

# Análisis del Control de Tensión en una Red Eléctrica de Distribución Empleando un Compensador Estático Síncrono (STATCOM)

Castañeda-Hernández, K.G.<sup>1</sup>; Hernández-Flores, Concepción.<sup>2</sup>; Arjona López, M.A.<sup>3</sup>

## Datos de adscripción:

<sup>1</sup>✉ Karina Guadalupe Castañeda Hernández. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. [m.kgcastanedah@correo.itlalaguna.edu.mx](mailto:m.kgcastanedah@correo.itlalaguna.edu.mx) <https://orcid.org/0009-0000-9311-5242>

<sup>2</sup> Concepción Hernández Flores. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. [chernandezf@correo.itlalaguna.edu.mx](mailto:chernandezf@correo.itlalaguna.edu.mx) <https://orcid.org/0000-0002-4757-5309>

<sup>3</sup> Marco Antonio Arjona Flores. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. [maarjona@correo.itlalaguna.edu.mx](mailto:maarjona@correo.itlalaguna.edu.mx) <https://orcid.org/0000-0003-1826-4066>

**Resumen** – Este artículo presenta un análisis del control de la tensión en una red eléctrica en el nivel de distribución mediante la compensación de potencia reactiva con un Compensador Estático Síncrono (STATCOM) bajo perturbaciones balanceadas y desbalanceadas. El sistema de prueba de la IEEE de 34 nodos se toma como caso de base para el estudio, el cual ha sido modificado con el reemplazo de los bancos de capacitores en paralelo por un STATCOM en el sistema. Además de analizar la regulación de tensión en estado estacionario, se evalúa la regulación dinámica del compensador como soporte de potencia reactiva para tener variaciones de tensión de menor magnitud en los nodos del sistema ante disturbios en la red, como fallas de corto circuito monofásicas y trifásicas. También se analizaron variaciones de carga en condiciones balanceadas y desbalanceadas en diferentes nodos del sistema. El estudio se realiza con el programa de análisis de transitorios electromagnéticos EMTP-RV (Electromagnetic Transients Program – Restructured Version) que permite hacer simulaciones de eventos transitorios en el dominio del tiempo y estudios de solución de flujos de potencia para redes en condiciones de red balanceada y desbalanceada. El STATCOM está integrado principalmente por un convertidor de voltaje CD/CA, que le permite inyectar o absorber potencia reactiva según las condiciones operativas de la red.

**Palabras Clave:** Control de Voltaje, EMTP-RV, Potencia Reactiva, Red Eléctrica Desbalanceada, STATCOM.

**Abstract** – This paper presents an analysis of voltage control performed by a Static Synchronous Compensator (STATCOM) through reactive power compensation under both balanced and unbalanced disturbances. The study uses the IEEE 34-Node Test Feeder as the base distribution network, modified by replacing the shunt capacitors with a STATCOM. The analysis evaluates the STATCOM's performance in dynamic power reactive power support is evaluated to have smaller voltage variations at system nodes during network disturbances, such as single-phase and three-phase short circuit faults, as well as load variations in balanced and unbalanced conditions at system nodes were

analyzed. The study is carried out using EMTP-RV (Electromagnetic Transients Program – Restructured Version), which allows transient event simulations in the time domain and power flow solution studies for both unbalanced and balanced networks. STATCOM consists of a DC/AC voltage source converter, which enables the STATCOM to inject or absorb reactive power according to the grid operating conditions.

**Key Words:** EMTP-RV, Reactive Power, STATCOM, Unbalanced Grid, Voltage Control.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en los niveles de los sistemas eléctricos de potencia, transmisión, subtransmisión y redes de baja tensión de distribución se están incluyendo Sistemas Flexibles de Transmisión de Energía en Corriente Alterna (FACTS) los cuales son dispositivos desarrollados a partir de electrónica de potencia.

Los convertidores de fuente de energía que son parte de los dispositivos FACTS, se han integrado a las redes eléctricas debido al aumento de la integración de generación de energía renovable distribuida, el uso de cargas no lineales, y de dispositivos de calidad de la energía, entre otros (Sánchez et al., 2023). Una aplicación de los convertidores de fuente de energía es el Compensador Estático Síncrono (STATCOM). La función principal del STATCOM es la compensación de potencia reactiva dinámica a sistemas de potencia, en diversas aplicaciones como optimización del flujo de potencia activa, la estabilidad de voltaje, mitigación de fluctuaciones de voltaje, análisis de fallas y distorsión armónica (Sharma et al., 2023).

En los niveles de transmisión, el STATCOM se puede utilizar para incrementar la capacidad de transmisión de potencia activa de las líneas (Hingorani et al., 2000). La potencia reactiva demandada por las cargas inductivas reduce la transmisión de potencia activa a través de las líneas provocando que la tensión disminuya, reduciendo así también la eficiencia de utilización entre la energía entregada por las plantas de generación y el consumo en las cargas. Adebiyi et al., (2017), realizaron un estudio de flujos de carga simulando escenarios de aumento de carga en el sistema IEEE 14 nodos, demostrando que la incorporación de un STATCOM reduce las pérdidas de potencia activa y reactiva en las líneas de transmisión.

Generalmente, los bancos de capacitores conectados en paralelo a cargas inductivas proporcionan la potencia reactiva requerida por las cargas, así como la requerida por las líneas de transmisión y distribución (Glover et al., 2015). Por otra parte, el efecto capacitivo en líneas medias y largas (líneas de transmisión y subtransmisión), provoca valores altos de tensión con respecto

al valor nominal. La colocación de reactores en paralelo en las líneas reduce el efecto capacitivo debido a la susceptibilidad en líneas de alta tensión. Esto es muy importante cuando hay poca carga, ya que la tensión en el punto de conexión de la carga sería muy elevada (Grainger et al., 1996).

El STATCOM tiene sistemas de control e IGBTs para convertir energía de corriente directa almacenada en un capacitor a energía de corriente alterna de forma modulada y controlada para que pueda responder ante cualquier condición de la red.

