los materiales aislantes y provocar daños en el rotor.
3. **Deterioro del aislamiento:** Un deterioro en el aislamiento eléctrico puede producir cortocircuitos a tierra y entre espiras en el rotor [37]. Esto puede provocar vibraciones en la máquina y, en última instancia, hacer necesaria la parada del grupo para realizar reparaciones, causando interrupciones en el servicio.
4. **Desgaste prematuro:** Los defectos eléctricos [38] pueden contribuir al desgaste prematuro de los componentes del rotor, especialmente si generan condiciones adversas como chispas eléctricas o corrientes elevadas. Esto reduce la eficiencia y fiabilidad de la máquina, aumentando los costos de mantenimiento.

5. **Inestabilidad del sistema:** Defectos eléctricos en el rotor [39], pueden afectar la estabilidad del sistema eléctrico en el que opera la máquina síncrona. Esto se puede manifestar en fluctuaciones de tensión o incluso en la pérdida de sincronismo, lo que compromete la estabilidad y seguridad del suministro eléctrico.

6. **Fallos imprevistos:** Los defectos eléctricos pueden provocar fallos inesperados [40] en la máquina síncrona, lo que resulta en tiempos de inactividad no planificados y costosos. Estos fallos inesperados pueden ser particularmente problemáticos en aplicaciones críticas donde la disponibilidad continua de energía es esencial.

En conclusión, los defectos en rotores de máquinas síncronas presentan una variedad de desafíos que afectan tanto la operación como la fiabilidad de estos equipos. Una comprensión profunda de las causas y manifestaciones de estos defectos es esencial para desarrollar estrategias efectivas de mantenimiento y reparación, garantizando así el funcionamiento eficiente y continuo de las máquinas síncronas.

1.2. Estado del arte en protecciones tierra rotor.

El Reglamento sobre instalaciones eléctricas de alta tensión (RAT), específicamente en su ITC RAT 9, establece claramente que para generadores de potencia superior a 5 MVA es obligatorio disponer de una protección contra falta a tierra en el rotor. Esta protección es crucial ya que puede, en caso de ser necesario, provocar la desconexión automática de la máquina de la red eléctrica para evitar daños mayores [41]. La implementación de estas protecciones es imprescindible para garantizar la seguridad y la operatividad eficiente de las instalaciones eléctricas de alta tensión.

Un defecto a tierra en el rotor de un generador síncrono, inicialmente, no causa perturbaciones [42] significativas debido a que el rotor está aislado de tierra [43]. Esta configuración en el circuito rotórico aislado de tierra es una medida de seguridad diseñada para prevenir problemas inmediatos. Sin embargo, debido a la importancia de mantener la integridad del sistema, es habitual instalar protecciones que detecten defectos a tierra en los rotores y actúen como alarmas [44]. Estas alarmas permiten al personal de operación estar al tanto de cualquier

problema potencial y tomar medidas preventivas antes de que ocurran fallos más graves.

Si durante la operación de la máquina ocurriera un segundo contacto a tierra, la situación se complicaría significativamente. La presencia de un segundo contacto a tierra anularía una parte del devanado inductor, lo que llevaría a una distribución no uniforme del campo magnético generado por los polos del rotor. Esta distribución desigual provoca que el campo sea más débil en los polos afectados por la doble falta a tierra [45]. La fuerza resultante de este campo magnético no uniforme gira en sincronía con el rotor. La fuerza resultante de este campo magnético no uniforme gira en sincronía con el rotor, produciendo vibraciones indeseadas. Estas vibraciones pueden causar daños severos a las bancadas de los cojinetes e incluso provocar desplazamientos en el propio eje del rotor, comprometiendo la estabilidad y la integridad estructural del generador.

A continuación, se analizan en detalle las protecciones de tierra para el rotor en dos tipos específicos de máquinas: aquellas con rotor accesible mediante anillos rozantes (que incluyen tanto la excitación estática como la indirecta con excitatriz de corriente continua) y las protecciones diseñadas para máquinas tipo brushless, que no permiten acceso al circuito rotórico [46] [47]. En el caso de las máquinas con rotor accesible, las protecciones de tierra se conectan directamente a los anillos rozantes a través de escobillas, siendo el punto débil de esta configuración, el mantenimiento de estos anillos rozantes y el cambio de escobillas.

El desgaste de escobillas lleva asociado la suciedad en el sistema de excitación y el riesgo de fallos si no se realizan los mantenimientos adecuados. Estas protecciones incluyen sistemas de detección que pueden identificar defectos a tierra y activar alarmas o procedimientos de desconexión automática para evitar daños.

Por otro lado, las máquinas tipo brushless, cuya virtud es la ausencia de escobillas y anillos rozantes, presenta el inconveniente de no disponer de acceso al circuito rotórico. Las actuales protecciones eléctricas necesitan apoyarse en escobillas y anillos rozantes auxiliares para poder proteger estas máquinas de defectos a tierra. La solución tecnológica sería poder detectar faltas a tierra en devanados rotórico sin la necesidad del uso de escobillas y anillos rozantes.

En resumen, el reglamento establece la necesidad de proteger los generadores eléctricos de alta potencia contra defectos a tierra en el rotor, destacando la

importancia de estas medidas para evitar fallos catastróficos. Los defectos a tierra pueden inicialmente pasar desapercibidos debido a que el rotor del generador está aislado de tierra, pero un segundo contacto a tierra puede provocar graves problemas operativos, como vibraciones que dañan los componentes mecánicos. Las protecciones de tierra deben ser adaptadas al tipo de máquina, ya sea con rotor accesible o del tipo brushless, para asegurar una operatividad segura.

1.3. Protección tierra rotor. Máquinas con rotor accesible.

En las máquinas síncronas [48] que operan con un sistema de excitación estática, la configuración del sistema de excitación es robusta ya que no requieren de máquinas auxiliares en rotación. Este sistema incluye varios componentes esenciales como un transformador de excitación, un rectificador controlado por tiristores (SCR), anillos rozantes y escobillas. Todos estos elementos trabajan coordinados por un regulador de tensión para garantizar que el rotor sea alimentado de manera efectiva con corriente continua, lo que es fundamental para el correcto funcionamiento de la máquina.

El transformador de excitación es responsable de proporcionar la tensión adecuada que posteriormente será rectificada, mientras que el rectificador controlado por tiristores ajusta la corriente que se suministra al rotor.

El regulador de tensión desempeña un papel crucial en este sistema. Su función principal es controlar el puente de tiristores, actuando sobre el ángulo de encendido de los tiristores, lo que se traduce en el ajuste de la corriente rotórica [49] según las necesidades operativas de la máquina. Este ajuste es vital para mantener la estabilidad y eficiencia del generador síncrono, ya que permite la adaptación a diferentes condiciones de carga y demanda eléctrica.

Para inyectar la corriente continua en el rotor, que está en constante movimiento a la velocidad de sincronismo, se requieren al menos dos anillos rozantes con sus respectivas escobillas. Estos componentes permiten la transferencia de corriente desde el sistema estacionario hacia el rotor en movimiento. Los anillos rozantes están diseñados para girar junto con el rotor, mientras que las escobillas, que son estacionarias, hacen contacto con los anillos para permitir el paso de la corriente.

La figura 1.7 ilustra claramente esta disposición, mostrando cómo los anillos rozantes y las escobillas trabajan en conjunto para asegurar la transferencia continua de corriente al rotor. Este mecanismo es esencial para el funcionamiento

de las máquinas síncronas con excitación estática, ya que, sin esta transferencia efectiva de corriente, el rotor no podría mantener el campo magnético necesario para la operación del generador. Los anillos rozantes y las escobillas, aunque simples en su diseño, son componentes críticos que deben ser mantenidos adecuadamente para garantizar la longevidad y el rendimiento eficiente de la máquina síncrona.

Además, es importante señalar que el uso de tiristores en el rectificador permite un control preciso de la corriente de excitación, lo que contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico en general. Los tiristores pueden ajustar la corriente de manera rápida y eficiente, respondiendo a las variaciones en la demanda eléctrica y asegurando que el generador opere dentro de sus parámetros de diseño.

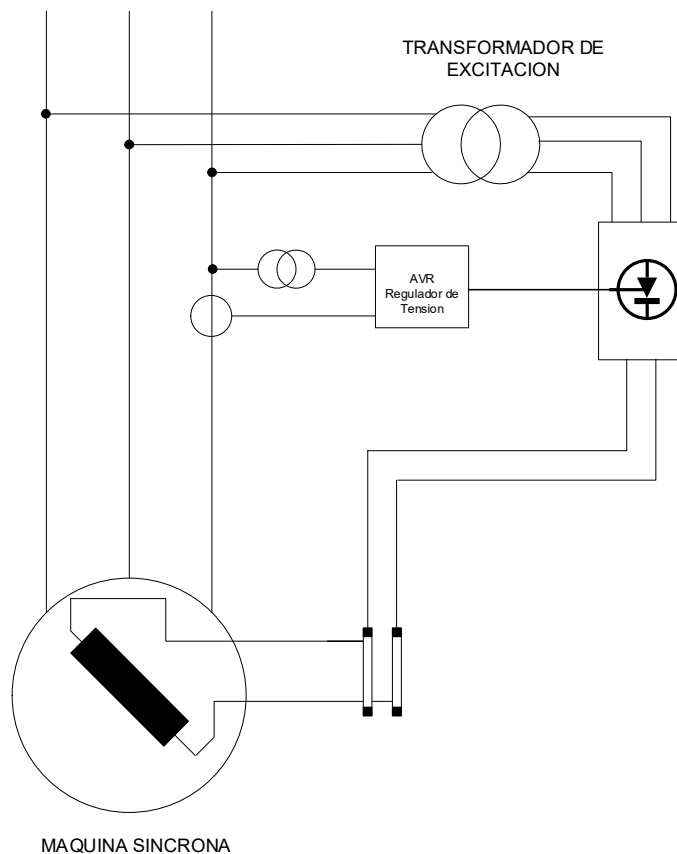


Figura 1.7. Máquina síncrona excitación estática.

En el caso de las máquinas síncronas que operan con un sistema de excitación indirecta mediante una excitatriz de corriente continua, la generación de corriente

continua se produce en la excitatriz que está girando de forma solidaria con el generador principal. Entre las diferentes configuraciones de las máquinas de corriente continua la más utilizada es aquella que dispone de dos devanados de excitación. Esta máquina de corriente continua tiene una configuración de excitación compuesta, que incluye tanto una excitación en serie como una en paralelo. La corriente suministrada al rotor se puede ajustar moviendo la posición del reóstato colocado en serie con la excitación paralelo, lo que permite modificar la corriente aportada según las necesidades operativas de la máquina.

Hoy en día, este tipo de configuración sigue siendo utilizadas dentro del parque de generadores de producción de energía eléctrica implementado mejoras tecnológicas consistentes principalmente en la sustitución de los reóstatos por reguladores de tensión. En estas configuraciones modernas, el devanado inductor de la máquina de corriente continua es alimentado directamente por el regulador de tensión [50]. Este regulador de tensión controla de manera precisa la corriente de excitación, asegurando que se mantenga en los niveles óptimos para el funcionamiento eficiente y estable de la máquina síncrona. Tal como se ilustra en la Figura 1.8 (b), el sistema muestra cómo la corriente es gestionada y suministrada al rotor a través de la máquina de corriente continua y el regulador de tensión.

Este método de excitación indirecta permite un control más flexible y ajustable de la corriente rotórica, lo que es especialmente útil en situaciones donde se requieren ajustes frecuentes o precisos de la excitación para mantener el rendimiento óptimo del generador. La capacidad de ajustar la corriente de excitación mediante el reóstato o en su defecto el regulador de tensión permite a los operadores adaptar la máquina a diferentes condiciones de carga y demandas del sistema eléctrico, garantizando así una operación fiable y eficiente.

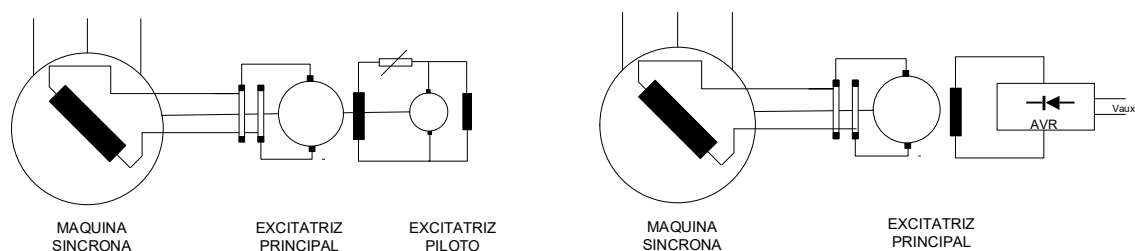


Figura 1.8. Máquina síncrona excitación indirecta. Excitatriz de corriente continua.

1.3.1. Protecciones Eléctricas.

El esquema más simple para la detección de una falta a tierra es el indicado en la Figura 1.9. Se conectan 2 lámparas en paralelo con el devanado de excitación con el punto entre las dos lámparas puesto a tierra [51]. Sin defectos a tierra las dos lámparas lucirán por igual. Si se produce una falta a tierra en las proximidades de un terminal, la lámpara próxima al terminal bajará su luminosidad y la otra lámpara la aumentará. En este caso, la detección se realiza en función de la luminosidad de las lámparas y sería necesario si queremos una vigilancia continua disponer de personal comprobando la luminosidad de estas lámparas.

El principal inconveniente es que en el caso de un defecto en el punto medio del bobinado ambas lámparas lucirán por igual.

Un esquema similar sustituyendo las lámparas por resistencias e instalando un relé de intensidad entre el punto medio y tierra, se muestra en la Figura 1.9. Estos sistemas se basan en el equilibrio de un puente formado entre el rotor y la protección tierra rotor.

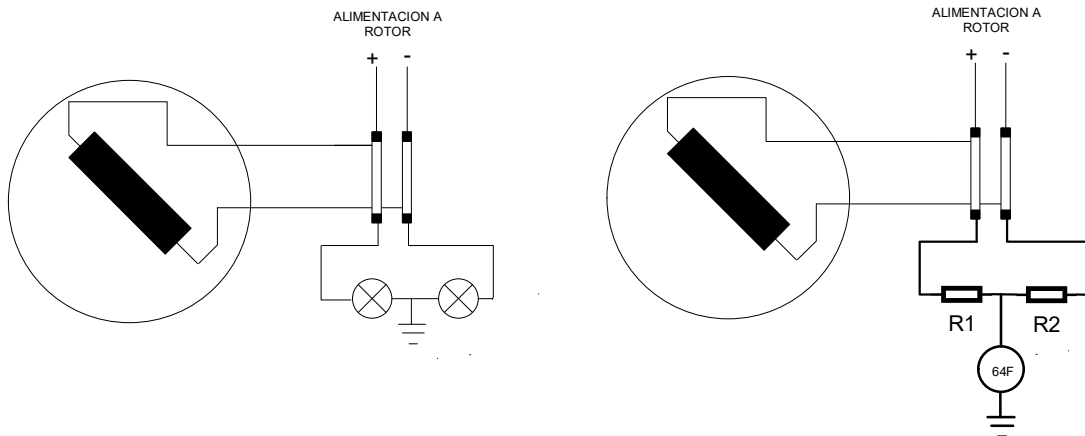


Figura 1.9. Deteccion de falta a tierra. Tipo puente.

Como se puede apreciar, es un método simple para la detección de faltas a tierra. Este método no requiere de fuentes de tensión auxiliar, pero tiene el inconveniente de que no se pueden detectar faltas en el centro del bobinado, ya que no se produce ningún cambio con respecto a la situación inicial sin falta.

