



POSGRADOS

MAESTRÍA EN _____ ELECTRICIDAD

RPC-SO-22-No.325-2018

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

PROYECTOS DE DESARROLLO

TEMA:

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE
MÁQUINAS SÍNCRONAS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE
RESPUESTA EN FRECUENCIA

AUTOR:

FLAVIO MATEO QUIZHPI CUESTA
FRANCISCO XAVIER GÓMEZ JUCA

DIRECTOR:

JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO

CUENCA - ECUADOR
2021

Autores:



Flavio Mateo Quizhpi Cuesta

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca

fquizhpic@est.ups.edu.ec



Francisco Xavier Gómez Juca

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca

fgomezj@est.ups.edu.ec

Director:



José Manuel Aller Castro

Ingeniero Electricista.

Doctor Ingeniero Industrial (Programa Sistemas de Energía Eléctrica).

jaller@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

FLAVIO MATEO QUIZHPI CUESTA

FRANCISCO XAVIER GÓMEZ JUCA

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

Agradecimientos y Dedicatoria

En primer lugar, agradecer a Dios, Don Bosco y María Auxiliadora por brindarme la oportunidad de convivir una etapa más de formación académica, profesional y personal.

A mi familia, que ha sido ese gran apoyo en cada situación adversa y felicidad en cada triunfo. Mi papá por ese amor de padre y de ingenieros. Mi mamá que fue la impulsora de este gran sueño. Mis hermanas y mis sobrinas que comparten cada emoción conmigo.

A Gabriela, que ha sido aquella mujer de apoyo incondicional, amor y felicidad. Por compartir cada meta conmigo, paso a paso.

A mi gran amigo Paco, por una etapa más culminada, por todos los momentos compartidos y ser ese amigo incondicional.

A mi tutor, Dr. José Aller, por compartir su conocimiento, sabiduría y momentos extraordinarios en clases y el desarrollo del proyecto de titulación.

Mateo Q.

Agradecimientos y Dedicatoria

Agradezco a Dios por la oportunidad de seguirme preparando en el ámbito académico y profesional, pero sobretodo como persona pensando siempre en servir a la sociedad.

Al Dr. José Manuel Aller director de nuestro trabajo de titulación por el acompañamiento brindado durante la realización de este trabajo y la confianza brindada en este periodo de tiempo. Al Ing. Flavio Quizhpi por su apoyo en los Laboratorios de la UPS de manera desinteresada para el desarrollo práctico de este proyecto.

Agradezco sin medida a mi gran amigo Mateo por los inolvidables momentos vividos durante la realización de este proyecto y por toda la confianza puesta en mi para alcanzar esta meta.

A mi familia por ser mi inspiración, sin duda este humilde trabajo es dedicado a ustedes Hilda, Rodrigo y Gilda.

Paco G.

Índice general

Índice de Figuras	8
Índice de Tablas	11
Resumen	12
Abstract	12
1. Introducción	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Propuesta de Investigación	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. Organización del manuscrito	16
2. Marco Teórico y Metodología de Trabajo	17
2.1. Introducción	17
2.2. La Máquina Síncrona	17
2.2.1. Modelo de la Máquina Síncrona	20
2.2.2. Transformación de Park	22
2.3. Determinación de parámetros por métodos clásicos	25
2.3.1. Ensayos de Régimen Permanente (RP): Característica a Vacío	25
2.3.2. Ensayos de RP: Característica de Cortocircuito	26
2.3.3. Ensayos de Reactancia de Secuencia Cero, X_0	27
2.3.4. Ensayos de régimen transitorio: Cortocircuito Trifásico Súbito	32
2.4. Respuesta en frecuencia de la Máquina Síncrona	36

3. Ensayos y Procesamiento	41
3.1. Introducción	41
3.2. Ensayos en Régimen Permanente	41
3.2.1. Parámetros en Por Unidad (P.U.) de la Máquina Síncrona	41
3.2.2. Ensayo a vacío de la Máquina Síncrona	43
3.2.3. Ensayo en cortocircuito de la Máquina Síncrona	44
3.2.4. Determinación de la reactancia de secuencia cero, X_0	46
3.3. Cortocircuito Trifásico Súbito	47
3.4. Respuesta en Frecuencia	51
3.4.1. Ubicación del rotor para los ejes d y q	51
3.4.2. Adquisición de variables para las impedancias características	53
4. Análisis y resultados	65
4.1. Introducción	65
4.2. Parámetros en Régimen Permanente	65
4.2.1. Parámetros de la característica a vacío y cortocircuito	65
4.2.2. Reactancia de Secuencia Cero	67
4.3. Parámetros del Cortocircuito Trifásico Súbito	68
4.4. Respuesta en Frecuencia	69
4.4.1. Impedancia e Inductancia de Eje Directo	69
4.4.2. Función de Transferencia de Eje Directo al Voltaje de Campo, $sG(s)$	72
4.4.3. Impedancia armadura-campo, Z_{af0}	73
4.4.4. Impedancia e Inductancia de Eje en Cuadratura	74
4.5. Parámetros obtenidos de la Respuesta en Frecuencia	76
4.5.1. Reactancia de Fuga, X_l	76
4.5.2. Valor inicial de L_{ad}	76
4.5.3. Relación de vueltas de campo a inducido	77
4.5.4. Obtención de los parámetros de eje directo	78
4.5.5. Obtención de los parámetros de eje en cuadratura	80
4.5.6. Parámetros de la Máquina Síncrona obtenidos del ensayo Standstill Frequency Response (SSFR)	82
4.6. Comparación de resultados obtenidos	84
5. Conclusiones y Recomendaciones	86
6. Glosario	88

ÍNDICE GENERAL

7

Referencias

89

Índice de Figuras

2.1. Máquina síncrona del Laboratorio. Fuente Autores.	19
2.2. Diagrama de la máquina síncrona de polos salientes [1].	19
2.3. Modelo de la máquina síncrona en coordenadas $dq0-f$ [1]	25
2.4. Curvas de saturación de la máquina síncrona [2]	27
2.5. Método de circuito paralelo para la reactancia de secuencia cero X_0 [2].	28
2.6. Método de circuito en serie para la reactancia de secuencia cero X_0 [2].	30
2.7. Método de cortocircuito sostenido para la reactancia de secuencia cero X_0 [2].	31
2.8. Oscilograma del cortocircuito súbito trifásico. Fuente Autores.	35
2.9. Análisis de la componente CA de la corriente de cortocircuito. Fuente Autores	35
2.10. Red de dos puertos de eje directo y eje de cuadratura de una máquina síncrona. Fuente Autores.	37
2.11. Circuito equivalente de segundo orden para una máquina síncrona (eje directo y eje de cuadratura). [2].	38
3.1. Datos de placa de la máquina síncrona bajo estudio. Fuente Autores	42
3.2. Diagrama de conexión y medición para el ensayo de vacío. Fuente Autores	43
3.3. Curva de vacío de la máquina síncrona. Fuente Autores	44
3.4. Diagrama de conexión y medición para el ensayo en cortocircuito. Fuente Autores	45
3.5. Curva de cortocircuito de la máquina síncrona. Fuente Autores	45
3.6. Diagrama de conexión para el ensayo de reactancia de secuencia cero. Fuente Autores	46

3.7. Implementación de equipos para adquisición de datos: Cortocircuito Trifásico Súbito en la Máquina Síncrona. Fuente Autores . . .	47
3.8. Diagrama de Conexión para adquisición de datos: Cortocircuito Trifásico Súbito en la Máquina Síncrona. Fuente Autores	48
3.9. Transitorio en el voltaje y corriente de campo. Fuente Autores . . .	49
3.10. Voltaje en bornes de la máquina. Fuente Autores	50
3.11. Corriente de cortocircuito en la máquina. Fuente Autores	50
3.12. Componente DC y Simétrica AC de la corriente de cortocircuito. Fuente Autores	51
3.13. Ajuste de la curva de la componente simétrica AC. Fuente Autores	52
3.14. Posicionamiento del rotor para la prueba de eje directo. Fuente Autores	53
3.15. Esquemático del amplificador de potencia diseñado para los ensayos. Fuente Autores	55
3.16. Implementación del ensayo SSFR en el laboratorio de la universidad. Fuente Autores	55
3.17. Flujoograma del proceso de SSFR en la máquina síncrona. Fuente Autores	56
3.18. Esquema de conexión y medición para la impedancia $Z_d(s)$. Fuente Autores	57
3.19. Señal de voltaje y corriente de armadura del ensayo para $Z_d(s)$ en una frecuencia de 1 Hz. Fuente Autores	58
3.20. Espectro de la señal de voltaje de armadura (1 Hz) en el ensayo para $Z_d(s)$. Fuente Autores	59
3.21. Espectro de la señal de corriente de armadura (1 Hz) en el ensayo para $Z_d(s)$. Fuente Autores	60
3.22. Esquema de conexión y medición para la impedancia $sG(s)$. Fuente Autores	61
3.23. Esquema de conexión y medición para la impedancia $Z_{af0}(s)$. Fuente Autores	62
3.24. Esquema de conexión y medición para la impedancia $Z_{fao}(s)$. Fuente Autores	63
4.1. Identificación de la corriente I_{FSI} e I_{FG} . Fuente Autores	66
4.2. Diagrama de Bode de la Impedancia Z_d . Fuente Autores	70
4.3. Diagrama de Bode de la Inductancia L_d . Fuente Autores	71
4.4. Diagrama de Bode de la función de transferencia $sG(s)$. Fuente Autores	72

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	10
4.5. Diagrama de Bode de la impedancia Z_{af0} . Fuente Autores	73
4.6. Diagrama de Bode de la impedancia Z_q . Fuente Autores	74
4.7. Diagrama de Bode de la inductancia L_q . Fuente Autores	75
4.8. Curva ajustada para la magnitud de Z_{af0} . Fuente Autores	78
4.9. Curva ajustada para la función de transferencia de L_d . Fuente Autores	80
4.10. Curva ajustada para la función de transferencia de L_q . Fuente Autores	81

Índice de Tablas

4.1. Mediciones del ensayo X_0	67
4.2. Resultados del ensayo de Secuencia Cero.	67
4.3. Resultados del Cortocircuito Trifásico Súbito para cada fase.	68
4.4. Resultados del Cortocircuito Trifásico Súbito para la Máquina Síncrona.	69
4.5. Resultados del SSFR para el eje d	82
4.6. Resultados del SSFR para el eje q	83
4.7. Variación Porcentual de los parámetros de eje d	84

Resumen

La máquina síncrona ha jugado un papel fundamental en los sistemas eléctricos de potencia, es el elemento más utilizado como generador eléctrico. Sin embargo, hoy en día, debido a los grandes avances en la electrónica de potencia, también se habla del motor síncrono. La implementación de controladores lógicos digitales ha impulsado la necesidad de modelar sistemas con mayor precisión que antes. La máquina sincrónica no queda fuera de este grupo, las pruebas clásicas siguen teniendo importancia para la determinación de variables características, ya sea en estado estable o transitorio.

La obtención de parámetros de la máquina sincrónica a través del análisis de respuesta en frecuencia se expone en el presente trabajo. La técnica de la respuesta en frecuencia es una alternativa a los métodos clásicos de ensayos. Se obtienen las impedancias características de la máquina, el rango de frecuencia de análisis es de 10 mHz a 1 kHz. Las variables de cada función de transferencia son obtenidas mediante sensores de corriente y voltaje y una DAQ que se comunica con un computador para el respectivo procesamiento. El voltaje y corriente de ensayo provienen de un circuito amplificador de potencia que fue diseñado para el proyecto. Se realiza un proceso de transformada rápida de Fourier a cada señal adquirida para discernir las frecuencias en análisis. Finalmente, mediante un algoritmo de optimización y ajuste de curvas, se obtienen los parámetros de la máquina síncrona.

También se realizan ensayos de estado estable, cortocircuito trifásico súbito y de secuencia cero para contrastarlos con los obtenidos mediante la respuesta en frecuencia. El proyecto propuesto evidencia que los datos obtenidos para la máquina síncrona guardan coherencia y similitud con los derivados por métodos clásicos.

Abstract

The synchronous machine has played a fundamental role in electrical power systems, it is the element most used as an electrical generator. However, nowadays, due to great advances in power electronics, there is also talk of the synchronous motor. The implementation of digital logic controllers has driven the need to model systems with greater precision than before. The synchronous machine is not left out of this group, the classical tests continue to be important for the determination of characteristic variables, whether in steady or transitory state.

Obtaining parameters of the synchronous machine through frequency response analysis is exposed in the present work. The frequency response technique is an alternative to classical test methods. The characteristic impedances of the machine are obtained, the analysis frequency range is from 10 mHz to 1 kHz. The variables of each transfer function are obtained by current and voltage sensors and a DAQ that communicates with a computer for the respective processing. The test voltage and current come from a power amplifier circuit that was designed for the project. A fast Fourier transform process is performed on each acquired signal to discern the frequencies under analysis. Finally, by means of an optimization and curve fitting algorithm, the parameters of the synchronous machine are obtained.

Steady-state, sudden triphasic short-circuit and zero-sequence tests are also performed to contrast them with those obtained by frequency response. The proposed project shows that the data obtained for the synchronous machine are consistent and similar to those derived by classical methods.

Capítulo 1

Introducción

El presente capítulo detalla los objetivos, justificación y necesidades que orientaron el interés por realizar el análisis de respuesta en frecuencia (SSFR) de la máquina síncrona. Inicialmente se describe el problema, los objetivos y contribuciones científicas en relación a este trabajo.

1.1. Antecedentes

Ecuador posee un gran potencial de energías renovables como la fotovoltaica, eólica e hidráulica. Esto debido a su gran potencial de radiación, condiciones constantes de velocidad del viento y su hidrografía [3]. En los últimos años, Ecuador ha experimentado un cambio de su matriz energética, siendo la energía hidroeléctrica la más destacada [4]. La máquina síncrona tiene un papel fundamental en los diferentes tipos de centrales, lo que proyecta caminos investigativos o de desarrollo de procesos de análisis para las máquinas síncronas.

El análisis de la máquina sincrónica desde hace mucho tiempo ha estado enfocado a la determinación de reactancias y constantes de tiempo: reactancias síncronas, transitorias y subtransitorias; y las constantes de tiempo de circuito abierto, cortocircuito, transitorias y subtransitorias como dicta la Norma ANSI/IEEE Std 115-2019 [5].

La Norma IEEE Std. 115, se ha enfocado en analizar maquinas síncronas con rotor liso, pero con algunas consideraciones practicas este método pue-

de aplicarse para maquinas síncronas de polos salientes, dichas maquinas son muy utilizadas en centrales hidroeléctricas como generadores o para motores síncronos en la industria [6] [7] [8].

El ensayo **SSFR** es adoptado como una alternativa a la prueba de cortocircuito brusco para hallar los parámetros de la máquina síncrona [9]. La cantidad y la exactitud de los datos de la máquina permiten obtener algoritmos de control moderno, modelos y otras aplicaciones, de allí la importancia de la adquisición de los datos de la máquina [10] [11]. La prueba de cortocircuito brusco proporciona información de los modelos de segundo orden en el eje directo mientras que el **SSFR** da como resultado parámetros del eje directo y de cuadratura [12].

En otros países el método **SSFR** es utilizado debido a que las pruebas se hacen en el sitio y con muy poco riesgo para la máquina en análisis. Existen recomendaciones con especificaciones teóricas y técnicas para determinar parámetros mediante este tipo de ensayos, tal como el estándar IEEE Std. 115 [5] y diversas experiencias alrededor del mundo [13] [14] [15] [16]. Por lo tanto, se propone implementar este nuevo y novedoso análisis en Ecuador.

1.2. Propuesta de Investigación

Determinar parámetros de la máquina síncrona mediante el ensayo **SSFR** y validar los resultados con los métodos clásicos.

1.2.1. Objetivo general

Determinar y validar los parámetros de la maquina síncrona mediante el **SSFR** comparados con pruebas de cortocircuito brusco.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar máquinas sincrónicas de polos salientes y rotor liso considerando devanados amortiguadores para poder ser utilizados en análisis de cortocircuito y respuesta en frecuencia.
- Reproducir con los modelos desarrollados de las máquinas sincrónicas los ensayos de cortocircuito y respuesta en frecuencia.

- Utilizar los resultados de los modelos y los ensayos realizados para determinar los parámetros subtransitorios, transitorios y de régimen permanente, mediante la respuesta en frecuencia y el cortocircuito brusco mediante técnicas de estimación paramétrica.
- Realizar cortocircuitos bruscos en una máquina sincrónica en el laboratorio y determinar los parámetros correspondientes mediante este ensayo.
- Utilizar la respuesta en frecuencia para determinar los parámetros de la misma máquina sincrónica disponible en el laboratorio, utilizando las técnicas de estimación paramétrica desarrolladas en la modelación.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos mediante ambas técnicas.

1.3. Organización del manuscrito

El capítulo 1 presenta la exposición del problema y objetivos del trabajo de titulación. El capítulo 2 presenta la fundamentación teórica de la máquina sincrónica, y la metodología clásica de los tres ensayos realizados en ella: Ensayos de RP, Cortocircuito Trifásico Súbito, y Respuesta en Frecuencia (SSFR). En el capítulo 3 se muestra el proceso de ajuste de los datos obtenidos en laboratorio para obtener los parámetros de la máquina sincrónica. En el capítulo 4 se presentan y contrastan los datos obtenidos de los tres ensayos realizados. Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo de titulación.

Capítulo 2

Marco Teórico y Metodología de Trabajo

2.1. Introducción

En este capítulo se describe el modelo de la máquina síncrona. Se revisa los distintos métodos clásicos de determinación de parámetros de la máquina síncrona como son: los ensayos de régimen permanente, determinación de inductancias y los ensayos en régimen transitorio. Finalmente se revisa el análisis de respuesta en frecuencia de máquinas síncronas.

2.2. La Máquina Síncronica

Para una eficaz y eficiente operación del [Sistema eléctrico de potencia \(SEP\)](#) se necesita una gran cantidad de potencia y energía eléctrica, la energía eléctrica se obtiene luego de un proceso de transformación de energía primaria. Para esta tarea la Máquina Síncrona en su uso como generador es el convertidor más utilizado en la actualidad, esto debido al elevado rendimiento que se puede alcanzar y la facilidad de controlar el voltaje [1].

Las máquinas síncronas pueden tener rotor liso para trabajar a velocidades altas y rotor con polos salientes para bajas velocidades, dependiendo fundamentalmente del sistema mecánico de accionamiento. La máquina síncrona es completamente reversible, pudiendo trabajar como generador o motor. Actualmente la aplicación de la máquina síncrona se incrementa debido a que se

obtiene grandes ventajas operativas cuando se controla mediante fuentes electrónicas de tensión y frecuencia variable [1].

Las partes de la máquina síncrona son, el rotor que es la parte rotativa y el estator la parte fija. Es necesario corriente continua para excitar el bobinado del rotor y que de tal manera por los bobinados del estator circulen corrientes alternas. Gracias a las corrientes alternas que circulan por las bobinas del estator se produce en el entrehierro de la máquina un campo magnético giratorio que rota a la frecuencia angular de las corrientes de la armadura. Por su parte, el rotor tiene que girar a igual velocidad que el campo magnético rotativo del estator con el objetivo que el par eléctrico medio sea diferente de cero, por tal motivo la máquina lleva el nombre de síncrona [1].

En estado estable, mecánicamente el rotor gira a idéntica frecuencia del campo magnético rotativo del estator. En estas condiciones, sobre el bobinado del campo no se genera fuerza electromotriz. Por esta razón, para producir la fuerza magnetomotriz en el rotor es preciso dotar de corriente a este bobinado a través de una fuente exterior (corriente continua). De esta manera se obtienen dos campos magnéticos rotativos: uno producido por el campo y otro por la armadura que rotan a igual velocidad. Estos campos al interactuar producen par eléctrico medio y produciéndose la mutación electromecánica de energía [1].

Para que el par medio de la máquina no sea nulo, necesariamente pero no suficientemente se debe cumplir la siguiente expresión [1]:

$$\omega_e = p \cdot \omega_m, \quad (2.1)$$

donde:

p = pares de polos de la máquina síncrona.

En la Fig. 2.1 se muestra la máquina síncrona que se dispone en la UPS sede Cuenca, en la cual se desarrollaron los distintos ensayos clásicos y el SSFR propuesto en este trabajo. En la Fig. 2.2 se observa un diagrama de la máquina síncrona con rotor de polos salientes [1].



