

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Análisis de estabilidad de gran perturbación en un sistema eléctrico de potencia considerando barra única alimentada mediante generación síncrona convencional y virtual

Modalidad Investigación

Hollman Fabian Largo Cristancho

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director:

Johann Farith Petit Suarez

Doctor en ingeniería eléctrica

Codirector:

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en ingeniería eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga, Colombia

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por permitirme reconocerlo como mi guía y salvador. En los momentos de dificultad me concedió fortaleza y sabiduría para continuar, transformando mi manera de ver la vida. Gracias a Él, hoy conservo la esperanza, la motivación y el optimismo necesarios para alcanzar cada objetivo propuesto.

Expreso mi más sincero agradecimiento a Elizabeth, Guillermo y Lorena, quienes conforman mi núcleo familiar: mi madre, mi padre y mi hermana, cuya partida temprana dejó una profunda huella en mi vida. A ellos, por su amor incondicional, apoyo constante y ejemplo de entrega, dedico con gratitud este logro académico.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Índice

Introducción	13
1. Modelado y Simulación de un Generador Síncrono	14
1.1. Modelo Dinámico de un Generador Síncrono	14
1.2. Representación Matricial en el Marco de Referencias $dq0$	20
1.3. Ecuación de Oscilación para un Generador Síncrono.....	21
1.4. Inercia de un Generador Síncrono	22
1.5. Modelo del Generador Síncrono Empleado en Matlab Simulink.....	23
1.6. Simulación de un Generador Síncrono Mediante Coordenadas dqo en Entorno Simulink-Matlab	25
2. Introducción a la Estabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia	29
2.1. Definición Actual de Estabilidad	29
2.2. Tipos de Inestabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia.....	29
2.3. Inestabilidad Oscilatoria	30
2.4. Inestabilidad sincronizante.....	30
2.5. Inestabilidad Oscilatoria Sincronizante	31
3. Estabilidad de Gran Perturbación (Estabilidad Transitoria)	32
3.1. Consideraciones para el Análisis de Estabilidad Transitoria.....	32
3.2. Relación Potencia-Ángulo	33
3.3. Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación (Estabilidad Transitoria) en Matlab- Simulink.....	34
4. Control de Estabilidad Mediante Métodos Convencionales	37
4.1. Tipos de Controles en un Sistema de Potencia Eléctrica.....	38
4.2. Control de Estabilidad Mediante el Sistema de Gobernador	39

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

4.3.	Modelado Diagrama de Bloques para un Gobernador en Matlab-Simulink.....	40
4.4.	Control de Estabilidad Mediante el Sistema AVR	42
4.5.	Modelado Mediante Diagrama de Bloques para un Controlador AVR en Matlab-Simulink.....	42
4.6.	Control de Estabilidad por Medio de métodos Convencionales en el Software Matlab-Simulink	44
5.	Convertidor de Potencia DC/AC (Inversor de Potencia).....	46
5.1.	Filtro Pasivo Pasa Bajos LCL	47
5.2.	Diseño de un inversor y su sistema de filtrado LCL en entorno Simulink de Matlab.....	47
6.	Generación Síncrona Virtual (VSG).....	51
6.1.	Estatismo en el VSG	53
6.2.	Modelo Matemático de un VSG	53
6.3.	Potencia Activa y Reactiva en un VSG	55
6.4.	Emulación de Rotor en un VSG.....	55
6.5.	Generador Síncrono Virtual de doble Lazo (Three Phase VSG Double Loop Control) ..	57
6.6.	Estructura del VSG Empleado	58
7.	Control de Estabilidad Mediante Generación Síncrona Convencional y Virtual	61
7.1.	Resultados	62
	Conclusiones	66
	Referencias Bibliográficas	68
	Lista de Apéndices	70

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de un Generador síncrono.	16
Figura 2. Circuito Equivalente para un Generador Síncrono.	17
Figura 3. Bloque para el Modelo de una Máquina Síncrona en Software Matlab-Simulink.	24
Figura 4. Sistema de Potencia Barra Única en el Entorno de Matlab-Simulink.	26
Figura 5. Señales en Coordenadas dqo Usando Matlab-Simulink.	27
Figura 6. Inestabilidad Oscilatoria.	30
Figura 7. Inestabilidad Sincronizante.	31
Figura 8. Inestabilidad Oscilatoria Sincronizante.	31
Figura 9. Estabilidad Transitoria.	32
Figura 10. Sistema de Potencia Barra Infinita Empleado.	33
Figura 11. Modelado del Sistema de potencia en el software Matlab-Simulink.	35
Figura 12. Gráfica de Frecuencia en Función del Tiempo del Sistema de Potencia analizado. ..	35
Figura 13. Gráfica de Potencia Versus Ángulo Ante la Gran Perturbación.	37
Figura 14. Secuencia de Control en un Sistema de Potencia.	39
Figura 15. Modelado del Gobernador Mediante Matlab-Simulink.	40
Figura 16. Modelado del Servomotor del Gobernador Mediante Matlab-Simulink.	41
Figura 17. Modelo del Gobernador en Software Matlab-Simulink.	41
Figura 18. Diagrama de Bloques Para un Sistema AVR en Entorno Matlab-Simulink.	43
Figura 19. Bloque del AVR en Software Matlab-Simulink.	43
Figura 20. Modelado Dinámico de un Sistema de Potencia Barra única y sus Controladores.	45
Figura 21. Frecuencia Eléctrica para el Sistema en Estudio Considerando Sistema de Control Convencional.	45

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Figura 22. Inversor Controlado por PWM en Simulink-Matlab.....	47
Figura 23. Señales de Tensión a la Salida del Inversor.	48
Figura 24. Inversor Trifásico con su Sistema de Filtrado LCL.	50
Figura 25. Inversor y Sistema de Filtrado LCL Simplificado.	50
Figura 26. Señales para el Inversor de Potencia.	51
Figura 27. Diagrama de un Sistema de Generación Síncrona Virtual VSG Conectado a la Red.	52
Figura 28. Estructura de un Sistema de Generación Síncrona Virtual VSG.	52
Figura 29. Modelo Monofásico de un Generador síncrono Virtual VSG.....	54
Figura 30. Modelo de Bloques para el Rotor Virtual de un VSG.....	56
Figura 31. Regulador de Frecuencia.	58
Figura 32. Regulador de Tensión para un VSG.	59
Figura 33. Controlador VSG.....	60
Figura 34. Sistema de potencia Barra Única Alimentado Mediante Generación Síncrona Convencional y Virtual en Matlab-Simulink.....	61
Figura 35. Frecuencia eléctrica del Sistema de Potencia.	63
Figura 36. Tensiones de Línea y Corrientes del Sistema de Potencia.	64
Figura 37. Señales de Tensión y Corriente del Sistema con GS y VSG.....	64

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Transformada de Park.	15
Ecuación 2. Transformación dq0 de las Tensiones en el Estator Para un Generador Síncrono ..	15
Ecuación 3. Ecuación de Posición Angular de la Máquina Síncrona.	16
Ecuación 4. Ecuación de Tensiones para la Máquina Síncrona en Coordenadas abc.....	17
Ecuación 5. Enlaces de Flujo en Función de Inductancias Presentes en un generador Síncrono.	18
Ecuación 6. Valores de Inductancias de un generador Síncrono.	18
Ecuación 7. Matriz de Inductancias en Coordenadas dq0.....	20
Ecuación 8. Tensiones en Coordenadas dq0 para un Generador Síncrono.....	21
Ecuación 9. Ecuación Mecánica aplicada a un cuerpo que rota.....	21
Ecuación 10. Ecuación de Oscilación en Base a su Momento de Inercia.....	22
Ecuación 11. Constante de Inercia.	23
Ecuación 12. Ecuación de Oscilación en P.U.	23
Ecuación 13. Ecuación de potencia para un sistema eléctrico.	36
Ecuación 14. Función de Transferencia para la Excitatriz de un Generador Síncrono.....	43
Ecuación 15. Condensador para un Filtro LCL.	49
Ecuación 16. Inductancias para un Filtro LCL.	49
Ecuación 17. Resistencia de Amortiguamiento de un Filtro LCL.	50
Ecuación 18. Impedancia Síncrona Virtual.....	54
Ecuación 19. Potencia Activa Entregada por un VSG.....	55
Ecuación 20. Ecuación de Oscilación para un VSG.	56
Ecuación 21. Inercia Total de un Sistema con Maquinas Rotativas y VSG's.....	57

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables de la Máquina Síncrona empleada en el Software Matlab Simulink.....	24
Tabla 2. Valores Nominales e Impedancias del Sistema Empleado Para la Simulación dq0.....	26
Tabla 3. Consideraciones para el Análisis de Estabilidad Transitoria.	33
Tabla 4. Variables de Entrada y Salida del Gobernador.	41
Tabla 5. Variables de Entrada y Salida para el AVR.....	44
Tabla 6. Datos para Convertidor DC/AC Empleado.....	47
Tabla 7. Parámetros Para el VSG.....	60
Tabla 8. Resultados Obtenidos.....	65

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Lista de Variables

t . Tiempo.

Δx . Vector linealizado de derivadas de estado.

Z . Vector linealizado auxiliar de derivadas de variables de estado.

Φ . Matriz cuadrada de vectores propios derechos de un sistema de espacio de estados.

Ψ . Matriz cuadrada de vectores propios izquierdos de un sistema de espacio de estados.

ϕ . Valor propio de un espacio de estados.

Λ . Matriz A de coeficientes auxiliares de un sistema de espacio de estados homogéneo.

C_i . Sustitución del producto matricial de la matriz linealizada de estados, y matriz de vectores propios izquierdos.

λ . Valor propio de una variable de estado.

V_a, V_t . Tensión en la fase a .

E_a, V_1 . Tensión generada.

I_a . Corriente en la fase a .

R_s . Resistencia síncrona.

Z_s . Impedancia síncrona.

L_s . Inductancia síncrona.

X_s . Reactancia síncrona.

P_m . Potencia mecánica.

P_e . Potencia eléctrica.

τ_m . Torque mecánico.

τ_e . Torque eléctrico.

τ_a . Torque acelerante.

τ_s . Torque sincronizante.

τ_D . Torque amortiguante.

A, B, C, D . Matrices de estado.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

E_f . Tensión de campo.

K_S . Constante de torque sincronizante.

D . Constante de par amortiguante.

δ . Angulo del par.

θ . Angulo en grados mecánicos.

P_n . Potencia nominal.

S_n . Pptencia aparente nominal.

Q . Potencia reactiva.

J . Momento de inercia.

E_k . Energía cinética.

H . Constante de inercia.

ω_s . Velocidad síncrona.

ω_0 . Velocidad nominal.

α . Aceleración angular.

P_{ref} . Potencia de referencia.

V_d . Tensión de eje directo.

V_q . Tensión de eje en cuadratura.

I_d . Corriente de eje directo.

I_q . Corriente de eje en cuadratura.

H_V . Constante de Inercia virtual.

J_V . Momento de inercia virtual.

δ_V . Angulo del par virtual.

R_d . Resistencia de amortiguamiento.

X_{VSG} . Reactancia síncrona Virtual.

ω_V . Velocidad síncrona virtual

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Resumen

Título: Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación en un Sistema Eléctrico de Potencia Considerando Barra Única Alimentada Mediante Generación Síncrona Convencional y Virtual*

Autor: Hollman Fabian Largo Cristancho**

Palabras claves: Inversor de potencia, Generador síncrono, Virtual Synchronous Generator, Estabilidad, Control, Frecuencia, VSG.

Descripción:

Los sistemas eléctricos de potencia están compuestos principalmente por generadores, líneas y transformadores capaces de soportar altas potencias eléctricas. En la actualidad, estos sistemas son fundamentales para el desarrollo y funcionamiento de la sociedad, presentando un desafío en su control y operación debido a su robustez para alimentar grandes cargas y soportar fallas variables en el tiempo. Esta capacidad se describe mediante la dinámica de los sistemas eléctricos de potencia, conocida como **estabilidad**.

La estabilidad de estos sistemas analiza la dinámica de sus variables de estado para controlar la frecuencia y la tensión eléctrica, donde la frecuencia está relacionada con el consumo de potencia activa, robustez y constante de inercia, mientras que la tensión depende de la capacidad de las barras y la potencia reactiva del sistema, alimentado por unidades generadoras.

Las unidades generadoras son cruciales para la estabilidad, ya que deben coordinar y suministrar los valores de potencia activa y reactiva. Se dividen en máquinas rotativas y estáticas, siendo esenciales las máquinas rotativas (**generadores síncronos**) por su capacidad de brindar la inercia necesaria para superar perturbaciones en el sistema eléctrico.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Eléctrica. E3T. Director Johann Farith P. Codirector María M.

Abstract

Title: Of Large Disturbance Stability in an Electrical Power System Considering Single Bus Fed by Conventional and Virtual Synchronous Generation*

Author: Hollman Fabian Largo Cristancho**

Key words: Power inverter, Synchronous generator, Virtual Synchronous Generator, Stability, Frequency Control, VSG.

Description:

Electrical power systems are mainly composed of generators, lines and transformers capable of supporting high electrical powers. Currently, these systems are fundamental for the development and functioning of society, presenting a challenge in their control and operation due to their robustness to power large loads and withstand variable failures over time. This capacity is described by the dynamics of electrical power systems, known as stability.

The stability of these systems analyzes the dynamics of their state variables to control the frequency and electrical voltage, where the frequency is related to the active power consumption, robustness and inertia constant, while the voltage depends on the capacity of the bars and the reactive power of the system, fed by generating units.

Generating units are crucial for stability, as they must coordinate and supply active and reactive power values. They are divided into rotating and static machines, with rotating machines (synchronous generators) being essential due to their ability to provide the necessary inertia to overcome disturbances in the electrical system.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Eléctrica. E3T. Director Johann Farith P. Codirector María M.

Introducción

En un entorno energético que evoluciona hacia sistemas más dinámicos y descentralizados, con un aumento progresivo en la penetración de sistemas de generación estática mediante fuentes renovables, comprender la interacción y el control eficaz de estas tecnologías es esencial, en este sentido la evaluación de la estabilidad ante grandes perturbaciones en sistemas eléctricos de potencia se vuelve esencial.

El enfoque del proyecto está centrado en la estabilidad frente a grandes perturbaciones, en un sistema eléctrico de potencia con barra única, alimentado mediante generación síncrona convencional y virtual. Para abordar los desafíos asociados con la estabilidad en este contexto, se utilizará la electrónica de potencia, específicamente un inversor con su técnica de control correspondiente denominada "generación síncrona virtual". Además, se implementará un control de potencia en la generación síncrona convencional, todo ello detallado y evaluado a través de simulaciones en MATLAB Simulink. La integración de la generación síncrona virtual y el control de potencia en la generación síncrona convencional se presenta como una solución innovadora para garantizar la estabilidad del sistema, especialmente en situaciones de perturbación significativa que afecta el balance generación demanda y por ende la frecuencia del sistema.

Con este estudio se contribuirá a la adaptación de los sistemas de potencia a las crecientes demandas y desafíos de nuestro entorno energético en constante cambio, incluida la posible falta de inercia en el futuro debido al uso masivo de convertidores electrónicos de potencia como interfaz de integración de conexión de fuentes de energía renovable. Una característica destacada

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

será la capacidad de emular la inercia de las máquinas síncronas convencionales mediante el uso del Generador Síncrono Virtual (VSG–Virtual Synchronous Generator).

1. Modelado y Simulación de un Generador Síncrono

Este capítulo proporcionará el conocimiento necesario sobre el funcionamiento de una máquina síncrona para efectuar análisis de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, ya que, de sus características de desempeño en operación, depende la estabilidad del sistema.

