



ESTABILIDAD DE TENSIÓN Y COMPENSACIÓN ELECTRÓNICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

VOLTAGE STABILITY AND ELECTRONIC COMPENSATION IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS USING SIMULATION MODELS

M. Campaña^{1,*} , P. Masache¹ , E. Inga¹ , D. Carrión¹ 

Recibido: 21-04-2021, Recibido tras revisión: 24-09-2021, Aceptado: 08-11-2021, Publicado: 01-01-2023

Resumen

El aumento de la demanda en los distintos sistemas eléctricos de potencia (SEP) tiene un impacto negativo en la estabilidad de la tensión, la confiabilidad y la calidad del suministro eléctrico. El perfil de tensión disminuye cuando las unidades de generación no son capaces de suministrar potencia reactiva al sistema eléctrico en los momentos que se requiere. Con el desarrollo de la electrónica de potencia y los complejos sistemas de control, se han podido introducir dispositivos de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS, del inglés *Flexible Alternating Current Transmission System*). En este artículo se analiza en detalle el impacto que genera la introducción de un tipo de FACTS que permite la compensación de potencia reactiva en el SEP. Además, se analizará una metodología para decidir la capacidad del compensador síncrono estático (STATCOM, del inglés *Static Synchronous Compensator*) y su ubicación óptima con la ejecución de flujos de potencia continuos (FPC). Finalmente, se estudiará el impacto positivo de la instalación de un control estabilizador de potencia (PSS, del inglés *Power System Stabilizer*) para asegurar la estabilidad de tensión en el SEP. Este artículo se desarrolla utilizando el sistema base IEEE de 14 barras bajo dos modelos matemáticos para el cálculo del flujo de potencia desarrollados en el software Matlab, que son: i) utilizando las ecuaciones de balance de potencia y ii) Newton Raphson con el *toolbox* de MATLAB (PSAT, del inglés *Power System Analysis Toolbox*).

Palabras clave: factor de carga, PSAT, contingencia, flujo de potencia continuo, PSS, STATCOM

Abstract

Increased demand in the different electrical power systems (EPS) has a negative impact in voltage stability, reliability and quality of the power supply. Voltage profile is reduced when generation units are not capable of supplying reactive power to the EPS at the times it is required. With the development of power electronics and complex control systems, flexible alternating current transmission system (FACTS) devices have been introduced. In this article, the impact of the introduction of a type of FACTS that allows reactive power compensation in the EPS is analyzed in detail. Furthermore, a methodology to decide the capacity of the Static Synchronous Compensator (STATCOM) and its optimal location with the execution of continuous power flows (CPF) will be analyzed. Finally, the positive impact of installing a Power System Stabilizer (PSS) control to ensure voltage stability in the EPS will be studied. This article is developed using the IEEE 14-bus base system under two mathematical models for power flow calculation developed in MATLAB software, which are: which are: i) through the power balance equations and ii) Newton Raphson with the toolbox PSAT.

Keywords: Load Factor, PSAT, contingency, Continuous Power Flow, PSS, STATCOM

^{1,*}Grupo de Investigación de Redes eléctricas Inteligentes (GIREI), Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: mcampana@ups.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Campaña, M.; Masache, P.; Inga, E. y Carrión, D. "Estabilidad de tensión y compensación electrónica en sistemas eléctricos de potencia usando herramientas de simulación," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 29, pp. 9-23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.01>.

1. Introducción

La mayoría de las interrupciones en redes eléctricas de transmisión (RET) se originan por inestabilidad de tensión. Las posibles causas pueden ser sistemas eléctricos sobrecargados, presencia de fallas o por falta de potencia reactiva disponible en las unidades de generación. En la actualidad, es posible tener mayor control sobre el margen de tensión en cada una de las barras inherentes al SEP [1–3]. Las RET son las encargadas de suministrar potencia eléctrica desde las unidades de generación hacia las cargas observando criterios de seguridad y confiabilidad. La insuficiencia de potencia reactiva, que una unidad de generación puede suministrar al sistema, puede darse por el aumento de carga en el SEP, provocando que, la estabilidad de tensión del sistema eléctrico se vea degradado [4, 5], especialmente en las barras que operan cerca de sus límites. En [6] se manifiesta que la máxima capacidad de transferencia de potencia eléctrica a través de RET puede ser mejorada al instalar dispositivos FACTS. Los dispositivos FACTS pueden anticipar el control de flujo de potencia, perfil de tensión, mejorar la estabilidad de tensión y minimizar pérdidas. Sin embargo, su alto costo limita la instalación de controladores FACTS en todas las líneas del SEP. En [7, 8] se asegura que los mejores dispositivos FACTS son aquellos que están basados en convertidores tales como STATCOM y el controlador de flujo unificado (UPFC, del inglés *Unified Power Flow Controller*). En el presente artículo se prestará especial atención al compensador estático sincrónico y su control directo en la estabilidad de tensión.

Otro detalle que se aborda es el análisis dinámico frente a oscilaciones electromecánicas presentes en el SEP. Estas oscilaciones pueden ser locales (un solo generador) o pueden involucrar una cantidad de generadores ampliamente separados geográficamente (oscilaciones entre áreas). Si no se controla, estas oscilaciones pueden conducir a una interrupción de suministro de potencia total o parcial [9]. Las oscilaciones electromecánicas pueden ser amortiguadas mediante la aplicación de PSS. Los PSS tienen como objetivo modular la tensión de extinción de un generador síncrono actuando a través del regulador de tensión (AVR) [10, 11] y son económicamente viables para la mejora de la estabilidad de tensión provocado por pequeñas perturbaciones [12–14]. Por lo tanto, PSS utiliza señales auxiliares de estabilización, como la velocidad del eje, la frecuencia y potencia para cambiar la señal de entrada al AVR. El diagrama de bloques del PSS utilizado en el presente artículo puede ser verificado en [9], [15, 16]. En este aspecto uno de los principales aportes del presente artículo radica en comprobar que la inestabilidad de tensión provocado por una contingencia $N - 1$ (apertura de una línea) puede eliminarse si se agrega un PSS en la barra 1 del SEP propuesto (Figura 1).

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la estabilidad de tensión y los efectos directos al instalar compensadores estáticos sincrónicos en barras que su tensión nominal es crítica, es decir que este bajo o a punto de superar el límite inferior de tensión (0.95 p. u.). Se usa el caso base de IEEE de 14 barras para validar la metodología propuesta. Además, mediante la aplicación de PSS y simulaciones en el dominio del tiempo, con el *toolbox* PSAT, se comprobará que la utilización de sistemas estabilizadores de potencia se puede mantener o amortiguar el efecto negativo en la estabilidad del SEP al presentarse una contingencia $N - 1$. Para lograr con el objetivo del presente artículo se simulará flujos de potencia en estado estático bajo dos modelos matemáticos iterativos basados en ecuaciones de balance de potencia y la metodología de Newton Raphson. Además, este análisis nos permitirá evaluar el rendimiento y márgenes de error entre cada modelo. Es de mucha importancia citar que se utilizará el *software* Matlab y el *toolbox* PSAT desarrollado por Federico Milano.

El análisis de flujo de potencia ayudará a verificar la magnitud, en estado estable, de tensión, ángulo, potencia activa y potencia reactiva de carga y generación. Los diferentes estados de operación variarán en función de los diferentes parámetros iniciales a las que será sometido el SEP obtenido del caso base IEEE 14 barras. Estos parámetros permitirán generar condiciones inestables en el SEP y posteriormente evaluar y lograr determinar técnicamente la mejor acción para recuperar la estabilidad en el sistema eléctrico de potencia. Las acciones a las que será sometido el SEP son: el incremento simétrico de la carga mediante un factor de carga λ que multiplicará de forma directa a la potencia activa y reactiva de todas las cargas y la apertura de líneas que simulan contingencias $N - 1$.

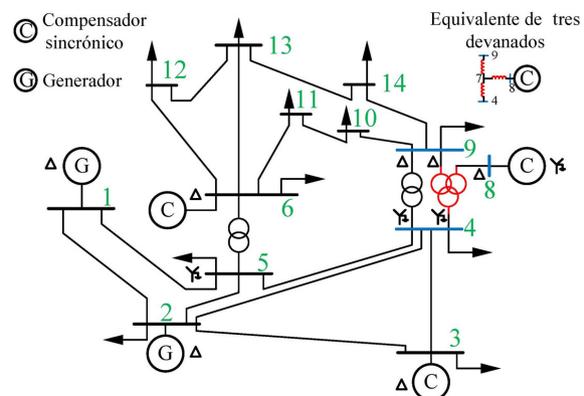


Figura 1. Caso base Sistema IEEE 14 barras

En la sección II se analizará brevemente el impacto positivo sobre los perfiles de tensión en un SEP al utilizar compensación estática sincrónica en barras de transferencia de potencia. En la sección III se hace la formulación del problema y se explica la metodología

aplicada en el presente artículo. En la sección IV se expone los resultados obtenidos de las simulaciones. Finalmente, las conclusiones se presentan en la sección V.

