



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA MULTIMÁQUINA DE UN SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN INTERCONECTADO CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA ANTE
EVENTOS DE FALLA**

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta

Ing. Juan Martín Izaguirre Cedillo
G10070135

No. de CVU del SECIHTI: 1239458

Director de Tesis

Dr. Joel Rodríguez Guillén
No. de CVU del SECIHTI: 560656

Co-director de Tesis

Dr. Rubén Salas Cabrera
No. de CVU del SECIHTI: 60075

Cd. Madero, Tamaulipas



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **06/junio/2025**

Oficio No.: U2.024/25

Asunto: Autorización de impresión de tesis

C. JUAN MARTÍN IZAGUIRRE CEDILLO
No. DE CONTROL G10070135
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA MULTIMÁQUINA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
INTERCONECTADO CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA ANTE EVENTOS DE FALLA"**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

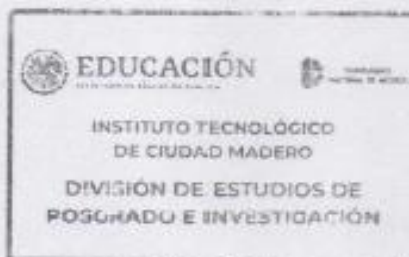
PRESIDENTE:	DR. JOEL RODRÍGUEZ GUILLÉN
SECRETARIO:	DR. RUBÉN SALAS CABRERA
VOCAL:	M.C. EDUARDO NACÚ SALAS CABRERA
SUPLENTE:	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
DIRECTOR DE TESIS:	DR. JOEL RODRÍGUEZ GUILLÉN
CO-DIRECTOR:	DR. RUBÉN SALAS CABRERA

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por mi patria y por mi bien"®

RAFAEL CASTILLO GUTIERREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
RCG/RCI/aecr



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx



DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que me han apoyado en este camino, y en todo lo que he realizado en mi carrera profesional y personal.

A todas aquellas personas que me han dado su apoyo incondicional en los momentos en donde más lo he necesitado.

Gracias a todos aquellos que se han tomado el tiempo y me han dado una explicación cuando algo no comprendo, una palabra de aliento cuando todo parece complicado, un abrazo y por estar conmigo en todo momento.

Considero que las personas que lean esto serán las correctas y sabrán que, en algún momento de su vida, han contribuido a que yo pueda estar en este momento escribiendo estas palabras, por lo cual en esta parte de mi trabajo no mencionare nombres, como dije anteriormente si lo puedes leer sabrás que estoy eternamente agradecido con todo lo que has hecho por mí, aunque pueda parecerme poco o mucho te escribo esto con una enorme gratitud.

Es para mí un placer dedicar estas palabras y que al leerlas sepas que has cambiado para mi bien mi vida, y que, si en un futuro el creador me permite cambiar la vida de alguien, lo hare en agradecimiento a lo que ustedes me han dado.

Con mucho cariño te dedico estas palabras.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en mi camino hacia la conclusión de mi maestría.

A mi esposa, gracias por tu amor, tu paciencia y tu motivación constante. No podría haber logrado esto sin ti

A mi hija, gracias por ser mi motivación y mi inspiración. Tu sonrisa y tu amor han sido mi energía para seguir adelante. Estoy orgulloso de ser tu padre y espero ser un ejemplo para ti.

A mi padre, gracias por tu ejemplo, tu guía y tu apoyo incondicional. Tu influencia en mi vida ha sido invaluable

A mi familia, gracias por su amor y apoyo constante. Su presencia en mi vida han sido un motor para seguir adelante.

A mis maestros y profesores, gracias por su dedicación, experiencia y sabiduría. Su enseñanza ha sido fundamental para mi crecimiento personal y profesional

Y a todas las personas que de alguna manera han contribuido a mi crecimiento y logro, gracias por su apoyo, motivación y confianza en mí.

Este logro no es solo mío, es también de todas las personas que han creído en mí. Gracias por ser parte de mi historia.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA MULTIMÁQUINA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN INTERCONECTADO CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA ANTES EVENTOS DE FALLA

Juan Martín Izaguirre Cedillo

RESUMEN

El Análisis de la estabilidad transitoria es uno de los tópicos clave en operación y planificación del sistema eléctrico. Este trabajo tiene como objetivo el análisis de respuesta transitoria de las máquinas ante una perturbación de la red eléctrica y evaluar la capacidad de la máquina para recuperar la estabilidad después de una perturbación

En el presente estudio se analiza una red eléctrica interconectada de 5 nodos en los cuales se encuentran conectadas máquinas de inducción con diferentes parámetros, tales como motores de inducción y un generador de inducción el cual trabaja a velocidad súper síncrona. Utilizando diferentes métodos de análisis, tales como el cálculo de la matriz de admitancia nodal (Y_{bus}) para la resolución de los flujos de carga en la red. Esto nos permite obtener datos del análisis de la red eléctrica en estado estacionario, donde se resuelve un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales utilizando números complejos. A su vez, con el fin de simplificar el análisis, el transitorio eléctrico del estator ha sido despreciado de las ecuaciones diferenciales que corresponden a las máquinas de inducción de orden reducido.

Bajo este enfoque se permite evaluar el comportamiento dinámico / transitorio y el estado estable de la red bajo las condiciones normales y anormales, facilitando un análisis más preciso de su operación en términos de potencia, voltaje y estabilidad.

Empleando el software Matlab, en este estudio se simula ante diversas perturbaciones tales como:

1. Condiciones de las máquinas donde no hay perturbación, todas las máquinas se encuentran en estado estable
2. Condiciones de las máquinas aplicando un escalón mecánico a dos máquinas
3. Arranque de una máquina desde el reposo.
4. Falla trifásica sin liberación de falla
5. Falla trifásica con liberación de falla.

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF A MULTI-MACHINE INTERCONNECTED DISTRIBUTION SYSTEM WITH DISTRIBUTED GENERATION UNDER FAULT EVENTS

Juan Martín Izaguirre Cedillo

ABSTRACT

The research on this thesis focuses on evaluating the dynamic response of induction machines under different perturbations, symmetrical short-circuits without fault clearance, direct-on-line starting from standstill, and voltage sags caused by external network conditions. The rotor equations are formulated in the time domain and solved using numerical integration techniques to assess the machine's ability to regain stable operation after each disturbance. The results provide insights into the limits of stable operation, highlighting critical scenarios that could lead to loss of synchronism or excessive torque oscillations. This analysis is particularly relevant for modern power systems with high integration of induction motor loads and distributed energy resources.

INDICE:

1. Introducción 1.	<i>Pag. (10)</i>
1.1. Antecedentes.	<i>Pag. (11)</i>
1.2. Planteamiento del problema.	<i>Pag. (13)</i>
1.3. Hipótesis.	<i>Pag. (13)</i>
1.4. Objetivo.	<i>Pag. (13)</i>
1.4.1 Objetivos Específicos.	<i>Pag. (13)</i>
1.5 Justificación.	<i>Pag. (13)</i>
1.6 Alcances y límites.	<i>Pag. (13)</i>
2.0 Marco Teórico.	<i>Pag. (14)</i>
2.1 Modelado de orden completo en coordenadas de fase de la máquina de inducción.	<i>Pag. (14)</i>
2.2 Ecuaciones de voltaje en variables de la máquina.	<i>Pag. (14)</i>
2.3 Ecuaciones de torque en variables de la máquina.	<i>Pag. (19)</i>
2.4 Ecuación de transformación para circuito de rotor ($qd0$).	<i>Pag. (20)</i>
2.5 Ecuaciones de voltaje en variables de marco de referencia.	<i>Pag. (22)</i>
2.6 Ecuaciones de torque en marco de referencia arbitraria.	<i>Pag. (26)</i>
2.7 Ecuaciones de la máquina de orden reducido	<i>Pag. (27)</i>
2.8 Modelado del par mecánico	<i>Pag. (27)</i>
2.9 Condiciones iniciales	<i>Pag. (28)</i>
2.10 Valores en por unidad	<i>Pag. (28)</i>
2.10.1 Característica del sistema en por unidad	<i>Pag. (29)</i>
2.11 Condiciones de operación de un sistema eléctrico de distribución con Generación distribuida	<i>Pag. (30)</i>
2.11.1 Ventajas de la generación distribuida	<i>Pag. (30)</i>
2.11.2 Impacto de la generación distribuida de un sistema eléctrico de distribución	<i>Pag. (31)</i>
2.11.3 Efecto en las pérdidas del sistema.	<i>Pag. (31)</i>

2.11.4 Efecto en el flujo de carga	Pag. (31)
2.11.5 Efecto sobre las corrientes de falla y equipos de protecciones	Pag. (31)
2.11.6 Efecto sobre la calidad de la energía	Pag. (32)
2.11.7 Efecto sobre la confiabilidad de un sistema eléctrico	Pag. (32)
2.12 Red eléctrica	Pag. (32)
2.12.1 Líneas de transmisión	Pag. (32)
2.13 Generador de inducción	Pag. (33)
2.14 Motor de inducción.	Pag. (33).
2.14.1 Motor Síncrono	Pag. (34)
2.14.2 Reactancias de las máquinas rotatorias	Pag. (34)
2.15 Impedancia	Pag. (35)
2.16 Admitancia	Pag. (35)
2.17 Flujos de carga	Pag. (36)
2.17.1 Barra tipo P-V	Pag. (37)
2.17.2 Barra tipo P-Q o Barra de carga	Pag. (37)
2.17.3 Barra Tipo Slack	Pag. (38)
2.17.4 Método de solución para los estudios de flujo de potencia	Pag. (38)
2.17.5 Método de Newton Raphson en estudios de flujos de potencia	Pag. (38)
2.17.6 Técnica iterativa de Newton- Raphson	Pag. (38)
Capítulo 3 Metodología.	Pag. (41)
3.1 Ecuaciones de la máquina de orden reducido despreciando el transitorio Del estator	Pag. (41)
3.2 Parámetros de la red eléctrica	Pag. (44)
3.3 Matriz de admitancia	Pag. (46)
3.3.1 Formación de matriz para estudios eléctricos	Pag. (46)
3.4 Flujos de potencia método de Newton Raphson	Pag. (56)
3.4.1 Calculo de Flujo de potencia método Newton Raphson	Pag. (57)

<i>3.5 solución de las ecuaciones iterativas de la máquina de inducción</i>	<i>Pag. (63)</i>
<i>3.5.1 Método de Euler mejorado</i>	<i>Pag. (63)</i>
<i>3.5.2 Aplicación del método de Euler Mejorado</i>	<i>Pag. (65)</i>
Capítulo 4 Desarrollo del código MATLAB	<i>Pag. (67)</i>
<i>4.1 Estructura y funcionamiento del código</i>	<i>Pag. (67)</i>
Capítulo 5 Resultados y conclusiones	<i>Pag. (72)</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Parámetros de la red eléctrica</i>	<i>Pag. (47)</i>
<i>Tabla 2 Parámetros de las máquinas</i>	<i>Pag. (47)</i>
<i>Tabla 3 Desarrollo de la matriz Y_{bus}</i>	<i>Pag. (49)</i>
<i>Tabla 4 Parámetros de la red eléctrica bajo estudio</i>	<i>Pag. (13)</i>

INDICE DE IMÁGENES.

<i>Imagen 1 Máquina de inducción simétrica conectada en estrella 2 polos 3 fases</i>	<i>Pag. (18)</i>
<i>Imagen 2 transformación para circuitos rotatorios representadas por relaciones Trigonométricas</i>	<i>Pag. (23)</i>
<i>Imagen 3 Barra tipo P V</i>	<i>Pag. (39)</i>
<i>Imagen 4 Barra tipo PQ</i>	<i>Pag. (39)</i>
<i>Imagen 5 Red Eléctrica valores de impedancia.</i>	<i>Pag. (46)</i>
<i>Imagen 6 Red eléctrica conexión entre buses</i>	<i>Pag. (48)</i>
<i>Imagen 7 Red eléctrica de dos buses</i>	<i>Pag. (58)</i>
<i>Imagen 8 Representación gráfica del método de Euler Mejorado</i>	<i>Pag. (66)</i>
<i>Imagen 9 Subrutina de datos</i>	<i>Pag. (70)</i>
<i>Imagen 10 Subrutina de condiciones iniciales</i>	<i>Pag. (70)</i>
<i>Imagen 11 Subrutina de flujos de carga</i>	<i>Pag. (71)</i>
<i>Imagen 12 Subrutina método numérico</i>	<i>Pag. (71)</i>
<i>Imagen 13 Velocidad del rotor</i>	<i>Pag. (73)</i>
<i>Imagen 14 Par eléctrico / Par Mecánico</i>	<i>Pag (73)</i>
<i>Imagen 15 Magnitudes de voltaje</i>	<i>Pag. (74)</i>
<i>Imagen 16 Magnitudes de voltaje rectangular</i>	<i>Pag. (74)</i>
<i>Imagen 17 Magnitudes de corriente</i>	<i>Pag. (75)</i>
<i>Imagen 18 Velocidad del rotor</i>	<i>Pag. (77)</i>
<i>Imagen 19 Par eléctrico / Par Mecánico</i>	<i>Pag (77)</i>
<i>Imagen 20 Velocidad del roto / Par eléctrico</i>	<i>Pag (77)</i>
<i>Imagen 21 Fasor de voltaje vs tiempo</i>	<i>Pag. (78)</i>
<i>Imagen 22 Magnitud de voltaje rectangular</i>	<i>Pag. (78)</i>
<i>Imagen 23 Magnitud de corriente</i>	<i>Pag. (78)</i>
<i>Imagen 24 Velocidad del rotor</i>	<i>Pag. (80)</i>

<i>Imagen 25 Par eléctrico / Par mecánico</i>	<i>Pag. (80)</i>
<i>Imagen 26 Velocidad del rotor / Par eléctrico</i>	<i>Pag. (80)</i>
<i>Imagen 27 Fasor de voltaje vs tiempo</i>	<i>Pag. (81)</i>
<i>Imagen 28 Magnitudes de corrientes</i>	<i>Pag. (81)</i>
<i>Imagen 29 Velocidad del rotor</i>	<i>Pag. (83)</i>
<i>Imagen 30 Par eléctrico / Par mecánico</i>	<i>Pag. (83)</i>
<i>Imagen 31 Velocidad rotor / Par eléctrico</i>	<i>Pag. (83)</i>
<i>Imagen 32 Fasor de voltaje vs tiempo</i>	<i>Pag. (84)</i>
<i>Imagen 33 Magnitudes de corrientes</i>	<i>Pag. (84)</i>
<i>Imagen 34 Velocidad de rotor</i>	<i>Pag. (86)</i>
<i>Imagen 35 Par eléctrico / Par mecánico</i>	<i>Pag. (86)</i>
<i>Imagen 36 Velocidad de rotor / Par eléctrico</i>	<i>Pag. (86)</i>
<i>Imagen 37 Fasor de voltaje Vs tiempo</i>	<i>Pag. (87)</i>
<i>Imagen 38 Magnitud de corrientes</i>	<i>Pag. (87)</i>

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el crecimiento de la población se ha convertido en uno de los tópicos con mayor importancia. Dado este suceso los consumos de energía eléctrica se han incrementado significativamente, bajo estas condiciones se espera que exista un incremento en la demanda de energía en los próximos años, lo cual nos hace pensar que un aumento significativo conducirá a cuestiones ambientales tanto locales como regionales, por lo tanto, organismos internacionales están optando por la implementación de energías renovables como su mejor opción para combatir estos requerimientos de energía [1].

Una de las opciones con mayor aceptación entre la comunidad internacional es el uso de energías renovable tales como la eólica lo cual se traduce en un incremento en el desarrollo de la generación distribuida (GD) [2].

Actualmente se puede considerar que la utilización de la generación distribuida es relativamente bajo y esto ha llevado a que las normas existentes exijan que la GD no debe participar en el control de voltaje y frecuencia disparando así durante transitorios de voltaje y frecuencia para volver a conectarse más tarde cuando se restablezcan las condiciones normales de funcionamiento [3].

Sin embargo, la utilización de la GD ciertamente está aumentando y se espera que alcance niveles que probablemente impactarían la operación y el rendimiento del sistema. Por lo tanto, los estudios están comenzando a concentrarse en analizar el efecto acumulativo de más GD en la red eléctrica a nivel de sistemas locales y globales [4].

Bajo este contexto hay muchas cuestiones que aún no están bien comprendidas.

Aunque la GD puede tener algunos beneficios para el sistema como mejoras en la calidad de la energía y la eficiencia del sistema, hay muchos aspectos que aún quedan por abordar adecuadamente. Por ejemplo, estrategias de control adecuadas para redes con importantes usos de la GD, considerando las interacciones entre los sistemas de transmisión y distribución. Dado que la mayoría de estos estudios se deben analizar basados en simulaciones.

Estos modelos deben cumplir ciertos requisitos para permitir investigar la estabilidad relevante del sistema y cuestiones de control.

1.1 ANTECEDENTES:

La evolución de los sistemas eléctricos ha estado estrechamente vinculada con los avances en las tecnologías de generación de energía. Tradicionalmente, las redes eléctricas se caracterizaban por una estructura jerárquica donde la generación centralizada en grandes plantas de energía abastecía a vastas áreas. Sin embargo, con el tiempo, las preocupaciones sobre la sostenibilidad, el cambio climático y la seguridad energética han impulsado el desarrollo de la generación distribuida (GD). Esta nueva forma de generación, que se basa en unidades más pequeñas y dispersas, ha permitido integrar una mayor cantidad de fuentes renovables, como la energía eólica y solar, directamente en la red eléctrica. La generación distribuida tiene el potencial de mejorar la eficiencia operativa, reducir pérdidas en las líneas de transmisión y proporcionar una mayor seguridad energética al reducir la dependencia de grandes plantas de generación.

No obstante, la incorporación de fuentes de energía renovable, especialmente la energía eólica, ha traído consigo una serie de retos técnicos, principalmente en términos de estabilidad y control del sistema eléctrico. Las fuentes renovables intermitentes, como los parques eólicos, generan variaciones en la potencia activa y reactiva, lo que puede afectar la frecuencia y el voltaje de la red.

Un área clave de investigación ha sido el análisis de máquinas de inducción, particularmente en el contexto de su integración en sistemas con generación distribuida. Los generadores de inducción eólicos (GIE) son una opción popular debido a su simplicidad y coste relativamente bajo, pero presentan un comportamiento dinámico complejo. A diferencia de los generadores síncronos, los GIE no tienen control directo sobre la frecuencia de la red, lo que puede generar dificultades para mantener la estabilidad del sistema, especialmente en redes con alta penetración de fuentes renovables. Estudios han demostrado que los GIE pueden contribuir a la estabilidad del sistema si se implementan adecuadas estrategias de control y compensación de potencia reactiva.

Además, los motores de inducción de orden reducido han emergido como una solución alternativa para mejorar la estabilidad y fiabilidad de los sistemas eléctricos. Estos motores, que se caracterizan por un número reducido de polos y una menor complejidad de control, ofrecen ventajas en términos de rendimiento y costos en comparación con otros tipos de generadores eólicos. Sin embargo, su integración en redes interconectadas también presenta desafíos, particularmente en términos de la dinámica transitoria y la sincronización con el sistema. Se han analizado el comportamiento de los motores de inducción de orden reducido en redes eléctricas y han identificado que su uso en combinación con tecnologías de generación distribuida puede mejorar la estabilidad, pero requieren una gestión cuidadosa de las condiciones de operación y protección.

En cuanto al análisis técnico y matemático de la red eléctrica interconectada, el estudio de los flujos de carga es esencial para evaluar cómo la potencia se distribuye a través de la red en condiciones de estado estacionario. El uso de la matriz de admitancia (Y_{bus}) es fundamental para modelar la topología de la red y calcular los flujos de potencia y voltaje en cada nodo.

Los métodos de resolución iterativa de las ecuaciones no lineales que describen los flujos de carga, como el método de Newton-Raphson, son comúnmente empleados para obtener soluciones precisas. Estos métodos iterativos son esenciales para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas no lineales que caracterizan el comportamiento de las redes eléctricas interconectadas, especialmente cuando se incorporan componentes dinámicos como los generadores eólicos y los motores de inducción.

A pesar de los avances en el análisis y control de redes con generación distribuida, la estabilidad del sistema sigue siendo un desafío crítico. La interacción entre los generadores de inducción eólicos, los motores de inducción y la red eléctrica requiere un análisis detallado de sus ecuaciones diferenciales y la influencia de estas máquinas sobre el comportamiento transitorio del sistema. La falta de un control directo sobre el voltaje y la frecuencia en estas máquinas puede dar lugar a oscilaciones y perturbaciones que afectan la estabilidad general de la red, como lo han señalado estudios recientes de Ghosh et al. (2015) y Gómez et al. (2021).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Se ha demostrado que la implementación de sistemas de Generación Distribuida afecta directamente a los niveles de cortocircuito, lo cual se traduce en niveles de perturbación con un impacto en los sistemas eléctricos mayores al que se tiene antes de su incorporación al SEP.

El análisis de la estabilidad requiere contemplar los nuevos parámetros de aportaciones de falla ya que la respuesta de los esquemas se verá afectada en los tiempos de respuesta, siendo posible perder la estabilidad al disparar cargas incorrectamente.

