

**ELIMINACIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA EN GENERADORES  
DFIG MEDIANTE UN COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO EN SERIE**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ELIMINACIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA EN GENERADORES  
DFIG MEDIANTE UN COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO EN SERIE**

**AUTOR:  
DAVID ALEXANDER LUGUAÑA PILLAJO**

**DIRECTOR:  
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

**Quito, Junio 2021**

David Alexander Luguaña Pillajo

**ELIMINACIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA EN GENERADORES DFIG MEDIANTE UN COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO EN SERIE**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**David Alexander Luguaña Pillajo** (Y'1994). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Don Bosco “La Tola”, se graduó de bachiller Técnico Industrial en Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta la Eliminación de la resonancia sub-síncrona en generadores DFIG mediante un compensador síncrono estático en serie

[dluguaa@est.ups.edu.ec](mailto:dluguaa@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Manuel Dario Jaramillo Monge** (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

[mjaramillo@ups.edu.ec](mailto:mjaramillo@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

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

**DERECHOS RESERVADOS**

©2021 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *ELIMINACIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA EN GENERADORES DFIG MEDIANTE UN COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO EN SERIE* realizado por David Alexander Luguaña Pillajo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Junio de 2021



.....  
Manuel Dario Jaramillo Monge  
C.C.: 1714298005

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, David Alexander Luguaña Pillajo, con documento de identificación N° 1721817813, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *ELIMINACIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA EN GENERADORES DFIG MEDIANTE UN COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO EN SERIE*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....

David Alexander Luguaña Pillajo

C.C.: 1721817813

Quito, D.M., Junio 2021

# INDICE DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 1  |
| Abstract.....   | 1  |
| 1    Introducción.....  | 2  |
| 2    Marco teórico.....   | 3  |
| 2.1  Distribución.....  | 3  |
| 2.2  Configuración DFIG.....  | 3  |
| 2.3  Resonancia Sub-Síncrona.....                                   | 4  |
| 2.3.1 Efecto generador de inducción.....                            | 4  |
| 2.3.2 Interacción torsional.....                                    | 4  |
| 2.3.3 Interacciones de control sub-síncrono.....                    | 5  |
| 2.3.4 Métodos para solucionar SSR.....                              | 5  |
| 2.3.5 Resonancia Afectaciones.....                                  | 5  |
| 2.4  Compensador Síncrono Estático en Serie.....                    | 6  |
| 2.4.1 Control de voltaje SSSC.....                                  | 7  |
| 3    Planteamiento del Problema.....                                | 8  |
| 3.1  Formulación del problema.....                                  | 8  |
| 4    Sistemas Eléctricos de Prueba de la IEEE.....                  | 8  |
| 4.1  Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Barras.....           | 8  |
| 4.2  Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Barras con DFIG.....  | 8  |
| 4.2.1 Sistema de Distribución de la IEEE de 33 Barras.....          | 9  |
| 4.2.2 Sistema de Distribución de la IEEE de 33 Barras con DFIG..... | 10 |
| 4.3  Casos de Estudio.....  | 11 |
| Caso 1.....   | 11 |
| Caso 2.....   | 11 |
| 5    Análisis de resultados.....                                    | 11 |
| 5.1.1 Perfiles de voltaje del Sistema 13 Barras de la IEEE.....     | 11 |
| 5.1.2 Perfiles de voltaje del Sistema 33 Barras de la IEEE.....     | 12 |
| 6    Conclusiones.....  | 13 |
| 7    Recomendaciones.....   | 14 |
| 8    Referencias.....   | 14 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Convertidor back-to-back .....   | 3  |
| Figura 2. Representación esquemática del SSSR.....   | 6  |
| Figura 3. Diagrama unifilar Sistema IEEE 13 barras.....  | 8  |
| Figura 4 Simulación Sistema IEEE 13 barras sin módulos implementados .....                                   | 8  |
| Figura 5. Diagrama unifilar Sistema IEEE 13 barras con DFIG.....   | 9  |
| Figura 6. Simulación Sistema IEEE 13 barras con DFIG .....   | 9  |
| Figura 7. Diagrama unifilar Sistema IEEE 33 barras.....  | 10 |
| Figura 8. Simulación Sistema IEEE 33 barras sin módulos implementados .....                                  | 10 |
| Figura 9. Diagrama unifilar Sistema IEEE 33 barras con DFIG.....   | 10 |
| Figura 10. Simulación Sistema IEEE 33 barras con DFIG .....  | 11 |
| Figura 11. Ubicación del SSSC en el Sistema IEEE de 13 Nodos. ....   | 11 |
| Figura 12. Ubicación del SSSC en el Sistema IEEE de 33 Nodos. ....   | 11 |
| Figura 13. Comparación del sistema IEEE de 13 barras sin el módulo DFIG Vs el módulo DFIG implementado ..... | 12 |
| Figura 14. Comparación del sistema IEEE de 13 barras con el módulo DFIG Vs SSSC implementado.....            | 12 |
| Figura 15. Diagrama de Caja de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. ....            | 12 |
| Figura 16 Comparación del sistema IEEE de 33 barras sin el módulo DFIG Vs el módulo DFIG implementado.....   | 13 |
| Figura 17 Comparación del sistema IEEE de 33 barras con el módulo DFIG Vs el módulo SSSC implementado .....  | 13 |
| Figura 18 . Diagrama de Caja de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 33 Nodos de la IEEE. ....           | 13 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros de voltajes sistema IEEE 13 barras .....                                | 8  |
| Tabla 2. Parámetros de voltaje con DFIG Sistema IEEE 13 Barras .....                        | 9  |
| Tabla 3. Parámetros de voltaje Sistema IEEE de 33 barras .....                              | 9  |
| Tabla 4. Parámetros de voltaje Sistema IEEE de 33 Barras con DFIG .....                     | 10 |
| Tabla 5. Comparación de Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 13 Barras de la IEEE. .... | 11 |
| Tabla 6. Comparación de Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 33 Barras de la IEEE. .... | 12 |

# ELIMINACIÓN DE LA RESONANCIA SUB-SÍNCRONA EN GENERADORES DFIG MEDIANTE UN COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO EN SERIE

## Resumen

En este documento se presenta una descripción general del generador eólico de la configuración DFIG para conocer su estructura, funcionamiento y principales problemas que se producen al momento de conectarse a la red eléctrica, uno de estos el más notorio la resonancia sub-síncrona. El presente documento plantea al SSSC como una solución efectiva para la eliminación de resonancia sub-síncrona, se debe tomar en cuenta que los SSSC son compensadores síncronos estáticos en serie, por ende los compensadores en sistemas de distribución son capaces de incrementar la estabilidad del sistema, mejorando la calidad y confiabilidad con respecto al abastecimiento de la demanda, con lo antes mencionada se puede describir que el presente documento establece dos casos de estudio. Los dos casos realizan la implementación de un generador de configuración DFIG conjuntamente con un módulo SSSC en serie para los sistemas de prueba IEEE de 13 y 33 barras, se efectuara un análisis comparativo acogiendo los niveles de voltaje como la principal variable , posteriormente los dos casos serán simulados en MATLAB-SIMULINK el cual es un software de programación visual con el propósito de validar resultados mediante gráficas, tablas y diagramas de barras