Figura 2.1: Máquina síncrona del Laboratorio. Fuente Autores.

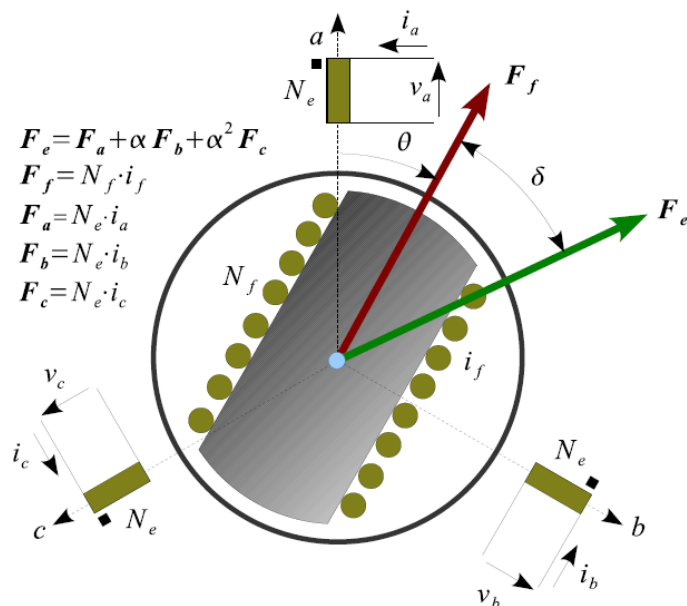


Figura 2.2: Diagrama de la máquina síncrona de polos salientes [1].

La siguiente expresión representa la magnitud del par de una máquina síncrona [1].

$$T_e = k \cdot F_r \cdot F_e \cdot \sin \delta, \quad (2.2)$$

donde:

k : constante de proporción que depende de la parte constructiva de la máquina y la disposición de las bobinas.

F_e : Fuerza magnetomotriz del estator o armadura.

F_r : Fuerza magnetomotriz del rotor o campo.

δ : es el ángulo entre las fuerzas magnetomotrices del estator y rotor, llamado también ángulo de carga.

La F_e y F_r son de amplitud constante, y para que el par medio sea constante, el ángulo δ debe ser igual en la operación en estado estable, para lograrlo, F_e y F_r deben rotar a igual velocidad angular [1].

2.2.1. Modelo de la Máquina Síncrona

El modelo de la máquina síncrona a continuación presentado se desarrolla de acuerdo a [1]. Según el proceder de los ejes eléctricos de la máquina síncrona en los sistemas de coordenadas correspondiente a los bobinados físicos o reales, cumple el sistema de ecuaciones siguiente:

$$[v_{abc,f}] = [R_{abc,f}] [i_{abc,f}] + \frac{d}{dt} [\lambda_{abc,f}] \quad (2.3)$$

La conexión entre las corrientes de los bobinados y los enlaces de flujos que las enlazan, en coordenadas lineales, se representa con la expresión siguiente :

$$[\lambda_{abc,f}(\theta, i)] = [L_{abc,f}] [i_{abc,f}] \quad (2.4)$$

Reemplazando la ecuación 2.4 en la expresión 2.3, se obtiene como resultado:

$$[v_{abc,f}] = [R_{abc,f}] [i_{abc,f}] + [L_{abc,f}] \frac{d}{dt} [i_{abc,f}] + \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{dt} [L_{abc,f}] [i_{abc,f}] \quad (2.5)$$

$$[v_{abc,f}] = [R_{abc,f}] [i_{abc,f}] + [L_{abc,f}] p [i_{abc,f}] + \dot{\theta} \cdot [\tau_{abc,f}] [i_{abc,f}] \quad (2.6)$$

El sistema de ecuaciones diferenciales 2.6 representa la dinámica de los bobinados de la máquina síncrona en coordenadas primitivas, el sistema expresado de manera canónica queda:

$$p [i_{abc,f}] = [L_{abc,f}]^{-1} \{ [v_{abc,f}] - [[R_{abc,f}] + \dot{\theta} \cdot [\tau_{abc,f}]] [i_{abc,f}] \} \quad (2.7)$$

La matriz $[L_{abc,f}]$ depende de la posición relativa (θ) del campo con respecto a la armadura, si la velocidad es constante, la posición angular del campo es:

$$\theta = \theta_0 + \omega_m t \quad (2.8)$$

La postura angular del rotor es una variable de estado nueva cuando la rapidez angular de la máquina cambia, por este motivo es necesario añadir una expresión al sistema 2.7 para analizar el funcionamiento dinámico del eje mecánico de la máquina síncrona.

$$\frac{1}{2} [i_{abc,f}]^t = [\tau_{abc,f}] [i_{abc,f}] - T_m = J\ddot{\theta} + \alpha\dot{\theta} \quad (2.9)$$

La ecuación diferencial 2.9, puede escribirse mediante dos ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{1}{2} [i_{abc,f}]^t = [\tau_{abc,f}] [i_{abc,f}] - T_m = J\ddot{\theta} + \alpha\dot{\theta} \quad (2.10)$$

$$\dot{\theta} = \omega_m \quad (2.11)$$

donde:

J = momento de inercia del campo.

T_m = par mecánico resistente.

α = coeficiente de rozamiento mecánico.

La unión del sistema de ecuaciones diferenciales 2.7, 2.10 y 2.11, definen el funcionamiento dinámico y transitorio total de la máquina síncrona. Este sistema de ecuaciones es no lineal, y los coeficientes son variantes en el tiempo. Por tal motivo, es necesario asistir a métodos numéricos para analizar el funcionamiento de la máquina, otra opción es reducir el problema mediante técnicas de cambio de coordenadas [1].

2.2.2. Transformación de Park

El cambio de coordenadas de Park del modelo de la máquina síncrona es analizado según [1], [17], [18]. En la máquina síncrona, tanto el campo magnético rotativo producido por las fuerzas magnetomotrices del estator, como el rotor, giran a velocidad síncrona ($\omega_r = \omega_e$), por lo que es necesario relacionar las expresiones del modelo de la máquina a un conjunto de coordenadas que sean amigables con el campo o rotor; por lo tanto se definen los ejes siguientes.

d : Rota a la rapidez del rotor con respecto al estator, siempre está en la misma dirección con respecto al eje del campo.

q : Rota a la rapidez del rotor con respecto al estator, siempre está a noventa grados con respecto al eje del campo.

0 : Firme en el estator y está desvinculado del resto de ejes.

f : Generoso con el sistema rotórico y en el mismo sentido que el eje de la bobina de rotor.

Los ejes d y q rotan a la misma velocidad del rotor, sin embargo, representan también variables del estator, el eje 0 permite que la transformación sea en dos direcciones, es decir, mudar de variables primitivas a $dq0$ y viceversa.

La matriz de cambio de coordenadas $dq0 - f$ a coordenadas primitivas se determina con la expresión siguiente:

$$[i_{abc,f}] = [A] [i_{dq0,f}] \quad (2.12)$$

Si la matriz de cambio $[A]$ es hermitiana, la transición sería conservativa de potencia. Si la matriz A es hermitiana y real, se consigue:

$$[i_{dq0,f}] = [A]^{-1} [i_{abc,f}] = [A]^t [i_{abc,f}] \quad (2.13)$$

La matriz de transformación [A] es resultado del producto de la transformación de coordenadas primitivas a ortogonales $\alpha\beta 0$ y la transformación de coordenadas $\alpha\beta 0$ a $dq0$.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

El cambio de coordenadas primitivas abc, f a $dq0, f$ es:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 0 \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La transformada de Park es hermitiana.

$$\begin{aligned} p(t) &= [v_{abc,f}]^t [i_{abc,f}] = [A] [v_{abc,f}]^t [A] [i_{dq0,f}] = \\ &= [v_{dq0,f}]^t [A]^t [A] [i_{dq0,f}] = [v_{dq0,f}]^t [i_{dq0,f}] = p(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Al aplicar la transformación de Park 2.17 al modelo dinámico de la máquina síncrona representado por el sistema de ecuaciones 2.6 se obtiene:

$$[v_{dq0,f}] = [R_{dq0,f}] [i_{dq0,f}] + [L_{dq0,f}] p [i_{dq0,f}] + \dot{\theta} \cdot [G_{dq0,f}] [i_{dq0,f}] \quad (2.19)$$

donde:

$$[R_{dq0,f}] = [A]^t [R_{abc,f}] [A] \quad (2.20)$$

$$[L_{dq0,f}] = [A]^t [L_{dq0,f}] [A] \quad (2.21)$$

$$[G_{dq0,f}] = [\tau_{dq0,f}] + [H_{dq0,f}] = [A]^t [\tau_{abc,f}] [A] + [A]^t [R_{abc,f}] \frac{d}{d\theta} [A] \quad (2.22)$$

La expresión que representa la dinámica del movimiento se puede enunciar como:

$$J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} = \frac{1}{2} [i_{dq0,f}]^t [\tau_{dq0,f}] [i_{dq0,f}] - T_m \quad (2.23)$$

Evaluando explícitamente las ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.23 y sustituyendo en la expresión 2.19, se alcanza el modelo de la máquina en coordenadas $dq0-f$ [1].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + L_d p & -\omega L_q & 0 & L_{df} p \\ -\omega L_d & R_e + L_q p & 0 & \omega L_{df} \\ 0 & 0 & R_0 + L_0 p & 0 \\ L_{df} p & 0 & 0 & R_f + L_f p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$Jp\omega = (L_d - L_q) i_d i_f + L_{df} i_q i_f - p\omega - T_m$$

En la expresión 2.24 no se consideran fuerzas electromotrices de generación en el bobinado de campo, esto debido a que las coordenadas $dq0-f$ son amigables con el eje del campo. Los flujos de los bobinados no atraviesan de manera tangencial a los conductores del campo.

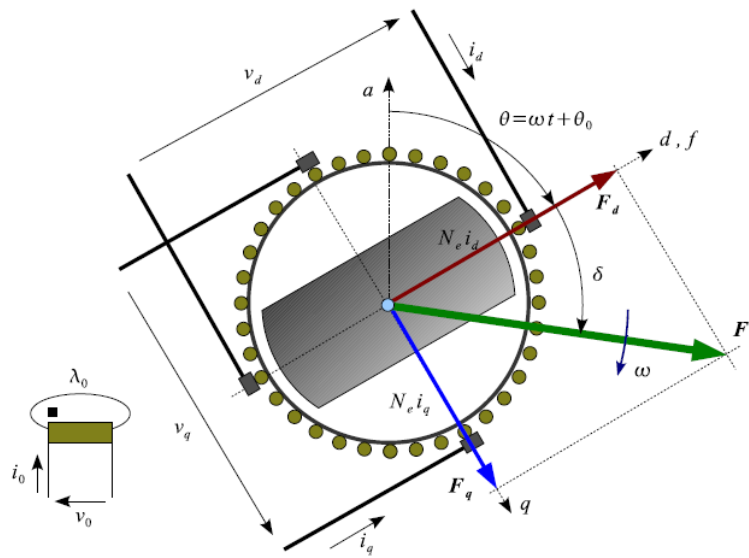


Figura 2.3: Modelo de la máquina síncrona en coordenadas $dq0 - f$ [1]

La Fig. 2.3 se encuentra representado el modelo de la máquina síncrona en coordenadas $dq0 - f$. Las intensidades i_d e i_q no transitan por ningún devanado físico, para encontrar las intensidades reales se debe aplicar el cambio a coordenadas primitivas o también llamada la transformada inversa de Park [1].

2.3. Determinación de parámetros por métodos clásicos

2.3.1. Ensayos de RP: Característica a Vacío

El ensayo de RP en vacío se detalla en la Norma IEEE Std 115-2019, en su sección 5.1.1 [2]. El ensayo consiste en arrancar la máquina síncrona en circuito abierto hasta llegar a la velocidad nominal y tomar valores de voltaje de armadura, corriente de campo y la frecuencia o rapidez del eje del rotor.

Los datos deben ser adquiridos de la siguiente forma o con el siguiente procedimiento:

Se deben medir o adquirir seis datos por debajo del voltaje nominal de armadura.

Adquirir datos cada 5 % desde el 60 % al 110 % del voltaje nominal de armadura. Este es un rango crítico y se debe obtener el mayor número de datos como lo permita el circuito de excitación de la máquina. Como mínimo diez datos.

Por encima del 110 %, se deben medir dos datos, siendo uno de ellos a 120 % de la corriente de campo, sin carga nominal.

En voltaje nominal, se debe comprobar el equilibrio en las tres fases del estator. Los datos deben ser medidos en condiciones constantes de excitación y velocidad, con el mismo instrumento de medición.

Los datos para esta prueba deben medirse con excitación progresivamente creciente, permitiendo que la máquina funcione por lo menos dos minutos en cada momento de prueba para estabilizar la rapidez en el valor nominal, excepto en los puntos por encima de los 110 % del voltaje nominal.

La recta del entrehierro comienza desde el origen y sigue la parte lineal inferior, hasta más allá de la parte no lineal de la recta de saturación a vacío.

2.3.2. Ensayos de RP: Característica de Cortocircuito

La característica de cortocircuito para ensayos de RP de la máquina síncrona se obtiene según la Norma IEEE Std 115-2019, en su sección 5.1.3 [2]. Esta prueba se realiza con la máquina a velocidad nominal y el estator o inducido en cortocircuito, en donde las corrientes de armadura y de campo tienen que ser registradas. Los registros deben realizarse para valores que van desde el 25 % hasta el 125 % de la corriente de excitación en intervalos cada 25 %.

El valor de corriente de prueba debe obtenerse del fabricante, aunque en la mayoría de casos se establece al 125 % de la intensidad nominal. En el valor de la intensidad nominal se deben registrar los valores de las intensidades de las tres fases para verificar el equilibrio actual de la máquina.

Las pruebas se realizan con corriente de excitación decreciente, empezando con un valor que da como resultado la máxima corriente de armadura, todo

esto con el objetivo de mantener constante la temperatura del devanado de armadura.

En la Fig. 2.4, se muestran las curvas de saturación de cortocircuito y circuito abierto, la recta del entrehierro y la curva de corriente de saturación de la máquina síncrona.

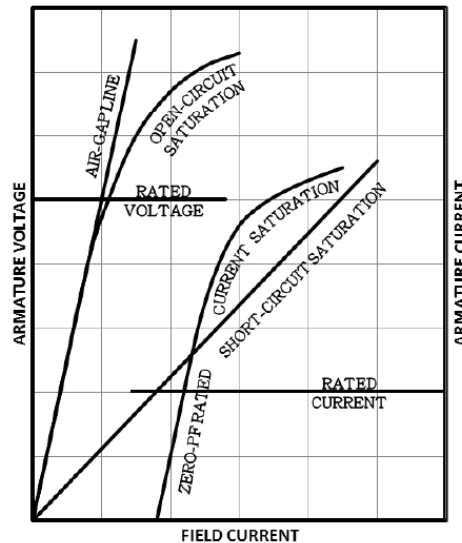


Figura 2.4: Curvas de saturación de la máquina síncrona [2]

2.3.3. Ensayos de Reactancia de Secuencia Cero, X_0

El ensayo de reactancia de secuencia cero de la máquina síncrona se presenta en la Norma IEEE Std 115-2019 en su sección 10.6.1 [2]. La reactancia de secuencia cero es la relación entre la componente fundamental de la tensión reactiva del inducido y la componente de la intensidad del inducido a velocidad nominal de la máquina.

La reactancia de secuencia cero X_0 , tiene influencia ya que limita corrientes de cortocircuito al interior de las bobinas.

El valor de la reactancia de secuencia cero cambia dependiendo del valor de la corriente, si este es menor o similar a la intensidad nominal de la máqui-

na, el valor de la reactancia de secuencia cero varía levemente. Caso contrario, si el valor de la reactancia de secuencia cero varía considerablemente con la corriente de prueba de la máquina, se puede representar en un gráfico, como una función entre la intensidad de secuencia cero y el valor de la intensidad nominal obtenida a partir de la curva.

La reactancia de secuencia cero puede ser obtenida mediante los métodos siguientes:

- Circuito Paralelo
- Circuito Serie
- Cortocircuito sostenido

Método de circuito paralelo

Con los neutros de los devanados y los tres terminales de línea instalados entre sí, de forma que las tres fases estén en paralelo, se aplica una tensión alterna monofásica al paralelo de las bobinas, como se muestra en la Fig. 2.5.

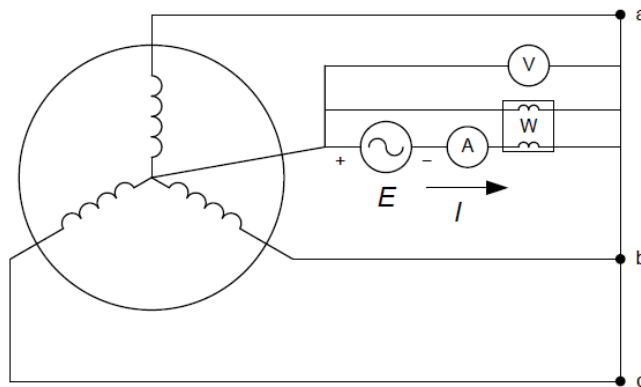


Figura 2.5: Método de circuito paralelo para la reactancia de secuencia cero X_0 [2].

Para varios valores de voltaje que produzcan tres veces o más la corriente nominal, se recogen datos de corriente y voltaje. Se recomienda utilizar la

barra de cortocircuito dada por el fabricante para los terminales de línea y no cables, por lo que, lo ideal sería realizar esta prueba después de la prueba de la curva de saturación en cortocircuito de la máquina.

$$Z_0 = \frac{3E}{I}, \quad (2.25)$$

donde:

Z_0 es la impedancia de secuencia cero.

E es el voltaje de prueba en pu

I es la corriente de prueba total en pu

Con la expresión 2.25 se calcula la impedancia de secuencia cero.

En la mayoría de los casos se considera el valor de la impedancia de secuencia cero como el valor de la reactancia de secuencia cero. En cambio, para pequeñas máquinas es necesario una corrección por resistencia. La resistencia del inducido es relativamente grande o la reactancia de secuencia cero es relativamente pequeña.

$$X_0 = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{P}{EI}\right)^2}, \quad (2.26)$$

donde:

X_0 es la reactancia de secuencia cero.

P es la potencia de prueba en pu (lectura del vatímetro).

La expresión 2.26, se utiliza para encontrar la reactancia de secuencia cero X_0 , considerando la corrección por resistencia.

Método de circuito en serie

Para este método las tres boninas de las fases se instalan en serie como indica la Fig. 2.6. Se aplica una tensión alterna monofásica y se adquieren varios registros de corriente y voltaje hasta llegar a la corriente nominal de la máquina. Es necesario registrar la potencia para determinar la resistencia de secuencia cero y aplicar la corrección de resistencia.

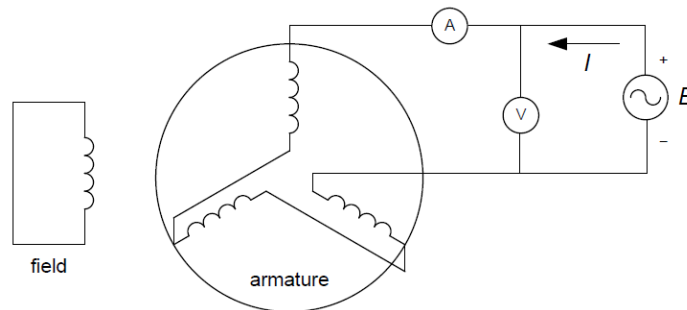


Figura 2.6: Método de circuito en serie para la reactancia de secuencia cero X_0 [2].

$$Z_0 = \frac{3E}{I}, \quad (2.27)$$

La impedancia de secuencia cero para el ensayo en serie, se puede obtener mediante la expresión 2.27. En caso de requerir la corrección por resistencia se utiliza la expresión 2.26.

Método de cortocircuito sostenido

La máquina se acciona a rapidez nominal con un cortocircuito sostenido de dos líneas al neutro como se observa en la Fig. 2.7. Se registran los voltajes en la línea abierta al neutro y las corrientes en las líneas cortocircuitadas al neutro. La excitación del campo se ajusta para obtener los registros de corriente nominal y si es factible hasta tres veces la intensidad nominal de la máquina.