1.1. Modelo Dinámico de un Generador Síncrono

La máquina síncrona consta de tres bobinados en el estator, un devanado de campo en el rotor y "n" devanados amortiguadores cortocircuitados. El número de estos devanados amortiguadores afecta la dimensión de las matrices características del modelo matemático, teniendo una buena operación con dos devanados amortiguadores “modelo (3,3)”.

Para el análisis transitorio de una máquina síncrona, se considera un grupo de circuitos acoplados magnéticamente que, a su vez, son dependientes de la posición angular " θ " del rotor, debida a la rotación angular " ω ", y una referencia a lo largo de la fase " α " para un tiempo igual a cero (Manfred, 2016).

Para eliminar la dependencia de la posición angular " θ " y simplificar los cálculos, se recurre a un sistema de coordenadas estacionarias rotatorias. Este proceso es posible mediante la transformada de Park (ecuación 1), donde se obtiene un nuevo sistema de tensiones estacionarias

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

que oscilan a una velocidad ω y tienen como referencia unas nuevas coordenadas llamadas $dq0$. Las coordenadas $dq0$ están compuestas por un eje d (eje directo) y un eje q (eje en cuadratura), los cuales están a 90° entre sí y rotan a la velocidad del rotor ω . El eje "0" es un eje estático que aparece en el caso de haber desbalance (Baez, 2003).

Ecuación 1.

Transformada de Park.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Para pasar de un marco de referencias abc a $dq0$, se utiliza la ecuación 1, dando como resultado, para las tensiones, la ecuación 2. v_d, v_q y v_0 hacen referencia a las tensiones $dq0$; v_a, v_b, v_c a las tensiones abc de la máquina síncrona.

Ecuación 2.

Transformación dq0 de las Tensiones en el Estator Para un Generador Síncrono.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Nota. Los valores de posición angular “ θ ” vienen dados por la ecuación cinemática dependiente del ángulo del par “ δ ” y la velocidad angular del rotor “ ω ” ecuación 3.

Ecuación 3.

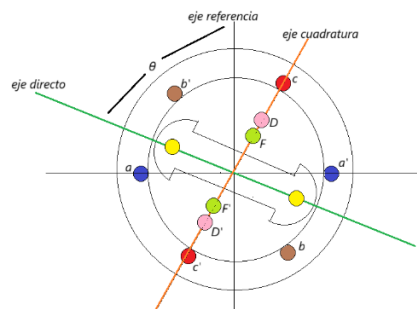
Ecuación de Posición Angular de la Máquina Síncrona.

$$\theta = \omega t + \delta + \frac{\pi}{2}$$

En la figura 1 se muestra un esquema ilustrativo para visualizar la disposición de los marcos de referencia **abc** y **dq** para una máquina síncrona (rotor y estator). En dicha figura se incluyen tres devanados en el estator (fases **abc**) y tres devanados en el rotor (un devanado de campo y dos de amortiguamiento). Nótese que los devanados de amortiguamiento se encuentran en los ejes **d** y **q**, mientras que los devanados del estator se encuentran en coordenadas **abc**. El devanado de campo se encuentra en el eje **q**.

Figura 1.

Esquema de un Generador síncrono.



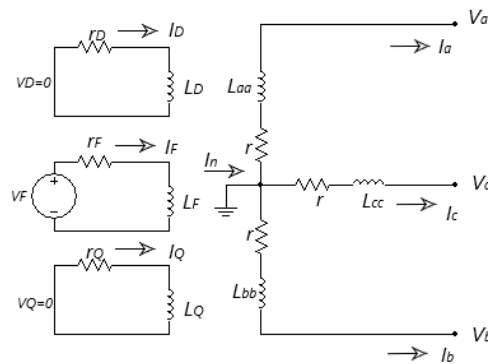
Así mismo, en la figura 2 se presenta los circuitos equivalentes para el generador síncrono de la figura 1. Si bien en la figura no se indican los acoplamientos, se aclara que entre los seis

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

devanados hay acoplamientos mutuos. Así mismo, tal como se indicará más adelante, algunas inductancias de los devanados son función del valor de la posición angular θ , debido a la velocidad ω de giro del rotor.

Figura 2.

Cirquito Equivalente para un Generador Síncrono.



Las tensiones respectivas de las fases y devanados en el rotor se pueden obtener a través de leyes de circuitos, teniendo en cuenta los enlaces de flujo total concatenado λ , (véase [ecuación 4](#)) para coordenadas *abc*.

Ecuación 4.

Ecuación de Tensiones para la Máquina Síncrona en Coordenadas abc.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ -V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix}$$

Nota. r hace referencia a la resistencia síncrona.; r_F , r_D y r_Q , a las resistencias de los devanados de campo y amortiguadores D y Q.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

A continuación, se enuncia el sistema de ecuaciones del generador síncrono, con base en sus inductancias y enlaces de flujo.

Ecuación 5.

Enlaces de Flujo en Función de Inductancias Presentes en un generador Síncrono.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

Nota. a, b, c hace referencia a las fases **abc**, y F, D, Q al campo y a los devanados amortiguadores: es decir L_{bF} enuncia la inductancia mutua entre el devanado de fase **b** y el devanado de campo F. Por lo consiguiente, L_{aa} la inductancia mutua de la fase **a**.

Representando los valores de inductancia dependientes de " θ " debido a la rotación del rotor, y considerando únicamente las componentes a frecuencia fundamental, donde se concentra la mayor parte de la energía, se obtiene los siguientes valores:

Ecuación 6.

Valores de Inductancias de un generador Síncrono.

Inductancias en el estator:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2 \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2 \left(\theta + \frac{5\pi}{6} \right)$$

Inductancias en el rotor:

$$L_{FF} = L_F$$

$$L_{DD} = L_D$$

$$L_{QQ} = L_Q$$

$$L_{FD} = L_{DF} = M_R$$

$$L_{FQ} = L_{QF} = 0$$

$$L_{DQ} = L_{QD} = 0$$

Inductancias mutuas entre el estator y rotor:

$$L_{aF} = L_{Fa} = M_F \cos 2\theta$$

$$L_{bF} = L_{Fb} = M_F \cos 2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cF} = L_{Fc} = M_F \cos 2 \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{aD} = L_{Da} = M_D \cos 2\theta$$

$$L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos 2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = M_D \cos 2 \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \sin 2\theta$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \sin 2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

$$L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \sin 2 \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Nota. Las inductancias M_D, M_Q, M_F, M_R, M_S y L_m hacen referencia, respectivamente, a los valores pico de inductancias mutuas entre devanado D y fases; el devanado Q y las fases; el devanado de campo y fases; la inductancia mutua en el rotor; la inductancia mutua en entre fases.

Como se puede observar, trabajar en las coordenadas **abc** implica hacerlo con inductancias que dependen de la posición del rotor. Por tal razón, se recurre a la transformación **dq0**, que, al estar sincronizada con la frecuencia ω , permite trabajar con valores constantes, eliminando la dependencia de θ .

1.2. Representación Matricial en el Marco de Referencias dq0

Utilizando la transformación de Park, se obtiene la siguiente matriz de inductancias en coordenadas **dq0**. Nótese que las inductancias no dependen de la posición θ .

Ecuación 7.

Matriz de Inductancias en Coordenadas dq0.

$$\begin{bmatrix} L_s - 2M_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s + M_s + \frac{3L_m}{2} & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_F & \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 \\ 0 & 0 & L_s + M_s + \frac{3L_m}{2} & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Asimismo, las ecuaciones de las tensiones para el generador síncrono en coordenadas $dq0$ corresponden a la Ecuación 8.

Ecuación 8.

Tensiones en Coordenadas dq0 para un Generador Síncrono.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & \omega L_q & 0 & 0 & -\omega \sqrt{\frac{3}{2}} M_Q \\ 0 & -\omega L_d & r & -\omega \sqrt{\frac{3}{2}} M_F & -\omega \sqrt{\frac{3}{2}} M_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} M_F & \sqrt{\frac{3}{2}} M_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} M_Q \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} M_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} M_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} M_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

1.3. Ecuación de Oscilación para un Generador Síncrono

La ecuación de oscilación aplicada a una máquina síncrona, ecuación 9, describe la dinámica angular basándose en la mecánica clásica.

Ecuación 9.

Ecuación Mecánica aplicada a un cuerpo que rota.

$$\sum_{k=1}^n \tau_k = \alpha J$$

El rotor de una máquina síncrona está sujeto a tres torques: el torque mecánico, el torque electromagnético y el torque amortiguante. El torque mecánico corresponde al torque de entrada,

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

proporcionado por el primotor, que impulsa al rotor; El torque electromagnético es generado por el propio generador síncrono y está relacionado con el torque sincronizante, el cual se analizará más adelante. La suma de los torques mecánico y electromagnético se denomina torque acelerante; y, finalmente el torque amortiguante, el cual es causado por el desequilibrio entre el torque mecánico y el torque electromagnético (Torque acelerante). Este torque aparece únicamente en situaciones de inestabilidad y es producido por los devanados amortiguadores presentes en el rotor (eje directo d) (Baez, 2003). Rescribiendo la ecuación 9 en función de los diferentes torques; aceleración y momento de inercia, se obtiene la ecuación de oscilación (ecuación 10).

Ecuación 10.

Ecuación de Oscilación en Base a su Momento de Inercia.

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \tau_m - \tau_e - D\omega$$

Donde $D\omega$ es el torque amortiguante; τ_m el torque mecánico; τ_e el torque electromagnético; J el momento de inercia; y δ el ángulo del par.

En estado estable, el torque electromagnético es aproximadamente igual al torque mecánico. Sin embargo, ante una perturbación, el torque electromagnético se ve afectado, lo que puede llevar a la pérdida de sincronismo, acelerando o frenando el rotor.

1.4. Inercia de un Generador Síncrono

La inercia de un generador síncrono representa la capacidad de la máquina para oponerse a cambios repentinos en su velocidad de rotación. Un generador con mayor inercia contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico. En estudios de estabilidad, es común trabajar con la **constante**

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

de inercia, ya que esta simplifica los cálculos cuando se analizan sistemas multimáquina (Zavala, 2022).

A continuación, se presenta la ecuación 9, que define la constante de inercia " H ".

Ecuación 11.

Constante de Inercia.

$$H = \frac{E_k}{S_n} = \frac{J\omega_0^2}{2S_n} \text{ [s]}$$

Nota. E_k , S_n , J hacen referencia a la energía cinética, potencia nominal y momento de inercia de la máquina síncrona

Al sustituir la ecuación 9 en la ecuación 10, finalmente se obtiene la ecuación de oscilación, representada en P.U.

Ecuación 12.

Ecuación de Oscilación en P.U.

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \tau_m - \tau_e - D\omega$$

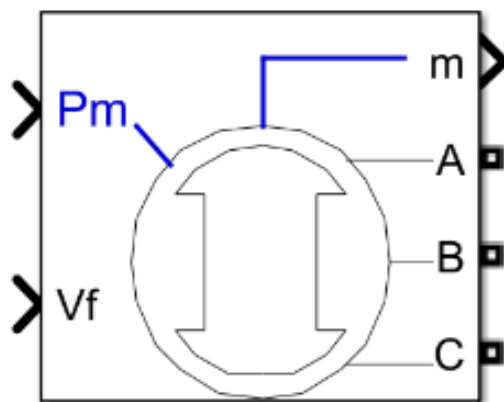
1.5. Modelo del Generador Síncrono Empleado en Matlab Simulink

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

El software Matlab cuenta con variedad de modelos de máquinas síncronas. Para este trabajo, se optó por implementar el modelo más completo, el cual es un modelo (3,3); es decir que emula un generador síncrono con dos devanados amortiguadores, uno de campo en el rotor y tres devanados en el estator. Dicho modelo está basado en coordenadas “ $dq\phi$ ”, además de operar en cálculos PU.

Figura 3.

Bloque para el Modelo de una Máquina Síncrona en Software Matlab-Simulink.



Nota. Synchronous Machine PU Fundamental. Tomada de Matlab-Simulink.

La siguiente tabla enuncia las variables de entrada y salida del bloque generador síncrono de Matlab-Simulink.

Tabla 1.

Variables de la Máquina Síncrona empleada en el Software Matlab Simulink.

Entradas y salidas Generador Síncrono Matlab Simulink			
Entradas	Símbolo	Salidas	Símbolo
Potencia mecánica	Pm	Tensión de	A,B,C
Tensión de campo	Vf	Fase a,b,c	
Salidas m		Simbolo	
	Corriente estator fase a	is_a (pu)	
	Corriente estator fase b	is_b (pu)	
	Corriente estator fase c	is_c (pu)	
	Corriente estator q	iq(pu)	
	Corriente estator d	id(pu)	
	Corriente campo ifd	ifd(pu)	
	Corriente devanado amortiguador 1	ikq1(pu)	
Componentes dq0	Corriente devanado amortiguador 2	ikq2(pu)	
	Corrientes devanados	ikd(pu)	
Amortiguadores			
	Flujo mutuo d	phimd (pu)	
	Flujo mutuo q	phimq (pu)	
	Tensión estator d	vd (pu)	
	Tensión estator q	vq (pu)	
	Inductancia mutua d	Lmd (pu)	
	Inductancia mutua q	Lmq (pu)	
	ángulo delta	delta (deg)	
	Potencia activa de salida	Peo (pu)	
	Potencia reactiva de salida	Qeo (pu)	

1.6. Simulación de un Generador Síncrono Mediante Coordenadas $dq0$ en Entorno Simulink-Matlab

A lo largo del capítulo 1, se ha presentado el desarrollo matemático necesario para obtener el modelo dinámico de una máquina síncrona, así como el proceso de reducción mediante la **transformada de Park**, que permite transformar un sistema variante en el tiempo en coordenadas estacionarias $dq0$. Asimismo, se ha destacado la utilidad del software Matlab, el cual ofrece herramientas avanzadas para simular el comportamiento dinámico de una máquina síncrona. Dicho proceso de simulación se fundamenta en los conceptos y cálculos expuestos anteriormente.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

A continuación, se ilustra la tabla de valores nominales (tabla 2) y la simulación del sistema de potencia en el entorno Simulink de Matlab. Este sistema incluye un generador síncrono que alimenta una carga de gran perturbación, a través de un transformador reductor de tensión conectado a una barra única.

Tabla 2.

Valores Nominales e Impedancias del Sistema Empleado Para la Simulación dq0.