**Palabras Clave:** Análisis, Resonancia Sub-Síncrona, DFIG, SSSC

## Abstract

This document presents a general description of the wind generator of the DFIG configuration in order to know its structure, operation and main problems that occur when connecting to the electrical network, one of these being the sub-synchronous resonance the most notorious. This document proposes the SSSC as an effective solution for the elimination of sub-synchronous resonance, it should be taken into account that the SSSC are static synchronous compensators in series, therefore the compensators in distribution systems are capable of increasing the stability of the system. , improving the quality and reliability regarding the supply of demand, with the aforementioned it can be described that this document establishes two case studies. The two cases carry out the implementation of a DFIG configuration generator together with an SSSC module in series for the IEEE test systems of 13 and 33 bars, a comparative analysis will be carried out accepting the voltage levels as the main variable, then the two cases will be simulated in MATLAB-SIMULINK which is a visual programming software with the purpose of validating results through graphs, tables and bar diagrams

**Keywords:** Analysis, Sub-Synchronous Resonance, DFIG, SSSC

# 1 Introducción

Las fuentes de energía renovables en la última década han se han desarrollado como una alternativa eficaz para generar energía eléctrica, en varios lugares del mundo se ha desarrollado el enfoque en la energía eólica, esto ha llevado a la construcción en ascenso de parques eólicos.

En la actualidad la mayoría de parques eólicos han tenido una acogida basada en generadores de inducción doblemente alimentados(DFIG) por su amplia ventaja en comparación con otras configuraciones, esto ha hecho que se conviertan en las instalaciones generadoras más limpias y modernas[1].

Los parque eólicos con configuración DFIG, utilizan máquinas de inducción de rotor bobinado para su conexión[2] con un convertidor back.to.back conectado al estator y los devanados del rotor los mismos que se encuentran en conexión directa con la red[3].

Los centros de generación eólicos se establecen como un sistema de distribución eléctrica, generalmente pertenecen a una micro red, su principal función es asegurar confiabilidad y eficacia una vez conectados a la red principal, además son ampliamente confiables frente a fenómenos naturales, esto provoca que el sistema tenga menos pérdidas de energía en transmisión, distribución además menos inversión económica[4].

La integración de parques eólicos con configuración DFIG se ven en la necesidad de implementar mejoras en la estructura de las líneas de transmisión para esto una solución económicamente fiable está dada por la compensación en serie así se puede incrementar la capacidad de transferencia de potencia y

de este modo evitar la construcción de más componentes para la red.

En los últimos años, los sistemas de energía en el mundo están interconectados, existen generadores que se van conectando a través de la interconexión de la red, para esto se debe tomar en cuenta que existe una gran carga conectada al sistema eléctrico, la mayoría de sistemas eléctricos se controlan mecánicamente, para esto se debe tomar en cuenta que existe carga variable en la red por lo tanto estos controles mecánicos no actúan con rapidez, de este modo dejan variaciones en el sistema que alteran la estabilidad de la red[5].

Hace varios años atrás se han diseñado los interruptores basados en electrónica de potencia cumpliendo un papel importante en la labor de conmutación permitiendo obtener una respuesta más rápida[6].

La estabilidad dinámica y transitoria merece importancia para de este modo poder lograr una mayor transferencia de energía. Los controladores del sistema de transmisión de CA flexible (FACTS) son capaces de mejorar el margen de estabilidad dinámica y transitoria. EL compensador en serie síncrona estático (SSSC) es el componente principal del controlador FACTS [7].

El SSSC tiene la capacidad de cambiar su reactancia capacitiva a inductiva sin la necesidad de aumentar o disminuir corriente de línea, de esto modo lo hace eficiente en el control de flujo de energía en la red, otra característica importante es la invulnerabilidad a la resonancia del sistema establecido, el SSSC ubicado en la línea tiene la función de ser un control

de amortiguación adicional, así el SSSC amortigua el sistema[7].

El SSSC aumenta los límites de estabilidad transitoria en líneas de larga distancia y de estado estable. La resonancia sub-síncrona(SSR) aparece por el efecto de interacción entre el subsistema eléctrico y el subsistema mecánico produciendo intensificación en las oscilaciones del rotor del generador en las frecuencias sub-síncronas afectando el eje del generador, el SSSC tiene la ventaja de evitar este evento[8].

## 2 Marco teórico

### 2.1 Distribución

El sistema eléctrico lo conforma tres zonas importantes: Fuentes generadoras, sistema de transmisión y el sistema de distribución. Las zonas de generación y transmisión han sido analizadas a fondo mientras que el sistema de distribución en este ambiente no ha podido ser analizado profundamente [9].

Los sistemas de generación y distribución deben ser analizados rigurosamente antes de realizar su construcción por su alto costo de inversión este es el principal factor de falta de análisis de sistemas de distribución[9].

Los sistemas de distribución aumentan gradualmente, implementando cambios mínimos en su estructura, manteniendo como objetivo la calidad del servicio para las cargas siendo enfáticos en el costo de operación a corto o largo plazo[10].

### 2.2 Configuración DFIG

La configuración DFIG tiene como característica principal obtener energía a voltaje y frecuencia constante, cuando la

velocidad del rotor ejerce variaciones [11]. De este modo la conversión de energía es mayormente flexible, permitiendo que la red mejore y provocando estabilidad en el control de voltaje y frecuencias en la red [12].

El DFIG mejora la transferencia de energía haciéndola más eficiente al soporte y operación de la red mediante el control de voltaje, amortiguación y rendimiento transitorio[13]. El DFIG generalmente consiste de un convertidor back.to.back que está conectado al estator y los devanados del rotor los mismos que se encuentran en conexión directa con la red

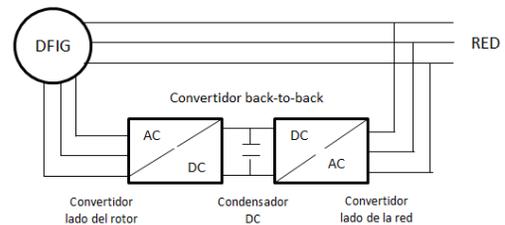


Figura 1. Convertidor back-to-back

En la configuración DFIG los terminales del estator conectan el generador de inducción, mientras que el rotor está conectado a un back-to-back que es un convertidor de frecuencia variable[13] este consta de un (RSC) convertidor en el lado del rotor, también posee un condensador de enlace de corriente continuo y un GSC convertidor en el lado de la red[5]. El convertidor de frecuencia variable únicamente es manejado con una fracción pequeña de la potencia total, de este modo los dispositivos electrónicos de potencia evitan pérdidas[14]

La configuración DFIG emite bidireccionalidad en el flujo de potencia de este modo le permite funcionar como

un generador o motor tanto de forma síncrona como súper-síncrona[15].

El DFIG tiene una turbina que proporciona una eficiencia totalmente mejorada del sistema debido que el ruido se ve reducido conjuntamente con las tensiones mecánicas, mejorando la calidad de energía y compensando el par junto a las pulsaciones de potencia[16].