2. Materiales y métodos

Los dispositivos FACTS no solo son capaces de controlar la potencia transmitida y aumentar la capacidad de las líneas, sino que, además, pueden suprimir las fluctuaciones de potencia [4], [17, 18]. Estos dispositivos están contruidos con elementos estáticos y mediante elementos de electrónica de potencia que, en su conjunto, nos permite mejorar el control y aumentar la capacidad de transferencia de energía en sistemas de corriente alterna (CA). El principio de funcionamiento del compensador sincrónico, que es un tipo de FACTS, opera bajo tres criterios fundamentales i) un condensador de corriente continua (CC) detrás de un transformador opera como una fuente de tensión controlable, ii) la diferencia de tensión en la reactancia del transformador produce intercambios de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y el SEP y iii) la magnitud de tensión de salida del STATCOM se puede controlar a través de la variación de tensión que circula por el condensador de CC [19–21]. Una estructura básica que resume la arquitectura del STATCOM se ilustra con la Figura 2.

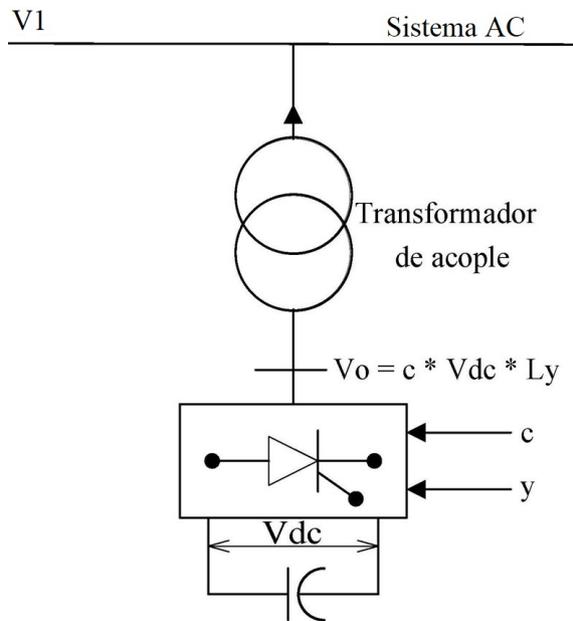


Figura 2. Estructura básica de STATCOM tipo 2

Existen dos tipos de compensadores estáticos sincrónicos: el compensador de tipo 1 puede controlar la potencia activa y reactiva en una línea de transmisión, mientras que la de tipo 2 solo se puede controlar el ángulo ψ y la ganancia c se mantiene fija. ψ es la diferencia angular entre V_1 (tensión de la barra STATCOM)

y V_0 (Figura 2). Además, el valor de ψ debe mantenerse muy pequeño para poder controlar la potencia reactiva y la tensión deseada del sistema. Para valores pequeños de ψ , la potencia reactiva suministrada por el STATCOM tiene una relación lineal [22, 23]. Por lo tanto, los compensadores sincrónicos estáticos de tipo 2 no pueden suministrar potencia activa, puesto que, consume potencia activa para compensar las pérdidas del transformador y las pérdidas por conmutación. En consecuencia, dependiendo del nivel de tensión del sistema y del tipo de compensador, el STATCOM puede operar como un capacitor o como un inductor. Es importante mencionar que en el presente artículo se utilizará el STATCOM de tipo 2. El STATCOM puede ser modelado como una fuente de tensión sincrónica que tiene límites máximos y mínimos de magnitud de tensión. Además, el STATCOM observa límites y en función de lo requerido es capaz de generar o absorber potencia reactiva [24–26]. Es importante citar que en este artículo el STATCOM será modelado como una fuente de tensión permitiendo un mecanismo de soporte de tensión rígido.

La metodología implementada para realizar el análisis del problema observa los siguientes planteamientos i) un análisis del flujo de potencia en el sistema a partir de ecuaciones diferenciales comparándolo con el método de Newton Raphson y ii) análisis de estabilidad de tensión y ángulo. El SEP que se analiza se ilustra en la Figura 1. El sistema cuenta con 5 barras de generación, 11 cargas y 20 líneas de transmisión. La base del sistema es 100 MVA y la barra 1 está definida como *Slack* o bus de referencia. Este será analizado en dos momentos i) flujo de potencia y la instalación arbitraria de un STATCOM en las barras 13 y 14 y ii) se analizará la estabilidad de tensión observando FPC que permite observar el comportamiento del SEP mediante el incremento del factor de carga. El flujo de potencia será visto bajo dos vías i) modelo matemático desarrollado en Matlab considerando las ecuaciones de balance de potencia y ii) flujo de potencia empleando el *toolbox* PSAT. Esto nos permitirá evidenciar márgenes de error y rendimiento de cada modelo.

Se sabe que al incrementar la carga tanto en potencia activa como reactiva el sistema se verá estresado y los valores referenciales de tensión en cada barra se degradarán. Si las unidades de generación no son capaces de proporcionar la potencia reactiva que demanda el sistema, estos valores de tensión, disminuyen. Esta disminución de tensión en las barras comprometerá la estabilidad de tensión en el SEP. Para esta investigación se aumentará el factor de carga $\lambda = 50 \%$, es decir, λ será igual a 1.5 p. u. Con esto se provoca estrés en el sistema y mediante un flujo de potencia en estado estático se podrá apreciar las magnitudes de tensión actualizadas con incremento de carga. Una vez estresado el SEP a causa del factor de carga se procede a seleccionar las barras 13 y 14

(Figura 1) como sitios candidatos para la instalación de STATCOM. El objetivo fundamental es lograr determinar el tipo de STATCOM y la mejor ubicación considerando criterios técnicos al menor costo. Los criterios básicos para el dimensionamiento y selección del mejor sitio para instalar un STATCOM se encuentra definida por la literatura considerando tres factores de suma importancia: i) se debe seleccionar la capacidad mínima del STATCOM en términos de Mvar que, ii) garanticen tensión dentro de los límites permitidos (1.05-0.95 p. u.) verificando que iii) las pérdidas de potencia reactiva total del SEP sean mínimas. En un segundo momento se analizará la estabilidad del sistema eléctrico frente a contingencias $N - 1$ en la línea 2-4 de la Figura 1. Finalmente, se simulará la afectación del STATCOM en el SEP antes y después de su instalación.

El sistema eléctrico moderno está formado por una gran mezcla de fuentes de energía renovable, cargas variables y flexibles, y también está experimentando una situación en la que un número significativo de generadores convencionales está siendo sustituido por fuentes basadas en la electrónica de potencia [27]. En consecuencia, los estabilizadores del SEP son controladores instalados en generadores síncronos y su principal función es amortiguar las oscilaciones del sistema eléctrico mediante el control de la excitación con la finalidad de aumentar el margen de estabilidad frente a oscilaciones de baja frecuencia presentada en el SEP. Los controladores PSS tienen dos estructuras compuestas por i) etapas de compensación de ganancia y fase y ii) compuesta por tres bandas que corresponden a un rango de frecuencia específico (baja, intermedia y alta frecuencia) en la que cada banda está compuesta por dos ramas que se basan en filtros diferenciales (con una ganancia, bloques de retardo y un bloque híbrido) [28]. En consecuencia, el diseño de estabilizadores de sistemas de potencia es una tarea ardua y que requiere mucho tiempo, por lo que una alternativa para el ajuste de los controladores es el uso de métodos de optimización [29]. En [30] se propone el diseño óptimo de PSS multimáquina para varias condiciones de funcionamiento simultáneamente en estado estacionario.

2.1. Metodología para el cálculo de flujo de potencia

Para conocer el comportamiento del SEP en un punto de operación dado se realiza el cómputo del flujo de potencia; la metodología y las ecuaciones que modelan el flujo de potencia se detallan a continuación:

- Se inicializa las variables no conocidas del sistema. Tensión igual a 1 p. u. y ángulos igual a 0 rad.

- Admitancia del sistema (Ybus)

$$Y_{ii} = \sum_{k=1} \left(\frac{1}{Z_{ik}} \right) + \sum (Y_i) \quad (1)$$

$$Y_{ij} = -\frac{1}{Z_{ij}} \quad (2)$$

- Ecuaciones que rigen el flujo de potencia

$$P_i = \sum_{k=1} (V_i * V_k * (G_{ik} * \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} * \sin(\delta_i - \delta_k))) \quad (3)$$

$$Q_i = \sum_{k=1} (V_i * V_k * (G_{ik} * \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} * \cos(\delta_i - \delta_k))) \quad (4)$$

- Balance de potencia activa y reactiva

$$\Delta P_i = P_{gen_i} - P_{di} - P_i \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = Q_{gen_i} - Q_{di} - Q_i \quad (6)$$

- Matriz jacobiana

$$\begin{bmatrix} \frac{d(\Delta P_i)}{d(\delta_i)} & \frac{d(\Delta P_i)}{d(V_i)} * |V_i| \\ \frac{d(\Delta Q_i)}{d(\delta_i)} & \frac{d(\Delta Q_i)}{d(V_i)} * |V_i| \end{bmatrix} = J \quad (7)$$

- Solución de ecuaciones

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} = J^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

- Nuevos valores de iteración

$$\begin{bmatrix} \delta_{i+1} \\ V_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

- Criterio de parada

$$\max \left(\begin{bmatrix} \Delta P_{i+1} \\ \Delta Q_{i+1} \end{bmatrix} \right) \leq 1e^{-5} \quad (10)$$

2.2. Capacidad de transferencia del sistema

Permite conocer cuál es la transferencia máxima de potencia permitida en el sistema eléctrico cuando se produce una contingencia $N - 1$; para calcular este índice se utiliza el siguiente modelo matemático que se representan en las ecuaciones 11-14.