El IEEE std 1547-2018 establece que los inversores que tienen las fuentes de energía distribuida deben tener la función Fault Ride Through (FRT) para permanecer en sincronismo con la red durante disturbios de tensión sin desconectarse (IEEE,2018). Durante de fallas de corto circuito, la función FRT del STATCOM, incrementa el aporte de potencia reactiva rápidamente para elevar los valores de tensión durante el disturbio. Esta capacidad del STATCOM es esencial para mejorar la estabilidad transitoria de la red.

A comparación de otros dispositivos de compensación en paralelo como los CEV (Compensador Estático de VARs), el STATCOM tiene una gran ventaja debido a su capacidad de poder mantener constante el aporte de potencia reactiva-capacitiva máxima incluso cuando la tensión en la red se reduce de manera drástica. Esta habilidad permite limitar más la caída de tensión y mejorar la estabilidad transitoria (primera oscilación) del sistema (Hingorani et al., 2000). Esto lo demostró el estudio realizado por Gopi et al. (2012), donde en un sistema de dos generadores y una línea, se simula una falla trifásica en la línea de transmisión cercana al área del primer generador. En el estudio se realizaron simulaciones de la falla colocando primero el CEV en distintos puntos a lo largo de la línea de transmisión y con distintos tiempos de liberación de la falla. Posteriormente, se realizaron las mismas simulaciones colocando el STATCOM en lugar del CEV. Los resultados del estudio muestran los ángulos de carga de los rotores, la velocidad y la tensión de ambas máquinas, y se confirma que el STATCOM ayuda a mantener el sincronismo de las dos máquinas en más ubicaciones diferentes a lo largo de la línea y en tiempos de liberación de la falla más grandes que el CEV.

En sistemas de distribución el STATCOM y los inversores fotovoltaicos se usan principalmente para el soporte de potencia reactiva durante abatimientos de tensión en redes industriales debido al arranque de motores de alta potencia, con la finalidad de evitar desconexiones de cargas y los costos económicos asociados a estas desconexiones, como se muestra en el estudio realizado por Bhujade et al. (2022).

El objetivo del presente trabajo es incorporar un modelo de STATCOM a la red de distribución IEEE de 34 de nodos, para evaluar su desempeño en la regulación de tensión ante disturbios simulados mediante el software EMTP-RV. Para ello, se compara la respuesta de tensión en los nodos durante las perturbaciones, considerando la compensación dinámica del STATCOM, respecto a la compensación fija de reactivos de los bancos de capacitores instalados originalmente en la red.

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

### 2.1 Caso base

El sistema de 34 nodos es una de las redes radiales de distribución aprobadas por el Subcomité de Análisis de Sistemas de Distribución (Distribution Systems Analysis Subcommittee) de la Sociedad de Potencia y Energía de la IEEE (IEEE Power Energy and Energy Society) en el año 2000. Es un sistema real ubicado en el estado de Arizona, EE. UU. La tensión del circuito principal trifásico es de 24.9 kV con una configuración en estrella y un subcircuito trifásico de 4.16 kV en configuración delta. Cuenta con dos transformadores con cambiadores de tap bajo carga que se encuentran entre los nodos 814-850 y 852-832, respectivamente. También tiene dos bancos de capacitores en paralelo de 300 kVAR y 450 kVAR conectados en los nodos 844 y 848 respectivamente.

Las líneas del sistema son aéreas y tienen 5 diferentes configuraciones de los conductores de fase, lo cual en sí, contribuye a que exista un pequeño desbalance natural en el sistema. Los datos del calibre y número de conductores de fases de las líneas se muestran en la Tabla 1. La identificación de espaciado proporcionado en la Tabla 2, se refiere al tipo de cableado, al espaciado del acomodo físico de los conductores de fase y la identificación correspondiente a cada configuración física de las líneas en la red eléctrica.

**Tabla 1**  
*Configuración física de las líneas áreas. (IEE PES, 2004).*

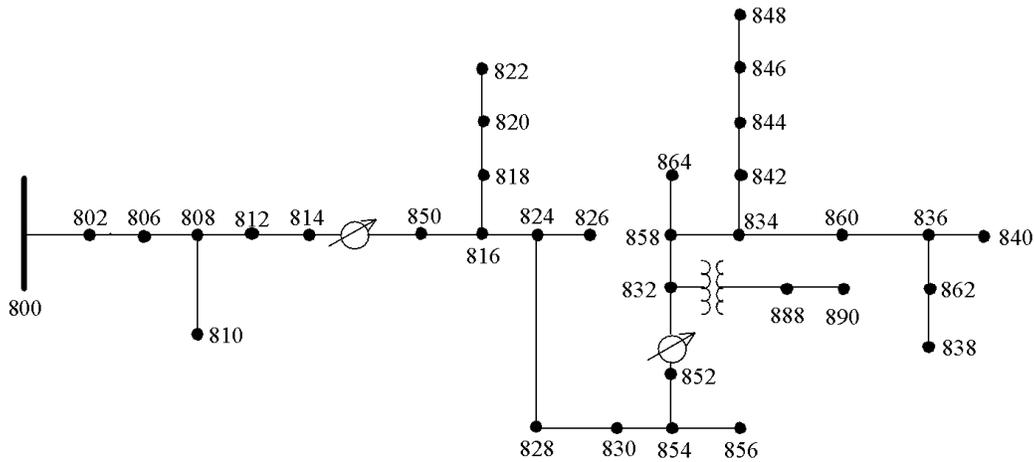
Config.	Fases	Fase	Neutro	Espaciamiento ID
		ACSR	ACSR	
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

**Tabla 2**  
*Tipo de Cableado de líneas aéreas. (Kersting, 2001).*

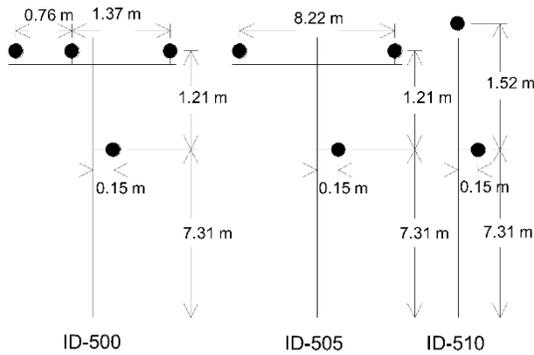
Espaciamiento ID	Tipo
500	3 fases, 4 hilos
505	2 fases, 3 hilos
510	1 fase, 2 hilos

En la Figura 1 se muestra el diagrama unifilar de la red y en la Figura 2 se muestra el esquema de la estructura y la distribución física de los conductores de las fases y el neutro según la configuración de la línea. Las medidas de separación están dadas en metros. Esta información se usa para poder parametrizar correctamente los modelos de línea en el software de simulación.