En caso de requerir corrección de resistencia o encontrar la resistencia de secuencia cero se debe registrar la potencia obtenida a partir de los voltajes y corrientes del ensayo.

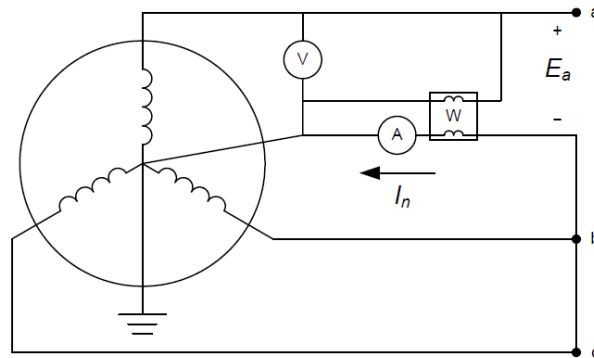


Figura 2.7: Método de cortocircuito sostenido para la reactancia de secuencia cero X_0 [2].

$$Z_0 = \frac{E_a}{I_n}, \quad (2.28)$$

donde:

Z_0 es la impedancia de secuencia cero.

E_a es el voltaje de línea a neutro en la fase abierta en pu.

I_n es la corriente al neutro en pu.

$$X_0 = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{P_{an}}{E_a I_n} \right)^2}, \quad (2.29)$$

donde:

X_0 es la reactancia de secuencia cero.

P_{an} es la potencia de prueba en pu (lectura del vatímetro).

La impedancia de secuencia cero se obtiene con la expresión 2.28. En caso de requerir una corrección de resistencia se aplica la expresión 2.29.

2.3.4. Ensayos de régimen transitorio: Cortocircuito Trifásico Súbito

El ensayo de cortocircuito súbito de la máquina síncrona se detalla en la Norma IEEE Std 115-2019 en su sección 11.4.1 [2]. Esta prueba se realiza con la máquina operando a circuito abierto, inicialmente a velocidad constante y a voltaje de armadura constante. El ensayo inicia al producir un cortocircuito simultáneo a los devanados estatóricos, manteniéndose hasta que las corrientes transitorias hayan alcanzado condiciones de régimen permanente muy bien definidas. Se debe tener muy en cuenta la conexión de la máquina, si es en estrella o en triángulo, debido a que existen muchas diferencias en los resultados de acuerdo al tipo de conexión.

El tamaño del equipo de conmutación para este ensayo debe ser dimensionado en base al valor pico de las corrientes transitorias y el voltaje de armadura de la máquina síncrona. Esta prueba se puede realizar con el sistema de excitación estándar de la máquina. En caso de que el sistema de excitación de la máquina sea alimentado con los terminales de la máquina es necesario una fuente externa alternativa para alimentar el sistema de excitación.

En este ensayo es necesario registrar o adquirir los siguientes datos:

- Voltaje de armadura en estado estable (fase-fase o fase-neutro).
- Corrientes trifásicas durante el cortocircuito hasta que alcance una condición de estado estable.
- Voltaje de excitación del devanado de campo.

La reactancia síncrona X_d , la reactancia transitoria X'_d , la reactancia subtransitoria X''_d , la constante de tiempo de cortocircuito transitorio T'_d y la constante de tiempo de cortocircuito subtransitorio T''_d , se utilizan para describir la operación de la máquina síncrona luego de un cortocircuito súbito.

Para la componente de corriente alterna luego de un cortocircuito trifásico y sin carga, el cálculo puede ser realizado mediante la expresión:

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sqrt{2}E \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{\frac{-t}{T''_d}} \right] = \\
 &= \sqrt{2} \left[I_{ss} + I'_{d0} e^{\frac{-t}{T'_d}} + I''_{d0} e^{\frac{-t}{T''_d}} \right] = \sqrt{2} [I_{ss} + I'_d(t) + I''_d(t)]
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

donde:

$I(t)$: son los valores máximos variables en el tiempo (curva envolvente) de la componente AC de la corriente de cortocircuito, en amperios.

E : es el voltaje RMS en AC antes del cortocircuito, en voltios.

t : tiempo de cortocircuito, en segundos.

I_{ss} : es la componente RMS en estado estacionario de la corriente $I(t)$, en amperios.

$I'_d(t)$: es la componente transitoria de la corriente $I(t)$, en amperios.

$I''_d(t)$: es la componente subtransitoria de la corriente $I(t)$, en amperios.

$I'_{d0}(t)$: es el valor inicial de la componente transitoria de la corriente $I(t)$, en amperios.

$I''_{d0}(t)$: es el valor inicial de la componente subtransitoria de la corriente $I(t)$, en amperios.

$I_{dc0}(t)$: es la componente DC inicial de la corriente $I_{dc}(t)$, en amperios.

X_d : es la reactancia síncrona de eje directo, en ohmios.

X'_d : es la reactancia transitoria de eje directo, en ohmios.

X''_d : es la reactancia subtransitoria de eje directo, en ohmios.

X''_q : es la reactancia subtransitoria de eje de cuadratura, en ohmios.

T'_d : es la constante de tiempo transitoria de cortocircuito de eje directo, en segundos.

T_d'' : es la constante de tiempo subtransitoria de cortocircuito de eje directo, en segundos.

T_a : es la constante de tiempo de armadura en el cortocircuito trifásico súbito, en segundos.

En la expresión 2.30, se desprecian las resistencias del circuito del inducido y se asume un voltaje constante de campo. La componente DC de la corriente de cortocircuito se obtiene a partir del término constante de la expresión 2.30, y se representa mediante,

$$I_{dc}(t) = \sqrt{2}E \left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) e^{\frac{-t}{T_a}} = \sqrt{2}I_{dc0} e^{\frac{-t}{T_a}} \quad (2.31)$$

La reactancia transitoria de eje directo se calcula partiendo de las lecturas de corriente del cortocircuito trifásico súbito aplicado a la máquina que se encuentra en circuito abierto y a velocidad nominal. La reactancia transitoria de eje directo es similar a la relación entre la tensión de circuito abierto y la intensidad de armadura encontrada por extrapolación de la envolvente de la componente AC de la onda de corriente de armadura. Las Figuras 2.8 y 2.9 muestran el enfoque gráfico asociado para la determinación de la reactancia transitoria y subtransitoria de eje directo.

La reactancia subtransitoria de eje directo se resuelve a partir de la misma prueba de cortocircuito súbito, los valores de la diferencia de la curva B y la línea C que es la componente transitoria son representados en la curva A, la cual es útil para conseguir la componente subtransitoria de la corriente de cortocircuito, todo esto se señala en la Fig. 2.9.

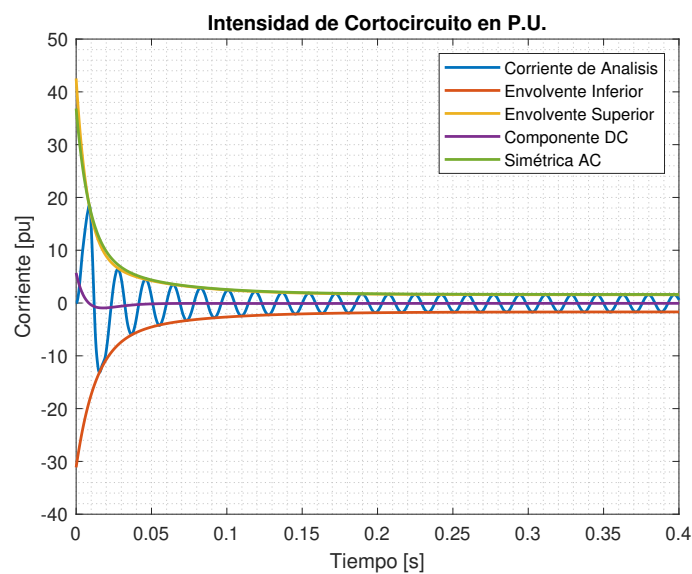


Figura 2.8: Oscilograma del cortocircuito súbito trifásico. Fuente Autores.

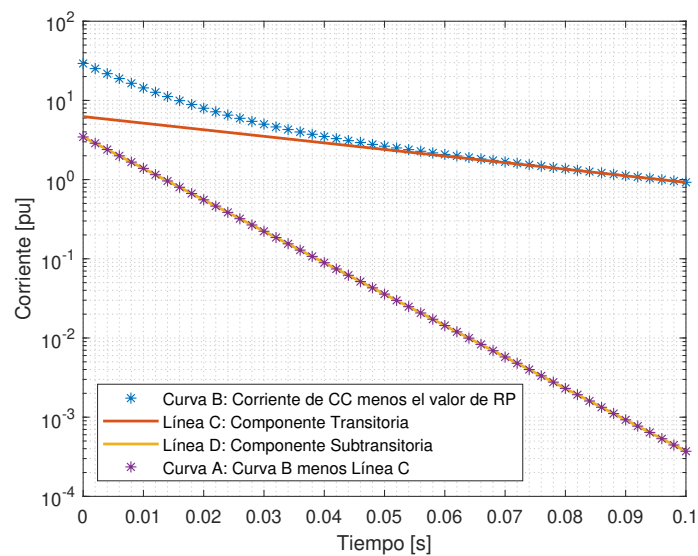


Figura 2.9: Análisis de la componente CA de la corriente de cortocircuito. Fuente Autores

2.4. Respuesta en frecuencia de la Máquina Síncrona

Una alternativa a los ensayos clásicos como el de cortocircuito súbito trifásico son los ensayos de respuesta en frecuencia **SSFR**, donde es posible encontrar parámetros de estabilidad con la máquina síncrona en reposo. Este ensayo describe las tasas de cambio de diversas cantidades de estator o campo al dar excitaciones sinusoidales desde frecuencias muy bajas hasta frecuencias mucho más altas de la nominal. El análisis o ensayos **SSFR** se presentan en la Norma IEEE Std 115-2019 en su sección 12 [2].

Con los ensayos **SSFR** es posible determinar respuestas a datos de campo de la máquina síncrona, lo cual es una ventaja notable con respecto al ensayo de cortocircuito súbito. Además, las pruebas se pueden realizar a un costo relativamente bajo, tanto en la fábrica o en el lugar de ubicación (instalación) de la máquina. El ensayo presenta una baja probabilidad de riesgo para la máquina, los datos obtenidos están disponibles tanto en eje directo como de cuadratura.

Con la finalidad de obtener la respuesta de la máquina sincrónica ante pequeñas perturbaciones, se puede expresar los incrementales de los enlaces de flujo como,

$$\Delta\psi_d(s) = G(s) \Delta e_{fd}(s) - L_d(s) \Delta i_d(s) \quad (2.32)$$

$$\Delta\psi_q(s) = -L_q(s) \Delta i_q(s) \quad (2.33)$$

donde:

ψ_d : es el enlace de flujo del estator de eje directo, en por unidad.

ψ_q : es el enlace de flujo del estator de eje de cuadratura, en por unidad.

i_d : es la corriente del estator de eje directo, en por unidad.

i_q : es la corriente del estator de eje de cuadratura, en por unidad.

$I'_d(t)$: es la componente transitoria de la corriente $I(t)$, en amperios.

e_{fd} : es el voltaje de campo de la máquina alrededor de un punto de trabajo particular, por unidad.

Δ : es una pequeña perturbación alrededor de algún punto de operación.

Las perturbaciones en el estator y rotor, alrededor de algún punto de operación involucran parámetros básicos de la función de transferencia, tanto para el eje directo como de cuadratura de la máquina síncrona.

Las ecuaciones 2.32 y 2.33 pueden ser representadas mediante una red de dos puertos para el eje directo y una red de un puerto para el eje de cuadratura. La Fig. 2.10 muestra el diagrama de bloques, recalcando que para el eje de cuadratura se ha colocado un segundo puerto solamente por simetría, dicho puerto no es accesible.

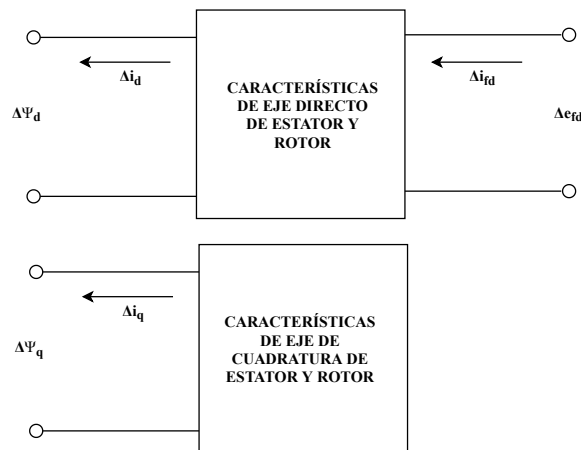


Figura 2.10: Red de dos puertos de eje directo y eje de cuadratura de una máquina síncrona. Fuente Autores.

Es necesario definir algunos parámetros que se encuentran presentes en las expresiones 2.32 y 2.33, se debe tener presente que la variable s de Laplace es compleja, tiene parte real e imaginaria. Es una variable compleja y la integración se puede hacer por muchas trayectorias pero hay que ir desde $s = 0$ hasta $s \rightarrow \infty$, no necesariamente por el eje.

$L_d(s)$: es la inductancia operativa del eje directo. Es la transformada de Laplace de la relación entre los enlaces de flujo de la armadura y la co-

riente de eje directo, con el bobinado de campo en cortocircuito $\Delta e_{fd}(s) = 0$.

$L_q(s)$: es la inductancia operativa del eje de cuadratura. Es la transformada de Laplace de la relación entre los enlaces de flujo de la armadura y la intensidad de eje de cuadratura.

$G(s)$: es la función de transferencia de flujo de armadura de eje directo a voltaje de campo, que es la transformada de Laplace de la relación entre los enlaces de flujo de armadura de eje directo a la tensión de campo, con la armadura a circuito abierto ($\Delta i_d(s) = 0$).

$Z_{af0}(s)$: es la relación entre la transformada de Laplace del voltaje de campo y la corriente del estator de eje directo, con el devanado de campo abierto.

Modelos específicos de la máquina síncrona se pueden desarrollar al analizar las funciones de transferencia descritas previamente. En la Fig. 2.11 se indica el modelo de segundo orden de la máquina síncrona [19].

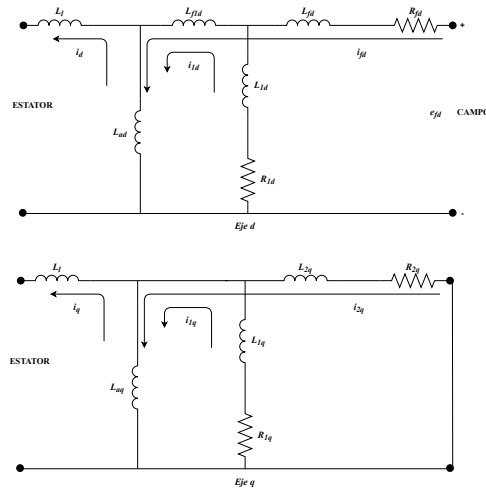


Figura 2.11: Circuito equivalente de segundo orden para una máquina síncrona (eje directo y eje de cuadratura). [2].

En el modelo de la Fig. 2.11, en el eje directo existe una inductancia adicional L_{f1d} , la cual es una inductancia de fuga diferencial. Es igual a la diferencia entre las inductancias mutuas relativamente grandes $L_{f1d} = L_{mf1d} - L_{ad}$. La L_{mf1d} es la mutua entre el devanado de campo y el circuito equivalente del rotor. La L_{ad} es la inductancia mutua entre el devanado de campo y el estator [19].

Las expresiones para los criterios de los circuitos equivalentes de la máquina síncrona de la Fig. 2.11, tanto para el eje directo como para el eje de cuadratura [19], se indican a continuación:

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} \quad (2.34)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} \quad (2.35)$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1 + sT_{kd})}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} \quad (2.36)$$

donde:

$$G_0 = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \quad (2.37)$$

$$T_{kd} = \frac{L_{1d}}{R_{1d}} \quad (2.38)$$

$$T_1 = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}} \quad (2.39)$$

$$T_2 = \frac{L_{ad} + L_{1d}}{R_{1d}} \quad (2.40)$$

$$T_3 = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right) \quad (2.41)$$

$$T_4 = \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{L_{ad} L_l}{L_{ad} + L_l} \right) \quad (2.42)$$

$$T_5 = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad} L_l}{L_{ad} + L_l} \right) \quad (2.43)$$

$$T_6 = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{fd}L_l}{L_{ad}L_l + L_{ad}L_{fd} + L_{fd}L_l} \right) \quad (2.44)$$

Para las expresiones $L_d(s)$, $L_q(s)$ y $G(s)$ es más común utilizarlas en su forma simplificada [19], como muestran las ecuaciones siguientes:

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (2.45)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT'_q)(1 + sT''_q)}{(1 + sT'_{q0})(1 + sT''_{q0})} \quad (2.46)$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1 + sT_{kd})}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1T_3s^2} \quad (2.47)$$

Las ecuaciones 2.45, 2.46 y 2.47 se encuentran simplificadas en cuanto a las constantes de tiempo, teniendo en cuenta que R_{1d} es mucho más grande que R_{fd} , lo cual hace que T_1 sea mucho mayor que T_2 y T_3 y que T_4 sea mucho mayor que T_5 y T_6 [19]. Todo esto conduce a las siguientes aproximaciones:

$$\begin{aligned} T'_{d0} &\approx T_1 \\ T''_{d0} &\approx T_3 \\ T'_d &\approx T_4 \\ T''_d &\approx T_6 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Capítulo 3

Ensayos y Procesamiento

3.1. Introducción

El presente capítulo describe el proceso de obtención de los parámetros de la máquina síncrona mediante cada una de las metodologías en los tres ensayos realizados. Cada prueba ejecutada ofrece información de un conjunto de parámetros en específico. Se inicia desde los ensayos comunes de régimen permanente, se continúa con el método de cortocircuito súbito, y finalmente con el método propuesto de Respuesta en Frecuencia.

3.2. Ensayos en Régimen Permanente

3.2.1. Parámetros en pu de la Máquina Síncrona

Para iniciar los ensayos en máquinas eléctricas, se debe normalizar cada magnitud eléctrica, proceso conocido como sistema adimensional de unidades o por unidad (pu). En primera instancia se definen los valores base. Para el caso de análisis, estos valores corresponden a los datos de placa de la máquina síncrona, tal como se muestra en la Fig. 3.1.

H. BUNGART K.G. Made in Germany VDE 0530						
Typ DM-SN/DG2240 Q-4 B3 IP 21 I.C.I. B						
No. 57116 2GA JEC						
Schaltg. Connect.	V	A	kVA	cos φ	1/min	Erreg. Excit.
D/GEN	230	8,8	3,5	0,95K	1800	110 V-
Y Δ	127	15,2	%ED	0,8 I	60 Hz	2,2 A
Schaltg. Connect.	V	A	kW	cos φ	1/min	Erreg. Excit.
D/MOT	220	10,5	3	0,95K	1800	110 V-
Y Δ	127	18,2	%ED	0,8 I	60 Hz	2,2 A
max. 1800 1/min. Gew./weight 680 N 1977						
BEIM ANLAUF FE LDKURZSCHLUSS						
05 NS 101 DE						

Figura 3.1: Datos de placa de la máquina síncrona bajo estudio. Fuente Autores

$$S_{base} = 3,5 \text{ kVA} \quad (3.1)$$

$$V_{base} = 230 \text{ V} \quad (3.2)$$

$$f_{base} = 60 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base}} = 8,8 \text{ A} \quad (3.4)$$

Aplicando la Ley de Ohm y la teoría de circuitos AC, se obtienen los parámetros base restantes.

$$Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} = 15,1143 \Omega \quad (3.5)$$

$$\omega_{base} = \omega_s = \frac{\omega_e}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{base}}{p} = 94,2478 \text{ rad/s} \quad (3.6)$$

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{\omega_{base}} = 160,3676 \text{ mH} \quad (3.7)$$

3.2.2. Ensayo a vacío de la Máquina Síncrona

Para el ensayo de vacío de la máquina síncrona, se utiliza el circuito descrito en la Fig. 3.2. La máquina síncrona gira con las bobinas del estator en circuito abierto y a velocidad nominal. En este caso, y según datos de placa, a 1800 rpm. El ensayo consiste en incrementar (desde cero) paulatinamente la corriente de excitación (I_{exc}) hasta el valor máximo, y medir la tensión inducida en bornes del generador. Para cada valor de corriente se grafica el valor de tensión de armadura, tal como se muestra en la Fig. 3.3.

