

# Generación Undimotriz: Integración con la red y análisis de resonancia subsíncrona

## Wave Energy: Grid Integration and Sub-synchronous Resonances Analysis.

Rubén Jaramillo - Osorio<sup>a\*</sup>, Alejandro Garcés - Ruiz<sup>a</sup>.

Recibido: julio 31 de 2014  
Recibido con revisión: mayo 19 de 2015  
Aceptado: mayo 25 de 2015

<sup>a\*</sup>Universidad Tecnológica de Pereira  
Programa de Ingeniería Eléctrica  
Pereira, Colombia  
Cra. 27 N° 10-02  
Tel.: + (57) 3165000 ext:11145  
rdjaramillo@utp.edu.co,  
alejandro.garces@utp.edu.co

### RESUMEN

Este artículo presenta un estudio preliminar sobre la integración de un generador undimotriz tipo Archimedes Wave Swing en el sistema de potencia y su impacto sobre las oscilaciones de frecuencia. Diferentes casos son analizados teniendo en cuenta la posible ocurrencia de resonancias subsíncronas debido a las bajas frecuencias de oscilación de las olas, así como los problemas dinámicos causados en la red debido a la oscilación de la potencia extraída del oleaje marino. Las simulaciones sobre el sistema IEEE de 9 nodos demuestran que la integración de generación undimotriz a la red eléctrica puede presentar resonancias subsíncronas, caída inesperada de frecuencia y otros problemas dinámicos.

### PALABRAS CLAVE

Archimedes Wave Swing, Convertidores *back-to-back*, Generación Undimotriz, Resonancia Subsíncrona.

### ABSTRACT

This paper presents a preliminary study on the integration of a wave generator to the power system, and its impact on frequency oscillations. Different cases are analyzed taking into account possible sub-synchronous resonances due the low oscillations of waves and the dynamic problems caused in the power grid due to the oscillation of the power extracted from the waves. Simulations on the IEEE9 system demonstrate the integration of wave energy to power grid can present sub-synchronous resonances and frequency drop as well as other dynamic problems.

### KEYWORDS

Archimedes Wave Swing, Back-to-back Converters, Wave Energy, Sub-synchronous Resonance.

Energética 45, junio (2015), pp. 49-59

ISSN 0120-9833 (impreso)  
ISSN 2357 - 612X (en línea)  
www.revistas.unal.edu.co/energetica  
© Derechos Patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia

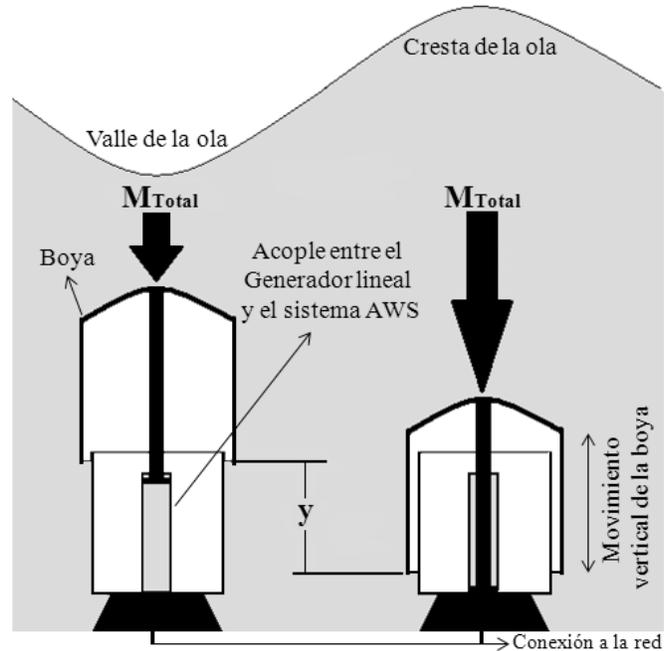


## 1. INTRODUCCIÓN

La extracción de energía eléctrica a partir del oleaje marino, también llamada generación undimotriz, es un nuevo concepto de energía limpia y renovable con alto potencial de explotación. En el mundo, diferentes tecnologías de generación undimotriz han sido objeto de estudio. Este artículo estudia el sistema de conversión conocido como *Archimedes Wave Swing* (AWS), el cual consiste en una cámara cilíndrica hueca fija en el lecho marino, y un flotador que sirve como su tapa (ver figura 1). Dicho flotador se mueve verticalmente debido al paso del oleaje oceánico por sobre éste [Rademakers, et al., 1998]. Cuando una ola está justo sobre el flotador, el aumento del peso del agua hace que éste baje y comprima el aire que está dentro de la cámara; cuando la cresta de la ola pasa y sobre el flotador se encuentra el valle de la misma, la disminución en el peso del agua sobre el flotador y el aumento de la presión al interior de la cámara cilíndrica hacen que la boya se mueva hacia arriba. De este movimiento vertical continuo se extrae la energía eléctrica por medio de un generador síncrono lineal acoplado al AWS, el cual se detallará más adelante. La integración de este tipo de generadores a la red de potencia puede presentar algunas problemáticas que son estudiadas en este artículo.

Las bajas frecuencias de oscilación del oleaje marino hacen que la potencia eléctrica extraída por el AWS presente una frecuencia subsíncrona y que la frecuencia y la magnitud del voltaje en terminales varíen constantemente. Estas frecuencias pueden ocasionar resonancias con el eje de las máquinas eléctricas con las que cuenta el sistema eléctrico, fenómeno que requiere ser estudiado en detalle dado que pueden ocasionar inestabilidad en el sistema de potencia, así como vibraciones mecánicas que implican graves problemas estructurales en el conjunto mecánico del generador undimotriz o de otros generadores con los que cuenta el sistema.

La generación undimotriz tipo AWS viene siendo objeto de estudios, los cuales han estado enfocados principalmente en el diseño electromecánico de los sistemas de conversión [Rademakers, et al., 1998; Wu, et al., 2008; Polinder, et al., 2004]. En este artículo se hará un análisis preliminar de la generación undimotriz, enfocado en la integración directa del sistema generador a la red de potencia y en el fenómeno de resonancia subsíncrona que se podría presentar, debido a la baja frecuencia de oscilación del oleaje marino. Un estudio de este tipo hasta ahora no ha sido llevado a cabo, a pesar de las graves consecuencias que dicha contingencia representa para la estabilidad y seguridad del sistema de potencia.