**Figura 1**  
Circuito IEEE 34 nodos. (IEEE PES, 2004).



**Figura 2**  
Geometría de las líneas.



La red eléctrica tiene cargas monofásicas y trifásicas que están instaladas en los nodos del sistema y de forma distribuida a lo largo de las líneas. Los datos mostrados en la Tabla 3 corresponden a las cargas instaladas puntualmente en los nodos. Mientras que la Tabla 4 contiene los datos de las cargas distribuidas en las líneas.

**Tabla 3**  
Datos de cargas en buses (IEEE PES, 2004).

Nodo	Modelo carga	Ph-1 kW	Ph-1 kVAR	Ph-2 kW	Ph-2 kVAR	Ph-3 kW	Ph-3 kVAR
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
<b>Total</b>		<b>344</b>	<b>224</b>	<b>344</b>	<b>224</b>	<b>359</b>	<b>229</b>

**Tabla 4**  
Datos de cargas distribuidas (IEEE PES, 2004).

Nodo A	Nodo B	Modelo Carga	Ph1 kW	Ph-1 kVAR	Ph-2 kW	Ph-2 kVAR	Ph-3 kW	Ph-3 kVAR
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
<b>Total</b>			<b>262</b>	<b>133</b>	<b>240</b>	<b>120</b>	<b>220</b>	<b>114</b>

Más detalles del sistema, tales como la información de cada configuración de cada segmento de línea del sistema, el reporte de los flujos de carga de la red y los perfiles de tensión del sistema pueden ser consultados en el documento IEEE 34 Bus Test Feeder antes citado en la Figura 1.

### 2.2 Normativa de regulación de tensión.

La regulación de tensión en las redes eléctricas es de fundamental importancia, y va desde minimizar las pérdidas de potencia activa en redes de transmisión debidas principalmente a la resistencia de los conductores, mantener una operación segura del sistema eléctrico hasta evitar el daño de equipo eléctrico – electrónico de las cargas.

Los documentos normativos como el ANSI C84.1-2016 tienen como finalidad estandarizar los valores de tensión nominal en sistemas eléctricos y tolerancias operativas de variación de tensión (ANSI, 2016). Además, esta normativa es la base para otras que clasifican los valores nominales de diseño y otras características de equipos eléctricos específicos. El estándar hace la diferencia entre tensión de utilización (Utilization Voltage) y tensión de servicio (Service Voltage). Una es la tensión en terminales de los equipos eléctricos en las instalaciones de cada usuario y la tensión que debe entregar la compañía de suministro eléctrico a los usuarios en los puntos de interconexión respectivamente. También establece dos rangos de tensión: A y B. El rango A establece valores de tensión en condiciones operativas normales y el rango B los valores de tensión durante eventos transitorios que hacen variar la tensión fuera de los límites del rango A. De acuerdo con el ANSI C84.1-2016 los límites del rango A van de + 5% a -2.5% (1.05 p.u. a 0.97 p.u.) respecto al valor nominal, para niveles de media tensión incluyendo el de 24.9 kV.

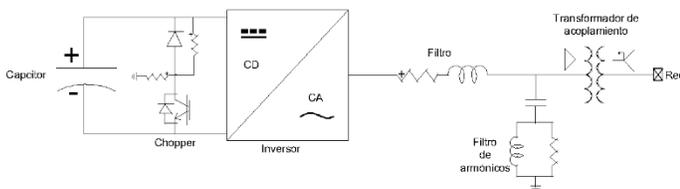
Por otra parte, en el Manual Regulatorio de Requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al Sistema Eléctrico Nacional del Código de Red Mexicano, se establece que la variación mínima y máxima de tensión de los nodos en condiciones de operación en estado estacionario estable debe estar de 1.05 p.u. a 0.95 p.u. respecto al valor nominal de operación de la red.

Para este estudio, los límites normativos antes mencionados se tendrán de referencia durante las simulaciones y se hará la comparación de los resultados que se obtengan con el STATCOM conectado en un nodo del caso base y los bancos de capacitores.

### 2.3 Modelo del STATCOM

El modelo de STATCOM empleado en el presente trabajo, tiene como bloque principal el modelo promediado del convertidor DC-AC (VSC) trifásico de dos niveles disponible en las librerías de EMTP-RV, se muestra en la Figura 3.

Figura 3  
Componentes principales del STATCOM.



Los componentes principales del STATCOM son: un capacitor de enlace que proporciona la tensión de CD, un chopper de protección que regula la tensión de CD en el capacitor, un

convertidor trifásico de dos niveles (modelo promediado), un filtro impedancia serie entre el inversor y la red, dos filtros tipo LC en paralelo para la atenuación armónica del convertidor y un transformador de acoplamiento de 0.575 kV/ 24.9, D-Yg.

En la Tabla 5 muestra los parámetros del convertidor:

Tabla 5  
Principales parámetros del convertidor.

Potencia del convertidor	1 MVA
Capacitor	20.83 mF
Tensión de CD	1.2 kV
Tensión de CA	0.575 kV
Resistencia del filtro	1.65 mΩ
Inductancia del filtro	65.6μH

Los sistemas de control del convertidor están basados en la teoría del control vectorial en el marco que proporciona Yazdani et al. (2010). Las ecuaciones (1) y (2) establecen la dinámica de la corriente en terminales del convertidor en el marco de referencia dq.

$$L \frac{di_d}{dt} = L\omega i_q - Ri_d + V_{td} - V_{sd} \quad (1)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -L\omega i_d - Ri_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (2)$$

donde  $L$  y  $R$  son la inductancia y resistencia del filtro.  $V_{td}$  y  $V_{sd}$  son las componentes del eje directo de la tensión en terminales del inversor y la red respectivamente.  $V_{tq}$  y  $V_{sq}$  son las componentes en cuadratura de la tensión en terminales del inversor y de la red respectivamente y  $\omega_0$  es la frecuencia del sistema eléctrico.