Para la detección completa en todo el bobinado, incluyendo el punto medio, se requiere de una fuente de tensión externa [52]. En la Figura 1.10, un relé de

corriente, conectado en serie con la fuente de alimentación, detecta la corriente circulante a tierra. Esta corriente es la suma de la capacitancia del bobinado a tierra y la resistencia a tierra de las bobinas. El valor de ajuste debe de estar por encima de estas corrientes capacitivas [53].

El condensador C1 limita la corriente en el caso de una falta a tierra en el bobinado, protegiendo la integridad de la protección y la fuente de alimentación.

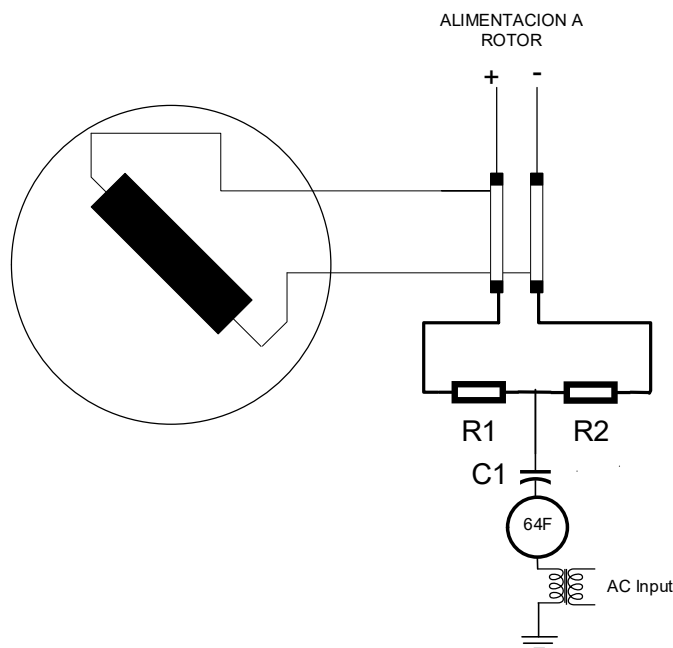


Figura 1.10 Detección falta a tierra mediante inyección de corriente alterna.

Actualmente en el mercado se puede diferenciar tres tecnologías en función del tipo de alimentación utilizado para detectar la falta [54].

1.3.2. Detección mediante relés de inyección de corriente continua.

El relé suministra una tensión continua entre el terminal negativo del rotor y tierra. Este equipo lleva instalada una resistencia, designada como R, para limitar la corriente que circula a través de la protección una vez se produce el defecto.

Cuando se produce una falta en el sistema de excitación, se origina una circulación de corriente que es detectada por el relé. Este dispositivo dispone de un contacto para la vigilancia continua de la protección y otro contacto para la alarma, activándose una vez que detecta una corriente superior a la ajustada previamente.

En detalle, el relé se encarga de monitorear la presencia de fallas a tierra en el sistema de excitación. Cuando se detecta una falta a tierra, la corriente comienza a circular desde el terminal negativo del rotor hacia tierra, pasando por la resistencia R. Esta corriente es limitada por la resistencia para evitar daños en la protección asegurando la circulación de una corriente pequeña a través de la protección.

El relé está diseñado para reaccionar cuando esta corriente supera un umbral predeterminado. En este momento, el contacto de alarma del relé se activa, enviando una señal de advertencia que puede ser utilizada para alertar a los operadores del sistema sobre la existencia de un problema. Además, el contacto de vigilancia permite un monitoreo constante, garantizando que cualquier fluctuación o incremento en la corriente sea detectado y gestionado adecuadamente.

Un ejemplo típico de este tipo de relés es el representado en la Figura 1.11, que ilustra la configuración del sistema de protección, incluyendo la resistencia y los contactos de vigilancia y alarma. Este ejemplo muestra cómo el relé se integra en el circuito del rotor, proporcionando una protección efectiva contra faltas a tierra.

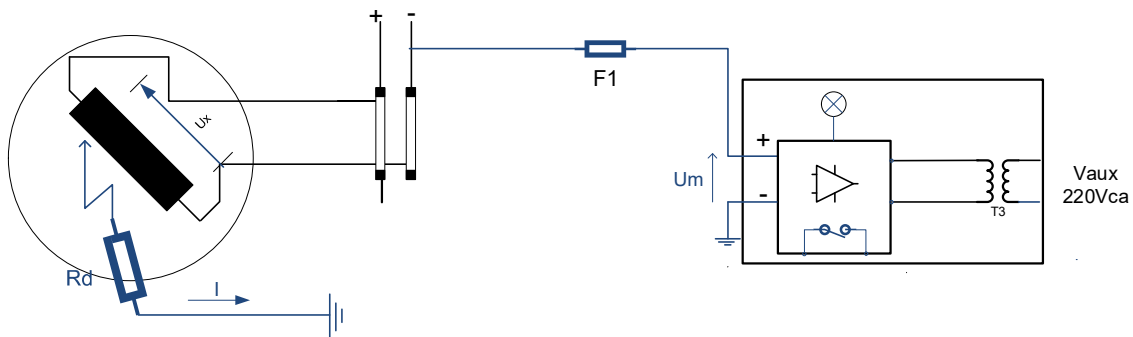


Figura 1.11. Deteccion mediante relés de inyeccion de corriente continua.

$$U_m + U_x = (R_d + R_b) * I \quad \text{siendo} \quad U_m = 48 \text{ V}_{cc} \text{ inyectado por la protección.}$$

La gran ventaja de los relés que inyectan corriente continua es que no se ven influenciados por las capacidades de los bobinados a tierra.

1.3.3. Relé inyección de corriente Alterna.

Esta familia de relés utilizados para la detección de faltas a tierra emplea un método de inyección de corriente alterna entre los terminales del rotor y la tierra [55]. Este enfoque permite una detección precisa y eficaz de las faltas a tierra que puedan ocurrir en un sistema de excitación de máquinas síncronas.

Un ejemplo típico de esta tecnología es el modelo desarrollado y utilizado por ABB en sus diferentes versiones a lo largo de los años [56].

El sistema de detección de faltas a tierra está constituido por dos módulos principales. El primer módulo es el módulo de detección, el cual es responsable de identificar la presencia de una falta a tierra. Este módulo monitoriza continuamente el sistema y reacciona ante cualquier irregularidad en la corriente que pueda indicar una falta a tierra. El segundo módulo es el módulo de inyección, que genera y suministra la corriente alterna necesaria para la detección de faltas.

El esquema simplificado de este sistema se muestra en la Figura 1.12. Este esquema ilustra cómo los dos módulos trabajan juntos para asegurar la protección del sistema. El módulo de inyección envía una corriente alterna entre los terminales del rotor y la tierra, mientras que el módulo de detección mide en continuo la corriente que está circulando a tierra.

Una consideración a tener en cuenta es que la maquina tiene una capacidad a tierra (CR) y por tanto una corriente capacitiva circulante. Además, para limitar la corriente que circula por la protección se dispone de condensadores de acoplamiento (CK1 y CK2).

La implementación de estos relés en sistemas de detección de faltas a tierra es crucial para la prevención de daños mayores y para mantener la integridad de la máquina. El uso de la inyección de corriente alterna permite una detección precisa y rápida. La evolución de estos modelos a lo largo de los años refleja la mejora continua en la tecnología de detección de faltas, adaptándose a las necesidades cambiantes de la industria y asegurando un alto nivel de protección para los sistemas eléctricos modernos.

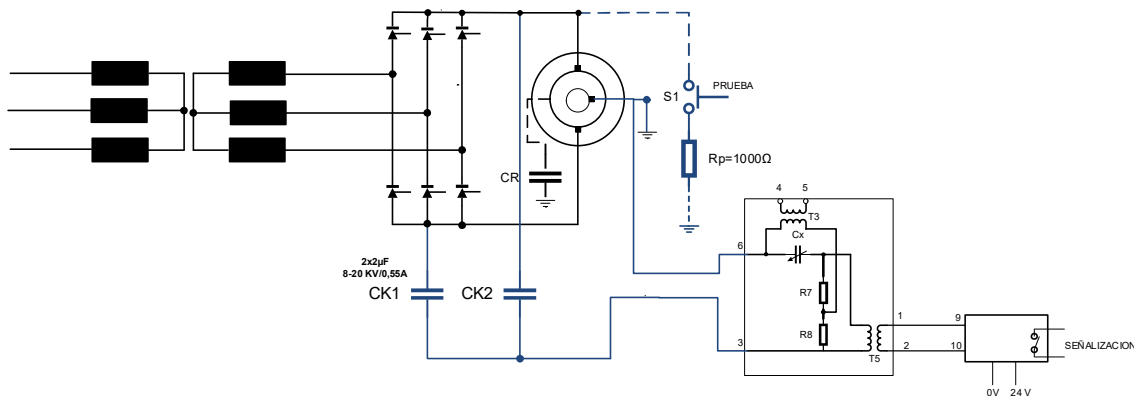


Figura 1.12. Detección faltas a tierra mediante inyección de corriente alterna.

La capacidad del devanado rotórico de la máquina C_R , el condensador de acoplamiento CK y las dos resistencias R_7 y R_8 forman un puente RC. El puente es alimentado a través de los terminales 4 y 5.

$$C_x = \frac{(CK_1 + CK_2) \cdot C_R}{CK_1 + CK_2 + C_R} \quad CK_1 = CK_2 = 2\mu F; R_7 = R_8 = 2,2k\Omega$$

Cuando ocurre una falta, la rama donde se encuentra C_R se ve modificada con la resistencia de la falta produciéndose un desequilibrio del puente.

El transformador T_5 transmite este desequilibrio al relé que activa un contacto para alarma.

El condensador variable C_x se ajusta para obtener en condiciones de funcionamiento normal (sin defectos) valores bajos de tensión en los terminales 1 y 2, aproximadamente 100mV.

1.3.4. Relé inyección pulsos de frecuencia ajustable.

Esta familia de relés inyecta pulsos de frecuencia variable para la detección de fallas. Un ejemplo de este tipo de relés es el fabricado por SIEMENS [57]. Este relé específico consta de varios componentes incluyendo una fuente de inyección cuya tensión de alimentación externa puede ser tanto de corriente continua, en un rango de 60-250V, como de corriente alterna, en un rango de 85-250 V.

El módulo principal genera pulsos de frecuencia ajustable mediante un switch interno, permitiendo seleccionar frecuencias entre 0,5 Hz y 4 Hz. Esta capacidad de ajustar la frecuencia es crucial para adaptarse a diferentes condiciones

operativas y requisitos de detección. La tensión del pulso generado es de 50 V, lo que asegura una señal clara y detectable a la frecuencia seleccionada.

Además del módulo generador de pulsos, el sistema requiere un módulo de acoplamiento con el rotor, que permite la correcta inyección de los pulsos en el sistema rotórico. Este módulo de acoplamiento es necesario para limitar la corriente que circula por la protección y evitar el daño de la protección en el momento de producirse una falta.

Otro componente necesario del equipo de protección es el módulo de medida y los contactos que nos van a permitir activar las alarmas en el sistema de control del grupo. Este módulo se encarga de medir los pulsos de frecuencia inyectados y de activar una alarma si se detectan irregularidades que indiquen una falta en el sistema de excitación. La capacidad de activar una alarma rápidamente permite una respuesta inmediata, minimizando el riesgo de daños mayores.

El esquema simplificado de este sistema de detección se muestra en la Figura 1.13. Este esquema ilustra cómo los diferentes módulos interactúan para proporcionar una detección eficaz y fiable.

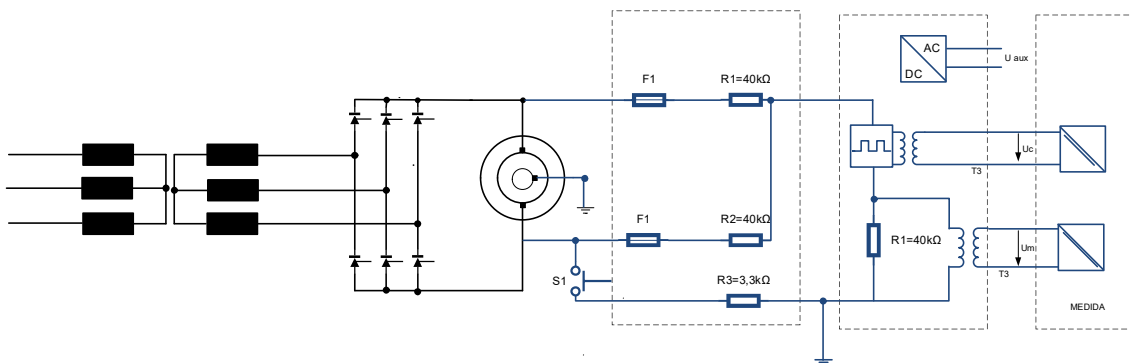


Figura 1.13. Detección de falta a tierra mediante inyección de pulsos.

1.4. Protección tierra rotor. Máquinas brushless.

En este tipo de máquinas, al no ser accesible el sistema de excitación, no es posible utilizar los métodos analizados en el capítulo 1.2.

Una alternativa pasa usar los métodos anteriormente indicados es utilizar un anillo con su escobilla para acceder al circuito de excitación. Este anillo sería un anillo para medida y la escobilla no estaría continuamente conectada, sino que se conectaría una o dos veces al día para controlar la corriente que circula a tierra.

Otra forma de detectar anomalías en el rotor es mediante medida de flujo [58] [59]: Air gap flux monitoring y stray flux monitoring [60] [61] [62].

Proveedores de equipos de monitorización de flujo como Iris Power disponen de equipos para medida de flujo en entrehierro [63]. Estos equipos son útiles para detectar desequilibrio del campo en el entrehierro debido principalmente a cortocircuitos entre espiras. En el caso de una falta a tierra, el equipo no puede detectarlo al no existir ningún desequilibrio. Si se produjera una doble falta a tierra, el equipo detectará un desequilibrio en el entrehierro, y actuaría.

1.5. Estado del arte en sistema de medida de corriente.

1.5.1. Efecto Hall.

El efecto Hall, fue descubierto por Edwin Herbert Hall en 1879 mientras trabajaba en su tesis doctoral en la Universidad Hopkins de Baltimore.

Cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor y se aplica un campo magnético perpendicular a la dirección de la corriente, las partículas cargadas en movimiento (como electrones o huecos) experimentan una fuerza de Lorentz. Esta fuerza desvía a las partículas cargadas hacia los lados del conductor, acumulándose cargas en uno de los bordes y creando una diferencia de potencial (voltaje) en dirección perpendicular tanto a la corriente como al campo magnético. Este voltaje se llama voltaje de Hall.

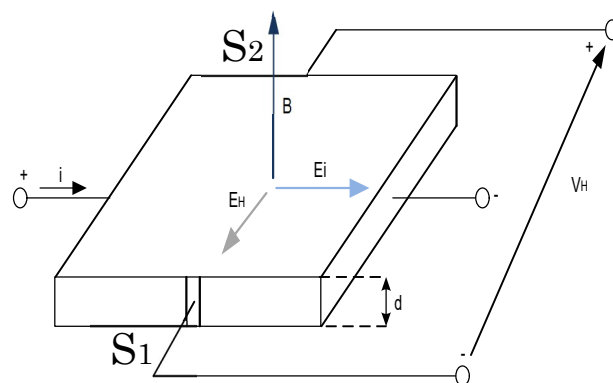


Figura 1.14. Efecto Hall

$V_H = \int_{S_1}^{S_2} E_H dy = \frac{\mu n}{\sigma d} i B_z = \frac{1}{nqd} i B_z$; siendo r_H el factor de Hall cuyo valor es aproximadamente 1 para la mayoría de los materiales estándar, y $R_H = \frac{r_H}{nq}$ es conocido como coeficiente de Hall.

$$V_H = R_H i \frac{B}{d}$$

$$V_H \propto B$$

$$\oint B dl = \mu I ; B = \frac{I}{\mu 2\pi r} ; \mu = 4\pi 10^{-7} \text{H/m}$$

La elección del tipo de material para el dispositivo Hall juega también un papel importante, ya que el voltaje de Hall (V_H) es directamente proporcional a la movilidad de los electrones e inversamente proporcional a la concentración del portador.