- Capacidad total de transferencia

$$TTC = \sum (P_{Load} + \lambda_{max} * \sum (\Delta P_{Loss})) \quad (11)$$

- Potenciar real transmitida

$$ETC = \sum (P_{Load}) \quad (12)$$

- Margen de transmisión antes de llegar a la inestabilidad

$$TRM = 0.05 * TTC \quad (13)$$

- Capacidad de transferencia

$$ATC = TTC - ETC - TRM \quad (14)$$

2.3. Estabilidad de tensión

La estabilidad de tensión se lo puede verificar a partir de la utilización de FPC. El objetivo de FPC es incrementar λ periódicamente para alcanzar el punto máximo (λ_{max}) de inflexión donde la estabilidad del sistema eléctrico opera al límite; es decir, cuando alcanza su máximo valor ($\lambda = P_{L_{max}}$) las magnitudes de tensión en las diferentes barras del SEP se verán disminuidos hasta llegar a un colapso de tensión. El análisis de estabilidad de tensión se lo realiza a partir de la curva de potencia *vs.* tensión (curvas PV). La curva PV se la simula a partir del flujo de potencia con las ecuaciones (1)-(10).

3. Resultados y discusión

En esta sección se detalla los resultados obtenidos del flujo de potencia y el análisis de estabilidad de tensión. Las magnitudes de tensión, ángulo, potencia activa y reactiva tanto de carga como de generación se obtienen del análisis del SEP en un punto de operación bajo condiciones iniciales específicas. La topología del SEP y sus parámetros eléctricos (líneas de transmisión y barras) se detallan en las Tablas 1 y 2 [31]. En la Tabla 1 se describen la topología del SEP y los parámetros de impedancia de la línea. En la Tabla 2 se detalla las potencias activas y reactivas tanto de generación como de carga y tensión base, además, se define el tipo de línea considerando la siguiente nomenclatura i) 1 barra *Slack* ii) 2 barra PV y iii) 3 barra PQ.

Tabla 1. Datos de líneas caso base IEEE 14 barras

| Línea | Línea desde | Línea hasta | Impedancia de línea [p.u] | | Bsh/2 |
|-------|-------------|-------------|---------------------------|------------|--------|
| | | | Resistencia | Reactancia | |
| 01 | 01 | 05 | 0.05403 | 0.22304 | 0.0219 |
| 02 | 01 | 02 | 0.01938 | 0.05917 | 0.0264 |
| 03 | 02 | 05 | 0.05695 | 0.17388 | 0.0170 |
| 04 | 02 | 04 | 0.05811 | 0.17632 | 0.0246 |
| 05 | 02 | 03 | 0.04699 | 0.19797 | 0.0187 |
| 06 | 03 | 04 | 0.06701 | 0.17103 | 0.0173 |
| 07 | 04 | 09 | 0.00000 | 0.55618 | 0.0000 |
| 08 | 05 | 04 | 0.01335 | 0.04211 | 0.0064 |
| 09 | 05 | 06 | 0.00000 | 0.25202 | 0.0000 |
| 10 | 06 | 12 | 0.12291 | 0.25581 | 0.0000 |
| 11 | 06 | 13 | 0.06615 | 0.13027 | 0.0000 |
| 12 | 06 | 11 | 0.09498 | 0.19890 | 0.0000 |
| 13 | 07 | 09 | 0.00000 | 0.11001 | 0.0000 |
| 14 | 07 | 04 | 0.00000 | 0.20912 | 0.0000 |
| 15 | 07 | 08 | 0.00000 | 0.17615 | 0.0000 |
| 16 | 09 | 14 | 0.12711 | 0.27038 | 0.0000 |
| 17 | 09 | 10 | 0.03181 | 0.08450 | 0.0000 |
| 18 | 10 | 11 | 0.08205 | 0.19207 | 0.0000 |
| 19 | 12 | 13 | 0.22092 | 0.19988 | 0.0000 |
| 20 | 14 | 13 | 0.17093 | 0.34802 | 0.0000 |

Una vez definido los parámetros iniciales y la característica de la RET se proceden a verificar el

rendimiento de dos modelos matemáticos desarrollados en el software Matlab para flujos de potencia. El primer modelo proporciona una solución iterativa en función de ecuaciones de balance de potencia (método tradicional), mientras que, el segundo modelo utiliza el algoritmo de Newton Raphson con el *toolbox* de PSAT.

Tabla 2. Datos por cada barra caso base IEEE 14 barras

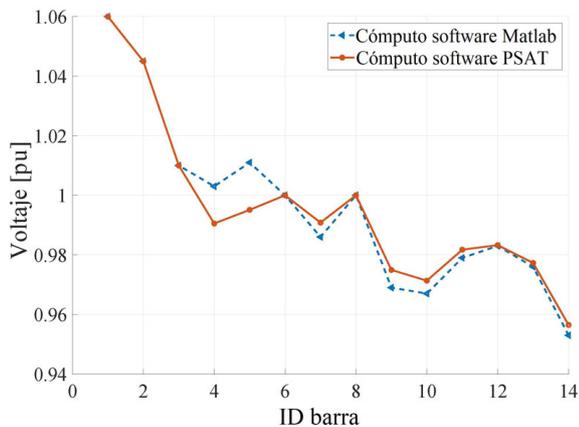
| Barra N.º | Barra Tipo | P_g [p. u] | Q_g [p. u] | P_d [p. u] | Q_d [p. u] | V_m [p. u] | Base [kV] |
|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| 01 | 1 | 1.1417 | -0.169 | 0.0000 | 0.0000 | 1.060 | 69.0 |
| 02 | 2 | 0.4000 | 0.0000 | 0.2170 | 0.1270 | 1.045 | 69.0 |
| 03 | 2 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9420 | 0.1910 | 1.010 | 69.0 |
| 04 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.4780 | 0.0400 | 1.000 | 69.0 |
| 05 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0760 | 0.0160 | 1.000 | 13.8 |
| 06 | 2 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1120 | 0.0750 | 1.000 | 13.8 |
| 07 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.000 | 18.0 |
| 08 | 2 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.000 | 13.8 |
| 09 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2950 | 0.1660 | 1.000 | 13.8 |
| 10 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0900 | 0.0580 | 1.000 | 13.8 |
| 11 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0350 | 0.0180 | 1.000 | 13.8 |
| 12 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0610 | 0.0160 | 1.000 | 13.8 |
| 13 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1380 | 0.0580 | 1.000 | 13.8 |
| 14 | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1490 | 0.0500 | 1.000 | 13.8 |

3.1. Flujo de potencia usando herramientas computacionales

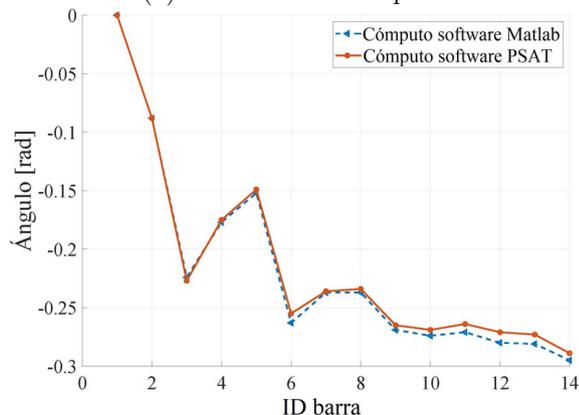
Con la Figura 3 se puede verificar los rangos de variación de tensión y ángulo obtenidos de la simulación. En la Figura 3(a) se expone los niveles de tensión nodal en cada barra del SEP bajo dos modelos de cómputo. De color naranja se muestran los resultados del modelo matemático propuesto en el *toolbox* de PSAT y de color azul la solución del modelo matemáticos propuesto en Matlab con las ecuaciones de balance de potencia. En las barras 4, 5, 7, 9, 10, 11 y 14 el error promedio es de 0.0037 p. u. (Figura 3a); como se puede apreciar, el margen de error presente entre ambos modelos (Matlab - PSAT) es mínima, técnicamente cero. En la Figura 3b se representa la magnitud de los ángulos en cada una de las barras del SEP; de manera similar el margen de error promedio en los resultados del ángulo es de 0.0042 radianes. Por lo tanto, los dos modelos propuestos para el análisis de flujo de potencia en estado estacionario proporcionan soluciones confiables con márgenes de error mínimos. Otro detalle adicional que se puede apreciar con la Figura 3 es que las magnitudes de tensión no superan los límites superior de 1.05 e inferior de 0.95 a excepción de la barra *Slack* que por su naturaleza está definida con una tensión 1.06 p. u.