Del ensayo se obtiene la curva de vacío o característica de vacío. Esta característica tiene un comportamiento lineal para bajos valores de la corriente de excitación, mientras que para valores más altos de I_{exc} la máquina comienza a saturarse, y por tanto, la *f.e.m.* se incrementa más lentamente al aumentar la corriente de campo. Si la máquina tuviera un circuito magnético ideal, la característica de vacío sería de tipo lineal para todos los valores de la corriente I_{exc} . La característica de vacío ideal, sin saturación magnética, se denomina recta de entrehierro y se obtiene prolongando la parte lineal de la característica de vacío.

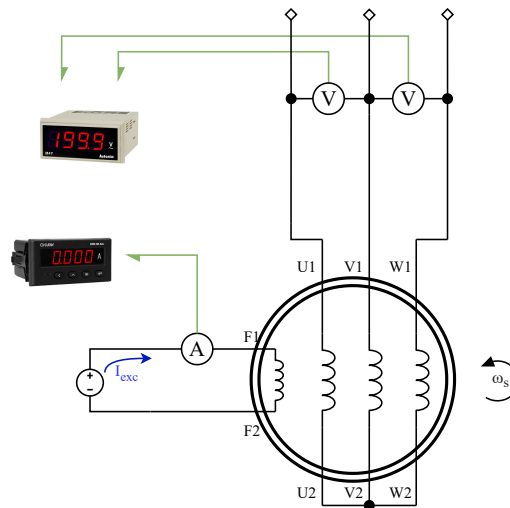


Figura 3.2: Diagrama de conexión y medición para el ensayo de vacío. Fuente Autores

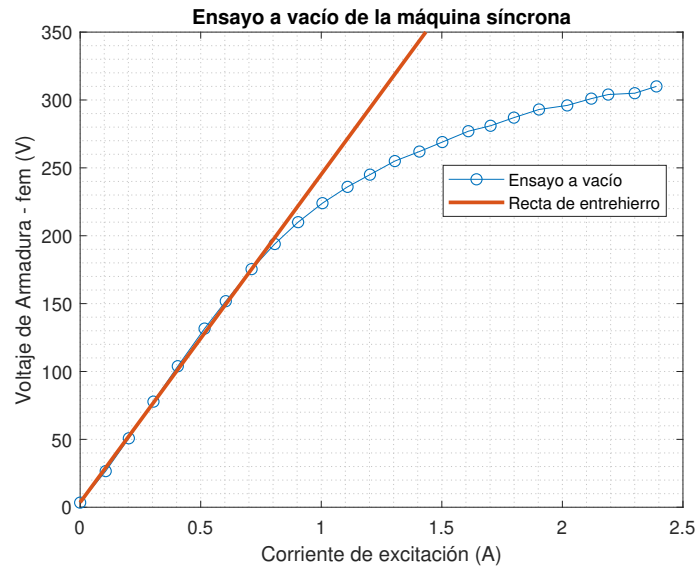


Figura 3.3: Curva de vacío de la máquina síncrona. Fuente Autores

3.2.3. Ensayo en cortocircuito de la Máquina Síncrona

Para realizar el ensayo en cortocircuito de la máquina síncrona, esta debe girar a velocidad nominal, con los bornes de conexión cortocircuitados entre sí y con una corriente de excitación nula. Se incrementa paulatinamente la corriente de excitación hasta lograr una corriente de cortocircuito (I_{cc}) igual a la corriente nominal de la máquina. La Fig. 3.4 muestra el esquema para el ensayo en cortocircuito.

En la Fig. 3.5 se presenta la curva característica de cortocircuito. Esta característica es del tipo lineal, debido a que no existe saturación en la máquina porque las tensiones aplicadas a las bobinas estatóricas son cero y esto implica que el flujo resultante también es nulo.

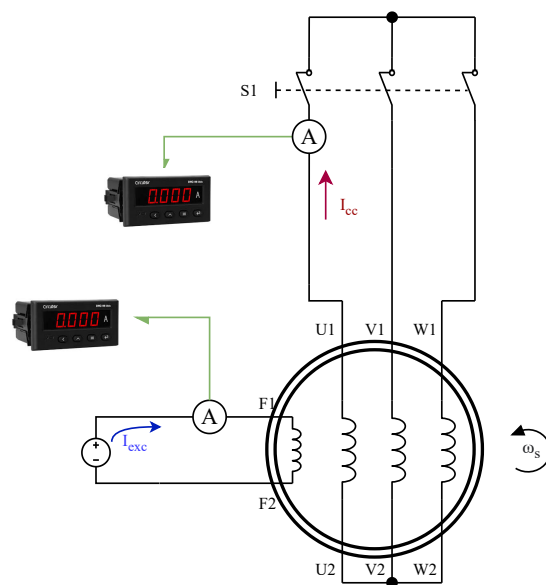


Figura 3.4: Diagrama de conexión y medición para el ensayo en cortocircuito. Fuente Autores

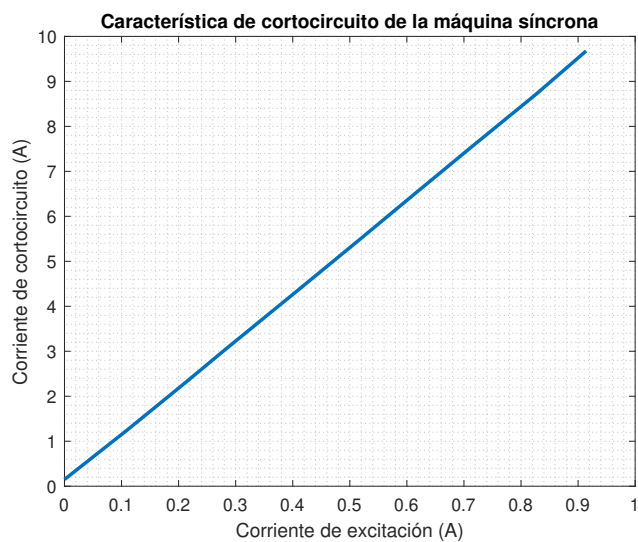


Figura 3.5: Curva de cortocircuito de la máquina síncrona. Fuente Autores

3.2.4. Determinación de la reactancia de secuencia cero, X_0

La reactancia de secuencia cero puede determinarse mediante tres métodos tal como se mencionó en la sección 2.3.3:

- Método 1: Circuito Paralelo.
- Método 2: Circuito Serie.
- Método 3: Cortocircuito Sostenido.

En este trabajo se utilizó el método de circuito en serie. El circuito de adquisición de datos se observa en la Fig. 3.6. Las tres bobinas se conectan en serie, se aplica una tensión alterna de secuencia cero y se miden las magnitudes de voltaje, corriente y potencia. La bobina de campo se encuentra cortocircuitada.

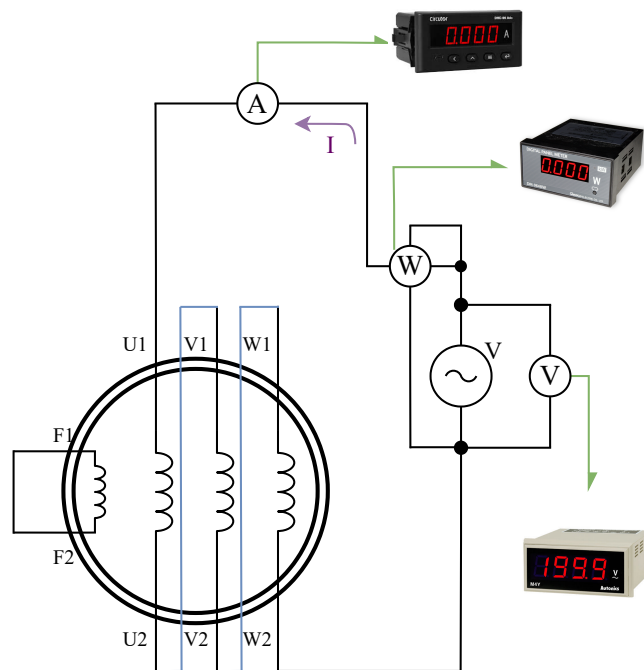


Figura 3.6: Diagrama de conexión para el ensayo de reactancia de secuencia cero. Fuente Autores

3.3. Cortocircuito Trifásico Súbito

En la Fig. 3.8 se observa el diagrama de conexión para la adquisición de las señales de voltaje y corriente en el ensayo de Cortocircuito Trifásico Súbito en la Máquina Síncrona. El proceso de adquisición se realiza mediante la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) «NI USB-6212». Las tensiones y corrientes se obtienen mediante sondas diferenciales de tensión y sondas de corriente de efecto Hall, para luego ser procesadas en el computador mediante un programa realizado en la herramienta Matlab. Se adquieren dos voltajes de línea y dos corrientes de armadura. La tercera corriente y voltaje se obtienen mediante la consideración de sistemas trifásicos balanceados. Para garantizar la frecuencia (f_s) y velocidad síncrona de giro (ω_s), el eje de la máquina síncrona se conecta (y asegura) mecánicamente a un motor DC en conexión paralelo.

Cabe recalcar que debido a la magnitud considerable de la corriente (transitoria) de cortocircuito, fue necesario utilizar transformadores de corriente (TC1 y TC2) para la adquisición de las corrientes de armadura. La Fig. 3.7 muestra la implementación de los equipos en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad.



Figura 3.7: Implementación de equipos para adquisición de datos: Cortocircuito Trifásico Súbito en la Máquina Síncrona. Fuente Autores

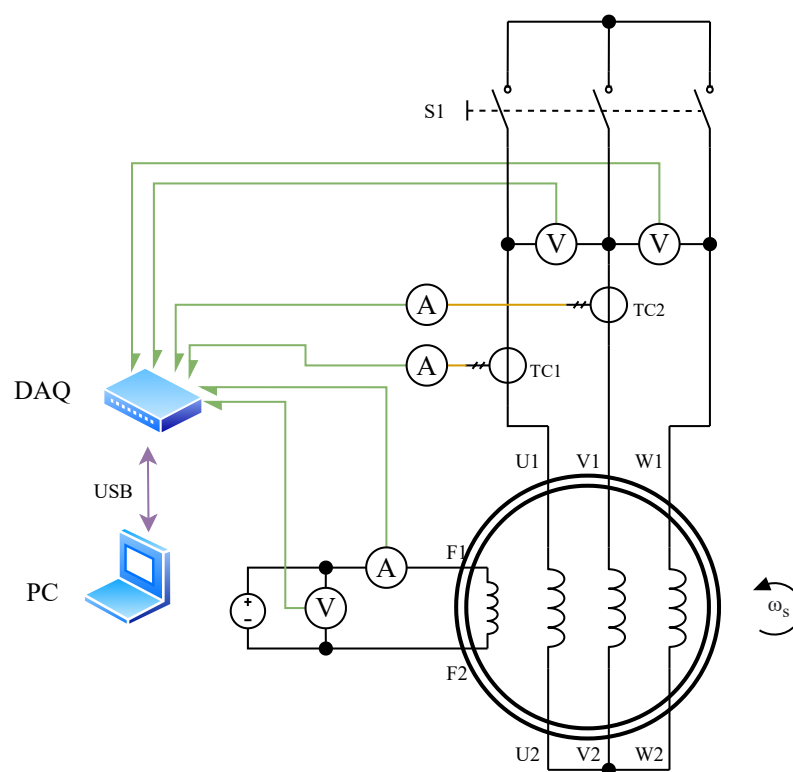


Figura 3.8: Diagrama de Conexión para adquisición de datos: Cortocircuito Tri-fásico Súbito en la Máquina Síncrona. Fuente Autores

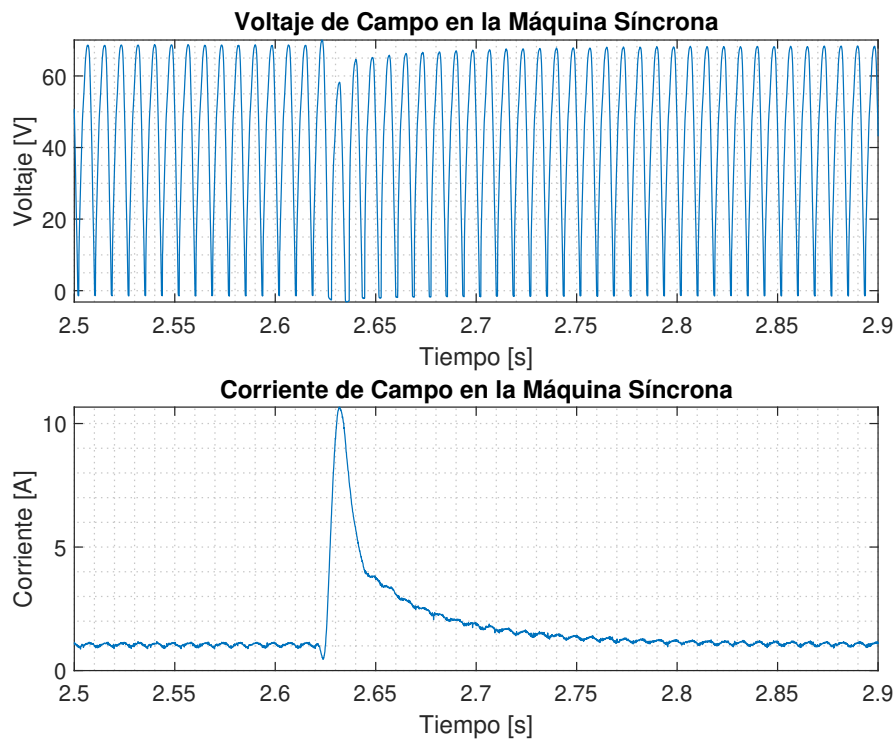


Figura 3.9: Transitorio en el voltaje y corriente de campo. Fuente Autores

Se realizaron varios cortocircuitos para disponer de un número importante de medidas. Las Figs 3.9 a 3.13 muestran los voltajes y corrientes de uno de los ensayos de cortocircuito. La Fig. 3.9 muestra el efecto del cortocircuito trifásico en la tensión y corriente de campo. En la Fig. 3.10, se observa el voltaje de línea en bornes de la máquina, y la corriente de cortocircuito trifásico en la Fig. 3.11. Por conveniencia para el proceso de ajuste, las corrientes se convirtieron a valores en por unidad.

De la corriente de cortocircuito se separa la componente DC y simétrica AC. La parte de continua se obtiene realizando la semisuma de la envolvente superior e inferior. Mientras que para la componente simétrica AC, se resta la parte DC de una de las envolventes de la señal de cortocircuito. En la Fig. 3.12 se visualiza las formas de onda de las componentes DC y AC.

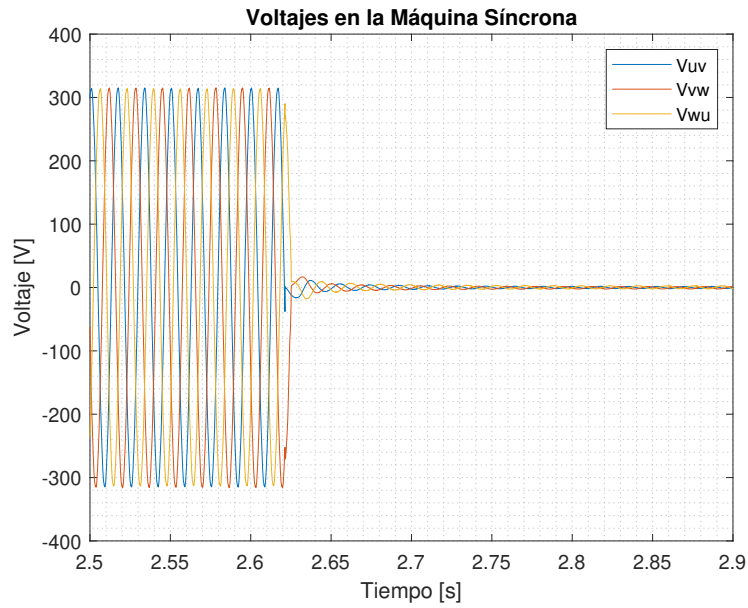


Figura 3.10: Voltaje en bornes de la máquina. Fuente Autores

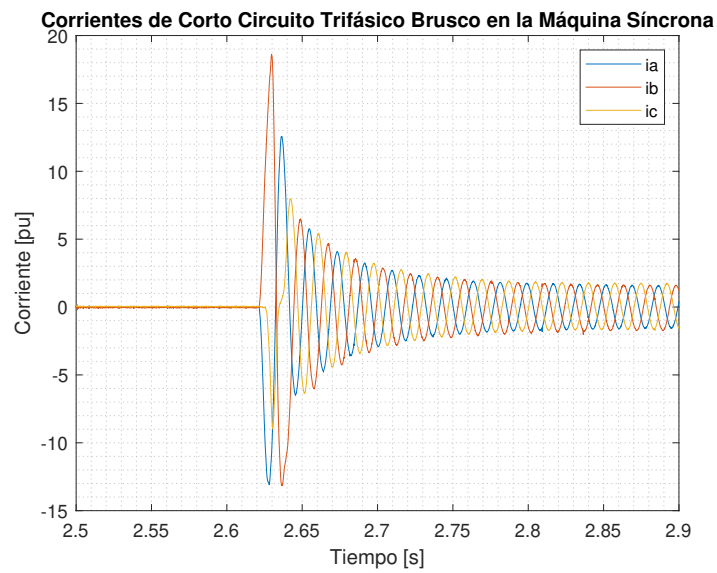


Figura 3.11: Corriente de cortocircuito en la máquina. Fuente Autores

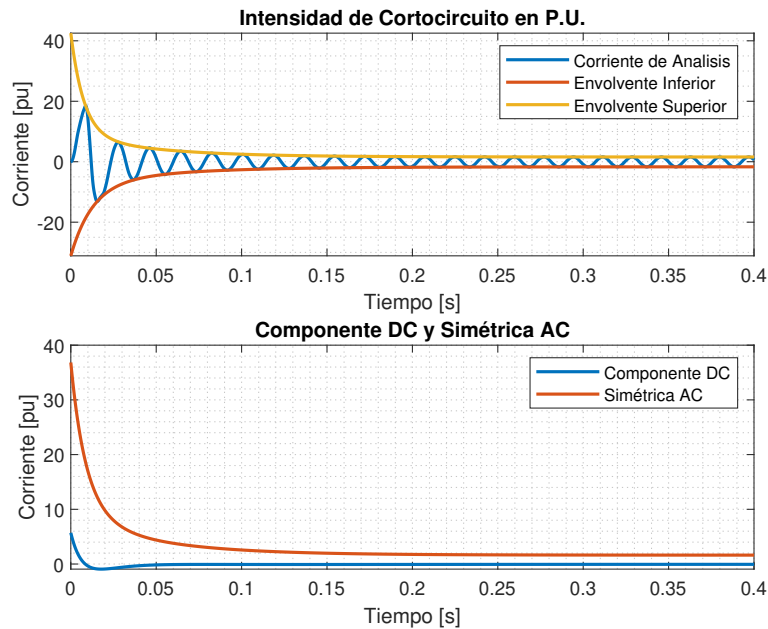


Figura 3.12: Componente DC y Simétrica AC de la corriente de cortocircuito.
Fuente Autores

Mediante el toolbox de Matlab y el algoritmo de ajuste de curvas basado en [mínimos cuadrados no lineales](#), se obtienen los parámetros característicos de la máquina. La función de ajuste se basa en la ecuación 2.30 y la componente simétrica AC. En la Fig. 3.13 se contrasta la curva ajustada, versus la señal adquirida en la máquina.