1.3 HIPOTESIS

Con la utilización de software se desarrollará un análisis a los sistemas interconectados con generación distribuida lo cual permitirá ver el impacto que se tendrá ante perturbaciones y la respuesta de estabilidad del sistema eléctrico.

1.4 OBJETIVO.

Analizar la respuesta transitoria de un sistema de distribución interconectado con generación distribuida.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

1. Analizar los transitorios del sistema de distribución
2. Modelado de la red.
3. Desarrollo de código en MATLAB.
4. Definir parámetros de las máquinas
5. Realizar diferentes simulaciones las cuales nos permitan visualizar el comportamiento de las máquinas y sus respuestas ante perturbaciones.

1.5 JUSTIFICACION.

Dado que las condiciones operativas de carga se encuentran variantes en el tiempo es decir no se mantienen estáticas, los consumos de potencia, corrientes y voltajes siempre están variando. Es necesario modelar la red para conocer los parámetros de afectación ante cualquier escenario posible de falla o incremento a la carga. Ya que de lo contrario nos podemos encontrar con la pérdida de la estabilidad del sistema eléctrico.

El desarrollo de un código en software nos apoyará a simular condiciones reales de falla y sus dinámicas en las máquinas conectadas al sistema eléctrico de distribución.

1.6 ALCANCES Y LIMITES

1. Este trabajo se basa en la simulación de sistemas eléctricos fallas de par mecánico, fallas de cortocircuito y arranque de máquinas desde el reposo
2. El trabajo se realizará con un máximo de 5 buses.
3. Demostrar estos análisis en simulación de campo es muy costosa.
4. No se puede modelar en tiempo real dado que no existe una red similar.

Capítulo 2: MARCO TEÓRICO.

2.1- MODELADO DE ORDEN COMPLETO EN COORDENADAS DE FASE DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

Las máquinas de inducción se utilizan en una gran variedad de aplicaciones como medio para convertir energía eléctrica en trabajo mecánico. Es sin duda el workhorse de la industria eléctrica.

Los accionamientos para bombas, acerías y polipastos son solo algunas de las aplicaciones de los grandes motores de inducción multifásicos

En menos escala, el servomotor bifásico se utiliza en sistemas de control de seguimiento de posición y los motores de inducción monofásicos se utilizan ampliamente en electrodomésticos, así como en herramientas de banco.

2.2 ECUACIONES DE VOLTAJE EN VARIABLES DE MÁQUINA.

En un sistema trifásico de dos polos con conexión en estrella, los devanados del estator son iguales entre sí, están distribuidos de formas sinusoidales y separadas entre sí 120 grados eléctricos. Cada uno tiene un número equivalente de vueltas N_s y una resistencia r_s . De forma similar, los devanados del rotor también se consideran como tres devanados iguales, igualmente distribuidos de manera sinusoidal y desplazados 120 grados, con un número equivalente de vueltas N_r y resistencia r_r . Es importante destacar que la orientación positiva de los ejes magnéticos de los devanados del estator coincide con la dirección de las fases f_{as} , f_{bs} y f_{cs} , tal como lo indican las ecuaciones de transformación.

Las ecuaciones de voltaje en variables de la maquina se pueden expresar como:

$$V_{abcs} = r_s * I_{abcs} + \rho \lambda_{abcs} \quad \dots (2.1)$$

$$V_{abcr} = r_r * I_{abcr} + \rho \lambda_{abcr} \quad \dots (2.2)$$

Dónde:

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} | f_{bs} | f_{cs}] \quad \dots (2.3)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} | f_{br} | f_{cr}] \quad \dots (2.4)$$

En las ecuaciones antes descritas la s denota las variables y parámetros asociados con el circuito del estator, y la r denota variables y parámetros asociados con el circuito del rotor.

Ambos r_s r_r son matrices diagonales. Cada uno con elementos iguales diferentes de cero. Para un sistema magnéticamente lineal, los enlaces de flujo se pueden expresar como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & (L_{sr}) \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \end{bmatrix} \quad \dots (2.5)$$

Las inductancias del devanado se derivan como.

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad \dots (2.6)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{ls} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad \dots (2.7)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad \dots (2.8)$$

En las ecuaciones de la inductancia L_{ls} and L_{ms} son respectivamente, el flujo y las inductancias magnetizantes del devanado del estator, L_{lr} and L_{mr} son devanados del rotor.

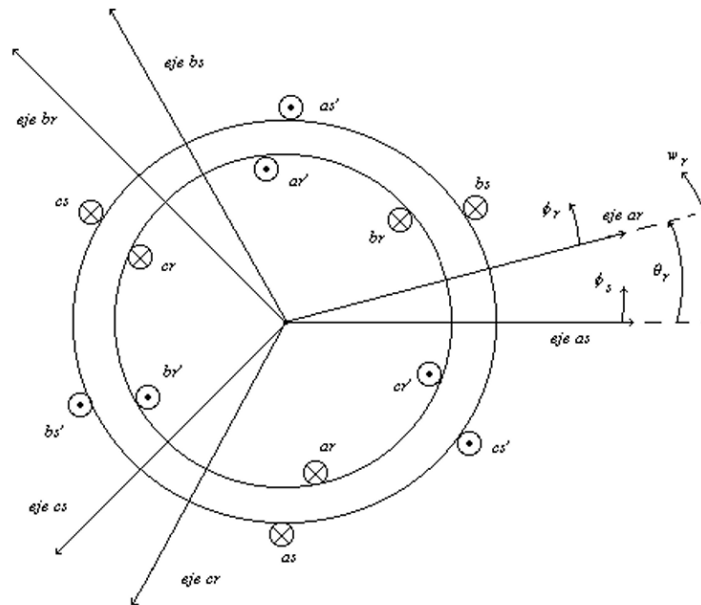


Figura 1 Máquina de inducción simétrica conectada en estrella, dos polos 3 fases.

La inductancia L_{sr} es la amplitud de la mutua inductancia entre el devanado del rotor y el devanado del estator.

La mayoría de las máquinas de inducción no utilizan devanados bobinados en el rotor; en su lugar, la corriente circula a través de barras de cobre o aluminio que están uniformemente distribuidas e incrustadas en un núcleo ferromagnético. Estas barras están conectadas entre sí por anillos conductores en ambos extremos del rotor, formando lo que se conoce como un rotor tipo jaula de ardilla. Aunque a primera vista podría parecer que la inductancia mutua entre un estator con devanado sinusoidal y un rotor con barras distribuidas uniformemente no adopta la forma típica (como se muestra en la ecuación 8), en la práctica, un rotor con este tipo de distribución puede modelarse razonablemente bien utilizando solo su componente fundamental. Esto permite representarlo como un sistema trifásico equivalente. Normalmente, se emplea un único devanado equivalente por fase para esta representación. Sin embargo, en ciertas máquinas, el diseño del rotor requiere una representación más detallada, en la que cada fase se modela con dos devanados equivalentes en paralelo, para reflejar mejor el comportamiento eléctrico. Estas máquinas se conocen como máquinas con rotor de doble jaula.

Adicionalmente, en las máquinas reales, las barras del rotor no suelen estar alineadas exactamente con el eje de rotación; en cambio, se colocan con una ligera inclinación. Esta torsión en los conductores del rotor ayuda a reducir el efecto de los pares no deseados generados por las componentes armónicas del campo magnético. Cabe destacar que estas particularidades de diseño no se abordan en el análisis actual.

En cambio, se supone que todos los efectos sobre la amplitud del componente fundamental de la forma de onda debido a los devanados del rotor sesgados y distribuidos uniformemente se tienen en cuenta en el valor de N_r . la suposición de que la máquina de inducción es un dispositivo lineal y libre de armónicos es una simplificación excesiva que no puede describir el comportamiento de las máquinas de inducción en todos los modos de operación. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones su comportamiento se puede predecir adecuadamente con esta representación simplificada.

Al expresar las ecuaciones de voltaje en forma de variable de máquina, es conveniente referir todas las variables del rotor a los devanados del estator mediante relaciones de vuelta apropiadas

$$\mathbf{i}'_{abc r} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{abc r} \quad \dots (2.9)$$

$$\mathbf{V}'_{abc r} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{V}_{abc r} \quad \dots (2.10)$$

$$\boldsymbol{\lambda}'_{abc r} = \frac{N_s}{N_r} \boldsymbol{\lambda}_{abc r} \quad \dots (2.11)$$

La magnetización y la inductancia mutua están asociadas con la misma trayectoria de flujo magnético por lo tanto L_{ms} , L_{mr} and L_{sr} están relacionadas como se establece y en particular

$$L_{ms} = \frac{N_r}{N_s} L_{sr} \quad \dots (2.12)$$

Así definiremos

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad \dots (2.13)$$

En este sentido L_{mr} debe ser expresado como

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 L_{ms} \quad \dots (2.14)$$

Y si dejamos

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_r \quad \dots (2.15)$$

Entonces obtenemos

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad \dots (2.16)$$

Donde

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr} \quad \dots (2.17)$$

El enlace de flujo ahora puede representarse como

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & (L'_{sr}) \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I'_{abcr} \end{bmatrix} \quad \dots (2.18)$$

Las ecuaciones de voltaje expresadas en términos de la variable de la máquina referida a los devanados del estator ahora pueden escribirse como

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \rho L_s & \rho L'_{sr} \\ \rho (L'_{sr})^T & r'_r + \rho L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I'_{abcr} \end{bmatrix} \quad \dots (2.19)$$

Donde

$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r \quad \dots (2.20)$$

2.3- ECUACIONES DE TORQUE EN VARIABLES DE LA MÁQUINA.

La evaluación de la energía almacenada en el campo de acoplamiento produce la expresión familiar para la energía almacenada en un sistema magnéticamente lineal. En particular la energía almacenada es la suma de la autoinductancia de cada devanado multiplicada por la mitad del cuadrado de su corriente y todas las inductancias mutuas cada vez multiplicada por las corrientes en los dos devanados acoplados por la inductancia mutua.

Es claro que la energía almacenada en las inductancias de fuga no es una parte de la energía almacenada en el campo de acoplamiento. Por tanto, la energía almacenada en el campo de acoplamiento puede escribirse como

$$\mathbf{W}_f = \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abcs})^T (\mathbf{L}_s - \mathbf{L}_{ls} \mathbf{I}) \mathbf{i}_{abcs} + (\mathbf{i}_{abcs})^T \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_{abcr} \frac{1}{2} (\mathbf{i}'_{abcs})^T (\mathbf{L}'_r - \mathbf{L}'_{lr} \mathbf{I}) \mathbf{i}'_{abcr} \dots (2.21)$$

Donde $\mathbf{I}$ es la matriz de identidad. Porque se asume que la máquina es magnéticamente lineal, el campo de energía $\mathbf{W}_f$ es el mismo que el de $\mathbf{W}_c$.

Para expresar el torque electromagnético, es necesario modificar la expresión. El cambio de energía mecánica en un sistema de rotación con una entrada mecánica puede ser escrita como:

$$dW_m = -T_e d\theta_{rm} \dots (2.22)$$

Donde T_e es el torque electromagnético positivo por la acción del motor (salida de torque) y θ_{rm} es el desplazamiento real del rotor. Los enlaces de flujo, las corrientes, $\mathbf{W}_f$, $\mathbf{W}_c$ se expresan todos en función del desplazamiento angular eléctrico θ_r .

Dado que

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2}\right) \theta_{rm} \dots (2.23)$$

Donde P es el número de polos en la máquina, entonces

$$dW_m = -T_e \left(\frac{2}{P}\right) d\theta_r \dots (2.24)$$

El torque electromagnético debe ser expresado como

$$T_e(i_j, \theta_r) = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{\partial W_c(i_j, \theta_r)}{\partial \theta_r} \dots (2.25)$$

El torque y la velocidad del rotor están relacionadas por

$$T_e = J \left(\frac{2}{P}\right) \rho \omega_r + T_L \dots (2.26)$$

Donde J es la inercia del rotor y en algunos casos conectados a la carga.

2.4- ECUACIONES DE TRANSFORMACIÓN PARA CIRCUITOS DE ROTOR (qd0).

Un cambio de variables la cual formula una transformación de 3 fases en las variables del circuito del rotor a un sistema arbitrario de referencia es

$$f_{qd0r} = \mathbf{K}_r \mathbf{f}'_{abcr} \quad \dots (2.27)$$

Donde

$$(\mathbf{f}'_{qd0r})^T = [\mathbf{f}'_{qr} | \mathbf{f}'_{dr} | \mathbf{f}'_{0r}] \quad \dots (2.28)$$

$$(\mathbf{f}'_{abcr})^T = [\mathbf{f}'_{ar} | \mathbf{f}'_{br} | \mathbf{f}'_{cr}] \quad \dots (2.29)$$

$$\mathbf{K}_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \beta & \sin \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \dots (2.30)$$

$$\beta = \theta - \theta_r \quad \dots (2.31)$$

El desplazamiento angular

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \dots (2.32)$$

Y podemos notar que se resuelve para θ_r y escrita en forma de integral definida o indefinida.

La inversa es

$$(\mathbf{K}_r)^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 1 \\ \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2.33)$$

El subíndice r se utiliza para identificar las variables, parámetros y transformaciones que corresponden a los circuitos del rotor. Aunque este cambio de variables no requiere necesariamente una interpretación física directa, al igual que en el caso de los circuitos del estator, resulta útil imaginar estas ecuaciones de transformación como relaciones trigonométricas entre vectores, lo que facilita su comprensión y análisis.

Es evidente que las ecuaciones de transformación presentadas para los circuitos del rotor son equivalentes a las de los circuitos estacionarios, con la diferencia de que se utiliza β como ángulo de desplazamiento en lugar de cero. En realidad, tanto las transformaciones aplicadas a los circuitos estacionarios como a los giratorios son casos particulares de una transformación general que puede aplicarse a cualquier tipo de circuito, ya sea fijo o en movimiento. En particular, si en la expresión $\beta = \theta_r$ se sustituye por θ_c se obtiene esta forma generalizada.

$$\omega_c = \frac{d\theta_c}{dt} \quad \dots (2.34)$$

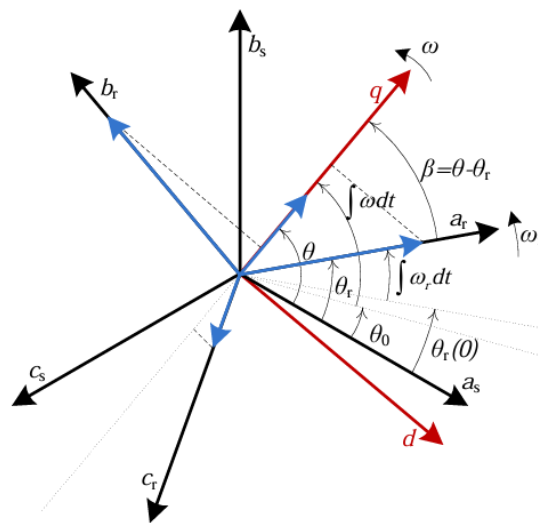


Figura 2 Transformación para circuitos rotatorios

2.5- ECUACIONES DE VOLTAJE EN VARIABLES DE MARCO DE REFERENCIA.

Usando la información sabemos la forma de las ecuaciones de voltaje en marco de referencia arbitrario.

$$V_{qd0s} = r_s * i_{qd0s} + \omega \lambda_{qds} + \rho \lambda_{qd0r} \quad \dots (2.35)$$

$$V'_{qd0r} = r'_r * i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + \rho \lambda'_{qd0r} \quad \dots (2.36)$$

Donde

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} | \lambda_{qs} | 0] \quad \dots (2.37)$$

$$(\lambda_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} | -\lambda'_{qr} | 0] \quad \dots (2.38)$$

El conjunto de ecuaciones se completa una vez que se determinan las expresiones para los vínculos de flujo. Sustituyendo las ecuaciones de transformación en las ecuaciones de vínculo de flujo expresadas en variables abc, se obtienen las ecuaciones de vínculo de flujo para un sistema magnéticamente lineal.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_r L'_r (K_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i_{qd0r} \end{bmatrix} \quad \dots (2.39)$$

Para L_s

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad \dots (2.40)$$

Donde

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad \dots (2.41)$$

L'_r is similar a L_s

$$K_r L'_r (K_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad \dots (2.42)$$

Puede ser mostrada como.

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_r)^{-1} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots (2.43)$$

Las ecuaciones de voltaje son a menudo escritas en la forma

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \rho \lambda_{qs} \quad \dots (2.44)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \rho \lambda_{ds} \quad \dots (2.45)$$

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + \rho \lambda_{0s} \quad \dots (2.46)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \rho \lambda_{qr} \quad \dots (2.47)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \rho \lambda_{dr} \quad \dots (2.48)$$

$$V'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \rho \lambda'_{0r} \quad \dots (2.49)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad \dots (2.50)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad \dots (2.51)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad \dots (2.52)$$

$$\lambda'_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad \dots (2.53)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad \dots (2.54)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad \dots (2.55)$$

Debido a que los parámetros de las máquinas y los sistemas de potencia casi siempre se dan en ohmios o porcentajes o por unidad de una impedancia base, es conveniente expresar las ecuaciones de enlace de voltaje y flujo en términos de reactancias en lugar de inductancias.

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \quad \dots (2.56)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \quad \dots (2.57)$$

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad \dots (2.58)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad \dots (2.59)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad \dots (2.60)$$

$$V'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{0r} \quad \dots (2.61)$$

Los enlaces de flujo ahora se convierten en enlaces de flujo por segundo con unidades de voltios.

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad \dots (2.62)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad \dots (2.63)$$

$$\psi_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad \dots (2.64)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad \dots (2.65)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad \dots (2.66)$$

$$\psi'_{0r} = X'_{lr} i'_{0r} \quad \dots (2.67)$$

Si se seleccionan las corrientes como variables independientes y se reemplazan los enlaces de flujo o los enlaces de flujo por segundo por las corrientes, las ecuaciones de voltaje se convierten en:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{0s} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \\ V'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X_M & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X'_{rr} & 0 \\ -\frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 & -\frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad \dots (2.68)$$

Donde

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \quad \dots (2.69)$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \quad \dots (2.70)$$

Los enlaces de flujo por segundo son expresados como

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & \mathbf{0} & 0 & X_M & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & X_{ss} & 0 & \mathbf{0} & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & \mathbf{0} & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad \dots (2.71)$$

Si los enlaces de flujo o enlaces de flujo por segundo son seleccionados como variables independientes entonces, pueden ser resueltos para las corrientes como

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} X'_{rr} & \mathbf{0} & 0 & -X_M & \mathbf{0} & 0 \\ \mathbf{0} & X'_{rr} & 0 & \mathbf{0} & -X_M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -X_M & 0 & \mathbf{0} & X_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{X_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} \quad \dots (2.72)$$

Donde

$$D = X_{ss}X'_{rr} - X_M^2$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{0s} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \\ V'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{r'_r X_{ss}}{D} - \frac{p}{\omega_b} & \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} & 0 \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & -\frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_r}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad \dots (2.73)$$

2.6- ECUACIONES DE TORQUE EN MARCO DE REFERENCIA ARBITRARIO

La expresión para el par electromagnético en términos de variables de marco de referencia arbitrarias se puede obtener sustituyendo las ecuaciones de transformación en lo siguiente:

$$T_e = [(\mathbf{K}_s)^{-1} \quad i_{qd0s}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{rr}] (\mathbf{K}_r)^{-1} i'_{qd0r} \quad \dots (2.74)$$

La expresión da como resultado el par expresado en términos de corriente como

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad \dots (2.75)$$

Donde T_e es la acción positiva del motor. Otra expresión equivalente para el torque electromagnético de una máquina de inducción es

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda_{dr} i'_{qr}) \quad \dots (2.76)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda_{dr} i'_{qr}) \quad \dots (2.77)$$

Las ecuaciones mostradas para el torque suelen escribirse en términos de enlaces de flujo por segundo y corriente. Por ejemplo

Pueden ser escritos:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(\frac{1}{\omega_b} \right) (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi_{dr} i'_{qr}) \quad \dots (2.78)$$

2.7.- ECUACIONES DE LA MÁQUINA DE ORDEN REDUCIDO.

A lo largo de los años, se ha prestado considerable atención al desarrollo de modelos simplificados, principalmente con el fin de predecir el comportamiento dinámico de las máquinas eléctricas durante grandes excursiones en algunas o todas sus variables. Antes de 1960, el comportamiento dinámico de las máquinas de inducción se predecía generalmente mediante las ecuaciones de tensión en estado estacionario y la relación dinámica entre la velocidad del rotor y el par.

De igual manera, el comportamiento de las máquinas síncronas en large-excursion se predecía mediante una serie de ecuaciones de tensión en estado estacionario con modificaciones para considerar condiciones transitorias. Con la llegada de las computadoras, estos modelos han dado paso a representaciones más precisas. En algunos casos, las ecuaciones de la máquina se programan en detalle; sin embargo, en la gran mayoría de los casos se utiliza un modelo de orden reducido en las simulaciones por computadora de sistemas de potencia. En particular, se ignoran de forma estándar los transitorios eléctricos en las ecuaciones de tensión del estator de todas las máquinas y en las ecuaciones de tensión de todos los componentes del sistema de potencia conectados al estator (transformadores, líneas de transmisión, etc.).