### 2.3 Resonancia Sub-Síncrona

La resonancia sub-síncrona (SSR) se presenta cuando los centros de generación eólicos combinan energía a la red con la que se encuentra conectados [11], la frecuencia fundamental del sistema se encuentra por encima de la frecuencia de energía que se está intercambiando. Existen tres tipos de SSR en centros de generación eólicos de configuración DFIG[17], estos son: Efecto generador de inducción, Interacción torsional, Interacciones de control sub-síncrono[18].

#### 2.3.1 Efecto generador de inducción

El problema surge cuando en la resistencia existe una magnitud negativa esta es conocida como frecuencia sub-síncrona equivalente del rotor, existe una amortiguación de signo negativo en la frecuencia sub-síncrona producida por la suma de la resistencia de la red y la resistencia de la armadura[19]. Para establecer como se encuentra el centro de generación eólico es fundamental analizar las formulas del deslizamiento (1) (2) según[20], S1 para frecuencias sub-síncronas y S2 para frecuencias síncronas :

$$S1 = \frac{f_n - f_m}{f_n} \quad (1)$$

$$S2 = \frac{f_n + f_m}{f_n} \quad (2)$$

Dónde:

$f_n$  = Frecuencia natural del sistema eléctrico.

$f_m$  = Frecuencia correspondiente a la velocidad de rotación.

La resistencia del rotor debe mantener siempre un valor positivo S2 es el deslizamiento síncrono[21], por lo tanto el centro de generación eólica se encuentra estable en estas condiciones. Al contrario S1 toma un valor negativo siendo este el deslizamiento sub-síncrono, la corriente sub-síncrona va aumentando el tiempo por consecuencia del valor negativo producido por,  $f_n$  que es menor que  $f_m$ , en la resistencia del rotor [22].

#### 2.3.2 Interacción torsional

El efecto SSR se produce cuando la frecuencia natural producida por la torsión del tren de transmisión ubicada en la turbina eólica está cerca de la frecuencia natural de la red, los componentes de par sub-síncrono son sostenidos por el voltaje que esta inducido en la armadura[23]. Para el planteamiento de las ecuaciones (3) y (4) la representación de los modos de oscilación torsional son N-1 que están dados por el rotor con N masas y tiene N modos[24]

$$f_{mi} = \frac{w_{ni} \sqrt{1 - \zeta_i^2}}{2\pi} \quad (3)$$

Dónde:

$w_{ni}$  = son la relación de amortiguamiento

$\zeta_i$  = la frecuencia natural no amortiguada de la i-ésima masa.

$f_{mi}$  = frecuencia natural torsional.

La ecuación (4) está establecida por consecuencia y participación del rotor del generador el mismo que se encuentra oscilando a una frecuencia torsional natural, esto produce un componente de voltaje de armadura en el generador a las frecuencias[17]:

$$f_{em_i} = f_s \pm f_{mi} \quad (4)$$

Para que los pares sub-síncronos sean sostenidos  $f_{em_i}$  debe encontrarse cerca de la frecuencia natural[25]. La interacción torsional está dada por el intercambio de energía eléctrica y mecánica del centro generador eólico[26].

### 2.3.3 Interacciones de control sub-síncrono

Este caso está dado cuando, la frecuencia no presenta eventos para analizarse[27] en comparación con los otros casos se nota el crecimiento acelerado de las oscilaciones provocadas por las iteraciones de control sub-síncrono[28].

La red de compensación en serie se ve en la obligación de conectarse de manera radial a las líneas que presentan defectos e interrupciones[29] provocando el aumento de oscilaciones de frecuencia sub-síncrona, dados estos antecedentes la turbina y el compensador en serie se ven afectados críticamente[30].

### 2.3.4 Métodos para solucionar SSR

Los problemas SSR estudiados anteriormente tienen planteadas tres posibles soluciones para neutralizarlos.

La primera posibilidad está dada por el análisis de un condensador en serie controlado por tiristores, el mismo que consiste en el acople de un tiristor en paralelo con un condensador fijo para cada fase de este modo efectúa la amortiguación del SSR[30], de este modo a las líneas de transmisión tienen la

capacidad de transferir mayor cantidad de energía, mejora la estabilidad posterior a contingencias existentes, proporciona control dinámico en el flujo de potencia y elimina riesgos de SSR[17].

La segunda solución está basada en la implementación de un interruptor de apagado de puerta (GTO) que se encarga de controlar el condensador en serie, para cada fase, adecua dos GTO en serie conectado con un condensador en paralelo fijo[31], una vez implementado proporciona una impedancia variable para las líneas de transmisión. Los GTO tienen como característica principal su control, con la capacidad de encender y apagar a diferencia de los tiristores, esta es una ventaja convirtiéndolos en interruptores más controlables para las líneas de transmisión y sus flujos de potencia[32].

Los convertidores back-to-back contiguos proporcionan la tercera solución para la amortiguación del SSR tienen como componentes principales un convertidor en el lado del rotor y un convertidor en el lado de la red (GSC), necesitan accionarse conjuntamente con un controlador adicional en el lado de la red el mismo que necesita un voltaje a través del condensador de serie fijo[33].

### 2.3.5 Resonancia Afectaciones

La demanda de energía eléctrica va creciendo y con esto va aumentando la dificultad en el desarrollo de nuevas líneas de transmisión esto es un problema económico que ha encontrado solución con la implementación de la compensación en serie.

Los sistemas eléctricos presentan resonancia cuando existen circuitos que contienen elementos inductores y capacitores, se plantea que al llegar a la

condición resonante existirá la máxima transferencia de potencia pero esta condición no es favorable para el sistema ya que puede desatar daños definitivos en los equipos conectados.

Los sistemas eléctricos de potencia durante perturbaciones y maniobras experimentan una gran variedad de oscilaciones, este tipo de oscilaciones alcanzan magnitudes considerables que crecen o se mantienen por periodos prolongados de tiempo causando daños a los aislamientos de las líneas de transmisión, disminución en el tiempo de vida útil de las partes mecánicas de los equipos y daños permanentes a los generadores y principalmente la pérdida de estabilidad del sistema.

## 2.4 Compensador Síncrono Estático en Serie

El (SSSC) compensador síncrono estático en serie tiene como función principal cambiar la impedancia como si existiera una capacitancia o inductancia aplicando un voltaje de compensación que es el encargado de aumentar o disminuir el voltaje mediante la impedancia respectivamente[34].

El SSSC se efectúa a través de una fuente de voltaje basada en tiristores que son encendidos mediante pulsos que es capaz de proporcionar un voltaje compensado controlable en rangos capacitivos e inductivos idénticos[35], es inmune a las resonancias de la red.

La compensación reactiva con fuente de alimentación externa de CC es capaz de compensar la caída de voltaje en los componentes resistivos de la impedancia de las líneas, la modulación coordinada y simultanea de la compensación reactiva y real aumenta ampliamente la

amortiguación de la oscilación de potencia[34].