3.4. Respuesta en Frecuencia

3.4.1. Ubicación del rotor para los ejes d y q

Para posicionar el rotor en el eje directo se utiliza el circuito de la Fig. 3.14. Se aplica una señal sinusoidal de 100 Hz en la armadura, y se mide el voltaje inducido en el campo mediante un osciloscopio. Se gira manualmente el rotor de la máquina hasta que el voltaje inducido sea cero. En este punto, el eje mag-

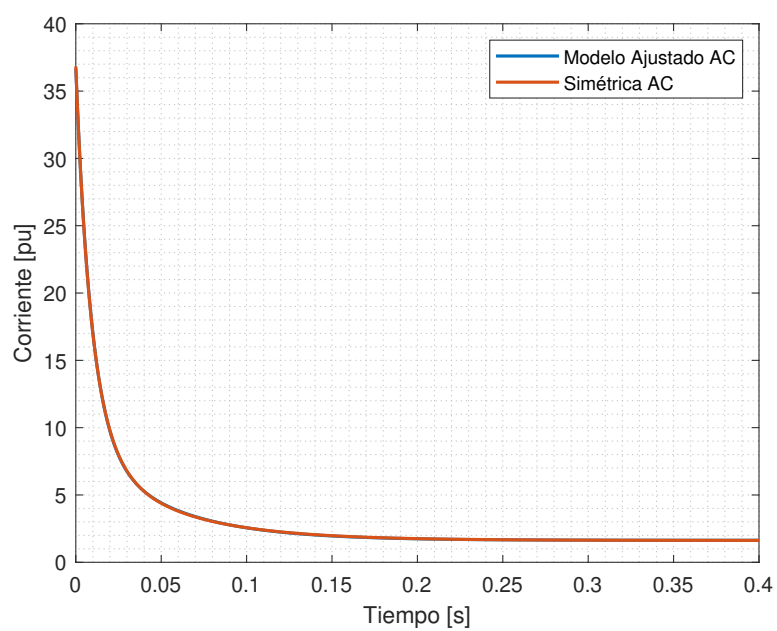


Figura 3.13: Ajuste de la curva de la componente simétrica AC. Fuente Autores

nético del bobinado de campo está alineado con las bobinas en serie *a* y *b* que serán utilizadas para las pruebas de eje directo.

Para el ensayo de eje en cuadratura, se debe girar manualmente el rotor 90° eléctricos desde la posición del eje directo. Es necesario tener presente la conversión de grados eléctricos a grados mecánicos. También es posible alinear el rotor hasta conseguir la máxima tensión en el circuito de campo.

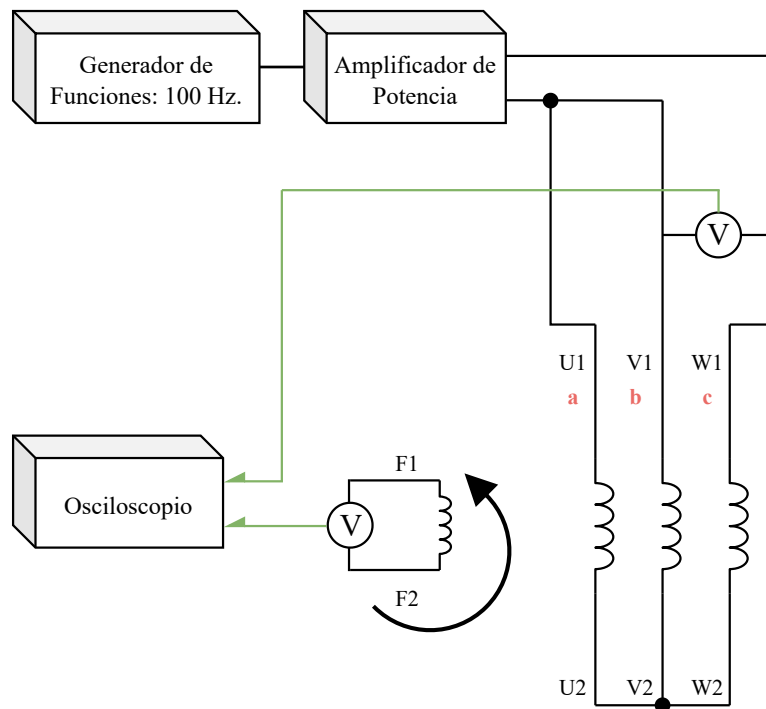


Figura 3.14: Posicionamiento del rotor para la prueba de eje directo. Fuente Autores

3.4.2. Adquisición de variables para las impedancias características

El ensayo de respuesta en frecuencia (SSFR), se realiza con la máquina síncrona detenida. Para realizar las mediciones de las impedancias características se utilizan los circuitos que se presentan en la Fig. 3.18, Fig. 3.22 y Fig. 3.23.

Las variables de voltaje y/o corriente se miden mediante sondas diferenciales. Estas señales son adquiridas utilizando el sistema de adquisición de datos DAQ «NI USB-6212» y transferidas a un computador para ser analizadas. Las variables obtenidas en cada ensayo son del tipo complejas. Es decir, presentan magnitud y ángulo, por lo que mediante un programa en MATLAB se realiza el análisis de frecuencia de cada señal obtenida, y en Excel se crea un registro de los datos analizados en cada frecuencia. El rango de frecuencias en el que se realizaron todos los ensayos fue de 10 mHz hasta 1 kHz.

Debido a la alta influencia de la temperatura en la parte resistiva de los bobinados y por seguridad en la integridad de la máquina, se recomienda que la corriente de ensayo no exceda el 0.5 % de la corriente nominal de armadura.

Para realizar los ensayos se consideró oportuno el diseño de un circuito amplificador de potencia. Esto debido a que se tiene que aplicar una cantidad de corriente y voltaje considerable a la salida del generador de funciones y a la conexión de la máquina síncrona. El amplificador utilizado es Tipo AB. Se utilizaron amplificadores operacionales para calibrar la ganancia deseada, y como elementos de potencia transistores de seis amperios. En la Fig. 3.15, se observa el circuito del amplificador de potencia diseñado para los ensayos en la máquina. Para el caso de frecuencias superiores a los 10 Hz, se optó por utilizar la fuente Chroma 61702, fuente programable AC de 3 kVA de potencia disponible en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana-Sede Cuenca.

En la Fig. 3.16 se observa la implementación de las etapas de adquisición, medición y análisis de las variables involucradas para el ensayo SSFR, en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana-Sede Cuenca.

El proceso de adquisición, medición y análisis de datos se resume en el flujoograma expresado en la Fig. 3.17. El proceso de visualización de los diagramas en frecuencia y ajuste de curvas complejas se complementa en la sección 4.4.

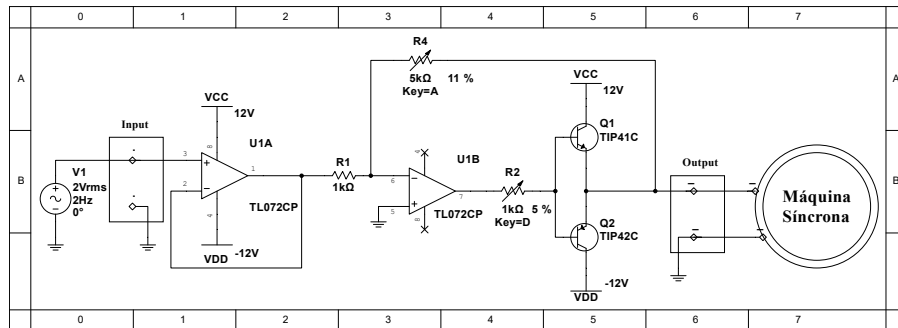


Figura 3.15: Esquemático del amplificador de potencia diseñado para los ensayos. Fuente Autores

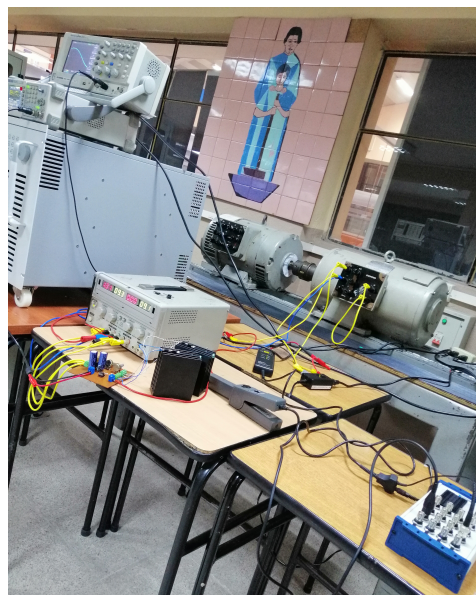


Figura 3.16: Implementación del ensayo **SSFR** en el laboratorio de la universidad. Fuente Autores

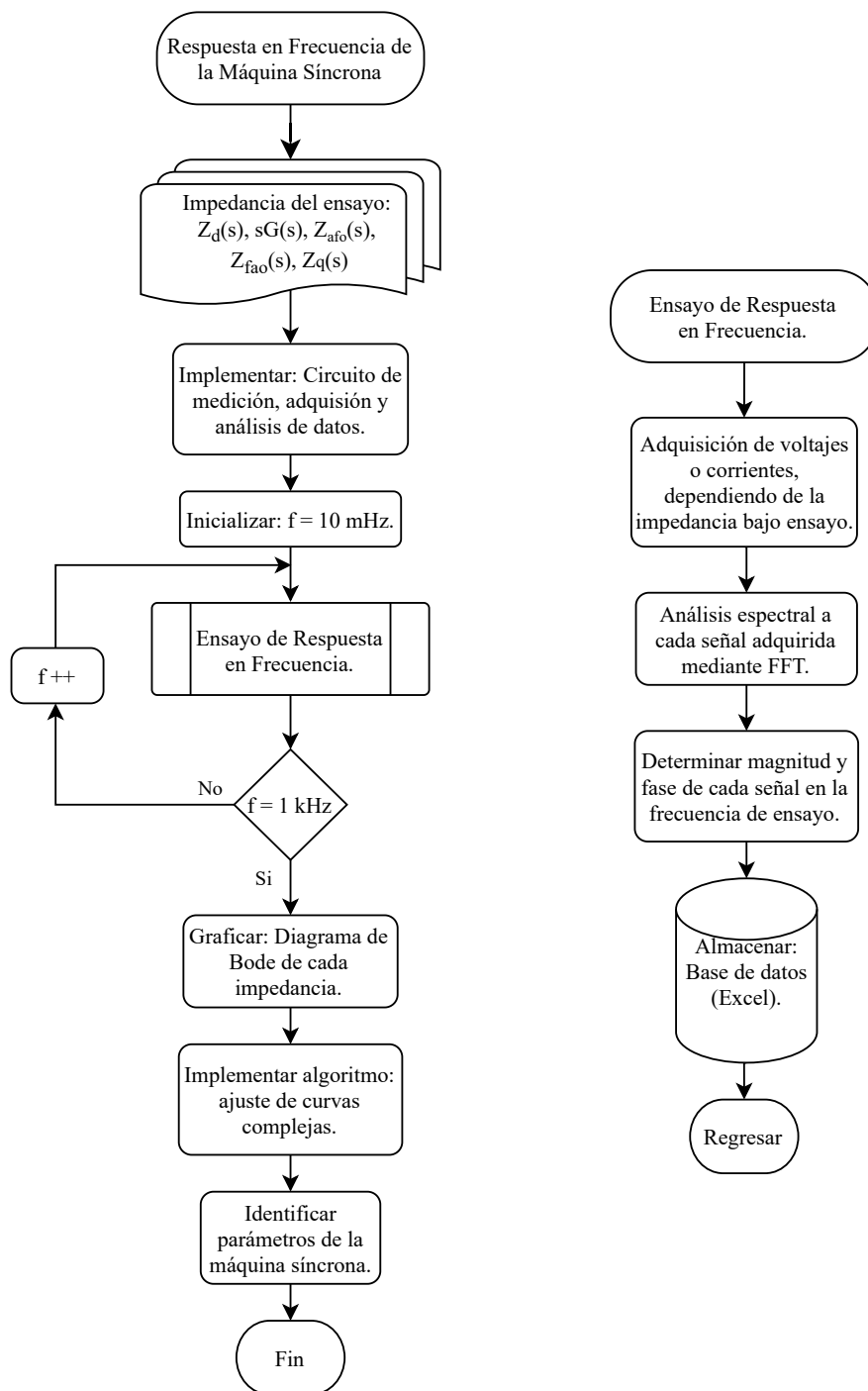


Figura 3.17: Flujograma del proceso de SSFR en la máquina síncrona. Fuente Autores

Impedancia $Z_d(s)$

La Fig. 3.18, presenta el diagrama de conexión para la obtención de la impedancia $Z_d(s)$. Se adquieren datos del voltaje y corriente de armadura, con el bobinado de campo cortocircuitado.

En primer lugar, se determina la impedancia de armadura ($Z_{arm}(s)$) como:

$$Z_{arm}(s) = \frac{\Delta V_{arm}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (3.8)$$

Con la expresión 3.8 se determina la impedancia $Z_d(s)$,

$$Z_d(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{arm}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (3.9)$$

Para determinar la resistencia de armadura, se evalúa el límite de cuando s tiende a cero en la función de $Z_d(s)$,

$$R_a = \frac{1}{2} \left\{ \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{arm}(s)] \right\} \Omega \quad (3.10)$$

Las ecuaciones anteriormente desarrolladas se obtienen de acuerdo a la Norma IEEE Std 115-2019 en su sección 12.3.3.1 [2].

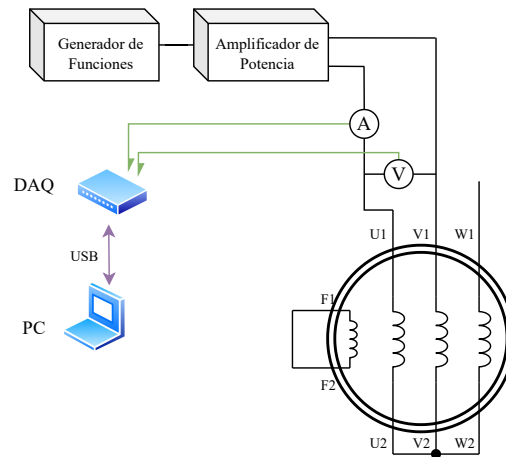


Figura 3.18: Esquema de conexión y medición para la impedancia $Z_d(s)$. Fuente Autores

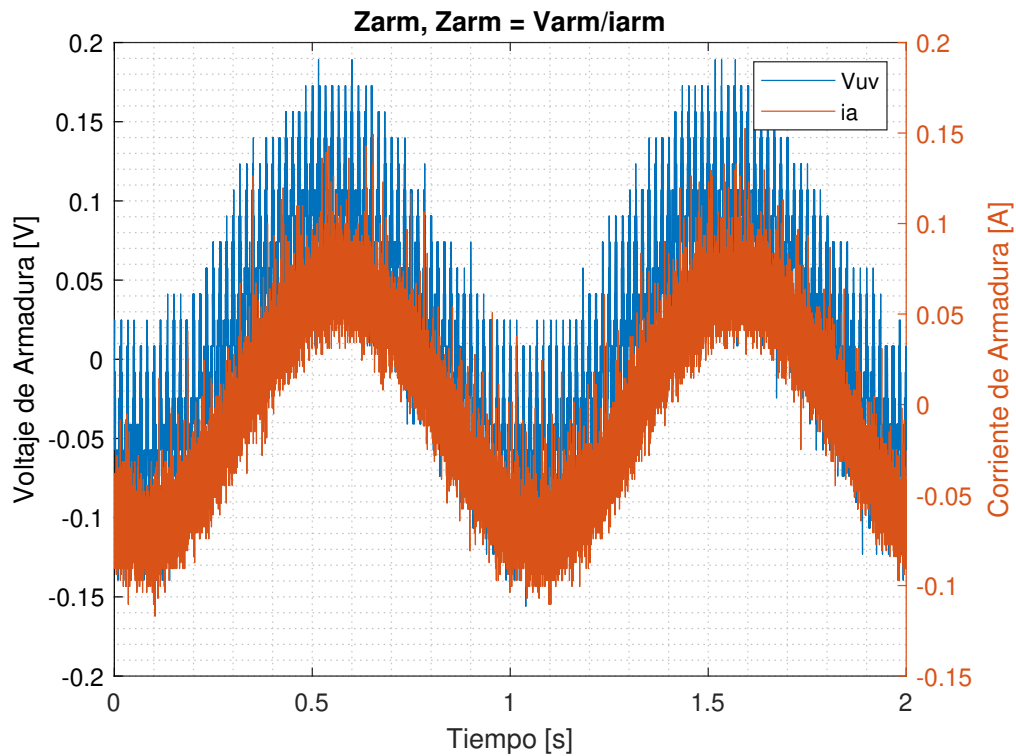


Figura 3.19: Señal de voltaje y corriente de armadura del ensayo para $Z_d(s)$ en una frecuencia de 1 Hz. Fuente Autores

En la Fig. 3.19 se observa la señal de voltaje y corriente de armadura de uno de los ensayos realizados para determinar la impedancia $Z_d(s)$. Las señales corresponden al ensayo de 1 Hz, y se observa que cada magnitud presenta una considerable proporción de ruido. Para analizar correctamente cada variable, se realiza un análisis espectral mediante la transformada rápida de Fourier (**Fast Fourier Transform (FFT)**). Esto permite identificar claramente cuál es la magnitud y ángulo del voltaje y de la corriente en la frecuencia bajo ensayo.

Por ejemplo, en la Fig. 3.20 se observa el espectro de frecuencia del voltaje en el ensayo de 1 Hz. Claramente se observa que el voltaje correspondiente a la frecuencia en estudio presenta una magnitud de 80.2401 mV con una fase de 162.0882° . De igual manera, se puede determinar la magnitud y fase para la

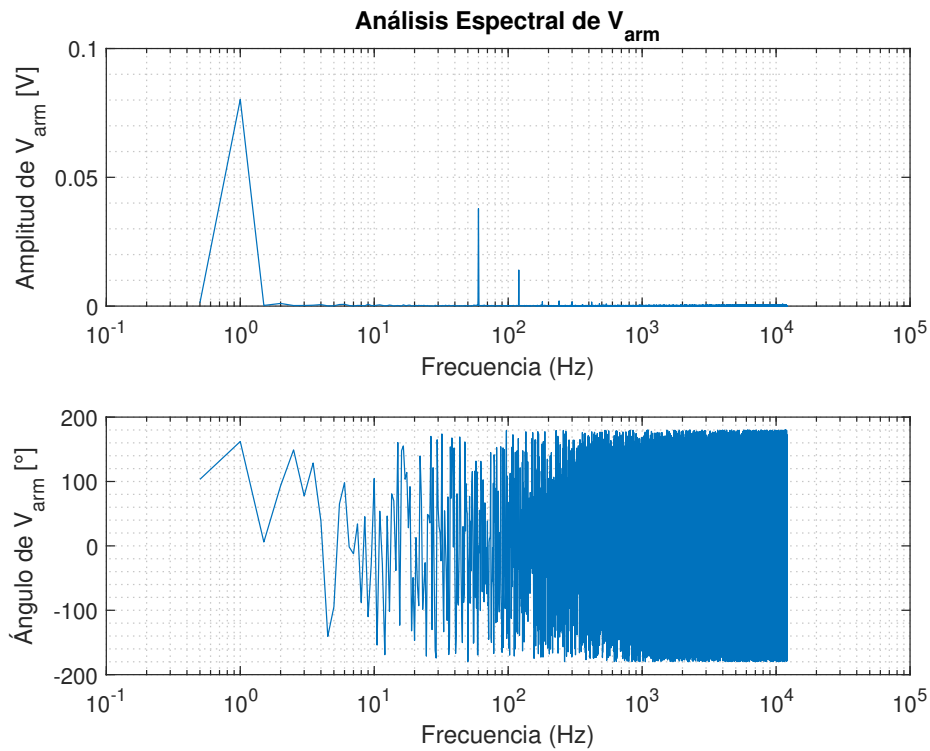


Figura 3.20: Espectro de la señal de voltaje de armadura (1 Hz) en el ensayo para $Z_d(s)$. Fuente Autores

corriente de armadura. Del espectro de frecuencia de la corriente, mostrado en la Fig. 3.21, se obtiene la magnitud de 69.1059 mA, con una fase de 153.9715° .

Un análisis similar se realiza para cada frecuencia en cada ensayo. Cada magnitud y ángulo se lleva en un registro de Excel para crear una tabla de resultados para cada impedancia. El proceso se lleva a cabo en cada uno de los ensayos para las impedancias restantes, por lo que se omitirá la explicación en los siguientes casos.