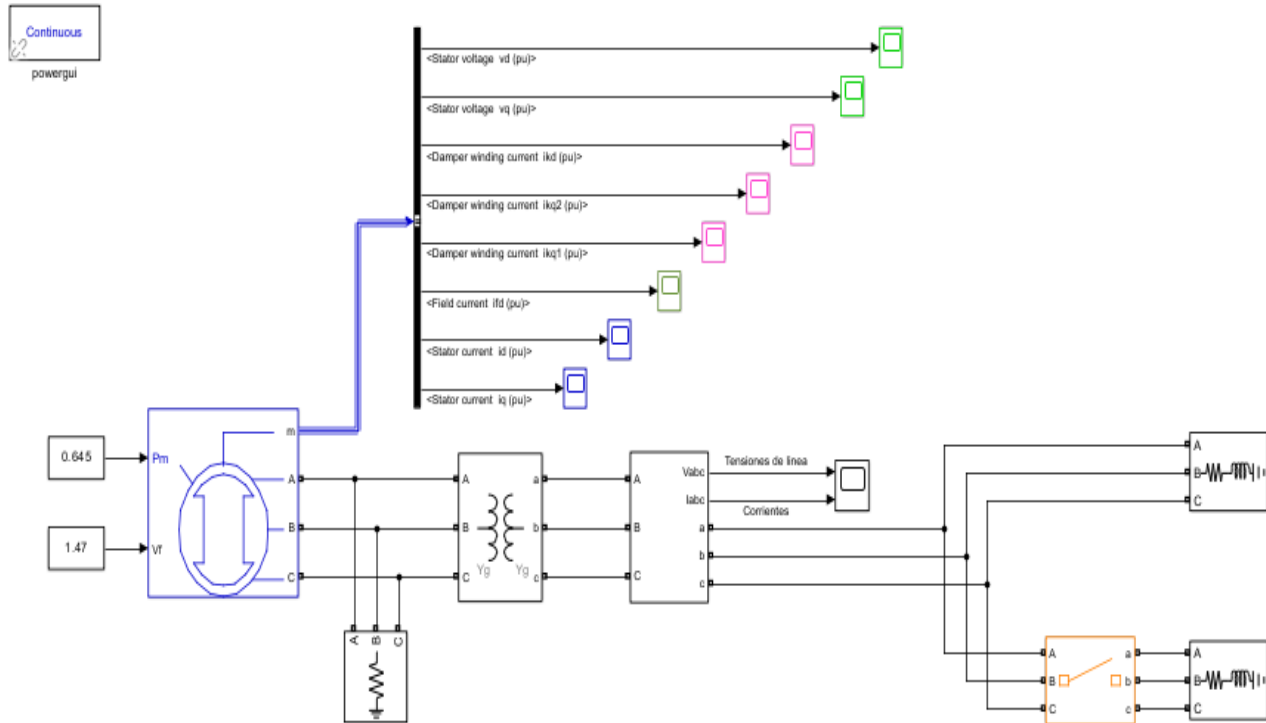
Descripción	Tensión [V]	potencia [VA]	Potencia Activa [W]	Potencia inductiva	Frecuencia [Hz]	bobinas amortiguante
Generador síncrono	11k	100 M	na	na	60	2
Transformador	11k/440	100 M	na	na	60	na
Carga principal	440	na	50 M	10 M	60	na
Carga de perturbación	440	na	30 M	3 M	60	na
Resistencia protección	11 k	1 M	na	na	60	na
Impedancias						
generador síncrono [PU]	Transformador [PU]		Carga conectada		Protección a tierra	
L_d	1.19	R_p	0.002	R_c [M Ω]	3.796	R_t [Ω]
L_q	0.36	R_s	0.002	L_c [μH]		121
R_s	2.85e-3	L_p	0.08			
		L_s	0.08		0.1724	
H [pu]				1.5		

Nota. Los espacios con las siglas “na” se deben a que no aplican en software para su configuración inicial.

Figura 4.

Sistema de Potencia Barra Única en el Entorno de Matlab-Simulink.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



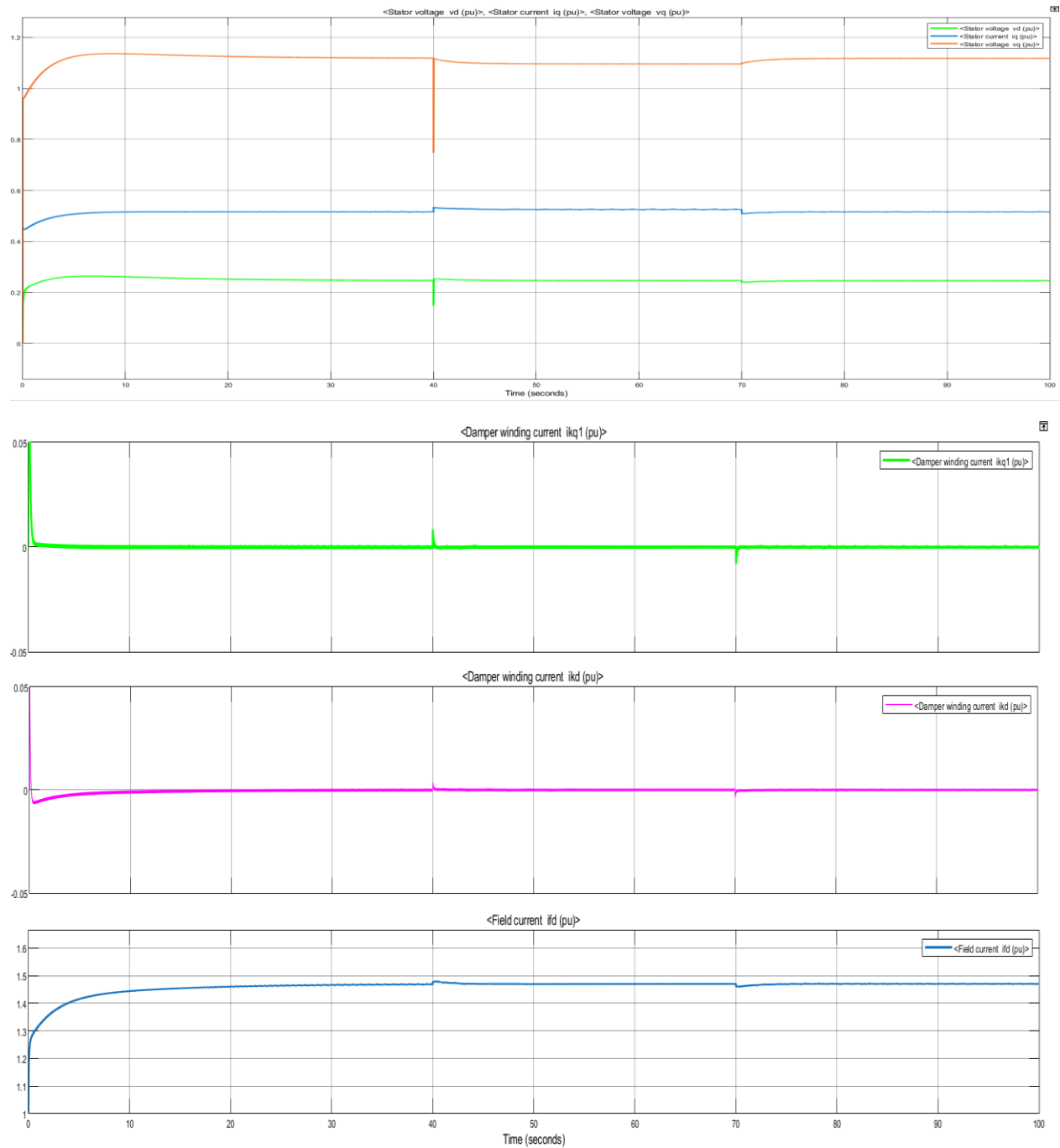
Nota. El breaker se acciona durante un intervalo temporal de [40s , 70s], periodo en el cual entra una carga de gran perturbación que altera la dinámica del sistema de potencia.

A continuación, grafica 5, se observa las señales de salida en coordenadas dq0 para el sistema de potencia mostrado en la figura 4.

Figura 5.

Señales en Coordenadas dq0 Usando Matlab-Simulink.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. El modelo implementado en el software opera utilizando cálculos en por unidad (PU). A partir de las gráficas obtenidas, se destacan los picos de corriente en los instantes 40 [s] y 70 [s] en las señales de corriente de los devanados amortiguadores. Esto se debe a que, dichos momentos, los devanados amortiguadores mitigan las variaciones en la dinámica del sistema eléctrico,

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

correspondiendo a la perturbación significativa en la carga conectada. En consecuencia, los devanados amortiguadores cumplen su función de mitigar estos cambios, generando en esos instantes variaciones en las tensiones en el eje directo y en cuadratura.

La corriente del devanado de campo solo se superpone en el eje directo, dado que el devanado de campo está completamente alineado con dicho eje. No se evidencian componentes en la secuencia cero, ya que, al tratarse de un sistema balanceado, estas se anulan. Además, se resaltan sus características no oscilatorias del sistema y la reducción de señales trifásicas a monofásicas, lo cual es precisamente el objetivo de la transformada de Park.

2. Introducción a la Estabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia

La estabilidad es el término aplicado a sistemas eléctricos de potencia, dando una condición en la cual varias máquinas síncronas del sistema estén en dicho sincronismo. Este capítulo pretende brindar conocimiento teórico acerca de la estabilidad de los sistemas de potencia, con la finalidad de aplicarlo al sistema eléctrico en estudio.

2.1. Definición Actual de Estabilidad

Es la capacidad de los sistemas eléctricos de potencia para, a partir de una condición inicial de operación, regresar a un estado de equilibrio tras ser sometidos a una perturbación física, con la mayoría de las variables limitadas.

2.2. Tipos de Inestabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

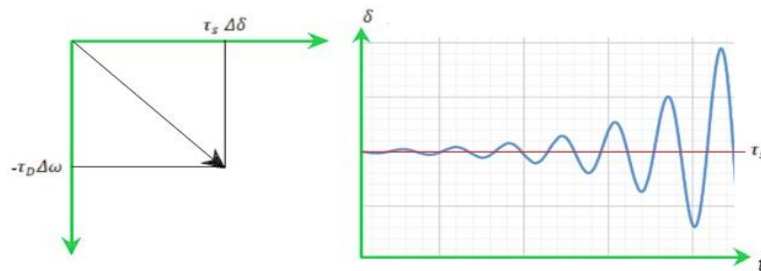
Es factible realizar un análisis de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia mediante la evaluación de sus valores de torque sincronizante y torque amortiguante.

2.3. Inestabilidad Oscilatoria

La inestabilidad oscilatoria es producto de la componente de torque amortiguante negativa, produciendo oscilaciones en la potencia de una máquina síncrona. Este tipo de inestabilidad a menudo corresponde a estabilidad en estado permanente (Apéndice A).

Figura 6.

Inestabilidad Oscilatoria.

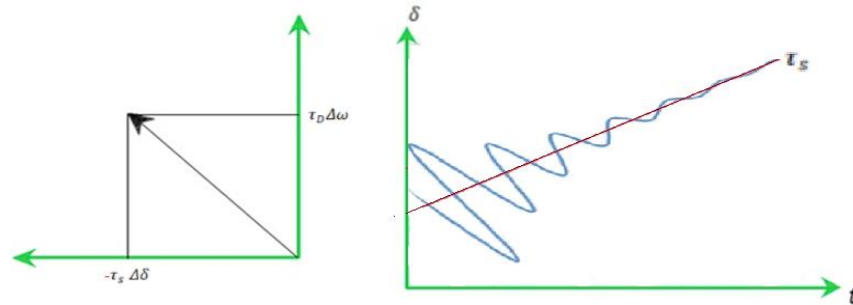


Nota. Oscilaciones con amplitudes crecientes en el ángulo del par “ δ ”, por falta de torque amortiguante.

2.4. Inestabilidad sincronizante

La inestabilidad sincronizante es producto de la componente de torque sincronizante negativa, produciendo incrementos en la potencia de una máquina síncrona.

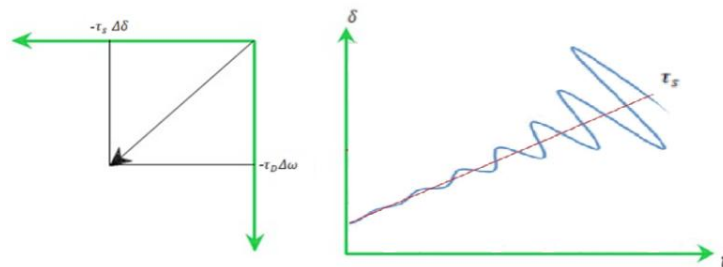
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Figura 7.*Inestabilidad Sincronizante.*

Nota. Se evidencia el crecimiento sostenido del ángulo del par “ δ ” (común en estabilidad de gran perturbación).

2.5. Inestabilidad Oscilatoria Sincronizante

La inestabilidad oscilatoria sincronizante es producto de las componentes de torque amortiguante y sincronizante negativas, produciendo oscilaciones e incrementos en la potencia de una máquina síncrona (Tapia, 2022).

Figura 8.*Inestabilidad Oscilatoria Sincronizante.*

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

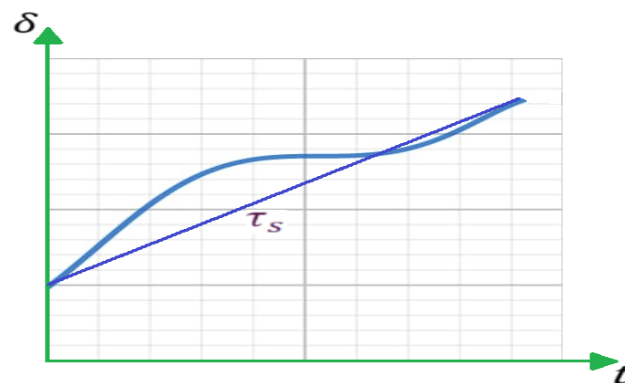
Nota. La inestabilidad oscilatoria sincronizante es producto de torque sincronizante y amortiguante negativo.

3. Estabilidad de Gran Perturbación (Estabilidad Transitoria)

La estabilidad Transitoria de un sistema eléctrico de potencia es la habilidad que posee dicho sistema para mantener el sincronismo después de haber sido sometido a grandes perturbaciones, como fallas o variaciones de grandes cargas eléctricas (Caro, 2019). Generalmente la estabilidad transitoria es producto de una gran disminución en el par sincronizante “ $\tau_s \Delta\delta$ ”.

Figura 9.

Estabilidad Transitoria.



Nota. Representación gráfica del crecimiento del ángulo del par a causa de una gran perturbación.

3.1. Consideraciones para el Análisis de Estabilidad Transitoria

La siguiente tabla enuncia las características a tener en cuenta para un análisis de estabilidad transitoria en el caso de estudio aplicado:

Tabla 3.

Consideraciones para el Análisis de Estabilidad Transitoria.

Consideraciones para el análisis de estabilidad transitoria	
Modelo GS	Para un estudio de estabilidad basta con emplear un modelo el cual considera únicamente tres devanados en el estator eje q. no considera devanados amortiguadores ni de campo, ya que los resultados son muy similares.
Cero devanados amortiguadores	los efectos de amortiguación se pueden despreciar, ya que son de gran respuesta temporal mientras que los transitorios son muy cortos de 1 a 2 segundos.
Reguladores de tensión no presentes	Ya que para estado estacionario la corriente de campo es constante, no hay control de tensión en la barra.
Valores propios	No es posible utilizar valores propios ya que no se cumple la linealidad y no es posible la aproximación al tratarse de grandes perturbaciones en δ .
Potencia mecánica constante	se debe a que la respuesta del gobernador es muy lenta en comparación a la excitatriz.
Saliencia despreciable	$X'_d = X_s$

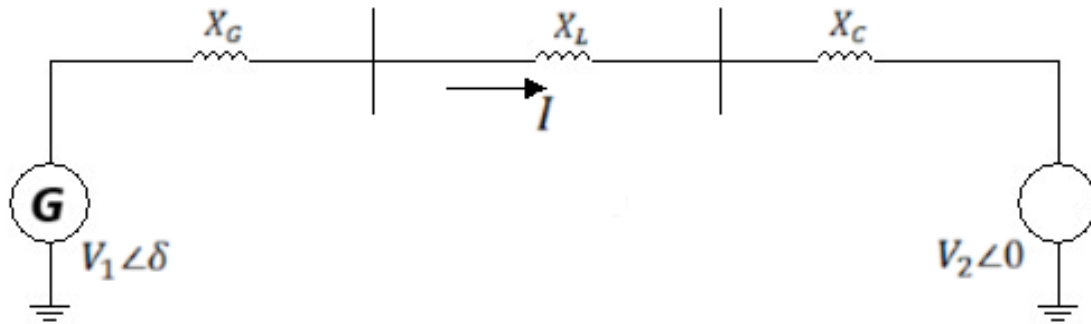
Nota. Las condiciones anteriores son aproximaciones válidas al realizar un estudio de estabilidad transitoria.