El margen de error de potencia activa y reactiva se presenta en la Figura 4. El promedio del margen de error de la potencia activa es 0.0019 p. u. como se puede apreciar con la Figura 4(a), mientras que, el margen de error promedio de la potencia reactiva es de 0.0593 pu. Un detalle que se debe tener presente es que

tanto la potencia activa y reactiva de la Figura 4 presentan tendencias similares con márgenes de error que tienden a cero. Por lo tanto, considerando únicamente el análisis comparativo entre los resultados obtenidos en ambos modelos expuestos con las Figuras 3 y 4 se puede concluir que los dos caminos, para dar solución al flujo de potencia, son confiables. Sin embargo, con la Tabla 3 se analiza el rendimiento de los métodos propuestos para el cálculo del flujo de potencia.



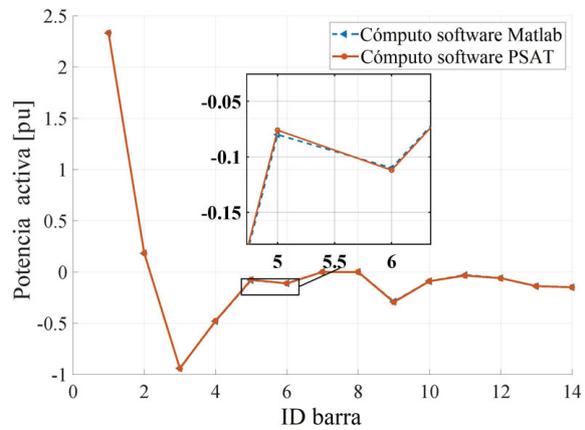
(a) Tensión nodal en p. u.



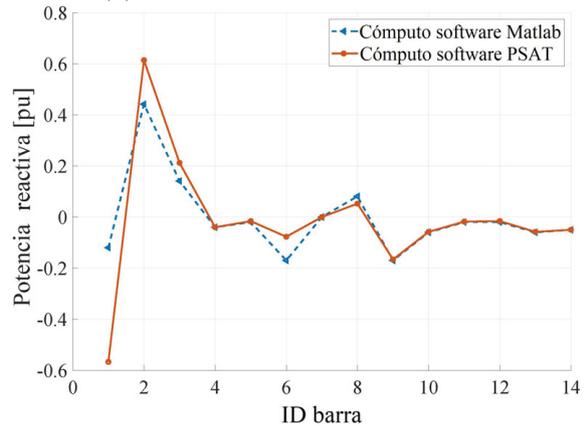
(b) Ángulo nodal en radianes

Figura 3. Análisis nodal del SEP de IEEE de 14 barras

En la Tabla 3 se puede apreciar que los modelos ejecutan el mismo número de iteraciones, sin embargo, el margen promedio de pérdidas totales de potencia activa y reactiva es de 0.0006 y 0.0485, respectivamente; por lo que se puede concluir que son mínimas y tienden a cero. Es importante mencionar que el margen de error en ambos métodos se consideró el mismo valor de 1×10^{-5} . Por otro lado, el *CPU - Time* alcanzado por el método convencional (flujo de potencia resuelto mediante ecuaciones de balance de potencia) es aproximadamente 65 veces mayor (Tabla 3) con lo que definitivamente el *toolbox* PSAT es una herramienta de muy buen rendimiento capaz de proporcionar soluciones confiables en tiempos de máquina muy reducidos.



(a) Potencia activa nodal en p. u.



(b) Potencia reactiva nodal en pu

Figura 4. Análisis nodal del SEP de IEEE de 14 barras

Tabla 3. Rendimiento de modelos matemáticos propuestos para el cómputo del flujo de potencia

| Parámetro | Método convencional | <i>Toolbox</i> PSAT |
|--|---------------------|---------------------|
| <i>CPU - Time</i> [s] | 19.641 | 0.3020 |
| # de iteraciones | 4.0000 | 4.0000 |
| Margen de error pérdidas totales P [p. u.] | 0.1440 | 0.1434 |
| Margen de error pérdidas totales Q [p. u.] | 0.2740 | 0.3225 |

En la Tabla 4 se presentan los resultados iniciales obtenidos del flujo de potencia que serán magnitudes referenciales para dar inicio al estudio de estabilidad de tensión. Es de mucha importancia mencionar que los resultados alcanzados fueron extraídos de la solución al flujo de potencia proporcionado por el *toolbox* PSAT. Como se puede apreciar, es posible monitorear las magnitudes de tensión, ángulo, potencias activa y reactiva en cada una de las barras del SEP; todos los parámetros presentados en la Tabla 4 fueron simulados sin restricciones de límites máximo y mínimo de potencia activa y reactiva.

Por lo tanto, según los valores iniciales el sistema eléctrico el sistema opera en condiciones normales, lo que, supone que respeta límites de tensión establecidos por la normativa. Adicionalmente, con la Tabla 4

se muestra las pérdidas totales de potencia activa y reactiva del SEP.

Tabla 4. Solución flujo de potencia bajo *Newton-Raphson* en caso base IEEE 14 barras

| Barra N.º | Tensión [p. u.] | Ángulo [rad.] | Generación | | Carga | |
|---------------------------|-----------------|---------------|------------|--------|-------|-------|
| | | | MW | Mvar | MW | Mvar |
| 01 | 1.060 | 0.000 | 233.0 | -5.70 | 0.000 | 0.000 |
| 02 | 1.045 | -0.088 | 40.00 | 74.10 | 21.70 | 12.70 |
| 03 | 1.010 | -0.227 | 0.000 | 40.30 | 94.20 | 19.10 |
| 04 | 0.991 | -0.175 | 0.000 | 0.000 | 47.80 | 4.000 |
| 05 | 0.995 | -0.149 | 0.000 | 0.000 | 7.600 | 1.600 |
| 06 | 1.000 | -0.255 | 0.000 | -0.200 | 11.20 | 7.500 |
| 07 | 0.991 | -0.236 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 08 | 1.000 | -0.234 | 0.000 | 5.200 | 0.000 | 0.000 |
| 09 | 0.975 | -0.265 | 0.000 | 0.000 | 29.50 | 16.60 |
| 10 | 0.971 | -0.269 | 0.000 | 0.000 | 9.000 | 5.800 |
| 11 | 0.982 | -0.264 | 0.000 | 0.000 | 3.500 | 1.800 |
| 12 | 0.983 | -0.271 | 0.000 | 0.000 | 6.100 | 1.600 |
| 13 | 0.977 | -0.273 | 0.000 | 0.000 | 13.50 | 5.800 |
| 14 | 0.956 | -0.289 | 0.000 | 0.000 | 14.90 | 5.000 |
| Suma | | | 273.6 | 113.8 | 259.3 | 81.50 |
| Pérdida total de potencia | | | | | | |
| Activa [MW] | 14.34 | | | | | |
| Reactiva [Mvar] | 32.25 | | | | | |

En la Tabla 5 se presentan los resultados con factor de carga del 50 % tanto en potencia activa como reactiva. Adicionalmente, se restringe al flujo de potencia observando límites potencia en las barras de generación cuyas magnitudes oscilan entre 0.5 p. u. para la potencia activa y -0.06 p. u. en la potencia reactiva. Si se realiza la comparación entre los dos casos presentados en las Tablas 4 y 5 se puede apreciar con el incremento de potencia activa y reactiva tanto la generada como la consumida. Sin embargo, las magnitudes de tensión en la barra 14 excedieron el límite inferior de 0.95 p. u. (Tabla 5).

Tabla 5. Solución del flujo de potencia en condiciones de incremento de carga al 50 % caso base IEEE 14 barras

| Barra N.º | Tensión [p. u.] | Ángulo [rad.] | Generación | | Carga | |
|---------------------------|-----------------|---------------|------------|-------|-------|-------|
| | | | MW | Mvar | MW | Mvar |
| 01 | 1.070 | 0.000 | 384.4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 02 | 1.045 | -0.145 | 40.00 | 114.2 | 32.60 | 19.10 |
| 03 | 1.010 | -0.361 | 0.000 | 81.40 | 141.3 | 28.70 |
| 04 | 0.973 | -0.281 | 0.000 | 0.000 | 71.70 | 6.000 |
| 05 | 0.980 | -0.239 | 0.000 | 0.000 | 11.40 | 2.400 |
| 06 | 1.000 | -0.405 | 0.000 | 26.90 | 16.80 | 11.30 |
| 07 | 0.973 | -0.370 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 08 | 1.000 | -0.370 | 0.000 | 15.20 | 0.000 | 0.000 |
| 09 | 0.948 | -0.419 | 0.000 | 0.000 | 44.30 | 24.90 |
| 10 | 0.945 | -0.425 | 0.000 | 0.000 | 13.50 | 8.700 |
| 11 | 0.966 | -0.419 | 0.000 | 0.000 | 5.300 | 2.700 |
| 12 | 0.973 | -0.431 | 0.000 | 0.000 | 9.200 | 2.400 |
| 13 | 0.963 | -0.433 | 0.000 | 0.000 | 20.70 | 8.700 |
| 14 | 0.924 | -0.457 | 0.000 | 0.000 | 22.40 | 7.500 |
| Suma | | | 424.4 | 237.0 | 389.0 | 122.3 |
| Pérdida total de potencia | | | | | | |
| Activa [MW] | 35.46 | | | | | |
| Reactiva [Mvar] | 115.5 | | | | | |