Si bien las ecuaciones de orden reducido son válidas para el funcionamiento con tensiones de estator de cualquier frecuencia, la atención se centra en el funcionamiento nominal. La principal ventaja de estos modelos es la reducción de orden que proporcionan al simular un sistema de potencia de gran tamaño.

2.8 MODELADO DEL PAR MECÁNICO.

El modelado del par mecánico se puede considerar de dos formas, ya sea constante o proporcional a la velocidad del rotor, si se considera constante, el valor elegido como par eléctrico constante será indicado desde las condiciones iniciales de la simulación por la velocidad del rotor ω_r , ya que para la velocidad w_r en estado estacionario le corresponde un par eléctrico T_E , al existir estado estacionario, el par mecánico T_L será idéntico al par eléctrico T_E .

En la variante cuando el par mecánico es función de la velocidad, se ve modificado siempre que la velocidad este en cambio, por esa razón en condiciones iniciales considerando un estado estacionario se calcula el valor de B_L que será constante en el resto de la simulación de esta forma el par mecánico será función de la velocidad.

2.9-CONDICIONES INICIALES.

Para definir las condiciones iniciales se desprecian los transitorios del estator y rotor, para lo cual tenemos un plano algebraico para las ecuaciones de voltajes de la máquina de inducción. La variable necesaria para el cálculo es la velocidad del rotor ω_r con este valor podemos calcular el deslizamiento, el cual es incluido en ecuaciones algébricas de voltaje de la máquina de inducción para encontrar las corrientes fasoriales de la máquina, que será de utilidad para el cálculo del par eléctrico. Al realizar este cálculo de las condiciones iniciales, y el sistema operando en estado estacionario, el par eléctrico debe ser constante, no habría desbalance entre el par eléctrico y el par mecánico, la derivada de la velocidad del rotor será cero.

2.10 VALORES EN POR UNIDAD (V_{pu}).

Las líneas de transmisión de energía eléctrica operan a tensiones tan altas que resulta más práctico expresarlas en kilovoltios (kV). Como estas líneas transportan grandes cantidades de potencia, es común utilizar unidades como kilovatios (kW), megavatios (MW), kilovoltamperios (kVA) o megavoltamperios (MVA). No obstante, estas magnitudes, al igual que la corriente (amperios) y la impedancia (ohmios), se representan con frecuencia en términos porcentuales o en valores por unidad, basados en un valor de referencia o base establecido para cada caso.

$$\text{Valor en por unidad} = \frac{\text{Valor real } [\Omega, A, VA \dots]}{\text{Valor base } [\Omega, A, VA \dots]} \quad \dots (3.1)$$

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_b} \quad \dots (3.2)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} \quad \dots (3.3)$$

$$I_{pu} = \frac{I_{real}}{I_b} \quad \dots (3.4)$$

$$S_{pu} = \frac{S_{real}}{S_b} \quad \dots (3.5)$$

- Valor real: Es el valor físico medido o el que aparece en la placa de datos del equipo, a partir del cual se desea calcular su equivalente en por unidad.
- Valor base – puede ser un valor nominal de placa de datos o un valor cualquiera que sirve como referencia para considerar el valor en por unidad.

En un sistema eléctrico se especificará la potencia en MVA y el voltaje en KV, por lo cual, para el caso de la impedancia, la impedancia base (Z_b) puede ser calculada como en la siguiente ecuación:

$$Z_b = \frac{(V_b)^2}{S_b} \quad \dots (3.6)$$

2.10.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA EN POR UNIDAD (P.U)

- Su representación da como resultado datos más significativos donde las magnitudes relativas de todas las magnitudes de circuito similares se pueden comparar directamente.
- La impedancia en por unidad de un transformador es igual tanto si se expresa desde el lado primario como desde el secundario.
- En sistemas trifásicos, la impedancia por unidad de un transformador no se ve afectada por el tipo de conexión del devanado (estrella-delta, estrella-estrella, o delta-estrella).
- Este método no depende de los cambios de tensión o de fase que ocurren al pasar por un transformador, siempre que las tensiones base en los devanados estén en proporción al número de vueltas de cada bobina
- Normalmente, los fabricantes indican la impedancia del equipo en por unidad o en porcentaje en la placa de datos, junto con su potencia nominal (generalmente en kVA) y su voltaje (en V o kV). Por lo tanto, si las bases seleccionadas coinciden con esos valores nominales, esa impedancia puede utilizarse directamente.
- También se reducen los errores relacionados con la diferencia entre sistemas monofásicos y trifásicos, así como entre tensiones de línea a línea y línea a neutro.
- El método por unidad resulta especialmente útil para realizar simulaciones del comportamiento del sistema eléctrico, tanto en estado estacionario como durante transitorios, en programas de computadora.

2.11 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

La conexión de generación distribuida (GD) puede influir significativamente en el funcionamiento de un sistema de distribución. Por esta razón, es necesario establecer un límite en la capacidad máxima que se permite conectar, con el fin de garantizar que el sistema opere de manera adecuada y que no se vea comprometida la calidad de la energía entregada. A continuación, se presentan algunos requisitos generales que la GD debe cumplir al momento de su interconexión.

- El voltaje en el punto de interconexión y a lo largo del alimentador debe mantenerse dentro de un rango de $\pm 5\%$ respecto al valor nominal.
- La corriente máxima que genera la GD y circula por el alimentador no debe provocar sobrecargas ni afectar negativamente a la capacidad de los conductores o transformadores del sistema.
- El factor de potencia de la generación distribuida debe mantenerse dentro de los límites establecidos por la normativa vigente.
- La GD no debe introducir al sistema niveles de armónicos o transitorios que puedan deteriorar la calidad de la energía en el alimentador.

2.11.1 VENTAJAS DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

La generación distribuida (GD) ofrece múltiples beneficios tanto para las empresas distribuidoras de electricidad como para los usuarios finales. A continuación, se detallan algunas de sus ventajas:

Para la compañía suministradora de energía:

- Disminuye las pérdidas técnicas en las redes de transmisión y distribución.
- Facilita el suministro eléctrico en áreas de difícil acceso o alejadas
- Ayuda a liberar capacidad del sistema eléctrico central.
- Permite un mejor control del voltaje en comparación con sistemas radiales sin GD.
- Contribuye a la mejora de los indicadores de confiabilidad de la red.
- Facilita la integración de fuentes de energía renovable, adaptándose fácilmente a las condiciones locales.

Para el usuario o consumidor:

- Aumenta la confiabilidad del suministro eléctrico.
- Mejoramiento en la calidad de servicio.
- Contribuye a la disminución de emisiones contaminantes al medio ambiente.

2.11.2 IMPACTOS DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN.

La Generación Distribuida presenta ventajas y desventajas en una red eléctrica, a continuación, se realiza una breve descripción de los mismos.

2.11.3 EFECTO EN LAS PÉRDIDAS DEL SISTEMA.

En términos generales, cuando la generación distribuida (GD) inyecta corriente en un nodo de la red, puede contribuir a la reducción de pérdidas eléctricas. Esto ocurre porque al disminuir la corriente que circula por una determinada rama, también se reduce la caída de tensión, lo que a su vez disminuye las pérdidas en esa sección de la línea. Sin embargo, si el nivel de penetración de la GD se vuelve muy alto, puede sobrecargar térmicamente los conductores, lo que en lugar de disminuir, incrementa las pérdidas. Al igual que la GD, los bancos de capacitores también ayudan a reducir pérdidas, pero existe una diferencia clave: mientras que los capacitores solo afectan el flujo de potencia reactiva, la GD influye tanto en la potencia activa como en la reactiva dentro del sistema.

2.11.4 EFECTO EN EL FLUJO DE CARGA.

La generación distribuida (GD) influye directamente en el flujo de carga, afectando tanto las corrientes como los voltajes en los nodos del alimentador. Cuando se integran una o varias fuentes de generación a una red alimentada desde una subestación, los voltajes en los nodos tienden a aumentar. Esto se debe a que la corriente que normalmente fluye desde la subestación hacia las cargas disminuye, ya que estas ahora también reciben energía de fuentes cercanas, además de la principal. Esta proximidad reduce las caídas de tensión en las líneas.

Sin embargo, también existe una posible desventaja: si la cantidad de potencia que se inyecta supera la capacidad que los conductores del alimentador pueden manejar, se puede exceder su límite térmico. Esto provoca un aumento en la resistencia de los conductores y, como consecuencia, se incrementan las pérdidas. En este escenario, la solución sería desconectar parte de la GD para que la red vuelva a un estado de operación normal, es decir, sin exceder los límites de voltaje ni de capacidad térmica.

En los casos donde la generación de la GD es superior al consumo local y el sistema puede manejar sin inconvenientes ese flujo de potencia, el excedente se transfiere hacia la red de transmisión a través de las subestaciones primarias.

2.11.5 EFECTO SOBRE LAS CORRIENTES DE FALLA Y EQUIPOS DE PROTECCIONES.

La potencia de cortocircuito en cada nodo puede variar en función de diversos factores, siendo uno de los principales el cambio en la topología de la red, ya sea por la incorporación de nuevas cargas o generadores. Cuando ocurre una falla por cortocircuito en el sistema, los generadores que están conectados también aportan corriente a ese evento.

Debido a esto, el sistema de protecciones de la red se ve afectado, ya que estos dispositivos fueron diseñados para soportar ciertos niveles de sobrecorriente con un límite máximo de tolerancia. Este límite puede convertirse en un obstáculo para la integración de nuevos generadores. Por lo tanto, es necesario ajustar o actualizar los equipos de protección —tanto en sus capacidades como en sus tiempos de respuesta— para adaptarlos a los nuevos niveles de corriente de cortocircuito y asegurar que operen de forma adecuada ante las nuevas condiciones del sistema.

En general, la contribución de los generadores síncronos a la corriente de falla es alta, la de los generadores de inducción es baja, y la de los generadores de corriente continua acoplados al sistema a través de equipos electrónicos, es muy baja.

2.11.6 EFECTOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

La incorporación de generación distribuida (GD) puede impactar la calidad de la energía eléctrica de diversas maneras. Entre los efectos más comunes se encuentran la inyección de armónicos, especialmente cuando se utilizan inversores como interfaz, lo cual puede dificultar el funcionamiento de los dispositivos que regulan el voltaje. Además, la GD puede aumentar el riesgo de fenómenos de ferresonancia, lo que puede dar lugar a fluctuaciones de voltaje o "flicker" (parpadeo) provenientes de la fuente de generación.

2.11.7 EFECTO SOBRE LA CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA ELÉCTRICO.

La integración de generación distribuida (GD) en los sistemas de distribución aporta beneficios importantes en términos de confiabilidad. Esto se debe a que la GD puede actuar como una fuente alternativa de suministro eléctrico, lo que reduce el tiempo de interrupción para los usuarios ubicados después del punto donde ocurre una falla permanente. En estos casos, el corte de energía para dichos usuarios solo duraría el tiempo necesario para aislar la sección afectada, en lugar de prolongarse hasta completar la reparación del equipo dañado o realizar la transferencia de carga hacia otro alimentador, lo que mejora los indicadores de confiabilidad del sistema.

La principal diferencia entre utilizar un alimentador vecino como respaldo y contar con generación distribuida como fuente alternativa es que, con la GD, no es necesario modificar la topología de la red, lo que permite que el restablecimiento del servicio sea más rápido en comparación con el tiempo requerido para transferir carga y luego volver a la configuración original una vez solucionada la falla.

2.12 RED ELÉCTRICA

Una red eléctrica es una interconexión de elementos en la red, tales como resistencias, capacitancias, inductancias, voltaje y fuentes de corriente, bus (nodos). Cada elemento de la red es asociado con dos variables: el voltaje variable y la corriente variable. Referencia de las direcciones son también asignadas a los elementos de la red.

2.12.1 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Es un medio conductor formado por dos o más conductores a través de los cuales se transmite la energía eléctrica.

La línea de transmisión se define como la ruta de transporte de energía eléctrica alterna desde la fuente hasta la carga.

2.13 GENERADOR DE INDUCCIÓN.

Un generador de inducción, también es conocido como un generador asíncrono, es un generador de corriente alterna que usa la inducción electromagnética para producir electricidad.

Los generadores de inducción funcionan haciendo girar mecánicamente sus rotores más rápidos que la velocidad síncrona. Esto hace que la energía se transfiera de un circuito a otro.

Los generadores de inducción se componen de devanados primarios y secundarios que giran entre sí

Los generadores de inducción se pueden utilizar para funcionar como generador cuando la velocidad de rotación del rotor es mayor que la velocidad del campo giratorio.

Los generadores de inducción no se utilizan comúnmente por que requieren potencia reactiva de la red, que puede ser difícil de proporcionar si la red es débil. Los generadores síncronos pueden actuar como fuente de esta energía.

2.14 MOTOR DE INDUCCIÓN.

La inercia tanto de la carga como del rotor en un motor de inducción tiene un efecto similar al que ocurre en un motor síncrono; es decir, permite que el motor siga girando durante un corto tiempo después de que se produce un cortocircuito en el sistema. La diferencia principal radica en que el motor de inducción no cuenta con un devanado de campo de corriente continua (CC), aunque durante su operación normal sí existe un flujo magnético. Este flujo cumple una función parecida al campo magnético creado por el devanado de campo en un motor síncrono. En el caso del motor de inducción, ese campo se genera por acción inductiva del estator, no por una corriente de excitación continua.

Mientras el estator reciba energía desde una fuente externa, el flujo del rotor se mantiene constante. No obstante, si la alimentación se interrumpe repentinamente, como ocurre ante una falla por cortocircuito, el flujo en el rotor no desaparece de inmediato.

Debido a esta persistencia del flujo y a la inercia del rotor que lo mantiene en movimiento, se induce una tensión en el devanado del estator. Como resultado, se genera una corriente de cortocircuito que continúa fluyendo mientras el flujo del rotor no haya desaparecido por completo. A diferencia del motor síncrono, que mantiene su flujo mediante una fuente de corriente continua, en el motor de inducción este flujo desaparece rápidamente, y la corriente de cortocircuito se extingue casi por completo en unos cuatro ciclos.

Sin embargo, ese flujo residual dura el tiempo suficiente para generar una corriente de cortocircuito capaz de afectar el funcionamiento temporal de los interruptores automáticos, especialmente si estos intentan abrir el circuito uno o dos ciclos después de ocurrida la falla.

2.14.1 MOTORES SÍNCRONOS.

Los motores síncronos están diseñados de manera similar a los generadores, ya que cuentan con un campo magnético alimentado por corriente continua y un devanado en el estator por donde circula corriente alterna.

En condiciones normales, estos motores toman energía de corriente alterna de la red eléctrica y la transforman en energía mecánica para mover una carga.

Cuando ocurre un cortocircuito en el sistema, el voltaje cae drásticamente. Como resultado, el motor ya no puede suministrar energía a la carga mecánica, lo que provoca una disminución en su velocidad. No obstante, al igual que un generador es accionado por un motor principal, la inercia tanto del motor como de la carga hace que el motor síncrono continúe girando, funcionando ahora como un generador y produciendo una corriente de cortocircuito. La magnitud de esta corriente dependerá de la impedancia propia del motor síncrono y de la impedancia total del sistema hasta el punto donde ocurrió el cortocircuito.

2.14.2 REACTANCIAS DE LAS MAQUINAS ROTATORIAS.

La impedancia de una máquina rotativa está compuesta principalmente por reactancia y no es un valor fijo ni sencillo como ocurre con un transformador, una línea de transmisión o un cable de potencia. En cambio, es un valor complejo que varía con el tiempo. Para describir esta reactancia variable en cualquier instante, se requiere una fórmula complicada que incluya el tiempo como una variable. Por esta razón, y para simplificar los cálculos, se definen tres valores de reactancia para generadores y motores, que se utilizan para determinar la corriente de cortocircuito en momentos específicos. Estos valores son conocidos como reactancia subtransitoria, reactancia transitoria y reactancia síncrona, y se explican a continuación:

1. **Reactancia subtransitoria (X''_d)** - es la reactancia aparente del bobinado del estator en el instante en que se produce un cortocircuito, y determina el flujo de corriente durante los primeros ciclos después del cortocircuito.
2. **Reactancia transitoria (X'_d)** - determina la corriente que sigue al período cuando la reactancia subtransitoria es el valor de control. La reactancia transitoria es efectiva hasta un segundo o más, dependiendo del diseño de la máquina.
3. **Reactancia síncrona (X_d)** - es la reactancia que determina el flujo de corriente cuando se alcanza una condición de estado estable. No es efectiva hasta varios segundos después de que ocurre el cortocircuito; en consecuencia, generalmente no se usa en cálculos de cortocircuito.

2.15 IMPEDANCIA.

En el campo de la ingeniería eléctrica, la impedancia representa la resistencia que un circuito ofrece al paso de la corriente alterna, resultado de la combinación de resistencia y reactancia.

La impedancia amplía el concepto de resistencia aplicado a circuitos de corriente alterna, ya que no solo tiene magnitud, sino también un ángulo de fase, a diferencia de la resistencia que solo se mide por su magnitud.

Esta impedancia puede expresarse como un número complejo, manteniendo las mismas unidades que la resistencia, cuyo estándar en el Sistema Internacional es el ohmio. Se simboliza con la letra Z y comúnmente se presenta en forma polar, mostrando su módulo y su fase.

2.16 ADMITANCIA.

En ingeniería eléctrica la admitancia es una medida de la facilidad con la que un circuito o dispositivo permitirá que fluya una corriente. Se define como el recíproco de la impedancia, de forma análoga a como se definen la conductancia y la resistencia. La unidad SI es el símbolo siemens.

2.17 FLUJOS DE CARGA.

Introducción.

El estudio de flujos de potencia es requerido para conocer la potencia consumida en las barras de una red eléctrica de potencia y la potencia que se produce en cada generador, conocer el flujo de potencia en cada transformador y línea de la red interconectada, la magnitud de voltaje y el ángulo de fase en cada bus.

Este estudio nos ayuda a asegurar que el sistema eléctrico de potencia está diseñado para satisfacer las necesidades de potencia en la red.

Alguna de la información que podemos obtener con este estudio es:

- Carga de los circuitos.
- Voltaje de las barras.
- Flujo de potencias.
- Ajuste de Tap en transformadores.
- Las aportaciones de potencia en caso de contingencia eléctrica.

Los sistemas de potencia se componen de diferentes ramales sobre los cuales fluye una potencia; tales sistemas pueden ser en serie y paralelo el estudio de flujos de potencia se enfocará en sistemas de potencia balanceados, operando en régimen estacionario, modelos monofásicos de secuencia positiva son usados.

El cálculo de flujos de potencia determina la condición del sistema de potencia para una carga y generación dada, esta representa una condición de régimen permanente, a pesar de que el flujo entre líneas y el voltaje de la barra varía con el tiempo debido a que las cargas no son estables, en este sentido siempre se están conectando o desconectando cargas tales como iluminación, motores etc, sin embargo, para efectos de cálculo estas fluctuaciones pueden ser despreciadas.

Las cargas de distribución y la red se encontrarán en constante cambio durante el tiempo que se encuentre energizado el sistema, por tal motivo es necesario realizar el estudio de flujos representando diferentes condiciones en el sistema de potencia tales como; picos de carga, carga promedio, carga mínima.

Con la información obtenida se determinará la condición óptima de operación o como el sistema responderá ante perturbaciones en la red, tales como perdida de una línea o transformadores.

El flujo de potencia es la base para determinar las condiciones de la red, o cuando es requerido instalar un equipo nuevo para satisfacer las necesidades de potencia en la red, así como también es la base para otros estudios tales como cortocircuito, estabilidad, arranque de motores y estudios de armónicos. El modelado de flujos de potencia suple los datos de la red y una condición de régimen permanente para ese estudio.

Una condición de régimen permanente para ese estudio.

Diferentes metodologías iterativas han sido desarrolladas tales como la de Gauss-Seidel, Gauss-Seidel Acelerado y la técnica de Newton-Raphson. Las cuales son las técnicas más utilizadas por los softwares comerciales de flujos de potencia, los cuales son variaciones del método de Newton. Todas estas técnicas resuelven las ecuaciones de barra en forma de admitancia, este sistema de ecuaciones ha ganado una amplia aplicación debido a la simplicidad de preparación de datos, y la

facilidad con la cual la matriz de admitancia de barra puede ser formada y modificada para subsecuentes casos.

En un flujo de potencia, los parámetros primarios son los siguientes:

P= Potencia activa en la red.

Q=Potencia reactiva en la red.

$|V|$ =Magnitud de voltaje de barra

δ = Angulo de voltaje de barra a una referencia común.

2.17.1 BARRA TIPO P-V.

En este tipo de barra, por lo general se establecen la potencia activa y la magnitud del voltaje (P y $|V|$), por lo que también se les conoce como barras de generación. Es lógico fijar estos valores en las barras de generación, ya que la potencia activa puede ser controlada mediante el gobernador y la magnitud del voltaje se regula a través del sistema de excitación.

