VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Modelado y simulación de inversores Grid-Forming en software para la simulación de transitorios electromagnéticos EMTP

Sebastián Cacho León[1], Kevin Yoel Perales González[2], Diego Flores Elizarraras[3], Miguel Ángel Gómez Martínez[4], Luis Ramon Merchan Villalba[5]

[1]Departamento de Ingeniería Eléctrica s.cacholeon@ugto.mx
[2]Departamento de Ingeniería Eléctrica, ky.peralesgonzalez@ugto.mx
[3]Departamento de Ingeniería Eléctrica d.floreselizarraras@ugto.mx
[4]Departamento de Ingeniería Eléctrica gomezma@ugto.mx
[5]Departamento de Ingeniería Eléctrica lr.merchan@ugto.mx

Resumen

El presente trabajo contempla el modelado y simulación de inversores Grid-Forming en el software para la simulación de transitorios electromagnéticos EMTPworks. Se analiza el comportamiento de un sistema eléctrico compuesto por generación, una carga y un inversor que opera en base al modo de control Virtual Sincronous Machine. El estudio se desarrolló mediante la simulación de diversos escenarios de operación, enfocándose principalmente en la aplicación de fallas trifásicas en diferentes puntos del sistema para evaluar su respuesta dinámica. Durante las pruebas se analizaron variables eléctricas como tensión, corriente y frecuencia, con el propósito de observar el impacto de las perturbaciones sobre la estabilidad y continuidad del suministro eléctrico. Los resultados obtenidos permitieron identificar la respuesta de cada una de las áreas ante condiciones de falla, y verificar la capacidad del sistema para recuperar un estado estable después de un periodo prolongado de falla.

Palabras clave: inversor; estabilidad; fallas trifásicas.

Introducción

La transición global hacia un modelo energético descarbonizado ha impulsado la integración masiva de fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar, que se conectan a la red a través de recursos basados en inversores (IBR) (B. Kroposki, 2017; R. Aljarrah, 2024). Este cambio estructural reduce drásticamente la inercia rotacional y la fortaleza de la red eléctrica, ya que los grandes generadores síncronos tradicionales, típicos de las plantas de gas y carbón, están siendo reemplazados de forma progresiva. Además, la inmensa mayoría de los inversores actuales operan como seguidores de red (grid-following o GFL), lo que significa que dependen de una red fuerte y estable para medir el voltaje y sincronizarse, aumentando la vulnerabilidad del sistema ante fluctuaciones de tensión y frecuencia.

En este contexto de vulnerabilidad, los inversores grid-forming (GFM) se erigen como un activo tecnológico crítico y el pilar fundamental para garantizar la resiliencia y seguridad del sistema eléctrico actual. A diferencia de los GFL, los GFM funcionan como fuentes de tensión controladas de manera autónoma, siendo capaces de establecer y mantener internamente su propia referencia de voltaje y frecuencia (R. Rosso, 2021). Al emular el comportamiento dinámico de los generadores síncronos, los inversores GFM proveen servicios esenciales al sistema, tales como inercia virtual o sintética, amortiguamiento de oscilaciones, respuesta rápida de frecuencia y aportación de corriente de cortocircuito (N. Mohammed, 2024). Esta tecnología no solo fortalece las redes débiles, sino que también habilitas operaciones de vital importancia, como la supervivencia en modo isla y la capacidad de arranque en negro (black-start) para restaurar la red tras un apagón. En definitiva, el despliegue de los inversores grid-forming es una condición indispensable para lograr operar redes eléctricas de forma segura con hasta un 100 % de energías renovables, cerrando la brecha de estabilidad que deja la retirada de las plantas de generación fósil (R. H. Lasseter, 2020).

El presente trabajo presenta el modelado y simulación de un inversor grid-forming en el entorno de simulación de transitorios electromagnéticos EMTP-RV. El modelo implementa un algoritmo matemático general con la capacidad de representar 4 estrategias de control Virtual SYnchrnous Machine (VSM), Droop Control,

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

dispatchable Virtual Oscilator Control (dVOC) y PLL-based. Se pretende evaluar respuesta dinámica del modelo VSM bajo diversas condiciones de operación incluyendo fallas y desviaciones de voltaje para analizar el comportamiento inercial, la estabilidad de frecuencia y de tensión. El proyecto busca proporcionar criterios cuantitativos y cualitativos que permitan seleccionar y ajustar estrategias de control de inversores en sistemas eléctricos modernos con alta penetración de fuentes renovables.

Inversores Grid Forming

Los inversores Grid-Forming (GFM) constituyen una de las tecnologías más importantes para la integración de fuentes de energía renovable en los sistemas eléctricos modernos. A diferencia de los inversores Grid-Following (GFL), los cuales requieren una referencia externa de tensión y frecuencia para sincronizarse con la red, los GFM funcionan como fuentes de tensión controladas capaces de establecer de manera autónoma la magnitud del voltaje, la frecuencia y el ángulo de fase. Gracias a esta característica, pueden proporcionar servicios auxiliares esenciales como regulación de frecuencia, soporte de tensión, reparto de potencia, operación en modo isla y capacidad de arranque en negro (black start) (Abudyak y otros, 2026). Para lograr este comportamiento se han desarrollado diversas estrategias de control, entre las que destacan el control por estatismo (Droop Control), la Máquina Síncrona Virtual (Virtual Synchronous Machine, VSM), el Control por Oscilador Virtual Despachable (Dispatchable Virtual Oscillator Control, dVOC) y los enfoques híbridos basados en Phase-Locked Loop (PLL), cada uno con diferentes características dinámicas y aplicaciones (Chatterjee y otros, 2025) (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2022) (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024). Estas estrategias de control se describen a continuación.