El efecto Hall se observa tanto en conductores como en semiconductores. En los semiconductores, el comportamiento puede variar dependiendo de si el material es de tipo n (donde los portadores de carga son electrones) o de tipo p (donde los portadores de carga son huecos). La dirección del voltaje de Hall será diferente en cada caso debido a la carga positiva o negativa de los portadores de carga.

Los materiales utilizados para el efecto Hall son semiconductores como InSb, InAs, GaAs con $r_H=1$.

El efecto Hall es esencialmente la desviación de partículas cargadas en movimiento en un campo magnético causada por la fuerza de Lorentz. Cuando las partículas cargadas (electrones o huecos) están confinadas en un material sólido, esta desviación conduce a la acumulación de cargas positivas y negativas en la dirección perpendicular a la corriente y al campo magnético, formando así un campo eléctrico transversal adicional (E_H).

Por otra parte, si se calcula el campo B para $r = 1 \text{ cm}$ e $I = 1 \text{ A}$ se tiene:

$$B = 2 \times 10^{-5} \text{ Tesla} = 0,2 \text{ Gauss.}$$

Este campo es muy pequeños, por este motivo, para incrementar B, es habitual colocar un núcleo de ferrita.

El núcleo de ferrita debe de ser abierto para poder medir el valor de B con el sensor Hall. Además, el entrehierro va a permitir modificar la reluctancia del circuito magnético. Un ejemplo de cómo influye la reluctancia es el indicado en la figura 1.15, donde se pueden ver los valores de I para diferentes valores de B en función del entrehierro.

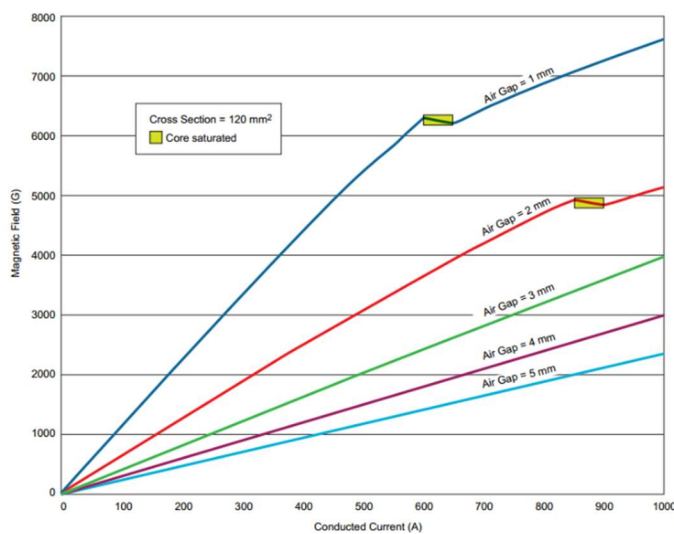


Figura 1.15. Reluctancia en función del entrehierro.

Un sensor Hall de corriente [64] [65], con salida proporcional a la corriente que circula por un conductor, puede realizarse mediante un núcleo de ferrita y un sensor Hall lineal (arseniuro de Galio o arseniuro de Indio) [66]. La corriente (I) que circula por el conductor crea un campo magnético (B). Este campo magnético es llevado por el núcleo de ferrita a un sensor Hall, que genera una tensión (U) proporcional al campo magnético (B).

La tensión de salida del elemento Hall requiere de un acondicionamiento de señal, que consiste en una etapa de amplificación, (la tensión Hall es de muy bajo nivel ($\approx 30\mu\text{V/G}$)), y una etapa de compensación de la temperatura [67].

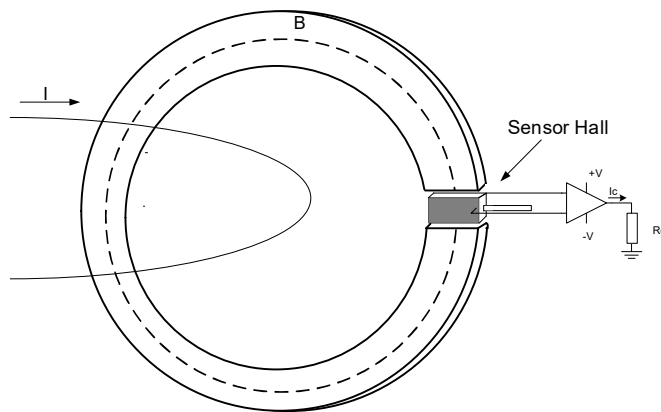


Figura 1.16. Medida de corriente mediante sensor Hall.

1.5.1.1. Aplicaciones del efecto Hall.

Utilizando el efecto Hall, es posible fabricar tanto sensores de conmutación como sensores lineales.

Los sensores Hall de tipo interruptor se emplean comúnmente para medir posición, desplazamiento y velocidad, mientras que los sensores Hall lineales se utilizan para medir campos magnéticos de corriente y voltaje.

En los últimos años, ha aumentado la necesidad de realizar mediciones eléctricas en magnitudes de frecuencia variable con características no sinusoidales. Dado el limitado rango de aplicación en frecuencia de los transformadores convencionales electromagnéticos, los sensores de voltaje y corriente Hall, cuya principal ventaja es que se pueden utilizar en un amplio rango de frecuencia, tienen un gran potencial en el mercado.

Por tanto, los sensores de efecto Hall se utilizan ampliamente en dispositivos de control de velocidad de conversión de frecuencia, dispositivos inversores, fuentes de alimentación ups, fuentes de alimentación de comunicaciones, máquinas de soldadura eléctricas, locomotoras eléctricas, subestaciones, máquinas herramienta CNC, revestimiento electrolítico, monitoreo por microcomputadoras, monitoreo de redes eléctricas y otras instalaciones que presentan la necesidad de aislar y detectar corriente y voltaje.

No obstante, para obtener mediciones precisas de parámetros eléctricos cuya frecuencia es variable en entornos electromagnéticos complejos, es crucial prestar atención a la sensibilidad del sensor Hall al campo magnético.

Debido a su capacidad para detectar y medir campos magnéticos con precisión, los sensores de efecto Hall además de para medida de corriente eléctrica, tienen una amplia variedad de aplicaciones en la industria y en productos de consumo:

Automoción: Estos sensores se utilizan para detectar la posición del cigüeñal, la velocidad de las ruedas y controlar sistemas de encendido electrónico.

Energías renovables: En aerogeneradores, monitorizan la velocidad y posición de las palas.

Electrónica de consumo: Los encontramos en teléfonos móviles para detectar cierres magnéticos en fundas o como brújulas digitales.

Electrodomésticos: En lavadoras y ventiladores, ayudan a determinar la posición y velocidad del motor.

Por último, se indica también las principales desventajas de los sensores de corriente Hall:

- a. En comparación con el transformador de corriente electromagnética, su corriente secundaria es pequeña y su capacidad de soportar interferencias electromagnéticas es relativamente débil.
- b. Al utilizar un campo magnético para medir, son susceptible a la influencia del campo magnético ambiental, lo que reduce la precisión de la medición.
- c. Generalmente, no se proporciona el error de ángulo, con lo que no son recomendables para medida de potencia.
- d. Alta deriva por temperatura que requiere de un circuito exterior de compensación. Esto eleva el coste en comparación con otros elementos para medida de corriente.

En las aplicaciones de los sensores Hall para regulación y control de procesos, debemos de prestar atención a la respuesta en frecuencia del sensor, sobre todo si se utiliza para mediciones de potencia.

1.5.2. Bobina Rogowski.

Este sensor utilizado para la medida de corriente alterna [68] lleva el nombre del físico alemán Walter Rogowski, quien desarrolló este diseño en la década de 1910.

La bobina Rogowski es esencialmente una espira toroidal abierta (una bobina enrollada en forma de anillo, pero sin núcleo de hierro) que se coloca alrededor del conductor cuya corriente se desea medir. La forma más común es una bobina flexible que puede envolverse fácilmente alrededor del conductor.

Las espiras deben de estar muy juntas y deben de cubrir todo el núcleo formando un anillo cerrado cuyo principio y fin están alineado y próximos.

La bobina Rogowski es un clásico ejemplo de una aplicación basado en la ley de Faraday. Se puede decir que la bobina Rogowski se basa en medir los cambios del campo magnético que se produce alrededor de un hilo portador de corriente para producir una señal de voltaje. Esta señal de voltaje es proporcional a la derivada de la corriente (di/dt). Por tanto, se requiere de un integrador para obtener la corriente que queremos medir.

Es similar a un transformador de intensidad, la bobina debe de rodear al conductor cuya corriente se quiere medir [69].

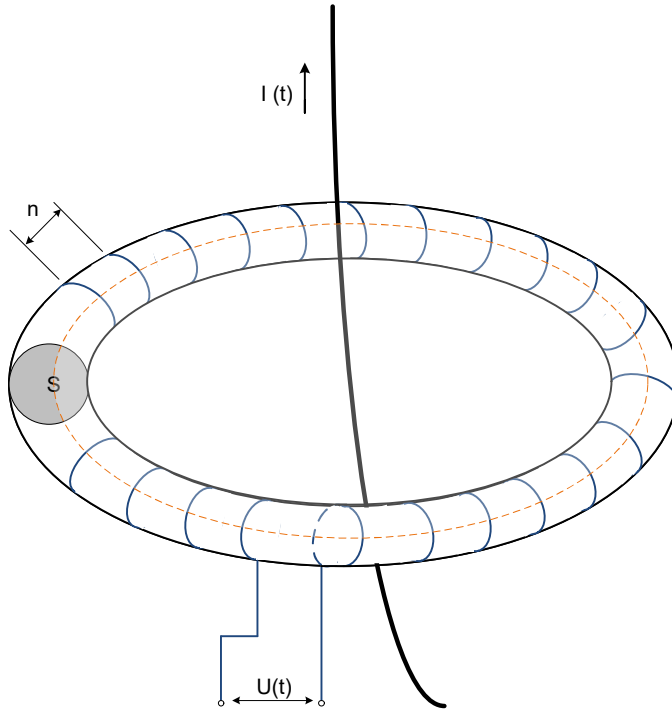


Figura 1.17. Principio de funcionamiento bobina Rogowski.

Si la bobina tiene una longitud l , una sección s , y un número de espiras N . Se obtiene [65]:

$$\Delta\phi = n \cdot \Delta l \cdot s \cdot \mu \cdot H \cdot \cos \alpha ; \text{ siendo } n = \frac{N}{l}$$

$$\phi = \mu \frac{N \cdot s}{l} \oint H \cdot \cos \alpha \cdot \Delta l$$

$$\phi = \mu \frac{N \cdot s}{l} \cdot I = M \cdot I ; \text{ siendo } M = \mu \frac{N \cdot s}{l}$$

$$I(t) = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{N \cdot s} \cdot \int u(t) \cdot dt$$

Luego, el valor de la intensidad se obtiene a la salida de un integrador cuya entrada es la tensión en la bobina.

Al disponer de un núcleo no magnético (amagnético), no existe el problema de la saturación [70] y se puede decir que la respuesta de la bobina es lineal [71].

El uso de este sensor hoy en día es para sistemas de medición de la calidad de la energía, medición de corrientes pulsadas, análisis de armónicos y en laboratorios

y para medida de corriente de excitación en ensayos de máquinas síncronas (sustituyendo a los shunt) [72].

En resumen, la bobina Rogowski es un dispositivo versátil y preciso para la medición de corrientes alternas y pulsantes, ofreciendo numerosas ventajas en comparación con otros métodos de medición de corriente. La principal ventaja es que, al no disponer de materiales ferromagnéticos, no se ve afectada por la saturación, y por tanto tiene un comportamiento lineal, siendo muy útil estas bobinas realizar medidas donde la amplitud de la variable a medir es desconocida.

El principal inconveniente es el error de medida debido a la posición del conductor dentro de la bobina. Si se analiza la información proporcionada por los fabricantes obtenemos errores inferiores a 0,2% si el conductor es colocado en el centro de la bobina hasta errores del 3% si el conductor es completamente desplazado del centro tocando prácticamente con la bobina.

1.5.3. Medida de corriente por fibra óptica.

Las ondas luminosas [73] que se propagan a través de un medio presentan un estado de polarización que viene dado por el vector campo eléctrico en función del tiempo y de la posición. En el caso más general, el vector de campo describe una elipse. La polarización circular describe el caso especial en el que la elipse se convierte en un círculo, mientras que en la polarización lineal la elipse se colapsa en una línea. El estado de cualquier polarización puede describirse siempre como la superposición de dos ondas luminosas ortogonales polarizadas lineal o circularmente.

Se dice que un medio que cambia el estado de polarización es birrefringente. Un material con birrefringencia circular cambia la polarización de la luz polarizada linealmente y mantiene la polarización de la luz polarizada circularmente. El material birrefringente lineal se comporta a la inversa.

Uno de los muchos descubrimientos de Faraday fue que la birrefringencia circular puede inducirse en un material aplicando un campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la luz. Si la birrefringencia circular intrínseca de un medio es pequeña, el plano de rotación de la polarización de la luz polarizada linealmente es proporcional a la integral del campo magnético aplicado a lo largo de la trayectoria:

$$\theta = V \int \vec{H} \cdot \vec{ds}$$

donde la constante V de proporcionalidad es la constante de Verdet, una propiedad del medio a través del cual viaja la luz que describe la fuerza del efecto Faraday.

Como ya se ha dicho, la luz polarizada lineal puede considerarse como compuesta de dos ondas de luz polarizada circulares ortogonales. En particular, una onda de luz polarizada lineal es la superposición de una onda de luz polarizada circularmente a la derecha (RHCP) a una onda de luz polarizada circularmente a la izquierda (LHCP).

En el efecto Faraday, la velocidad de las ondas luminosas RHCP disminuye si el campo magnético apunta a lo largo de su dirección de propagación, y aumenta cuando el campo magnético apunta en la dirección opuesta. Las ondas luminosas LHCP se comportan a la inversa. Esto significa que si la luz polarizada linealmente, que es la superposición de la luz RHCP y LHCP, se introduce en un material sometido al efecto Faraday habrá una diferencia de fase inducida entre los dos haces polarizados circularmente diferentes, y como resultado el plano de polarización de la luz polarizada linealmente.

Los investigadores llevan más de tres décadas estudiando los transformadores ópticos de corriente que aprovechan el efecto Faraday. Estos proporcionan una alternativa atractiva en aplicaciones en las que es esencial un aislamiento eléctrico excelente, por ejemplo, en sistemas de distribución de energía.

En estas aplicaciones, la construcción de transformadores de corriente tradicionales resulta cada vez más difícil y costosa debido a los requisitos impuestos al material aislante, que debe soportar tensiones muy elevadas, y a la necesidad de evitar la saturación del material del núcleo. Como ventaja adicional, los sensores ópticos de corriente también permiten medir de corrientes continuas superiores a 100 kA.