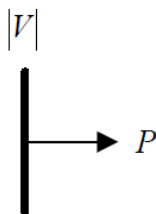


Imagen 3: Barra tipo P $|V|$

2.17.2 BARRA TIPO P-Q o BARRA DE CARGA.

En este tipo de barras se conoce la cantidad total de potencia activa y reactiva que se inyecta en ellas, por lo que también se denominan barras de carga. También es válido conocer la potencia activa junto con el factor de potencia. Además, estas barras pueden tener generación conectada; la potencia total asociada a la barra se calcula como:

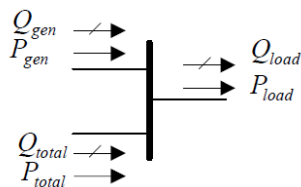


Imagen 4: Barra tipo P,Q

2.17.3 BARRA TIPO SLACK, SWING.

En los sistemas de transmisión, las pérdidas no se conocen antes de realizar el análisis del flujo de potencia, por lo que es necesario contar con una barra en la cual la potencia activa no esté predeterminada. A esta barra se le llama barra oscilante o barra swing, y en ella se especifican la magnitud del voltaje $|V|$ y el ángulo δ . Como el ángulo δ es un valor fijo, se mantiene constante durante el cálculo del flujo de potencia, sirviendo como referencia para todo el sistema. Esta barra también se conoce como barra de referencia, ya que al no tener establecidas las potencias activa y reactiva, puede ajustarse libremente para compensar las pérdidas que ocurren en el sistema de transmisión.

2.17.4 MÉTODO DE SOLUCIÓN PARA LOS ESTUDIOS DE FLUJO DE POTENCIA.

El método a utilizar para resolver el problema de flujo de potencia depende de las características del sistema, del tamaño del sistema, Etc. En general el procedimiento preliminar es igual sin importar el método seleccionado.

2.17.5 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON EN ESTUDIOS DE FLUJO DE POTENCIA.

El método de Newton-Raphson, requiere un especial interés, debido a que su implementación es un poco más compleja que otro método iterativo

2.17.6 TÉCNICA ITERATIVA DE NEWTON-RAPHSON.

El método de Newton-Raphson para el flujo de cargas utiliza las derivadas parciales de las relaciones de flujo de carga para estimar los cambios en la variable independiente requeridos para encontrar la solución. La técnica de Newton-Raphson converge usando menos iteraciones que otros métodos, sin embargo, el proceso de iteración es algo mayor.

Un ejemplo de esto es aplicar la técnica a un arreglo de 3 barras, las potencias de las barras son expresadas como funciones no lineales de los voltajes de barra.

$$P_1 = V_1(\gamma_{11}V_1 + \gamma_{12}V_2 + \gamma_{13}V_3) \quad \dots (1)$$

$$P_2 = V_2(\gamma_{21}V_1 + \gamma_{22}V_2 + \gamma_{23}V_3) \quad \dots (2)$$

$$P_3 = V_3(\gamma_{31}V_1 + \gamma_{32}V_2 + \gamma_{33}V_3) \quad \dots (3)$$

Pequeños cambios en los voltajes de barra causarán correspondientemente pequeños cambios en las potencias de la barra. Una aproximación linealizada al cambio de potencia como una función de los cambios de voltaje puede ser obtenido como sigue.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_1} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}$$

O simbólicamente

$$\Delta P = J^{-1} \Delta P$$

Donde J es la matriz jacobiana, que contiene las derivadas parciales de la potencia respecto a los voltajes para un particular juego de voltajes, V_1, V_2, V_3 que son las derivadas parciales.

Cuando uno o más voltajes cambian substancialmente, una matriz Jacobiana debe ser calculada. Como V_1 es especificado como $V_1 = 0$ el cálculo de la ecuación puede ser reducido

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}$$

Los cambios en V_2, V_3 debido a los cambios en P_2, P_3 son obtenidos por la inversión de J , obteniendo:

$$\Delta P = J^{-1} \Delta P$$

El método de Newton- Raphson es como sigue:

- Asignar estimaciones a V_2, V_3
- Calcular P_2, P_3
- Calcule la diferencia de potencia ΔP entre la potencia calculada $(P)_0$ y la potencia estimada P_2 .

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= P_2 - (P_2)_0 \\ \Delta P_3 &= P_3 - (P_3)_0 \end{aligned}$$

Donde las primas indican el valor especificado.

$\Delta P \neq 0$ es causado por errores en los voltajes, esto visto que los voltajes deben ser incorrectos.

- Entonces los nuevos valores estimados para los voltajes de barra son:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}_{new} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}_{old} - J \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

Esta es la ecuación básica en el método de Newton-Raphson, el signo negativo es debido a la forma en que ΔP es definido

Recalcular e invertir la matriz jacobiana usando los últimos valores calculados de voltaje y calcule nuevo estimado para los voltajes. El proceso iterativo será hasta que $\Delta P_2, \Delta P_3$ sean menores que un pequeño valor. (Criterio de convergencia).

La convergencia es muy rápida para las primeras pocas iteraciones y lento para la cercanía a la solución.

Para la solución de flujo de carga AC, la matriz Jacobiana puede ser arreglada como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Dados los voltajes de barra complejos son escritos en forma polar $|V| \angle \delta$. La matriz jacobiana puede ser arreglada en varias formas diferentes para acomodarse a la técnica de programación seleccionada.

Como anexo se presenta un Código en Matlab donde se calcula el flujo de carga con el método de Newton-Raphson.

Capítulo 3: METODOLOGÍA.

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad de un sistema eléctrico de potencia, para una condición inicial de operación, de recuperar un estado de equilibrio después de someterse a una perturbación.

Para el análisis de estabilidad en este capítulo se muestra la metodología para la obtención de datos y los modelos de estudio.

3.1- ECUACIONES DE LA MAQUINA DE INDUCCIÓN DE ORDEN REDUCIDO DESPRECIANDO EL TRANSITORIO DEL ESTATOR.

Incluir los transitorios de la red y del estator del generador en el modelo del sistema eléctrico hace que este sea más complejo y aumente el tiempo de cálculo por los métodos numéricos necesarios. Por eso, en los estudios de estabilidad de grandes sistemas de potencia, es común simplificar el modelo del generador y omitir estos transitorios. Esta metodología ignora el cambio del flujo en el estator, eliminando así de las ecuaciones diferenciales.

$$v_{qr} - r_r i_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi_{dr} = \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qr} \quad (3.1)$$

$$v_{dr} - r_r i_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi_{qr} = \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{dr} \quad (3.2)$$

Se considera alimentado por un sistema de voltaje balanceado; entonces todas las variables en el eje cero del rotor y estator son cero

$$i_{0s} = i_{0r} = \psi_{0s} = \psi_{0r} = v_{0r} = v_{0s} = 0 \quad \dots (3.3)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \quad \dots (3.4)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \quad \dots (3.5)$$

$$i_{qr} = -\frac{X_M}{D} \psi_{qs} + \frac{X_{ss}}{D} \psi_{qr} \quad \dots (3.6)$$

$$i_{dr} = -\frac{X_M}{D} \psi_{ds} + \frac{X_{ss}}{D} \psi_{dr} \quad \dots (3.7)$$

$$i_{qs} = \frac{X_{rr}}{D} \psi_{qs} - \frac{X_M}{D} \psi_{qr} \quad \dots (3.8)$$

$$i_{ds} = \frac{X_{rr}}{D} \psi_{ds} - \frac{X_M}{D} \psi_{dr} \quad \dots (3.9)$$

Sustituyendo: i_{qs} en v_{qs}

$$v_{qs} = r_s \left[\frac{X_{rr}}{D} \psi_{qs} - \frac{X_M}{D} \psi_{qr} \right] + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \quad \dots (3.10)$$

$$v_{qs} = \frac{r_s X_{rr}}{D} \psi_{qs} - \frac{r_s X_M}{D} \psi_{qr} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \quad \dots (3.11)$$

Sustituyendo: i_{ds} en v_{ds}

$$v_{ds} = r_s \left[\frac{X_{rr}}{D} \psi_{ds} - \frac{X_M}{D} \psi_{dr} \right] - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \quad \dots (3.12)$$

$$v_{ds} = \frac{r_s X_{rr}}{D} \psi_{ds} - \frac{r_s X_M}{D} \psi_{dr} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \quad \dots (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{r_s X_{rr}}{D} & -\frac{\omega}{\omega_b} \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X_{rr}}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qs} + \frac{r_s X_M}{D} \psi_{qr} \\ v_{ds} + \frac{r_s X_M}{D} \psi_{dr} \end{bmatrix} \quad \dots (3.14)$$

Desarrollo de las ecuaciones de orden reducido.

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \\ \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} \quad \dots (3.15)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{X_M}{D} \psi_{qs} + \frac{X_{ss}}{D} \psi_{qr} \\ -\frac{X_M}{D} \psi_{ds} + \frac{X_{ss}}{D} \psi_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \\ \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} \quad \dots (3.16)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_r \left(-\frac{X_M}{D} \psi_{qs} + \frac{X_{ss}}{D} \psi_{qr} \right) \\ r_r \left(-\frac{X_M}{D} \psi_{ds} + \frac{X_{ss}}{D} \psi_{dr} \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \\ \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} \quad \dots (3.17)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{r_r X_{ss}}{D} \psi_{qr} \\ \frac{r_r X_{ss}}{D} \psi_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_r X_M}{D} & 0 \\ 0 & -\frac{r_r X_M}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \\ \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} \dots (3.18)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{r_r X_{ss}}{D} \psi_{qr} \\ \frac{r_r X_{ss}}{D} \psi_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_r X_M}{D} & 0 \\ 0 & -\frac{r_r X_M}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r_s X_{rr}}{D} & \frac{\omega}{\omega_b} \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X_{rr}}{D} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{qs} + \frac{r_s X_M}{D} \psi_{qr} \\ v_{ds} + \frac{r_s X_M}{D} \psi_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \\ \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} \dots (3.19)$$

ECUACIÓN DINÁMICA DE LA MÁQUINA

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qr} - \frac{r_r X_{ss}}{D} \psi_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \psi_{dr} \\ v_{dr} - \frac{r_r X_{ss}}{D} \psi_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) \psi_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_r X_M}{D} & 0 \\ 0 & -\frac{r_r X_M}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r_s X_{rr}}{D} & \frac{\omega}{\omega_b} \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X_{rr}}{D} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{qs} + \frac{r_s X_M}{D} \psi_{qr} \\ v_{ds} + \frac{r_s X_M}{D} \psi_{dr} \end{bmatrix} \dots (3.20)$$

3.2- PARÁMETROS DE LA RED ELÉCTRICA.

La red eléctrica que se analizará está formada por 5 nodos, 7 líneas de transmisión y 4 máquinas de inducción, las cuales 3 máquinas trabajan como motor y 1 como generador de inducción.

En la siguiente figura se muestra el diagrama unifilar de la red a analizar.

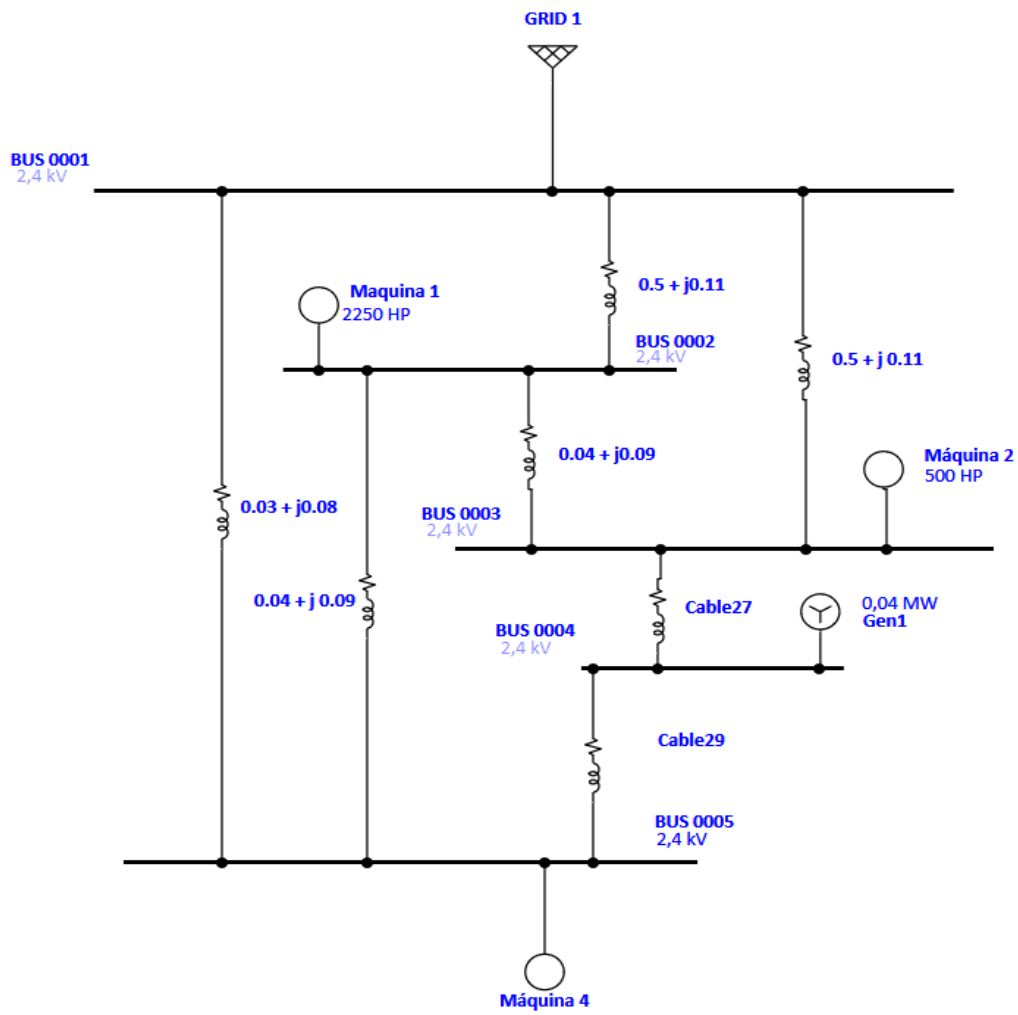


Imagen 5: Red Eléctrica valores de impedancia

Los parámetros de las líneas de transmisión son los presentados en la siguiente tabla:

Línea	r	jx	$sh/2$
1-2	0.05	0.11	0.01
1-3	0.05	0.11	0.01
1-5	0.03	0.08	0.01
2-3	0.04	0.09	0.01
2-5	0.04	0.09	0.01
3-4	0.06	0.13	0.015
4-5	0.04	0.09	0.01

Tabla 1 Parámetros de la red eléctrica.

Los parámetros de las máquinas son representados en la siguiente tabla:

Máquina	r_s	r_r	x_{ls}	x_{lr}	x_m	H
1	0.092	0.070	0.0717	0.0717	4.1376	0.6760
2	0.0185	0.0132	0.0850	0.0850	3.8090	0.5268
3	0.0153	0.0402	0.0532	0.0532	2.3057	0.7916
4	0.0201	0.0377	0.0349	0.0349	1.2082	0.7065

Tabla 2 Parámetros de las máquinas.

3.3.1 Formación de matrices para estudios eléctricos.

En el análisis de sistemas el modelo de la red se resuelve por medio de la matriz de admitancia nodal con los elementos determinados por los parámetros seleccionados.

Diagrama de un sistema de potencia de 2,4 kV. El sistema incluye un GRID 1 conectado a una barra superior. Hay cinco buses (BUS 0001 a BUS 0005) y cuatro máquinas (Máquina 1 a Máquina 4). Las líneas de transmisión están etiquetadas como Línea 1-2, Línea 1-3, Línea 1-5, Línea 2-3, Línea 2-5, Línea 3-4 y Línea 4-5. Las impedancias de las líneas se indican como 0.0 pu. Las máquinas tienen capacidades de 2250 HP, 500 HP y 0,04 MW Gen1. La Máquina 4 tiene una capacidad de 3 HP.

50

Desarrollo de la matriz Y_{bus}

Línea	impedancia	r	jx
1-2	$0.05 + j 0.11$	0.05	0.11
1-3	$0.05 + j 0.11$	0.05	0.11
1-5	$0.03 + j 0.08$	0.03	0.08
2-3	$0.04 + j 0.09$	0.04	0.09
2-5	$0.04 + j 0.09$	0.04	0.09
3-4	$0.06 + j 0.13$	0.06	0.13
4-5	$0.04 + j 0.09$	0.04	0.09

Tabla 3 Desarrollo de la matriz Y_{bus} .

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 1-2} = 0.05 + j 0.11$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.05^2 + 0.11^2}$$

$$L1-2 = 0.120830$$

Ángulo

$$\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{0.11}{0.05}\right) = 65.55^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.120830 \angle 65.55$$

Cálculo de admitancia

$$Y = \left(\frac{1}{Z}\right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.120830 \angle 65.55}\right)$$

$$Y = (8.2760 \angle -65.55)$$

$$Y = 3.4254 - j 7.5338$$

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 1-3} = 0.05 + j 0.11$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.05^2 + 0.11^2}$$

$$L1-3 = 0.120830$$

Ángulo

$$\tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{0.11}{0.05} \right) = 65.55^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.120830 \angle 65.55$$

Cálculo de admitancia.

$$Y = \left(\frac{1}{Z} \right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.120830 \angle 65.55} \right)$$

$$Y = (8.2760 \angle -65.55)$$

$$Y = 3.4254 - j 7.5338$$

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 1-5} = 0.03 + j 0.08$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.03^2 + 0.08^2}$$

$$L1-5 = 0.08544$$

Ángulo

$$\tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{0.08}{0.03} \right) = 69.44^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.08544 \angle 69.44$$

Cálculo de admitancia

$$Y = \left(\frac{1}{Z} \right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.08544 \angle 69.44} \right)$$

$$Y = (11.7041 \angle -69.44)$$

$$Y = 4.110 - j 10.95$$

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 2-3} = 0.04 + j 0.09$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.04^2 + 0.09^2}$$

$$L_{2-3} = 0.09848$$

Ángulo

$$\tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{0.09}{0.04} \right) = 66.03^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.09848 \angle 66.03$$

Cálculo de admitancia

$$Y = \left(\frac{1}{Z} \right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.09848 \angle 66.03} \right)$$

$$Y = (10.154 \angle -66.03)$$

$$Y = 4.123 - j 9.278$$

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 2-5} = 0.04 + j 0.09$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.04^2 + 0.09^2}$$

$$L2-5 = 0.09848$$

Ángulo

$$\tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{0.09}{0.04} \right) = 66.03^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.09848 \angle 66.03$$

Cálculo de admitancia

$$Y = \left(\frac{1}{Z} \right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.09848 \angle 66.03} \right)$$

$$Y = (10.154 \angle -66.03)$$

$$Y = 4.123 - j 9.278$$

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 3-4} = 0.06 + j 0.13$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.06^2 + 0.13^2}$$

$$L_{3-4} = 0.1431$$

Ángulo

$$\tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{0.13}{0.06} \right) = 65.22^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.1431 \angle 65.22$$

Cálculo de admitancia

$$Y = \left(\frac{1}{Z} \right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.1431 \angle 65.22} \right)$$

$$Y = (6.988 \angle -65.22)$$

$$Y = 2.928 - j 6.344$$

Datos de impedancia de la línea.

Impedancia de la línea

$$\text{Línea 4-5} = 0.04 + j 0.09$$

Magnitud en polar

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3.21)$$

$$\sqrt{0.04^2 + 0.09^2}$$

$$L4-5 = 0.09848$$

Ángulo

$$\tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \dots (3.22)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{0.09}{0.04} \right) = 66.03^\circ$$

Impedancia de la línea

$$Z = 0.09848 \angle 66.03$$

Cálculo de admitancia

$$Y = \left(\frac{1}{Z} \right) \quad \dots (3.23)$$

$$Y = \left(\frac{1}{0.09848 \angle 66.03} \right)$$

$$Y = (10.154 \angle -66.03)$$

$$Y = 4.123 - j 9.278$$

A partir de la red de transmisión se genera la matriz de admitancia sumando cada elemento en cada fila y columna.

$$\begin{bmatrix} Y_{12} & Y_{13} & Y_{15} & Y_{SH12} & Y_{SH13} & Y_{SH15} & -Y_{12} & -Y_{13} & 0 & -Y_{15} \\ -Y_{21} & Y_{21} & Y_{23} & Y_{25} & Y_{SH12} & Y_{SH23} & Y_{SH25} & -Y_{23} & 0 & -Y_{25} \\ -Y_{31} & -Y_{32} & -Y_{34} & Y_{SH13} & Y_{SH23} & Y_{SH34} & -Y_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{43} & Y_{43} & Y_{45} & Y_{SH34} & Y_{SH45} & -Y_{SH54} & -Y_{SH54} & -Y_{45} \\ -Y_{51} & -Y_{52} & 0 & 0 & -Y_{SH54} & Y_{51} & Y_{52} & Y_{54} & Y_{SH51} & Y_{SH52} & Y_{SH54} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los valores.

$$\begin{bmatrix} 10.9589 - 25.9974i & -3.4247 + 7.5342i & -3.4247 + 7.5342i & 0000 + 0000i & -4.1096 + 10.9589i \\ -3.4247 + 7.5342i & 11.6721 - 26.0609i & 4.1237 + 9.2784i & 0000 + 0000i & -4.1237 + 9.2784i \\ -3.4247 + 7.5342i & 4.1237 + 9.2784i & 10.4752 - 23.1191i & -2.9268 + 6.3415i & 0000 + 0000 \\ 0000 + 0000i & 0000 + 0000i & -2.9268 + 6.3415i & 7.0505 - 15.5948i & -4.1237 + 9.2784i \\ -4.1096 + 10.9589i & 4.1237 + 9.2784i & 0000 + 0000i & -4.1237 + 9.2784i & 12.3570 - 29.4856i \end{bmatrix}$$

En el apartado de anexos se adjunta un código en MATLAB para realizar la matriz de admitancia.