Droop-based GFM (Control por Estatismo)

El control por estatismo es la estrategia clásica y más consolidada, heredada de la regulación de los generadores tradicionales en sistemas eléctricos y microrredes. Es un método sumamente robusto, fácil de implementar y no requiere canales de comunicación rápidos entre inversores para repartirse la carga de manera equitativa. Su principio de funcionamiento se basa en regular la potencia del inversor de manera local y descentralizada modificando la frecuencia y el voltaje según la demanda de la carga. Aplica dos relaciones lineales: Si la demanda de potencia activa (P) aumenta, el inversor reduce ligeramente su frecuencia (f); Si la potencia reactiva (Q) aumenta, disminuye levemente la magnitud de su voltaje (V).

Esta estrategia permite una distribución adecuada de la potencia entre varios inversores conectados en paralelo y presenta una elevada robustez frente a cambios de carga. Sin embargo, debido a que no incorpora de manera explícita un modelo de inercia, su respuesta frente a perturbaciones rápidas depende completamente del ajuste de sus ganancias de control (Chatterjee y otros, 2025) (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2022) (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024).

VSM-based GFM (Virtual Synchronous Machine / Máquina Síncrona Virtual)

Esta estrategia busca imitar digitalmente el comportamiento físico exacto de una máquina síncrona tradicional de rotor masivo. El software del inversor procesa matemáticamente la ecuación del giro (*swing equation*) de los generadores reales. Esto introduce en el bucle de control dos factores artificiales: inercia y amortiguamiento virtuales. Aporta inercia real al sistema eléctrico digitalizado. Ante caídas bruscas de frecuencia en la red, el inversor inyecta o absorbe energía de forma inmediata simulando el efecto de una masa rotatoria pesada, ralentizando el cambio de frecuencia y estabilizando la red.

Su diseño y ajuste de parámetros son más complejos. Si no se sintoniza de forma precisa, puede introducir oscilaciones subsíncronas o inestabilidades dinámicas similares a las que sufren las centrales eléctricas reales (Chatterjee y otros, 2025) (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2022) (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

dVOC-based GFM (Dispatchable Virtual Oscillator Control / Control por Oscilador Virtual Despachable)

El control dVOC es una de las técnicas avanzadas más recientes desarrollada en entornos de investigación de vanguardia para redes altamente digitales. A diferencia del control Droop y del VSM, esta metodología no intenta imitar a un generador mecánico, sino que este control emula el comportamiento de un oscilador electrónico no lineal. Los inversores se programan para comportarse como osciladores acoplados físicamente a través de las líneas de transmisión.

Posee una respuesta dinámica increíblemente rápida y superior ante perturbaciones críticas. Ofrece una propiedad matemática intrínseca de sincronización global automática (sin necesidad de comunicaciones), garantizando que todos los inversores se sincronicen de manera natural y óptima según las leyes físicas de los circuitos del sistema. Sin embargo, su formulación matemática es compleja y no lineal, lo que hace que su análisis de estabilidad ante fallas extremas a gran escala sea más difícil de certificar para los operadores de red tradicionales (Chatterjee y otros, 2025) (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2022) (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024).

PLL-based GFM (Grid-Forming basado en PLL)

Los lazos de seguimiento de fase (PLL o *Phase-Locked Loop*) son la solución híbrida de los inversores *Grid-Following* (GFL) para sincronizarse rígidamente con la red. Utiliza un PLL modificado para estimar la frecuencia de la red, pero implementa un bucle de control externo de voltaje que le permite comportarse temporalmente como una fuente de tensión (GFM) en lugar de una fuente de corriente. El ángulo de fase se calcula rastreando la red, pero con límites de corriente o filtros de potencia lentos integrados.

Permite a los fabricantes reutilizar gran parte de las arquitecturas de firmware de inversores actuales, facilitando una transición de código más rápida para dar soporte a redes débiles. Sin embargo, al depender de la medición de un voltaje existente a través del PLL, su rendimiento en condiciones de cortocircuito severo, redes extremadamente débiles o en un "Black Start" (arranque en negro de una red completamente apagada) es drásticamente inferior en comparación con el control Droop, VSM o dVOC (Chatterjee y otros, 2025) (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2022) (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024).

Modelo de inversor Grid-Forming en EMTPWorks

Dentro del software EMTPWork viene implementado un modelo de inversor grid-forming versátil con la capacidad de operar en función en modo Droop, VSM, dVOC y PLL-based. Ésta característica es relevante dentro del softwate, pues otras herramientas de simulación de transitorios electromagnéticos como PSCAD o EMTP-ATP no incorporan modelos de inversores listo para ser usados. La representación del modelo en el en el software EMTPWorks se presenta en la Figura 1.