Una forma sencilla de utilizar el efecto Faraday para medir corriente es la indicada en la Figura 1.18.

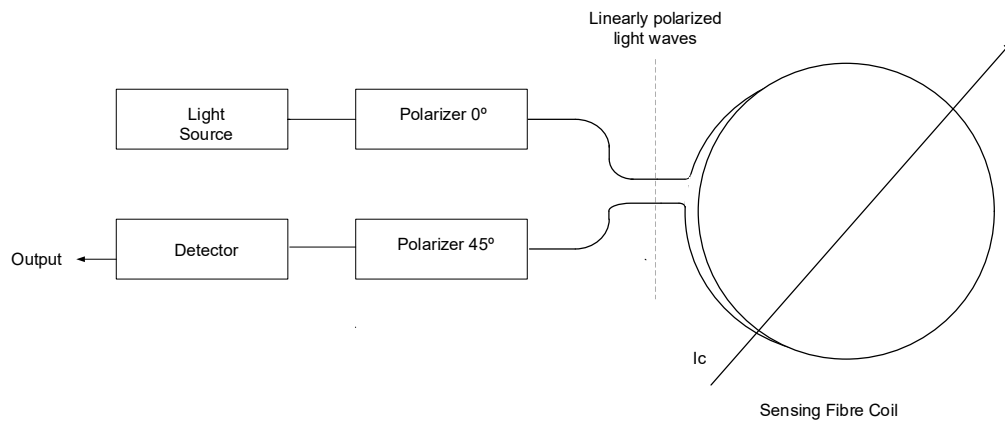


Figura 1.18. Esquema sistema de detección utilizado para la medida de corriente

La luz polarizada lineal se introduce en una bobina de fibra óptica con espiras que encierra la corriente a medir. La rotación de la luz polarizada lineal puede calcularse utilizando la ley de Ampere:

$$\theta = V \cdot N \cdot ic$$

Un efecto deseable de utilizar una bobina de fibra óptica es que sólo se detectan los campos magnéticos debidos a las corrientes dentro de la bobina, ya que los campos magnéticos parásitos externos en general se anulan. Además, la posición del conductor de corriente dentro de la bobina de fibra óptica no tiene una influencia apreciable en la precisión de la medición.

El circuito de análisis indicado en el Figura 1.18 consta de un polarizador a 45 respecto a la dirección de polarización original, de modo que la intensidad de la luz de salida viene dada por

$$Id = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\theta)$$

donde I_0 es la intensidad de la luz de entrada. Para pequeñas rotaciones θ , la función seno puede linealizarse. Un problema importante con la configuración mostrada es la dependencia de la señal de salida de la intensidad de la luz de entrada. Este problema puede solucionarse utilizando un divisor de haz polarizado (prisma de Wollaston) ajustado a 45° para dividir el haz por igual. En esta

configuración, se calcula la relación entre la diferencia y la suma de la entrada y salida:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\theta \approx 2 \cdot V \cdot Ni_c$$

Así, la señal de salida es independiente de I_0 .

Como ya se ha mencionado, la linealidad de este principio está limitada a una rotación pequeña debido al comportamiento no lineal de la función seno cuando el argumento es grandes. La precisión se deteriora aún más por la birrefringencia inducida al doblar el cable de fibra óptica. Por esta razón, los primeros transformadores de corriente ópticos basados en este principio utilizaban vidrio a granel en lugar de cable de fibra óptica para evitar el esfuerzo de flexión, que era inflexible, caro y limitado a una sola vuelta.

Hoy en día se disponen de fibras de vidrio hiladas y de sílex altamente birrefringentes que son relativamente insensibles a la tensión y hacen obsoleto el uso de vidrio macizo.

A diferencia de la birrefringencia inducida en la fibra por la tensión de flexión, el efecto Faraday es no recíproco, lo que significa que el desplazamiento de fase inducido depende de la dirección de propagación de la luz a través del sistema. Este hecho puede ser capitalizado enviando la luz a lo largo de ambas direcciones dentro de la bobina de fibra óptica y detectando la rotación diferencial en la polarización.

Un ejemplo de este tipo de sensor es el diseñado por ABB [74]. Este sistema medida se compone de un módulo optoelectrónico y una fibra óptica sensora de terminación sencilla que rodea el conductor de corriente.

El módulo optoelectrónico comprende una fuente luminosa semiconductor, un circuito de detección y un procesador de señal digital. Dos ondas luminosas, con polarización lineal ortogonal, viajan desde la fuente de luz, por una fibra de interconexión, hasta la fibra sensora. Un retardador de fase de fibra óptica convierte las ondas lineales en ondas luminosas polarizadas circularmente, a izquierda y derecha, en la entrada de la fibra sensora. En el campo magnético existente, estas ondas luminosas se desplazan a distintas velocidades por la fibra sensora, lo que a su vez crea una diferencia de recorrido óptico o, equivalentemente, una diferencia de fase óptica, $\Delta\phi$.

Las ondas se reflejan en el extremo de la fibra y luego retroceden en su recorrido óptico de vuelta hacia el módulo optoelectrónico. Las dos ondas luminosas de retorno se hacen interferir luego en el circuito de detección.

El procesador de señales convierte su diferencia de fase óptica en una señal digital.

La diferencia de fase total del recorrido de ida y vuelta es proporcional a la integral lineal del campo magnético a lo largo del camino cerrado descrito por la fibra sensora y es, por consiguiente, una medida directa de la intensidad.

La señal es independiente de la distribución particular del campo magnético, siempre que el número de bucles de la fibra sensora sea un valor entero.

Tampoco existe sensibilidad cruzada con corrientes externas a la bobina de fibra. Ni el diámetro ni la forma de los bucles de fibra tienen influencia alguna.

La diferencia de duración entre la ida y la vuelta de las dos ondas luminosas circulares varía entre 10^{-21} y 10^{-15} segundos, dependiendo de la intensidad.

La medición directa no es factible y, por consiguiente, se mide con gran precisión la diferencia de recorrido o de fase, que corresponde a una fracción de la longitud de onda óptica (820 nm). Para ello se hacen interferir las ondas, es decir, se superponen entre sí.

Dependiendo de su retardo relativo, las ondas se interfieren constructiva o destructivamente. La mínima diferencia medible de recorrido es 100 veces menor que el diámetro de un átomo de hidrógeno y corresponde a una intensidad de 0,25 A (para un bucle de fibra y un tiempo de medición de un segundo).

Actualmente, la máxima intensidad medible, correspondiente a una diferencia de recorrido de una longitud de onda completa, es ± 600 kA (± 500 kA + 20% de sobreintensidad).

Las principales ventajas de estos transductores de medida comparándolo con la sonda Hall y los transductores convencionales son:

- La instalación del sensor es muy simple y rápido.
- No se requiere de un centrado del anillo sobre el conductor a medir (en la bobina Rogowski el descentrado aumenta el error).
- A diferencia de los transductores de intensidad convencional, los errores debido a distribución de campos asimétricos y sobrecargas magnéticas se eliminan intrínsecamente.

- El sensor puede manejar campos magnéticos bidireccionales.
- La cabeza sensora es dieléctrica y por tanto muy segura.
- El consumo de potencia es pequeño.

El principal uso de este tipo de sensores es para medida de corriente en alta tensión tanto para protección como para control y medida.

Otro uso es la medida de grandes corrientes en sistemas de corriente continua como catenarias de ferrocarril y subestaciones.

A continuación, en la Tabla 1-1 se realiza una comparativa entre los sistemas de medida analizados, comparándolo con el transformador de corriente tradicional.

Tabla 1-1. Comparativa sistemas de medida [73].

	Ancho de banda	Medida de DC	Precisión	Aislado	Rango de medida	Potencia pérdidas
Transformador de corriente	KHz-MHz	No	0.1%-1%	Si	A-kA	mW
Bobina Rogowski	kHz-MHz	No	0,2%-5%	Si	A-MA	mW
Sensor Hall	kHz	Si	0,5%-5%	Si	A-kA	mW
Sensor fibra Óptica	kHz-MHz	Si	0,1%-1%	Si	kA-MA	W

1.6. Objetivo de la tesis.

La presente tesis tiene un doble objetivo. El primer objetivo es detectar faltas a tierra en máquinas síncronas brushless y poner en seguridad la máquina antes de que una segunda falta cause grandes daños en la misma. Como ya se ha indicado, en esta configuración de máquina todo el sistema de excitación es inaccesible encontrándose girando con el rotor a la velocidad de sincronismo.

Como se ha visto hasta ahora, es necesario crear un sistema anillo rozante y escobillas para poder acceder al sistema rotórico.

El segundo objetivo es, una vez que se ha producido la falta, conseguir detectar donde se encuentra esta falta (localizar), para evitar si es posible, el desmontaje completo del rotor. Este desmontaje conlleva un coste elevado tanto de reparación como de pérdida de beneficios para la Propiedad.

1.7. Resumen de Publicaciones.

A continuación, se indican las publicaciones en revistas, publicaciones en conferencias internacionales y patentes relacionadas con esta tesis:

a. Artículos publicados en revistas JCR:

Artículo A1:

M. Pardo, K. Mahtani, C. A. Platero, and J. A. Sánchez Fernández, "On-Line Rotor Ground Fault Location Method for Brushless Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 3, pp. 3067-3076, May-June 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3248020.

Artículo A2:

Pardo-Vicente, M.; Platero, C.; Sánchez-Fernández, J.; Blázquez, F. AC/DC Current Sensor for Rotating Applications. Sensors 2020, 20(23), 6811; <https://doi.org/10.3390/s20236811>.

<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6811>

Artículo A3:

Pardo-Vicente, M.; Guerrero, J.; Platero, C.; Sánchez-Fernández, J. Contactless Rotor Ground Fault Detection Method for Brushless Synchronous Machines Based on an AC/DC Rotating Current Sensor. Sensors 2023, 23(22), 9065; <https://doi.org/10.3390/s23229065>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/22/9065>

b. Artículos en conferencias internacionales:

Artículo B1:

M. A. Pardo, K. Mahtani, C. A. Platero and J. A. Sánchez-Fernández, "New On-line Rotor Ground Fault Location Method for Brushless Synchronous Generators," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Dallas, TX, USA, 2021, pp. 140-145, doi: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605540.

Otros artículos presentados en conferencias internacionales:

Artículo B2:

C. A. Platero, M. Redondo, M. Pardo and E. Rebollo, "Novel adaptive 100% stator ground fault protection based on the third harmonic measurement," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 2300-2305,
doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732842.

Artículo B3:

M. Pardo, C. A. Platero, E. Rebollo and F. Blázquez, "New on-line excitation-system ground-fault location method tested in a 106 MVA synchronous generator," 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany, 2014, pp. 1908-1914,
doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960444.

c. Patentes relacionadas con la tesis.

Patente C1:

P202130547 "Sistema y método de localización de faltas a tierra en devanados de excitación de máquinas síncronas con excitación indirecta"
Concedida con examen previo 01/02/2022

Patente C2:

P202030993 "Sensor rotativo para medida de corriente alterna y/o corriente continua en máquinas rotativas"
Concedida con examen previo 29/07/2021

Patente C3:

P201731347 "Sistema y método de protección frente a faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas con excitación estática"
Concedida con examen previo 24/05/2019

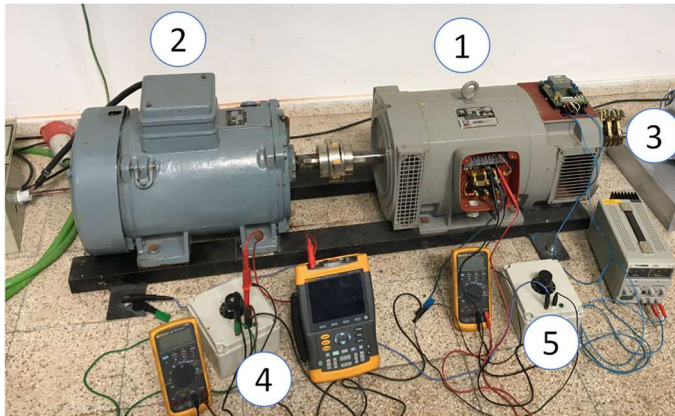
2. Metodología.

Lo que se presenta en esta tesis es un sistema innovador y eficaz de detección y localización de faltas a tierra en máquinas brushless. El gran reto tecnológico que se enfrenta es conseguir detectar estos defectos a tierra sin necesidad de conectarse físicamente al rotor del generador. Para lograr esto, se buscarán y desarrollarán alternativas al uso tradicional de escobillas y anillos rozantes.

Inicialmente, se plantea un sistema de protección de máquina que permita detectar fallos a tierra en los rotores de máquinas síncronas. Este sistema no solo se limita a la detección de la falta a tierra, sino que, una vez detectada, se utiliza el mismo sistema para la localización precisa de la falta. Esta falta puede estar localizada en la parte de excitación brushless, que puede ser tanto en el lado de alterna como en el lado de continua, o, por otro lado, puede estar localizada en los polos del propio rotor del generador. La diferenciación y localización exacta del defecto es crucial para realizar las reparaciones necesarias de manera eficiente.

Para validar este método, se diseñará y construirá una máquina a escala, un prototipo, que permitirá realizar pruebas exhaustivas y detalladas. Esta máquina prototipo dispondrá de acceso completo a las partes móviles, principalmente a todos los polos del rotor y a la estrella de la excitatriz (brushless). Este acceso va a permitir provocar y simular defectos a tierra en los diferentes polos de la máquina. Al hacer esto, se podrá comprobar que este sistema de protección no solo es capaz de detectar el fallo, sino que también identifica con precisión el polo específico que está dañado. Esta capacidad de localización detallada es esencial para minimizar el tiempo y los costos de reparación.

El uso de un prototipo a escala permite una validación práctica del método propuesto, asegurando que se puedan realizar ajustes y mejoras antes de su implementación a gran escala. La eliminación del uso de escobillas y anillos rozantes también reduce el desgaste y los problemas de mantenimiento asociados con estos componentes, proporcionando un sistema más robusto y de menor mantenimiento.



1. Generador síncrono 12kVA, 400V
2. Motor de arrastre asíncrono.
3. Escobillas acceso a los 4 polos y neutro de brushless.
4. Reóstato de puesta a tierra.
5. Reóstato para modificar resistencia de defecto a tierra.

Figura 2.1. Máquina para ensayo

En la figura 2.1 puede verse el montaje en el laboratorio del prototipo para simular defectos en diferentes partes del bobinado. Para los ensayos se utiliza un generador síncrono brushless (1) que es arrastrado por motor asíncrono (2) a la velocidad de sincronismo (1500 rpm). Los reóstatos (3) y (4) se utilizan para ajustar el valor de puesta a tierra, así como el de la resistencia de defecto.

La disposición eléctrica es la recogida en la figura 2.2. Para limitar la corriente circulante a tierra se coloca una resistencia limitadora entre el neutro de la excitación brushless y tierra (R_g). Para la detección de faltas a tierra se medirá la caída de tensión en la resistencia R_g . Estas tensiones son V_{ac} (tensión alterna) y V_{dc} (tensión continua).