3.4 FLUJOS DE POTENCIA MÉTODO DE NEWTON RAPHSON.

El método de Newton-Raphson requiere la formación de un conjunto de ecuaciones lineales que expresan la relación de la variación de las componentes de la potencia respecto a los componentes de los voltajes nodales, donde la matriz de sensibilidad se denomina como jacobiana.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}$$

En este apartado tomaremos como base el desarrollo de una red de dos buses con una conexión a tierra.

En el apartado de anexos se adiciona un código de MATLAB para la resolución de la red de 5 nodos.

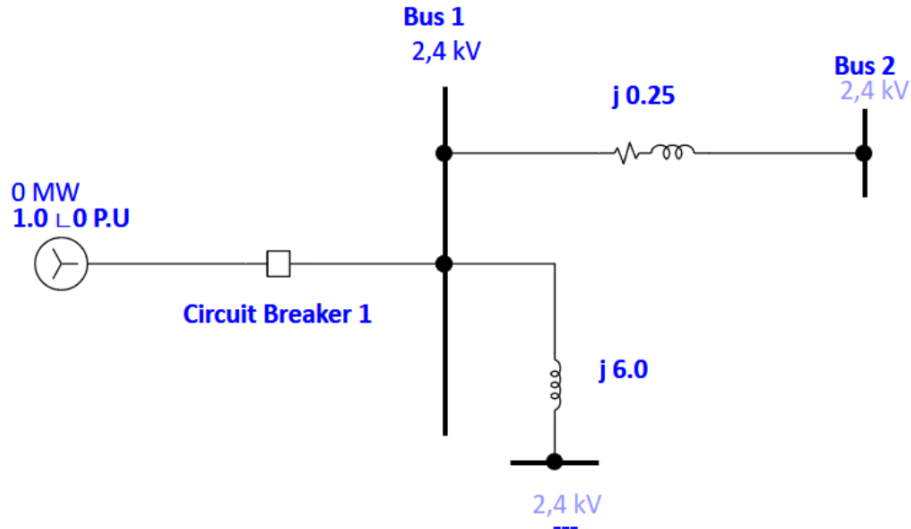


Imagen 7: Red Eléctrica de dos buses

3.4.1 Cálculo de Flujos de potencia. (Método Newton Raphson).

Metodología del cálculo de flujos de potencia.

Dado el modelo de potencia en la red se calcula la matriz de admitancia nodal.

Dada la impedancia que existe entre el Bus 1 y el Bus 2 se calcula la admitancia nodal, y posteriormente se construye la matriz de admitancia nodal.

$$Y_{12} = \frac{1}{0.25j} = -4j$$

Tomando en cuenta la impedancia del elemento conectado a tierra tenemos

$$Y_{10} = \frac{1}{6j} = -0.166j$$

La matriz de admitancia nodal se forma como se muestra a continuación:

Al ser una matriz 2x2 debido a la existencia de 2 buses se obtiene lo siguiente.

$$Y_{Barra} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y_{11} = Y_{12} + Y_{10} = -4j - 0.166 = -4.166j$$

$$Y_{22} = Y_{21} = -4j$$

Sustituyendo los vales en la matriz de admitancia nodal tenemos

$$Y_{Barra} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.166j & 4j \\ 4j & -4j \end{bmatrix}$$

Para la obtención de ángulos de magnitudes es requerido hacer la transformación a valores en polar.

$$\begin{bmatrix} 4.166 \angle -90^\circ & 4 \angle 90^\circ \\ 4 \angle 90^\circ & 4 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

Cálculo de la matriz jacobiana.

Se deberán considerar los datos obtenidos de la red eléctrica como potencias, ángulos y voltajes.

BARRA	V	θ	P	Q
1	1.05	0	-----	-----
2	0.9038	$\angle -9.53$	-0.6	-0.3

Tabla 4: parámetros de la red eléctrica bajo estudio

Para el desarrollo de la matriz jacobiana se tiene la siguiente forma.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_n \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, dada la construcción de la red eléctrica y los parámetros obtenidos en la tabla se obtiene la siguiente matriz jacobiana.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

Una vez obtenida la matriz jacobiana se debe encontrar los valores de potencia como sigue:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| * |V_j| * |\gamma_{ij}| * (\cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i))$$

- **Sustituyendo para el bus 2**

$$P_2 = \sum_{j=1}^n |V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) + |V_2| * |V_2| * |\gamma_{22}| * (\cos(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2))$$

$$P_2 = \sum_{j=1}^n |V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) + |V_2|^2 * |\gamma_{22}| * (\cos(\theta_{22}))$$

Se calcula la derivada con respecto al ángulo 2

$$P_2 = \sum_{j=1}^n |V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) + |V_2|^2 * |\gamma_{22}| * (\cos(\theta_{22}))$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)$$

- Se calcula la derivada con respecto al voltaje $|V_2|$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |V_1| * |\gamma_{21}| (\cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) + 2|V_2| * |\gamma_{22}| \cos \theta_{22}$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| * |V_j| * |\gamma_{ij}| * (\sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i))$$

- **Sustituyendo para el bus 2**

$$Q_2 = -|V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) - |V_2| * |V_2| * |\gamma_{22}| * (\sin(\theta_{22} + \delta_2 - \delta_2))$$

$$Q_2 = -|V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\text{Sen}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) - |V_2|^2 * |\gamma_{22}| * \text{Sen } \theta_{22}$$

- Se calcula la derivada con respecto al ángulo 2

$$Q_2 = -|V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\text{Sen}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) - |V_2|^2 * |\gamma_{22}| * \text{Sen } \theta_{22}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| \text{Cos}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)$$

- Se calcula la derivada con respecto al voltaje $|V_2|$

$$Q_2 = -|V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\text{Sen}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) - |V_2|^2 * |\gamma_{22}| * \text{Sen } \theta_{22}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = -|V_1| * |\gamma_{21}| (\text{Sen}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) - 2|V_2| * |\gamma_{22}| \text{Sen } \theta_{22}$$

Una vez obtenidas las variables de la matriz jacobiana definimos el perfil plano

$$V_1 = 1 \angle 0$$

$$V_2 = 1 \angle 0 \text{ (se asume que se tiene perfil plano)}$$

Determinar el valor inicial de $(P_2)_0$

$$\gamma_{Barra} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.166j & 4j \\ 4j & -4j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.166 \angle -90^\circ & 4 \angle 90^\circ \\ 4 \angle 90^\circ & 4 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

$$(P_2)_0 = |V_2| * |V_1| * |\gamma_{21}| * (\text{Cos}(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)) + |V_2|^2 * |\gamma_{22}| * (\text{Cos}(\theta_{22}))$$

- **Sustituyendo los valores obtenidos.**

$$(P_2)_0 = |1| * |1| * |4| * (\text{Cos}(90)) + |1|^2 * |4| * (\text{Cos}(-90)) = 0$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |1| * |1| * |4| \text{Sen}(90) = 4$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |1| * |4| (\text{Cos}(90)) + 2|1| * |4| \text{Cos}(-90) = 0$$

$$(Q_2)_0 = -|1| * |1| * |4| * (\text{Sen}(90)) - |1|^2 * |4| * \text{Sen } 90 = 0$$

- Se calcula la derivada con respecto al ángulo 2

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |1| * |1| * |4| \text{Cos}(90) = 0$$

- Se calcula la derivada con respecto al voltaje $|V_2|$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = -|1| * |4| (\text{Sen}(90)) - 2|1| * |4| \text{Sen}(-90) = 4$$

Primera iteración.

$$\Delta P_2 = P_{dada} - P_{calculada}$$

$$\Delta P_2 = -0.6 - 0 = -0.6$$

$$\Delta Q_2 = P_{dada} - P_{calculada}$$

$$\Delta Q_2 = -0.3 - 0 = -0.3$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la matriz jacobiana.

Cambiar la matriz jacobiana a negativa y realizar iteración nuevamente.

$$\begin{bmatrix} -0.6 \\ -0.3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0.6 \\ -0.3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.15 \text{ rad} \\ -0.075 \text{ V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8.594^\circ \\ -0.075 \text{ V} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_0 - \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -8.594 \\ -0.075 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.594^\circ \\ 0.925 \text{ V} \end{bmatrix}$$

- **Segunda iteración.**

$$V_1 = 1 \angle 0$$

$$V_2 = 0.925 \angle -8.594$$

$$(P_2)_1 = |1| * |0.925| * |4| * (\cos(90 + 8.594) + |0.925|^2 * |4| * (\cos(-90))) = -0.55292$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |1| * |0.925| * |4| \sin(90 + 8.594) = 3.658453$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |1| * |4| (\cos(90 + 8.594) + 2|0.925| * |4| \cos(-90)) = -0.5977525$$

$$(Q_2)_1 = -|1| * |0.925| * |4| * (\sin(90 + 8.594) - |0.925|^2 * |4| * \sin(-90)) = -0.23595$$

$$\left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)_1 = |0.925| * |1| * |4| \cos(90^\circ + 8.594) = 0.552910$$

$$\left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)_1 = -|1| * |4| (\sin(90 + 8.594) - 2|0.925| * |4| \sin(-90)) = 3.444915$$

$$\Delta P_2 = P_{dada} - P_{calculada}$$

$$\Delta P_2 = -0.6 - (0.55292) = 0.0470789$$

$$\Delta Q_2 = P_{dada} - P_{calculada}$$

$$\Delta P_2 = -0.3 - (-0.235953) = -0.064047$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la matriz jacobiana.

$$\begin{bmatrix} -0.0470789 \\ -0.064047 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.658453 & -0.5977525 \\ -0.5529109 & 3.444915 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}_1$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} -0.0470789 \\ -0.064047 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3.658453 & -0.5977525 \\ -0.5529109 & 3.444915 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} -0.01633495 \text{ rad} \\ -0.02121351 \text{ V} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.93590321^\circ \\ -0.02121351 \text{ V} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} -8.594 \\ 0.925 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.93590321^\circ \\ -0.02121351 \text{ V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9.53^\circ \\ 0.9038 \text{ V} \end{bmatrix}$$

$$(V_2)_2 = 0.9038 \angle -9.53$$

3.5 SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

(MÉTODO EULER MEJORADO).

La solución de ecuaciones diferenciales es parte importante en la fase de análisis numérico, los métodos de integración numérica utilizados en un proceso iterativo determinan una serie de valores dependiente, correspondientes a un selecto conjunto de valores de la variable independiente.

El procedimiento usual es seleccionar valores de la variable independiente a intervalos fijos. La exactitud de una solución por integración numérica depende del método que se escoja y el tamaño del paso de integración

3.5.1 Método de Euler Mejorado.

Consiste en mejorar la aproximación a la pendiente, aplicando el cálculo de dos derivadas dentro del intervalo, una en el punto inicial y la otra en el punto final mismas que se promedian y de esta forma se consigue una aproximación mejorada de la pendiente. Entonces el valor que se encuentra con Euler no representa la respuesta final, sino una predicción intermedia. Las ecuaciones para este método son:

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) h$$

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1})}{2} \right] h$$

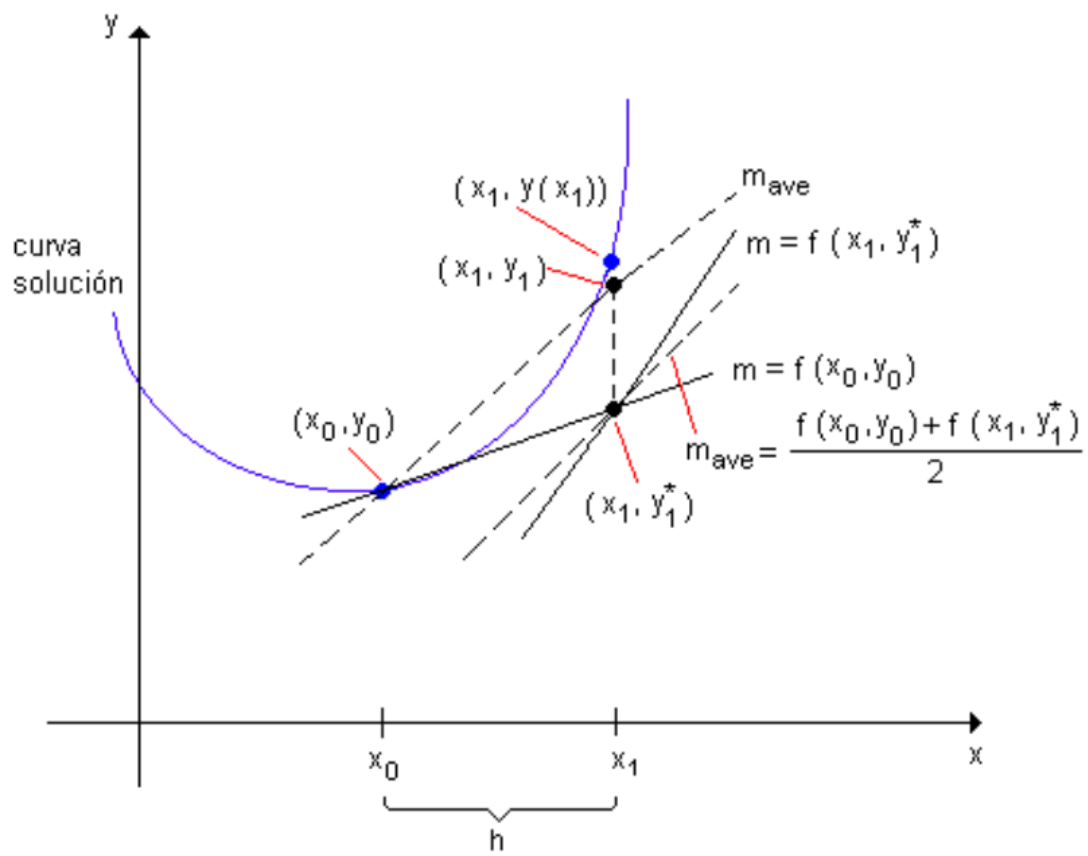


Imagen 8: representación gráfica del método Euler Mejorado (Heun).

3.5.2 Aplicación del método de Euler Mejorado.

Un ejemplo de la aplicación de este método se muestra a continuación, así mismo en el apartado de anexos se describe el código utilizado para la resolución de la ecuación dinámica de las máquinas utilizando Matlab.

Encontrar la solución de la siguiente ecuación diferencial.

$$y' = 2x - 3y + 1$$

$$y_0 = 5$$

$$1 \leq x \leq 1,5$$

$$h = 0,1$$

Iteración 1

$$i = 0$$

$$y_1 = y_0 + \left[\frac{f(x_0, y_0) + f(x_1, y_1)}{2} \right] h$$

$$f(x_0, y_0) = 2(1) - 3(5) + 1 = -12$$

$$y_1 = 5 + (-12)(0,1) = 3,8$$

$$f(x_1, y_1) = 2(1,1) - 3(3,8) + 1 = -8,2$$

$$y_1 = 5 + \left[\frac{-12 - 8,2}{2} \right] 0,1 = 3,99$$

Iteración 2

$$i = 1$$

$$y_2 = y_1 + \left[\frac{f(x_1, y_1) + f(x_2, y_2)}{2} \right] h$$

$$f(x_1, y_1) = 2(1,1) - 3(3,99) + 1 = -8,77$$

$$y_2 = 3,99 + (-8,77)(0,1) = 3,113$$

$$f(x_2, y_2) = 2(1,2) - 3(3,113) + 1 = -5,939$$

$$y_2 = 3,99 + \left[\frac{-8,77 - 5,939}{2} \right] 0,1 = 3,25455$$

Capítulo 4: Desarrollo del código en Matlab.

En este capítulo se demuestra el funcionamiento del código y como se desarrolla de acuerdo a la implementación del mismo y como va llamando variables para la resolución del sistema de ecuaciones algebraicas no lineales y las ecuaciones diferenciales, la respuesta gráfica de las máquinas ante las diferentes perturbaciones que se simulan.

4.1 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL CÓDIGO

De acuerdo a la estructura se realizaron diversos programas, los cuales son llamados por un programa principal.

Este código concentra los valores de las máquinas, los valores de la matriz de admitancia, los valores de flujos de carga por el método de Newton Raphson y la metodología para la resolución de la ecuación diferencial es las máquinas de inducción

4.1.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA PRINCIPAL.

DATOS:

En una subrutina de este código se tiene una rutina en la cual se encuentran los valores de las máquinas para la simulación de respuesta transitoria. La cual se llama

IZA_maquinas_datos el código de esta subrutina se presenta en el apartado de anexos

```
% Definicion de parametros, entradas de cada maquina en cantidades reales y en pu  
[H,rs,rr,xls,xlr,xm,xss,xrr,D,P,maq,nodo_maq]=IZA_maquinas_datos;
```

Imagen 9: Subrutina de datos

4.1.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA PRINCIPAL.

CONDICIONES INICIALES:

Una rutina llamada condiciones iniciales calcula las condiciones iniciales de la máquina, en ella se encuentran los valores de la matriz de resistencias, la matriz de reactancias para el cálculo de las corrientes, la ecuación de enlaces de flujo por segundo.

IZA_cond_ini.m el código de esta subrutina se presenta en el apartado de anexos

```
calcula el resto de las condiciones iniciales para cada maquina  
for ii=1:maq  
    fqr(1,ii) fdr(1,ii) isf(ii) PQ(1,ii) Te(1,ii) Tl(1,ii) Bl(ii)]=IZA_cond_ini(xss(ii),xrr(ii),xm(ii),vred1(nodo_maq(ii)),D(ii),P,rs(ii),rr(ii),wr(1,ii),trs1(ii));  
end
```

Imagen 10: Subrutina de condiciones iniciales

4.1.3 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA PRINCIPAL.

CONDICIONES INICIALES:

El cálculo de flujos por el método de Newton Raphson es llamado por la rutina principal como una subrutina. La cual contiene la información de cada nodo.

IZA_flujos_nr3 el código de esta subrutina se presenta en el apartado de anexos.

```
% Flujos de carga
[vred1]=IZA_flujos_nr3(PQ,nodo_maq,maq,t(1),tf1,tf2,vred1);
```

Imagen 11: Subrutina de flujos de carga.

4.1.4 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA PRINCIPAL.

METODO NÚMÉRICO

El método numérico para resolver las ecuaciones diferenciales de las máquinas se encuentra en una rutina llamada IZA_maq_predictor y en él se encuentran las derivadas de la ecuación dinámica de la máquina.

IZA_maq_predictor el código de esta subrutina se presenta en el apartado de anexos.

```
% primera "constante" del predictor corrector
df1=[vqr-rr*xss*fqr/D-(w-wrx)*fdr;vdr-rr*xss*fdr/D+(w-wrx)*fqr]; %%dinamica electrica de la maquina.
df1=wb*(df1+R*fsx);
dwr1=(Tex-TLx)/(2*H);
```

Imagen 12: Subrutina de método numérico

Capítulo 5: RESULTADOS

En este capítulo se describen las simulaciones realizadas para obtener la respuesta de las máquinas de inducción ante diferentes eventos.

Así mismo se detallan conclusiones de las simulaciones.

Simulación #1

En esta simulación se verifica el comportamiento estable del sistema eléctrico con máquinas de inducción.

Condiciones iniciales:

- Todas las máquinas de inducción están conectadas a la red eléctrica y operan en su punto de equilibrio.
- No se aplican fallas, variaciones de carga, ni desconexiones.
- Los parámetros de red (frecuencia, voltaje, impedancias, velocidad del rotor, par eléctrico, par mecánico) se mantienen constantes.
- La alimentación del sistema es continua y sin variaciones.

Resultado esperado:

- Los voltajes en todos los nodos del sistema permanecen estables.
- Las máquinas de inducción funcionan sin fluctuaciones en velocidad ni par.
- El sistema permanece en equilibrio durante todo el tiempo de la prueba.