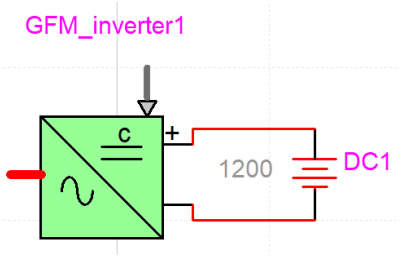


Figura 1. Inversor GFM.

El modelo posee todos los elementos de control y operación para simular el comportamiento en las simulaciones transitorias. Además, tiene los elementos necesarios para inicializar las variables internar desde una simulación de flujos de potencia.

El sistema de control está conformado según lo mostrado en la Figura 2, que posee lo siguiente:

- GSC Sampler: Adquiere las señales medidas desde el convertidor, tanto voltaje, corriente de la parte de CD, se encarga también de realizar un muestreo para que las señales puedan ser procesadas por el sistema de control digital.
- Convertidor de las señales a sistema por unidad [p.u.]: Como su nombre lo indica, convierte las señales eléctricas medidas, a sistema en por unidad, facilitando los procesos.
- Filtro pasa-bajas (LPF): Sirve para rechazar señales de alta frecuencia, esto para evitar oscilaciones rápidas que afecten al sistema y tener mayor estabilidad.
- El modelado del sistema de control: Parte del modelo, en el que se generan las referencias de tensión y frecuencia del inversor, dependiendo de la estrategia utilizada, este bloque regula la potencia activa y reactiva para emular un distinto comportamiento, de una fuente de tensión síncrona y mantener la estabilidad de la red.
- Un sistema de protección: Supervisa constantemente las variables de tensión, corriente, y el voltaje en la parte de CD, para activarse y proteger el sistema ante una sobre corriente, sobre tención, evitando daños al equipo.

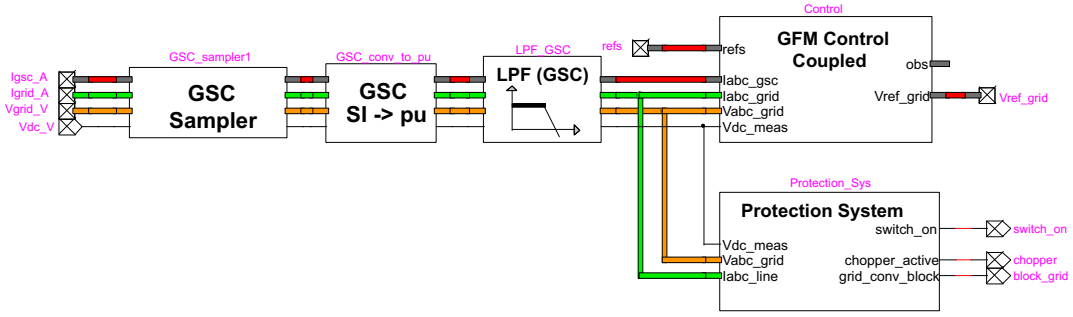
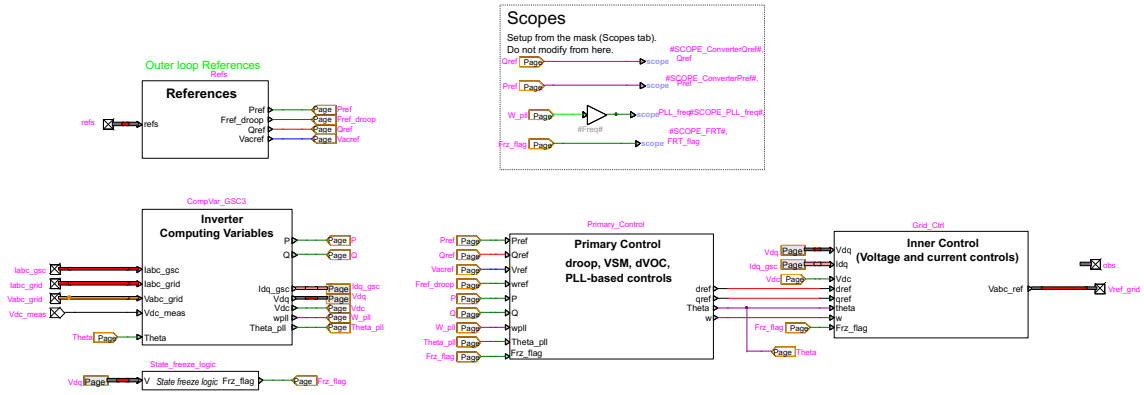


Figura 2. Control GFM.

El elemento “GFM Control Couped” se conforma por distintos componentes según lo mostrado en la Figura 3, con las siguientes funciones:

- References: Bloque donde se definen los valores deseados de potencia activa, tensión y frecuencia, que sirven para el sistema de control, pueden ser constantes o variar dependiendo de las condiciones de operación.
- Scopes: Sirve para visualizar el comportamiento del sistema durante la simulación, potencia activa, reactiva, tensión, frecuencia y otras señales internas.
- Inverter Computing variables: Procesa las señales medidas del inversor para obtener las variables necesarias para el control, entre este proceso se encuentra la retroalimentación del sistema, que permiten que el controlador compare el estado actual con las referencias.
- Primary Control: En este bloque, como su nombre lo indica, se encuentra el control primario del inversor, utiliza una estrategia de control seleccionada, y su objetico es regular el intercambio de potencia con la red y proporcionar estabilidad al sistema.
- Inner Control: Se encarga de garantizar que las tensiones y corrientes generadas por el convertidor sigan las referencias producidas por el control primario. Su dinámica de operación es más rápida que el control primario, y responde ante cambios de operación.