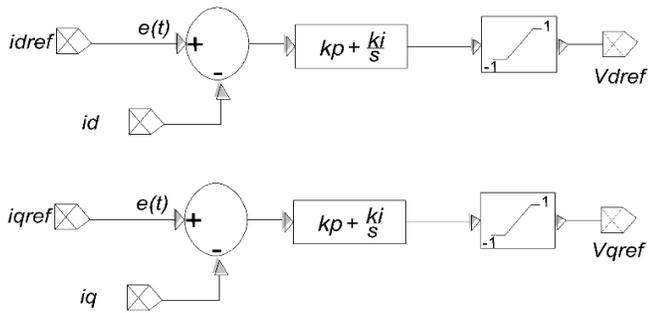
Con base en (3) y (4), Ashourian et al. (2021) definen las tensiones de referencia en el eje d y q de convertidor que son controladas por los lazos de corriente internos del convertidor.

$$V_{dref} = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{dref} - i_d) + \omega Li_q + V_d \quad (3)$$

$$V_{qref} = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{qref} - i_q) - \omega Li_q + V_d \quad (4)$$

El diagrama del control de corriente interno de las componentes dq de la corriente con un controlador PI se muestra en la Figura 4. La salida del controlador PI proporciona las señales de tensión dq de referencia para inversor. Estas señales son posteriormente transformadas al marco de referencia abc y enviadas como referencia al modelo promedio del convertidor. Los términos  $\omega Li_q + V_d$  y  $\omega Li_q + V_d$  son compensados a las señales  $V_{dref}$  y  $V_{qref}$  en otra parte del circuito.

**Figura 4**  
Diagrama simplificado de los lazos internos de corriente.



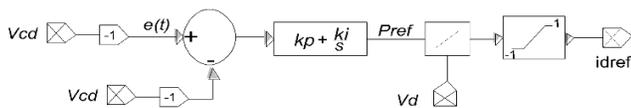
Las corrientes de referencia del eje “d” y del eje “q” son proporcionadas por los lazos de control externos o bien por los lazos de control de potencia del convertidor.

Si bien el STATCOM no genera potencia activa, en el caso del STATCOM el lazo de control de eje “d”, del convertidor tiene como principal objetivo regular la tensión de CD del capacitor. Para mantener una tensión de cd constante, un STATCOM pudiera consumir potencia activa debido a pérdidas en sus componentes internos. En todo momento la potencia activa que el STATCOM intercambia con la red debe ser un valor lo más cercano a cero.

En el caso de inversores fotovoltaicos se debe regular la tensión de los circuitos de los paneles solares que alimentan los capacitores de enlace en esta aplicación.

La Figura 5, muestra el lazo de control externo simplificado del eje “d” del modelo del convertidor. El controlador PI del lazo genera una potencia activa de referencia, posteriormente  $i_{dref}$  se calcula como se muestra en (5).

**Figura 5**  
Diagrama simplificado del lazo de control externo del eje d.

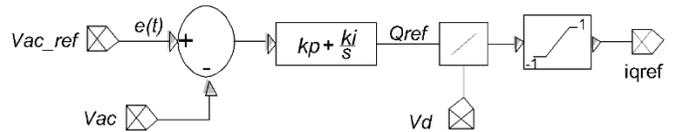


$$i_{dref} = -\frac{P_{ref}}{V_d} \quad (5)$$

El lazo de control del eje “q” por su parte controla entrega de la potencia reactiva del convertidor. El convertidor cuenta con tres modos de control: control de Q, control de voltaje en CA y control del FP.

La Figura 6 muestra una simplificación del lazo de control del eje d. El controlador PI procesa el error entre la medición de la tensión CA en terminales del convertidor y  $V_{ac\_ref}$  la tensión que se desea mantener. Después genera la señal  $Q_{ref}$  necesaria para realizar el cálculo de la corriente de referencia del eje q ( $i_{qref}$ ), ésta se calcula como se muestra en (6).

**Figura 6**  
Diagrama simplificado del lazo de control externo del eje q.



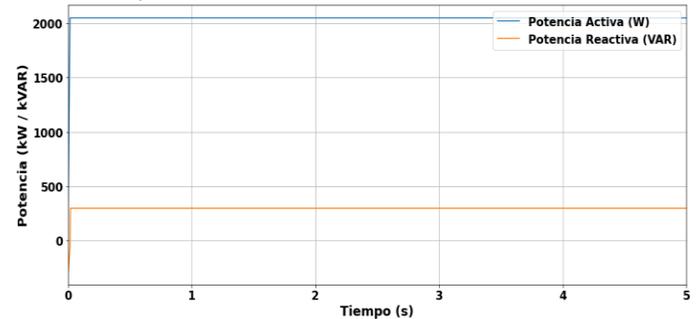
$$i_{qref} = \frac{Q_{ref}}{V_d} \quad (6)$$

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Validación del modelado del caso base.

Se validó el modelo del caso base IEEE 34 Nodos en el software EMTP-RV, en la Tabla 6 se presenta el perfil de tensión obtenido y en la Figura 7 se graficó la potencia activa (kW) y de la potencia reactiva (kVAR) que el sistema le demanda a la Subestación ubicada en el nodo 800.

**Figura 7**  
Demanda de potencia en la subestación.



Respecto a los resultados en el documento del caso base, los porcentajes de error en la demanda de potencia activa y reactiva de los resultados obtenidos son de 0.4% y 5% respectivamente. Las diferencias son despreciables, debido a que la demanda es prácticamente la misma.

Los resultados del perfil de tensión de los nodos se compararon con los resultados en el documento IEEE 34 Bus Test Feeder de la IEEE (IEEE PES, 2004).