**Figura 1.** Principio de funcionamiento del AWS.

**Fuente.** Elaboración Propia.

El artículo está dividido de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta las principales características del sistema de conversión de energía tipo AWS, la sección 3 presenta un análisis de la resonancia subsíncrona y las contingencias que ésta causa en la red eléctrica. La sección 4 muestra el modelamiento del sistema de generación. Finalmente se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones.

## 2. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ TIPO AWS

El estado de la investigación y el desarrollo de la conversión de la energía undimotriz en el continente Europeo, que es donde se ha innovado y se ha desarrollado principalmente éste tipo de tecnología, se encuentra detallado en [Clement & Cols., 2002]. En la extracción de la energía de las olas se pueden observar diferentes tecnologías, tales como el OWC [de O. Falcao & Justino, 1999], el *Mighty Whale* [Washio, et al., 2001], el *Pelamis* [Henderson, 2006] y el *Wave Dragon* [Kofoed, et al., 2006].

El objetivo de este estudio es la integración a las redes de potencia y el análisis del sistema conversor de la energía de las olas conocido como *Archimedes Wave Swing* (AWS), originado en 1993 mediante los estudios desarrollados por F. Gardner y H. Van Breugel [Rademakers, et al., 1998].

En [Polinder et al., 2004] se desarrolló todo el modelo matemático para la extracción de la energía eléctrica del oleaje marino acoplado al AWS un generador lineal. Dicho modelo se presenta a continuación:

$$(M_{fl} + M_{H2O}) \frac{d^2 y}{dt^2} + (\beta_{AWS} + \beta_G) \frac{dy}{dt} + (k_{AWS}) y = F_{WAVE} \quad (1)$$

En donde:

$y$  Es la distancia recorrida por el flotador del AWS y el *translator* del generador lineal.

$M_{fl}$  Es la masa del flotador

$M_{H2O}$  Es la masa que representa el agua que se encuentra por encima del flotador

$\beta_{AWS}$  Es el coeficiente de amortiguación hidrodinámica de la AWS

$\beta_G$  Es el coeficiente de amortiguación del generador lineal

$k_{AWS}$  Es la constante del resorte de AWS

$F_{WAVE}$  Es la suma de las fuerzas resultantes de las olas que actúan sobre el flotador

Se demuestra en [Polinder et al., 2004] que para extraer la máxima energía del oleaje, el sistema AWS debe cumplir dos condiciones: la primera es estar en resonancia con el oleaje marino; la segunda es que el coeficiente de amortiguación hidrodinámica del AWS debe ser igual a la amortiguación proporcionada por el generador, entonces  $\beta_{AWS} = \beta_G$

Definiendo la masa total de la siguiente manera:

$$(M_{fl} + M_{H2O}) = M_{Total} \quad (2)$$

Finalmente el modelo dinámico del sistema mecánico para la máxima extracción de energía del oleaje se muestra en la ecuación 3.

$$(M_{Total}) \frac{d^2 y}{dt^2} + (k_{AWS}) y = 0 \quad (3)$$

Por lo tanto, la máxima potencia eléctrica extraída del oleaje está dada por:

$$P_{max} = \cos^2(w_x t) \quad (4)$$

Dónde:

$$w_x = \sqrt{\frac{k_{AWS}}{M_{Total}}} \quad (5)$$

Para el acople del generador de energía eléctrica al AWS, en [Polinder, et al., 2005] se le practicó un estudio a cinco diferentes topologías de generador lineal, buscando el generador más adecuado para extraer la energía de las olas, siendo finalmente elegido el generador síncrono lineal de imán permanente (PMLSM, por sus siglas en inglés) con imanes en el *translator* (la parte móvil

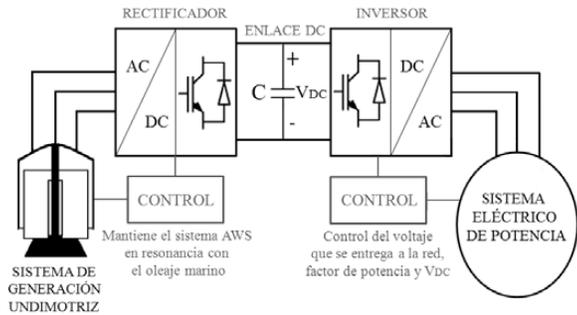
del generador); generador también elegido y justificado para los estudios desarrollados en [Polinder et al., 2004].

En 2004 se sumergió el primer prototipo a escala de esta tecnología, hallando los modelos de movimiento del AWS sumergido y del generador lineal acoplado a éste [de Sousa Prado, et al., 2006].

Resulta importante mencionar que el modelo del movimiento del generador en [de Sousa Prado et al., 2006] se encuentra en un marco de referencia *abc*. Todos los componentes dinámicos de un sistema de potencia convencional, tales como generador síncrono, motor de inducción, dispositivos electrónicos de potencia, entre otros, se establecen en un marco de referencia *dq* [Wu, et al., 2008], entonces, todos los componentes de un sistema de generación independiente establecidos en el marco de referencia *dq*, pueden ser integrados con un sistema de potencia convencional y posteriormente ser analizados en su estado dinámico sin presentar problema alguno [Kundur, 1994]. Por lo tanto, se puede concluir que los modelos utilizados en [de Sousa Prado et al., 2006] no son adecuados para el análisis dinámico de los sistemas de potencia con múltiples componentes dinámicos, como lo son los sistemas de potencia a los cuales sería integrada esta nueva tecnología de generación.

Con el propósito de la integración del AWS en la dinámica de las redes eléctricas y el análisis de estabilidad de éstas, se propone en [Wu, et al., 2008], una transformación de coordenadas del generador síncrono lineal del marco de referencia *abc* al marco de referencia *dq*, bajo la transformada de coordenadas de Park para una máquina síncrona, fijando el marco de referencia *dq* en el *translator* (la parte móvil) del generador lineal. Se desarrollan en [Wu, et al., 2008], simulaciones en las que el sistema convertidor de la energía de las olas opera primero sin carga y posteriormente alimentando una carga R-C aislada, buscando comparar las respuestas dinámicas halladas bajo simulaciones en dicho documento, con las del sistema estudiado en [de Sousa Prado, et al., 2006] para comprobar la validez del cambio de coordenadas propuesto. Se concluye finalmente que el modelo dinámico del generador lineal propuesto en las coordenadas *dq* es adecuado para la dinámica del sistema de potencia y su análisis de estabilidad [Wu, et al., 2008].