- *Figura 3. GFM control couped elementos.*

Dependiendo de la configuración que se desee, el sistema puede trabajar en Droop, VSM, dVOC ó PLL-based controls, en los cuales, los primeros tres tienen el mismo principio matemático de operación, donde se ve en las ecuaciones 1, 2, 3.

$$\tau_f \frac{d\omega}{dt} = -\omega + \omega_0 + k_d(\omega_g - \omega) + k_f(p_{ref} - p_m) \quad (1)$$

$$\tau_v \frac{dV}{dt} = f_v(V) + k_v(q_{ref} - q_m) \quad (2)$$

$$\tau_p \left[\frac{dp_m}{dt} ; \frac{dq_m}{dt}\right] = -[p_m ; q_m] + [p ; q] \quad (3)$$

Donde:

$\boldsymbol{\omega}$ es la frecuencia angular del inversor,
$\boldsymbol{\omega_0}$ es la frecuencia angular nominal,
$\boldsymbol{\omega_g}$ es la frecuencia angular de la red medida por el PLL,
$\boldsymbol{V}$ es la magnitud del voltaje del inversor,
$\boldsymbol{V_0}$ es la magnitud nominal del voltaje,
$\boldsymbol{P}$ es la potencia activa de salida medida del inversor,
$\boldsymbol{q}$ es la potencia reactiva de salida medida del inversor,
$\boldsymbol{P_{ref}}$ es la potencia activa de salida de referencia del inversor, y
$\boldsymbol{q_{ref}}$ es la potencia reactiva de salida de referencia del inversor (EMTP-EMTPWorks, 2024).

$\boldsymbol{\tau_f, k_d, k_f, \tau_v, k_v, \tau_p}$ y $\boldsymbol{f_v(V)}$ son parámetros dependientes que cambian de acuerdo con la estrategia de control del inversor **Grid-Forming (GFM).**

Los valores correspondientes para el control del GFM dependiendo de sus parámetros se pueden ver en la Tabla 1:

Tabla 1. *Valores de parámetros para control*

	τ_f	τ_v	τ_p	k_d	k_f	k_v	$f_v(V)$	Ecuaciones
PLL-based	NA	NA	$\frac{1}{\omega_c}$	NA	$\frac{1}{d_f}$	$\frac{1}{d_v}$	NA	$P_{oref} = d_f(\omega_g - \omega) + (P_{ref} - P_m)$ $V = V_0 + \frac{1}{d_v}(q_{ref} - q_m)$
Droop	0	0	$\frac{1}{\omega_c}$	0	$\frac{1}{d_f}$	$\frac{1}{d_v}$	$-V + V_0$	$\omega = \omega_0 + \frac{1}{d_f}(P_{ref} - P_m)$ $V = V_0 + \frac{1}{d_v}(q_{ref} - q_m)$
VSM	$\frac{m_f}{d_f}$	0	$\frac{1}{\omega_c}$	$\frac{d_d}{d_f}$	$\frac{1}{d_f}$	$\frac{1}{d_v}$	$-V + V_0$	$\frac{m_f}{d_f}\frac{d_\omega}{d_t} = -\omega + \omega_0 + \frac{d_d}{d_f}(\omega_g - \omega) + \frac{1}{d_f}(P_{ref} - P_m)$ $V = V_0 + \frac{1}{d_v}(q_{ref} - q_m)$
dVOC	0	$\frac{1}{\omega_0}$	0	0	$\frac{\omega_0 k_1}{V^2}$	$\frac{k_1}{V}$	$k_2(-V^3 + V_0^3 V)$	$\omega = \omega_0 + \frac{\omega_0 k_1}{V^2}(P_{ref} - P_m)$ $\frac{1}{\omega_0}\frac{dV}{dt} = k_2(-V^3 + V_0^3 V) + \frac{k_1}{V}(q_{ref} - q_m)$

Tanto la información sobre las ecuaciones, como la tabla de los parámetros se pudieron sacar con respecto a la fuente (EMTP-EMTPWorks, 2024).

Las ecuaciones (1)-(3) se implementan en el modelo tal como se representa en la Figura 4.