**Tabla 6**  
Resultados del Perfil de tensión (p.u) en EMTP-RV.

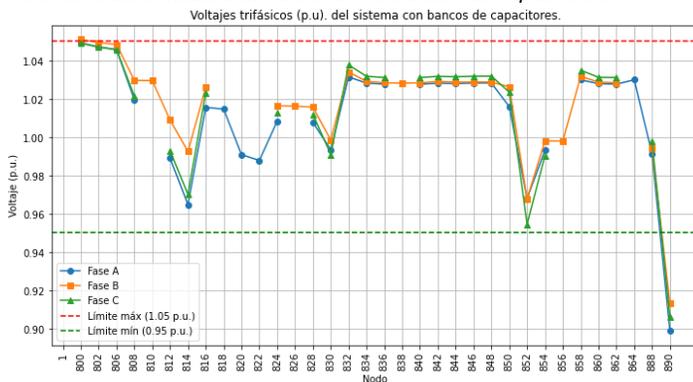
Nodo	Magnitud		Magnitud		Magnitud	
	Ángulo	Ángulo	Ángulo	Ángulo	Ángulo	Ángulo
	A-N		B-N		C-N	
800	1.04924	-0.08	1.0511	-119.93	1.0491	120.02
802	1.0472	-0.14	1.0495	-119.99	1.0471	119.96
806	1.0458	-0.18	1.0484	-120.03	1.0457	119.93
808	1.0195	-0.92	1.0297	-120.75	1.0215	119.26
810			1.0296	-120.75		

812	0.9890	-1.84	1.0090	-121.57	0.9929	118.47
814	0.9648	-2.59	0.9925	-122.23	0.9702	117.83
850	1.0160	-2.59	1.0263	-122.24	1.0235	117.82
816	1.0156	-2.60	1.0260	-122.24	1.0232	117.82
818	1.0147	-2.60				
820	0.9909	-2.66				
822	0.9878	-2.66				
824	1.0084	-2.76	1.0164	-122.43	1.0128	117.58
826			1.0162	-122.43		
828	1.0078	-2.78	1.0157	-122.44	1.0120	117.56
830	0.9935	-3.14	0.9985	-122.79	0.9910	117.08
854	0.9931	-3.15	0.9981	-122.80	0.9905	117.07
856			0.9980	-122.81		
852	0.9681	-3.81	0.9679	-123.44	0.9545	116.20
832	1.0315	-3.81	1.0341	-123.44	1.0377	116.20
858	1.0300	-3.89	1.0318	-123.52	1.0350	116.09
834	1.0283	-3.99	1.0292	-123.61	1.0318	115.97
842	1.0282	-4.00	1.0291	-123.62	1.0318	115.96
844	1.0280	-4.02	1.0288	-123.64	1.0316	115.94
846	1.0283	-4.06	1.0288	-123.69	1.0319	115.89
848	1.0283	-4.07	1.0288	-123.69	1.0319	115.88
860	1.0280	-3.99	1.0288	-123.61	1.0313	115.97
836	1.0277	-3.99	1.0285	-123.61	1.0312	115.97
840	1.0277	-3.99	1.0284	-123.61	1.0312	115.97
862	1.0277	-3.99	1.0284	-123.61	1.0312	115.97
838			1.0283	-123.61		
864	1.0300	-3.89				
888	0.9912	-5.52	0.9942	-125.11	0.9977	114.51
890	0.8990	-6.23	0.9131	-126.21	0.9061	113.60
856			0.9980	-122.81		

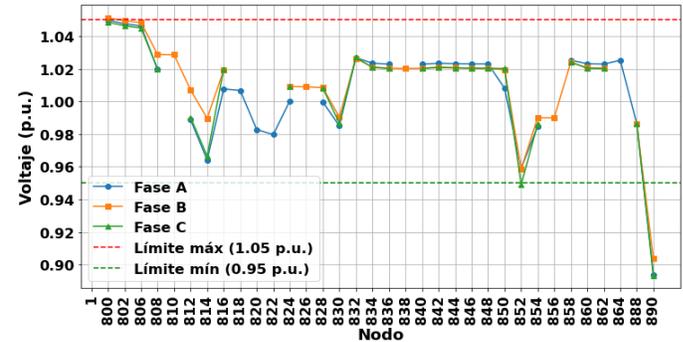
### 3.2 Perfiles de tensión en estado estacionario

En las Figuras 8 y 9, se muestran los perfiles de tensión trifásicos obtenidos mediante el cálculo de flujos de potencia en la red. El primero es con los bancos de capacitores y el segundo con el reemplazo de los bancos de capacitores por el STATCOM en el nodo 844. Se observa que ambos casos logran mantener un perfil de tensión en los rangos normativos establecidos.

**Figura 8**  
Perfil de tensión trifásico del sistema con bancos de capacitores.



**Figura 9**  
Perfil de tensión trifásico con STATCOM en Nodo 844.



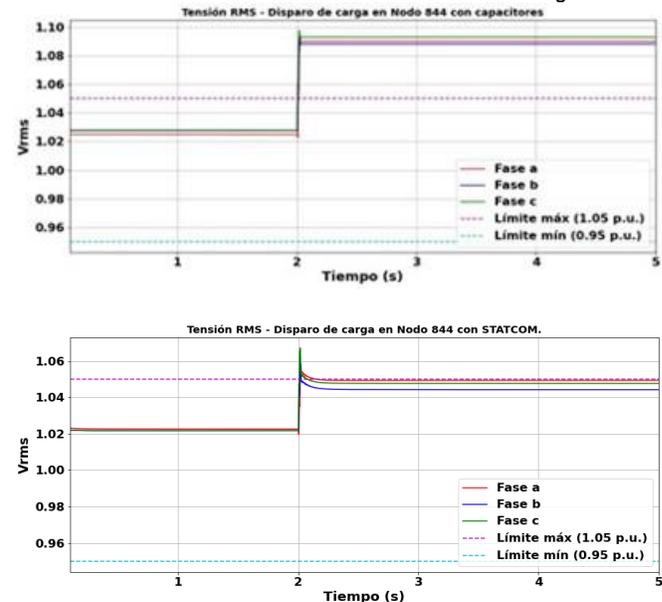
El perfil con los bancos de capacitores es ligeramente mayor en algunos nodos críticos (852 y 890), sin embargo, esto se debe a que los bancos de capacitores se encuentran distribuidos en 2 nodos diferentes del sistema y el STATCOM se encuentra conectado a un bus.