3.2.Relación Potencia-Ángulo

Figura 10.

Sistema de Potencia Barra Infinita Empleado.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. Se tiene en cuenta únicamente las Reactancias, ya que las resistencias para un sistema de potencia se suelen despreciar por su muy poca contribución. V_1 corresponde a la tensión generada y V_2 a la tensión en terminales.

3.3. Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación (Estabilidad Transitoria) en Matlab-Simulink

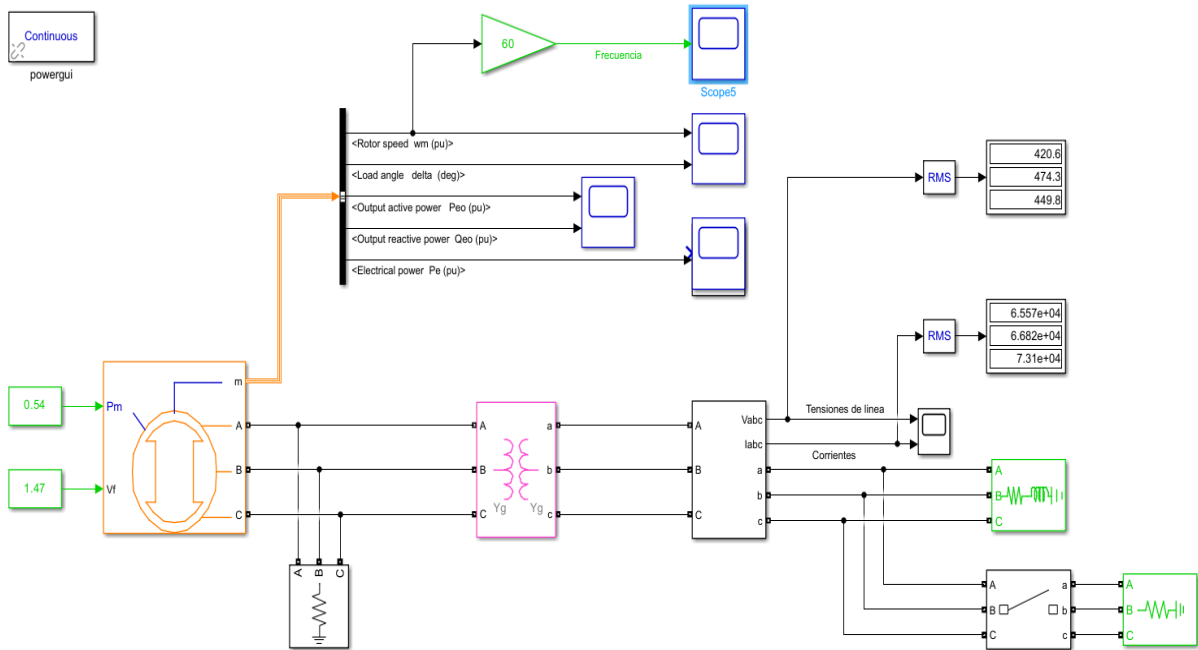
Para mantener la coherencia con el caso de estudio desarrollado a lo largo de este libro, a continuación, se analiza el mismo sistema de potencia, incorporando un evento de torque electromagnético. Este evento consiste en la entrada súbita de una carga de 60 MW (**carga de gran perturbación**), en el intervalo de tiempo [130 s, 150 s], lo que representa un evento de torque electromagnético desacelerante.

El proceso de cálculo empleado por el software de Matlab para encontrar la solución del sistema de potencia en estudio es mediante los métodos de integración numérica “Runge-Kutta” (Apéndice B). A continuación, se presenta el modelo realizado para el sistema en estudio en el software Matlab-Simulink, con la finalidad de efectuar un análisis de estabilidad de gran perturbación.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Figura 11.

Modelado del Sistema de potencia en el software Matlab-Simulink.

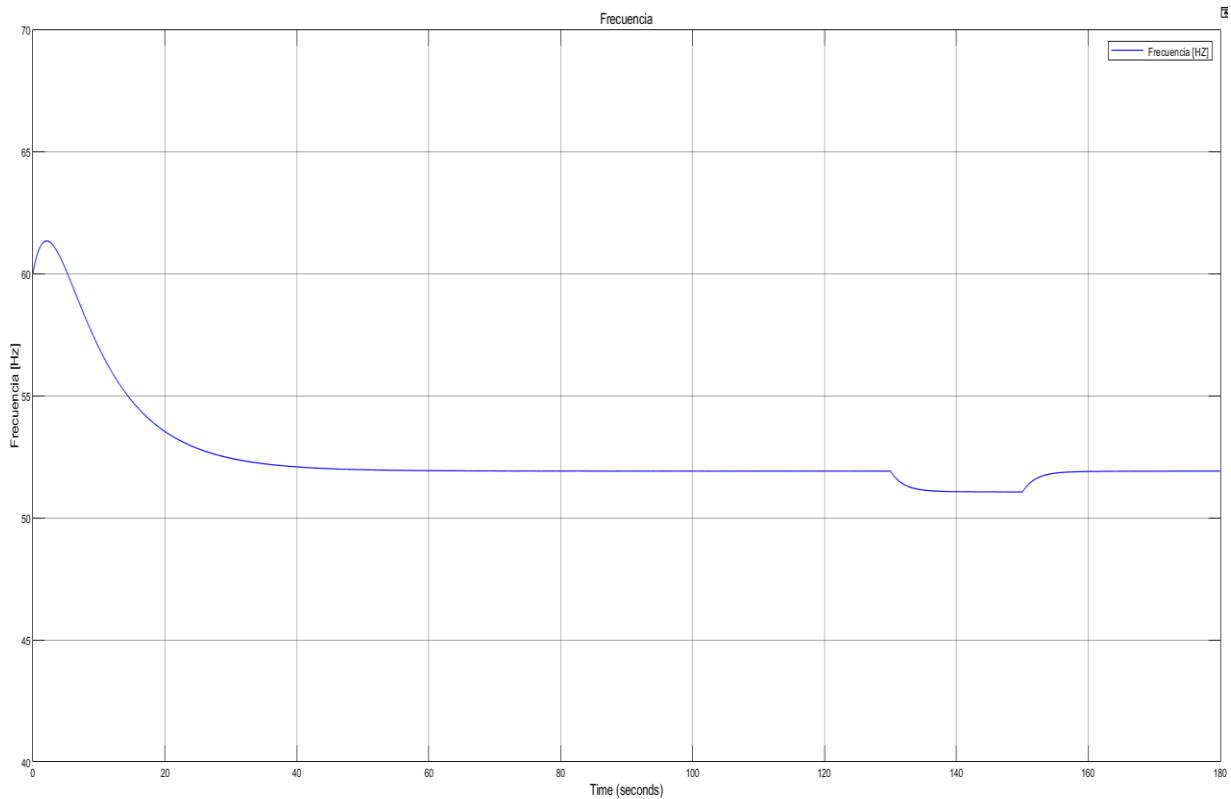


Correspondiendo a un valor de 0.54 PU en la potencia mecánica de entrada y 1.47 PU en el voltaje DC de excitación. A continuación, se observa la [figura 12](#), correspondiente a la frecuencia en función del tiempo del sistema de potencia, donde se evidencia la caída de frecuencia debida a la incursión de la carga de gran perturbación, la cual claramente está por fuera de parámetros normativos (Apéndice C).

Figura 12.

Grafica de Frecuencia en Función del Tiempo del Sistema de Potencia analizado.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



La relación entre el ángulo del par y la potencia eléctrica describe la importancia de alcanzar un equilibrio entre las áreas bajo la curva en las condiciones de falla o gran perturbación para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico (Apéndice B). dicho anexo también enuncia las consecuencias de no lograr dicho equilibrio, lo que conduce a un estado de pérdida de sincronismo.

A continuación, en la [figura 13](#) se presenta la gráfica de generación de potencia eléctrica descrita en la [ecuación 13](#) para el generador síncrono en estudio. Esta grafica evidencia cómo la máquina, tras una gran perturbación, pierde el sincronismo, reflejándose en la alteración de la ecuación sinusoidal descrita anteriormente.

Ecuación 13.

Ecuación de potencia para un sistema eléctrico.

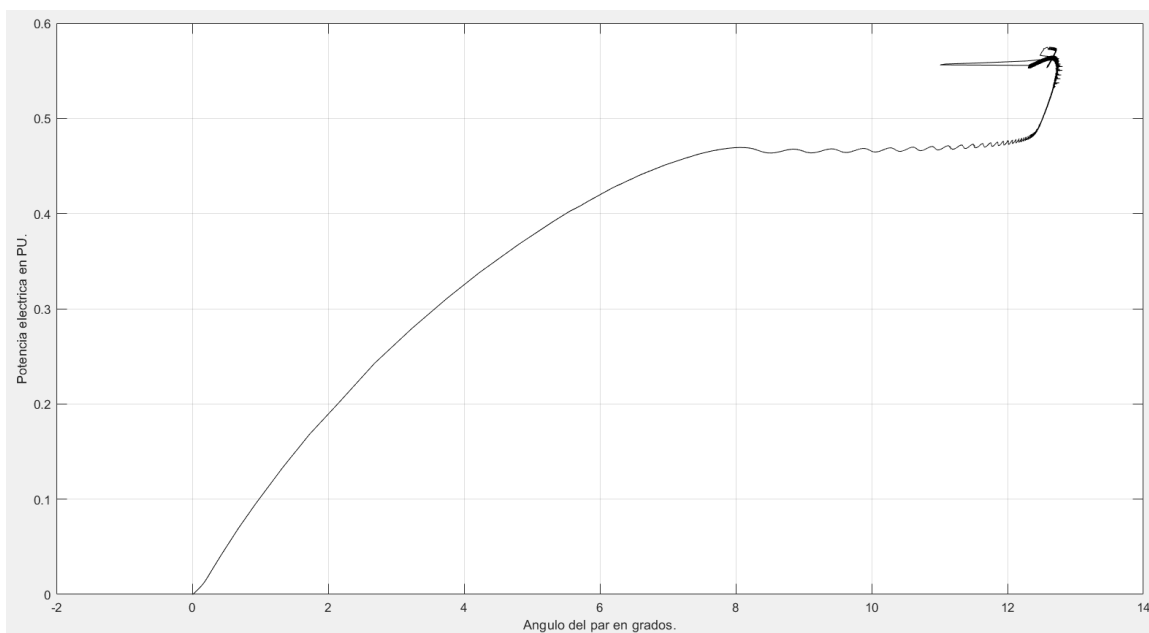
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_T} \text{sen}(\delta)$$

Nota. V_1 y V_2 hacen referencia a la tensión generada y a la tensión en terminales del generador síncrono. X_T representa la impedancia Total del sistema de potencia.

Figura 13.

Gráfica de Potencia Versus Ángulo Ante la Gran Perturbación.



Nota. Se observa cómo el sistema pierde el sincronismo.

4. Control de Estabilidad Mediante Métodos Convencionales

El control de potencia en una máquina síncrona es el proceso mediante el cual se regula la cantidad de energía eléctrica que el sistema suministra a la red eléctrica, específicamente a la carga. Este control es esencial para mantener la estabilidad del sistema eléctrico, tanto en frecuencia como

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

en tensión, garantizando la eficiencia operativa y evitando sobrecargas y fluctuaciones en el sistema eléctrico.

El control de potencia en un generador síncrono es fundamental para la estabilidad del sistema eléctrico. Este se lleva a cabo mediante la regulación de tensión y frecuencia; para temas de estabilidad angular, la regulación actúa directamente sobre la potencia mecánica, mientras que, para la estabilidad de tensión, la regulación actúa directamente en la excitatriz del generador síncrono.

4.1. Tipos de Controles en un Sistema de Potencia Eléctrica

Control Primario

El control primario en un sistema eléctrico de potencia siempre es el primero en responder a perturbaciones, actuando directamente en el gobernador y excitatriz. Reacciona a los deltas en la frecuencia eléctrica del sistema mediante la modificación en la potencia mecánica en el primotor.

ΔP_m está directamente ligado al estatismo, siendo importante en sistemas multimáquina.

Control Secundario AGC Y LFC

Cuando el control primario en un sistema de potencia no es suficiente para superar la pérdida de sincronismo del sistema, inmediatamente entra en marcha el control secundario (AGC Y LFC). Estos consisten en la conexión o desconexión automática de unidades generadoras, compuestas por máquinas síncronas disponibles para conexión en cualquier momento. Es clave el valor de la constante de inercia asociada al sistema de potencia, ya que influye directamente en la velocidad de reacción del control secundario.

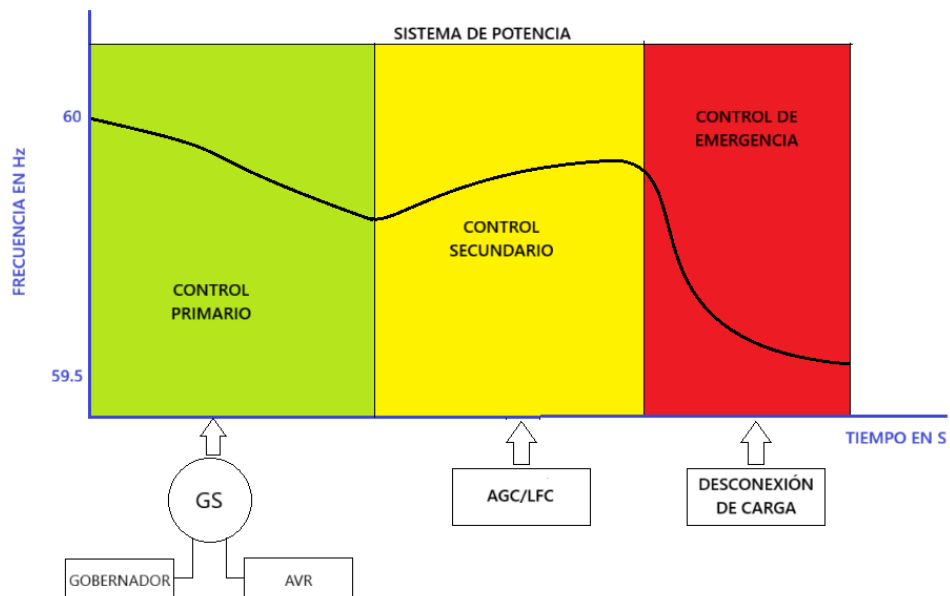
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Control Terciario de Emergencia ERAC

Cuando el control primario y secundario no es suficiente para recuperar la pérdida de sincronismo en el sistema de potencia, rápidamente entra el control de emergencia el cual consiste en el rechazo de cargas (deslastre de cargas), con la finalidad de recuperar el sincronismo del sistema.

Figura 14.

Secuencia de Control en un Sistema de Potencia.



Nota. El orden del color va de acuerdo con la secuencia de los controladores.

4.2. Control de Estabilidad Mediante el Sistema de Gobernador

El gobernador actúa directamente en la potencia mecánica, brindando un control en frecuencia mediante la modificación del Ángulo del par. Su respuesta es lenta debido al retardo en

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

los controladores en los actuadores de los servomotores encargados de modificar la posición de las compuertas de la potencia mecánica de entrada a las turbinas.