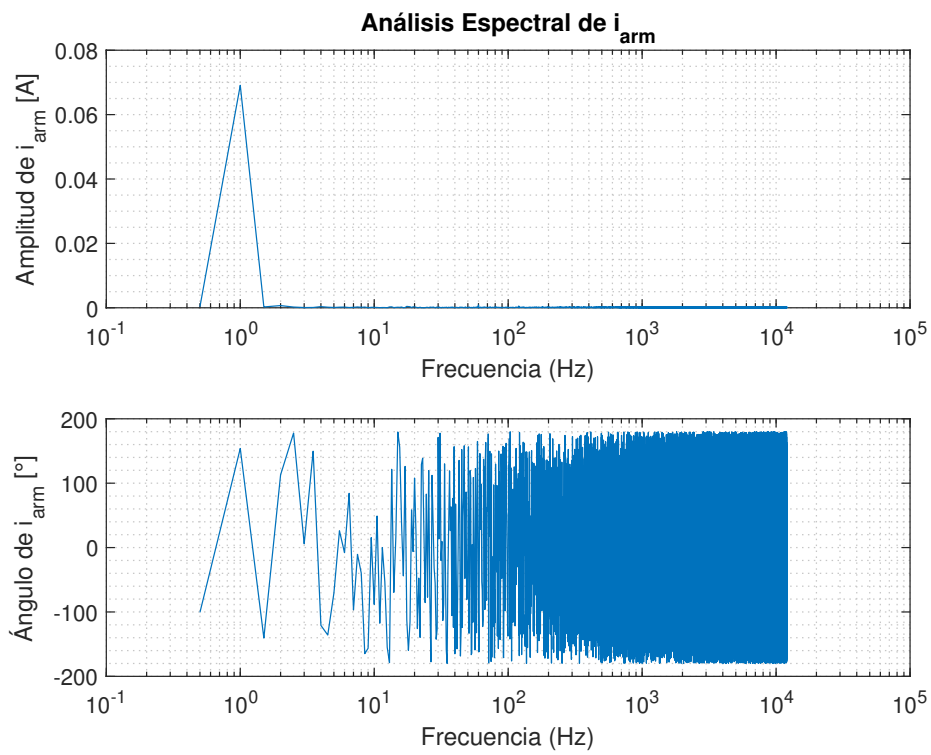


Figura 3.21: Espectro de la señal de corriente de armadura (1 Hz) en el ensayo para $Z_d(s)$. Fuente Autores

Impedancia $sG(s)$

La Fig. 3.22 indica el diagrama de conexión para la obtención de la impedancia $sG(s)$. Se adquieren los datos de corriente de armadura y campo, con el bobinado de campo en cortocircuito. La función de transferencia se expresa como [2],

$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_a(s)} = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s) / \cos(30^\circ)} = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (3.11)$$

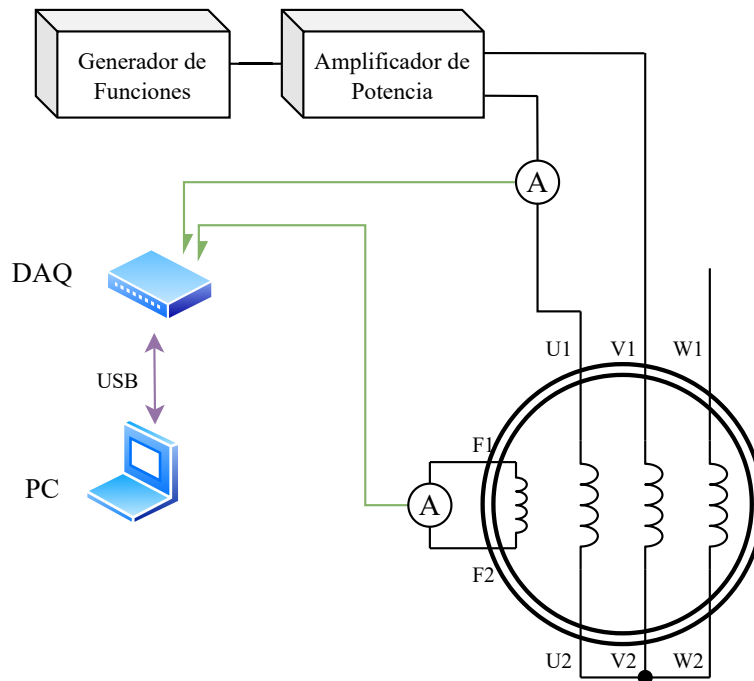


Figura 3.22: Esquema de conexión y medición para la impedancia $sG(s)$. Fuente Autores

Impedancia $Z_{af0}(s)$

La Fig. 3.23 muestra el diagrama de conexión para la obtención de la impedancia $Z_{af0}(s)$. Se adquieren los datos de corriente de armadura y voltaje de campo, con el bobinado de campo en circuito abierto para poder medir tensión. La función de transferencia se expresa como [2],

$$Z_{af\phi}(s) = \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s) / \cos(30^\circ)} = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (3.12)$$

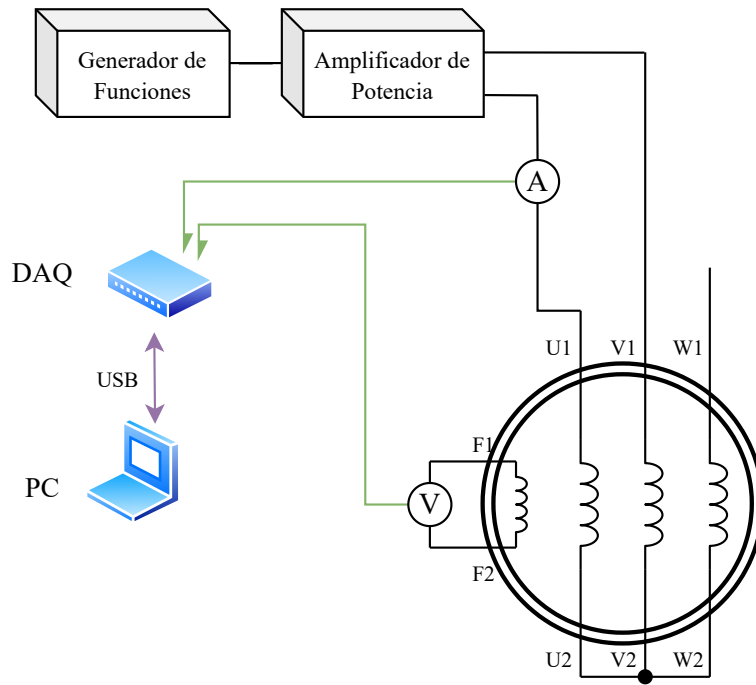


Figura 3.23: Esquema de conexión y medición para la impedancia $Z_{af\phi}(s)$. Fuente Autores

Impedancia $Z_{f\phi}(s)$

Ocasionalmente se requiere la medición de la impedancia de transferencia campo-estator. Para ello, se alimenta el campo, y se observa el comportamiento del estator, como se observa en la Fig. 3.24. La función de transferencia se expresa como [2],

$$Z_{f\phi}(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_{fd}(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_{arm}(s) / \cos(30^\circ)}{\Delta i_{fd}(s)} \right] = \sqrt{\frac{1}{3}} \frac{\Delta V_{arm}(s)}{\Delta i_{fd}(s)} \quad (3.13)$$

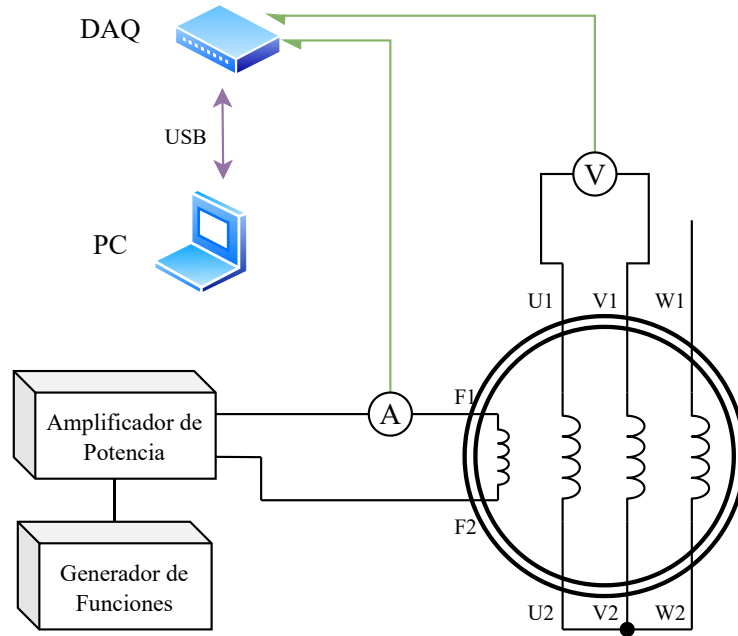


Figura 3.24: Esquema de conexión y medición para la impedancia $Z_{fao}(s)$. Fuente Autores

Impedancia $Z_q(s)$

Para obtener la impedancia $Z_q(s)$, se utiliza el circuito de la Fig. 3.18, considerando que en este caso el campo debe rotar 90° , tal como se explicó en la subsección 3.4.1.

La Fig. 3.18 muestra el diagrama de conexión para la obtención de la impedancia $Z_q(s)$. Se adquieren los datos del voltaje y corriente de armadura, teniendo el bobinado de campo en corto circuito. La función de transferencia se expresa en la ecuación 3.15. Para determinar la resistencia de armadura, se evalúa el límite de cuando s tiende a cero en la función de $Z_q(s)$, ver la ecuación 3.16.

En primer lugar, se determina la impedancia de armadura ($Z_{armq}(s)$) como,

$$Z_{armq}(s) = \frac{\Delta V_{arm}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (3.14)$$

Con la expresión 3.14 se determina la impedancia $Z_q(s)$,

$$Z_q(s) = \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{arm}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (3.15)$$

Para determinar la resistencia de armadura, se evalúa el límite de cuando s tiende a cero en la función de $Z_q(s)$,

$$R_a = \frac{1}{2} \left\{ \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{armq}(s)] \right\} \Omega \quad (3.16)$$

Las ecuaciones anteriormente desarrolladas se obtienen de acuerdo a la Norma IEEE Std 115-2019 en su sección 12.3.5 [2].

Capítulo 4

Análisis y resultados

4.1. Introducción

Este capítulo presenta los resultados para cada ensayo realizado en la máquina síncrona y planteado en el capítulo 3. Los ensayos en régimen permanente ofrecen información básica de la máquina, mientras que el ensayo de cortocircuito súbito permite determinar los parámetros de régimen transitorio y estable. Finalmente, el ensayo SSFR ofrece un abanico considerable de parámetros de la máquina síncrona, desde constantes de tiempo, hasta inductancias de estado estable y transitorias.

4.2. Parámetros en Régimen Permanente

4.2.1. Parámetros de la característica a vacío y cortocircuito

En la Fig. 4.1 se puede apreciar la característica de vacío y cortocircuito, la tensión de armadura y la corriente de cortocircuito se expresan en pu. De este ensayo en conjunto y, mediante la relación de las corrientes I_{FSI} e I_{FG} se puede obtener la reactancia no saturada de eje directo X_{du} .

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}}, \quad (4.1)$$

donde:

X_{du} : reactancia síncrona no saturada.

I_{FSI} : es la corriente de campo correspondiente a la corriente base de armadura en la curva característica de cortocircuito.

I_{FG} : es la corriente de campo correspondiente al voltaje base de armadura en la curva característica de vacío.

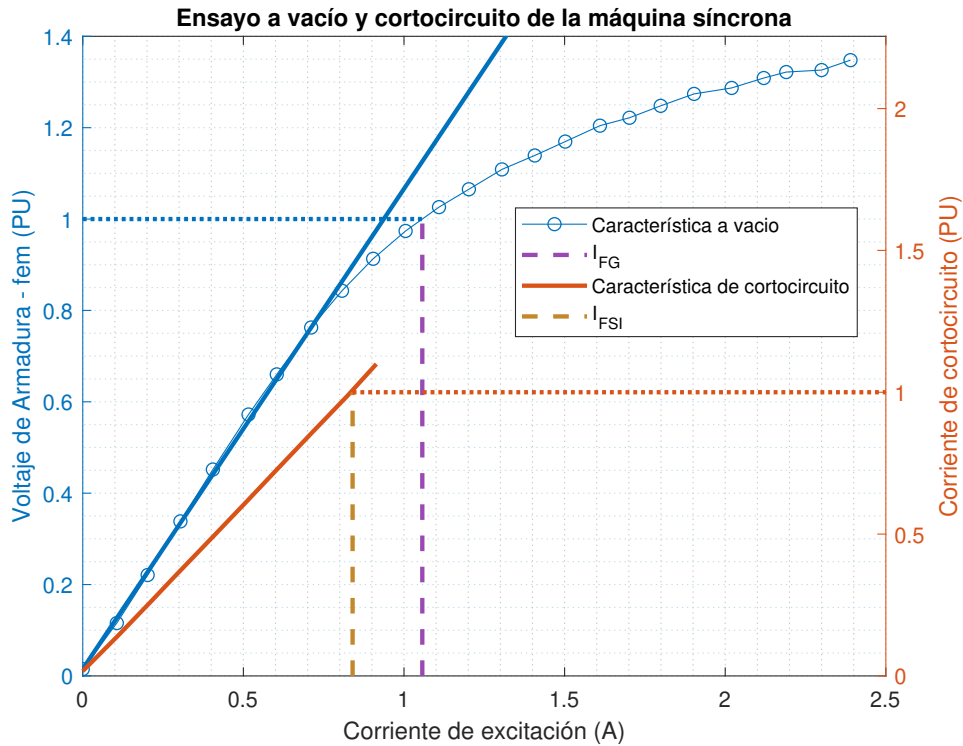


Figura 4.1: Identificación de la corriente I_{FSI} e I_{FG} . Fuente Autores

Analizando la gráfica de la Fig. 4.1 se determina que la corriente I_{FSI} es de 0.84 A, mientras que la corriente I_{FG} corresponde a 1.057 A. De la relación de las dos corrientes se evalúa que la reactancia no saturada es de $X_{du} = 0,7947 pu$.

4.2.2. Reactancia de Secuencia Cero

Para el ensayo de reactancia de secuencia cero se realizaron varias mediciones a diferentes valores de tensión. Los valores aplicados según el esquema de la Fig. 3.6 se presentan en la Tabla 4.1. Se recalca que para el ensayo, los valores presentados se encuentran en pu y en una base monofásica.

Tabla 4.1: Mediciones del ensayo X_0 .

Datos del ensayo			Valores en PU (1F)			Z_0 [pu]	X_0 [pu]
V [V]	I [A]	P [W]	V	I	P		
1.21	0.53	0.5	0.0091	0.0603	0.0004	0.0504	0.0315
2.91	1.27	2.9	0.0219	0.1446	0.0025	0.0505	0.0313
4.95	2.13	8.4	0.0373	0.2424	0.0072	0.0513	0.0310
5.92	2.54	11.8	0.0446	0.2891	0.0101	0.0514	0.0319
6.97	2.98	16.5	0.0525	0.3392	0.0141	0.0516	0.0313
7.93	3.39	21.3	0.0597	0.3859	0.0183	0.0516	0.0315
8.89	3.79	26.7	0.0669	0.4314	0.0229	0.0517	0.0316
9.18	3.91	28.4	0.0691	0.4450	0.0243	0.0518	0.0317

Aplicando la formulación detallada en la sección 2.3.3 y los datos del ensayo referidos anteriormente, se obtiene la impedancia y reactancia de secuencia cero para cada medición. De todos los datos se realiza el promedio y se obtiene un solo valor. Los parámetros finales se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados del ensayo de Secuencia Cero.

Z_0 [pu]	X_0 [pu]
0.0513	0.0315

4.3. Parámetros del Cortocircuito Trifásico Súbito

Debido a que la corriente transitoria de cortocircuito varía dependiendo del instante en el que el interruptor es cerrado, y a la imposibilidad práctica de repetir aquel instante de cortocircuito, se realizaron cinco repeticiones de adquisición de datos para el ensayo.

En la Tabla 4.3 se aprecian los parámetros de la máquina síncrona obtenidos del ensayo del cortocircuito trifásico súbito. Las reactancias se expresan en pu y las constantes de tiempo en segundos. Los parámetros se obtuvieron de cinco ensayos de cortocircuito, y en cada prueba se analizaron las tres señales de corriente. Del conjunto de pruebas realizadas se obtuvo el promedio para determinar cada parámetro por fase, y se complementó con el cálculo de la desviación estándar para cuantificar la variación del parámetro con respecto a la media.

Tabla 4.3: Resultados del Cortocircuito Trifásico Súbito para cada fase.

	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
X_d [p.u.]	0.9432	0.0143	0.8865	0.0122	0.8864	0.0147
X'_d [p.u.]	0.1298	0.0518	0.0861	0.0301	0.1219	0.0337
X''_d [p.u.]	0.0763	0.0112	0.0603	0.0137	0.0815	0.0144
T'_d [s]	0.0181	0.0157	0.0125	0.0026	0.0145	0.0038
T''_d [s]	0.0522	0.0173	0.0498	0.0047	0.0559	0.0094

Finalmente, de los valores por fase del ensayo de cortocircuito súbito, se obtiene nuevamente el promedio para determinar los parámetros de la máquina síncrona. En la Tabla 4.4 se observan los resultados finales en pu y segundos, respectivamente.

Tabla 4.4: Resultados del Cortocircuito Trifásico Súbito para la Máquina Síncrona.

Parámetros de la Máquina Síncrona	
X_d [pu]	0.9053
X'_d [pu]	0.1126
X''_d [pu]	0.0727
T'_d [s]	0.0150
T''_d [s]	0.0526

4.4. Respuesta en Frecuencia

Luego de aplicar la metodología de SSFR descrita en la Fig. 3.17 para cada impedancia característica de la máquina, se obtienen los diagramas de Bode [20] para cada una de estas.

4.4.1. Impedancia e Inductancia de Eje Directo

En la Fig. 4.2 se observa el comportamiento de la impedancia Z_d en función de la frecuencia. Al ser una magnitud compleja, la magnitud se expresa en pu y la fase en grados.

Para obtener la parte real de la impedancia de eje directo, se puede aplicar la ecuación 3.10, evaluando el límite de cuando s tiende a cero. Para determinar la inductancia de eje directo (L_d) se aplica la ecuación 4.2. En la Fig. 4.3 se evidencia el diagrama de Bode de la L_d , tanto en magnitud como en fase, expresada en pu y grados respectivamente.