Datos:**Parámetros de simulación.****Tiempos de simulación**

$h=0.0002;$

$t_f=0.0499;$

$t=0:h:t_f;$

Tiempo de aplicación y liberación de par mecánico

$t_{L1} = [11.50 \ 10.25 \ 11.2 \ 10.50];$

$t_{L2} = [11.8 \ 10.45 \ 11.50 \ 10.8];$

Tiempo de aplicación y liberación de falla trifásica

$t_{f1} = [10.1 \ 10.1 \ 10.65 \ 10.70 \ 10.6];$

$t_{f2} = [10.5 \ 10.2 \ 10.4 \ 10.95 \ 10.4];$

Tiempo de arranque y paro de las maquinas

$t_{rs1} = [0.0 \ 0 \ 0 \ 0];$ arranque

$t_{rs2} = [100.3 \ 30.5 \ 40 \ 10.5];$ paro

Velocidad en condiciones iniciales para todas las máquinas

$w_r = [0.9955 \ 0.9958 \ 1.01 \ 0.9748]$

GRAFICAS DE SIMULACIÓN:

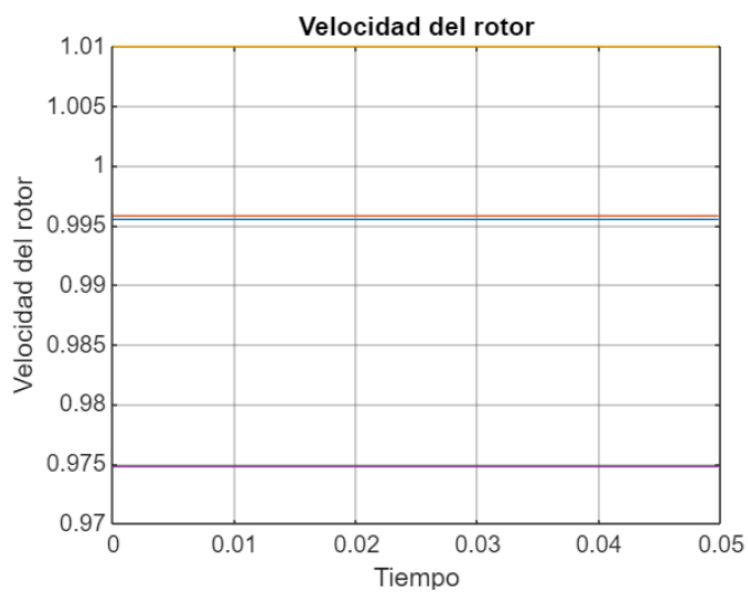


Imagen 13: Velocidad del rotor.

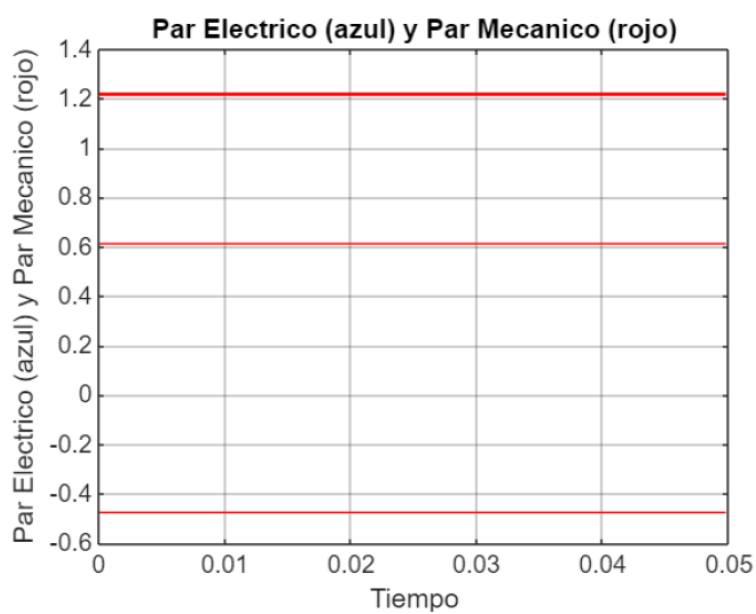


Imagen 14: Par eléctrico / Par Mecánico.

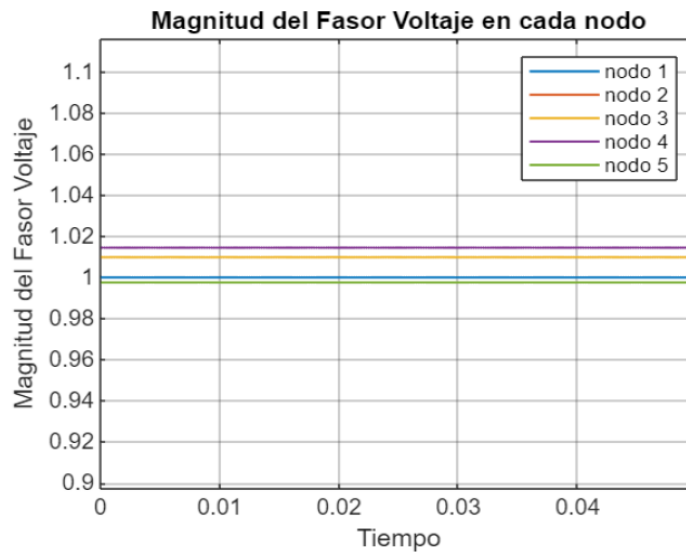


Imagen 15: Magnitudes de voltaje.

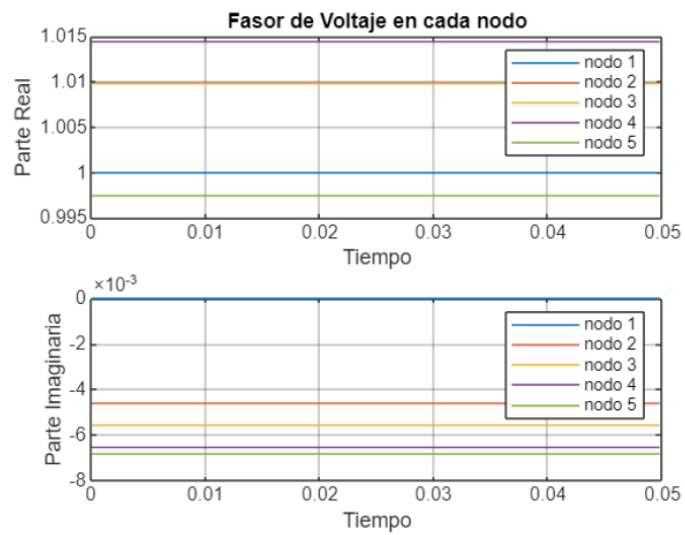


Imagen 16: Magnitudes de voltaje rectangular.

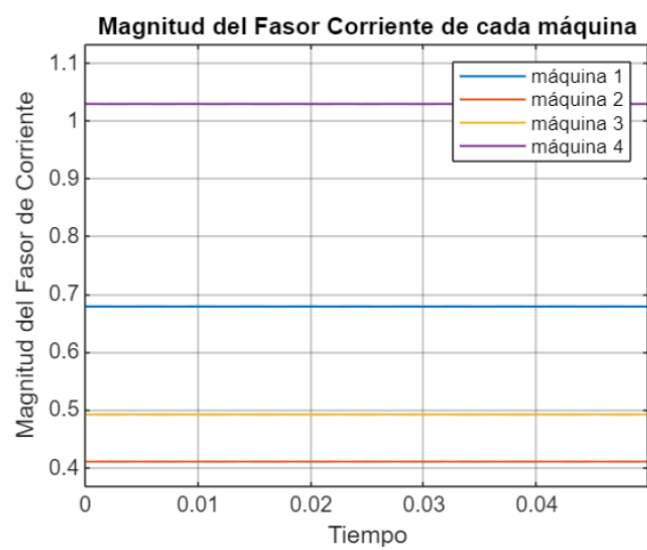


Imagen 17: Magnitudes de corriente

Simulación #2 condiciones de las máquinas aplicando un escalón de par mecánico a dos máquinas

Esta prueba consiste en aplicar un cambio brusco (escalón) en el par mecánico aplicado al eje de una máquina de inducción, con el objetivo de observar su respuesta dinámica, especialmente en términos de velocidad, corriente, y estabilidad del sistema.

Condiciones iniciales:

- La máquina de inducción se encuentra operando en régimen permanente, conectado a una red estable.
- El voltaje de alimentación se mantiene constante y sin perturbaciones.
- El par mecánico inicial aplicado a la máquina es constante.

Resultado esperado:

- La velocidad del rotor mostrará una variación transitoria y tenderá a estabilizarse en un nuevo valor.
- Los voltajes de las máquinas se verán afectados
- La corriente de arranque o transitoria aumentará temporalmente tras el escalón.
- La máquina ajustará su deslizamiento para equilibrar el nuevo par aplicado.
- No se espera que el sistema pierda estabilidad si está correctamente diseñado.

Datos:**Parámetros de simulación.****Tiempos de simulación**

$h=0.0002;$

$t_f=3.499;$

$t=0:h:t_f;$

Tiempo de aplicación y liberación de par mecánico

$t_{L1} = [.150 \ .125 \ 11.2 \ 10.50];$

$t_{L2} = [1 \ 1 \ 11.50 \ 10.8];$

Tiempo de aplicación y liberación de falla trifásica

$t_{f1} = [10.1 \ 10.1 \ 10.65 \ 10.70 \ 10.6];$

$t_{f2} = [10.5 \ 10.2 \ 10.4 \ 10.95 \ 10.4];$

Tiempo de arranque y paro de las maquinas

$tr_{s1} = [0.0 \ 0 \ 0 \ 0];$ arranque

$tr_{s2} = [100.3 \ 30.5 \ 40 \ 40.5];$ paro

Velocidad en condiciones iniciales para todas las maquinas

$w_r = [0.9955 \ 0.9958 \ 1.01 \ 0.9748]$

GRAFICAS DE SIMULACIÓN:

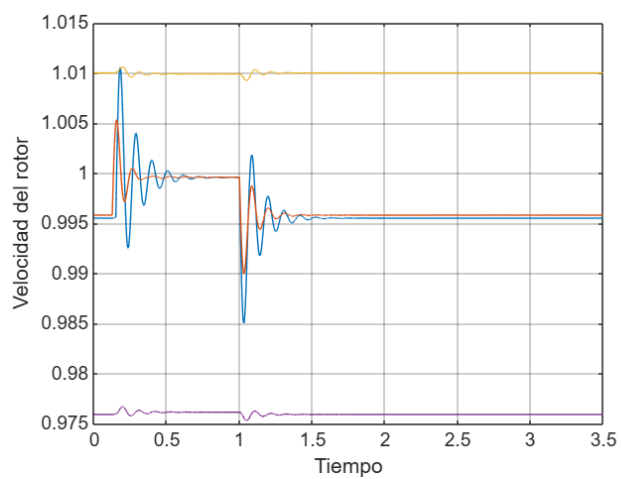


Imagen 18: Velocidad del rotor.

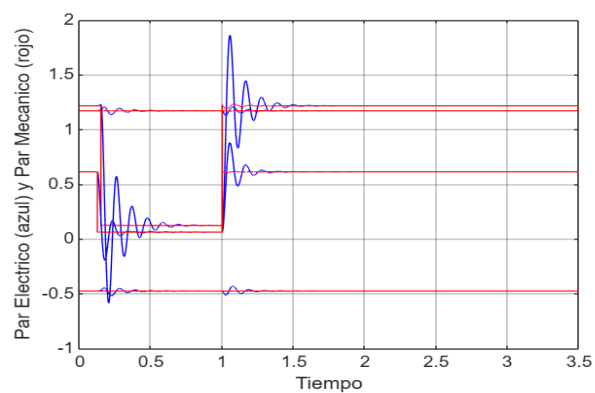


Imagen 19: Par eléctrico / Par Mecánico.

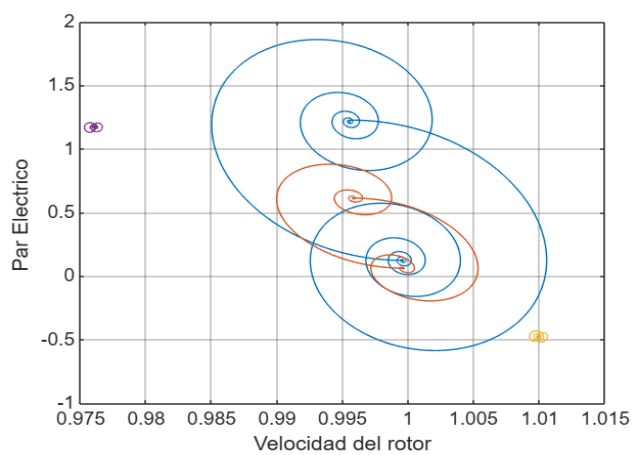


Imagen 20: Velocidad del rotor / Par eléctrico.

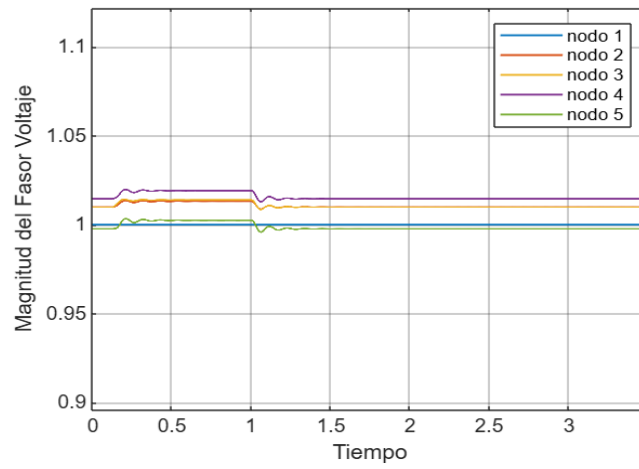


Imagen 21: Fazor de voltaje Vs Tiempo.

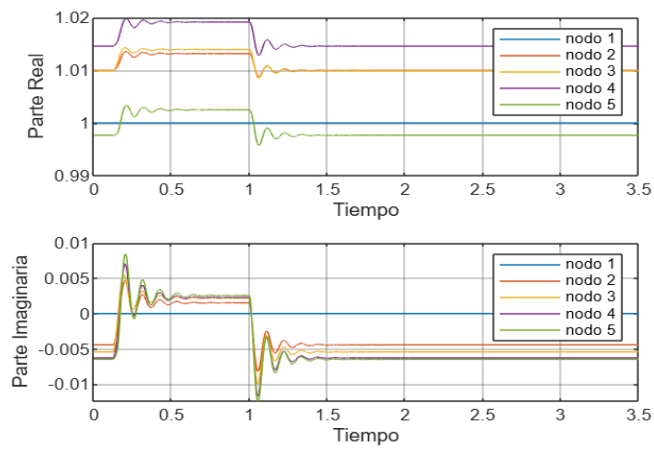


Imagen 22: Magnitudes de voltaje rectangular

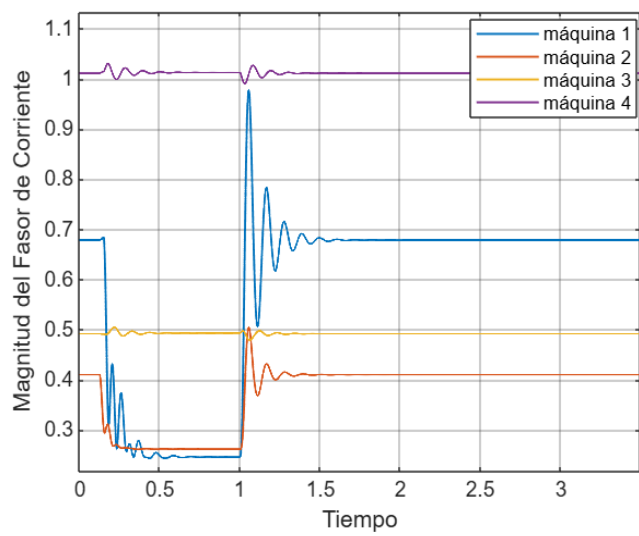


Imagen 23: Magnitudes de corriente

Simulación #3 Arranque de una máquina desde el reposo.

Esta prueba simula el arranque de una nueva máquina (por ejemplo, una máquina de inducción) mientras otras máquinas ya están en operación normal. El objetivo es observar cómo este arranque afecta el voltaje del sistema y la estabilidad operativa de las máquinas en funcionamiento.

Condiciones iniciales:

- El sistema eléctrico opera en estado estacionario, con todas las máquinas inicialmente conectadas y funcionando de forma estable.
- Los voltajes en las barras son constantes, las cargas están equilibradas, y no hay perturbaciones previas.
- La red tiene una capacidad limitada de respuesta dinámica, típica de un sistema real.

Resultado esperado:

- Durante el arranque, se produce una perturbación temporal en los voltajes, especialmente cerca de la máquina que se conecta.
- Las máquinas ya operativas pueden experimentar variaciones transitorias en corriente y velocidad.
- Tras unos segundos, si el sistema es robusto, se espera que recupere la estabilidad y alcance un nuevo estado estacionario.
- En sistemas débiles o mal regulados, la perturbación puede causar inestabilidades o incluso desconexiones automáticas por protección.

Datos:**Parámetros de simulación.****Tiempos de simulación**

$h=0.0002;$

$t_f=3.499;$

$t=0:h:t_f;$

Tiempo de aplicación y liberación de par mecánico

$t_{L1}= [11.50 \ 10.25 \ 11.2 \ 10.50];$

$t_{L2}= [11.8 \ 10.45 \ 11.50 \ 10.8];$

Tiempo de aplicación y liberación de falla trifásica

$t_{f1}= [10.1 \ 10.1 \ 10.65 \ 10.70 \ 10.6];$

$t_{f2}= [10.5 \ 10.2 \ 10.4 \ 10.95 \ 10.4];$

Tiempo de arranque y paro de las maquinas

$t_{rs1}= [0.0 \ 0 \ 0 \ 0.1];$ arranque

$t_{rs2}= [100.3 \ 30.5 \ 40 \ 40.5];$ paro

Velocidad en condiciones iniciales para todas las maquinas

$w_r= [0.9955 \ 0.9958 \ 1.01 \ 0]$

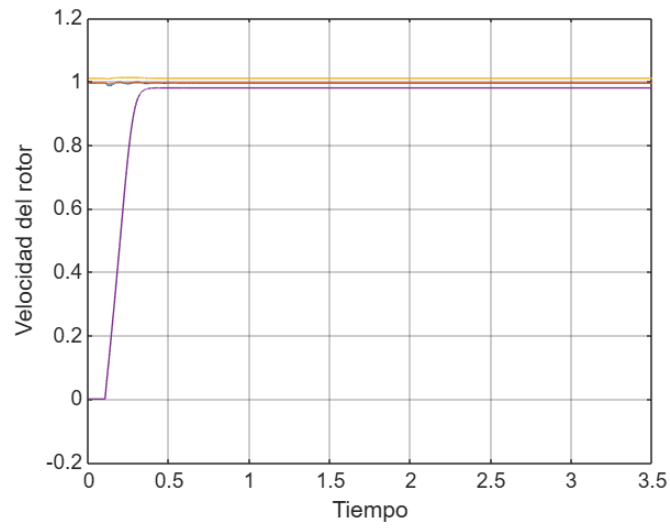


Imagen 24: Velocidad del rotor.

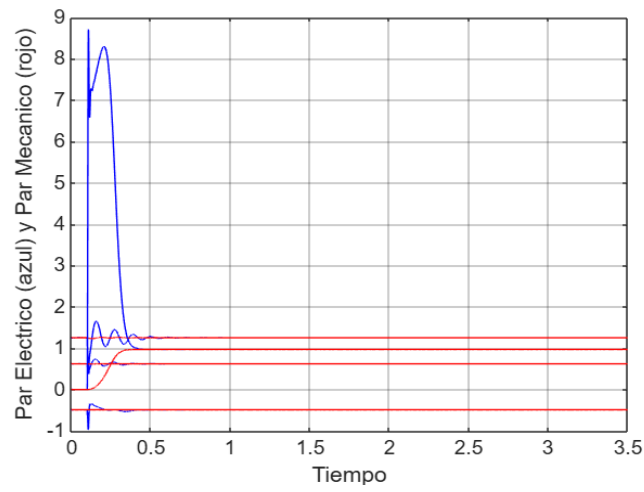


Imagen 25: Par eléctrico / Par Mecánico.

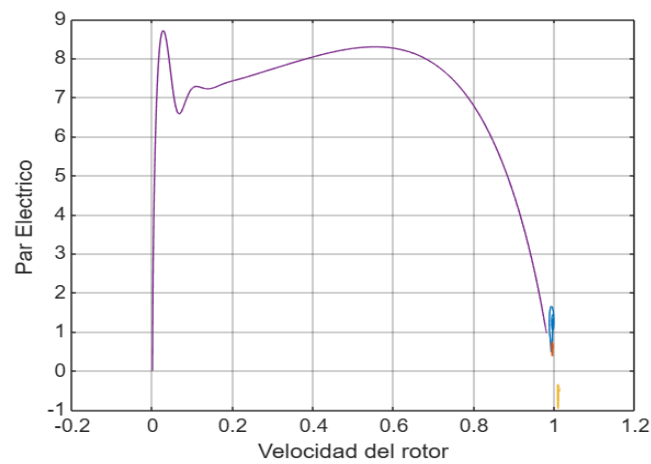


Imagen 26: Velocidad del rotor / Par eléctrico.

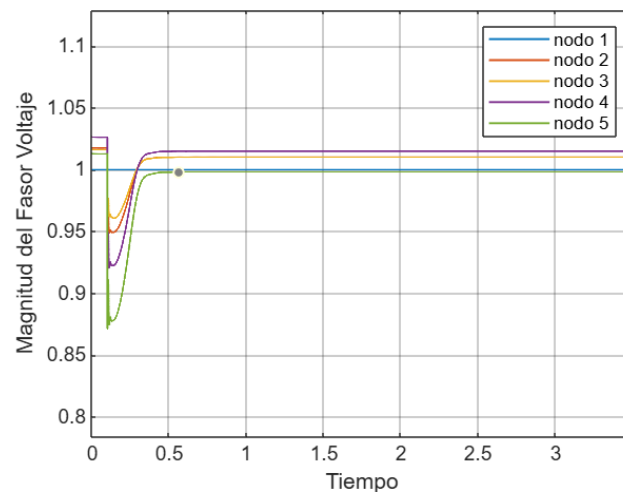


Imagen 27: Fasor de voltaje Vs Tiempo.