### 3.3 Desconexión de la carga trifásica en Nodo 844

En el primer disturbio se simula en el segundo 2 la desconexión de la carga trifásica del Nodo 844, la cual demanda 405 kW y 315 kVAR. La carga no vuelve a conectarse durante la simulación. En una red, la desconexión repentina de grandes cargas ocasiona elevaciones importantes de tensión.

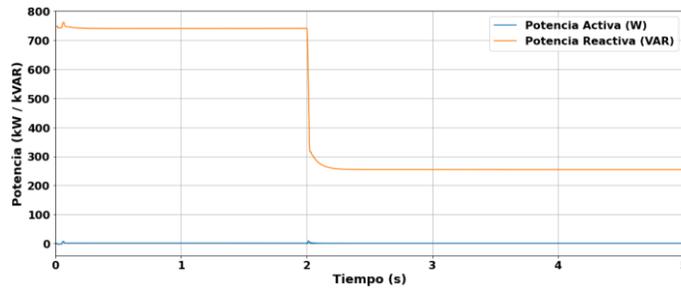
La Figura 10 muestra la tensión en el nodo 844 durante el disturbio con los capacitores y con el STATCOM. Al momento de la desconexión hay una elevación de tensión, con los bancos la tensión se eleva hasta 1.09 p.u., mientras que con el STATCOM los valores se mantienen dentro del límite máximo normativo por debajo de 1.05 p.u., 0.04 p.u. de diferencia.

**Figura 10**  
Tensión RMS en nodo 844 durante la desconexión de carga.



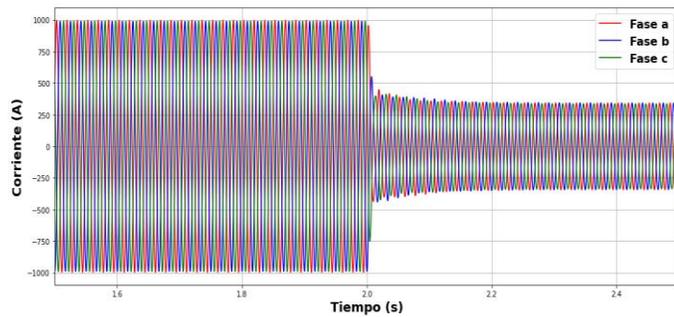
En la Figura 11 se muestra la potencia reactiva del STATCOM, el cual se encontraba entregando una potencia reactiva a la red de 748 kVAR en estado estacionario. Al presentarse el disturbio, la potencia reactiva el STATCOM disminuye a 277 kVAR.

**Figura 11**  
Potencia reactiva del STATCOM durante la desconexión de la carga.



La Figura 12, muestra la reducción de la corriente en el convertidor del STATCOM a los 2s.

**Figura 12**  
Corriente del STATCOM.



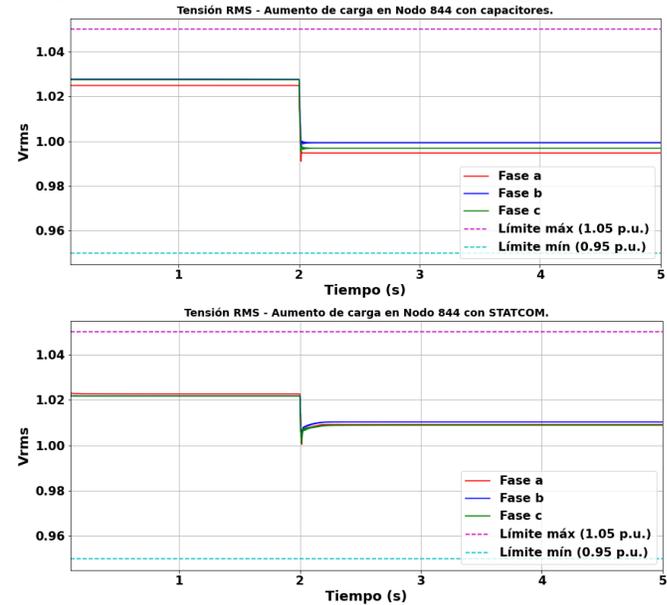
### 3.4 Aumento de la carga trifásica en Nodo 844

En el segundo disturbio se simula un aumento de la carga trifásica en el nodo 844, se aumentan 250 kVA con un factor de potencia de 0.8. La carga se conecta a los dos segundos de la simulación. Al igual que la desconexión repentina de grandes cargas, la conexión de nuevas cargas industriales sin planeación perturba la red, como el arranque de grandes motores en una industria que amplía su línea de procesos. Un aumento de carga considerable causaría caídas significativas de tensión.

La Figura 13, muestra la tensión en el nodo 844 al momento de la conexión de la carga.

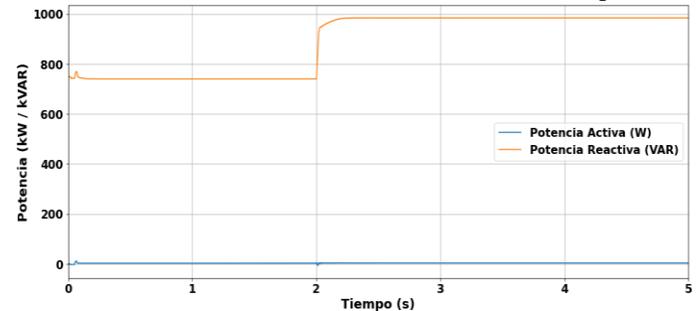
Como se observa en la comparación en ambos casos para este disturbio, la tensión se encuentra dentro de los límites normativos. Para el caso con los bancos de capacitores el voltaje cae de 1.03 p.u. a 1 p.u. y con el STATCOM conectado en el Nodo 844 el voltaje cae a 1.02 p.u. a 1.01 p.u.