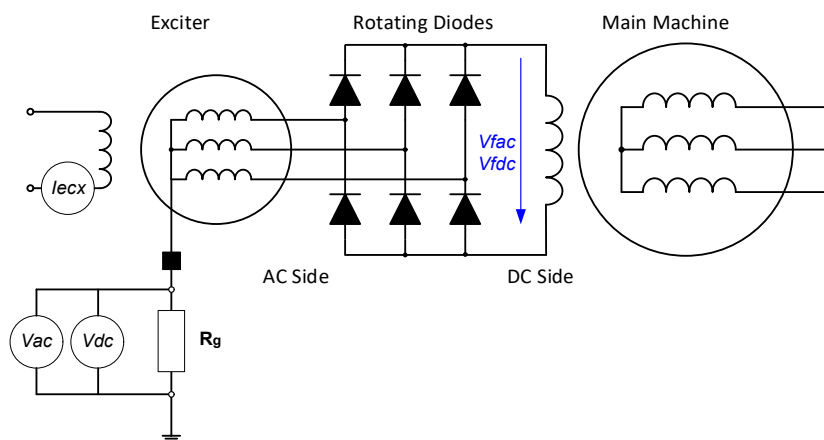


Figura 2.2. Configuración máquina síncrona para ensayo.

El objetivo principal del sistema de protección es detectar y localizar las faltas a tierra que se pueden producir en el lado de AC, en los diodos rotativos [75], y en el lado de DC correspondiente al rotor del generador síncrono. Para lograr este propósito, se llevan a cabo experimentos provocando deliberadamente faltas tanto en el lado de AC como en el lado de DC, así como en ambos lados simultáneamente (AC+DC).

En estos experimentos, se considera que un valor mínimo estandarizado de resistencia a tierra para este tipo de máquinas es de 2 k Ω . Con este valor como referencia, se realizan ensayos en los que las resistencias de defecto varían ampliamente, oscilando entre $R_f = 0 \Omega$ y $R_f = 5 \text{ k}\Omega$. Esta amplia gama de resistencias de defecto permite evaluar la sensibilidad del sistema de protección bajo diversas condiciones y escenarios de fallo.

Provocar faltas en diferentes puntos y con diferentes resistencias permite al sistema de protección demostrar su capacidad para detectar y localizar estos defectos de manera precisa. Las pruebas en el lado de AC implican evaluar que corriente circula por la resistencia R_g cuando se producen defectos en todo el sistema alimentado de corriente alterna, mientras que las pruebas en el lado de DC se centran en analizar la corriente que circula por la resistencia R_g en función de los defectos en los diferentes polos, así como defectos en los diodos rotativos.

Adicionalmente, las pruebas combinadas (AC+DC) ayudan a entender el comportamiento del sistema de protección en situaciones más complejas donde tenemos múltiples defectos pueden afectar tanto al lado de corriente alterna (inducido de la excitatriz), como al lado de corriente continua (diodos rotativos, cables de alimentación rotor, etc.).

El rango de resistencia de defecto desde 0 Ω hasta 5 k Ω cubre una variedad de posibles condiciones de falta, desde cortocircuitos directos hasta defectos más sutiles con alta resistencia. Al ensayar con este rango, se asegura que el sistema de protección sea robusto y versátil, capaz de manejar tanto fallas severas como leves. Estos ensayos proporcionan datos para afinar los algoritmos de detección y para validar la eficacia del sistema en condiciones reales de operación.

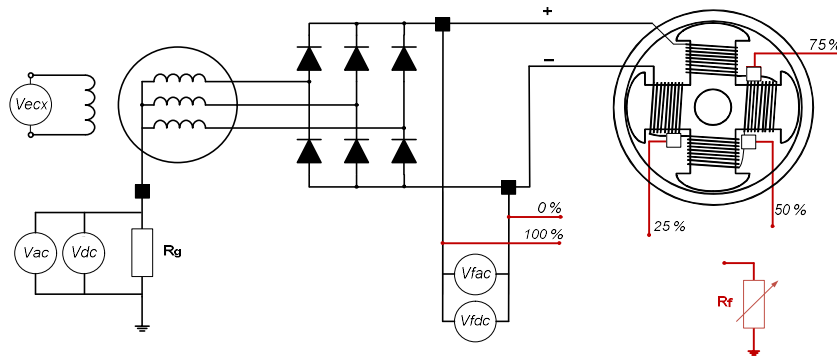


Figura 2.3. Puntos accesibles de la máquina.

Durante los ensayos realizados, para cada una de las resistencias de falta se registró la caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra (V_{ac} y V_{dc}) y la tensión en la salida del puente de tiristores (V_{fac} y V_{fdc}).

Una vez analizados todos los ensayos realizados, se desarrolla un método específico para la detección de faltas a tierra y, además, se elabora otro método distinto para la localización del defecto. Estos métodos se fundamentan en los datos obtenidos y analizados durante los experimentos, proporcionando así una base sólida y empírica para su implementación efectiva. La creación de estos métodos surge como resultado de un análisis detallado de cada uno de los ensayos, asegurando que tanto la detección como la localización de los defectos sean precisas y confiables. La metodología desarrollada no solo identifica la presencia de una falta a tierra, sino que también determina con exactitud la ubicación del defecto dentro del sistema de excitación [76].

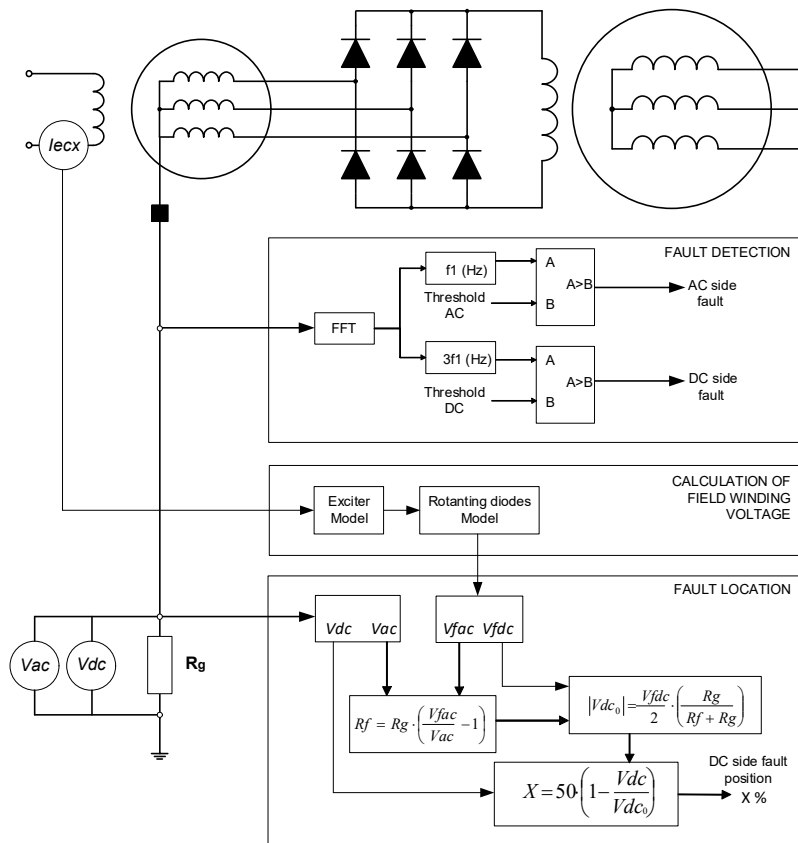


Figura 2.4. Lógica simplificada para detección y localización de defectos

Como podemos observar en la figura 2.4, a partir del análisis de la forma de onda de la corriente que circula a tierra, se puede identificar el tipo de falta a tierra presente en el sistema.

Si el valor eficaz de la onda fundamental (f_1) supera el límite definido, se puede activar una alarma indicando una falta a tierra en el lado de AC (alterna). Este procedimiento permite una detección rápida y precisa de problemas en la corriente alterna del sistema.

Por otro lado, si el que supera el valor definido es el tercer armónico ($3f_1$), entonces se activará una alarma indicando una falta a tierra en el lado de DC (corriente continua).

Para la localización exacta de las faltas a tierra, nos apoyamos en el cálculo detallado de la tensión en bornas de la excitación. Este cálculo es necesario para comprender la distribución de la tensión en el sistema y determinar con precisión dónde se encuentran los defectos.

Además, se lleva a cabo la medida de la tensión de corriente alterna (Vac) y la tensión de corriente continua (Vdc) en la resistencia de puesta a tierra.

Con todas estas variables anteriormente definidas, se podrá determinar la posición del defecto en el devanado rotórico.

La tensión que alimenta el rotor, después del puente de diodos, se puede considerar la superposición de una corriente de continua y un rizado en alterna. En nuestro modelo la excitatriz es una máquina de 12 polos que gira a 1500 rpm.

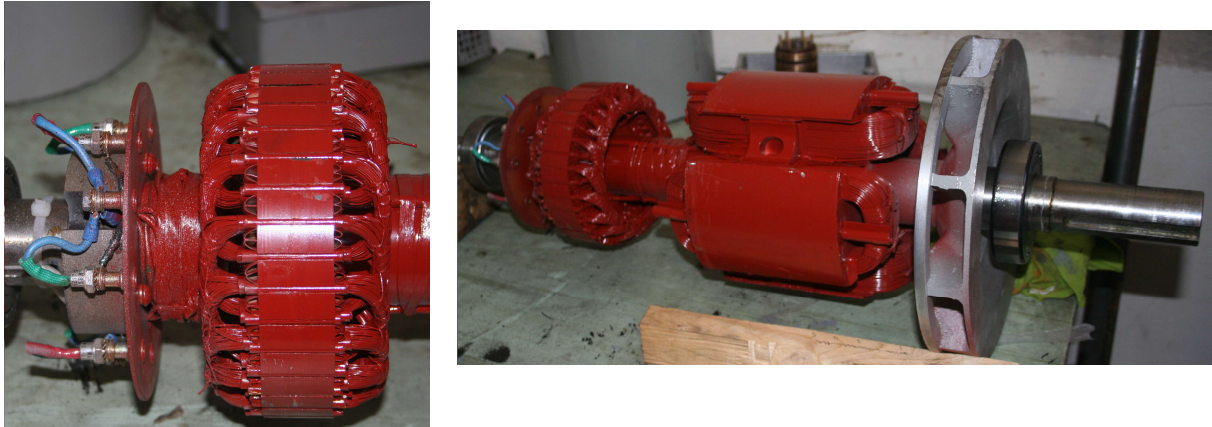


Figura 2.5 Excitatriz y rotor maquina ensayo

En la figura 2.5 puede verse tanto el rotor de la excitatriz como el rotor del generador principal.

Por tanto:

$$n=1500 \text{ rpm.}$$

$$p= 12.$$

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = 150 \text{ Hz.}$$

El análisis del comportamiento del circuito rotórico a una corriente de 150Hz correspondiente al rizado permite obtener el valor de la resistencia de defecto. Figura 2.6.

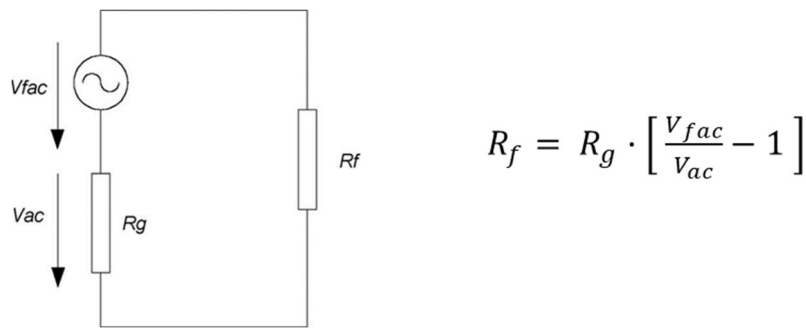


Figura 2.6. Circuito equivalente alterna

El comportamiento del mismo devanado rotórico a la corriente continua obtenida a la salida del puente trifásico de diodos si consideramos que el defecto se produce en el polo positivo o negativo será:

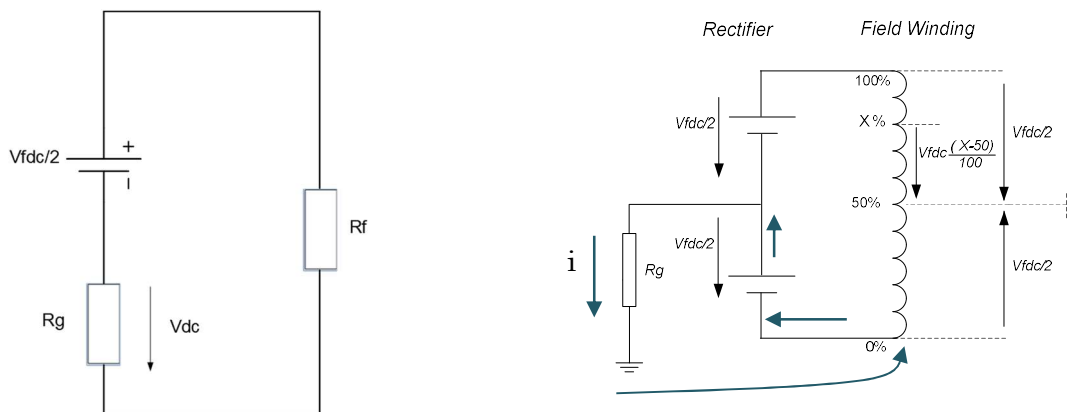


Figura 2.7. Circuito equivalente corriente continua.

Por tanto, la posición de defecto quedará definida por:

$$|Vdc0| = \frac{Vfdc}{2} * \left[\frac{Rg}{Rf + Rg} \right]$$

$$X(\%) = 50 * \left[1 - \frac{Vdc}{Vdc0} \right]$$

Este método fue simulado mediante el uso de la herramienta Simulink SimPowerSystem. En esta simulación, se empleó un modelo simplificado [77] que permitió evaluar y validar el método propuesto. Dicho modelo simplificado, representado en la figura 2.8, proporciona una base sobre la cual se pueden realizar diversas pruebas y análisis.

En la figura 2.8 se muestra el diagrama del modelo empleado para la simulación. La tensión inducida en la excitatriz, que posteriormente alimentará el rotor del generador principal se simula con una fuente trifásica la cual es rectificadora por un puente de diodos. El rotor es simulado mediante un conjunto de cargas discretas formadas por resistencias e inductancias conectadas en serie. La capacidad del bobinado a tierra se simula mediante el uso de condensadores.

La simulación en Simulink SimPowerSystem es importante para entender cómo el método se comporta en diferentes escenarios y bajo distintas condiciones operativas. Utilizar un modelo simplificado facilita la comprensión de los principios fundamentales del método y permite realizar ajustes y mejoras antes de aplicar el método en un entorno real. Esta aproximación no solo ahorra tiempo y recursos, sino que también asegura que el método sea robusto y efectivo cuando se implemente en situaciones prácticas.

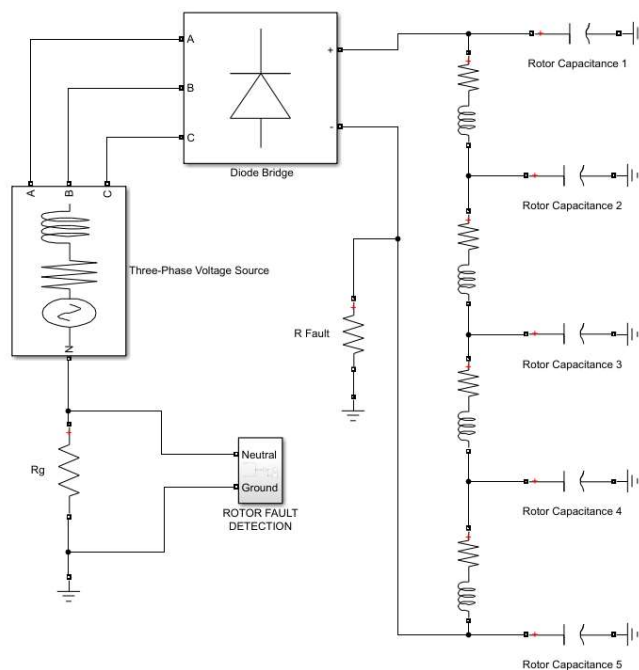


Figura 2.8. Modelo Simulación.