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (4.2)$$

$$s = j\omega = j2\pi f \quad (4.3)$$

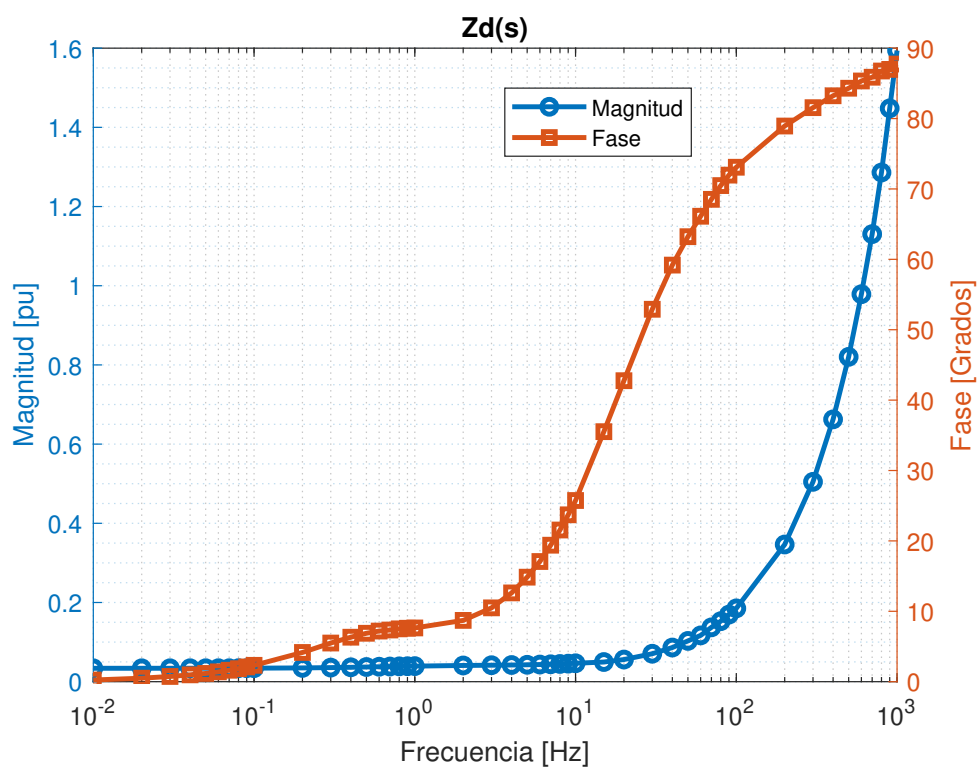
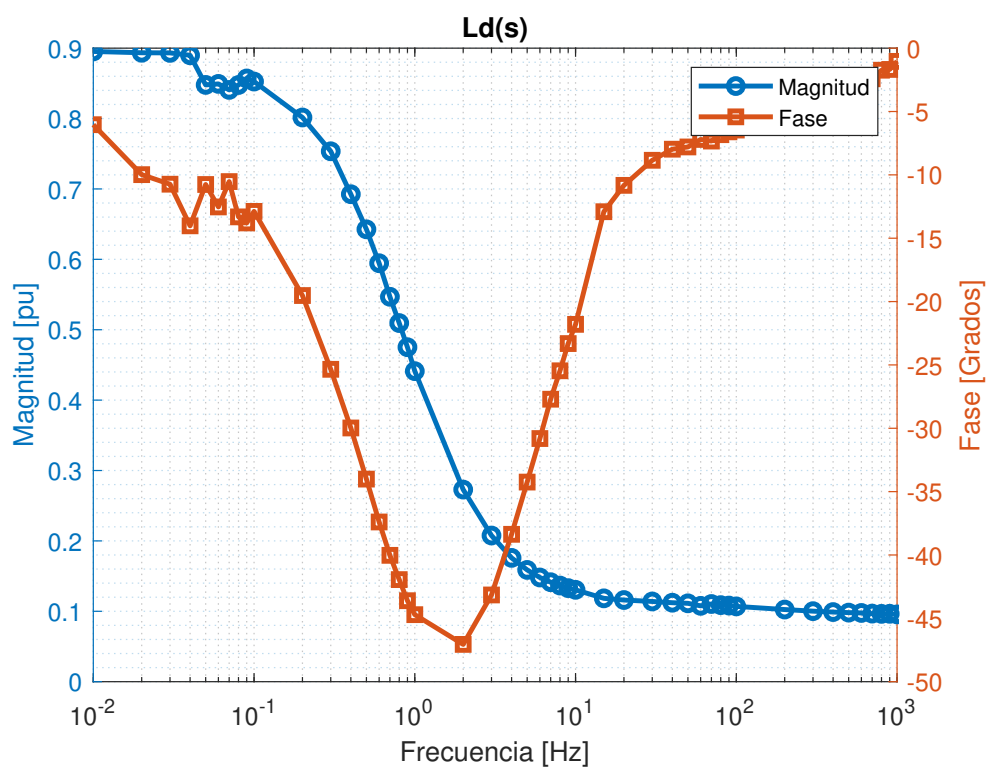


Figura 4.2: Diagrama de Bode de la Impedancia Z_d . Fuente Autores

Figura 4.3: Diagrama de Bode de la Inductancia L_d . Fuente Autores

4.4.2. Función de Transferencia de Eje Directo al Voltaje de Campo, $sG(s)$

El diagrama de Bode de la función de transferencia armadura-campo ($sG(s)$) expresada en la ecuación 3.11 se muestra en la Fig. 4.4. La amplitud se representa en A/A y la fase en grados.

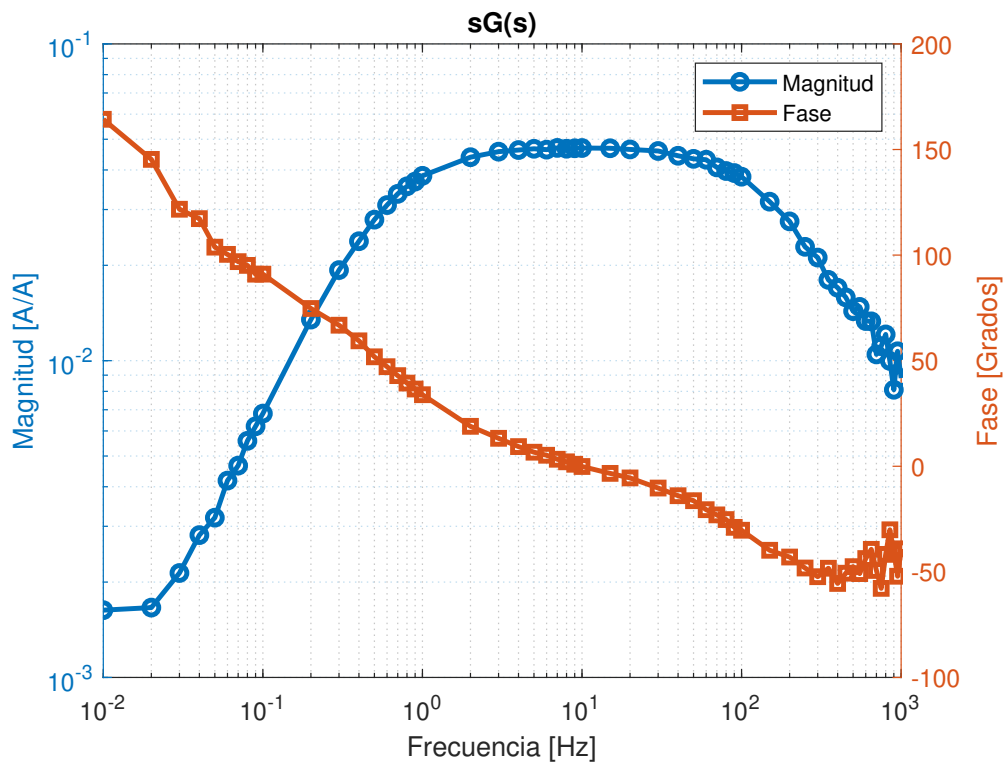


Figura 4.4: Diagrama de Bode de la función de transferencia $sG(s)$. Fuente Autores

4.4.3. Impedancia armadura-campo, Z_{afo}

Finalmente, la última función de transferencia de eje directo es la impedancia armadura-campo Z_{afo} . La función de transferencia se determina mediante la ecuación 3.12. El diagrama de Bode correspondiente se presenta en la Fig. 4.5.

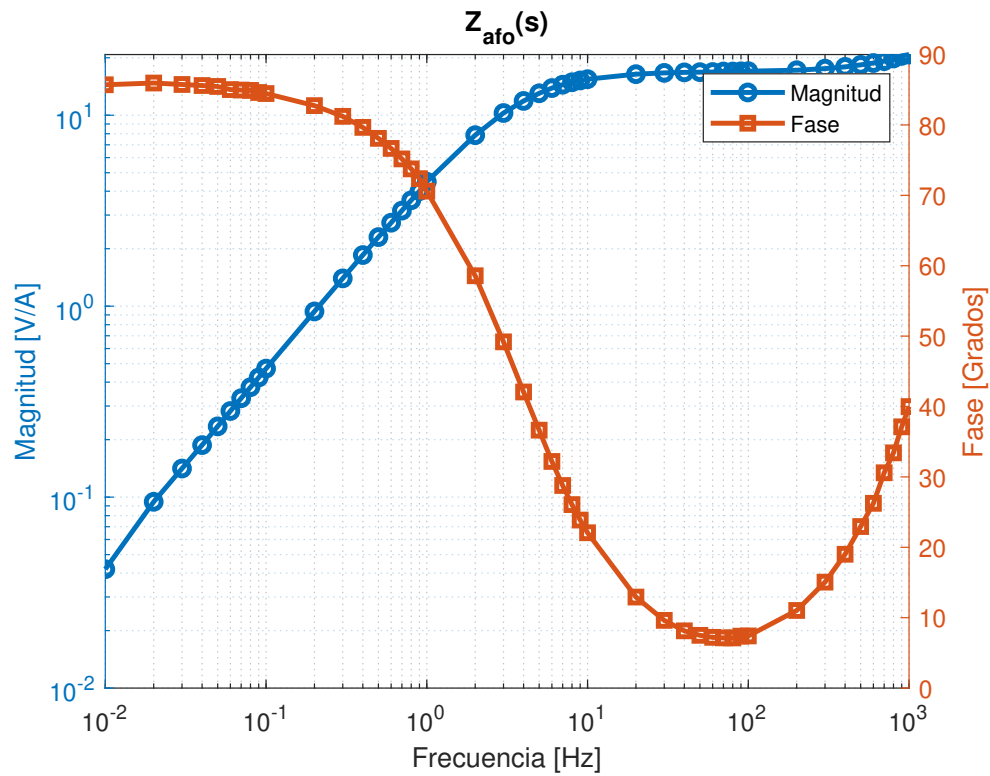


Figura 4.5: Diagrama de Bode de la impedancia Z_{afo} . Fuente Autores

4.4.4. Impedancia e Inductancia de Eje en Cuadratura

Del proceso detallado en la sección 3.4.2, para la impedancia en cuadratura, Z_q , se obtiene el diagrama de Bode tanto en magnitud (pu) como en fase (grados). La Fig. 4.6 muestra la variación de la impedancia de cuadratura versus la frecuencia.

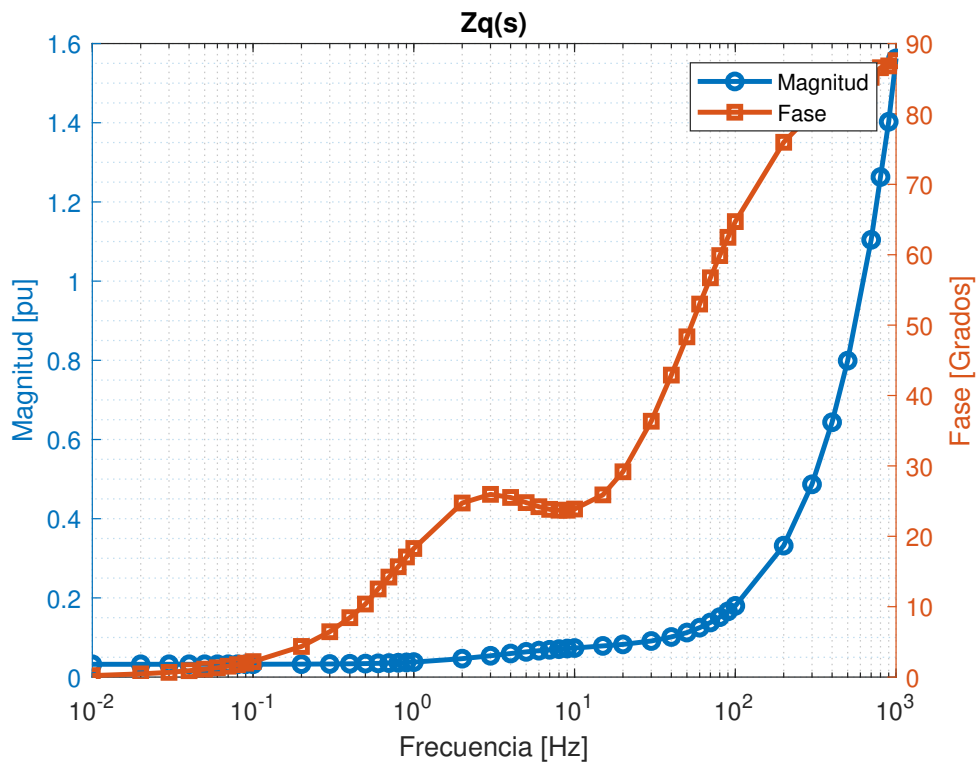


Figura 4.6: Diagrama de Bode de la impedancia Z_q . Fuente Autores

Para obtener la inductancia de cuadratura ($L_q(s)$) se realiza el proceso similar a la de eje directo. Se obtiene la parte real de la impedancia evaluando el límite de cuando s tiende a cero. La parte real corresponde a la resistencia de armadura, luego esta se resta de la impedancia $Z_q(s)$ y se divide para la variable de Laplace (s). El resultado tanto en magnitud como en fase de la inductancia en función de la frecuencia se aprecia en la Fig. 4.7.

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \quad (4.4)$$

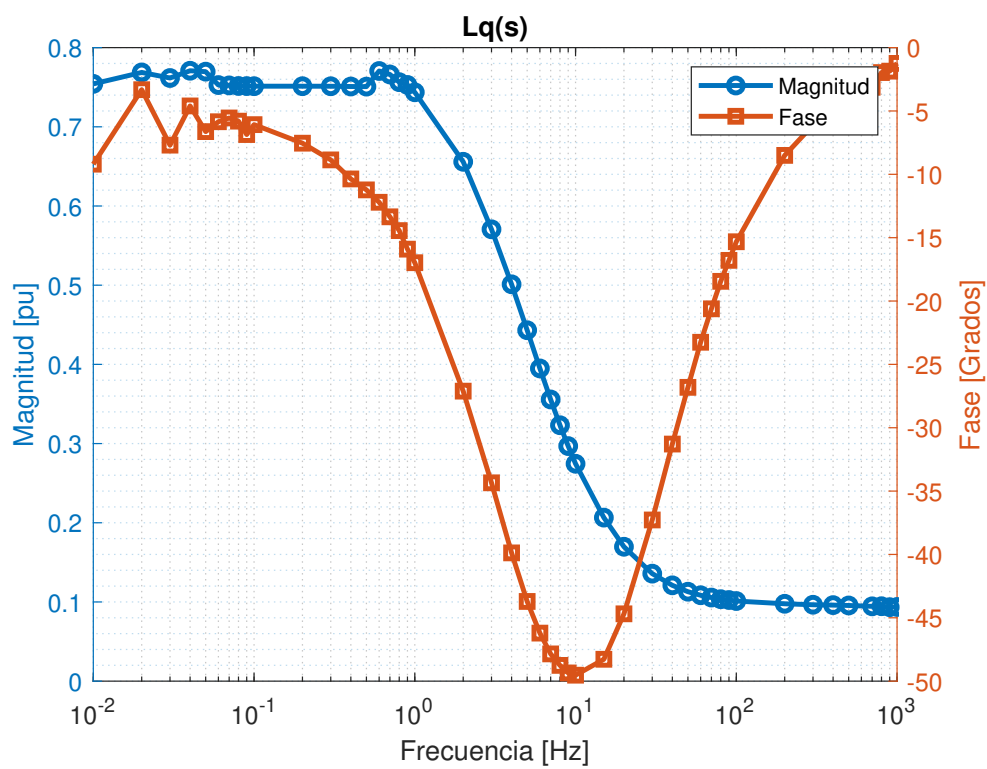


Figura 4.7: Diagrama de Bode de la inductancia L_q . Fuente Autores

4.5. Parámetros obtenidos de la Respuesta en Frecuencia

En la sección a continuación se presentan los parámetros de la máquina síncrona derivados de la prueba [SSFR](#). Se deben tener presente los datos de placa de la máquina, los cuales representan los valores base para el sistema en [pu](#). Los valores base fueron detallados en la sección [3.2.1](#).

4.5.1. Reactancia de Fuga, X_l

La reactancia de fuga es un parámetro que viene dado por el fabricante. En el caso de la máquina síncrona en estudio, se sabe que es una máquina que tiene algunos años de antigüedad, y no se dispone de sus valores de fábrica. El ensayo de secuencia cero ([3.2.4](#)) permite determinar la reactancia de secuencia, que es un valor similar a la reactancia de fuga de la máquina.

Por lo tanto, la máquina presenta una reactancia $X_0 = 0,0315 pu$, y teniendo presente que en el sistema [pu](#), el valor de inductancia y reactancia son los mismos, se puede determinar el valor de la inductancia de fuga (L_l).

$$L_l = 0,0315 p.u. \rightarrow 1,2615 mH \quad (4.5)$$

4.5.2. Valor inicial de L_{ad}

El valor inicial de la inductancia $L_{ad}(0)$ se obtiene a partir del diagrama de respuesta en frecuencia de la inductancia de eje directo ([4.3](#)) y la ecuación [4.6](#). El valor de $L_{ad}(0)$, corresponde a los niveles de flujo que existieron durante la prueba y, por tanto, al nivel de saturación magnética durante la prueba. En general, será menor que el valor no saturado asociado con la recta del entrehierro.

$$\begin{aligned} L_{ad}(0) &= L_d(0) - L_l \\ L_{ad}(0) &= (895,315 \times 10^{-3}) - (31,4642 \times 10^{-3}) \\ L_{ad}(0) &= 863,8508 \times 10^{-3} p.u. \rightarrow 34,6334 mH \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.5.3. Relación de vueltas de campo a inducido

Para la determinación de la relación de vueltas campo-inducido ($N_{af}(0)$) se hace referencia a la respuesta en frecuencia de la impedancia Z_{af0} , Fig. 4.5, y al valor inicial de la inductancia $L_{ad}(0)$.

Para evaluar el límite cuando $s \rightarrow 0$, se realiza un proceso de ajuste de curva mediante **mínimos cuadrados no lineales** para la parte lineal de la magnitud de la impedancia. Evaluando la pendiente de esta curva, se obtiene la asíntota para bajas frecuencias de la impedancia. En la Fig. 4.8, se contrasta la curva ajustada versus la magnitud de la impedancia Z_{af0} .

$$\begin{aligned}
 N_{af}(0) &= \left\{ \frac{1}{sL_{ad}(0)} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right] \right\} \\
 N_{af}(0) &= \frac{1}{s(34,6334 \times 10^{-3})} (4,5105s) \\
 N_{af}(0) &= 130,2356
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

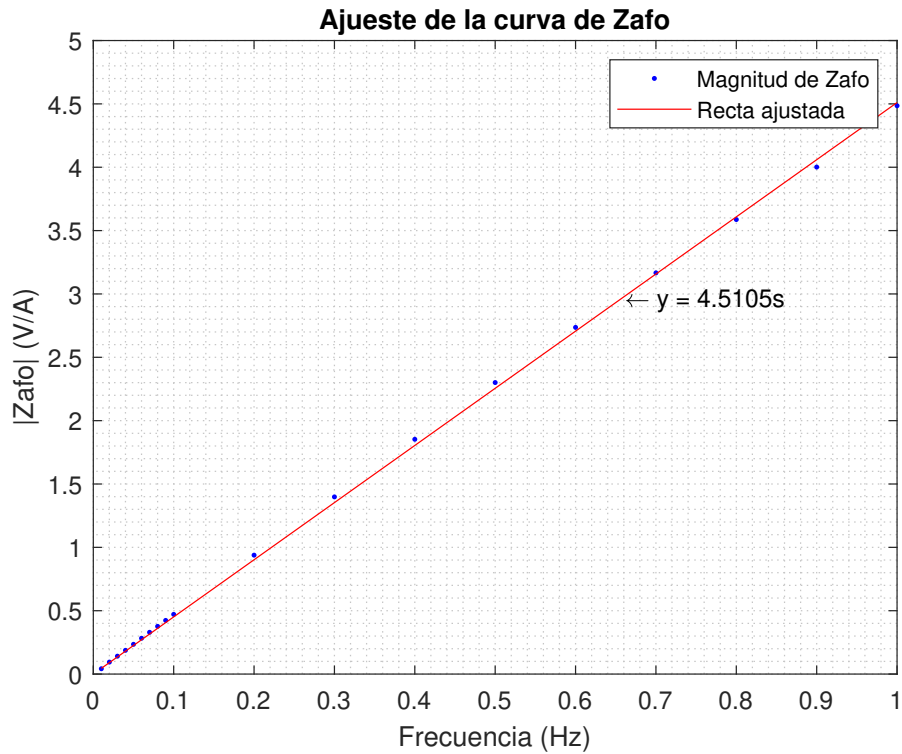


Figura 4.8: Curva ajustada para la magnitud de Z_{af0} . Fuente Autores

4.5.4. Obtención de los parámetros de eje directo

Para obtener los parámetros de eje directo, se realiza el ajuste de la función de transferencia L_d , ecuación 2.34 y 2.45, a los datos del ensayo, como se muestra en la Fig. 4.3. Para el ajuste se debe considerar que se trata de una curva de variables complejas, para ello se utiliza una función de minimización, conocida como algoritmo de Levy [21],

$$\min_{b,a} \sum_{k=1}^n w t(k) |h(k)A(w(k)) - B(w(k))|^2 \quad (4.8)$$

El método se fundamenta en plantear un función de error para encontrar el mejor modelo para los datos de respuesta en frecuencia. Se crea un sistema de ecuaciones lineales y se resuelve mediante Matlab. Los factores $A(w(k))$ y

$B(w(k))$ son las transformadas de Fourier de los polinomios del denominador (a) y numerador (b), respectivamente, a la frecuencia $w(k)$. Finalmente, n es el número de puntos de frecuencia (la longitud de h y w).