Para la integración del sistema convertidor de la energía de las olas en la red de potencia, se ha estudiado el uso de convertidores *back-to-back*, los cuales consisten en un convertidor del lado del generador, un convertidor del lado de la red, un condensador actuando como enlace DC y sus respectivos controles, cuyo objetivo es optimizar el sistema convertidor de la energía de las olas (ver figura 2).



**Figura 2.** Integración del sistema de generación undimotriz con la red de potencia.

**Fuente.** Elaboración Propia.

El convertidor del lado del generador, el cual está conectado al estator de la máquina, tiene como función recibir la señal de corriente alterna entregada por el generador síncrono lineal y convertirla en una señal de corriente directa. Su principal objetivo es maximizar la extracción de energía de las olas y reducir las pérdidas en el generador; para esto, como se demostró en el desarrollo de la ecuación matemática para la extracción de la energía de las olas en [Polinder, et al., 2004], el *translator* del generador síncrono lineal debe estar en resonancia con la ola.

Para el control y regulación del AWS en resonancia con el oleaje marino, se propuso en [Polinder, et al., 2004; Wu, et al., 2008], un control manual, el cual consiste básicamente en regular la presión de aire y el volumen dentro de la cámara cilíndrica de la AWS. Regular estos aspectos se lleva a cabo mediante el bombeo de agua de entrada/salida de la AWS, lo cual es un proceso lento [Wu, et al., 2009]. Esto impide que se pueda hacer una regulación de resonancia con la rapidez y efectividad necesaria, lo cual crearía una limitación práctica al sistema que haría menos viable el desarrollo e implementación de esta tecnología. Se propone en [Shek, et al., 2007] y se desarrolla totalmente en [Wu, et al., 2009] un control electrónico del AWS, el cual regula la fuerza de rigidez que el AWS aplica al movimiento del *translator* en el generador, este control es mucho más fácil de implementar en la práctica y mucho más rápido en su regulación, haciendo insignificante el retraso en la regulación del AWS y la puesta de la misma en resonancia con el oleaje, haciendo máxima en todo momento la extracción de potencia del oleaje marino, sin importar la continua variación de éste.

La función del convertidor del lado de la red es recibir del enlace DC una señal de corriente directa y entregarle a la red de potencia una señal de corriente alterna. Su principal objetivo es entregar a la red una potencia activa y una tensión en terminales constante [Wu, et al.,

2008; Wu, et al., 2009]. Para cumplir este objetivo, se necesita, al igual que en el convertidor del lado del generador, aplicar un control electrónico. En [Wu, et al., 2008] se presenta un diagrama de bloques completo del control que se puede aplicar sobre el convertidor de lado de la red.

Para los análisis realizados en [Polinder, et al., 2004], se utiliza, por diferentes factores allí expuestos, un convertidor inversor con fuente de corriente (CSI, por sus siglas en inglés), pero se concluye finalmente en ese mismo documento que es mucho más viable utilizar un convertidor *back-to-back* inversor con fuente de voltaje (VSI, por sus siglas en inglés), ya que mejora el factor de potencia en la red, la corriente entregada al sistema de potencia y la corriente del generador se pueden hacer sinusoidales, la fuerza en la máquina síncrona puede ser mayor y el factor de potencia del generador puede controlarse para disminuir al mínimo las pérdidas en éste y en los cables que lo conectan con el convertidor *back-to-back*. Estos factores hacen finalmente que el rendimiento energético anual provisto por el sistema de conversión de la energía de las olas aumente en un 18%.

Si se planea utilizar, debido a su mayor rendimiento energético, convertidores *back-to-back* del tipo VSI, es necesario implementar un control electrónico para el voltaje del enlace DC, ya que dicha tensión debe mantenerse constante para apoyar el correcto funcionamiento del convertidor [Wu, et al., 2009]. Se debe complementar entonces el control implementado al convertidor del lado de la red desarrollado en [Wu, et al., 2008], con un control en el enlace DC. En [Wu, et al., 2009] se desarrolla completamente el control para el voltaje del enlace DC. Para su correcta aplicación, se necesita muestrear constantemente el oleaje marino buscando mantener un voltaje de referencia en el enlace DC, el cual está variando debido a la diferencia de la potencia activa que está saliendo en cada instante del generador síncrono lineal con respecto a la potencia activa que está entregando el convertidor VSI del lado de la red al sistema de potencia.

Para establecer los valores de referencia de los controladores en el convertidor *back-to-back*, es necesario establecer los parámetros cambiantes del oleaje, tales como la suma de las fuerzas resultantes de las olas que actúan sobre el flotador y la velocidad angular de la tensión inducida en el generador lineal; estos parámetros se pueden obtener en tiempo real mediante la instalación de monitores de medida a lo largo del camino de las olas [Wu, et al., 2009].

### 3. ESTUDIO DE LA RESONANCIA SUBSÍNCRONA

Es usual en líneas de transmisión largas encontrar compensación conectada en serie, la cual se basa en la conexión de capacitores en serie con la línea buscando disminuir la impedancia inductiva de ésta. Dicha compensación hace que en el análisis eléctrico la longitud de la línea parezca más corta, lo cual incrementa la estabilidad en el sistema de potencia y la capacidad de transmisión de energía [Song & Johns, 1999; Gyugyi, et al., 1997].

La aplicación de capacitores en serie para la transmisión de energía a larga distancia ayuda a mejorar la transferencia de potencia con menores costos que los necesarios para la adición a la red de nuevas líneas de transmisión. El problema de la aplicación de compensación en serie es que puede causar oscilaciones a baja frecuencia auto excitadas o resonancias subsíncronas en la red de potencia [Padiyar, 2004].

La definición formal propuesta por el IEEE establece a la resonancia subsíncrona como la condición del sistema de potencia donde la red eléctrica intercambia energía con una turbina a una o más de las frecuencias naturales del sistema debajo de la frecuencia síncrona de éste [Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Oscillations”, 1980; Terms Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations”, 1985]. Se ha encontrado que este problema también puede surgir con la operación radial del enlace HVDC conectado al turbogenerador [Bahman, et al., 1980] y con compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC) [Rostamkolai, et al., 1990].

Este fenómeno se comenzó a estudiar después de que en Diciembre de 1970 y en Octubre de 1971 se presentara daño físico en el eje del grupo turbina-generador de la central termoeléctrica de Mohave, en Estados Unidos. Esta falla se produjo por las oscilaciones que se amplificaron y causaron calentamiento excesivo en el eje del grupo turbina-generador de la central, debido a las vibraciones mecánicas producidas por el fenómeno de resonancia subsíncrona [Walker, et al., 1975].