El nuevo flujo de potencia, considerando límites de potencia activa con la implementación de STATCOM en las barras 13 y 14, se ilustra con la Tabla 6. Es muy importante recordar que el STATCOM se lo modela como una fuente de tensión. Los parámetros iniciales de la fuente de tensión se fijan en 1 p. u. y 0 grados, de esta manera, al ejecutar un flujo de potencia con el *toolbox* PSAT obtendremos la potencia reactiva necesaria para compensar y conservar la magnitud de tensión requerida en 1 p. u. en la barra instalación del STATCOM. Es decir, esta magnitud de potencia reactiva generada será necesaria para compensar al sistema frente a un incremento del factor de carga $\lambda = 1.5$ p. u. de la demanda. Como se puede apreciar en la Tabla 6 la potencia reactiva de generación, para mantener la tensión en 1 p. u. en las barras 13 y 14 en momentos diferentes, alcanzan una magnitud de 40.5 y 34.8 Mvar, respectivamente. Además, es notorio que al colocar el STATCOM en la barra 13 los perfiles de tensión no alcanzan los valores mínimos admisibles, mientras que, al colocar el STATCOM en la barra 14 la tensión en las barras es adecuados. Un detalle adicional es que el SEP en condiciones normales y en condiciones de estrés ($\lambda = 1.5$ p. u.) registra magnitudes mínimas de 0.956 y 0.924 en la barra 14, respectivamente; lo que significa, una posible barra para instalar el STATCOM porque es la barra donde la tensión es de menor magnitud en p. u. y que, por lo tanto, requiere ser compensada con potencia reactiva para elevar la magnitud de tensión a rangos adecuados.

Por otro lado, en la Tabla 6 se presenta la pérdida total de potencia activa y reactiva. Se puede notar que la pérdida de potencia activa es de igual magnitud, sea cual sea, la barra en que se decida instalar el STATCOM. Sin embargo, existe una ligera diferencia en términos de pérdida total de potencia reactiva si al STATCOM se lo instala en la barra 13 o 14 (Tabla 6) siendo la de menor magnitud al instalar el STATCOM en la barra 14. Por lo tanto, al minimizar las pérdidas totales de potencia reactiva, mantener los perfiles tensión en rangos moderados y ser el de menor clase se logra determinar que la ubicación óptima del STATCOM. Entiéndase por clase a la magnitud en Mvar requerido para el STATCOM. Finalmente, al aumentar el factor de carga a un 50 % en todas las barras PQ (barras de carga) se requiere instalar un STATCOM de clase 34.80 Mvar en la barra 14 con la finalidad de mantener los niveles de tensión en magnitudes permitidas garantizando así estabilidad de tensión mediante el uso de compensación estática sincrónica minimizando las pérdidas. Cuando se minimiza pérdidas se maximiza la capacidad de transferencia del flujo de potencia en el SEP como se especifica en la literatura.

Tabla 6. Solución flujo de potencia aplicando STATCOM caso base IEEE 14 barras

| Barra N.º | STATCOM Barra 13 | | | | | | STATCOM Barra 14 | | | | | |
|-----------|------------------|--------|------------|--------|-------|-------|------------------|--------|------------|-------|-------|-------|
| | Tensión | Ángulo | Generación | | Carga | | Tensión | Ángulo | Generación | | Carga | |
| | [p. u.] | [rad.] | MW | Mvar | MW | Mvar | [p. u.] | [rad.] | MW | Mvar | MW | Mvar |
| 01 | 1.070 | 0.000 | 384.5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.071 | 0.000 | 384.3 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 02 | 1.045 | -0.145 | 40.00 | 113.0 | 32.60 | 19.10 | 1.045 | -0.145 | 40.00 | 109.3 | 32.60 | 19.10 |
| 03 | 1.010 | -0.361 | 0.000 | 80.80 | 141.3 | 28.70 | 1.010 | -0.361 | 0.000 | 79.10 | 141.3 | 28.70 |
| 04 | 0.974 | -0.281 | 0.000 | 0.000 | 71.70 | 6.000 | 0.977 | -0.282 | 0.000 | 0.000 | 71.70 | 6.000 |
| 05 | 0.980 | -0.239 | 0.000 | 0.000 | 11.40 | 2.400 | 0.982 | -0.240 | 0.000 | 0.000 | 11.40 | 2.400 |
| 06 | 1.000 | -0.404 | 0.000 | -10.20 | 16.80 | 11.30 | 1.000 | -0.400 | 0.000 | 4.600 | 16.80 | 11.30 |
| 07 | 0.977 | -0.370 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.986 | -0.372 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 08 | 1.000 | -0.370 | 0.000 | 13.30 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | -0.372 | 0.000 | 8.200 | 0.000 | 0.000 |
| 09 | 0.955 | -0.419 | 0.000 | 0.000 | 44.30 | 24.90 | 0.973 | -0.420 | 0.000 | 0.000 | 44.30 | 24.90 |
| 10 | 0.951 | -0.426 | 0.000 | 0.000 | 13.50 | 8.700 | 0.966 | -0.426 | 0.000 | 0.000 | 13.50 | 8.700 |
| 11 | 0.969 | -0.418 | 0.000 | 0.000 | 5.300 | 2.700 | 0.977 | -0.417 | 0.000 | 0.000 | 5.300 | 2.700 |
| 12 | 0.993 | -0.436 | 0.000 | 0.000 | 9.200 | 2.400 | 0.983 | -0.428 | 0.000 | 0.000 | 9.200 | 2.400 |
| 13 | 1.000 | -0.451 | 0.000 | 40.50 | 20.70 | 8.700 | 0.980 | -0.436 | 0.000 | 0.000 | 20.70 | 8.700 |
| 14 | 0.945 | -0.464 | 0.000 | 0.000 | 22.40 | 7.500 | 1.000 | -0.482 | 0.000 | 34.80 | 22.40 | 7.500 |
| Suma | | | 424.5 | 237.3 | 390.0 | 122.3 | | | 424.3 | 235.8 | 389.0 | 122.3 |

| Pérdida total de potencia | | | |
|---------------------------|--------|-----------------|--------|
| Activa [MW] | 35.532 | Activa [MW] | 35.343 |
| Reactiva [Mvar] | 115.07 | Reactiva [Mvar] | 113.59 |

3.2. Flujo de potencia continuo en análisis de estabilidad de tensión

En esta sección se presenta el análisis de estabilidad de tensión antes y después de una contingencia. Además, se analiza cómo el sistema responde al instalar compensación estática sincrónica.

Con la Figura 5 se presenta el análisis de estabilidad de tensión en la barra 11 del SEP. Se puede apreciar el comportamiento de la barra en tres escenarios i) operación normal de la barra (curva de color amarillo), ii) desconexión de la línea L2 y L4 (curva de color azul) y iii) análisis de estabilidad de tensión cuando se incorpora compensación reactiva a través de un STATCOM (curva de color rojo). En la Figura 5 se presenta el comportamiento de la barra 11 en condiciones normales de operación con $\lambda_{max} = 3.7$, aproximadamente. Cuando se produce un incremento de carga con $\lambda_{max} = 3.2$ el margen de estabilidad se ve reducido. Esto sucede porque el SEP se encuentra estresado y su capacidad máxima de transferencia de potencia se ve reducida como se presenta en los puntos 2-4 de la Figura 5). Las métricas de color amarillo y azul representan la curva PV en condiciones previas a la contingencia y después de la contingencia sin compensación estática sincrónica. Otro detalle adicional que desvela la Figura 5 es que la capacidad de mantener al sistema estable disminuye cuando se presenta una contingencia. Cuando se usa STATCOM el nivel de tensión incrementa y ligeramente puede transmitir mayor potencia como se puede apreciar en los puntos 4-6 de la Figura 5. Por lo tanto, el nivel del factor de carga, cuando se usa compensación sincrónica, no varía

de manera significativa, sin embargo, mejora el perfil de tensión. Los puntos 1, 3, 5 de la Figura 5 representan los niveles óptimos de operación del sistema donde se puede apreciar con mayor claridad que la capacidad de transmisión de potencia aumenta si el sistema dispone de STATCOM para proveer de potencia reactiva en condiciones específicas de operación.