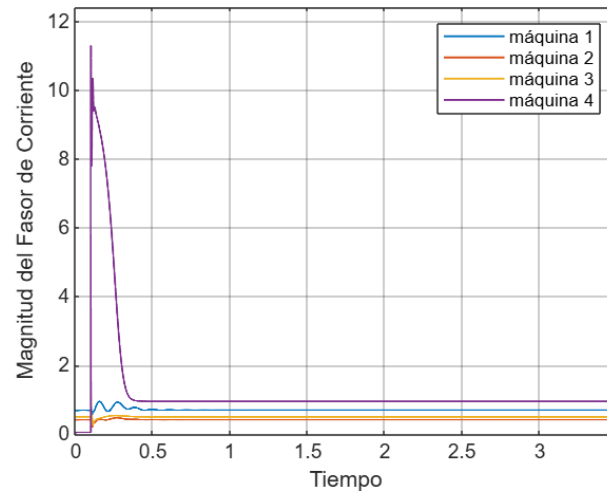


Imagen 28: Magnitudes de corriente

Simulación #4 Falla trifásica sin liberación de falla

Esta prueba analiza el comportamiento de máquinas de inducción que operan normalmente en un sistema eléctrico cuando ocurre una falla trifásica de cortocircuito y las protecciones no despejan la falla. El objetivo es estudiar la respuesta transitoria de estas máquinas bajo una condición de falla severa y sostenida.

Condiciones iniciales:

- Las máquinas de inducción están funcionando en estado estacionario, conectadas a una red estable, operando como motores o generadores según el caso.
- La tensión y la frecuencia del sistema están dentro de los valores nominales.
- No hay perturbaciones previas, y el sistema está equilibrado.

Respuesta transitoria esperada:

- Caída severa del voltaje en las terminales de las máquinas de inducción, lo que reduce drásticamente el flujo magnético.
- Aumento significativo de la corriente de estator, ya que la máquina intenta mantener el par motor a pesar de la pérdida de voltaje. Esta corriente puede superar los valores de arranque y provocar un calentamiento excesivo.
- Reducción de la velocidad del rotor, especialmente si la máquina opera como motor.
- Inestabilidad en el sistema, ya que las máquinas no pueden sostener la operación bajo estas condiciones.

Datos:**Parámetros de simulación.****Tiempos de simulación**

$h=0.0002;$

$t_f=3.499;$

$t=0:h:t_f;$

Tiempo de aplicación y liberación de par mecánico

$t_{L1} = [11.50 \ 10.25 \ 11.2 \ 10.50];$

$t_{L2} = [11.8 \ 10.45 \ 11.50 \ 10.8];$

Tiempo de aplicación y liberación de falla trifásica

$t_{f1} = [10.1 \ 10.1 \ .4 \ 10.75 \ 10.1];$

$t_{f2} = [10.5 \ 10.2 \ 10.5 \ 10.95 \ 10.4];$

Tiempo de arranque y paro de las maquinas

$t_{rs1} = [0.0 \ 0 \ 0];$ arranque

$t_{rs2} = [100.3 \ 30.5 \ 40 \ 100.5];$ paro

Velocidad en condiciones iniciales para todas las maquinas

$w_r = [0.9955 \ 0.9958 \ 1.01 \ 0.9759]$

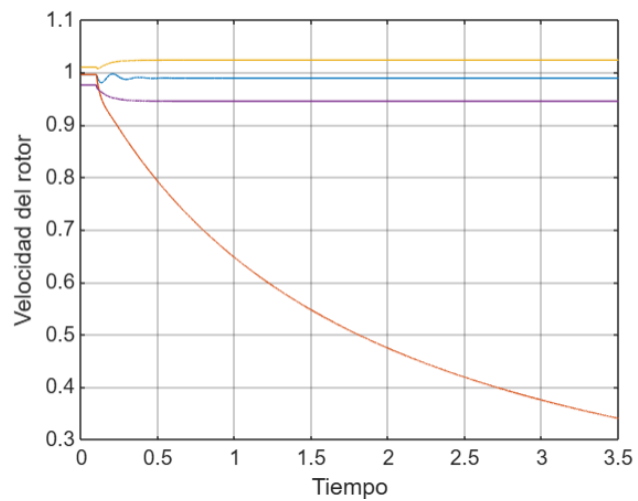


Imagen 29: Velocidad del rotor.

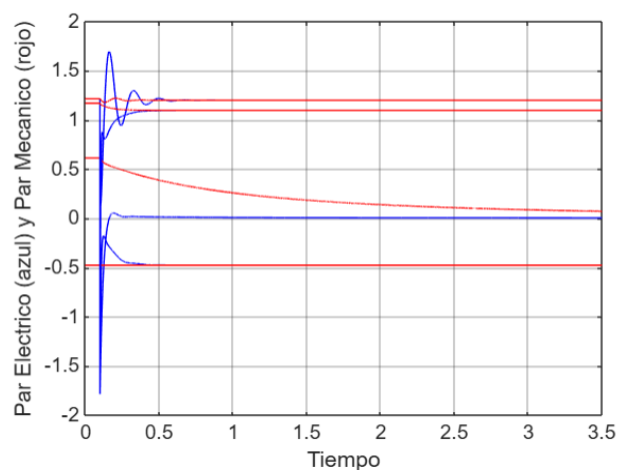


Imagen 30: Par eléctrico / Par Mecánico.

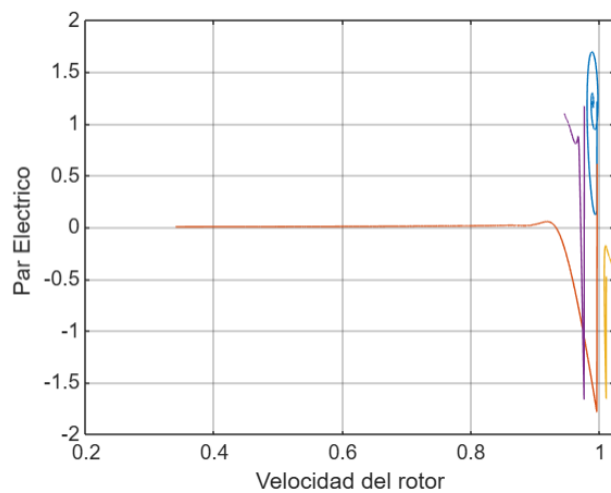


Imagen 31: Velocidad del rotor / Par eléctrico.

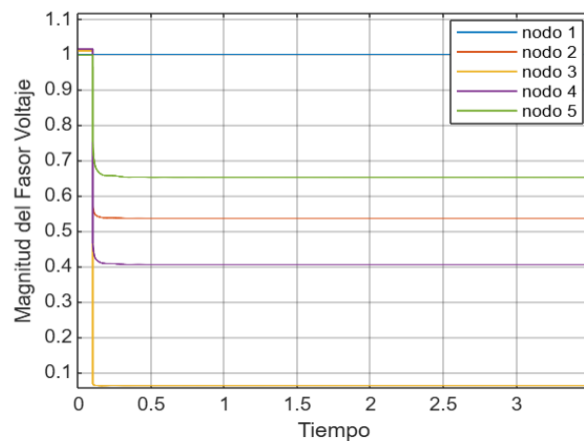


Imagen 32: Fazor de voltaje Vs Tiempo.

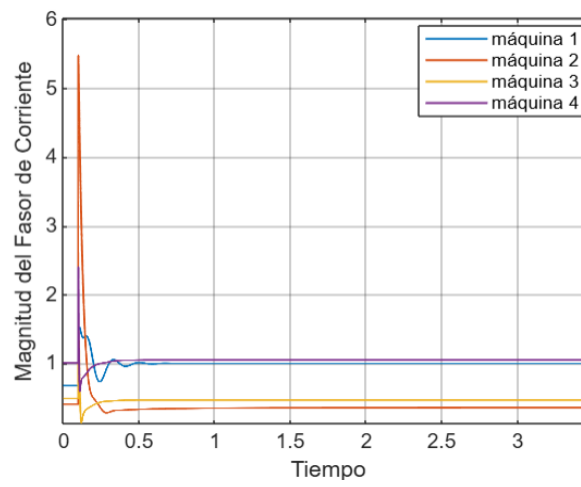


Imagen 33: Magnitudes de corriente

Simulación #5 Falla trifásica con liberación de falla.

Esta prueba tiene como como la anterior tienen el objetivo de analizar el comportamiento dinámico de máquinas de inducción que operan normalmente en un sistema eléctrico cuando ocurre una falla trifásica de cortocircuito, la cual es despejada correctamente por el sistema de protecciones en un tiempo determinado. El enfoque está en observar la respuesta transitoria de las máquinas durante el evento y su recuperación posterior.

Condiciones iniciales:

- Todas las máquinas de inducción están operando en estado estacionario, alimentadas por una red estable, sin perturbaciones.
- Las variables eléctricas (voltaje, corriente, frecuencia) se mantienen dentro de los valores nominales.
- Las protecciones del sistema están correctamente configuradas y activas.

Datos:**Parámetros de simulación.****Tiempos de simulación**

$h=0.0002;$

$t_f=3.499;$

$t=0:h:t_f;$

Tiempo de aplicación y liberación de par mecánico

$t_{L1} = [11.50 \ 10.25 \ 11.2 \ 10.50];$

$t_{L2} = [11.8 \ 10.45 \ 11.50 \ 10.8];$

Tiempo de aplicación y liberación de falla trifásica

$t_{f1} = [10.1 \ 10.1 \ .1 \ 10.75 \ 10.1];$

$t_{f2} = [10.5 \ 10.2 \ 1 \ 10.95 \ 10.4];$

Tiempo de arranque y paro de las maquinas

$t_{rs1} = [0.0 \ 0 \ 0];$ arranque

$t_{rs2} = [100.3 \ 30.5 \ 40 \ 100.5];$ paro

Velocidad en condiciones iniciales para todas las maquinas

$w_r = [0.9955 \ 0.9958 \ 1.01 \ 0.9759]$

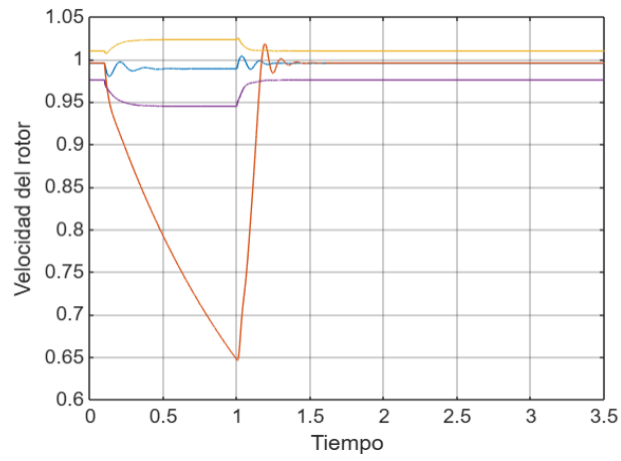


Imagen 34: Velocidad del rotor.

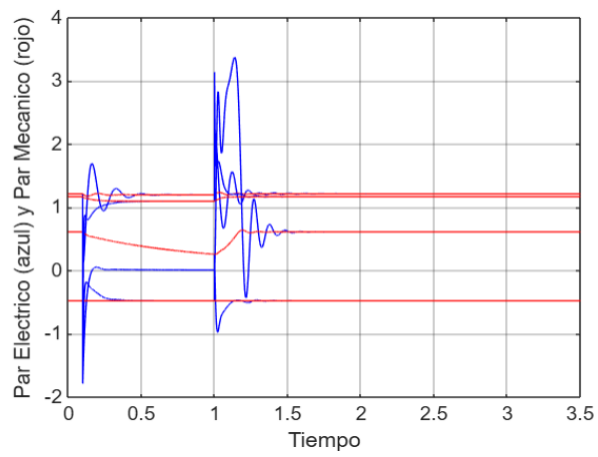


Imagen 35: Par eléctrico / Par Mecánico.

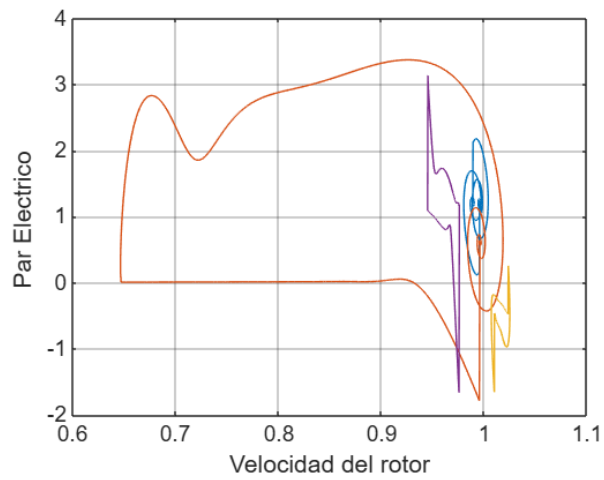


Imagen 36 Velocidad del rotor / Par eléctrico.

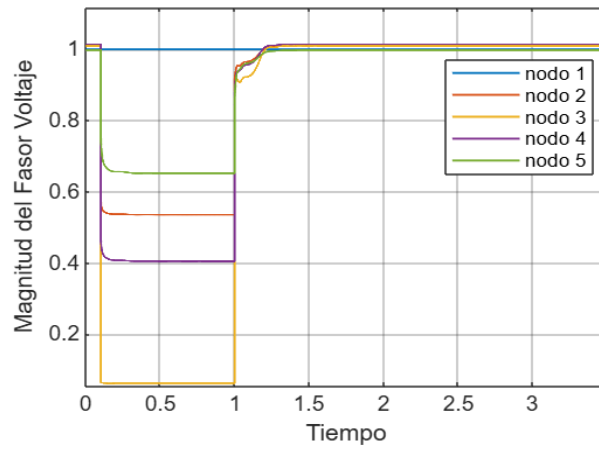


Imagen 37: Fazor de voltaje Vs Tiempo.

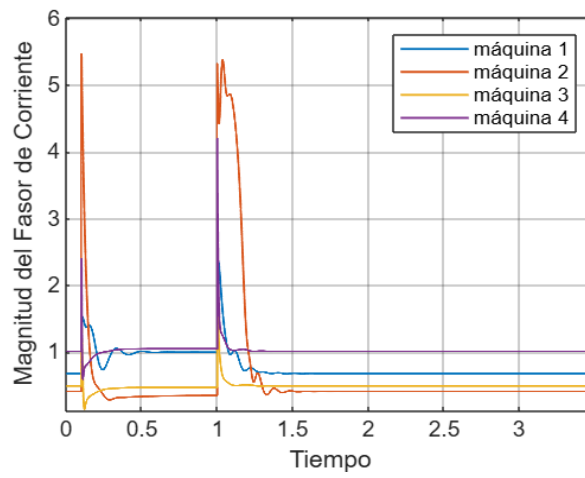


Imagen 38: Magnitudes de corriente

Capítulo 6: CONCLUSIONES.

El modelado desarrollado para las máquinas de inducción demostró una alta precisión al ser incorporado en flujos de carga, representando de manera satisfactoria el comportamiento dinámico y estacionario de estas máquinas bajo diversas condiciones operativas. La comparación con datos teóricos y simulaciones de referencia valida la consistencia del modelo.

La integración de los modelos en el análisis de los flujos de potencia permitió observar el impacto real de las máquinas de inducción en la operación de redes eléctricas, especialmente en sistemas con alta penetración de carga industrial. Esto ofrece una herramienta más robusta para estudios de estabilidad y puede ser la herramienta para otros tipos de estudio tales como calidad de energía y planificación del sistema.

Si bien el modelo demostró buenos resultados, su aplicación puede verse limitada por la disponibilidad de datos precisos de los fabricantes o del sistema.

APLICACIONES FUTURAS:

Este modelo puede ser base de estudios más avanzados tales como estudios de calidad de energía o permitir tomar los valores de las perturbaciones para realizar ajustes de protección del sistema.

Un ejemplo lo podemos encontrar en las señales de voltaje las cuales son perturbadas por la interacción de la red, los incrementos de carga, las perturbaciones eléctricas como fallas en la red. Con estos datos se puede ajustar una protección en una línea o en motores de media tensión, los cuales pueden ser disparados por una protección de voltaje si la misma tiene una duración en ciclos más allá de lo que está ajustada.

Anexo: A

IZA_maquinas_datos.m

```
function [H,rs,rr,xls,xlr,xm,xss,xrr,D,P,maq,nodo_maq]=IZA_maquinas_datos
% Definición de parámetros, entradas de cada maquina en cantidades reales y en pu
% Bases
Vb=[2300/sqrt(3) 2300/sqrt(3) 460/sqrt(3) 220/sqrt(3)];
Pb=[2250*746 500*746 50*746 3*746]; P=4; wb=2*pi*60;
Tb=(P/2)*Pb/wb;
%parametros de las maquinas de 2250,500, 50 y 3 HP Krause (los programas
%previos tienen otros parametros)
rs=[0.029 0.262 0.087 0.435]; %resistencia valor original (se modificara para simular arranque).
rr=[0.022 0.187 0.228 0.816];
xls=[0.226 1.206 0.302 0.754];
xlr=[0.226 1.206 0.302 0.754];
xm=[13.04 54.02 13.08 26.13];
J=[63.87 11.06 1.662 0.089];
vef1=[2300/sqrt(3)+j*0 2300/sqrt(3)+j*0 460/sqrt(3)+j*0 220/sqrt(3)];
maq=length(vef1); % número de maquinas
for i=1:maq
    Zb(i)=3*Vb(i)*Vb(i)/Pb(i);
    H(i)=(1/2)*(2/P)*J(i)*wb/Tb(i);
    vef1(i)=vef1(i)/Vb(i);
    rs(i)=rs(i)/Zb(i);
    rr(i)=rr(i)/Zb(i);
    xls(i)=xls(i)/Zb(i);
    xlr(i)=xlr(i)/Zb(i);
    xm(i)=xm(i)/Zb(i);
end
xss=xls+xm;
xrr=xlr+xm;
D=xss.*xrr-xm.*xm;
```

Anexo: B

Código condiciones iniciales.