El problema de la resonancia subsíncrona puede ser clasificado como:

- Problema de estado estacionario debido a la excitación propia. Las causas son:
  - Efecto generador de inducción
  - Interacción torsional
- Pares transitorios que pueden provocar daños por fatiga en los ejes del rotor.

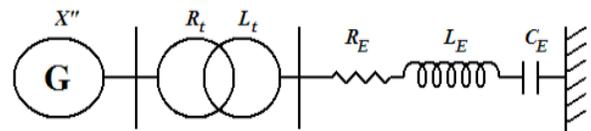
El problema de estado estacionario debe ser evitado con una planificación adecuada de los sistemas eléctricos de potencia. Sin embargo, es imposible asegurar que el sistema se encuentre totalmente a salvo de este fenómeno, dado que es probable que al planificar no sea posible identificar todas las condiciones de funcionamiento crítico que dan lugar a la auto excitación, debido a la complejidad de los sistemas eléctricos de potencia. El problema de los pares transitorios se debe resolver con el uso dispositivos auxiliares que proporcionen amortiguación al sistema mecánico del generador, mientras que el problema de las interacciones torsionales se debe resolver con el uso de filtros eléctricos que limiten la magnitud de los pares subsíncronos transitorios.

Además de los dispositivos necesarios para la amortiguación de la resonancia subsíncrona, también es necesario proveer a la red de

potencia con dispositivos auxiliares que proporcionen medidas de protección y de reinstalación, los cuales se encarguen de supervisar y corregir las condiciones que pueden conducir a contingencias en el sistema eléctrico o a daños graves en los sistemas mecánicos de generación [Padiyar, 2004].

### 3.1. Resonancia subsíncrona en líneas con compensación conectada en serie

Considérese el sistema mostrado en la figura 3. Éste consiste en un generador conectado a una línea provista con compensación conectada en serie.



**Figura 3.** Sistema unifilar equivalente de una línea de transmisión con compensación en serie.

**Fuente.** Elaboración Propia.

El sistema eléctrico constituido tiene carácter R-L-C con una frecuencia de resonancia dada por:

$$f_{er} = \left( \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_E}} \right) = f_0 \sqrt{\frac{X_{CE}}{X_{LT}}} \quad (6)$$

En donde:

$f_0$  Es la frecuencia fundamental del sistema eléctrico.

$L_T$  Es la inductancia total del circuito

$X_{LT}$  Es la reactancia inductiva total del circuito

$X_{CE}$  Es la reactancia capacitiva total del circuito

La medida que indica el grado de compensación de la reactancia de la línea, es el factor de compensación F.C., el cual se define como:

$$F.C. = \left( \frac{X_{CE}}{X_{LT}} \right) \quad (7)$$

Cuyo valor suele estar comprendido en el margen del 25% al 75%, por lo que es inferior a la frecuencia fundamental [Rodríguez, 2009].

### 3.2. Tipos de interacciones debidas a la resonancia subsíncrona

#### • Efecto generador de inducción

El efecto generador de inducción es provocado por la auto excitación del sistema eléctrico como resultado de una fuerza magnetomotriz (FMM) producida por las corrientes de frecuencia subsíncrona [Viveros, 2004].

Cuando en el sistema se está presentando el fenómeno de resonancia subsíncrona, el campo magnético producido en el generador gira a una velocidad dada por la frecuencia subsíncrona, mientras que el sistema de potencia le impone al rotor de la máquina generadora una velocidad de sincronismo dada por la frecuencia fundamental del mismo ( $f_0$ ) [Rodríguez, 2009].

El campo magnético gira entonces con un deslizamiento negativo con respecto al rotor de la máquina, el cual está dado por la expresión:

$$s = \frac{f_{er} - f_0}{f_{er}} \quad (8)$$

Debido a que  $f_{er} < f_0$  el deslizamiento es negativo, entonces la resistencia del rotor cuando existe frecuencia subsíncrona es vista desde los terminales de la máquina como negativa. Cuando la magnitud de esta resistencia negativa excede la suma de la resistencia de la armadura del generador más las resistencias de la red completa, a una frecuencia de resonancia, habrá auto excitación en el sistema. Esto dará paso a una condición de operación inestable del mismo [Viveros, 2004; Rodríguez, 2009].

Este fenómeno se conoce como efecto generador de inducción, debido a que la máquina síncrona se comportaría como tal, si se da la condición de resonancia subsíncrona en el sistema.

- **Interacción torsional [Rodríguez, 2009].**

Cuando las corrientes transitorias subsíncronas producen pares en el entrehierro cercanos a algunos de los modos torsionales del turbogenerador, se dice que ocurre interacción torsional [Rodríguez, 2009]. Si ante alguna condición de contingencia o pequeña perturbación en el sistema, se produce la oscilación del eje del turbogenerador a alguna de sus frecuencias naturales, se inducen tensiones y corrientes en el devanado trifásico del estator con frecuencias dadas por:

$$f_{em} = f_0 \pm f_m \quad (9)$$

Si la componente subsíncrona  $f_m$  se encuentra cerca de la frecuencia de resonancia eléctrica de la red ( $f_{er}$ ), la oscilación torsional del eje de la máquina y la resonancia eléctrica del sistema interactuarán reforzándose mutuamente, lo que conlleva a la aparición de resonancia subsíncrona y pares transitorios asociados a este fenómeno [Viveros, 2004; Rodríguez, 2009]. Estos pares pueden presentar un crecimiento tal que superen el amortiguamiento mecánico con el que debe estar provisto el sistema giratorio del generador, provocando una condición de operación inestable en la máquina generadora.

Dado que en esta condición interactúan directamente el sistema mecánico (oscilaciones del eje y amortiguamiento mecánico provisto en el sistema turbogenerador) y el sistema eléctrico (pares eléctricos debido a componentes subsíncronas), se le conoce con el nombre de interacciones torsionales.

- **Pares transitorios**

Las alteraciones del sistema, debidas a la conmutación de la red o a cualquier otra contingencia presente en ésta, pueden excitar pares oscilatorios en el rotor del generador [Padiyar, 2004].