El SSSR contiene un inversor de fuente de voltaje (VSI) que es el encargado de convertir un voltaje CC en un voltaje CA trifásico entre sus componentes consta de una fuente de voltaje trifásico con frecuencia fundamental, un capacitor de cd un controlador y un transformador de acoplamiento en serie[36]

El circuito convertidor del SSSC puede tener una configuración de múltiples pulsos en el presente trabajo se modela el SSSC mediante una combinación de configuraciones de tres niveles y 24 pulsos[34]

El SSSC se puede modelar transformando las corrientes y tensiones trifásicas en variables DQ

El SSSC está representado de manera esquemática en la Figura 1 donde  $R_s$  y  $X_s$  son la resistencia y reactancia del transformador de VSC [37]

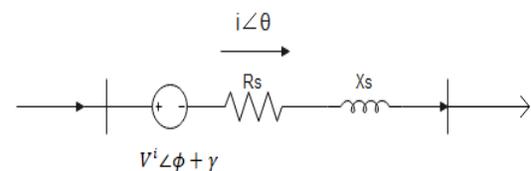


Figura 2. Representación esquemática del SSSR

En el análisis de SSR se requiere un modelado detallado del sistema eléctrico conjuntamente con el sistema mecánico, la red externa se describe mediante la siguiente ecuación:

$$[T] \left\{ \begin{bmatrix} \frac{V_{gd}}{V_{gq}} \\ \frac{V_{cd}}{V_{cq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_D^i}{V_Q^i} \\ \frac{V_B^i}{V_Q^i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{bd} \\ E_{bq} \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

donde  $[T] \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$

RL y XL están en serie y la reactancia inductiva mostradas desde los terminales del generador

Donde:

$\bar{\omega}$  = es la velocidad por unidad del rotor del generador

$V_g$  = es el voltaje de los terminales del generador,

$I$  = corriente de línea,

$V_c$  = voltaje del capacitor

$V^i$  = voltaje inyectado SSSC

$E_b$  = voltaje de la barra

Para comprender de mejor manera el SSSC trabaja con los componentes D y Q del voltaje inyectado estos se describen como[38].

$$V_D^i = K_m V_{dc} \sin(\phi + \gamma) \quad (5)$$

$$V_Q^i = K_m V_{dc} \cos(\phi + \gamma) \quad (6)$$

Donde:

$K_m$  = es el índice de modulación

$\phi$  = es el ángulo de fase de tensión de línea

$\gamma$  = es el ángulo de fase de corriente de línea

$\kappa\rho \cos\beta$  para convertirlo en tres niveles de 24 pulsos,  $\beta$  es una función del ángulo muerto,  $\rho$  es la relación de transformación del transformador de interfaz[39]

El ángulo de fase de la tensión del convertidor adelanta al ángulo de fase de la corriente de línea  $\phi$  por  $\gamma$ ,  $V_p$  es el voltaje real de  $V^i$  este esta en fase con la corriente de línea  $I$  mientras que  $V_R$  es el voltaje reactivo, la relación entre los voltajes real y reactivo esta dada por

$$V_R = V_D^i \cos \phi - V_Q^i \sin \phi \quad (8)$$

$$V_P = V_D^i \sin \phi - V_Q^i \cos \phi \quad (9)$$

Donde:

$V_p$  = voltaje real

$V_R$  = voltaje reactivo

$\phi$  = ángulo de fase de tensión de línea

$V_R$  y  $V_P$  son valores encargados de mostrar la absorción de potencia activa de la línea y la parte inductiva de funcionamiento del SSSC[37].

#### 2.4.1 Control de voltaje SSSC

El SSSC utiliza un controlador Tipo 1 para controlar el voltaje de salida del VSC variando el ángulo  $\beta$  con su frecuencia de conmutación fundamental y el ángulo  $\gamma$  variando [40], el voltaje del condensador de la parte de CC/( $V_{dc}$ ) están constantes de esta forma controla el voltaje real  $V_p$  el valor establecido de voltaje real,  $V_p^{ord}$  se obtiene del controlador de voltaje de CC.  $V_R^{ord}$  es el valor de voltaje reactivo y se mantiene constante o se obtiene de un controlador de programación de energía, los voltajes  $V_p^{sub}$  y  $V_R^{sub}$  son obtenidos del controlador de amortiguación y se utilizan para modular la tensión real y la reactiva del SSSC  $\beta$  y  $\gamma$  están dados por

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{V_{R(ord)}}{V_{P(ord)}} \right] \quad (10)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[ \frac{\sqrt{V_{P(ord)}^2 + V_{R(ord)}^2}}{\kappa\rho V_{dc}} \right] \quad (11)$$

Donde:

$V_p^{ord}$  = controlador de voltaje de CC

$V_R^{ord}$  = valor de voltaje reactivo

$\rho$  = relación de transformación del transformador de interfaz

### 3 Planteamiento del Problema

#### 3.1 Formulación del problema

El presente trabajo de estudio se realizara una serie de modelaciones en Matlab/Simulink la primera modelación se basa en dos sistemas de distribución de prueba del IEEE de 13 y 33 barras sin ninguna implementación para la siguiente fase de simulación se realizara la implementación de un bloque DFIG en el sistema IEEE de 13 y 33 barras de este modo se realizara el análisis de resonancia sub-síncrona, posteriormente se realizara la última modelación realizando la implementación de un bloque SSSC en cada uno de los sistema para poder apreciar la eliminación de la resonancia sub-síncrona, la simulaciones del DFIG y SSSC están validadas en un ejemplo propio de Matlab/Simulink, el cual contiene el bloque de la turbina eólica DFIG y un bloque específicamente del SSSC posteriormente se realizara una validación y comparación de gráficas y datos entre cada uno de los modelos a evaluar.

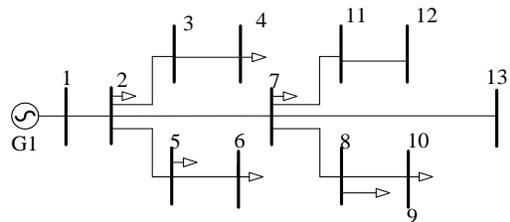
### 4 Sistemas Eléctricos de Prueba de la IEEE.

#### 4.1 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Barras.

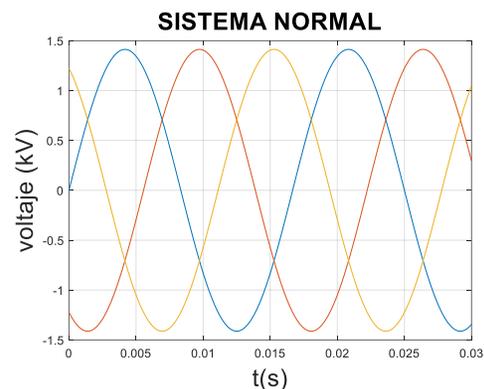
Este es un sistema de prueba que comprende un único generador convencional, nodo slack en la barra 1, de 13 barras de característica radial que opera a 24.9kV. Los parámetros de voltajes en cada barra se representan en la siguiente Tabla 1, la Figura 3 representa el diagrama unifilar de este sistema la Figura 4 muestra el sistema en operación normal.