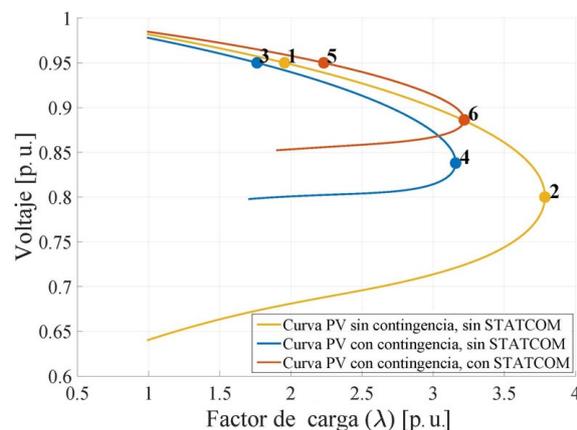


Figura 5. Nivel de tensión en función del parámetros normales de operación, contingencia $N - 1$ utilizando compensación reactiva

En la Tabla 7 se realiza el cálculo de la capacidad máxima de potencia que se puede transmitir (ATC, del inglés *Available Transmission Capacity*). Este análisis se lo realiza considerando la peor contingencia que se puede presentar en el sistema; para este caso, se considera la peor contingencia cuando se desconecta la línea 2-4, TPlo representa la potencia de la demanda; es decir, la potencia que se necesita abastecer

al sistema para su operación normal, PI son pérdidas presentes en todo el SEP, TTC es el valor máximo de potencia que se puede presentar en el sistema, ETC representa la potencia actual en el SEP y TMR es el margen disponible de potencia en el que el sistema eléctrico debe permanecer antes que exista un colapso de tensión.

Tabla 7. Capacidad de transferencia disponible en contingencia $N - 1$

| Barra N.º | Unidades | Sin STATCOM | Con STATCOM |
|------------------|----------|----------------|----------------|
| λ máximo | p. u. | 3.15760 | 3.21820 |
| TPlo | MW | 259.300 | 259.300 |
| PI | MW | 15.2020 | 15.1810 |
| TTC | MW | 307.302 | 308.156 |
| ETC | MW | 259.300 | 259.300 |
| TMR | MW | 15.3651 | 15.4078 |
| ATC | MW | 32.6367 | 33.4477 |

Finalmente, queda comprobado que el STATCOM es capaz de ajustar las magnitudes de tensión en las barras del SEP. Un detalle en particular es que el STATCOM no modifica los valores de potencia activa del sistema eléctrico. Con todo lo expuesto, se puede inferir que el STATCOM realiza un ajuste en los niveles de tensión por la inyección de potencia reactiva en las barras y mantiene estable los parámetros de tensión bajo condiciones normales de operación y, en caso de falla aumenta la tensión para que el sistema permanezca estable.

Con las métricas de la Figura 6 se realiza el análisis de estabilidad de tensión considerando diferentes escenarios. Con las Figuras 6(a, b y c) se hace el cómputo del flujo de potencia continuo en condiciones iniciales, es decir, sin contingencias y sin la instalación de compensadores estáticos sincrónicos. En las Figuras 6(d, e y f) se analiza la estabilidad de tensión al aplicar una contingencia en las líneas L2 - L4. Para el análisis mencionado se verifica el comportamiento de la curva PV para diferentes valores de λ . Las curvas PV que se presentan en la Figura 6 ilustran las magnitudes de las variables en las barras PQ. En las barras de referencia y de generación el nivel de tensión es constante.

De las Figuras 6(a-b) y 6(d-f) se puede inferir que a medida que se aumenta λ la capacidad de transmisión (λ resultante) disminuye y esto sucede porque la capacidad del sistema eléctrico de transmisión opera inversamente a la carga, es decir, aumenta la carga y la capacidad máxima de transferencia de potencia eléctrica disminuye. Cuando existe una falla (Figuras 6(d-f)) y el factor de carga incrementa los niveles de tensión caen drásticamente colocando al sistema eléctrico en condiciones críticas de operación pudiendo llevar al sistema eléctrico a experimentar un colapso de voltaje. Un detalle adicional, es que a través del análisis de estabilidad de tensión; se verifica que, cuando se produce una desconexión o falla en el sistema, la tensión en todas las barras PQ del sistema se reducen, principalmente por ser barras de carga, pero en las barras de generación las caídas de tensión no son significativas.

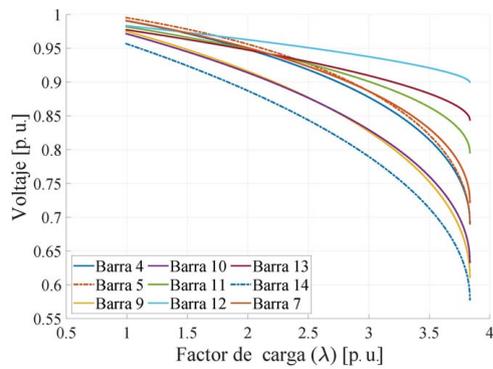
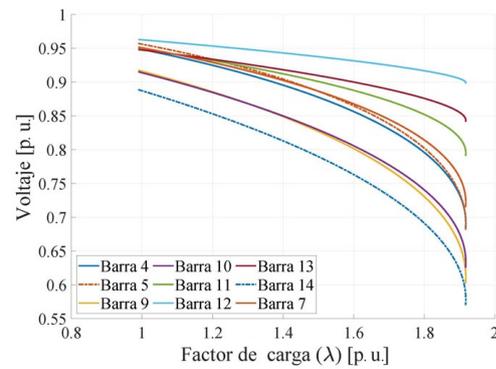
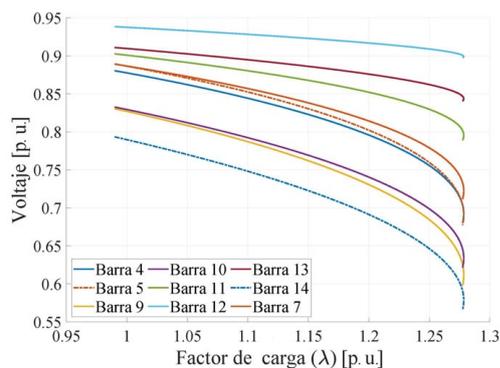
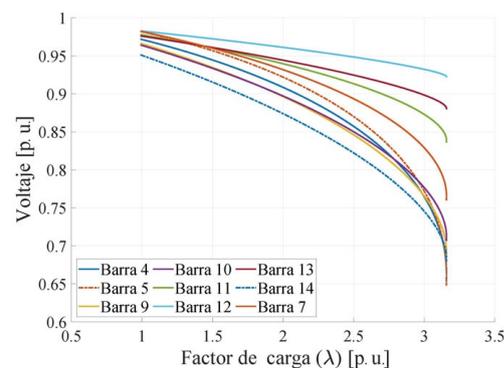
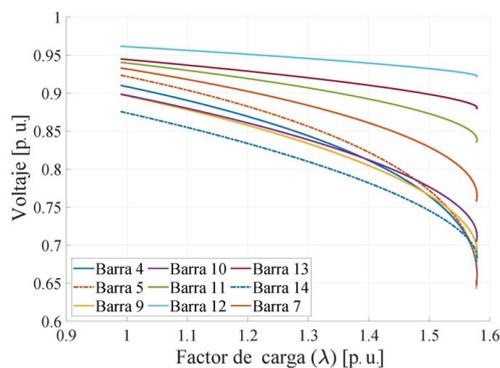
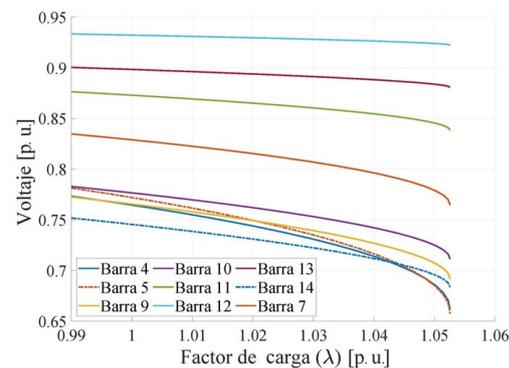
(a) Tensión con factor de carga ($\lambda = 1$)(b) Tensión con factor de carga ($\lambda = 2$)(c) Tensión con factor de carga ($\lambda = 3$)(d) Tensión con factor de carga ($\lambda = 1$)(e) Tensión con factor de carga ($\lambda = 2$)(f) Tensión con factor de carga ($\lambda = 3$)

Figura 6. Curvas PV con análisis de flujo de potencia continuo. Las Figuras a, b y c corresponden a un FPC sin STATCOM y sin contingencias y las Figuras d, e y f incluye un FPC sin STATCOM y una contingencia provocada por la apertura de la línea 2-4

En las Figuras 7 y 8 y la Tabla 8 se exponen las métricas para el análisis de estabilidad de tensión y el comportamiento angular en las barras analizadas; con la Figura 7 se analiza la variable de tensión; el análisis de la variación angular corresponde a la Figura 8 junto a la Tabla 8. En la Figura 7 se puede identificar la curva PV que permite analizar la estabilidad de tensión cuando se produce la desconexión en la línea L2 - L4, misma que, se considera como la peor contingencia del

sistema eléctrico. Además, se aprecia la variación del factor de carga disminuyendo el margen de operación estable del sistema eléctrico en las barras PQ cuando existe un incremento del factor de carga $\lambda = 1.3$ p.u. La caída de tensión se lo aprecia en la Figura 8. Cuando se produce una falla el margen de estabilidad de tensión disminuye y esto se puede apreciar en la Figura 7(b).