En un par eléctrico transitorio existen muchas componentes, principalmente pares oscilatorios de múltiples frecuencias con comportamientos de decaimiento exponencial, los cuales van desde las frecuencias subsíncronas hasta la frecuencia nominal del sistema [Viveros, 2004]. En sistemas de transmisión sin compensación serie, estos transitorios resultan en respuestas de tipo exponencial cuya constante de decaimiento depende de la relación R-L de la línea. Sin embargo, en redes de transmisión con compensación conectada en serie, ante la ocurrencia de una gran contingencia en el sistema, la corriente a través de la línea se puede presentar con característica oscilatoria de frecuencia  $f_{er}$ . La cantidad de éstas posibles frecuencias depende del valor de inductancia, resistencia y capacitancia presente en la línea de transmisión [Rodríguez, 2009].

Un sistema de transmisión con compensación en serie basada en muchos capacitores, tendrá como resultado la presencia de un gran número de frecuencias subsíncronas. Si alguna de estas frecuencias se encuentra lo suficientemente cerca o llega a coincidir con alguna de las frecuencias naturales del sistema mecánico (modos torsionales del grupo turbina-generador), los pares transitorios que se presentarían en la flecha de la máquina podrían tener magnitudes muy grandes, debido a que estos son directamente proporcionales a la magnitud de la corriente de oscilación. La presencia de estos pares disminuye la vida útil del eje, como resultado de la fatiga que experimenta el material, e incluso, si la magnitud del par mecánico en el eje es lo suficientemente grande y se presenta durante un tiempo prolongado, éste puede causar la destrucción inmediata de la flecha del turbogenerador [Viveros, 2004].

#### 4. MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ TIPO AWS.

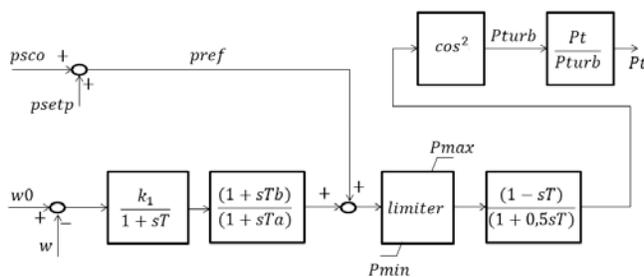
*DigSILENT PowerFactory* es uno de los programas de simulación de sistemas eléctricos de potencia con más difusión en Colombia. Utilizando esta herramienta se realizan análisis dinámicos de sistemas eléctricos de potencia con generación undimotriz integrada a estos, buscando comprobar los análisis teóricos previamente desarrollados.

*DigSILENT* cuenta por defecto con múltiples máquinas eléctricas, todas las necesarias para simular completamente un sistema eléctrico “convencional”, sin embargo, no cuenta con generadores síncronos lineales, ni con un sistema de energía primaria tal como el oleaje marino que permita la simulación de la energía undimotriz.

Por esto, se requiere adecuar los generadores síncronos clásicos al modelo teórico obtenido de la generación undimotriz.

Para esto, se le asignó un gobernador de velocidad a una máquina síncrona y se editó su diagrama de control, buscando que la potencia provista por la turbina al generador se presente de forma sinusoidal, simulando así el oleaje marino en condiciones ideales. Se elige por simplicidad el modelo de gobernador IEEE2, el cual se encuentra en las librerías del programa simulador utilizado, y se edita su diagrama de control añadiendo un bloque que nos brinde la característica deseada. Así, la potencia entregada por el generador undimotriz tendría el comportamiento esperado, el cual es presentado en la ecuación 4.

La figura 4 muestra el diagrama de bloques del gobernador utilizado en la máquina síncrona, se puede observar el ingreso de la función coseno elevada al cuadrado en dicho diagrama, lo que causa que la potencia entregada por la turbina al generador presente la característica oscilante requerida para esta aplicación.



**Figura 4.** Diagrama de control editado del gobernador de velocidad.

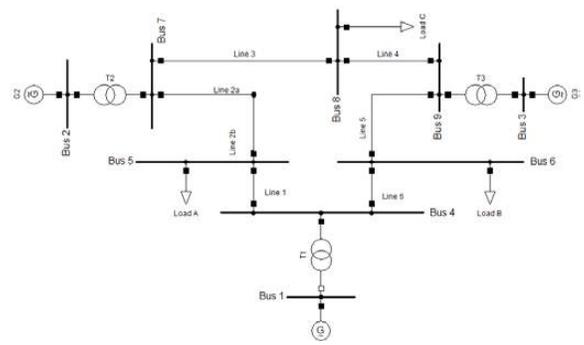
**Fuente.** Elaboración Propia.

Cabe destacar que el modelo desarrollado para la presentación de este artículo, tal como se mencionó anteriormente, representa únicamente un comportamiento ideal del oleaje marino. Se espera que adecuar el modelo para representar el comportamiento estocástico del oleaje cause algunas problemáticas adicionales en el sistema de potencia y acerque más las simulaciones a la realidad de este tipo de generación. En futuros trabajos se mejorarán los modelos hasta ahora obtenidos y se agregarán nuevos detalles a las simulaciones llevadas a cabo en este artículo.

### 5. RESULTADOS

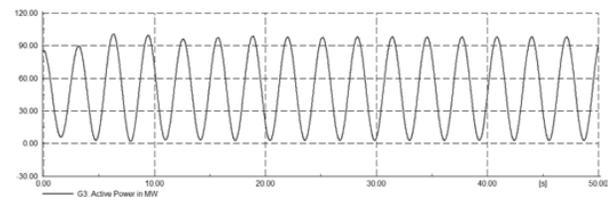
El generador Undimotriz desarrollado se implementa en el sistema IEEE de nueve nodos, el cual es mostrado en la figura 5. El generador undimotriz se implementa en la máquina eléctrica G3, en principio con las mismas características de despacho con las que se diseñó el sistema original ( $P_g=85$  MW;  $Q_g=-10$  MVAR).

La figura 6 muestra el comportamiento de la potencia activa cuando el generador undimotriz está despachando 85 MW y está demandando 10,9 MVAR.



**Figura 5.** Sistema IEEE de nueve nodos.

**Fuente.** Tomada de *DIGSILENT Power Factory*.



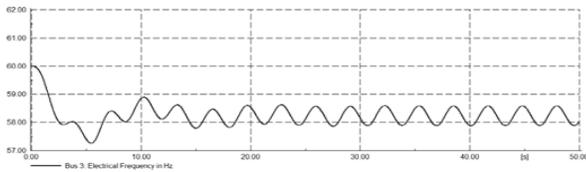
**Figura 6.** Potencia Activa entregada por el generador undimotriz para un despacho de 85 MW.