Dado que las máquinas comerciales brushless no disponen de escobillas [78] [75], se presenta un desafío particular para obtener las variables críticas dentro del sistema de excitación. Para abordar este desafío, se diseñará un sensor de corriente [79] que permita conocer de forma indirecta las variables que deben ser controladas por el sistema propuesto. Este sensor de corriente permitirá la monitorización continua sin la necesidad de escobillas que tradicionalmente se utilizan para este propósito.

La validación del sensor no se limitará únicamente a su diseño teórico; también se llevará a cabo mediante simulación. Estas simulaciones permitirán prever el comportamiento del sensor bajo diversas condiciones operativas y fallos potenciales.

Además de la validación por simulación, se procederá a la construcción de un modelo físico del sensor, Figura 2.9. Este modelo será probado en un entorno controlado para verificar su desempeño en condiciones reales. La combinación de simulación y pruebas físicas garantizará que el sensor de corriente cumpla con los requisitos necesarios para su integración.

Este sensor debe de ser capaz de medir simultáneamente corriente alterna (CA) y corriente continua (CC). [80]

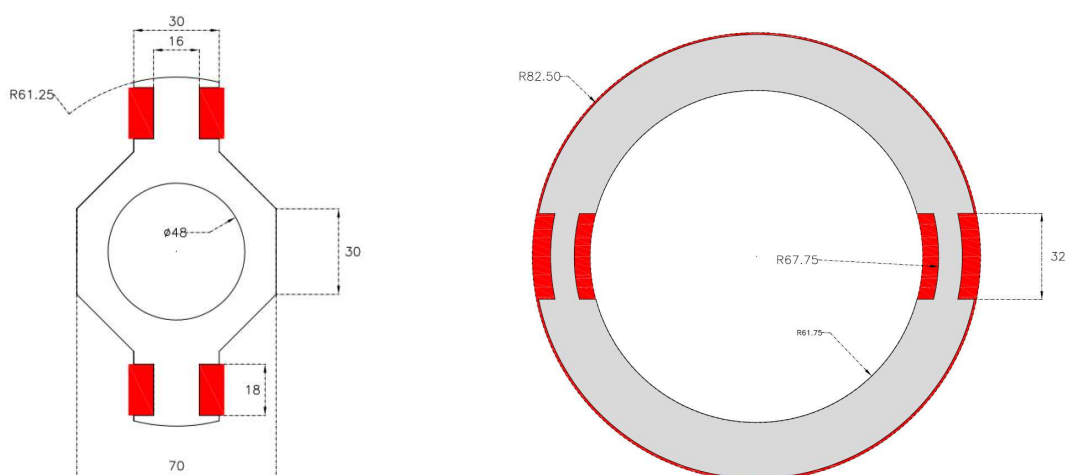


Figura 2.9. Sensor rotativo de corriente. a) Rotor, b) estator.

Para entender el fundamento físico del sensor desarrollado nos apoyamos en el teorema de Leblanc.

El Teorema de Leblanc determina que cuando un devanado rotórico es alimentado por una corriente alterna monofásica, se induce un campo magnético pulsante, el cual equivale a la suma de dos campos magnéticos iguales y de sentido opuesto.

$$\phi_{s,s} = \phi_{s,s}(f + f_r) + \phi_{s,s}(f - f_r)$$

$$U_s = N \cdot \left\{ \frac{d}{dt} [\phi_{s,s}(f + f_r)] + \frac{d}{dt} [\phi_{s,s}(f - f_r)] \right\}$$

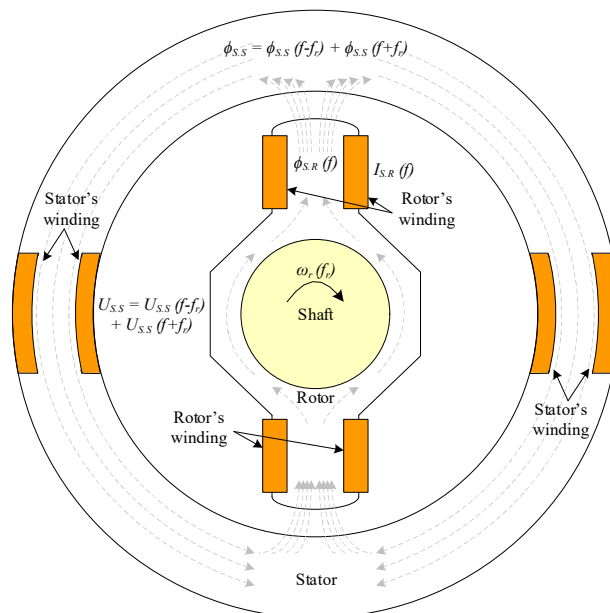


Figura 2.10. Sensor de corriente rotativo. Distribución de flujos y tensiones inducidas.

En la Figura 2.10 se representa la distribución de flujos en el sensor rotativo.

Por tanto, cuando el sensor es alimentado con una corriente continua, se induce una corriente alterna cuya frecuencia es función del número de polos del sensor y de su velocidad de rotación.

Este diseño fue simulado para evaluar la corriente máxima que se puede aplicar al sensor sin que se produzca la saturación [81], asegurando así su correcto funcionamiento (linealidad) bajo condiciones de diseño. Además, se analizó la respuesta del sensor a diferentes tipos de señales: corriente alterna, corriente

continua y una combinación de ambas. Estas simulaciones permitieron entender cómo el sensor responde diversas formas de corriente y además determinamos el valor máximo de la corriente a partir del cual comienza la saturación.

La evaluación de la corriente máxima que el sensor puede manejar es imprescindible para determinar sus límites operativos y garantizar que funcione de manera óptima en todo el rango definido.

La corriente que circula por el sensor será:

$$I_R = I_{dc} + I_{ac} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Siendo:

I_R : Corriente circulante por el sensor (rotor).

I_{dc} : Corriente continua.

I_{ca} : Corriente alterna.

f : Frecuencia.

t : Tiempo.

Se realizan múltiples simulaciones alimentando el sensor con corriente continua llegando a la saturación en corriente continua a los 50mA [82].

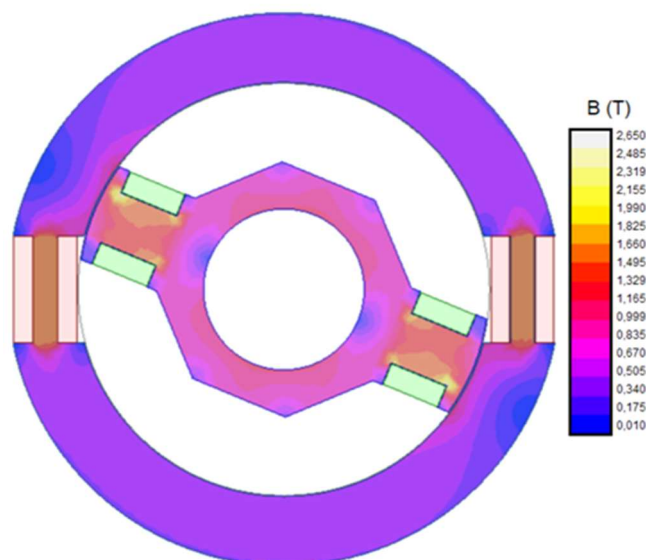


Figura 2.11. Densidad de flujo con sensor alimentado a 50 mA con CC.

El máximo valor de la densidad de flujo es superior a 1,6 Teslas tanto en el rotor como en el estator. Estos valores se localizan cerca de los bobinados.

La respuesta del sensor, así como FFT de la señal inducida por el sensor cuando se alimenta el rotor con corrientes inferiores a la saturación, se puede ver en las figuras 2.12 y 2.13.

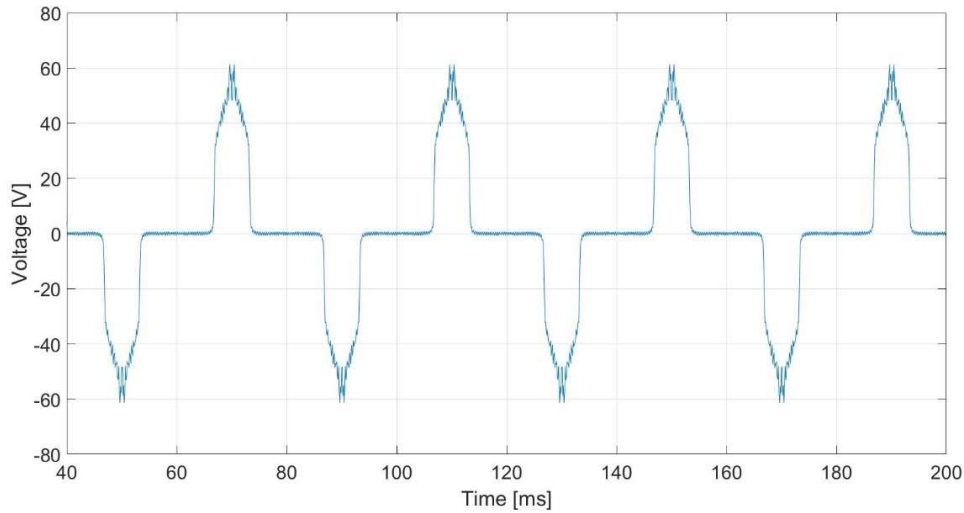


Figura 2.12. Forma de onda sensor alimentado a 8,35 mA con CC.

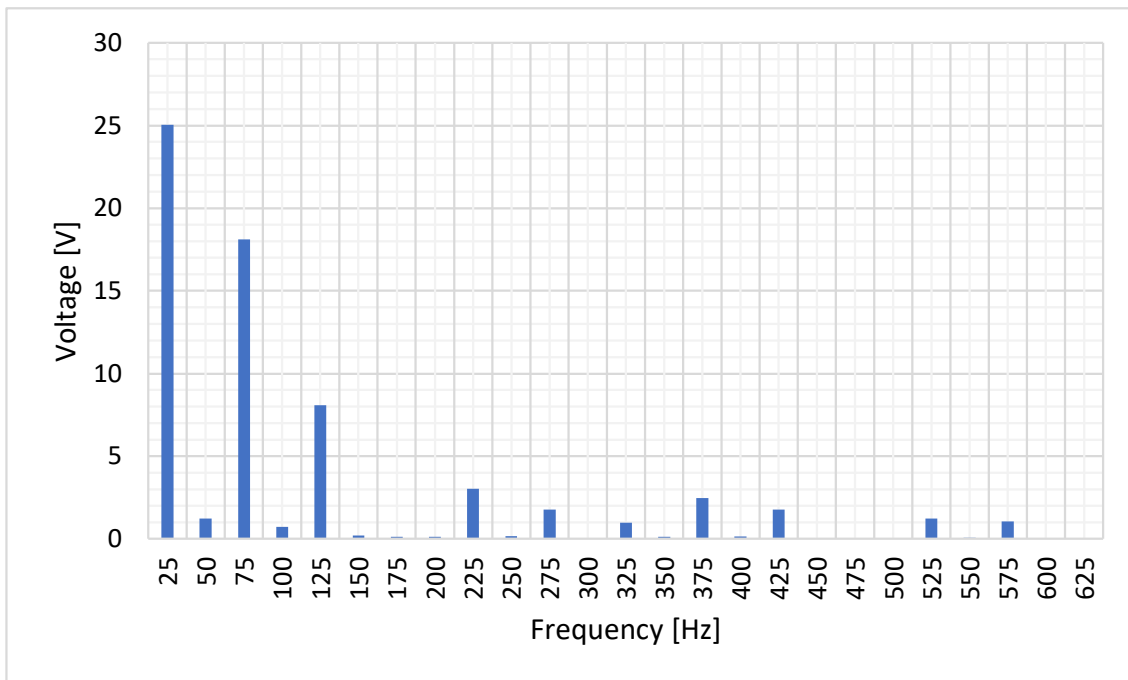


Figura 2.13. FFT de sensor alimentado a 8,35 mA con CC

Como puede verse en la Figura 2.13 la frecuencia fundamental es 25Hz propia de un sensor alimentado con corriente continua que está girando a 1500 rpm y tiene dos polos.

Para la simulación en corriente alterna se ha utilizado la frecuencia de 450 Hz ya que es la frecuencia con la que nos vamos a encontrar en nuestro prototipo:

$$I_R = 60 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 450 \cdot t) \text{ mA}$$

La saturación cuando el sensor es alimentado con corriente alterna se produce con 60 mA. (Figura 2.14) La respuesta del sensor y la FFT de la tensión inducida en el sensor, cuando circula una corriente alterna por el rotor, se puede ver en las figuras 2.15 y 2.16.

Al igual que en el caso anterior la densidad de flujo supera el valor de 1,6 T. tanto en el rotor como en el estator y estos valores elevados se localizan cerca de los bobinados.

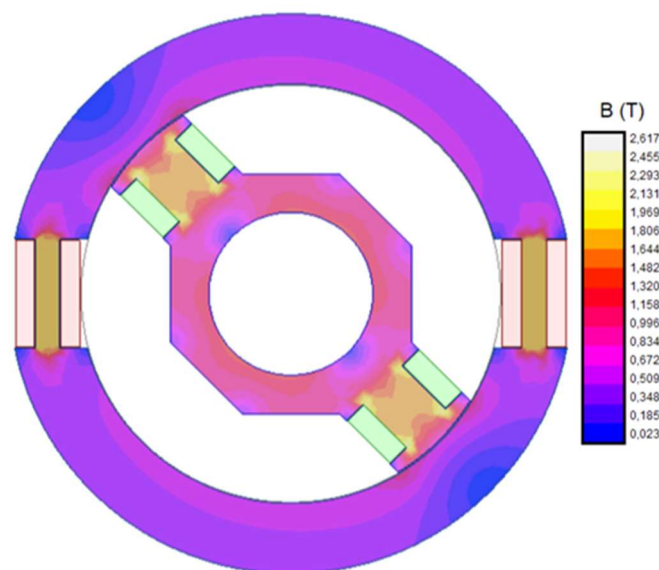


Figura 2.14. Densidad de flujo con sensor alimentado a 60 mA con CA a 450Hz.