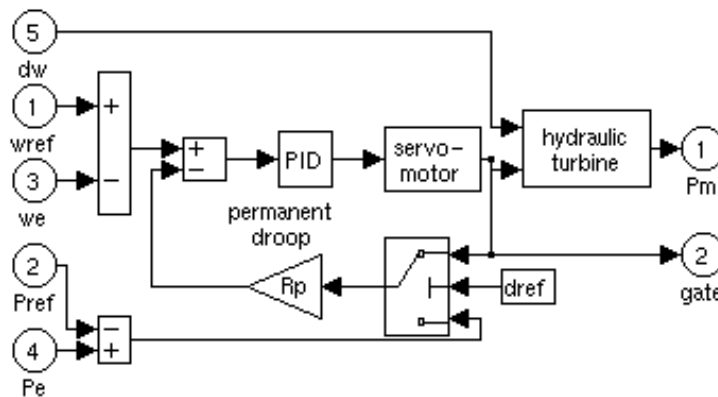
El bloque de gobernador implementado por Matlab-Simulink, adopta una turbina hidráulica no lineal, un sistema de regulador PID y un servomotor.

4.3. Modelado Diagrama de Bloques para un Gobernador en Matlab-Simulink.

El software de Matlab-Simulink cuenta con un bloque específico que emula el funcionamiento de un gobernador [figura 17](#), incluyendo la turbina, el servomotor y la compuerta. A continuación, [figura 15](#) y [figura 16](#), se ilustra un desglose detallado de los componentes pertenecientes a un sistema de gobernador.

Figura 15.

Modelado del Gobernador Mediante Matlab-Simulink.



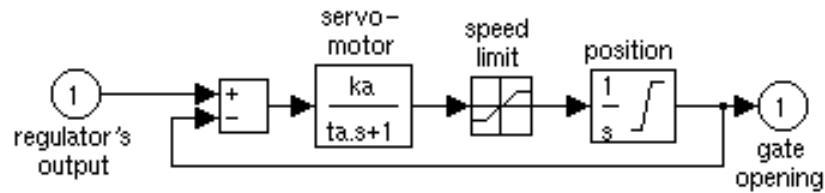
Nota. La constante R_p hace referencia al estatismo del generador síncrono. Tomado del software Matlab.

El servomotor de la compuerta está modelado por un sistema de segundo orden.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Figura 16.

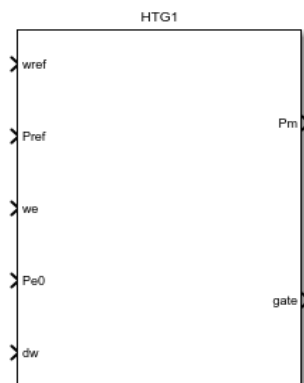
Modelado del Servomotor del Gobernador Mediante Matlab-Simulink.



Nota. La constante K_a hace referencia a la ganancia en el servomotor. Se observan dos limitadores asociados a la velocidad de la turbina y la posición de la compuerta. Tomado del software Matlab.

Figura 17.

Modelo del Gobernador en Software Matlab-Simulink.



Nota. El bloque modela el sistema de gobernador completo: servomotor, compuerta y turbina. Tomado del software Matlab.

La siguiente tabla enuncia las variables de entrada y salida en el gobernador.

Tabla 4.

Variables de Entrada y Salida del Gobernador.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Variables del sistema de Gobernador de Matlab-Simulink			
Entradas		Salidas	
Wref	Velocidad de referencia	pm	Potencia mecánica
Pref	Potencia de referencia	gate	Compuerta
We	Velocidad del rotor		
Pe0	Potencia de entrada		
dw	Desviación de velocidad		

Nota. Las variables descritas pueden estar en unidades SI o PU.

4.4. Control de Estabilidad Mediante el Sistema AVR

El AVR actúa directamente en la excitatriz, brindando control en la tensión y potencia reactiva, mediante la modificación en la alimentación de tensión DC (continua) en el devanado de campo. Su respuesta es rápida, y junto al gobernador forma parte del control primario.

La constante de ganancia K_a en el AVR [figura 18](#) está relacionada con la velocidad en los actuadores del regulador de tensión. Se ha demostrado en la práctica que valores elevados en la ganancia K_a pueden generar problemas de estabilidad permanente, afectando directamente en el par amortiguante. Por esta razón es muy habitual que el sistema AVR esté acompañado de un sistema estabilizador PSS (véase [figura 18](#)), el cual brinda una ayuda en el par amortiguante, reduciendo los modos de inestabilidad.

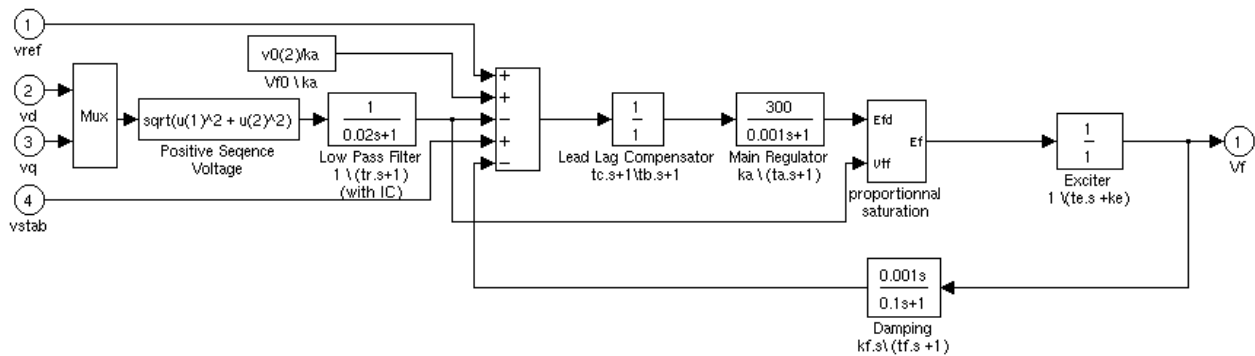
4.5. Modelado Mediante Diagrama de Bloques para un Controlador AVR en Matlab-Simulink.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

El bloque del sistema de excitación de Simulink [figura 18](#) implementa un excitatriz de CC junto a su función de saturación. Los elementos básicos que conforman el bloque del Sistema de Excitación son el regulador de voltaje y la excitatriz.

Figura 18.

Diagrama de Bloques Para un Sistema AVR en Entorno Matlab-Simulink.



Nota. El bloque Damping corresponde al sistema estabilizador PSS. Tomado del software Matlab.

La excitatriz del generador síncrono está representada por la siguiente función de transferencia, la cual relaciona el voltaje en corriente continua de salida en la excitatriz " V_{fd} " y la del regulador E_f :

Ecuación 14.

Función de Transferencia para la Excitatriz de un Generador Síncrono.

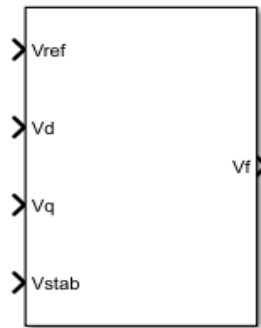
$$\frac{V_f}{E_f} = \frac{1}{sT_e + K_e}$$

Nota. La constante K_e hace referencia a la ganancia de la excitatriz y T_e a la constante de tiempo.

Figura 19.

Bloque del AVR en Software Matlab-Simulink.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. El bloque modela el sistema de AVR con estabilizador PSS. Tomado del software Matlab.

La siguiente tabla enuncia las variables de entrada y salida para el AVR.

Tabla 5.

Variables de Entrada y Salida para el AVR.

Variables del sistema AVR en Matlab-Simulink			
Entradas		Salidas	
Vref	Tensión de referencia	Vf	Tensión de campo
Vd	Tensión en eje directo		
Vq	Tensión en cuadratura		
Vstab	Tensión estabilizadora		

Nota. Las variables descritas pueden estar en unidades *SI* o *PU*.

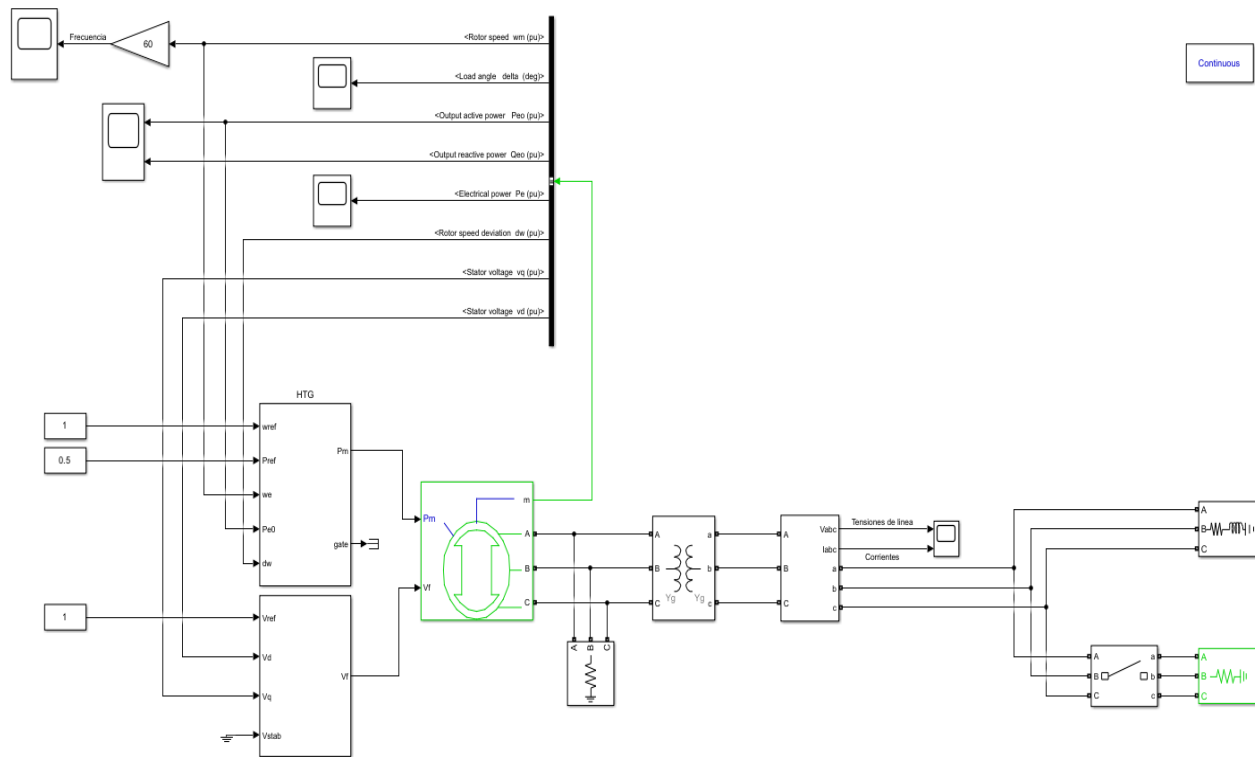
4.6. Control de Estabilidad por Medio de métodos Convencionales en el Software Matlab-Simulink

Manteniendo la coherencia con el caso de estudio desarrollado a lo largo de este libro, a continuación [figura 20](#), se analiza el mismo sistema de potencia, simulando mediante el software de Matlab-Simulink, incorporando sistemas de control convencionales compuestos por un gobernador y un AVR junto a su estabilizador PSS.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Figura 20.

Modelado Dinámico de un Sistema de Potencia Barra única y sus Controladores.



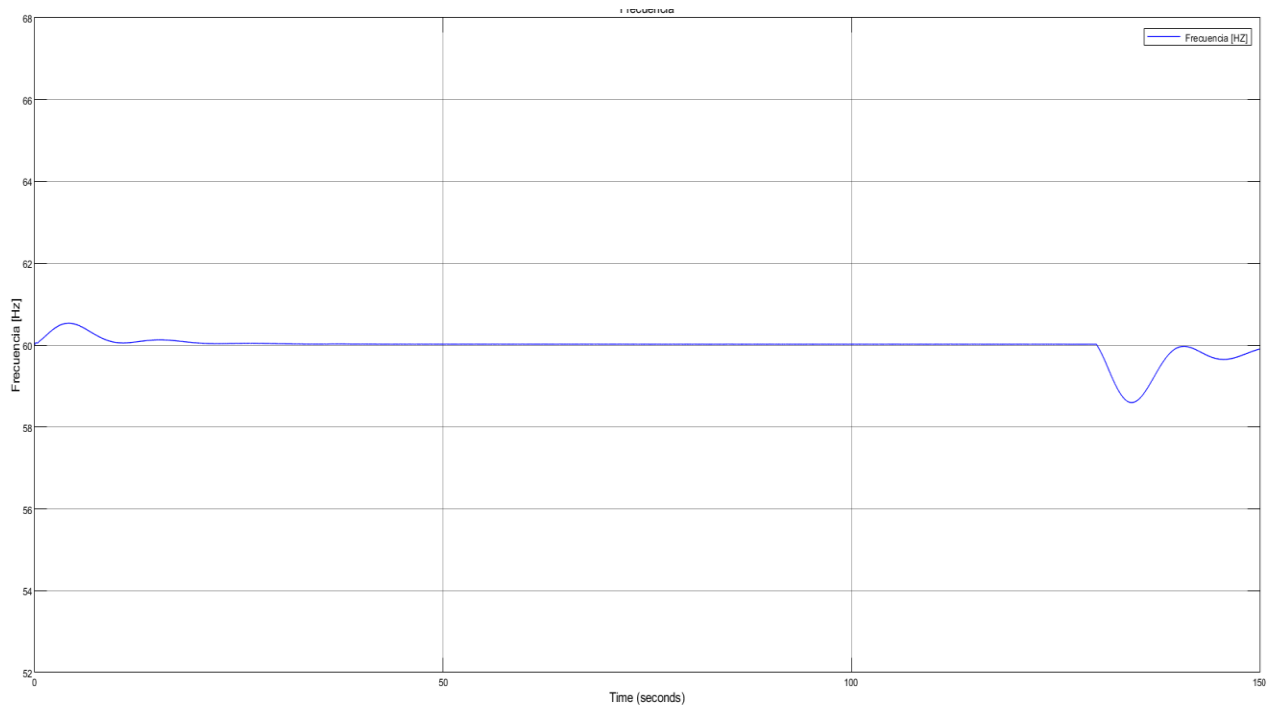
Nota. El breaker trifásico se sierra a los 130 segundos, para dar entrada una carga de gran perturbación.

A continuación, se observa la gráfica de frecuencia eléctrica correspondiente al sistema de potencia de la [figura 20](#).

Figura 21.

Frecuencia Eléctrica para el Sistema en Estudio Considerando Sistema de Control Convencional.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. Se observa cómo el sistema de potencia recupera el sincronismo después de sufrir la gran perturbación en la carga, manteniéndose dentro los parámetros normativos (Apéndice C).

5. Convertidor de Potencia DC/AC (Inversor de Potencia)

Es un dispositivo que convierte corriente continua (CC) en corriente alterna (CA). Un inversor de potencia es aquel que realiza esta conversión, pero con una capacidad significativamente mayor para manejar cargas eléctricas más grandes y demandas de energía más elevadas.

El principio de funcionamiento se basa en el control de conmutación de las llaves electrónicas, mediante diversas técnicas de control, con la finalidad de obtener una señal periódica de salida. Para efectos de este trabajo, se utilizará un modelo el cual emplea IGBT's y control PWM (Apéndice D).

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

5.1.Filtro Pasivo Pasa Bajos LCL

Un filtro LCL es un dispositivo capaz de limitar las señales eléctricas de salida a un valor de frecuencia de corte. El filtro LCL tiene la ventaja de no absorber mucha potencia activa, dada la poca resistencia eléctrica que emplea en su configuración, con excepción de la resistencia de amortiguamiento, cuyo valor es muy pequeño (M, 2005).

5.2.Diseño de un inversor y su sistema de filtrado LCL en entorno Simulink de Matlab

A continuación, tabla 6, se enuncia los valores nominales y características del convertidor DC/AC empleado. En la figura 22 se observa su respectiva simulación en Matlab-Simulink.

Tabla 6.

Datos para Convertidor DC/AC Empleado.