**Tabla 1.** Parámetros de voltajes sistema IEEE 13 barras

| Barra | voltaje (pu) |
|-------|--------------|
| 1     | 1,00         |
| 2     | 1,00         |
| 3     | 1,00         |
| 4     | 1,00         |
| 5     | 0,96         |
| 6     | 0,92         |
| 7     | 1,00         |
| 8     | 1,00         |
| 9     | 1,00         |
| 10    | 1,00         |
| 11    | 1,00         |
| 12    | 1,00         |
| 13    | 1,00         |



**Figura 3.** Diagrama unifilar Sistema IEEE 13 barras



**Figura 4** Simulación Sistema IEEE 13 barras sin módulos implementados

#### 4.2 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Barras con DFIG.

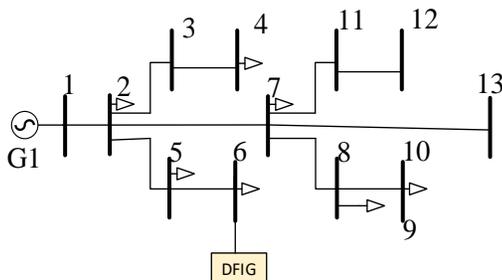
Para este sistema se integrara un módulo DFIG que contiene 6 turbinas de 1.5 Mw cada uno, se colocara este módulo en la barra 6 por ser la barra con el menor voltaje los parámetros de voltajes con el módulo DFIG integrado se representa en la Tabla 2, la Figura 5 representa el

diagrama unifilar del sistema junto al módulo DFIG

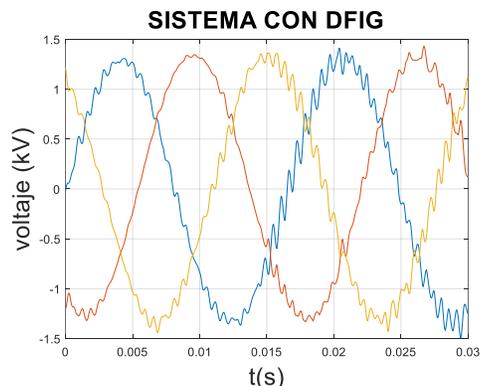
La Figura 6 representa la simulación del sistema con la implementación del módulo DFIG.

**Tabla 2.** Parámetros de voltaje con DFIG Sistema IEEE 13 Barras

| Barra | voltaje (pu) | DFIG (pu) |
|-------|--------------|-----------|
| 1     | 1,00         | 1,00      |
| 2     | 1,00         | 1,00      |
| 3     | 1,00         | 1,00      |
| 4     | 1,00         | 1,00      |
| 5     | 0,96         | 0,96      |
| 6     | 0,92         | 0,92      |
| 7     | 1,00         | 1,00      |
| 8     | 1,00         | 1,00      |
| 9     | 1,00         | 1,00      |
| 10    | 1,00         | 1,00      |
| 11    | 1,00         | 1,00      |
| 12    | 1,00         | 1,00      |
| 13    | 1,00         | 1,00      |



**Figura 5.** Diagrama unifilar Sistema IEEE 13 barras con DFIG



**Figura 6.** Simulación Sistema IEEE 13 barras con DFIG

#### 4.2.1 Sistema de Distribución de la IEEE de 33 Barras.

Este es un sistema de prueba que comprende un único generador convencional, nodo slack en la barra 1, de 33 barras de característica radial que opera a 12.6kV. Los parámetros de voltajes en cada barra se representan en la siguiente Tabla 3, la Figura 7 representa el diagrama unifilar de este sistema la Figura 8 muestra el sistema en operación normal.

**Tabla 3.** Parámetros de voltaje Sistema IEEE de 33 barras

| Barra | Normal(pu) |
|-------|------------|
| 1     | 1,4        |
| 2     | 1,4        |
| 3     | 1,4        |
| 4     | 1,4        |
| 5     | 1,3        |
| 6     | 1,3        |
| 7     | 1,3        |
| 8     | 1,3        |
| 9     | 1,3        |
| 10    | 1,3        |
| 11    | 1,3        |
| 12    | 1,3        |
| 13    | 1,3        |
| 14    | 1,3        |
| 15    | 1,2        |
| 16    | 1,2        |
| 17    | 1,2        |
| 18    | 1,2        |
| 19    | 1,4        |
| 20    | 1,4        |
| 21    | 1,3        |
| 22    | 1,3        |
| 23    | 1,3        |
| 24    | 1,3        |
| 25    | 1,3        |
| 26    | 1,3        |
| 27    | 1,3        |
| 28    | 1,3        |
| 29    | 1,2        |
| 30    | 1,2        |
| 31    | 1,2        |
| 32    | 1,1        |
| 33    | 1,2        |

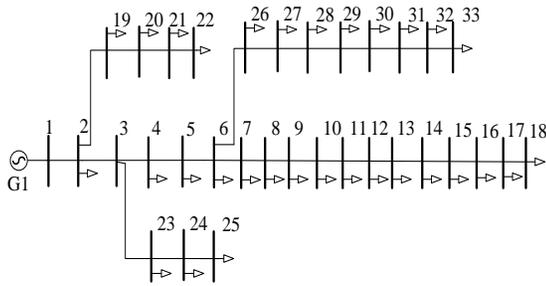


Figura 7. Diagrama unifilar Sistema IEEE 33 barras

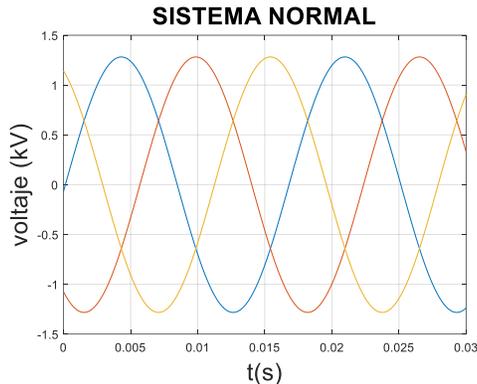


Figura 8. Simulación Sistema IEEE 33 barras sin módulos implementados

#### 4.2.2 Sistema de Distribución de la IEEE de 33 Barras con DFIG.

Para este sistema se integrara un módulo DFIG que contiene 6 turbinas de 1.5 Mw cada uno, se colocara este módulo en la barra 32 por ser la barra con el menor voltaje los parámetros de voltajes con el módulo DFIG integrado se representa en la Tabla 4, la Figura 9 representa el diagrama unifilar del sistema junto al módulo DFIG

La Figura 10 representa la simulación del sistema con la implementación del módulo DFIG.

Tabla 4. Parámetros de voltaje Sistema IEEE de 33 Barras con DFIG

| Barra | Normal(pu) | DFIG(pu) |
|-------|------------|----------|
| 1     | 1,4        | 1,4      |
| 2     | 1,4        | 1,4      |
| 3     | 1,4        | 1,3      |
| 4     | 1,4        | 1,3      |
| 5     | 1,3        | 1,3      |

|    |     |     |
|----|-----|-----|
| 6  | 1,3 | 1,2 |
| 7  | 1,3 | 1,2 |
| 8  | 1,3 | 1,2 |
| 9  | 1,3 | 1,2 |
| 10 | 1,3 | 1,2 |
| 11 | 1,3 | 1,2 |
| 12 | 1,3 | 1,2 |
| 13 | 1,3 | 1,1 |
| 14 | 1,3 | 1,1 |
| 15 | 1,2 | 1,1 |
| 16 | 1,2 | 1,1 |
| 17 | 1,2 | 1,0 |
| 18 | 1,2 | 0,9 |
| 19 | 1,4 | 1,4 |
| 20 | 1,4 | 1,3 |
| 21 | 1,3 | 1,3 |
| 22 | 1,3 | 1,2 |
| 23 | 1,3 | 1,3 |
| 24 | 1,3 | 1,2 |
| 25 | 1,3 | 1,1 |
| 26 | 1,3 | 1,2 |
| 27 | 1,3 | 1,2 |
| 28 | 1,3 | 1,1 |
| 29 | 1,2 | 1,1 |
| 30 | 1,2 | 1,0 |
| 31 | 1,2 | 0,9 |
| 32 | 1,1 | 0,9 |
| 33 | 1,2 | 0,9 |