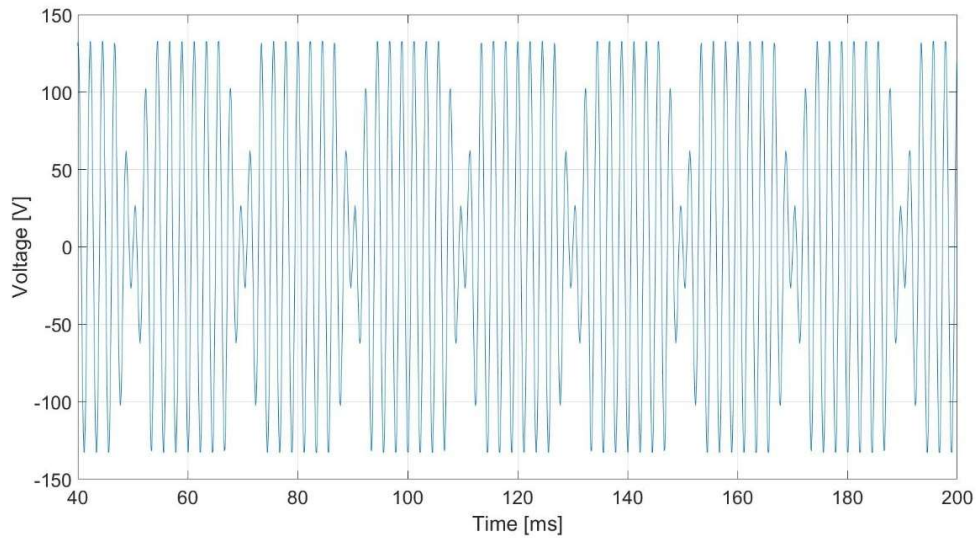


Figura 2.15. Forma de onda sensor alimentado a 12 mA con CA a 450Hz

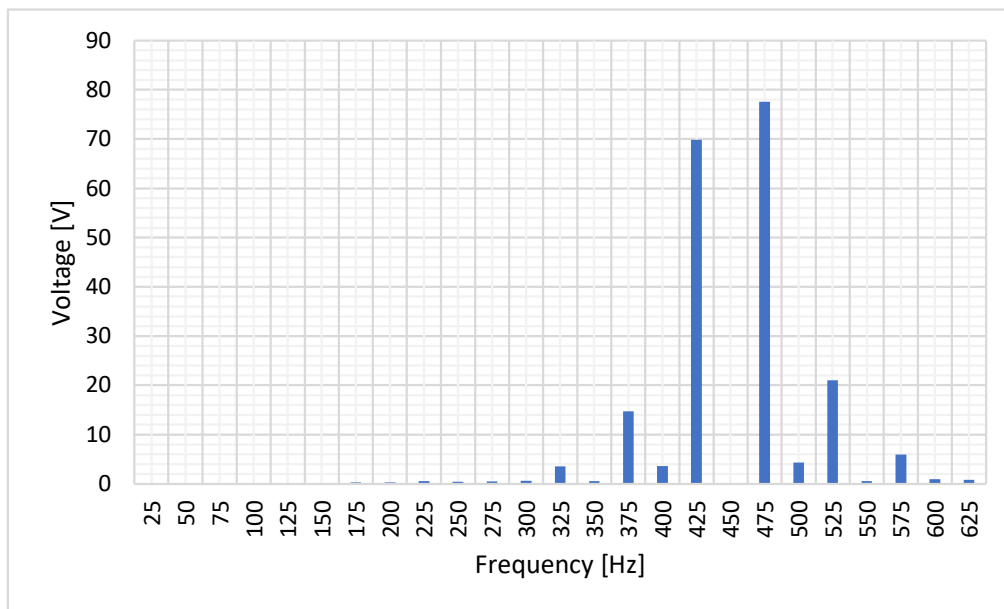


Figura 2.16. FFT de sensor alimentado a 12 mA con CA a 450Hz.

Por último, se ha simulado el comportamiento del sensor ante una corriente de 22 mA a 450 Hz superpuesta con una corriente continua de 10 mA:

$$I_R = 10 + 22 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 450 \cdot t) \text{ mA}$$

La forma de onda y FFT de la respuesta del sensor es la recogida en las figuras 2.17 y 2.18 respectivamente.

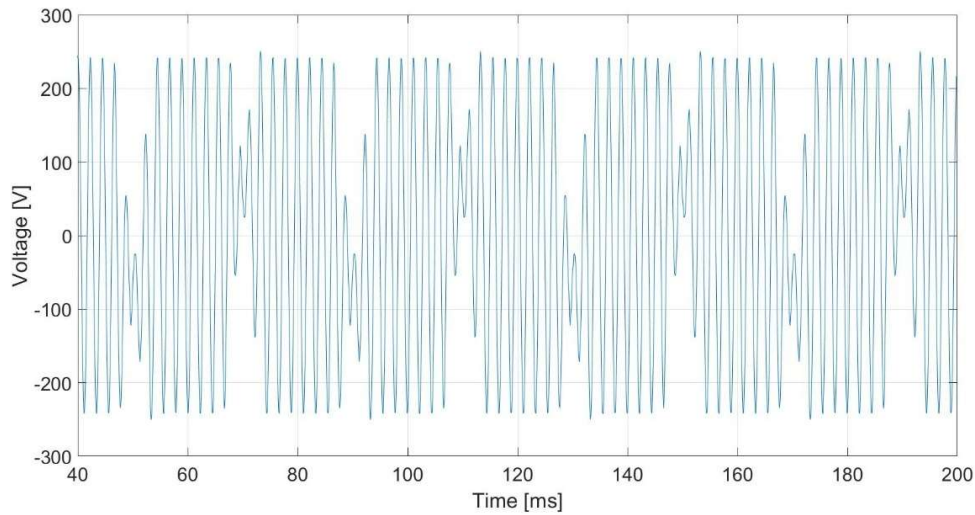


Figura 2.17. Forma de onda para 22 mA de AC a 450Hz + 10 mA de DC.

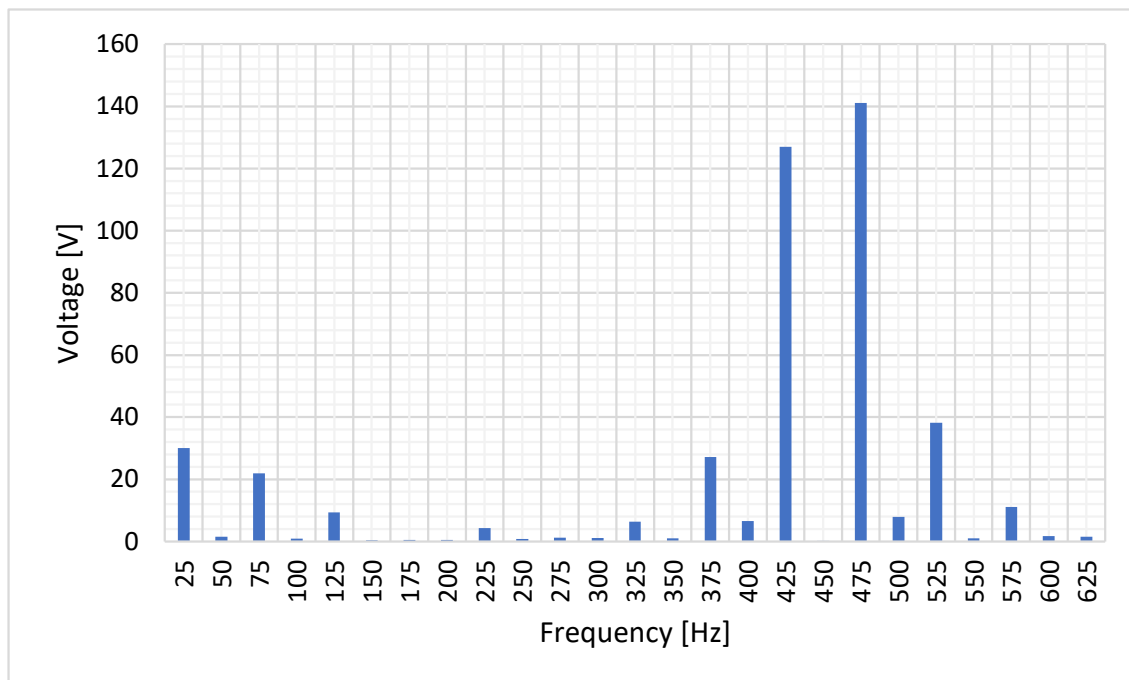


Figura 2.18. FFT de la tensión inducida en el sensor alimentado a 22 mA con AC a 450Hz + 10 mA DC.

Con todo lo anterior, se fabrica el prototipo de sensor. Lo esperable del sensor es que, ante una circulación de corriente continua por su rotor, se induzca una tensión cuya frecuencia depende de la velocidad de giro y del número de polos. En el prototipo, la velocidad de giro es 1500 rpm y el número de polos es 2, con lo que se tienen 25 Hz. Esta tensión inducida en el sensor será proporcional a la corriente circulante por el rotor, que es la corriente de defecto. Figuras 2.19 y 2.20.

Como puede verse en la Figuras 2.19 y 2.20, registros obtenidos en nuestro modelo se ajustan perfectamente a lo esperado, obteniendo como frecuencia fundamental el valor de 24,95 Hz. Esto es debido a que el motor de arrastre es una maquina asíncrona cuya velocidad de giro es ligeramente inferior a la de diseños y dependerá de la carga.

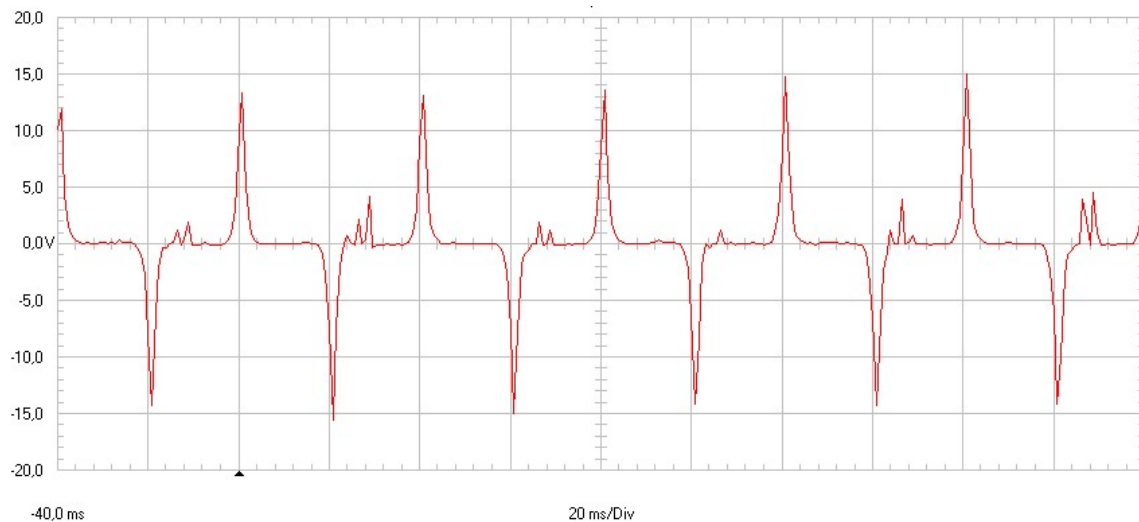


Figura 2.19. Tensión inducida en el sensor con 3 mA CC.

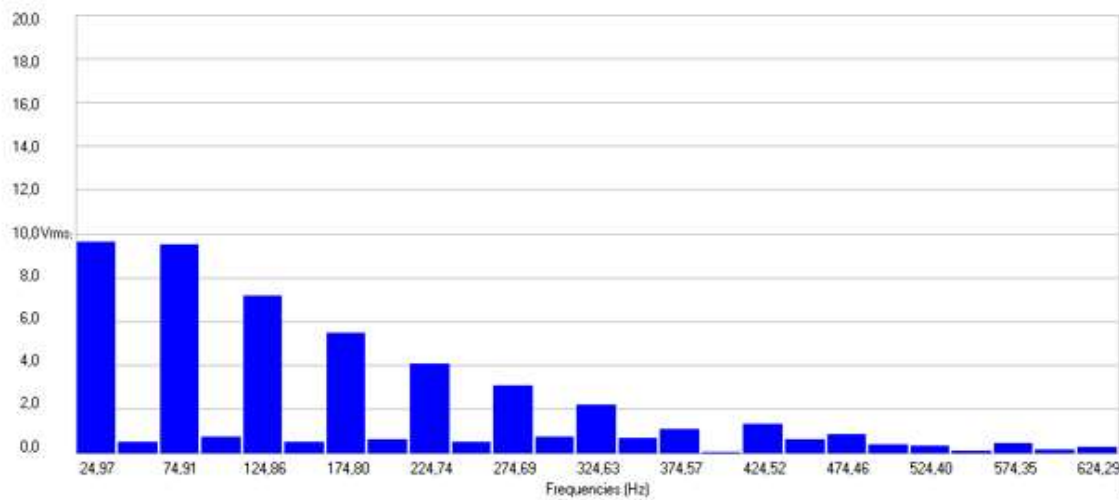


Figura 2.20. Descomposición FFT de la respuesta del sensor a 3 mA.

En el caso de que circule una corriente alterna de frecuencia f por el rotor del sensor, la tensión inducida es proporcional a esta corriente, pero pulsatoria. De acuerdo con el teorema de Leblanc, se podrá descomponer en $(f-25\text{Hz})$ y $(f+25\text{Hz})$.

Los valores obtenidos de nuevo en el prototipo reflejan que la respuesta del sensor a tensiones de componente alterna a 450Hz son valores eficaces altos a las frecuencias de 425Hz y 475 Hz, Figuras 2.21 y 2.22.

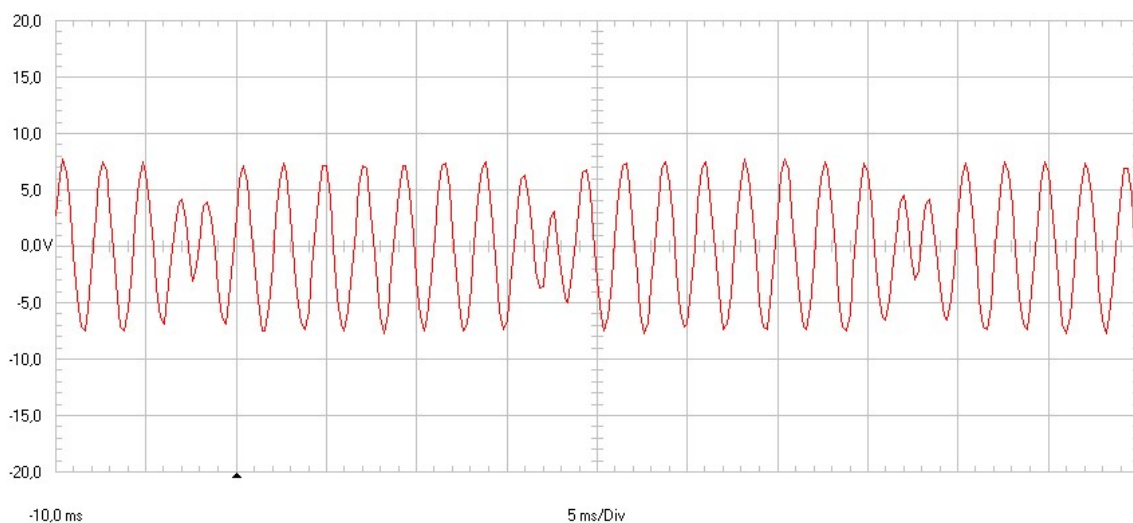


Figura 2.21. Respuesta del sensor a CA de 450Hz y 0,8 mA.