En la Fig. 4.9 se aprecia la función de transferencia de L_d . La curva naranja corresponde a los datos del ensayo SSFR, mientras que la curva en azul corresponde a la función de transferencia ajustada mediante la función 4.9.

El proceso de ajuste presenta la siguiente función de transferencia:

$$L_d(s) = L_d \frac{T_4 T_6 s^2 + (T_4 + T_5) s + 1}{T_1 T_3 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1} \quad (4.9)$$

$$L_d(s) = (875,7952 \times 10^{-3}) \frac{(9,9072 \times 10^{-3}) s^2 + (325,2052 \times 10^{-3}) s + 1}{(85,8657 \times 10^{-3}) s^2 + (1,9449) s + 1}$$

Finalmente, teniendo presente las ecuaciones 2.37 a 2.44 y los parámetros de la función de transferencia L_d , se realiza un algoritmo de resolución para el sistema de ecuaciones que se genera. La solución de este sistema son los parámetros de eje directo y los correspondientes al circuito equivalente de eje d , Fig. 2.11, los valores se presentan en la Tabla 4.5.

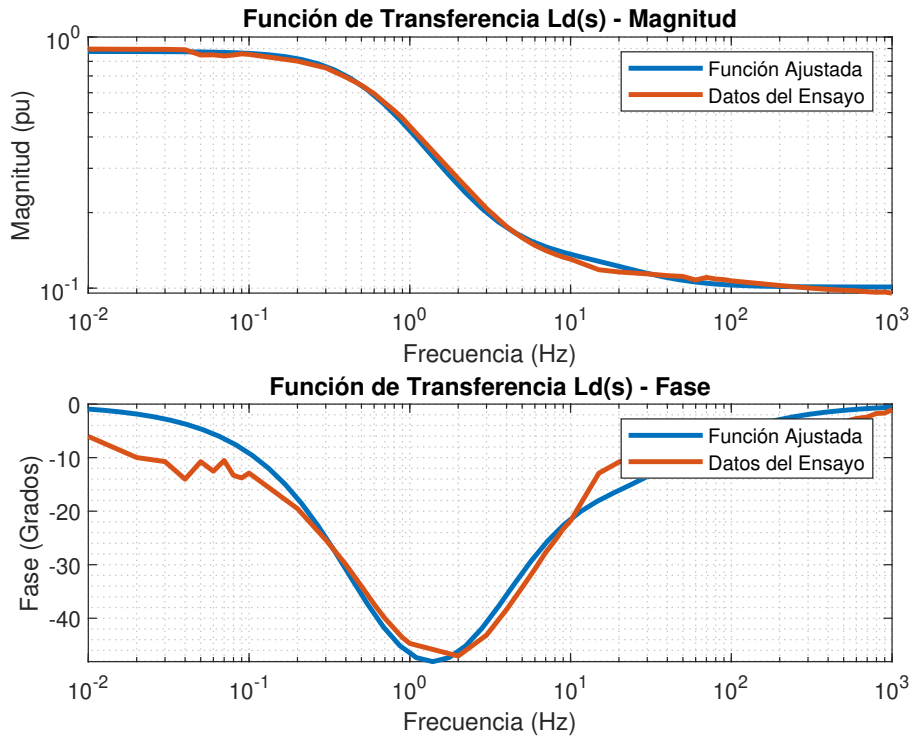


Figura 4.9: Curva ajustada para la función de transferencia de L_d . Fuente Autores

4.5.5. Obtención de los parámetros de eje en cuadratura

Para el eje en cuadratura, se sigue un proceso similar al realizado para el eje directo (4.5.4). Mediante la función de optimización de Levy [21], se ajusta la curva de L_q , Fig. 4.7, a la función de transferencia en 2.35 y 2.46.

En la Fig. 4.10 se observa la función de transferencia de L_q . La curva naranja corresponde a los datos del ensayo SSFR, mientras que la curva en azul corresponde a la función de transferencia ajustada mediante la función 4.10.

El proceso de ajuste presenta la siguiente función de transferencia:

$$L_q(s) = L_q \frac{T_4 T_6 s^2 + (T_4 + T_5) s + 1}{T_1 T_3 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1} \tag{4.10}$$

$$L_q(s) = (764,2677 \times 10^{-3}) \frac{(1,1543 \times 10^{-3}) s^2 + (39,2443 \times 10^{-3}) s + 1}{(2,1842 \times 10^{-3}) s^2 + (305,1207 \times 10^{-3}) s + 1}$$

Finalmente, para la obtención de los parámetros de cuadratura se obtiene un sistema de ecuaciones que se resuelve utilizando Matlab. Los valores obtenidos, de igual manera corresponden al circuito equivalente de eje q , Fig. 2.11. La Tabla 4.6 presenta los resultados.

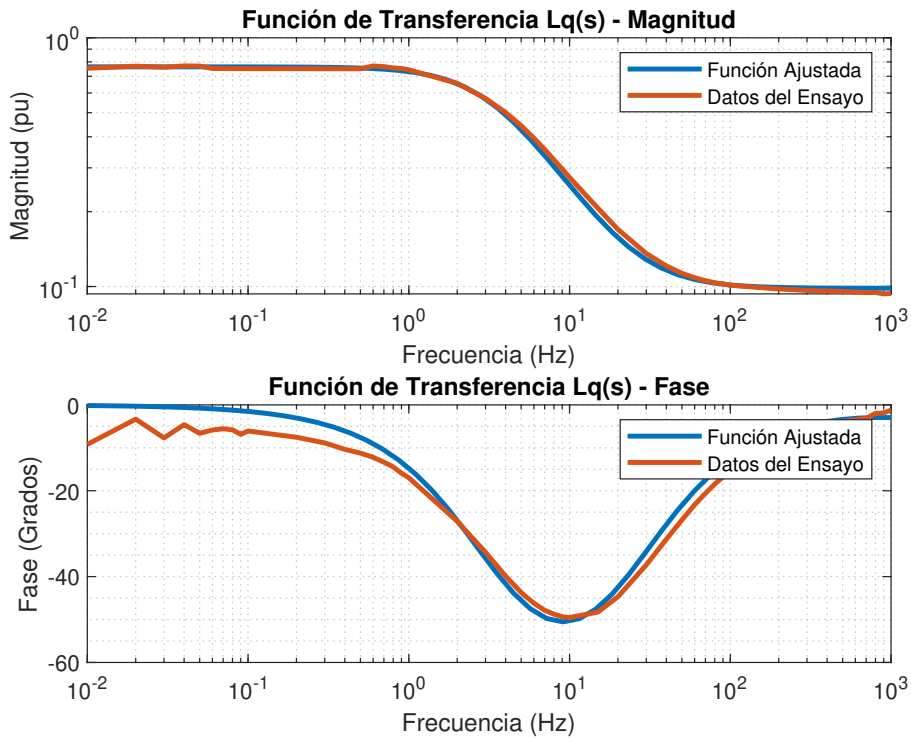


Figura 4.10: Curva ajustada para la función de transferencia de L_q . Fuente Autores

4.5.6. Parámetros de la Máquina Síncrona obtenidos del ensayo SSFR

Luego del proceso de ajuste de curvas, se presentan los parámetros de la máquina síncrona obtenidos del ensayo SSFR. Las Tablas 4.5 y 4.6 engloban los resultados para el eje d y q , respectivamente. Los parámetros se presentan en pu, la cual es la forma clásica de representación de magnitudes eléctricas en los SEP. Si se desea expresar en valores clásicos, se debe multiplicar cada parámetro por su respectivo valor base.

Tabla 4.5: Resultados del SSFR para el eje d .

Parámetro	Valor	Magnitud
R_a	$33,8091 \times 10^{-3}$	pu
L_l	$31,4642 \times 10^{-3}$	pu
R_{fd}	$406,1748 \times 10^{-3}$	pu
N_{af}	130,2356	-
L_{ad}	$844,3310 \times 10^{-3}$	pu
L_d	$875,7952 \times 10^{-3}$	pu
L'_d	$146,4403 \times 10^{-3}$	pu
L''_d	$101,0490 \times 10^{-3}$	pu
L_{fd}	$185,1054 \times 10^{-3}$	pu
R_{1d}	$547,3684 \times 10^{-3}$	pu
L_{1d}	$128,4642 \times 10^{-3}$	pu
T'_{d0}	1,9449	s
T''_{d0}	$44,1489 \times 10^{-3}$	s
T'_d	$325,2052 \times 10^{-3}$	s
T''_d	$30,4643 \times 10^{-3}$	s

Tabla 4.6: Resultados del SSFR para el eje q .

Parámetro	Valor	Magnitud
R_a	$32,2873 \times 10^{-3}$	pu
L_l	$31,4642 \times 10^{-3}$	pu
L_{aq}	$732,8034 \times 10^{-3}$	pu
L_q	$764,2677 \times 10^{-3}$	pu
L'_q	$96,8497 \times 10^{-3}$	pu
L''_q	$23,8376 \times 10^{-3}$	pu
R_{2q}	2,6956	pu
L_{2q}	$73,9044 \times 10^{-3}$	pu
R_{1q}	75,9854	pu
L_{1q}	$35,0112 \times 10^{-3}$	pu
T'_{q0}	$308,1937 \times 10^{-3}$	s
T''_{q0}	$509,1442 \times 10^{-6}$	s
T'_q	$39,0550 \times 10^{-3}$	s
T''_q	$125,3155 \times 10^{-6}$	s

4.6. Comparación de resultados obtenidos

Los ensayos de estado estable presentan parámetros elementales de la máquina síncrona. Esto requiere que la máquina opere a velocidad constante, en general a la velocidad de sincronismo. Son ensayos clásicos que se realizan a la máquina, y determinan las curvas características de cortocircuito y vacío.

El ensayo de secuencia cero, fue un resultado complementario o necesario para poder proceder con los ensayos restantes. Tal como se mencionó en la sección anterior, la máquina síncrona bajo ensayo es una máquina que tiene varios años en el laboratorio y no se dispone de los parámetros iniciales determinados por el fabricante. Por este motivo fue necesario determinar cada uno de estos parámetros mediante diferentes ensayos, en especial la reactancia de fuga de la máquina. El valor obtenido de reactancia de secuencia cero presenta bastante coherencia con respecto al diseño de la máquina.

Los parámetros dinámicos obtenidos mediante el ensayo de cortocircuito súbito, difieren ligeramente de los obtenidos mediante la respuesta en frecuencia. Las inductancias de eje directo (estable y transitorias) presentan bastante similitud entre ambos ensayos. Las del **SSFR** son levemente mayores, pero sin presentar una gran diferencia con respecto al análisis clásico. En la Tabla 4.7 se presenta la variación porcentual entre los parámetros obtenidos mediante el ensayo de cortocircuito súbito y los obtenidos mediante el ensayo **SSFR**.

Tabla 4.7: Variación Porcentual de los parámetros de eje d .

	Ensayo de Cortocircuito	SSFR	Variación Porcentual
L_d	0.9053 pu	0.87579 pu	3.37 %
L'_d	0.1126 pu	0.14644 pu	23.11 %
L''_d	0.0727 pu	0.1010 pu	28.05 %
T'_d	0.015 s	0.32520 s	95.39 %
T''_d	0.0526 s	0.03046 s	72.66 %

Una diferencia que llama la atención es en la constante de tiempo subtransitoria de la máquina obtenida del ensayo de cortocircuito trifásico súbito. Esta constante de tiempo es considerablemente mayor en el ensayo de frecuencia que en el de cortocircuito. Evaluando las constantes de tiempo transitorias, se

determina que, en los dos ensayos esta es similar. De la teoría general de máquinas eléctricas se conoce que la constante de tiempo subtransitoria es menor que la transitoria. Esta condición no se satisface para el ensayo de cortocircuito, por lo tanto, se da como válido al valor obtenido del ensayo de respuesta en frecuencia. Una razón para esta discrepancia puede ser el tamaño reducido de la máquina utilizada ($< 5 \text{ kW}$). Esto hace que las constantes de tiempo sean muy rápidas y difíciles de estimar mediante el ensayo de cortocircuito súbito. En este ensayo existen varias fuentes de error tales como la generación de envolventes, simetrización de las señales y filtrado de términos DC que pueden afectar los resultados cuando estas constantes de tiempo son rápidas.

Los parámetros de eje en cuadratura no se pueden contrastar contra sus semejantes. Justamente esta es una de las ventajas del SSFR, porque permite obtener un conjunto completo de parámetros de la máquina en una sola sesión o técnicas de ensayo. Los parámetros obtenidos guardan coherencia propia entre sí, la inductancia L_q es menor a la de eje d .

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

- Los ensayos de estado estable suministran (producen) información elemental del comportamiento de la máquina síncrona, son ensayos frecuentes que se realizan a este tipo de convertidor rotativo. El ensayo de cortocircuito trifásico súbito permite la determinación de los principales parámetros transitorios de la máquina síncrona. Estas dos metodologías de ensayo obligan a que la máquina deba estar funcionando en condiciones nominales. Los ensayos para determinar los parámetros en cuadratura conllevan una metodología diferente y que no fueron contemplados en el presente proyecto.
- Como alternativa para determinar los parámetros de la máquina sincrónica, se plantea los ensayos de [SSFR](#) en estos convertidores. La respuesta en frecuencia entrega un conjunto completo de parámetros de la máquina, que incluyen valores de estado estable, estado transitorio y subtransitorio, hasta las correspondientes constantes de tiempo.
- Los parámetros obtenidos en el ensayo de respuesta en frecuencia guardan relación con los obtenidos en los ensayos convencionales o clásicos. Existen algunas diferencias numéricas, principalmente con los parámetros obtenidos del cortocircuito trifásico brusco. Una posible razón para estas discrepancias se puede deber al instante en el que el interruptor es cerrado y se obtienen las corrientes de cortocircuito. La otra fuente de error puede ser debida al tamaño de la máquina utilizada, en el cual las resistencias juegan un papel más importante que en las máquinas de gran tamaño. El conjunto de parámetros ofrece información completa de

la máquina para poder realizar los diferentes estudios dinámicos, de estabilidad, de pequeña señal y de protecciones, que son necesarios en los estudios del Sistema Eléctrico de Potencia.

- Los programas de procesamiento en Matlab son una herramienta importante para la realización de todos los ensayos. La adquisición de las variables, procesamiento y discriminación de señales, programación del algoritmo para los parámetros, y presentación de resultados, fueron las etapas clave para el desarrollo del proyecto.
- En un futuro, la prueba de cortocircuito súbito en conjunto con los ensayos [SSFR](#) servirán para validar modelos de elementos finitos. Esto con el objetivo de realizar otras simulaciones y pruebas menos sensibles.
- Para realizar el ensayo propuesto se deben tener presente algunas consideraciones. Debido a que el ensayo se realiza con la máquina detenida y sin alimentación nominal, se debe tener en cuenta o considerar la temperatura ambiente y la de los bobinados. Para ello se requiere que la corriente de ensayo no supere el 0.5% de la corriente nominal. Para los casos de análisis a bajas frecuencias, se recomienda considerar el ruido que se introduce en el sistema de adquisición de señales. Un analizador de espectro puede ser un gran aliado en la realización de este ensayo, pero en el caso de no poseer uno de ellos, existen algunas alternativas para omitir o descartar las señales no deseadas. Tales como adquirir las señales y procesar en un computador mediante un análisis de Fourier ([FFT](#)). Este es el método recomendado debido a que el espectro de frecuencia se puede determinar directamente la magnitud y fase de la señal en la frecuencia bajo análisis. Otra técnica puede ser la implementación de filtros analógicos o digitales. La adecuada puesta a tierra de los elementos también resulta ser muy importante para minimizar la introducción de ruido en la medición. Utilizar medidores diferenciales también ayuda a reducir el ruido de modo común presente en los terminales de medida.

Capítulo 6

Glosario

FFT Método eficiente para determinar la transformada discreta de Fourier.

Mínimos cuadrados no lineales Variante de la técnica de ajuste de mínimos cuadrados, se utiliza para ajustar un conjunto de parámetros a un modelo no lineal.

pu Relación del valor real en cualquier unidad y el valor base o de referencia en la misma unidad.

RP Condiciones constantes y normales de funcionamiento de una máquina. Las variables de estado no se ven modificadas con el tiempo.

SEP Sistema eléctrico de potencia, hace referencia a los sistemas de generación, transporte distribución y comercialización de energía eléctrica.

SSFR Método para determinar funciones de transferencia apropiadas que describen la respuesta del flujo de la máquina a las perturbaciones de la corriente del estator y del voltaje de campo.

Bibliografía

- [1] J. M. Aller, “Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general,” *Editorial Equinoccio*, 2006.
- [2] “Ieee guide for test procedures for synchronous machines including acceptance and performance testing and parameter determination for dynamic analysis,” *IEEE Std 115-2019 (Revision of IEEE Std 115-2009)*, pp. 1–246, 2020.
- [3] D. Icaza and D. Borge-Diez, “Potential sources of renewable energy for the energy supply in the city of cuenca-ecuador with towards a smart grid,” in *2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2019, pp. 603–610.
- [4] N. G. Jara and C. Isaza, “Programas de eficiencia energética y etiquetado en el ecuador–revisión del estado actual,” *Memorias Ponencias 2014*, pp. 1–12, 2014.
- [5] “Ieee guide for test procedures for synchronous machines including acceptance and performance testing and parameter determination for dynamic analysis,” *IEEE Std 115-2019 (Revision of IEEE Std 115-2009)*, pp. 1–246, 2020.
- [6] D. Park, H. Karmaker, G. Dawson, and A. Eastham, “Standstill frequency response testing and modeling of salient-pole synchronous machines,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 3, pp. 230–236, 1998.
- [7] J. Bladh, M. Wallin, L. Saarinen, and U. Lundin, “Standstill frequency response test on a synchronous machine extended with damper bar measurements,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 46–56, 2016.

- [8] A. Belqorchi, U. Karaagac, J. Mahseredjian, and I. Kamwa, "Standstill frequency response test and validation of a large hydrogenerator," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2261–2269, 2019.
- [9] A. Walton, "A systematic method for the determination of the parameters of synchronous machines from the results of frequency response tests," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 15, no. 2, pp. 218–223, 2000.
- [10] D. Bilyi and D. Gerling, "Standstill frequency response test for obtaining parameters of six phase double delta salient-pole synchronous machine on example of claw-pole alternator," in *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2016, pp. 47–54.
- [11] M. Ghomi and Y. N. Sarem, "Review of synchronous generator parameters estimation and model identification," in *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 228–235.
- [12] E. Bortoni and J. Jardini, "A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 687–691, 2004.
- [13] M. Hasni, O. Touhami, R. Ibtouen, M. Fadel, and S. Caux, "Estimation of synchronous machine parameter by standstill frequency response tests," in *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, pp. 1–6.
- [14] H. Bissig, K. Reichert, and T. Kulig, "Modelling and identification of synchronous machines, a new approach with an extended frequency range," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 8, no. 2, pp. 263–271, 1993.
- [15] V. Pavlicek, M. Pittermann, and J. Fort, "Development of the measuring device for standstill frequency response (ssfr) testing for electric machine," in *2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 2018, pp. 1–6.
- [16] P. Dandeno, H. Karmaker, C. Azuaje, M. Glinkowski, I. Kamwa, S. Oliveira, S. Salon, R. Saunders, and S. Umans, "Experience with standstill frequency response (ssfr) testing and analysis of salient pole synchronous machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1209–1217, 1999.

- [17] R. H. Park, “Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, no. 3, pp. 716–727, 1929.
- [18] R. Park, “Two-reaction theory of synchronous machines-ii,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 52, no. 2, pp. 352–354, 1933.
- [19] A. Jaros, “Parameter identification of synchronous generator using standstill frequency response (ssfr) test,” Master’s thesis, NTNU, 2019.
- [20] H. W. Bode *et al.*, “Network analysis and feedback amplifier design,” 1945.
- [21] E. Levy, “Complex-curve fitting,” *IRE transactions on automatic control*, no. 1, pp. 37–43, 1959.