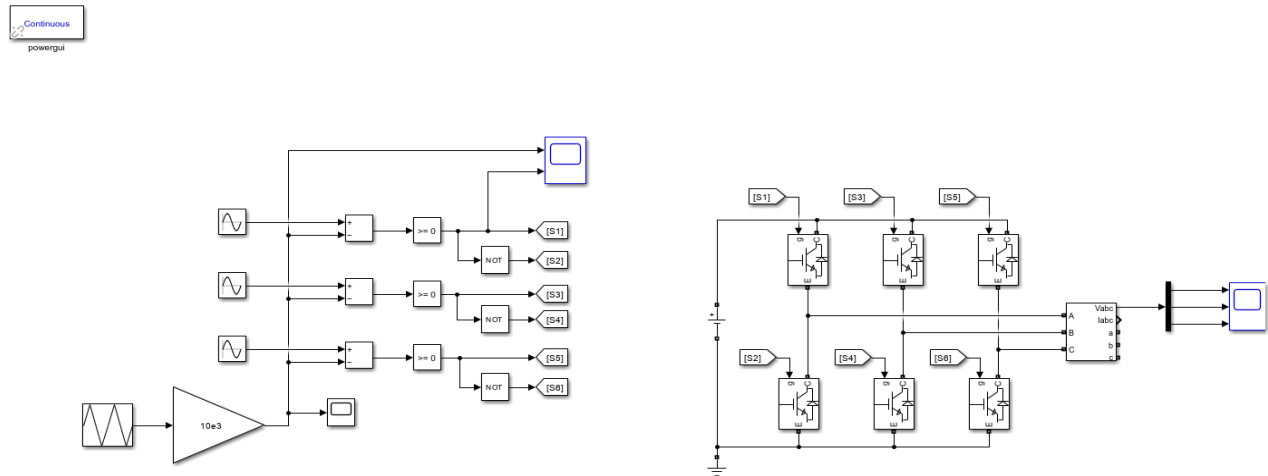
COMBERTIDOR DC/AC					
INVERSOR			FILTRO LCL		
DESCRIPCION	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCION	VALOR	UNIDAD
Capacidad	30	MVA	Frecuencia resonante	7178,6	Rad/s
Tensión de terminales	11	kV	Corriente de rizado máxima	0,3149	kA
tensión DC	20	kV			
Llaves electrónicas	IGBT	Unid	Capacitor	33	μ F
Controlador	PWM	NA	Inductor	1,17608	mH
Frecuencia de conmutación	9	kHz	Resistencia amortiguadora	1,4071	Ω
Fases	3	NA			

Nota. Los valores de frecuencia de resonancia y corriente de rizado son propios para el filtro.

Figura 22.

Inversor Controlado por PWM en Simulink-Matlab.

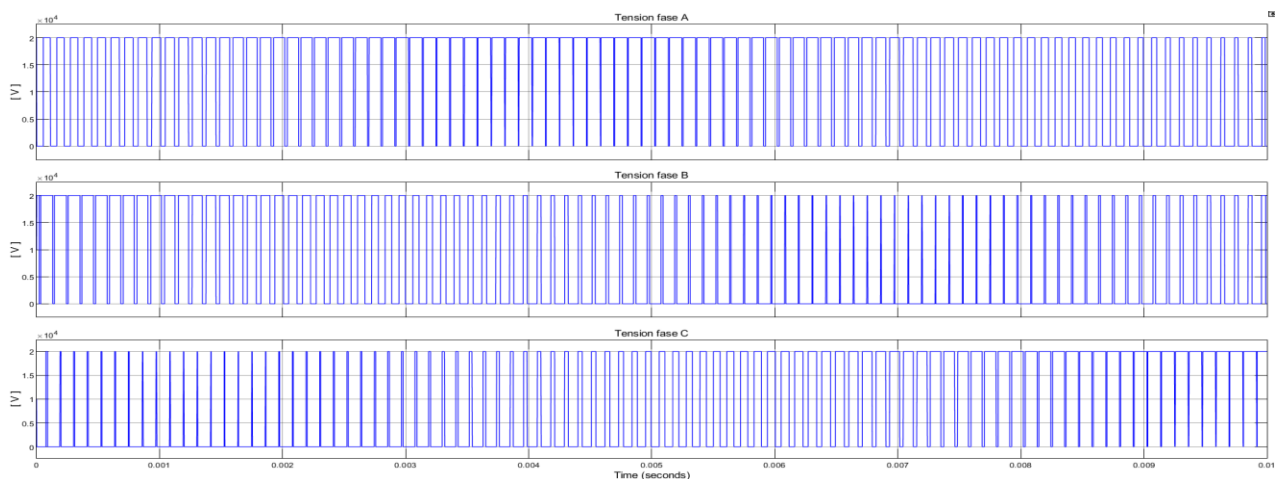
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. En la imagen se ilustra un inversor trifásico controlado mediante PWM, diseñado con IGBT'S, con una frecuencia de conmutación de 9 KHz (Apéndice D).

Figura 23.

Señales de Tensión a la Salida del Inversor.



Nota. En la imagen se ilustra las señales de tensión a la salida del inversor, si un sistema de filtrado.

El inversor descrito anteriormente [figura 22](#) por sí mismo no es capaz de suministrar una señal eléctrica de tipo senoidal. Para ello, es necesario conectar en sus terminales un sistema de filtrado que permita obtener a la salida una señal senoidal a 60 Hz, la cual es de interés para el desarrollo de este trabajo.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

A continuación, se muestra el proceso para calcular el filtro LCL y su resistencia de amortiguamiento.

Cálculo del Condensador

Ecuación 15.

Condensador para un Filtro LCL.

$$C = \frac{S_{inv}}{3\omega_0 V_f^2} = \frac{30M}{3(2\pi 60) \left(\frac{11K}{\sqrt{3}}\right)^2} = 33 \mu F$$

Nota. S_{inv} , ω_0 y V_f corresponden a la potencia nominal del inversor, la frecuencia angular de la red y tensión de fase en terminales del convertidor respectivamente.

Cálculo de La Inductancia L_1 y L_2

Ecuación 16.

Inductancias para un Filtro LCL.

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{6f_{sw}\Delta I_{max}} = \frac{20K}{6(9K)\left(\frac{2\sqrt{3}}{11}\right)} = 1,17608 \text{ mH}$$

$$L_1 \approx L_2$$

Nota. V_{DC} , f_{sw} y ΔI_{max} corresponden a la tensión DC del inversor, la frecuencia de conmutación y la corriente de rizado, respectivamente.

Cálculo de la Resistencia de Amortiguamiento R_d

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Ecuación 17.

Resistencia de Amortiguamiento de un Filtro LCL.

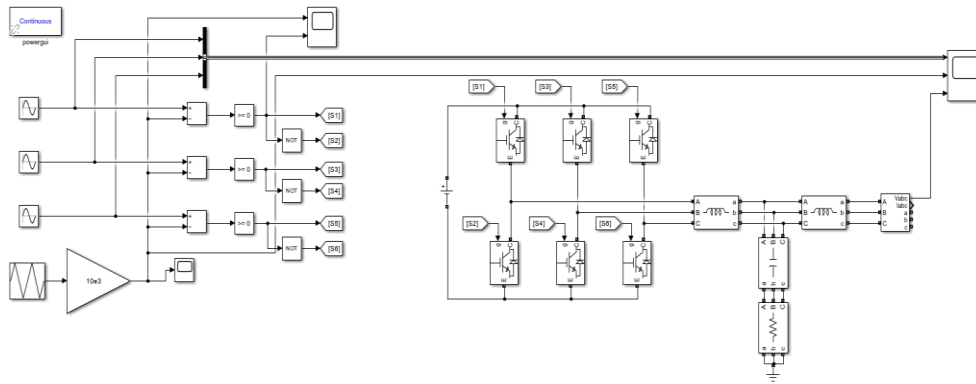
$$R_d = \frac{1}{3C\omega_{res}} = \frac{1}{3(33\mu)(7178.6)} = 1.4071 \Omega$$

Nota. ω_{res} corresponde a la frecuencia de resonancia.

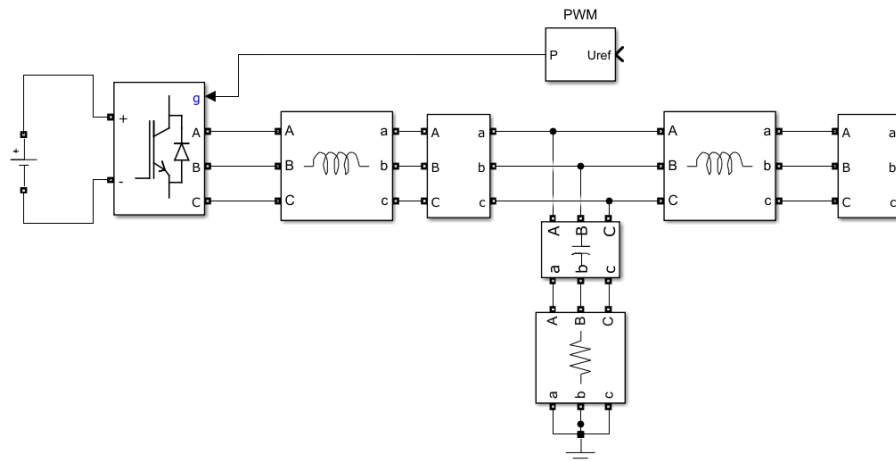
En la [figura 24](#), se ilustra el diseño del inversor con su sistema de filtrado LCL en Matlab-Simulink.

Figura 24.

Inversor Trifásico con su Sistema de Filtrado LCL.

**Figura 25.**

Inversor y Sistema de Filtrado LCL Simplificado.



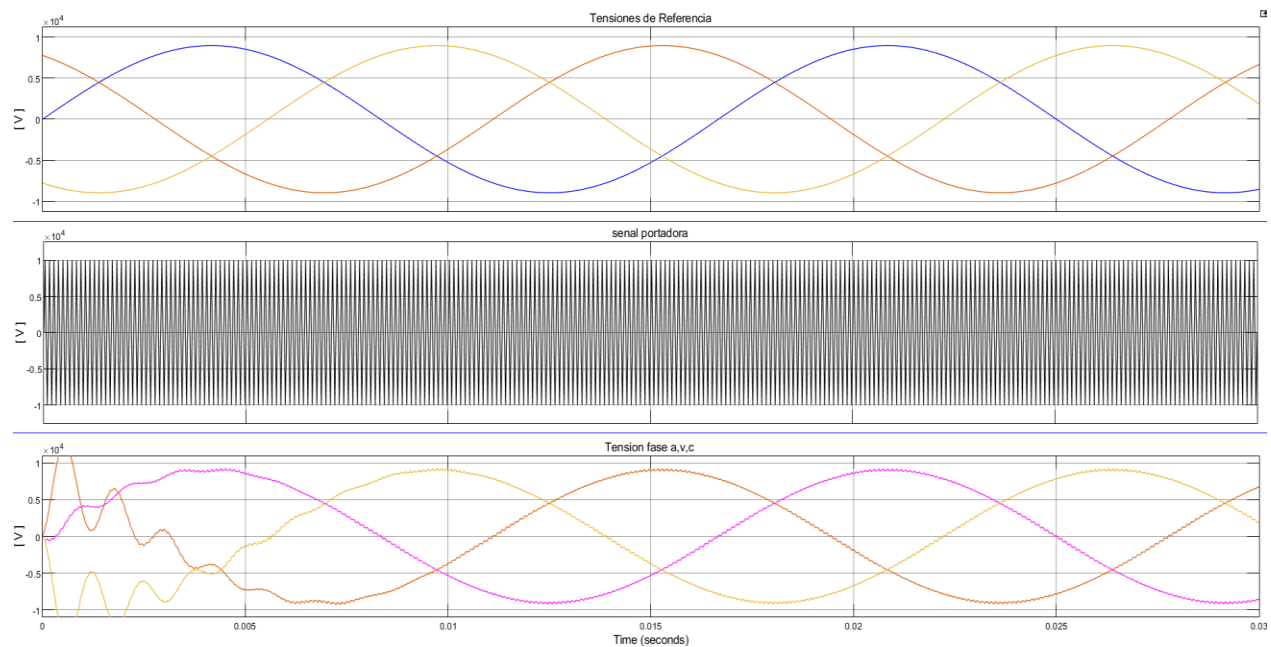
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Nota. El inversor se encuentra en vacío “sin carga”. En las simulaciones respectivas se evidencio que el mismo filtro, ante una tensión de 860 VDC , entrega a la salida una tensión de 440 Vrms , permitiendo elegir la conexión en alta o baja tensión.

A continuación figura 26, se observan las señales para el filtro descrito anteriormente.

Figura 26.

Señales para el Inversor de Potencia.



Nota. Las señales inferiores corresponden con las señales de tensión de salida del inversor.

6. Generación Síncrona Virtual (VSG)

El sistema de generación síncrona virtual (VSG) se encarga de realizar la conversión de DC a AC, brindando un control en el suministro de la potencia eléctrica adquirida por su fuente de alimentación carente de inercia, de acuerdo con la necesidad de la red eléctrica. El VSG está

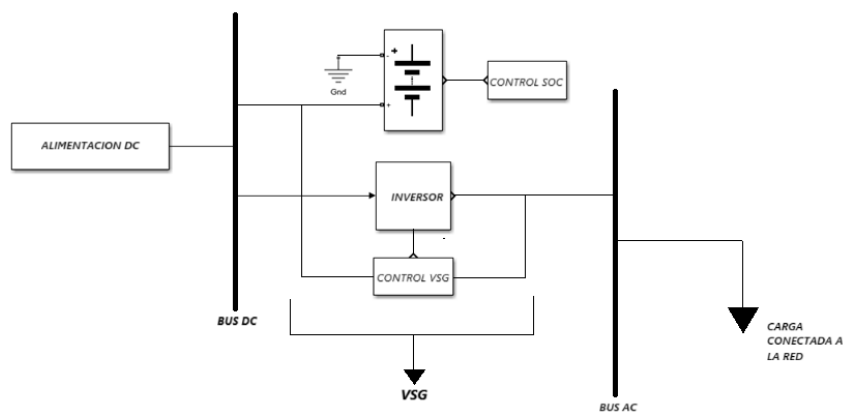
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

compuesto por un inversor trifásico, un sistema de filtrado LCL y un sistema de almacenamiento DC, el cual emula el funcionamiento de una máquina síncrona convencional, suministrando inercia virtual al sistema eléctrico.

El VSG está diseñado para almacenar energía hasta un 50 % de la capacidad total de almacenamiento, teniendo la ventaja de consumir o entregar potencia de acuerdo con los requerimientos de la red, con la finalidad de proveer regulación de frecuencia, imitando a un generador síncrono convencional. A continuación [figura 27](#) y [figura 28](#) se observa el diagrama de un VSG conectado a la red.

Figura 27.

Diagrama de un Sistema de Generación Síncrona Virtual VSG Conectado a la Red.

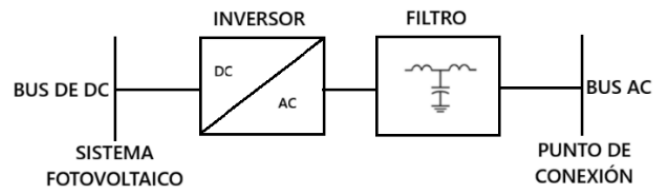


Nota. La alimentación DC está compuesta por un sistema de control de tensión basado en un convertidor DC/DC y un controlador de máximo punto de potencia (MPP). Para este trabajo se asumirá una fuente DC constante. El SOC hace referencia al valor de estado de carga de la unidad de almacenamiento DC del del sistema (para fines de este trabajo se asume un SOC de 1).

Figura 28.