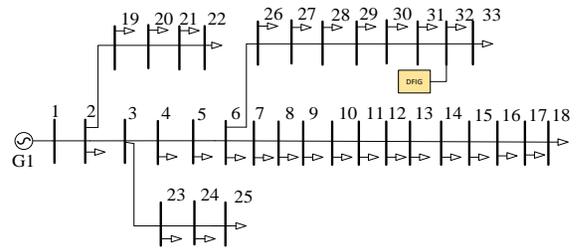


Figura 9. Diagrama unifilar Sistema IEEE 33 barras con DFIG

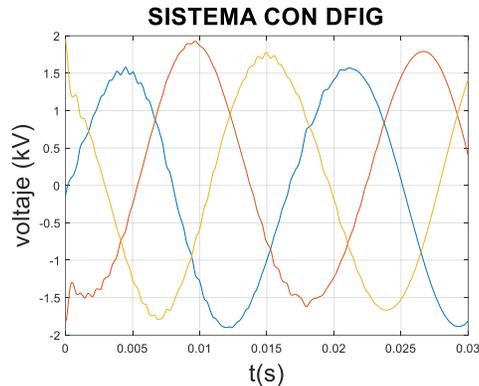


Figura 10. Simulación Sistema IEEE 33 barras con DFIG

### 4.3 Casos de Estudio.

#### Caso 1.

En el caso 1 se busca eliminar la resonancia sub-síncrona en el sistema eléctrico de 13 Barras de la IEEE, para lo cual se realiza la implementación de una bloque SSSC ubicado en serie entre la barra 6 y la barra 5 como lo muestra la Figura 11. Ubicación del SSSC en el Sistema IEEE de 13 Nodos.

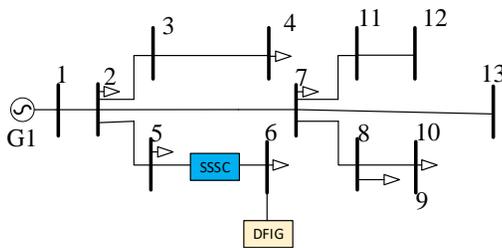


Figura 11. Ubicación del SSSC en el Sistema IEEE de 13 Nodos.

#### Caso 2.

En el caso 2 se busca eliminar la resonancia sub-síncrona en el sistema eléctrico de 33 Nodos de la IEEE, para lo cual se realiza la implementación de una bloque SSSC conectado en serie entre la barra 32 y la barra 31 como lo muestra la Figura 11. Ubicación del SSSC en el Sistema IEEE de 13 Nodos.

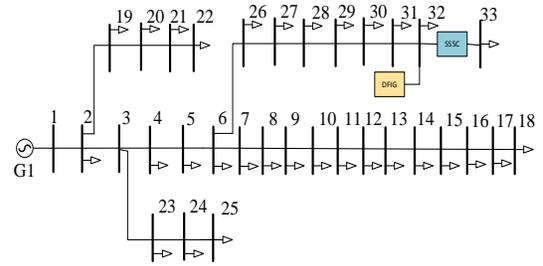


Figura 12. Ubicación del SSSC en el Sistema IEEE De 33 Nodos.

## 5 Análisis de resultados

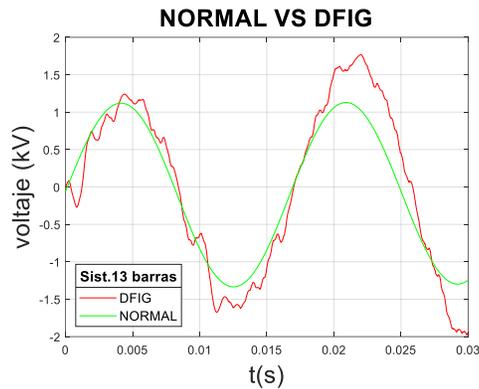
Mediante los casos mencionados anteriormente se tiene los siguientes resultados:

### 5.1.1 Perfiles de voltaje del Sistema 13 Barras de la IEEE.

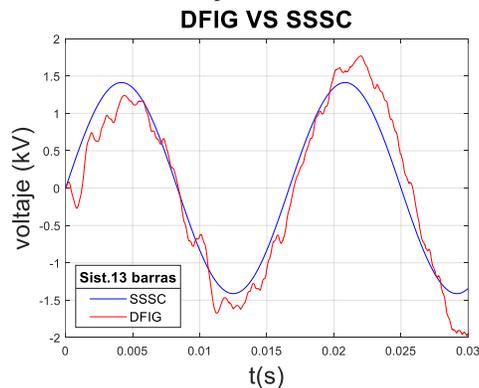
Al implementar el bloque SSSC en el sistema de 13 barras se logró eliminar la resonancia sub-síncrona con respecto al sistema que se ve afectado por el bloque DFIG. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Muestra los valores de voltajes simulados en la plataforma MATLAB-SIMULINK para validar resultados antes y después de la eliminación de resonancia.

Tabla 5 Comparación de Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 13 Barras de la IEEE **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

| Barra | voltaje (pu) | DFIG (pu) | SSSC (pu) |
|-------|--------------|-----------|-----------|
| 1     | 1,00         | 1,00      | 1,41      |
| 2     | 1,00         | 1,01      | 1,41      |
| 3     | 1,00         | 1,00      | 1,41      |
| 4     | 1,00         | 1,00      | 1,41      |
| 5     | 1,00         | 0,96      | 1,35      |
| 6     | 1,00         | 1,40      | 1,28      |
| 7     | 1,00         | 1,01      | 1,41      |
| 8     | 1,00         | 1,00      | 1,41      |
| 9     | 1,00         | 1,00      | 1,41      |
| 10    | 1,00         | 1,00      | 1,41      |
| 11    | 1,00         | 1,01      | 1,41      |
| 12    | 1,00         | 1,01      | 1,41      |
| 13    | 1,00         | 1,01      | 1,41      |