**Figura 13**  
Voltajes RMS en nodo 844 durante el aumento de carga.



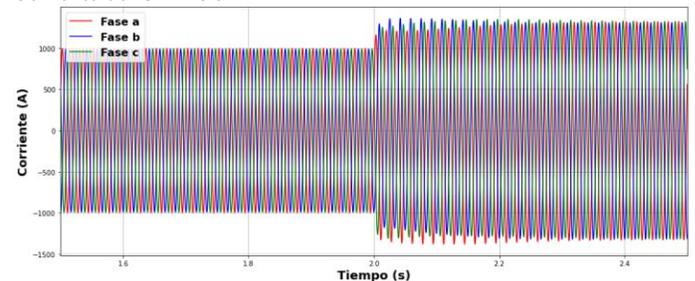
En la Figura 14, se observa que al presentarse el disturbio el STATCOM pasa de entregar 748 kVAR a incrementar la potencia a 1 MVAR, el cual es su límite nominal, por esta razón el STATCOM no puede inyectar más potencia reactiva y elevar más la tensión.

**Figura 14**  
Potencia reactiva del STATCOM durante la conexión de la carga.



La Figura 15 muestra que, al segundo dos de la simulación, la corriente del convertidor del STATCOM se incrementa, debido al incremento de aporte de potencia reactiva del convertidor.

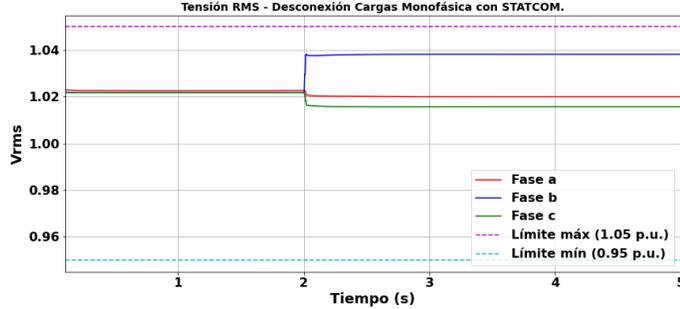
**Figura 15**  
Corriente del STATCOM.



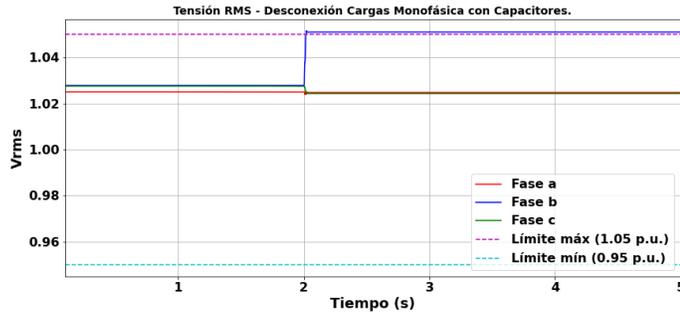
### 3.5 Desconexión de una carga monofásica

En las Figuras 16 y 17, se observa la comparación de la tensión en el nodo 844 al ocurrir el tercer disturbio planteado: desconexión de carga monofásica.

**Figura 16**  
Tensión RMS durante desconexión de carga en la fase b con STATCOM.



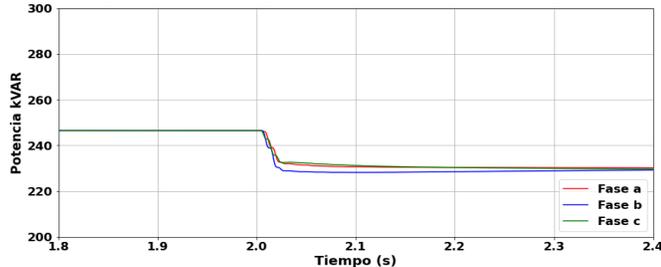
**Figura 17**  
Tensión RMS durante desconexión de carga en la fase b con capacitores.



Al desconectarse la carga de la fase b, la carga está ubicada de manera distribuida a lo largo de las secciones de línea de los nodos 844 y 846. Se observa que, para el caso con el STATCOM, se logra mantener aún dentro del límite superior y en el caso de los capacitores supera ligeramente el límite superior.

Con la finalidad de observar el aporte de potencia reactiva de cada fase, éstas se graficaron de manera independiente en la Figura 18. La fase b disminuye ligeramente más que las fases a y c. Posteriormente el STATCOM equilibra la inyección de potencia reactiva en las tres fases.

**Figura 18**  
Aporte de potencia reactiva por fase del STATCOM

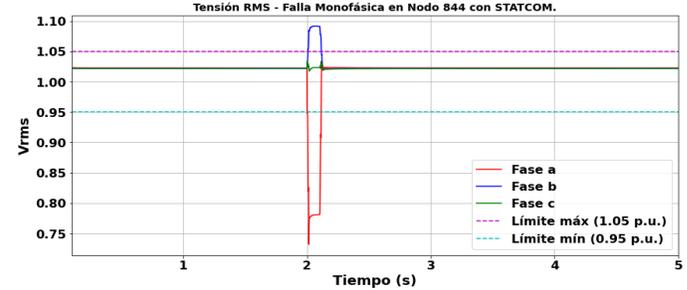


### 3.6 Falla monofásica en Nodo 844

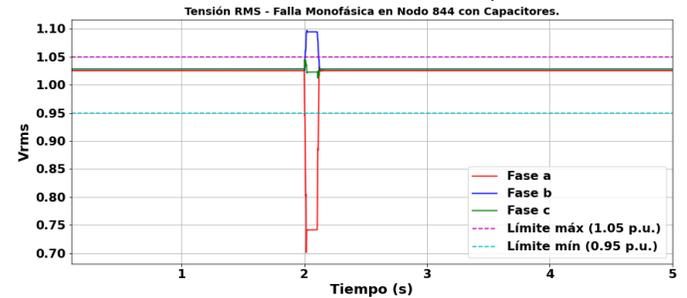
Para el cuarto disturbio se simula una falla monofásica en la fase a del nodo 844. Como se observa en las Figuras 19 y 20, al

ocurrir la falla al segundo 2, en ambos casos ocurre una elevación de tensión en la fase b, el límite superior normativo es superado. En la fase ocurre un abatimiento en la fase a, se observa que la tensión en esta fase para el caso con capacitores cae ligeramente más que con el STATCOM.