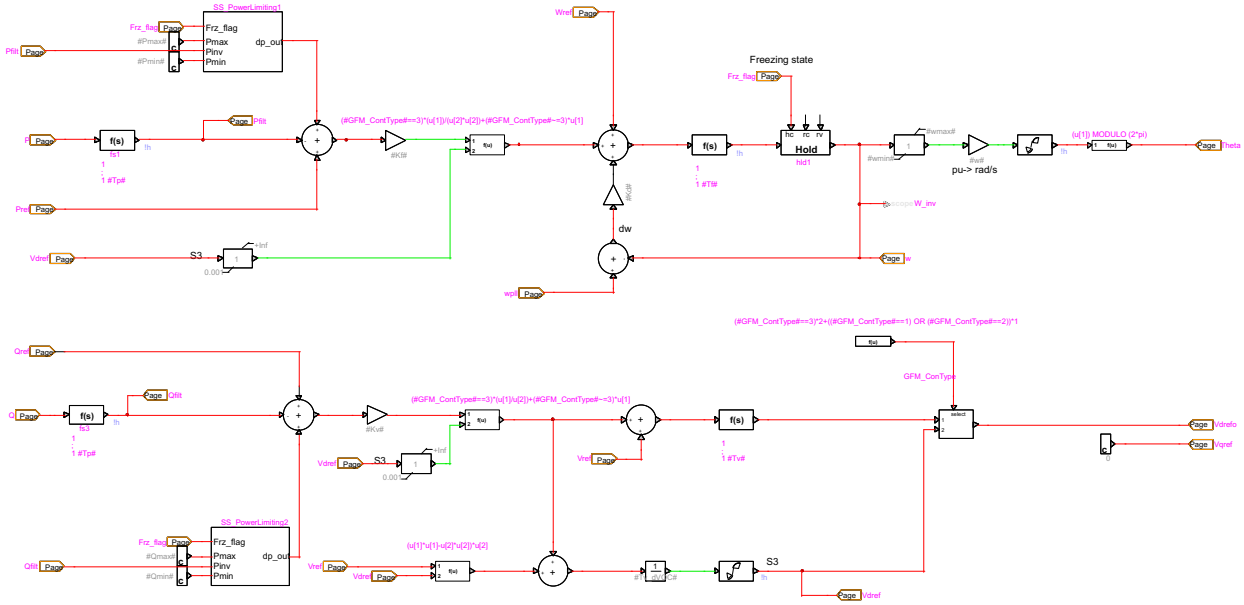


Figura 4. Modelo matemático implementado para Droop, VSM, dVOC-based GFM.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

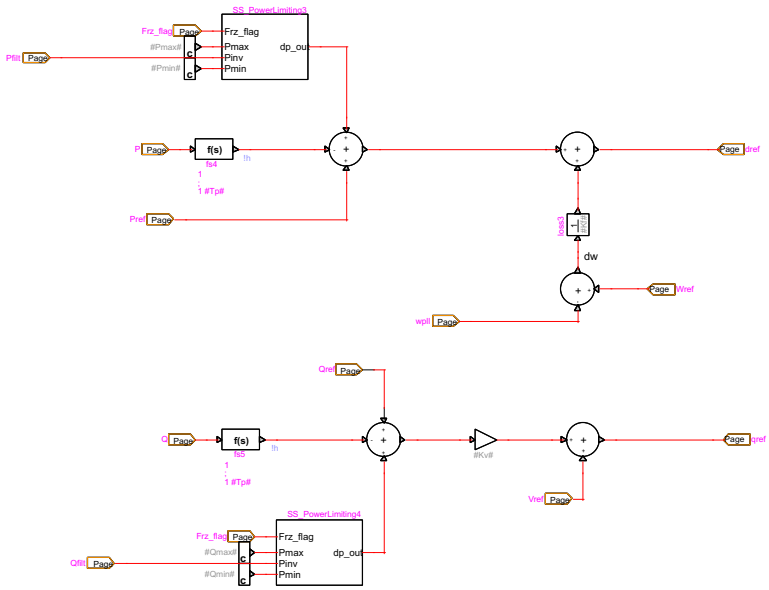


Figura 5. Modelo matemático implementado para PLL-based GFM.

Resultados

Con el objetivo de validar el comportamiento del modelo de inversor Grid-Forming se van a desarrollar varias pruebas que permitirán evaluar la respuesta del sistema ante diferentes condiciones de operación. El sistema de prueba a evaluar corresponde al presentado en la Figura 6.

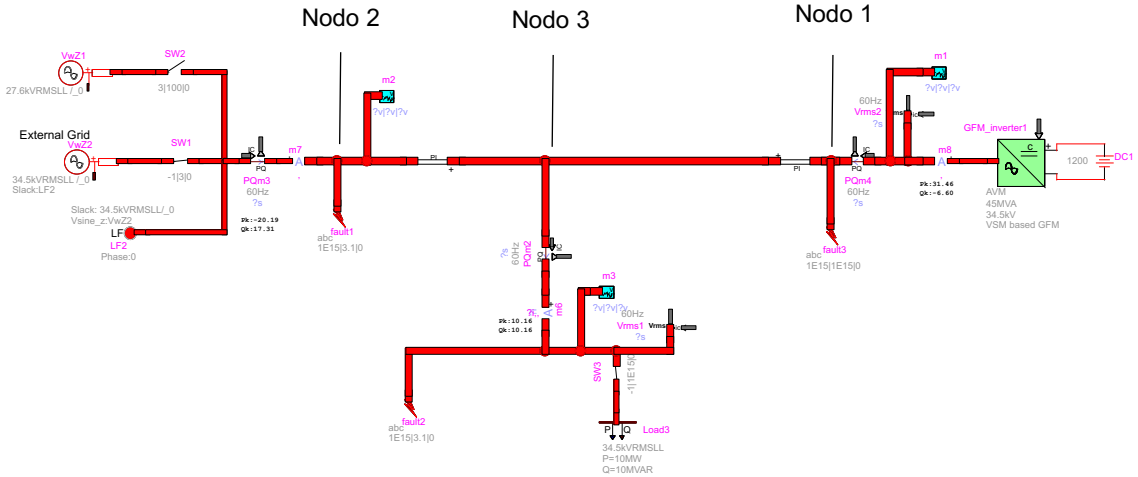


Figura 6. Sistema de prueba.