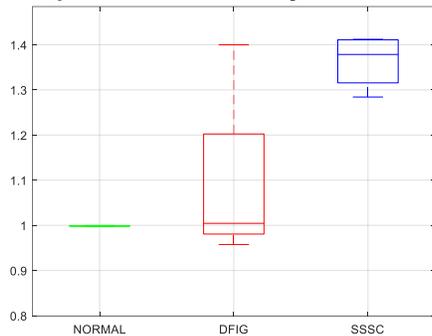


**Figura 13.** Comparación del sistema IEEE de 13 barras sin el módulo DFIG Vs el módulo DFIG implementado



**Figura 14.** Comparación del sistema IEEE de 13 barras con el módulo DFIG Vs SSSC implementado

**Comparacion entre voltajes 13BARRAS**



**Figura 15.** Diagrama de Caja de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

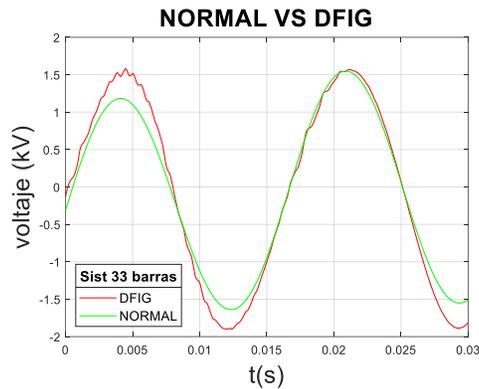
La Figura 15. Diagrama de Caja de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. Representa un diagrama de cajas o box plot, en el cual se puede apreciar la comparación entre los tres sistemas Normal, DFIG al ubicar el SSSC en el sistema

### 5.1.2 Perfiles de voltaje del Sistema 33 Barras de la IEEE.

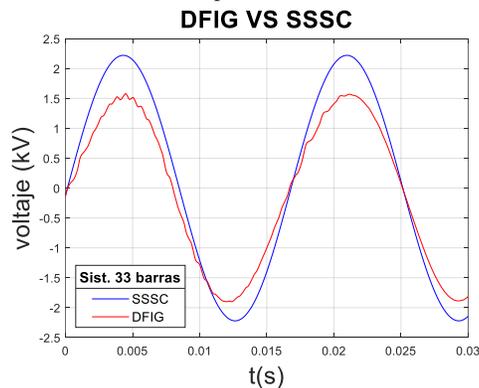
Al implementar el bloque SSSC en el sistema de 33 barras se logró eliminar la resonancia sub-síncrona con respecto al sistema que se ve afectado por el bloque DFIG. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Muestra los valores de voltajes simulados en la plataforma MATLAB-SIMULINK para validar resultados antes y después de la eliminación de resonancia

**Tabla 6.** Comparación de Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 33 Barras de la IEEE.

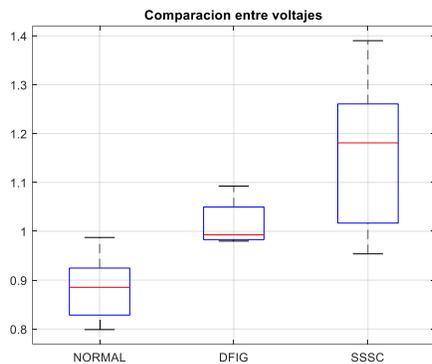
| Barra | Normal(pu) | DFIG(pu) | SSSC(pu) |
|-------|------------|----------|----------|
| 1     | 1,0        | 1,0      | 1,4      |
| 2     | 1,0        | 1,0      | 1,4      |
| 3     | 1,0        | 1,0      | 1,3      |
| 4     | 1,0        | 1,0      | 1,3      |
| 5     | 0,9        | 1,0      | 1,3      |
| 6     | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 7     | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 8     | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 9     | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 10    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 11    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 12    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 13    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 14    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 15    | 0,9        | 1,0      | 1,1      |
| 16    | 0,9        | 1,0      | 1,1      |
| 17    | 0,8        | 1,0      | 1,0      |
| 18    | 0,8        | 1,1      | 1,0      |
| 19    | 1,0        | 1,0      | 1,4      |
| 20    | 0,9        | 1,0      | 1,3      |
| 21    | 0,9        | 1,0      | 1,3      |
| 22    | 0,9        | 1,0      | 1,3      |
| 23    | 0,9        | 1,0      | 1,3      |
| 24    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 25    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 26    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 27    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 28    | 0,9        | 1,0      | 1,2      |
| 29    | 0,9        | 1,0      | 1,1      |
| 30    | 0,8        | 1,0      | 1,1      |
| 31    | 0,8        | 1,1      | 1,0      |
| 32    | 0,8        | 1,1      | 1,0      |
| 33    | 0,8        | 1,1      | 1,0      |



**Figura 16.** Comparación del sistema IEEE de 33 barras sin el módulo DFIG Vs el módulo DFIG implementado



**Figura 17.** Comparación del sistema IEEE de 33 barras con el módulo DFIG Vs el módulo SSSC implementado



**Figura 18** **Figura 15.** Diagrama de Caja de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

La Figura 15. Diagrama de Caja de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. Representa un diagrama de cajas o box plot, en el cual se puede apreciar la comparación entre

los tres sistemas Normal, DFIG al ubicar el SSSC en el sistema

## 6 Conclusiones

Del análisis de resultados y lo descrito en el presente documento se concluye lo siguiente:

El presente trabajo realiza, ejecuta y simula la implementación de un SSSC para la eliminación de resonancia sub-síncrona

En la presente investigación el modelo DFIG es el más utilizado para inyectar energía en la red, con respecto al análisis de niveles de voltaje se muestra una mejora imponente en el nivel de cada una de las barras corroborando al DFIG como uno de los mejores sistemas para ser implementados

Planteando el análisis de armónicos se determina que en las barras donde fue implementado existe mayor presencia de armónicos, se observa que al implementar un SSSC en serie entre la barra 6 y la barra 5 por su efecto compensador los armónicos se ven eliminados

Para cada caso de estudio se pudo observar que al implementar el SSSC este provoco la eliminación de la resonancia sub-síncrona incluyendo la ventaja de mejorar los perfiles de voltaje en cada uno de los sistemas analizados

A través de los resultados obtenidos en el sistema de 13 barras presenta incremento de voltaje en las barra 6 y la barra adyacente que en este caso sería la barra 5 al implementar un SSSC en serie entre la barra 6 y la barra 5 el voltaje de la misma aumenta considerablemente y la presencia de resonancia se elimina en su totalidad de esta manera se concluye

que en la eliminación de armónicos este el mejor método

Para el sistema de 33 barras tiene una mejora de voltaje al implementar un SSSC en serie con la barra 33 la resonancia en este punto se ve totalmente eliminada del sistema ya mencionado.

## 7 Recomendaciones

Se debe tomar en cuenta análisis muy puntuales, tales como señales de carácter: discreto continuo y fasorial que fueron los aplicados en esta investigación, de este modo se podrá llevar la implementación de módulos de control de manera eficaz y en una sola dirección sin presentar problemas de conceptos

Para extender el estudio de eliminación de resonancia sub-síncrona se puede complementar la investigación del método estudiado a través de nuevas técnicas de control de la presente investigación y de este modo obtener un desarrollo eficaz y sostenible para los modelos FACTS ya que el SSSC es uno de sus componentes principales