Estructura de un Sistema de Generación Síncrona Virtual VSG.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. El sistema fotovoltaico hace referencia a la generación de energía.

6.1. Estatismo en el VSG

El sistema de control aplicado en el bus de DC cuenta con la capacidad de controlar el estatismo en el VSG, con la finalidad de limitar el consumo o inyección de potencia al sistema eléctrico, restringiendo la fuente de almacenamiento DC impidiendo su descarga o sobrecarga. Para el sistema de control solo basta que SOC se encuentre entre los intervalos $[0.05, 0.95]$ PU. En caso contrario el control se desactivará.

Nota: Para efectos de este trabajo no se considerará el estatismo ya que se utiliza un bus de DC ideal.

6.2. Modelo Matemático de un VSG

El modelo de un generador síncrono virtual (VSG) debe presentar un comportamiento similar al de un generador síncrono convencional. A continuación, [figura 29](#), se ilustra el circuito equivalente monofásico para un VSG (A, 2022).

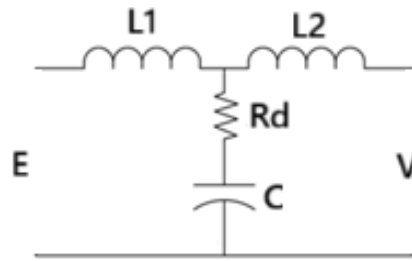
Este modelo reproduce, de manera aproximada, el comportamiento del generador síncrono virtual en su componente armónica fundamental, sin presentar inconvenientes, ya que su etapa de filtrado LCL atenúa de forma considerable las componentes armónicas no fundamentales. Dicho

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

filtro es equivalente a la reactancia síncrona convencional y se denomina **reactancia síncrona virtual** X_{VSG} .

Figura 29.

Modelo Monofásico de un Generador síncrono Virtual VSG.



Nota. E y V hacen referencia a la tensión generada y la tensión en terminales del VSG, respectivamente.

Mediante técnicas de solución de circuitos es posible encontrar el valor de la impedancia síncrona virtual X_{VSG} . A continuación, se describe la ecuación para su cálculo (Medina, 2019):

Ecuación 18.

Impedancia Síncrona Virtual.

$$X_{VSG} = \frac{(X_{LC} + X_L)X_L}{X_{LC}}$$

Nota. Despreciando el valor de la resistencia de amortiguamiento, se puede obtener un valor aproximado de impedancia síncrona virtual.

Remplazando en la ecuación anterior, se obtiene el valor de reactancia síncrona Virtual.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

$$X_{VSG} = \frac{(0.1105 + 0.1099)0.1099}{0.1105} = 0.2192 \text{ PU}$$

6.3.Potencia Activa y Reactiva en un VSG

El intercambio de potencia activa y reactiva en un VSG es similar al de un generador síncrono convencional, correspondiendo así a su emulación. A continuación, ecuación 19 enuncia el cálculo para la potencia activa de un VSG.

Ecuación 19.

Potencia Activa Entregada por un VSG.

$$P = \frac{E_A V_t}{X_{VSG}} \text{sen}(\delta)$$

Nota: δ hace referencia al ángulo del fasor de tensión generada E_A , el cual coincide con el Angulo del par del VSG.

6.4.Emulación de Rotor en un VSG

En el capítulo 1 se expuso el funcionamiento de la máquina síncrona convencional y su ecuación de oscilación. En el modelo del rotor virtual para un VSG, la inercia virtual depende de la potencia nominal del inversor y de la unidad de almacenamiento DC del VSG (Ornelas, 2021).

La velocidad del rotor virtual es equivalente a la velocidad de conmutación de las llaves electrónicas (IGBT's) del inversor. A continuación, se describe la ecuación de oscilación para un VSG:

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Ecuación 20.

Ecuación de Oscilación para un VSG.

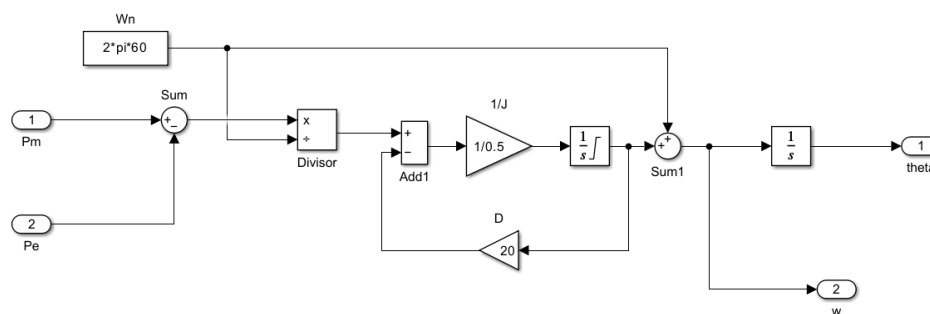
$$\frac{2H_V}{\omega_0} \frac{d^2\delta_V}{dt^2} = \tau_{m_V} - \tau_e - D\omega_V$$

En el capítulo 1, también se explicó cómo la estabilidad de los sistemas de potencia se ve afectada por la inercia de las máquinas rotativas. Todo sistema de potencia tiene asociada una constante de inercia, la cual es fundamental para mantener la estabilidad del sistema ante perturbaciones.

Con base a la ecuación 20 se realiza el modelo representativo de bloques para un rotor virtual (figura 30) de un VSG, al cual, a través de simulaciones, se le asignó un momento de inercia de 0.5 y un coeficiente de amortiguamiento D de 20.

Figura 30.

Modelo de Bloques para el Rotor Virtual de un VSG.



Nota. Se obtiene el ángulo θ a la salida del sistema. (Zhong, 2021).

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Los sistemas de generación renovable carecen de inercia, lo que no solo limita su capacidad de respuesta dinámica, sino que además reduce la inercia total del sistema al que se conectan, afectando negativamente su estabilidad.

La principal ventaja de los Generadores Sincrónicos Virtuales (VSG) es su capacidad para aportar inercia virtual, emulando el comportamiento dinámico de las máquinas síncronas convencionales. A continuación, se presenta la expresión correspondiente a la inercia total de un sistema con VSG conectados.

Ecuación 21.

Inercia Total de un Sistema con Maquinas Rotativas y VSG's.

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i + \sum_{i=1}^n H_{VSG_i} S_{VSG_i}}{S_{sys}}$$

Con base a la ecuación 9, se calcula la constante de inercia asociada al VSG y al sistema de potencia:

$$H = \frac{(0.5)(37.7)^2}{2(30M)} = 1.18$$

$$H_{sys} = \frac{1.5(100M) + 1.18(30M)}{100M + 30M} = 1.43$$

6.5. Generador Síncrono Virtual de doble Lazo (Three Phase VSG Double Loop Control)

Con el incremento en penetración de energías renovables carentes de inercia, se han propuesto distintos controladores para formadores de red VSG.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Para el desarrollo del modelo de máquina síncrona virtual (VSG), se utilizó como base el archivo “*Virtual Synchronous Machine Control Modeling*” disponible en MATLAB Central File Exchange (Zhong, 2021). Dicho modelo fue modificado y adaptado según los objetivos de este trabajo. Este tipo de formador de red es de doble lazo o doble realimentación.

6.6. Estructura del VSG Empleado

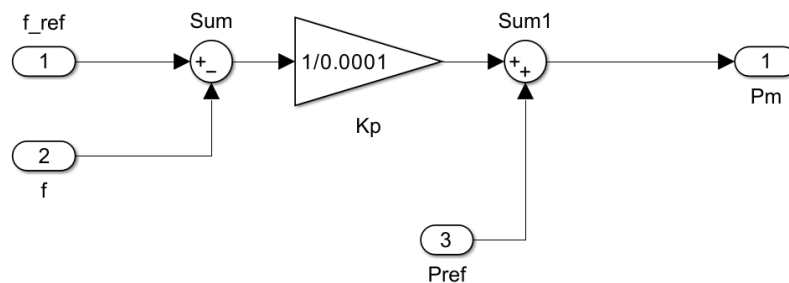
Regulador de Frecuencia

La desviación de frecuencia eléctrica respecto a su referencia se controla mediante un controlador proporcional k_p , el cual permite obtener el cambio de frecuencia, para comparar con la potencia de referencia del VSG, y así obtener una regulación de potencia mecánica virtual entregada por la fuente de generación.

En la [figura 31](#) se observa la topología del regulador de frecuencia empleado para el VSG.

Figura 31.

Regulador de Frecuencia.



Nota. La constante k_p puede ser calculada por el método de Ziegler-Nichols. (Zhong, 2021).

Regulador de Tensión

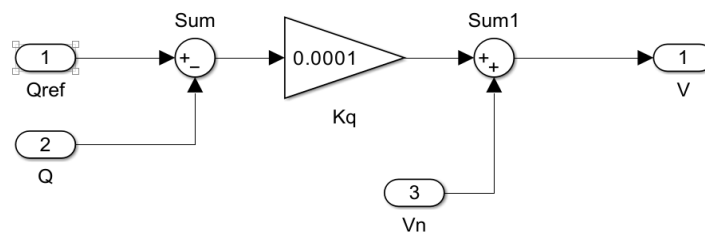
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

El control de tensión en un VSG, al igual que la maquina síncrona está ligado directamente a la potencia reactiva, mediante un controlador proporcional k_p denominado k_q , el cual permite regular el intercambio de potencia reactiva para corregir la desviación de tensión de la red ante posibles eventos de estabilidad por tensión.

En la [figura 32](#) se observa la topología del regulador de tensión empleado.

Figura 32.

Regulador de Tensión para un VSG.



Nota. La constante k_q se puede calcular por el método de Ziegler-Nichols. (Zhong, 2021).

Con base a los diagramas de bloques descritos en las Figuras [30](#), [31](#) y [32](#), se obtienen las entradas de tensión moduladoras, las cuales son transformadas a coordenadas $dq0$ mediante la transformada de Park, explicada en el Capítulo 1. Al considerar un sistema balanceado, se obtienen únicamente las señales en coordenadas dq .

Estas señales moduladoras en dq ingresan al formador de señales de referencia, que corresponde a un sistema de control de doble lazo. Dicho sistema genera las señales de referencia para el control PWM (Anexo número 4), que envía las señales de conmutación a las llaves IGBT

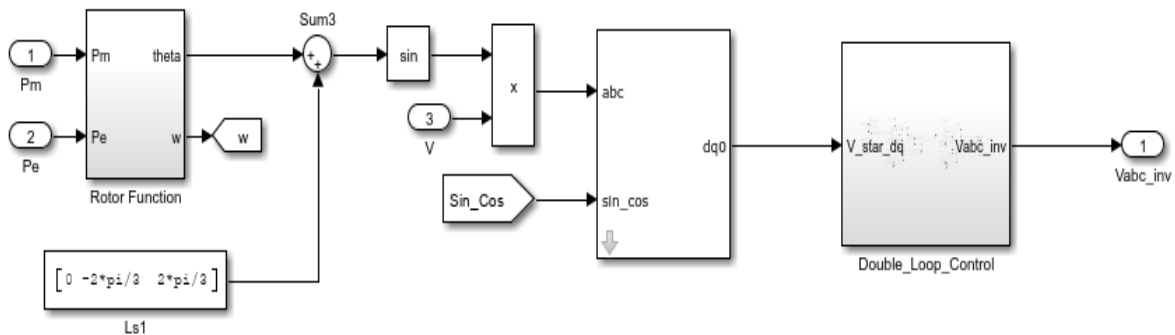
ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

del inversor. Antes de ingresar al controlador PWM, las señales son transformadas nuevamente a coordenadas *abc* por medio de la anti transformada de Park.

El controlador de doble lazo [figura 33](#) compara las señales de tensión y corriente en coordenadas *dq* con respecto a la impedancia síncrona virtual estudiada al inicio de este capítulo, y calcula las señales instantáneas en las terminales del filtro LCL descrito anteriormente. A través de control proporcional e integral PI, se ajustan las señales de tensión de referencia de acuerdo con la dinámica del sistema de potencia.

Figura 33.

Controlador VSG.



Nota. La señal de salida del sistema ingresa al controlador PWM. (Zhong, 2021).

A continuación, [tabla 7](#) se enuncian los parámetros correspondientes al VSG empleado.

Tabla 7.

Parámetros Para el VSG.

parámetros sistema de generación virtual			
S_n	30 MVA	J	0.5
V_n	440 V	H	1.18
X_{VSG}	0.2192 P.U	Interruptores	IGBT
f_0	60 Hz	Control	PWM
w_{SV}	377 RAD/s	f_s	9kHz

Nota. El VSG se estableció con un funcionamiento de 440V ya que es un valor de tensión más común en inversores.

7. Control de Estabilidad Mediante Generación Síncrona Convencional y Virtual

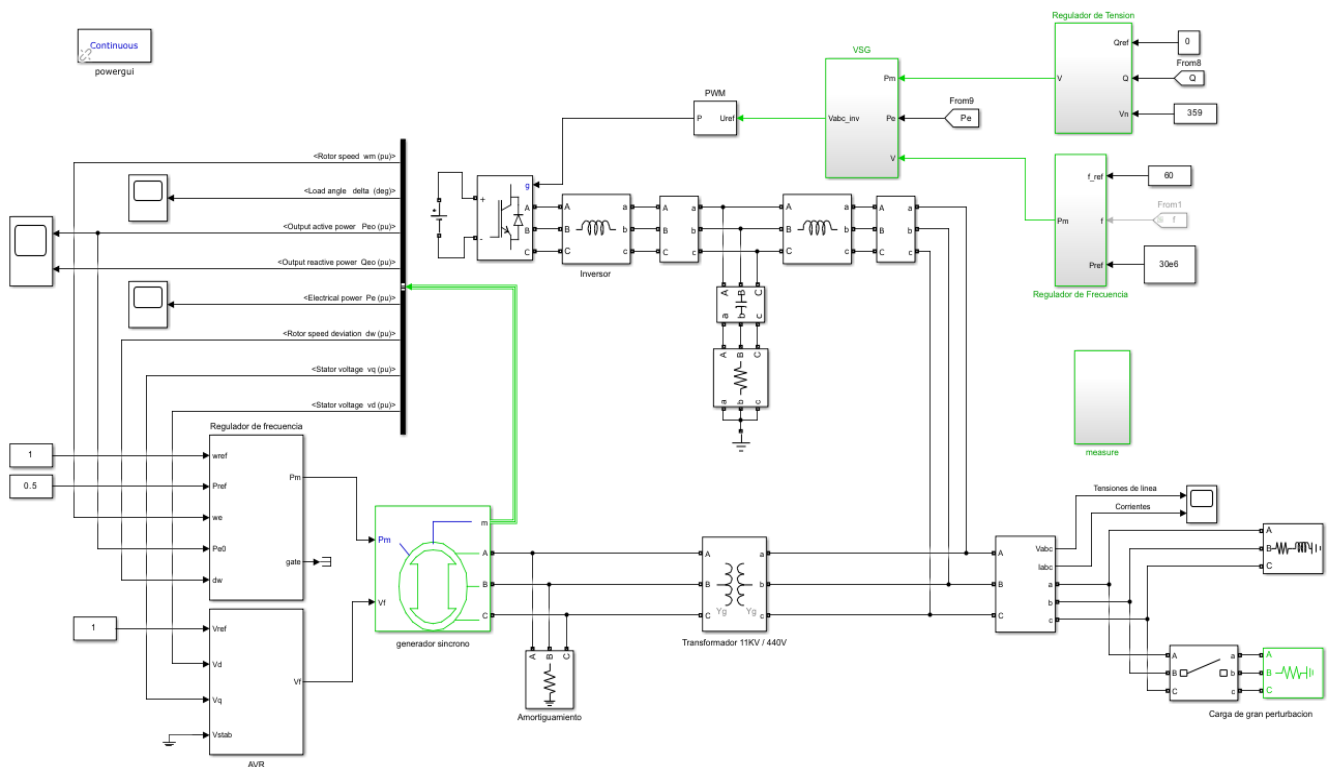
Manteniendo la coherencia con el caso de estudio desarrollado a lo largo de este libro, a continuación [figura 34](#), se analiza el mismo sistema de potencia simulando en los capítulos anteriores mediante el software de Matlab-Simulink, con la incorporación de sistemas de control convencionales compuestos por un gobernador y un AVR, junto a su estabilizador PSS. Adicionalmente, se agrega el sistema de generación síncrona virtual, tratado en el capítulo anterior, el cual se divide en dos partes: parte de potencia y parte de control.