Entre los elementos que se pueden observar en la Figura 6, están:

- External grid: Una representación de una fuente ideal a 34.5 KVRMSLL, que simula a una red muy grande, el cuál posee una impedancia equivalente de thevenin que se puede observar en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.
- Una fuente extra en el Nodo 1, no cerrada, en paralelo a la red, para posteriormente conectarla para simular una caída o aumento en el voltaje para próximos análisis

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

- Una carga Load 3, donde se usará posteriormente para análisis y sirve para ver cómo reacciona el inversor ante una posible desconexión de la red, cuya capacidad a voltaje nominal es de 34.5 KVRMSLL:

  - $P = 10\ MW$
  - $Q = 10\ MVAR$

- Un inversor de 45MVA con 34.5 KV, cuyo modelo de control que se usará es el VSM para las pruebas y ver su comportamiento. EL inversor posee los siguientes valores de constantes para el control VSM (se desactivaron las protecciones, AC undervoltage protections y AC overvoltage protections):
  - $\boldsymbol{\omega_c}$ = 125.66
  - $\boldsymbol{d_f}$ = 0.8038
  - $\boldsymbol{d_v}$ = 25
  - $\boldsymbol{m_f}$ = 0.15
  - $\boldsymbol{d_d}$ = 0.11
  - $\boldsymbol{k_1}$ = 0.0033
  - $\boldsymbol{k_2}$ = 0.0457
  - $\boldsymbol{V_{dip}}$ = 0.8
  - $\boldsymbol{d\omega_{min}}$ = -100
  - $\boldsymbol{d\omega_{max}}$ = 100
  - $\boldsymbol{P_{max}}$ = 1
  - $\boldsymbol{P_{min}}$ = 0
  - $\boldsymbol{Q_{max}}$ = 0.33
  - $\boldsymbol{Q_{min}}$ = -0.33
- Elementos tales como medidores, las impedancias de las líneas y otros más. La conexión de estas mismas líneas se da de la siguiente manera:
  - Desde la red (External Grid, Nodo 2) hacia la carga (Nodo 3)
  - Desde el Nodo 3 hacia el inversor (Nodo 1)

  El Nodo 3 es el punto de conexión entre la red, la carga, y el inversor.

  A su vez el posicionamiento de los medidores es:
  - m1: Medidor conectado del lado del inversor (Nodo 1)
  - m2: Medidor conectado del lado de la red (Nodo 2)
  - m3: Medidor conectado del lado de la carga (Nodo 3)

- ***Tabla 2.*** *Valores de thevenin de la red, R*

$R\ (\Omega)$	1	2	3
1	0.895740708514605	0.10799941081417	0.109484576755749
2	0.10799941081417	0.889103873213176	0.106189364822871
3	0.109484576755749	0.106189364822871	0.891981382224984

- ***Tabla 3.*** *Valores de thevenin de la red, L*

$L\ (\Omega)$	1	2	3
1	0.655097414543195	0.298982468614046	0.264127480422623
2	0.298982468614046	0.662801712865134	0.24310310006215
3	0.264127480422623	0.24310310006215	0.659460089496582

- ***Tabla 4.*** *Valores de thevenin de la red, C*

$C\ (\mu S)$	1	2	3
1	2.376590386575513	-0.666653862026103	-0.436360318210068
2	-0.666653862026103	2.276712977004351	-0.276194453697949
3	-0.436360318210068	-0.276194453697949	2.188484837787446

Se empezó por realizar fallas con respecto a la red, en el inversor y en la carga.

Respuesta ante falla trifásica en el POI

En la Figura 7 se pueden observar las gráficas de los voltajes de una sola fase (ya que son los mismos en cada una de las fases) ante la presencia de una falla en la red.

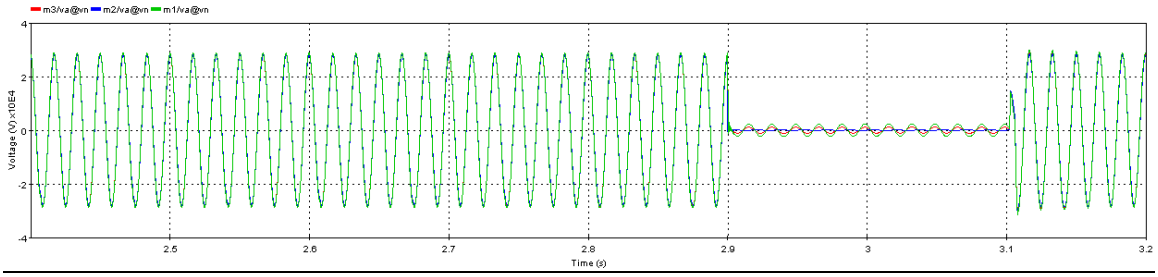


Figura 7. Resultados de mediciones de voltaje ante falla en la red. Señal verde (m1): Representa el voltaje de la fase A en el nodo 1 del sistema; Señal azul (m2): Representa el voltaje de la fase A en el nodo 2 del sistema; Señal roja (m3): Representa el voltaje de la fase A en el nodo 3 del sistema.