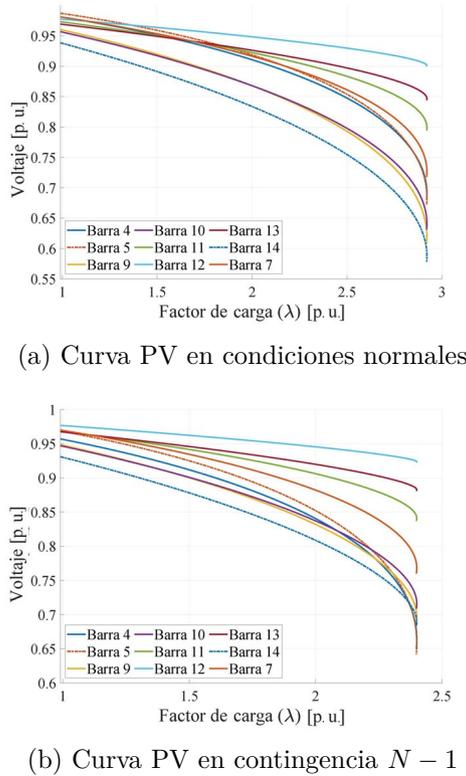


Figura 7. Curvas PV en condiciones normales y apertura temporal de la línea 2-4 $\lambda = 1.3$, $t = 1$ s

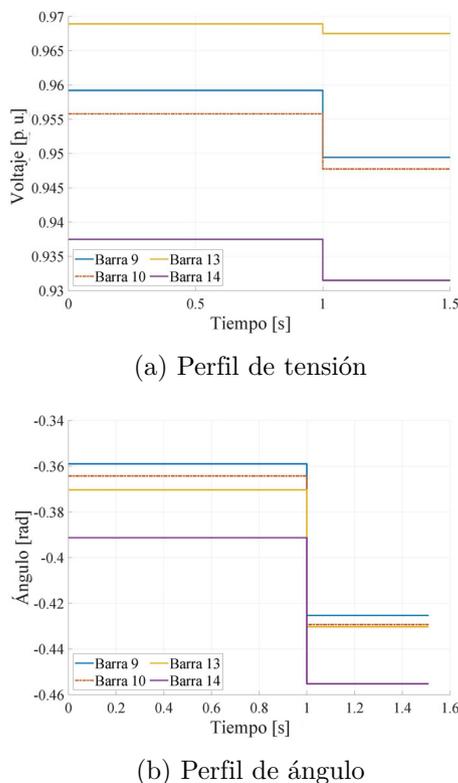


Figura 8. Curva en dominio del tiempo en contingencia $N - 1$ en la línea 2-4

Tabla 8. Magnitudes de tensión y ángulo

| Barra N.º | Condiciones normales | | Apertura línea 2-4 | |
|-----------|----------------------|--------|--------------------|--------|
| | Tensión | Ángulo | Tensión | Ángulo |
| 01 | 1.060 | 0.000 | 1.060 | 0.000 |
| 02 | 1.045 | -0.124 | 1.045 | -0.115 |
| 03 | 1.010 | -0.309 | 1.010 | -0.346 |
| 04 | 0.980 | -0.240 | 0.958 | -0.310 |
| 05 | 0.985 | -0.204 | 0.969 | -0.252 |
| 06 | 1.000 | -0.346 | 1.000 | -0.405 |
| 07 | 0.981 | -0.316 | 0.970 | 0.385 |
| 08 | 1.000 | -0.317 | 1.000 | -0.385 |
| 09 | 0.959 | -0.358 | 0.949 | -0.425 |
| 10 | 0.956 | -0.364 | 0.948 | -0.429 |
| 11 | 0.973 | -0.358 | 0.969 | -0.420 |
| 12 | 0.977 | -0.368 | 0.977 | -0.428 |
| 13 | 0.969 | -0.370 | 0.968 | -0.430 |
| 14 | 0.938 | -0.391 | 0.932 | -0.455 |

La Figura 8(a) permite realizar un análisis amplio, ya que, en ella se evalúa el comportamiento de las barras en dominio del tiempo cuando existe un incremento de cargabilidad del 30 %, y la desconexión se produce en un tiempo igual a 1 segundo; el comportamiento de todas las barras PQ son semejantes, por lo tanto, en la Figura 8(a) solo se presentará las barras, en las que, existe variaciones significativas debido a la contingencia generada. Por lo tanto, cuando existe una apertura no programa de algún elemento del sistema eléctrico, principalmente líneas, esta contingencia afecta a todas las barras PQ debido a que se deja de abastecer de potencia reactiva desde los nodos de generación hacia las cargas.

En la Figura 8(b) se presenta el comportamiento del ángulo en el dominio del tiempo. El nivel angular varía dependiendo del flujo de potencia y las condiciones iniciales para el cálculo; la Figura 8(a) representa la variación angular de las barras PQ donde existe una mayor variabilidad angular; se puede observar que la mayor variación angular se encuentran en las barras 9, 10, 13 y 14 donde existe un cambio drástico de niveles de tensión, esto se puede apreciar en la Tabla 8. De lo que se concluye que la desconexión de un elemento del sistema o una falla modifican los parámetros de operación del sistema y se ve afectado en los límites máximos y mínimos de operación de la variable tensión.

Otro aspecto de mucha importancia que revela la Tabla 8 es un resumen de las variaciones de los niveles de tensión y la variación angular de cada una de las barras en el dominio del tiempo. En la Tabla 8 se aprecian las variaciones de tensión en todas las barras y se observa que en las barras PV no existen cambios del nivel tensión, pero en las barras PQ, la tensión varía por la desconexión de la línea. Esto sucede, ya que el flujo de potencia del sistema cambia por el cambio drástico de la topología y el redireccionamiento del flujo de potencia debido a la apertura de la línea

2-4. Un punto importante es que en condiciones de operación con el 30 % de sobrecarga, en el SEP, el nivel de tensión de la barra 14 es menor a 0.95 p. u. y un punto crítico de análisis es cuando se produce la desconexión de la línea en la barra 14 y su magnitud de tensión está por debajo de 0.93 p. u. es decir, que la desconexión o falla en el sistema se ve afectado por la conexión de la barra 14; una forma de estabilizar los parámetros en dicha barra es el uso de compensación estática sincrónica, con lo que, se demuestra que un lugar candidato para colocar el STATCOM es en la barra 14.

La Tabla 8 permite realizar el análisis del comportamiento de todas las barras del sistema. La variación angular en todas las barras PQ es variante y a diferencia del nivel de tensión, cuando se realiza un análisis angular, existe variación en las barras PV; la única barra que se mantiene bajo los mismos niveles de operación tanto en tensión como en ángulo es la barra Slack, esto se debe a que, al variar el flujo de potencia el ángulo también lo hace. En consecuencia, en la Figura 8 se aprecia la variación angular y en la Tabla 8 la variación de tensión y angular de todas las barras del sistema.

La Figura 9 ilustra la estabilidad de tensión cuando se usa un controlador PSS de tipo II, que significa que la posibilidad de análisis varía dependiendo de la señal de entrada del PSS (velocidad angular, tensión y la potencia); cuando se utiliza un controlador de velocidad es fundamental la asignación de varios parámetros para su pleno funcionamiento; como son tensión máxima y mínima, ganancia de estabilidad. En la Figura 9 tiene una ganancia de 100 y se aprecia que, después, de la desconexión de la línea 2-4 empieza a funcionar el controlador del generador para mantener la estabilidad del sistema. Este tipo de control es conocido como control primario de tensión, donde, lo importante es estabilizar los niveles de tensión después que el SEP experimente alguna contingencia.

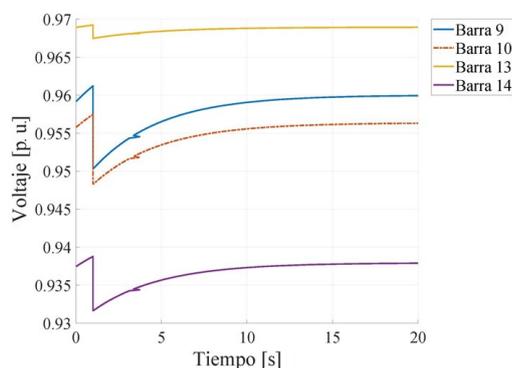


Figura 9. Tensión en función del tiempo en contingencia $N - 1$ con apertura de línea 2-4 con regulación de tensión PSS

4. Conclusiones

Se ha logrado verificar la confiabilidad de los datos obtenidos del *toolbox* PSAT y el rendimiento para proporcionar resultados de análisis de estabilidad de tensión y variación angular. En consecuencia, es una herramienta confiable para ejecutar análisis detallados de estabilidad de tensión, considerando la instalación de STATCOM y PSS. El uso de dispositivos FACTS de tipo STATCOM ha demostrado ser un método eficaz para reducir el estrés de la red eléctrica de transmisión y, así poder maximizar el intercambio de flujo de potencia desde las unidades de generación hacia los diferentes puntos de consumo.