**Figura 19**  
Tensión RMS durante falla monofásica en fase a con STATCOM.

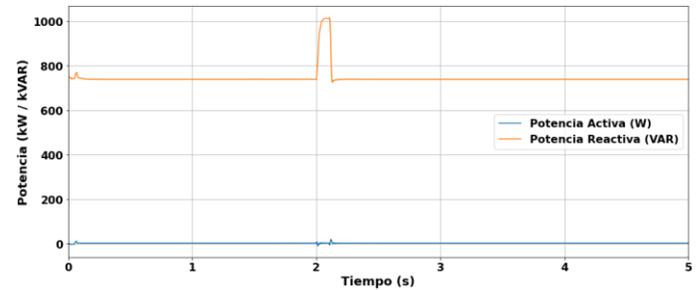


**Figura 20**  
Tensión RMS durante la falla monofásica a con Capacitores.



Como se muestra en la Figura 21, al momento de ocurrir la falla el STATCOM incrementa su aporte de potencia reactiva. Sin embargo, alcanza el límite de su capacidad nominal.

**Figura 21**  
Potencia Reactiva del STATCOM durante falla monofásica.



## IV. CONCLUSIONES

En este artículo se simularon 4 disturbios que se presentan comúnmente en una red real de distribución, con la finalidad de estudiar la inclusión de un STATCOM como una solución de compensación dinámica de potencia reactiva para la regulación de tensión en este tipo de redes. El STATCOM respondió ante los disturbios de ambas condiciones balanceadas y desbalanceadas.

Al comparar los perfiles de tensión obtenidos, con la regulación de tensión dinámica del STATCOM y la compensación fija de los bancos de capacitores después de cada disturbio, se observó que los perfiles con el STATCOM logran mantenerse dentro los límites normativos recomendados en los estándares presentados en la sección 2.2 del presente trabajo. A excepción del disturbio de la falla de la fase a tierra. Sin embargo, se observó que ante un aumento alto de carga y al presentarse una falla de corto circuito como en el segundo y cuarto disturbios, el STATCOM alcanzó su límite nominal de 1 MVA. Aumentar la capacidad del STATCOM resultaría una opción técnica y económica no viable para el tamaño de la red, por lo que se concluye que una planeación donde se integre el STATCOM y un banco de capacitores de menos capacidad en dos puntos diferentes en la red puede ser una solución de regulación de tensión tanto en estado estacionario y ante variaciones de tensión transitorias donde el STATCOM es el dispositivo que responde ante cambios dinámicos.

El estudio presentado en este artículo fue útil, ya que permitió analizar el modelo de STATCOM de 1 MVA, para regular dinámicamente la tensión en la red, comparando su respuesta contra el esquema de compensación de potencia reactiva fija original. Esto es relevante, frente a la modernización de las redes de distribución debido a la integración tanto de energías renovables como de dispositivos de control de la energía como los STATCOMs.

## V. AGRADECIMIENTOS

K. G. Castañeda Hernández agradece a la Secretaria de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONAHCYT por el apoyo económico recibido para el estudio del posgrado. También a la División de Estudios de Posgrado del Instituto del Instituto Tecnológico de La Laguna por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

## VI. REFERENCIAS

- Adebiyi, A. A., Akindeji, K. T. (2017). *Investigating the effect of Static Synchronous Compensator (STATCOM) for voltage enhancement and transmission line losses mitigation*. IEEE PES-IAS Power Africa (pp. 462–467). IEEE. DOI: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991269
- American National Standards Institute. (2016). *ANSI C84.1-2016: Electric power systems and equipment—Voltage ratings (60 Hertz)*. National Electrical Manufacturers Association (NEMA).
- Ashourian, H., Gras, H. (2021). *Three-phase grid-connected converter. EMTP-RV Documentation. Inverter\_documentation*
- Bhujade, R., Saha, J., Maharjan, S., Khambadkone, A., Srinivasan, D., Sundarajan, P. (2022). *Solar PV sitting impacts on annual interruption cost due to voltage sags in industry*. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) DOI:10.1109/PEDES56012.2022.10080316..
- Comisión Reguladora de Energía. (2021). *Resolución No. RES/550/2021 Código de Red*. Diario Oficial de la Federación. DOF - Diario Oficial de la Federación
- Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. J. (2015). *Power system analysis and design* (6th ed.). Cengage Learning.
- Gopi, P., Prabhakar Reddy, I. Sri Hari, P. (2012). *Shunt FACTS Devices for First-Swing Stability Enhancement in Inter-Area Power System*. Third International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System (SEISCON 2012), Chennai and Vivekanandha College of Technology for women, Tiruchengode, Tamilnadu, India. DOI: 10.1049/cp.2012.2230
- Grainger, J.J., Stevenson, W.D. (1996) *Análisis de Sistemas de Potencia (Primera edición en español)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Hingorani, N. G., Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Press.
- IEEE Power Engineering Society. (2004). *IEEE 34 Node Test Feeder: Distribution SSystem Analysis Subcommittee*. IEEE.
- IEEE Standards Association. (2018). *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*. [https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs\\_ora/20220305/IEEE%201547a-2020.pdf](https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20220305/IEEE%201547a-2020.pdf)
- Kersting, W. H. (2001). *Radial Distribución Test Feeders (Distribution System Analysis Subcommittee Report)*. IEEE Power Engineering Society.
- Mahseredjian J., S. Denetière, L. Dubé, B. Khodabakhchian, L. Gérin-Lajoie, "On a new approach for the simulation of transients in power systems," *Electric Power Systems Research*, Volume 77, Issue 11, 2007, Pages 1514-1520. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.027>
- Sánchez, J.H., Castro, L.M. *Novel VSC-based STATCOM model based on dynamic phasor for unbalanced distribution networks*. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, Vol. 11, 241-253. DOI: 10.1109/OAJPE.2024.3392190.
- Sharma, S., Gupta S., Zuhaib, M., Bhuria, V., Malik, H., Almutairi, A., Afthanorban, A., Hossaini, M.A. (2024). *A comprehensive review on STATCOM: Paradigm of modeling, control, stability, optimal location, integration, application, and installation*. IEEE Access, Vol. 12, 2701-2721. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3345216.
- Yazdani, A., Iravani, R. (2010). *Voltage-Sourced Converters in Power Systems. Modeling, Control and Applications*. Wiley-IEEE Press. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=6739364>