La Figura 8 muestra las gráficas de las corrientes de control I_d (señal roja) e I_q(señal azul) en un inversor Grid-Forming. Alrededor de los 2.9 s se observa la actuación del limitador, provocando un cambio brusco en ambas corrientes debido a una perturbación en el sistema. Posteriormente, cerca de los 3.1 s, tanto $I_d$como $I_q$presentan un comportamiento transitorio con sobreimpulso y oscilaciones amortiguadas antes de volver de nuevo a estado estable.

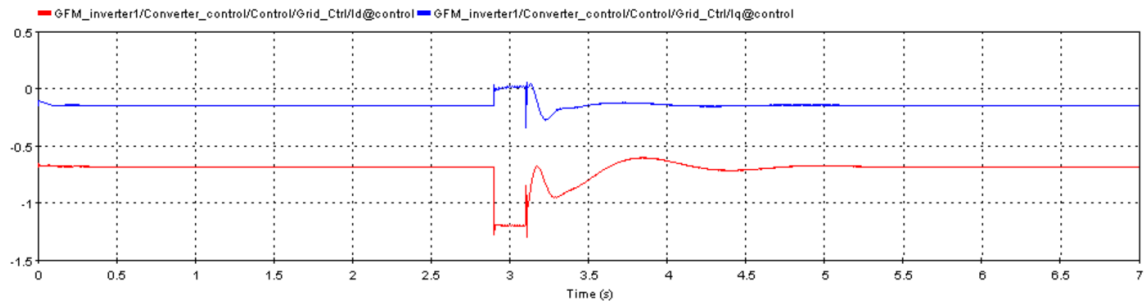


Figura 8. Resultados de Iq e Id en A

Respuesta ante falla trifásica en terminales de los inversores

Dada la Figura 9 y la respuesta del inversor ante la falla trifásica en el inversor, se puede observar como el inversor (señal roja), llega a tener cero Volts, esto debido a que la falla se encuentra en este mismo nodo donde se encuentra, lo que provoca que no se pueda mantener el voltaje en esa zona. La red sin embargo

(señal azul) mantiene un voltaje mayor incluso ante el bus donde se encuentra la carga, lo cual es esperado ya que es el bus más lejano a la falla, estando este en el Nodo 2, y la carga en el Nodo 3.

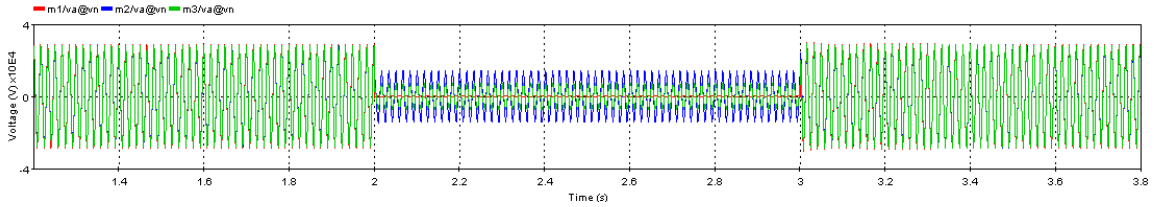


Figura 9. Resultados de mediciones de voltaje ante falla en el inversor

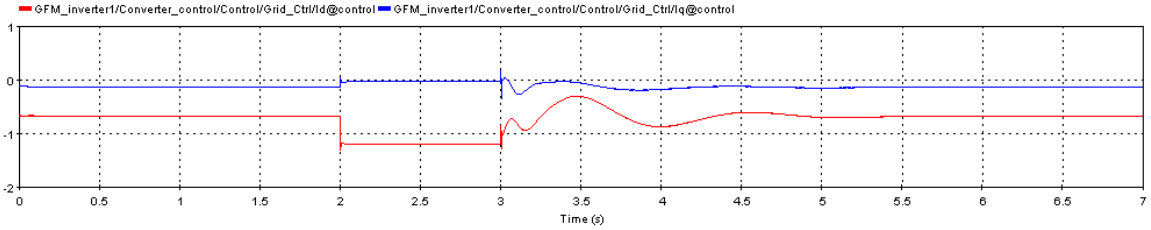


Figura 10. Resultados de Iq (señal azul) e Id (señal roja) en A

Durante la falla, como se puede ver en la Figura 10, la corriente Id que estaba en valores de -0.6 cae drásticamente hasta -1.2 en el momento en el que sucede la falla, y se llega a estabilizar en ese valor mientras la falla continua. En el caso de Iq, pasa de valores cercanos de -0.16 hasta cercanos a -0.05.