IZA_cond_ini.m

```
function [fqr fdr isf PQ Te Tl Bl]=IZA_cond_ini(xss,xrr,xm,vmaq,D,P,rs_x,rr,wr,trsr1);

if wr==0
fqr=0;
fdr=0;
isf=0;
Te=0;
Tl=0;
% Bl=1;
wr_n=0.9955; %velocidad nominal en pu
Bl=1/(wr_n*wr_n);
Pss=0;
Qss=0;
PQ=(Pss+j*Qss);
else
wb=2*pi*60;
w=2*pi*60/wb; % velocidad de marco de referencia en pu
vqs=real(vmaq*sqrt(2)); %voltajes qd del estator a partir del fasor
vds=imag(-vmaq*sqrt(2));
vsr=[vqs;vds;0;0];
% arranque del reposo de la maquina (condiciones inciales cero)
rs=1000*rs_x;
if trsr1==0
rs=rs_x;
end
%calculo de condiciones inciales para el orden completo
R=[rs 0 0 0;0 rs 0 0; 0 0 rr 0; 0 0 0 rr];
X=[xrr 0 -xm 0;0 xrr 0 -xm;-xm 0 xss 0;0 -xm 0 xss]*(1/D); %matriz de reactancias para calcular corrientes.
W1=[0 w 0 0; -w 0 0 0; 0 0 0 (w-wr); 0 0 -(w-wr) 0];
fsr=inv(R*X+W1)*vsr; %condición inicial de enlaces de flujo por segundo en qd0 rotor y estator
fqs=fsr(1,1); %flujo q de estator
fds=fsr(2,1); %flujo d de estator
fqr=fsr(3,1); %flujo q de rotor
fdr=fsr(4,1); %flujo d de rotor
isr=X*fsr; %corrientes en qd0 rotor estator
isf=isr(1,1)/sqrt(2)-j*isr(2,1)/sqrt(2); % fasor
Te=(xm/D)*(fqs*fdr-fqr*fds);
Tl=Te;
Bl=Te/(wr*wr);
Pss=-3*vqs*isr(1);
Qss=-3*vqs*isr(2);
PQ=(Pss+j*Qss)/20;
% pause
end
end
```


Anexo: C

Iza_flujos_nr3.m

```
function[vred]=Iza_flujos_nr3(PQ,nodo_maq,maq,t,tf1,tf2,vred)
% [vred]=Iza_flujos_nr(PQ)
datos5_R      % Archivo m con datos de la red
Y= ybus_R3(DatosLinea,t,tf1,tf2); % Matriz de admitancia nodal
G= real(Y);    % Matriz de conductancia
B= imag(Y);    % Matriz de susceptancia

% Numero de nodos de la red
n=5;

% Tolerancia
tol= 0.000051;

% Inicializar los voltajes de bus
E(1:5,1)=1;
F(1:5,1)=0j;
V(1:5,1)=1+0j;
for i=2:5
    if t>tf1(i)
        if t<tf2(i)
            E(1:5,1)=real(vred);
            F(1:5,1)=imag(vred);
            V(1:5,1)=vred;
        end
    end
end

% Declarando las potencias demandadas
P(1) = 0 ; Q(1)= 0; % Nodo Slack, no se conoce la potencia.
P(2) = 0 ; Q(2)= 0;
P(3) = 0 ; Q(3)= 0;
P(4) = 0 ; Q(4)= 0;
P(5) = 0 ; Q(5)= 0;
% P(2) = -0.40 ; Q(2)=- 0.20; % 40MW, 20MVAR
% P(3) = -0.25 ; Q(3)=- 0.15; % 25MW, 15MVAR
% P(4) = -0.40 ; Q(4)=- 0.20; % 40MW, 20MVAR
% P(5) = -0.50 ; Q(5)=- 0.20; % 50MW, 20MVAR

% adicionar el consumo de las maquinas a las potencias de la red
for ni=1:maq
    P(nodo_maq(ni))=P(nodo_maq(ni))+real(PQ(ni));
    Q(nodo_maq(ni))=Q(nodo_maq(ni))+imag(PQ(ni));
% pause
end
PQ=P+j*Q;

% Inicializar las DeltaP y DeltaQ
deltaP(1:5,1)=0;
deltaQ(1:5,1)=0;
```

```

for ite=1:100

    for k=2:5
        potencia1=0; % P
        potencia2=0; % Q
        for jj=1:5 % Calculo de la sumatoria de las Potencias
            parte1= E(k,ite)*(G(k,jj)*E(jj,ite)-(B(k,jj)*F(jj,ite)));
            parte2= F(k,ite)*(G(k,jj)*F(jj,ite)+(B(k,jj)*E(jj,ite)));
            potencia1= potencia1+parte1+parte2; % P calculada

            parte3= F(k,ite)*(G(k,jj)*E(jj,ite)-(B(k,jj)*F(jj,ite)));
            parte4= E(k,ite)*(G(k,jj)*F(jj,ite)+(B(k,jj)*E(jj,ite)));
            potencia2= potencia2+parte3+parte4; % Q calculada
        end
        deltaP(k,ite)= P(k)-potencia1; % deltaP = Pprog - Pcalc
        deltaQ(k,ite)= Q(k)-potencia2; % deltaQ = Qprog - Qcalc
    end

    % Calculo del JACOBIANO 1:
    for fila= 1:4
        for columna= 1:4
            if fila==columna
                tempo1=0;
                for jj= 1:5
                    if jj~=fila+1
                        tempo1=tempo1+(G(fila+1,jj)*E(jj,ite))-(B(fila+1,jj)*F(jj,ite));
                    end
                end
                J1(fila,columna)= 2*G(fila+1,fila+1)*E(fila+1,ite)+tempo1;
            else
                J1(fila,columna)= G(fila+1,columna+1)*E(fila+1,ite)+B(fila+1,columna+1)*F(fila+1,ite);
            end
        end
    end
end
% Fin del Jacobiano 1

    % Calculo del JACOBIANO 2:
    for fila= 1:4
        for columna= 1:4
            if fila==columna
                tempo1=0;
                for jj= 1:5
                    if jj~=fila+1
                        tempo1=tempo1+(G(fila+1,jj)*F(jj,ite))+(B(fila+1,jj)*E(jj,ite));
                    end
                end
                J2(fila,columna)= 2*G(fila+1,fila+1)*F(fila+1,ite)+tempo1;
            else
                J2(fila,columna)= -B(fila+1,columna+1)*E(fila+1,ite)+G(fila+1,columna+1)*F(fila+1,ite);
            end
        end
    end
end
% Fin de Jacobiano 2

    % Calculo del JACOBIANO 3:
    for fila= 1:4

```

```

for columna= 1:4
    if fila==columna
        tempo1=0;
        for jj= 1:5
            if jj~=fila+1
                tempo1=tempo1+(G(fila+1,jj)*F(jj,ite))+(B(fila+1,jj)*E(jj,ite));
            end
        end
        J3(fila,columna)= (-2*B(fila+1,fila+1)*E(fila+1,ite))-tempo1;
    else
        J3(fila,columna)= G(fila+1,columna+1)*F(fila+1,ite)-(B(fila+1,columna+1)*E(fila+1,ite));
    end
end
end
end
% Fin de Jacobiano 3

```

% Calculo del JACOBIANO 4:

```

for fila= 1:4
    for columna= 1:4
        if fila==columna
            tempo1=0;
            for jj= 1:5
                if jj~=fila+1
                    tempo1=tempo1+(G(fila+1,jj)*E(jj,ite))-(B(fila+1,jj)*F(jj,ite));
                end
            end
            J4(fila,columna)= -2*B(fila+1,fila+1)*F(fila+1,ite)+tempo1;
        else
            J4(fila,columna)= -B(fila+1,columna+1)*F(fila+1,ite)-G(fila+1,columna+1)*E(fila+1,ite);
        end
    end
end
end
end
% Fin de Jacobiano 4

```

% Formando la matrix Jacobiana:

```
J= [J1 J2; J3 J4];
```

% Calculando la inversa de J y multiplicando por delta de las potencias

```
delta(1:8,ite)= inv(J)*[deltaP(2:5,ite);deltaQ(2:5,ite)];
```

% Calculando los voltajes:

```

E(2:5,ite+1)=E(2:5,ite)+delta(1:4,ite); % Parte real del V
F(2:5,ite+1)=F(2:5,ite)+delta(5:8,ite); % Parte imaginaria de V
V(2:5,ite+1)=E(2:5,ite+1)+F(2:5,ite+1)*j;

```

%Actualizando voltaje del nodo Slack

```

V(1,ite+1)=V(1,ite);
E(1,ite+1)=E(1,ite);
F(1,ite+1)=F(1,ite);

```

% Código para detener el número de iteraciones cuando se cumpla la
% tolerancia especificada anteriormente para el sistema.

```

ParteReal= abs(real(V(:,ite+1))-real(V(:,ite)));
ParteImaginaria= abs(imag(V(:,ite+1))-imag(V(:,ite)));

```

```

SolucionReal= 1;
SolucionImaginaria=1;
for k=2:n
    if ParteReal(k)>tol
        SolucionReal=0;
    end
    if ParteImaginaria(k)>tol
        SolucionImaginaria=0;
    end
end
if SolucionReal==1 && SolucionImaginaria==1
%     disp('Numero de iteraciones necesarias:');
%     ite
%     V(:,ite+1)
    vred=V(:,ite+1);
    break
end

end % fin de ite

```

Anexo: D

IZA_maq_predictor.m

```
function [wr fqr fdr isf PQ Te TI] = IZA_maq_predictor(xss,xrr,xm,H,vef1,D,P,rs_x,rr,wr_x,fqr_x,fdr_x,t,h,Bl,tL1,tL2,trs1,trs2,Te_ini,wr_ini);  
% Orden reducido.  
wb=2*pi*60;  
w=2*pi*60/wb; % velocidad de marco de referencia en pu  
vqr=0;vdr=0; % voltajes del rotor (jaula de ardilla)  
vqs=real(vef1*sqrt(2)); % voltajes qd del estator a partir del fasor  
vds=imag(-vef1*sqrt(2));  
R=rr*xm/D;  
  
tx=t; % tiempo auxiliar.  
wrx=wr_x;  
fqr=fqr_x; % flujos de rotor  
fdr=fdr_x; % flujos de rotor  
  
% perturbaciones  
Blx=Bl;  
rs=rs_x;  
TLx=Te_ini; % par mecánico constante para operación generador  
  
%%%%%%  
% perturbación escalón de par mecánico  
if tx>tL1 & tx<tL2  
    Blx=Blx/10;  
    TLx=Te_ini/10; % caso generador con TL constante  
end  
%%%%%%  
% arranque del reposo de la maquina (condiciones iniciales cero)  
rs=1000*rs_x;  
if tx>=trs1 & tx<trs2  
    rs=rs_x;  
end  
%%%%%%  
  
W1=[rs*xrr/D w; -w rs*xrr/D];  
fsx=inv(W1)*[vqs+rs*xm*fqr/D;vds+rs*xm*fdr/D]; % flujos del estator  
fqs=fsx(1,1);  
fds=fsx(2,1);  
if wr_ini<1.00 % caso generador con TL constante  
    TLx=Blx*wrx*wrx;  
end  
Tex=(xm/D)*(fqs*fdr-fqr*fds);  
  
% primera "constante" del predictor corrector  
df1=[vqr-rr*xss*fqr/D-(w-wrx)*fdr;vdr-rr*xss*fdr/D+(w-wrx)*fqr]; % dinámica eléctrica de la maquina.  
df1=wb*(df1+R*fsx);  
dwr1=(Tex-TLx)/(2*H);
```

```

tx=t+h;
wrx=wr_x+h*dwr1;
frx=[fqr_x;fdr_x]+h*df1; %flujos de rotor
fqr=frx(1,1); %flujos de rotor
fdr=frx(2,1); %flujos de rotor

W1=[rs*xrr/D w; -w rs*xrr/D];
fsx=inv(W1)*[vqs+rs*xm*fqr/D;vds+rs*xm*fdr/D]; %flujos del estator
fqs=fsx(1,1);
fds=fsx(2,1);
if wr_ini<1.00 % caso generador con TL constante
TLx=Blx*wrx*wrx;
end
Tex=(xm/D)*(fqs*fdr-fqr*fds);

% segunda "constante" del predictor corrector
df2=[vqr-rr*xss*fqr/D-(w-wrx)*fdr;vdr-rr*xss*fdr/D+(w-wrx)*fqr]; %%dinámica eléctrica de la maquina.
df2=wb*(df2+R*fsx);
dwr2=(Tex-TLx)/(2*H);

fr=[fqr_x;fdr_x]+(h/2)*(df1+df2);
fqr=fr(1,1); %flujos de rotor
fdr=fr(2,1); %flujos de rotor
wr=wr_x+(h/2)*(dwr1+dwr2);

W1=[rs*xrr/D w; -w rs*xrr/D];
fsx=inv(W1)*[vqs+rs*xm*fqr/D;vds+rs*xm*fdr/D]; %flujos del estator
fqs=fsx(1,1);
fds=fsx(2,1);
Te=(xm/D)*(fqs*fdr-fqr*fds);
if wr_ini<1.00 % caso generador con TL constante
TLx=Blx*wrx*wrx;
end
TI=TLx;
X=[xrr 0 -xm 0 ;0 xrr 0 -xm ;0 0 0 0 ;-xm 0 xss 0 ;0 -xm 0 xss;0 0 0 0]*(1/D); %matriz de reactancias para calcular
corrientes.
isr=X*[fqs fds fqr fdr]'; %corrientes en qd0 rotor estator
isf=isr(1,1)/sqrt(2)-j*isr(2,1)/sqrt(2); % fasor del estator
Pss=-3*vqs*isr(1);
Qss=-3*vqs*isr(2);
PQ=(Pss+j*Qss)/20;
end

```

Anexo: E

Código Matlab, Matriz de Admitancia.

```
clc
close all
clear all

z12= 0.05+0.11*j;
y12= 1/z12;
ysh12=0.01*j;

z13=z12;
y13=y12;
ysh13=0.01*j;

z15=0.03+0.08*j;
y15=1/z15
ysh15=0.01*j;

z23=0.04+0.09*j;
y23=1/z23;
ysh23=0.01*j;

z25=z23;
y25=y23;
ysh25=0.01*j;

z34=0.06+0.13*j;
y34=1/z34;
ysh34=0.015*j;

z45=0.04+0.09*j;
y45=1/z45
ysh45=0.01*j;

Y= [y12+y13+y15+ysh12+ysh13+ysh15      -y12      -y13      0      -y15
    -y12      y12+y23+y25+ysh12+ysh23+ysh25      -y23      0      -y25
    -y13      -y23      y13+y23+y34+ysh13+ysh23+ysh34      -y34      0
      0      0      -y34      y34+y45+ysh34+ysh45      -y45
    -y15      -y25      0      0      0
y15+y25+y45+ysh15+ysh25+ysh45]
```

Anexo: F.

Programa Principal

IZA_multimaquina_3.m

```
clc
clear all
close all
% tiempos de simulacion
h=0.0002;
tf=3.499;
t=0:h:tf;
% Tiempo de aplicación y liberación de par mecánico
tl1=[11.50 10.25 11.2 10.50];
tl2=[10 10 11.5 10.8];
% Tiempo de aplicación y liberación de falla trifásica
tf1=[10.1 10.1 .1 10.75 10.1];
tf2=[10.5 10.2 1 10.95 10.4];
% tiempo de arranque y paro de las maquinas
trs1=[0 0 0 0]; % arranque
trs2=[100.3 10.7 10 10.5]; % paro
% velocidad en condiciones iniciales para todas las maquinas
%wr=[0.9955 0.9913 0.9748 0.9759]; % velocidad a par nominal
wr=[0.9955 0.9958 1.01 .9759]; % velocidad inicial

% definición de parámetros, entradas de cada maquina en cantidades reales y en pu
[H,rs,rr,xls,xlr,xm,xss,xrr,D,P,maq,nodo_maq]=IZA_maquinas_datos;

% Calculo de las condiciones iniciales junto con la red (flujos de carga).
% Calculo del estado estacionario inicial
vred1=[1 1 1 1 1]'; %inicializar voltajes en la red
for i=1:10 % Suponiendo que convergen en 10 iteraciones (solución de flujos y cond. ini de las maquinas)
% cálculo del resto de las condiciones iniciales para cada maquina
for ii=1:maq
[fqr(1,ii) fdr(1,ii) isf(ii) PQ(1,ii) Te(1,ii) Tl(1,ii)
Bl(ii)]=IZA_cond_ini(xss(ii),xrr(ii),xm(ii),vred1(nodo_maq(ii)),D(ii),P,rs(ii),rr(ii),wr(1,ii),trs1(ii));
end

% Flujos de carga
[vred1]=IZA_flujos_nr3(PQ,nodo_maq,maq,t(1),tf1,tf2,vred1);

end
vred=vred1;
A='Voltajes nodales de estado estacionario al inicio de la simulación';
disp(A)
disp(vred)
A='Potencias de las maquinas al inicio de la simulación';
disp(A)
disp(PQ)

% Calculo del sistema algebraico (flujos de carga) con el sistema
```



```

% diferencial (maquina eléctricas)
% Calculo del transitorio multimáquina incluyendo la red
n=length(t);
for i=1:n-1

for in=1:10 % Suponiendo que converge en 10 iteraciones (solución de flujos y diferenciales de las maquinas)
% solución de las ecs diferenciales
for ii=1:maq
% [wr(i+1,ii) fqr(i+1,ii) fdr(i+1,ii) isf(i+1,ii) Te(i+1,ii) Tl(i+1,ii)
]=IZA_maq_predictor(xss(ii),xrr(ii),xm(ii),H(ii),vef1(ii),D(ii),P,rs(ii),rr(ii),wr(i,ii),fqr(i,ii),fdr(i,ii),t(i),h,Bl(ii),tL1(ii),tL2(ii),
trs1(ii),trs2(ii),Te(1,ii),wr(1,ii));
[wr(i+1,ii) fqr(i+1,ii) fdr(i+1,ii) isf(i+1,ii) PQ(ii) Te(i+1,ii)
Tl(i+1,ii)]=IZA_maq_predictor(xss(ii),xrr(ii),xm(ii),H(ii),vred1(nodo_maq(ii)),D(ii),P,rs(ii),rr(ii),wr(i,ii),fqr(i,ii),fdr(i,ii),t(i)
),h,Bl(ii),tL1(ii),tL2(ii),trs1(ii),trs2(ii),Te(1,ii),wr(1,ii));
end
% Flujos de carga
[vred1]=IZA_flujos_nr3(PQ,nodo_maq,maq,t(i),tf1,tf2,vred1);
end
vred(:,i+1)=vred1;
end
%
% Figuras
figure(1)
for ii=1:maq
plot(t,wr(:,ii))
hold on
end
%title('Velocidad del rotor')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Velocidad del rotor')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

figure(2)
for ii=1:maq
plot(t,Te(:,ii),'b',t,Tl(:,ii),'r')
hold on
end
xlabel('Tiempo')
ylabel('Par eléctrico (azul) y Par mecánico (rojo)')
%title('Par eléctrico (azul) y Par Mecánico (rojo)')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

figure(3)
for i=1:maq
plot(wr(:,i),Te(:,i))
hold on
end
ylabel('Par Electrico ')
xlabel('Velocidad del rotor')
grid

```

```

ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

figure(4)
mx1=1; % para calcular axis
mn1=1;
for i=1:5
plot(t,abs(vred(i,:)),'LineWidth',1)
hold on
mx2=max(abs(vred(i,:))); % para calcular axis
mn2=min(abs(vred(i,:)));
if mx1<mx2 % para calcular axis
    mx1=mx2;
end
if mn1>mn2
    mn1=mn2;
end
end
axis([0 tf 0.9*mn1 1.1*mx1])
xlabel('Tiempo')
ylabel('Magnitud del Fasor Voltaje')
%title('Magnitud del Fasor Voltaje en cada nodo')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;
legend('nodo 1', 'nodo 2', 'nodo 3', 'nodo 4', 'nodo 5')

figure (5)
subplot(2,1,1)
for i=1:5
plot(t,real(vred(i,:)))
hold on
end
%title('Fasor de Voltaje en cada nodo')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Parte Real')
legend('nodo 1', 'nodo 2', 'nodo 3', 'nodo 4', 'nodo 5')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

subplot(2,1,2)
for i=1:5
plot(t,imag(vred(i,:)))
hold on
end
xlabel('Tiempo')
ylabel('Parte Imaginaria')
legend('nodo 1', 'nodo 2', 'nodo 3', 'nodo 4', 'nodo 5')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

figure(6)
for i=1:5
if i==1

```

```

        plot(real(vred(i,:)),imag(vred(i,:)),'*')
    else
        plot(real(vred(i,:)),imag(vred(i,:)))
    end
    hold on
end
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;
xlabel('Parte Real')
ylabel('Parte Imag')
%title('Fasor de Voltaje en cada nodo en el plano complejo')
legend('nodo 1', 'nodo 2', 'nodo 3', 'nodo 4', 'nodo 5')

figure(7)
mx1=1; % para calcular axis
mn1=1;
for i=1:maq
    plot(t,abs(isf(:,i)),'LineWidth',1)
    hold on
    mx2=max(abs(isf(:,i))); % para calcular axis
    mn2=min(abs(isf(:,i)));
    if mx1<mx2 % para calcular axis
        mx1=mx2;
    end
    if mn1>mn2
        mn1=mn2;
    end
end
axis([0 tf 0.9*mn1 1.1*mx1])
xlabel('Tiempo')
ylabel('Magnitud del Fasor de Corriente')
%title('Magnitud del Fasor Corriente de cada máquina')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;
legend('máquina 1', 'máquina 2', 'máquina 3', 'máquina 4')

figure (8)
subplot(2,1,1)
for i=1:maq
    plot(t,real(isf(:,i)))
    hold on
end
%title('Fasor de Corriente del Estator')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Parte Real')
grid
legend('Máquina 1', 'Máquina 2', 'Máquina 3', 'Máquina 4')
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

subplot(2,1,2)
for i=1:maq
    plot(t,imag(isf(:,i)))

```

```

hold on
end
xlabel('Tiempo')
ylabel('Parte Imaginaria')
legend('Máquina 1', 'Máquina 2', 'Máquina 3', 'Máquina 4')
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;

figure(9)
for i=1:maq
plot(real(isf(:,i)),imag(isf(:,i)))
hold on
end
grid
ax = gca;ax.GridAlpha = 0.3;
xlabel('Parte Real del Fasor de Corriente del Estator')
ylabel('Parte Imag del Fasor de Corriente del Estator')
%title('Fasor de Corriente del Estator en el plano complejo')
legend('Máquina 1', 'Máquina 2', 'Máquina 3', 'Máquina 4')
hold on
% for i = 1:50:length(t)
% plot(real(isf(i,1)),imag(isf(i,1)),'.r')
% drawnow
% hold on
% end

```

1 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. E. Ekechukwu y P. Simpa, «Trends, insights, and future prospects of renewable energy integration within the oil and gas sector operations,» *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, vol. 12, nº 1, pp. 152-167, 2024.
- [2] M. Ranjan y R. Shankar, «A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects,» *Journal of Energy Storage*, vol. 45, p. 103717, 2022.
- [3] Comisión Reguladora de Energía: Estados Unidos Mexicanos, «Disposiciones Administrativas de Carácter General que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red,» *Diario Oficial de la Federación*, vol. Única Sección, nº Edición Matutina, pp. 836-1092, 31 12 2021.
- [4] Secretaría de Energía: Gobierno de México, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038.
- [5] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2002.
- [6] J. J. Grainger y W. D. Stevenson Jr., *Análisis de sistemas de potencia*, Naucalpan de Juárez, Estado de México: McGraw-Hill/Interamericana de México, 1996.
- [7] S. Poudel, G. D. Black, E. G. Stephan y A. P. Reiman, «Admittance Matrix Validation for Power Distribution System Models Using a Networked Equipment Model Framework,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9108-9123, 2022.
- [8] «IEEE Recommended Practice for Conducting Load-Flow Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems,» *IEEE Std 3002.2-2018*, pp. 1-73, 2018.
- [9] A. A. Jiménez Garibay, *Mejora la autonomía de sistemas eólicos ante perturbaciones de voltaje de red mediante un modelo de referencia de corriente-rotor*, Santiago de Querétaro, Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, 2017.