Figura 2.23. Respuesta del sensor a CA de 450Hz y 0,6 mA y CC de 1 mA

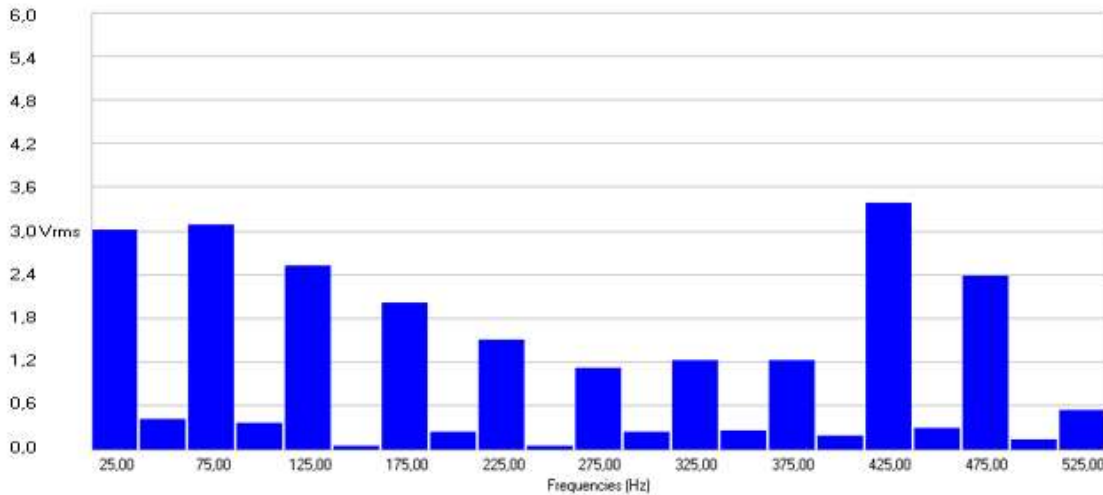
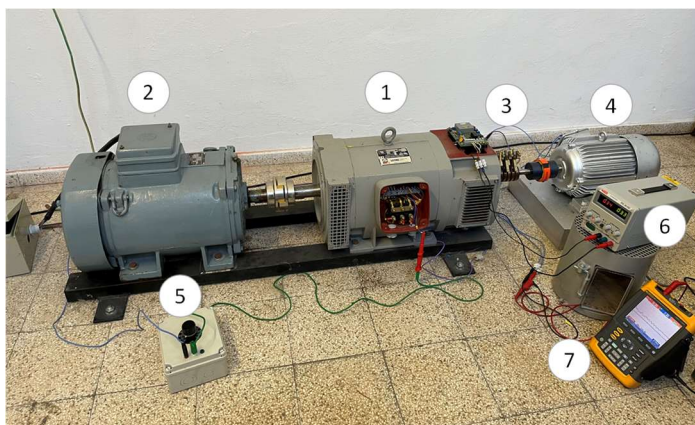


Figura 2.24. Descomposición FFT respuesta del sensor a CA 0,6 mA y CC 1 mA

Una vez que se dispone de un método, se desarrolla un sensor rotativo para medir corriente alterna y corriente continua. El siguiente paso es comprobar el funcionamiento en máquinas brushless sin el uso de escobillas auxiliares [83].

Para ello, se conectará mecánicamente el sensor rotativo al generador síncrono brushless. La disposición del sensor rotativo, el motor de arrastre y la maquina brushless se puede ver en la Figura 2.25.



1. Generador síncrono 12kVA, 400V
2. Motor de arrastre asíncrono.
3. Escobillas acceso a los 4 polos y neutro de brushless.
4. Sensor rotativo AC y DC
5. Reóstato para modificar resistencia de defecto a tierra.
6. Fuente alimentación ajustable.
7. Osciloscopio.

Figura 2.25. Máquina completa para pruebas

Para estos ensayos necesitamos alimentar el inductor de la excitatriz a través de una fuente auxiliar de corriente continua (6) que nos permita controlar la tensión con la que alimentamos el rotor y por tanto la tensión de salida en bornas del generador.

Además, para simular diferentes resistencias de defectos se utiliza un reóstato variable entre 0 y 5K Ω (5).

El osciloscopio (7) no permite registrar los valores obtenidos, que se están compartiendo en el presente documento.

En la Figura 2.26 se muestra un esquema de las conexiones utilizadas donde se puede ver el sensor rotativo, la excitatriz, el puente de diodos y el generador síncrono.

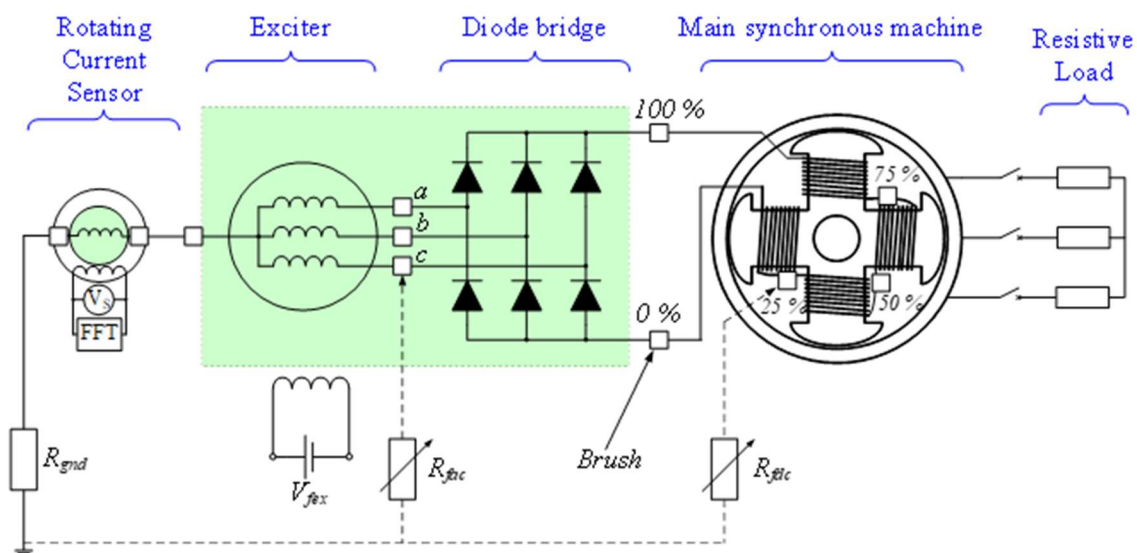


Figura 2.26. Esquema de conexionado de la máquina de ensayos con sensor.

Inicialmente, se recogen y registran las medidas obtenidas en el sensor bajo diversas condiciones de funcionamiento, pero sin la presencia de defectos. El resultado de esta recopilación de datos se muestra en la figura 2.27.

Es importante notar que el valor eficaz de la tensión medida no supera en ningún caso los 0,4 V. Esta observación es crucial para establecer una línea base para futuras comparaciones y para asegurar que el sensor está operando dentro de los

parámetros esperados y sin anomalías significativas en esta etapa inicial de las pruebas.

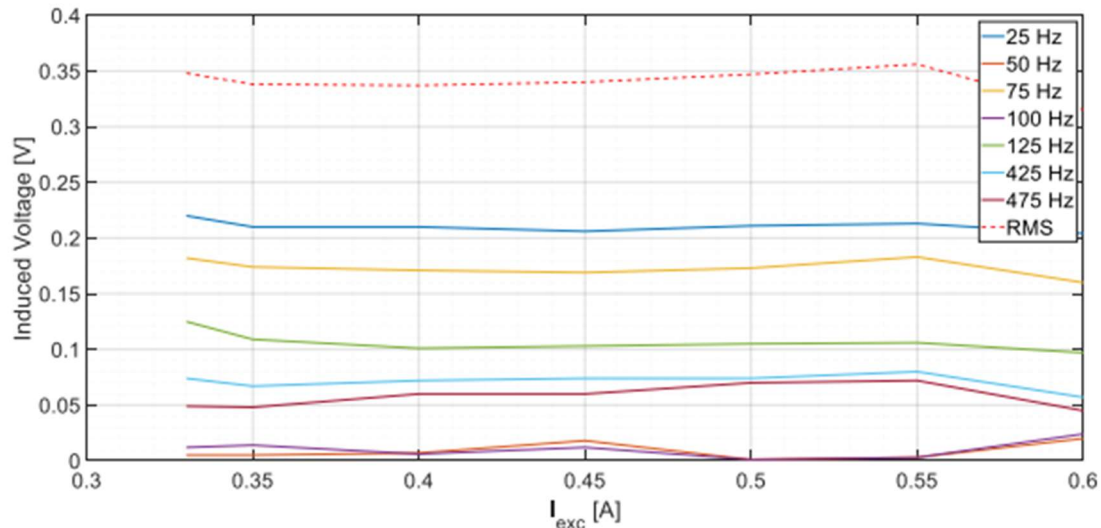


Figura 2.27. FFT tensión inducida en el sensor máquina funcionando sin defectos.

A continuación, se han llevado a cabo múltiples pruebas con defectos a tierra, variando las resistencias entre 0 y 5 k Ω , y en diferentes posiciones del rotor (0%, 25%, 50%, 75% y 100%).

Además, se han realizado pruebas de defectos en el lado de alterna, antes del puente de diodos. Estas pruebas incluyen un rango amplio de condiciones para evaluar el comportamiento del sistema bajo distintas circunstancias.

Ejemplos representativos de los resultados obtenidos se presentan en las siguientes Figuras 2.28 y 2.29. Estos resultados permiten analizar cómo responde el sensor ante los defectos y las variaciones en las resistencias y posiciones del rotor.

En la figura 2.28 (a) se puede ver la forma de onda recogida en el sensor cuando se produce un defecto de 0 ohmios en el lado de continua en concreto en el polo negativo. La frecuencia dominante es 25Hz, Figura 2.28 (b).

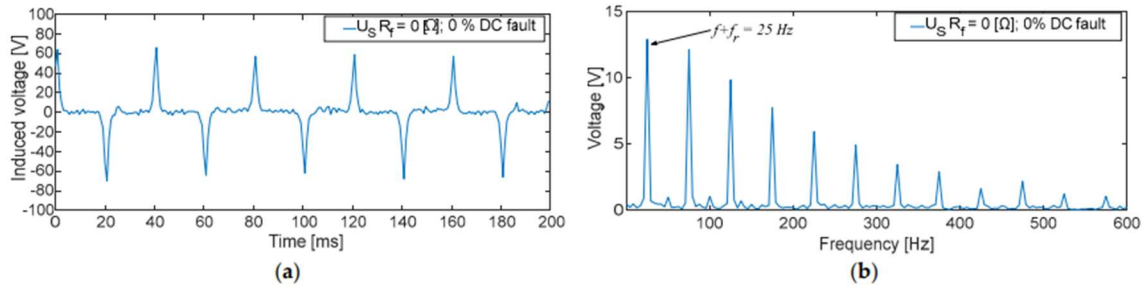


Figura 2.28. Tensión inducida en el sensor, posición 0% y $R_f = 0\Omega$ (a) forma de onda, (b) FFT.

En la figura 2.29 (a) se registra la respuesta del sensor ante un defecto de $1k\Omega$ en el lado de alterna. Las frecuencias en este caso son 125Hz y 175 Hz.

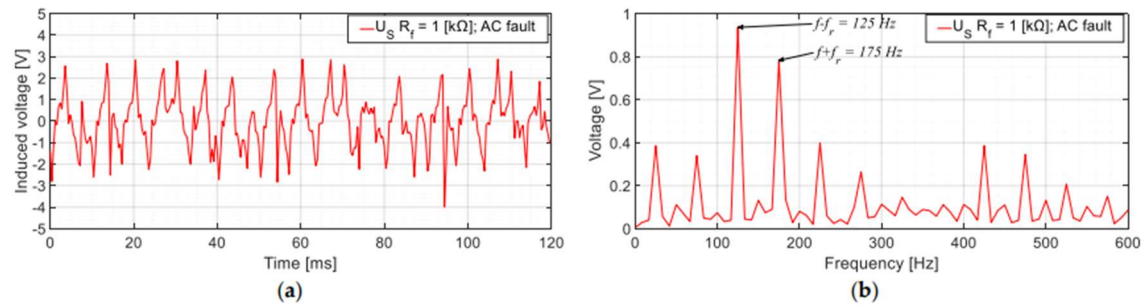


Figura 2.29. Tensión inducida en el sensor, posición AC y $R_f = 1k\Omega$ (a) forma de onda, (b) FFT.

Como resultado final se recogen los valores eficaces de la tensión en el sensor en función de la resistencia de defecto para las 5 posiciones ensayadas Figura 2.30.

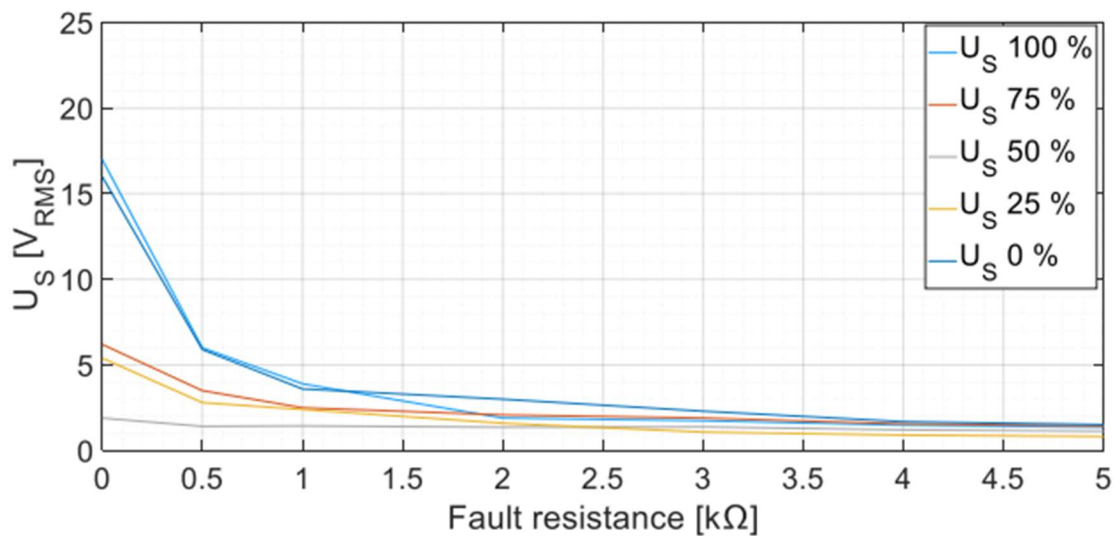


Figura 2.30. Tensión en sensor para diferentes resistencias de defecto y posiciones

Esta metodología expuesta nos va a permitir presentar un sistema novedoso de detección de defectos a tierra sin necesidad del uso de escobillas.

Una vez detectado el defecto a tierra, es crucial conocer la ubicación exacta del defecto dentro del sistema de excitación.

Si el defecto se produce en el rotor del generador, el reto tecnológico es identificar con precisión qué polo está dañado y determinar si es posible desmontar únicamente ese polo específico. Esto puede reducir considerablemente los costos de reparación en comparación con el desmontaje completo del rotor.

Una segunda solución, que elimina por completo el uso del anillo de medida, es la localización del defecto mediante la instalación de un sensor rotativo. Para eliminar el anillo de medida en un sistema de excitación que gira a la velocidad de sincronismo, se necesita desarrollar un sensor rotativo capaz de medir la forma de onda de la corriente de defecto de manera eficiente. En esta tesis, se diseña un sensor rotativo y, mediante software de elementos finitos, se analizan los límites de funcionamiento y la linealidad del sensor.

Este modelo de sensor rotativo se fabrica en un taller y se instala en un laboratorio, acoplándose a una máquina síncrona brushless de 5KVA para la verificación del método. Se concluye en la investigación que el sensor es capaz de transmitir una señal de tensión proporcional a la corriente que lo alimenta. Por tanto, mediante el uso de

este sensor, se pueden detectar faltas a tierra en el sistema de excitación sin la necesidad de escobillas ni anillos rozantes, reduciendo así el mantenimiento y el riesgo de fallos por suciedad.

Mediante la descomposición de la forma de onda de la corriente que circula por el sensor, se puede determinar si el defecto está en el sistema de alterna o, por el contrario, en el lado de continua del sistema de excitación. Si predomina la componente de 25Hz, se trata de una corriente continua; si la componente predominante es de $(150+25\text{Hz})$ y $(150-25\text{Hz})$, se trata de un defecto en alterna.