**Fuente.** Elaboración Propia.

En la figura 6 se puede notar que la potencia extraída del oleaje marino presenta un comportamiento sinusoidal ideal, lo que en la práctica no es totalmente cierto, dado que el oleaje presenta un comportamiento estocástico, variando continuamente su periodo y amplitud. Sin embargo, la figura 6 es suficiente para corroborar los análisis desarrollados en la teoría, mostrando los principales problemas que la integración de la generación undimotriz traería al sistema eléctrico de potencia. Como se puede observar, la potencia generada presenta una oscilación de forma sinusoidal con una frecuencia fundamental baja, lo cual genera resonancias subsíncronas en la red; también es notable que la potencia media entregada por el generador undimotriz, es aproximadamente la mitad de la potencia pico generada, lo que ocasionaría sobrecostos en la aplicación a gran escala de esta tecnología.

La figura 7 muestra la respuesta de la frecuencia del sistema de potencia. Se puede notar que no es viable agregar un generador undimotriz con una penetración tan alta de potencia al sistema, dado que la frecuencia entraría en rangos inaceptables para la operación del sistema.

Teniendo en cuenta que los generadores del sistema IEEE de nueve nodos deben proporcionar al sistema 320 MW, potencia que cubre la demanda de las cargas conectadas (*Load A*, *Load B* y *Load C* en la figura 5)



**Figura 7.** Respuesta de la frecuencia del sistema para un despacho undimotriz de 85 MW.

**Fuente.** Elaboración Propia.

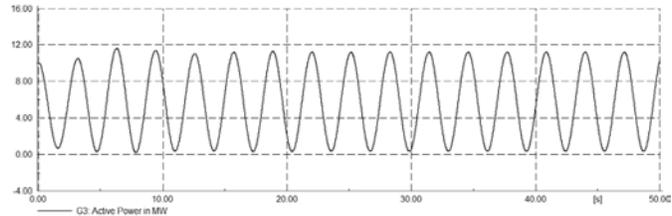
más las pérdidas a través del sistema de transmisión, se busca en las simulaciones llevadas a cabo hallar un porcentaje de generación de potencia activa desde el generador undimotriz (G3), con respecto a la demanda total del sistema, en el que la frecuencia se establezca en un rango de  $60 \pm 0,2$  HZ, rango en el cual se admite la fluctuación de la frecuencia sin necesidad de ejercer acciones correctivas, al ser categorizado como banda normal de operación del sistema interconectado nacional (SIN).

Se encontró que la frecuencia se estabiliza en dicho rango de operación cuando el generador undimotriz se encuentra despachando un máximo de 10 MW, lo que equivale al 3,125% de la potencia activa total demandada por el sistema simulado.

La figura 8 muestra la señal de la potencia extraída del generador undimotriz cuando éste se encuentra despachando 10 MW. Se puede notar que la señal de la potencia trifásica extraída de la planta undimotriz en este caso, presenta la misma característica de la figura 6, variando únicamente en la amplitud de la potencia, la cual depende del despacho programado para el generador. Es notable que ambas señales corresponden con el comportamiento esperado de la ecuación 4.

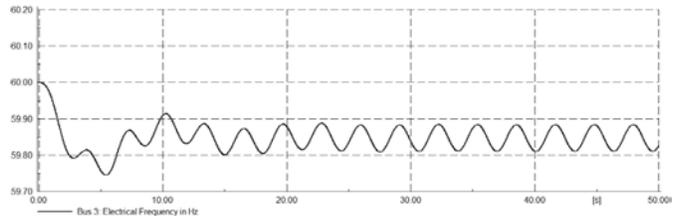
La figura 9 muestra el comportamiento de la frecuencia del sistema, la cual se encuentra oscilando sinusoidalmente en el rango de 59,9 Hz – 59,8 Hz. En este punto se puede afirmar que la frecuencia se encuentra oscilando en la banda normal de operación, por tanto, desde el punto de vista de la señal frecuencia, resulta seguro inyectar este nivel de potencia desde el generador undimotriz al sistema de potencia.

Si se hace una extrapolación lineal del valor de inyección porcentual de potencia undimotriz hallado sin que la frecuencia del sistema se salga de la banda normal de operación en el sistema IEEE de nueve nodos, a la demanda total de potencia del sistema eléctrico Colombiano, la cual bajo un escenario conservador se puede considerar promedio de 6000 MW; se podría generar en el país por medio del oleaje marino una potencia aproximada de 187,5 MW, valor equivalente al



**Figura 8.** Potencia Activa entregada por el generador undimotriz para un despacho de 10 MW.

**Fuente.** Elaboración Propia.



**Figura 9.** Respuesta de la frecuencia del sistema para un despacho undimotriz de 10 MW.

**Fuente.** Elaboración Propia.

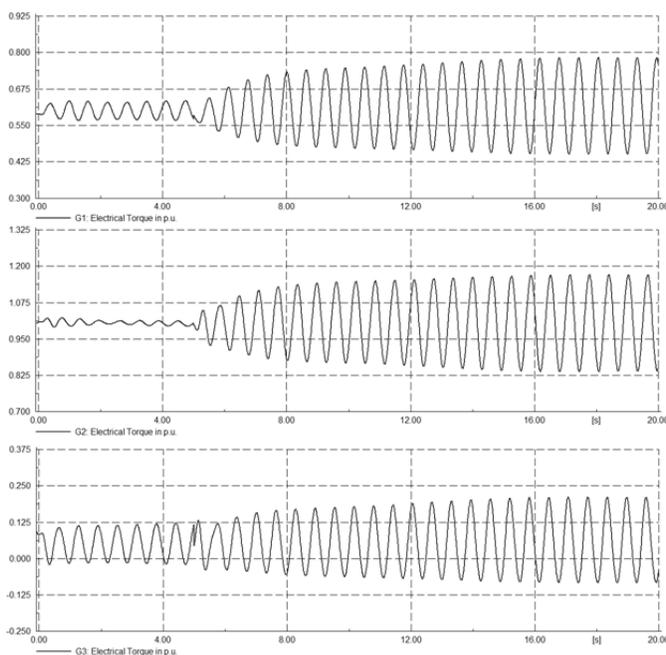
3,125% de la demanda considerada. Es notable que aunque este cálculo no es más que una aproximación rápida, y que la demanda de potencia del sistema eléctrico Colombiano para diferentes horas es muy superior a la considerada, lo que beneficia la generación undimotriz, la cantidad de potencia que podría generarse e interconectarse al sistema eléctrico nacional es considerable, suficiente para por ejemplo proveer la demanda de potencia de dos ciudades del tamaño de Pereira (aproximadamente 450.000 habitantes).