Además, con la presente investigación se puede evidenciar que existen alternativas como son los controladores PSS para ejecutar ajustes de tensión en las barras antes de decidir instalar STATCOM que son de mayor costo. Por otro lado, el principal aporte del presente artículo es que se considera el factor de cargabilidad que introduce al SEP a operar en condiciones de congestión. Dicha congestión causa costos marginales de operación, lo cual, eleva los costos para el transporte de energía eléctrica.

Además, se considera contingencias para poder evaluar y seleccionar el nodo más crítico (nivel de tensión bajo) y así poder decidir la ubicación de compensación reactiva. Por lo tanto, se garantiza el dimensionamiento óptimo del STATCOM minimizando las pérdidas de potencia.

Existe una gran diferencia entre el uso de un compensador FACTS y el uso de un controlador en el generador PSS. FACTS es un dispositivo que mejora la estabilidad de tensión de la barra donde es colocado y modifica los niveles de tensión en la gran mayoría de las barras del SEP buscando mantenerlo en 1 p. u. En cambio, un control de tensión con PSS permite estabilizar los niveles de tensión en las barras de generación mediante un control adicional sobre los AVR.

Una de las variables fundamentales para modelar PSS, en PSAT, es la ganancia. La ganancia del PSS es directamente proporcional al incremento de la magnitud de tensión en la barra deseada. Por lo tanto, PSS solo actúa cuando existe una caída de tensión en las barras de las unidades de generación, logrando con ello, mantener estable la tensión en las barras adyacentes mediante el control electromecánico de las unidades de generación. Además, con el artículo propuesto se proporciona una metodología para garantizar estabilidad de tensión en las barras del SEP mediante el uso de STATCOM y controlador PSS considerando escenarios de contingencia $N - 1$ y aumento de carga en el sistema.

Finalmente, los flujos de potencia continuos han sido una herramienta fundamental para prever el margen máximo de estabilidad de tensión en un SEP.

Referencias

- [1] V. S. Rao and R. S. Rao, "Optimal Placement of STATCOM using Two Stage Algorithm for Enhancing Power System Static Security," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 575–582, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.151>
- [2] O. Samuelsson, S. Lindahl, P. Kundur, J. Paserba, V. Vittal, and T. T. Force, "Definition and Classification of Power System Stability," *Ieee Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 446–447, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.861952>
- [3] R. K. Varma and R. Salehi, "SSR Mitigation with a New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM)," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1473–1483, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2691279>
- [4] A. K. Dwivedi and S. Vadhera, "Reactive Power Sustainability and Voltage Stability with Different FACTS Devices Using PSAT," in *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2019*. IEEE, 2019, pp. 248–253. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SPIN.2019.8711587>
- [5] B. Hernández, C. A. Cañizares, J. M. Ramírez, B. Hu, and M. Liu, "Secondary and tertiary voltage regulation controls based on regional optimal power flows," *20th Power Systems Computation Conference, PSCC 2018*, pp. 1–7, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/PSCC.2018.8442443>
- [6] J. Kumar and N. Kumar, "Determination and allocation of optimal size of TCSC and STATCOM for obstruction alleviation in power system," in *2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2018, pp. 65–72. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2018.8897336>
- [7] L. Chun, J. Qirong, X. Xiaorong, and W. Zhonghong, "Rule-based control for statcom to increase power system stability," in *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151)*, vol. 1, 1998, pp. 372–376 vol.1. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPST.1998.728989>
- [8] P. M. Chavan and G. P. Chavan, "Interfacing of hybrid power system to grid using STATCOM amp; power quality improvement," in *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICOMICON.2017.8279079>
- [9] N. Mithulananthan, C. A. Cañizares, J. Reeve, and G. J. Rogers, "Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 786–792, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.811181>
- [10] C. Cañizares, T. Fernandes, E. Gerdali, L. Gerin-Lajoie, M. Gibbard, I. Hiskens Tf Past Chair, J. Kersulis, R. Kuiava, L. Lima, F. Demarco, N. Martins, B. C. Pal, A. Piardi, R. Ramos Tf Chair, J. Dos Santos, D. Silva, A. K. Singh, B. Tamimi, and D. Vowles, "Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715–722, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2561263>
- [11] R. K. Varma and H. Maleki, "PV Solar System Control as STATCOM (PV-STATCOM) for Power Oscillation Damping," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1793–1803, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2871074>
- [12] C. C. A. Gomes-Exposito, A. Conejo, "Electric Energy Systems Analysis and Operation," *Engineering - Technology*, p. 748, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315192246>
- [13] M. Ahmadiania and R. Ghazi, "Coordinated Control of STATCOM and ULTC to Reduce Capacity of STATCOM," *26th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2018*, pp. 1062–1066, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICEE.2018.8472712>
- [14] Y. T. Jeon, G. Farivar, C. D. Townsend, J. H. Park, and J. Pou, "Capacitor Voltage Shaper for Cascaded H-Bridge StatCom," *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference, SPEC 2018*, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SPEC.2018.8635915>
- [15] A. S. Tamboli and H. T. Jadhav, "Hybrid STATCOM for Reactive Power Compensation," *Proceedings of the 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies, ICCTCT 2018*, pp. 1–5, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCTCT.2018.8550889>

- [16] C. Xing, X. Xi, S. Li, and X. He, "Analysis on the Control Strategy and Response Characteristics of Large Capacity STATCOM Device in DC Converter Station," *2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018 - Proceedings*, no. 201804270001168, pp. 2873–2879, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8602013>
- [17] M. R. Wara and A. H. Rahim, "Supercapacitor E-STATCOM for power system performance enhancement," *1st International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques, ICREST 2019*, pp. 69–73, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICREST.2019.8644388>
- [18] J. Chen, P. Wang, Y. Hu, H. Shao, G. Li, X. Wang, and J. Qin, "Analysis of negative influence of harmonic circulation between parallel STATCOMs and suppression method," *PEDG 2019 - 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, pp. 751–755, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PEDG.2019.8807514>
- [19] H. A. Hassan, Z. H. Osman, and A. E.-A. Lasheen, "Sizing of STATCOM to Enhance Voltage Stability of Power Systems for Normal and Contingency Cases," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 05, no. 01, pp. 8–18, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/sgre.2014.51002>
- [20] S. Isik, H. Nath, M. Alharbi, and S. Bhattacharya, "Negative Sequence Component Elimination with M-STATCOM for Versatile FACTS," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2019-October, pp. 7069–7073, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927805>
- [21] A. Raju, E. P. Cheriyan, and R. Ramchand, "Nearly Constant Switching Frequency Hysteresis Current Controller for Multilevel Inverter based STATCOM," *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, vol. 2019-October, pp. 176–180, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2019.8929458>
- [22] V. Jain and N. Kumar, "Designing of Supplementary Controller for STATCOM for Damping of Oscillations in Power System," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 99, no. 5, pp. 419–429, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40031-018-0330-z>
- [23] G. G. Farivar, H. Dehghani Tafti, C. D. Townsend, and J. Pou, "Low Capacitance StatCom Capacitor Lifetime and Current Stress Analysis," *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems, ICPEES 2019*, no. 5, pp. 0–4, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPEES47639.2019.9105361>
- [24] A. M. Vural and K. C. Bayindir, "Optimization of parameter set for STATCOM control system," *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*, pp. 1–6, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484230>
- [25] A. B. Nassif and D. Fedaku, "A reactive power compensation scheme using distribution STATCOMs to manage voltage in rural distribution systems," *2020 IEEE Electric Power and Energy Conference, EPEC 2020*, vol. 3, pp. 1–5, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EPEC48502.2020.9320005>
- [26] L. Sun, H. Zhang, Y. Cao, C. Li, Q. Guo, and Y. Zhu, "Design of micro dynamic simulation system for power system with wind power and VSC-HVDC," *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020*, no. 51627811, pp. 1355–1360, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9347174>
- [27] S. Gurung, F. Jurado, S. Naetiladdanon, and A. Sangswang, "Comparative analysis of probabilistic and deterministic approach to tune the power system stabilizers using the directional bat algorithm to improve system small-signal stability," *Electric Power Systems Research*, vol. 181, no. June 2019, p. 106176, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106176>
- [28] W. Peres, I. C. Silva Júnior, and J. A. Passos Filho, "Gradient based hybrid metaheuristics for robust tuning of power system stabilizers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 47–72, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.014>
- [29] H. Verdejo, V. Pino, W. Kliemann, C. Becker, and J. Delpiano, "Implementation of particle swarm optimization (PSO) algorithm for tuning of power system stabilizers in multimachine electric power systems," *Energies*, vol. 13, no. 8, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13082093>
- [30] T. Guesmi, A. Farah, H. H. Abdallah, and A. Ouali, "Robust design of multimachine power system stabilizers based on improved non-dominated sorting genetic algorithms," *Electrical Engineering*, vol. 100,

- no. 3, pp. 1351–1363, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0589-0>
- [31] S. Orlando, “A Study of STATCOM on Stability and Efficiency in IEEE 14-bus,” Master’s thesis, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qT2McR>