## 8 Referencias

- [1] X. Xiao, B. Gao, C. Zhao, and X. Kun, "A Novel SSR-Damping Scheme based on Imbalance Operation of SSSC," 2010.
- [2] S. Vajpayee, N. R. Panda, and P. Behera, "Crowbar Protection of Grid Connected Double Fed Induction Generator with Variable Speed Wind Turbine," no. Icces, pp. 56–61, 2017.
- [3] J. Bhukya, "Modeling and Analysis of Double fed Induction Generator for Variable Speed Wind Turbine," pp. 1324–1329, 2013.
- [4] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. Lehn, "Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process," p. 2021.
- [5] A. K. Jadhav, "Improvement in Power System Stability Using SSSC," pp. 162–166, 2018.
- [6] A. Rashad, S. Kamel, and F. Jurado, "Stability improvement of power systems connected with developed wind farms using SSSC controller," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 2767–2779, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2017.03.015.
- [7] P. R. Sahu, P. K. Hota, and S. Panda, "Power system stability enhancement by fractional order multi input SSSC based controller employing whale optimization algorithm," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 326–336, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2018.02.008.
- [8] J. Bhukya and V. Mahajan, "Electrical Power and Energy Systems Optimization of damping controller for PSS and SSSC to improve stability of interconnected system with DFIG based wind farm," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 108, no. June 2018, pp. 314–335, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.01.017.
- [9] E. D. E. Ingenier, "Escuela politécnica nacional," 2008.
- [10] G. E. Marco and R. R. Carlos, "DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE TÉCNICAS HEURÍSTICAS."
- [11] Y. Li, H. Liu, M. Yin, and W. Song, "SSR Analysis of DFIG-based Series-compensated System Based on Complex Torque Analysis Method," no. 201804270001030, pp. 1903–1908, 2018.

- [12] Z. Mi, L. Liu, H. Yuan, P. Du, and Y. Wan, "A Novel Control Strategy of DFIG Based on the Optimization of Transfer Trajectory at Operation Points in the Islanded Power System," vol. 2016, 2016.
- [13] F. M. Hughes, O. Anaya-lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Generation," vol. 21, no. 2, pp. 763–772, 2006.
- [14] M. Bouderbala, A. Lagrioui, and S. M. Ben, "Modeling and Power Controls of Wind Energy Conversion Systems Based on Doubly Fed Induction Generator."
- [15] A. Shabani and H. R. Karami, "A Fast Model of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine."
- [16] J. Morren, S. Member, and S. W. H. De Haan, "Ridethrough of Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generator During a Voltage Dip," vol. 20, no. 2, pp. 435–441, 2005.
- [17] H. A. Mohammadpour and E. S. Senior, "Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: Definitions and problem identification - Part I," *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, pp. 812–819, 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953480.
- [18] D. Vlqjk, W. Hgx, F. Fdsdelolw, R. I. Ix, F. Kdv, and D. Ehhq, "0lwljdwlrq ri 6xev \ qfkrqrxv 5hvrqdfh lq '),\* edvhg : lqg ) dupv xvlqj ) x ]]\ & rqwuroohuv."
- [19] M. Sahni *et al.*, "Advanced Screening Techniques for Sub-Synchronous Interaction in Wind Farms," 2012.
- [20] M. Sahni *et al.*, "Sub-synchronous interaction in wind power plants- part II: An ertcot case study," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345355.
- [21] M. Sahni, B. Badrzadeh, S. Member, and D. Muthumuni, "Sub-synchronous Interaction in Wind Power Plants- Part II: An ERCOT Case Study," pp. 1–9, 2012.
- [22] N. Yousif, M. Al-dabbagh, and S. Member, "Time-Frequency Distribution Application for Sub-synchronous Resonance Analysis in Power Systems," pp. 0–4.
- [23] H. Radmanesh and R. Sharifi, "Elimination of Sub-Synchronous Resonance via Doubly-Fed Induction Generator Based on Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) Algorithm," *ICEE 2019 - 27th Iran. Conf. Electr. Eng.*, pp. 748–752, 2019, doi: 10.1109/IranianCEE.2019.8786711.
- [24] Z. Xi and S. Bhattacharya, "STATCOM control and operation with series connected transformer based 48-pulse VSC," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1714–1719, 2007, doi: 10.1109/IECON.2007.4460359.
- [25] B. Gao *et al.*, "Impact of DFIG-based wind farm integration on sub-synchronous torsional interaction between HVDC and thermal generators," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 17, pp. 3913–3923, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.0328.
- [26] X. Dong, J. Hou, Z. Wang, J. Pi, X. Tian, and Y. Jin, "Study on the subsynchronous resonance mechanism of DFIG based on the analysis of stator and rotor

- torques,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, vol. 2016–Septe, no. Ciced, pp. 10–13, 2016, doi: 10.1109/CICED.2016.7576188.
- [27] C. Karunanayake, J. Ravishankar, and Z. Y. Dong, “Nonlinear SSR Damping Controller for DFIG Based Wind Generators Interfaced to Series,” vol. 35, no. 2, pp. 1156–1165, 2020.
- [28] Y. Cheng, M. Sahni, D. Muthumuni, and B. Badrzadeh, “Reactance Scan Crossover-Based Approach for Investigating SSCI Concerns for DFIG-Based,” vol. 28, no. 2, pp. 742–751, 2013.
- [29] P. Li, J. I. E. Wang, L. Xiong, and M. Ma, “Robust Nonlinear Controller Design for Damping of Sub-Synchronous Control Interaction in DFIG-Based Wind Farms,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16626–16637, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891768.
- [30] H. A. Mohammadpour, S. Member, E. Santi, and S. Member, “Sub-Synchronous Resonance Analysis in DFIG-Based Wind Farms: Mitigation Methods - TCSC, GCSC, and DFIG Controllers - Part II,” pp. 1550–1557, 2014.
- [31] K. Jemli, B. Touaiti, and M. Jemli, “Influence of the blades and the shaft rigidity of a wind turbine on the stability of the system under voltage dips,” vol. 1, no. 3, pp. 300–305, 2012.
- [32] Y. Belkacem and M. Ouriagli, “Fuzzy Controllers for a high performance of the Doubly Fed Induction Generator based on Wind Turbine in variable speed,” no. 1.
- [33] T. Nikita, “Computational Analysis on Doubly Fed Induction Generator to determine Core Loss under normal and Low Voltage Ride Through (LVRT) Condition,” pp. 5–10, 2017.
- [34] M. Ieee, K. K. Sen, and M. Ieee, “Old-state smission lines .,” vol. 12, no. 1, pp. 406–417, 1997.
- [35] G. N. Pillai, A. Ghosh, S. Member, and A. Joshi, “Torsional Interaction Studies on a Power System Compensated by SSSC and Fixed Capacitor,” vol. 18, no. 3, pp. 988–993, 2003.
- [36] L. Wang, S. Member, and Q. Vo, “Power Flow Control and Stability Improvement of Connecting an Offshore Wind Farm to a One-Machine In fi nite-Bus System Using a Static Synchronous Series Compensator,” vol. 4, no. 2, pp. 358–369, 2013.
- [37] R. Thirumalaivasan, M. Janaki, and N. Prabhu, “Damping of SSR Using Subsynchronous Current Suppressor With SSSC,” vol. 28, no. 1, pp. 64–74, 2013.
- [38] T. Rajaram, J. M. Reddy, and Y. Xu, “Kalman Filter Based Detection and Mitigation of Subsynchronous Resonance with SSSC,” vol. 32, no. 2, pp. 1400–1409, 2017.
- [39] K. R. Padiyar, “Analysis of SubSynchronous Resonance with Three Level Twelve-Pulse VSC based SSSC.”
- [40] V. Komoni, I. Krasniqi, and G. Kabashi, “Control Active and Reactive Power Flow with UPFC connected in Transmission Line,” pp. 1–6, 2012.