Posteriormente y para hacer un breve análisis de la aparición de resonancia subsíncrona en el sistema eléctrico de potencia debido a la generación undimotriz, se agregó compensación serie a la línea 5 del sistema simulado, buscando inducir el fenómeno y revisar sus contingencias en la red eléctrica y en los componentes con que ésta cuenta. Para inducir dicho fenómeno, se configuró el generador undimotriz para que la potencia extraída de éste tuviera una frecuencia angular de 10 rad/s; dada esta frecuencia en el sistema undimotriz, el capacitor que actúa como compensador induce resonancias subsíncronas cuando se encuentra en un rango entre 500  $\mu$ F y 1500  $\mu$ F. El capacitor se ubicó entre el final de la línea 5 y el Bus 6 (ver figura 5). Dicho capacitor se puso en paralelo con un *breaker*, el cual inicialmente se encuentra cerrado, lo que conecta directamente la línea al nodo. Se realizó en *DIGSILENT* una simulación dinámica de 20 segundos, buscando analizar el comportamiento del torque eléctrico proveniente de los generadores cuando en el sistema se presenta el fenómeno de resonancia subsíncrona. En dicha simulación el *breaker* se abre a los 5 segundos, lo que ingresa a la línea de transmisión el capacitor en serie e induce resonancia subsíncrona en la red.

La figura 10 muestra el comportamiento del torque eléctrico generado por las tres máquinas síncronas con que cuenta el sistema. Se puede notar que como se esperaba, al entrar el capacitor en serie con la línea de transmisión, el torque eléctrico generado por cada una de las máquinas síncronas se incrementa de manera desmedida.

Se debe tener en cuenta que integrar a la red eléctrica la potencia extraída del generador undimotriz, la cual presenta un comportamiento oscilante, hace que la potencia generada por las demás centrales generadoras también presente dicho comportamiento. Esto se debe a que en todo momento los generadores deben proveer al sistema un valor constante de potencia, por tanto, las demás plantas deben adaptarse a la fluctuación de la potencia entregada por el parque undimotriz. Al torque eléctrico ser proporcional a la potencia, éste sufre el mismo efecto, así que únicamente el hecho de agregar generación undimotriz al sistema eléctrico causa que el torque eléctrico en todas las plantas generadoras se presente de manera oscilante. Lo que se puede notar en la figura 10 es que con la presencia de compensación serie en el sistema, y dado el fenómeno de resonancia subsíncrona, el torque eléctrico se incrementa desproporcionadamente en todas las máquinas y por ende la potencia generada por cada una.

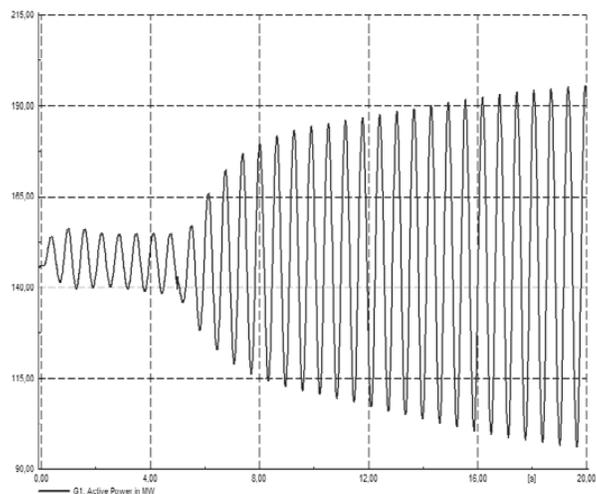
En la figura 10 se puede notar también que el fenómeno de resonancia subsíncrona afecta todas las máquinas generadoras conectadas a la red, aunque se ven más afectadas las máquinas que mayor potencia estén generando; por ende, el generador undimotriz, el cual como se mencionó anteriormente debe entregar una potencia pequeña al sistema con respecto a los demás generadores, es el que menos se ve afectado por la resonancia subsíncrona, aunque es el principal causante de ésta.



**Figura 10.** Torque Eléctrico generado por G1, G2 y G3 respectivamente.

**Fuente.** Elaboración Propia.

La figura 11 muestra la potencia generada por la máquina G1, la cual actúa como *slack* en el sistema analizado.



**Figura 11.** Señal de la Potencia Activa generada por G1, después de que se presenta el fenómeno de Resonancia Subsíncrona.

**Fuente.** Elaboración Propia.

En los primeros 5 segundos de la simulación, se puede notar que la potencia generada por la máquina síncrona G1 presenta una oscilación sinusoidal, con un valor de amplitud pico-pico cercano a las 12,5 MW. Después de que el capacitor entra en serie con la línea de transmisión y se induce resonancia subsíncrona en la red, la potencia, proporcional a la señal de torque eléctrico mostrada en la figura 9, empieza a incrementarse de una manera desmedida. En 20 segundos el valor de amplitud pico-pico de la señal de potencia es cercano a los 100 MW, es decir, se incrementó en un 800% con respecto al sistema sin el capacitor conectado en serie.

Este fenómeno es el que preocupa para la integración de la generación undimotriz, dado que un incremento de este nivel en la oscilación de la señal de potencia haría que las protecciones de potencia oscilante con que cuentan los sistemas eléctricos actúen, aislando ciertas partes de la red, o incluso desenergizando el sistema completo. Incluso si las protecciones no actuaran, oscilaciones tan grandes de potencia, como se mostró en la figura 7, ocasionarían que la frecuencia de la red salga de una banda segura para la operación, lo que también podría causar un *blackout* en el sistema.

Es necesario entonces estudiar y prevenir el fenómeno de resonancia subsíncrona, dado que es normal en sistemas de potencia como el Colombiano contar con líneas de transmisión con compensación conectada en serie.

## 6. CONCLUSIONES

Generar energía mediante el aprovechamiento del oleaje marino presenta muchas ventajas desde el punto de vista ambiental y de la aceptación pública, se debe avanzar entonces en el estudio de métodos de integración seguros de este tipo de energía con los sistemas eléctricos de potencia, buscando estudiar, caracterizar y corregir las contingencias que esta energía traería al sistema.