Por motivos de tiempo de simulación, el evento de carga de gran perturbación se modificó para 29 segundos de simulación en el software de Matlab-Simulink.

Figura 34.

Sistema de potencia Barra Única Alimentado Mediante Generación Síncrona Convencional y Virtual en Matlab-Simulink.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. La carga de gran perturbación corresponde a 60MVA. Para el desarrollo del modelo de máquina síncrona virtual (VSG), se utilizó como base el archivo “Virtual Synchronous Machine Control Modeling” disponible en MATLAB Central File Exchange. Dicho modelo fue modificado y adaptado según los objetivos de este trabajo (Zhong, 2021).

7.1.Resultados

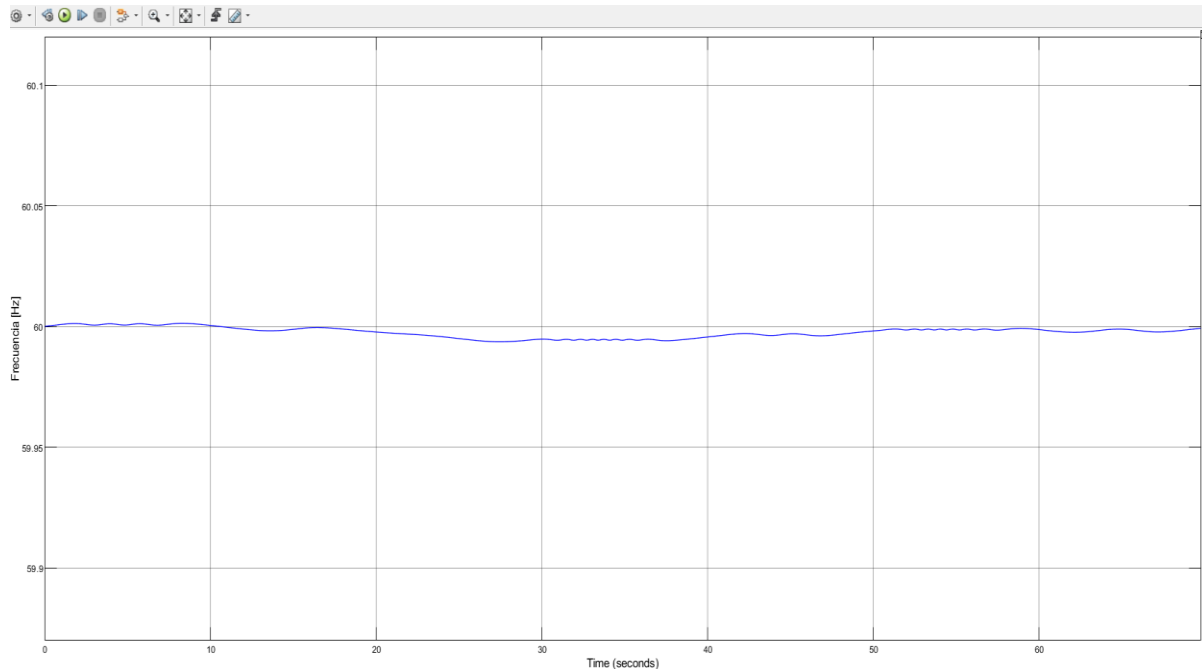
El sistema en conjunto mejora la estabilidad del sistema de potencia y es capaz de mantenerlo dentro de los parámetros normativos de frecuencia ante la entrada de la carga de gran perturbación. Esto se debe a que el sistema de generación virtual, no reduce la inercia del sistema de potencia, como se sustentó previamente.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

A continuación, [figura 35](#), se observa la frecuencia eléctrica del sistema de potencia mostrado en la [figura 34](#).

Figura 35.

Frecuencia eléctrica del Sistema de Potencia.



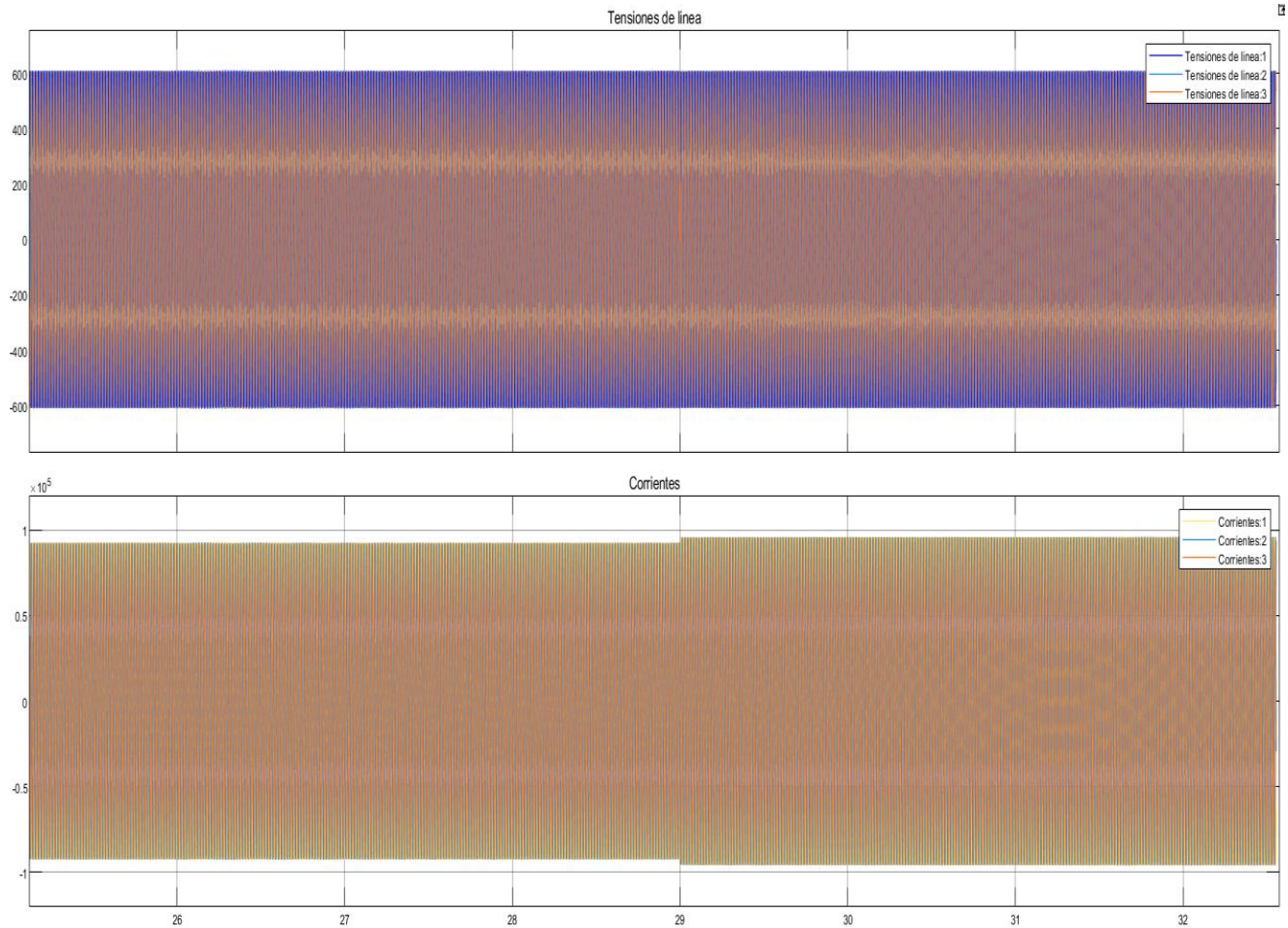
Nota. El hundimiento de la gráfica se debe a que, en ese instante, es cuando se conecta la carga de gran perturbación al sistema.

La [figura 36](#) evidencia un aumento de aproximadamente 15 KA en las corrientes del sistema de potencia al momento de ingresar la carga de gran perturbación. Aunque los valores de tensiones de línea siguen constantes 440V, esto se debe a que sistema de generación síncrona convencional y virtual es capaz de conservar la estabilidad del sistema ante la entrada de la carga de gran perturbación, mediante el control en el suministro de potencia activa y reactiva.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Figura 36.

Tensiones de Línea y Corrientes del Sistema de Potencia.



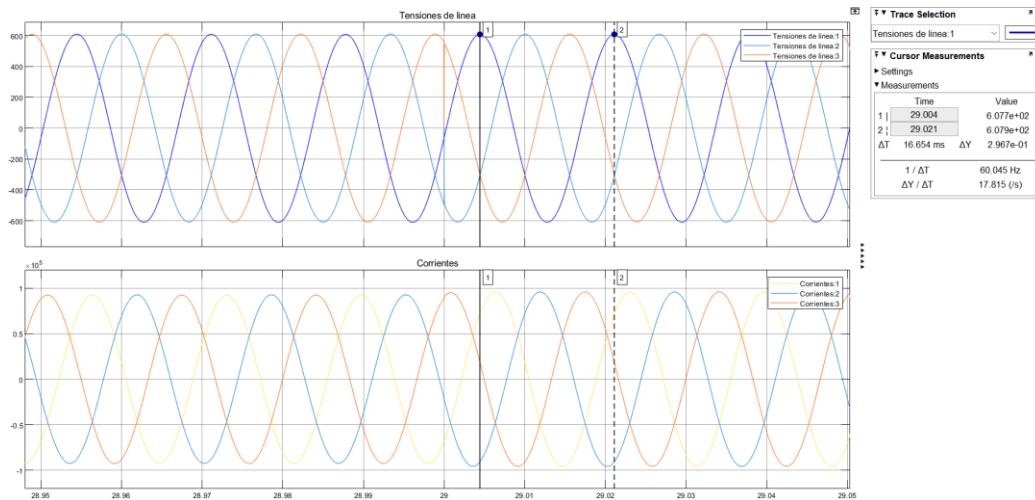
Nota. A los 29s se observa un aumento en la corriente debido a la carga de gran perturbación.

A continuación, [figura 37](#), se observa la estabilidad de las señales de tensión y corriente del sistema de potencia estudiado.

Figura 37.

Señales de Tensión y Corriente del Sistema con GS y VSG.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN



Nota. Se observa la estabilidad del sistema, con frecuencia de 60 Hz.

A continuación, la siguiente tabla presenta los resultados obtenidos en los tres escenarios: generación síncrona convencional sin control, generación síncrona con control y generación síncrona convencional y virtual.

Tabla 8.

Resultados Obtenidos

Descripción	Generación síncrona convencional (GS)		Generación síncrona virtual (VSG)
	sin control	con control	
Valor de la constante de inercia H	1.5	1.5	1.18
Valor mínimo de frecuencia	52 Hz	58.6	59.8 Hz
variación de resultados entre generación síncrona convencional y generación síncrona convencional y virtual			1.2 Hz
menor tiempo de respuesta en el transitorio de inestabilidad		generación síncrona convencional y virtual	
mayor tiempo de respuesta en el transitorio de inestabilidad		generación síncrona sin controladores	

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Nota. Se observa que la generación síncrona convencional y virtual, proporciona la mejor respuesta ante el transitorio de estabilidad ocasionado por la carga de gran perturbación de 60 MW.

Conclusiones

Si bien la generación a partir de fuentes renovables representa una alternativa viable frente a la problemática energética actual, su integración debe realizarse considerando las variables técnicas involucradas, evaluando y garantizando el cumplimiento de los parámetros operativos adecuados. En particular, este documento abordó el **parámetro de estabilidad** del sistema eléctrico de potencia.

Esto se debe a que las fuentes renovables, al ser de naturaleza estática, carecen de la capacidad de aportar inercia al sistema eléctrico. Por tal motivo, su incorporación desmedida puede generar problemas de **estabilidad por frecuencia**, a diferencia de los sistemas de **generación síncrona convencional**, los cuales sí proporcionan inercia al sistema.

El presente trabajo expuso una alternativa a la generación síncrona convencional y virtual para brindar inercia a los sistemas de potencia a partir de fuentes estáticas, como las energías renovables, mediante la implementación de un **generador síncrono virtual (VSG)**. Los resultados obtenidos evidenciaron que la combinación de generación síncrona convencional y virtual permitió limitar la caída de frecuencia hasta un valor de **59,8 Hz**, siendo este el escenario más favorable. En comparación, la generación síncrona convencional presentó un mínimo de **58,6 Hz** durante el transitorio de estabilidad, observándose una mejora de **1,2 Hz** con el empleo del VSG.

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Finalmente, se proyecta continuar con una segunda etapa a futuro en el desarrollo de este trabajo, incorporando una **unidad de sincronización** y mejorando el proceso de **filtrado en los terminales del inversor**, con el objetivo de mejorar la respuesta dinámica y la estabilidad global del sistema.

Referencias Bibliográficas

- A, R. (18 de enero de 2022). *cenace*. Obtenido de Emulación de Generadores Síncronos con Inversores para Inyectar Inercia Virtual en Sistemas de Energía de 60 Hz Considerando la Auto sincronización: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/497/633>
- Baez, R. (2003). *Estudio de la dinamica de la maquina sincrona en los sistemas electricos de potencia*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000321399>
- Caro, O. (2019). *Estabilidad Transitoria en Redes Eléctricas modernas Con enlaces VSC-HVDC*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2019/enero/0784238/0784238.pdf>
- M, L. (31 de octubre de 2005). *Diseño y control de un rectificador activo trifásico basado en filtro LCL*. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1510826/figures#figures>
- Manfred, A. (2016). *Modelo de una maquina sincrona*. Obtenido de <https://www.modelo-de-maquina-sncrona-2016>
- Medina, L. (octubre de 2019). *Diseño del algoritmo de control para un generador síncrono virtual parasistemas de generación distribuida fotovoltaicos*. Obtenido de Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica: <https://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/28993>
- Ornelas, F. (Septiembre de 2021). *Optimal Control of an Inverter-based VirtualSynchronous Generator with Inertial Response*. Obtenido de IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS SEPTEMBER 2021 : <https://es.readkong.com/page/optimal-control-of-an-inverter-based-virtual-synchronous-5269493>

ESTABILIDAD DE GRAN PERTURBACIÓN

Tapia, A. (2022). *Evaluación de la Estabilidad de Corto Plazo y Discriminación de Inestabilidades Transitoria y de Tensión*. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=estabilidad%20de%20gran%20perturbacion>

Zavala, M. (26 de enero de 2022). *Control óptimo de un generador síncrono virtual basado en inversor con respuesta inercial*. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9693562>

Zhong, C. (10 de febrero de 2021). *Virtual Synchronous Machine control modeling*. Obtenido de Mathworks: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/87177-virtual-synchronous-machine-control-modeling>

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio institucional

Apéndice A. Estabilidad Permanente.

Apéndice B. Métodos de Análisis de Estabilidad en Frecuencia.

Apéndice C. Frecuencia Eléctrica en Colombia.

Apéndice D. Control PWM para un Inversor.

Apéndice E. Regulación de Tensión del Bus de DC.

Apéndice F. licencia Virtual Synchronous Machine Control Modeling.