Es necesario aclarar que para la implementación de la generación undimotriz aún hay muchos estudios que se deben realizar, entre ellos, uno que analice el impacto de la potencia oscilante en las protecciones con que cuenta la red, buscando que éstas puedan permitir cierto nivel de oscilación, la cual es inherente al sistema de generación analizado. Se espera que la oscilación de la potencia extraída de los generadores “convencionales” conectados a la red, disminuya a medida que haya más plantas conectadas al sistema, por tanto, para un sistema robusto como el Colombiano, las oscilaciones de potencia en las centrales convencionales podrían ser muy pequeñas y ser asumidas por las ratas de variación de cada planta.

Se encontró que entre mayor sea el despacho de potencia activa desde un generador undimotriz hacia el sistema eléctrico, más inconvenientes se tendrá con la frecuencia del sistema. Para el sistema IEEE de nueve nodos, se halló como punto aceptable generar por medio del oleaje marino hasta el 3,125 % de la potencia total demandada por el sistema, después de esto, la oscilación en la frecuencia haría inoperable la red.

Se debe tener en cuenta además que la cantidad de potencia oscilante que puedo inyectar, teniendo en cuenta que la señal de frecuencia se mantenga en la banda normal de operación, depende de las singularidades de cada sistema. Por tanto, se requiere un estudio mucho más riguroso que garantice la seguridad de la red a la que se vaya a integrar este tipo de tecnología.

Teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones, se puede notar que construir pequeñas plantas generadoras en las costas Colombianas, buscando llevar energía eléctrica a zonas de difícil acceso de una manera limpia, amigable con el medio ambiente y sin interrupciones, no ocasionaría ningún problema en la operación del sistema interconectado nacional, desde el punto de vista de la señal de frecuencia. Incluso, se podría pensar en generar la potencia necesaria para suplir la demanda de una ciudad como Pereira, lo cual es bastante grande y ambicioso.

Es necesario para la implementación de la generación undimotriz el correcto planeamiento y conocimiento del sistema eléctrico al cual se le va conectar dicha tecnología. Entre más robusto sea el sistema, mejores

condiciones presenta para la integración de esta tecnología. El análisis y las medidas preventivas y correctivas ante la posible ocurrencia de resonancia subsíncrona resultan fundamentales, dado que si dicho fenómeno se presentara, podría causar daños enormes a la estabilidad de la red y a la integridad física de los generadores que estén conectados a ésta.

## REFERENCIAS

- Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., ..., Thorpe, T. (2002, October). “Wave energy in europe: Current status and perspectives”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (5), 405 - 431.
- Bahrman, M., E., R.J.P., & H.S.P. (1980, May). “Experience with hvdc - turbine-generator torsional interaction at square butte”. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-99* (3), 966-975. doi:10.1109/TPAS.1980.319726
- de O. Falcao, A. F., & Justino, P. A. P. (1999, December). “Owc wave energy devices with air flow control”. *Ocean Engineering*, 26 (12), 1275-1295.
- de Sousa Prado, M. G., Gardner, F., Damen, M., & Polinder, H. (2006, December). “Modelling and test results of the archimedes wave swing”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220 (A8), 855-868.
- Gyugyi, L., Schauder, C. D., & Sen, K. (1997, Jan). “Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines”. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 12 (1), 406-417. doi: 10.1109/61.568265
- Henderson, R. (2006, February). “Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the pelamis wave energy converter”. *Renewable Energy*, 31 (1), 271-283.
- Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E., & Sorensen, H. C. (2006, February). “Prototype testing of the wave energy converter wave dragon”. *Renewable Energy*, 31 (2), 181-189.
- Kundur, P. (1994). “Power system stability and control”. McGraw-Hill Professional.
- Padiyar, K. (2004). “Power system dynamics: Stability and control”. (Second ed.). ANSHANPUB.
- Polinder, H., Damen, M. E. C., & Gardner, F. (2004, september). “Linear pm generator system for wave energy conversion in AWS”. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 19 (3), 583 - 589.
- Polinder, H., Mecrow, B., Jack, A., Dickinson, P., & Mueller, M. (2005, June). “Conventional and tfpm linear generators for direct-drive wave energy conversion”. *Energy Conversion, IEEE Transactions*, 20 (2), 260 - 267.
- Proposed terms and definitions for subsynchronous oscillations. (1980, March). *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-99* (2), 506-511. doi: 10.1109/TPAS.1980.319686
- Rademakers, L., Van Schie, R., Schuitema, R., Vriesema, B., & Gardner, F. (1998). “Physical model testing for characterising the AWS”. Netherlands Energy Research Foundation ECN.
- Rodríguez, M. V. (2009, Junio). “Estudio de la resonancia subsíncrona”, Tesis de Pregrado, Universidad Pontificia

Comillas.

- Rostamkolai, N., Piwko, R. J., Larsen, E., Fisher, D., Mobarak, M. A., & Poitras, A. (1990, Nov). "Subsynchronous interactions with static var compensators- concepts and practical implications". *Power Systems, IEEE Transactions on*, 5 (4), 1324-1332. doi: 10.1109/59.99384
- Shek, J., Macpherson, D., Mueller, M., & Xiang, J. (2007, March). "Reaction force control of a linear electrical generator for direct drive wave energy conversion". *Renewable Power Generation, IET*, 1 (1), 17 - 24.
- Song, Y., & Johns, A. (1999). "Flexible ac transmission systems (facts)". Institution of Electrical Engineers.
- Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations. (1985, June). *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-104 (6), 1326-1334. doi: 10.1109/TPAS.1985.319152
- Viveros, A. M. (2004). "Análisis de resonancia subsíncrona y contramedidas". Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Walker, D., Bowler, C. E. J., Jackson, R., & Hodges, D. (1975, Sept). "Results of subsynchronous resonance test at Mohave". *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 94 (5), 1878-1889. doi: 10.1109/T-PAS.1975.32034
- Washio, Y., Osawa, H., & Ogata, T. (2001). "The open sea tests of the offshore floating type wave power device "mighty whale characteristics of wave energy absorption and power generation". (Vol. 1, p. 579 - 585). *OCEANS, 2001. MTS/ IEEE Conference and Exhibition*.
- Wu, F., Zhang, X.-P., Ju, P., & M.J.H., S. (2008, August). "Modeling and control of AWS based wave energy conversion integrated into power grids". *Power Systems, IEEE Transactions*, 23 (3), 1196 - 1204.
- Wu, F., Zhang, X. P., Ju, P., & Sterling, M. (2009, November). "Optimal control for aws-based wave energy conversion system". *Power Systems, IEEE Transactions on*, 24 (4), 1747 - 1755. 19