Respuesta ante falla bifásica BUS 1

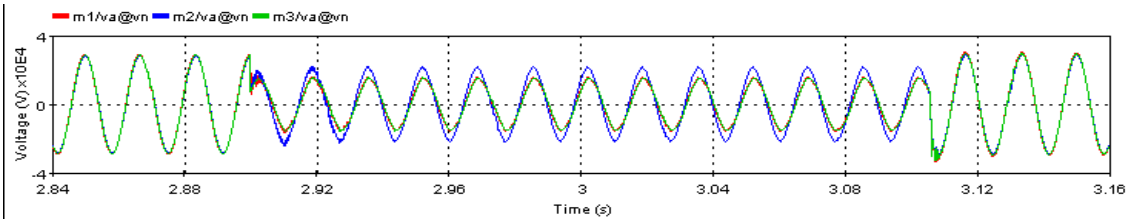


Figura 11. Resultados de la falla bifásica en el BUS 1

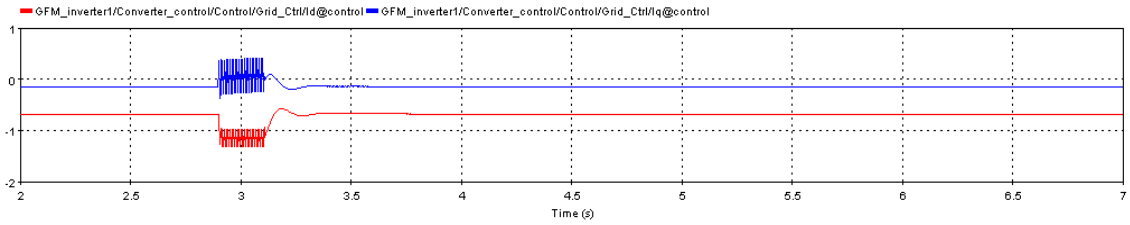


Figura 12. Resultados de Iq (señal azul) e Id (señal roja) en A

En la figura 11 se puede observar que una falla entre dos fases afecta principalmente el voltaje de esas mismas y el voltaje de la fase no afectada logró mantenerse estable por más tiempo frente a la perturbación;

de igual manera, el inversor (señal roja) consiguió sostener su nivel de tensión sin tener una caída drástica. Como resultado, la caída en el voltaje del bus es mayor en comparación a las otras dos. La perturbación permaneció completamente limitada al nodo de interconexión entre los tres componentes del sistema.

Respuesta ante monofásica a tierra BUS 1

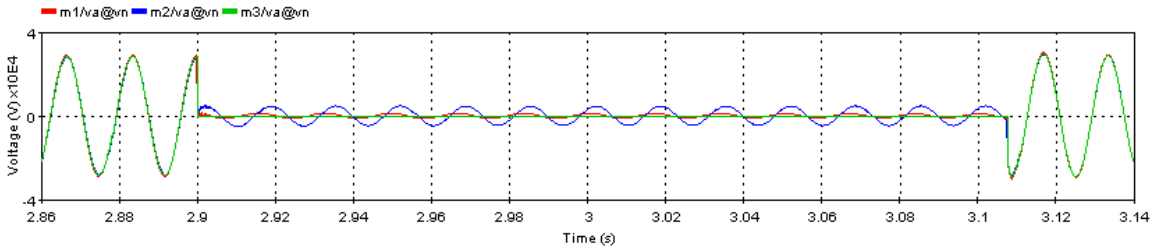


Figura 13. Resultados de la falla monofásica en el BUS 1

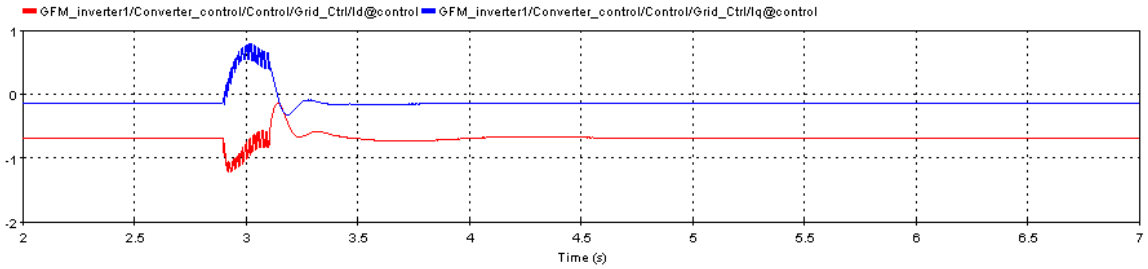


Figura 14. Resultados de Iq (señal azul) e Id (señal roja) en A.

Como se muestra en las Figuras 13 y 14, cuando ocurre la falla, el voltaje en la fase afectada cae de manera drástica durante los primeros instantes del evento, este impacto en el voltaje es notablemente más severo en la parte del inversor debido a sus propias capacidades eléctricas limitadas, que la vuelven más sensible a este tipo de alteraciones.

Respuesta voltaje 0.8

Ante una caída del voltaje en la red eléctrica del 80% del voltaje nominal se puede observar su comportamiento en la Figura 15.

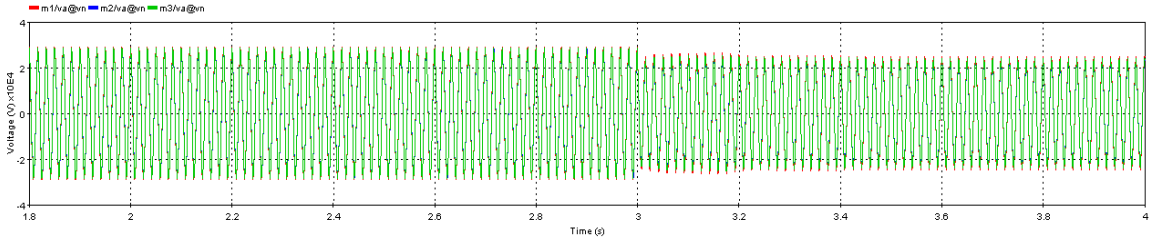


Figura 15. Voltaje 80% en la red.

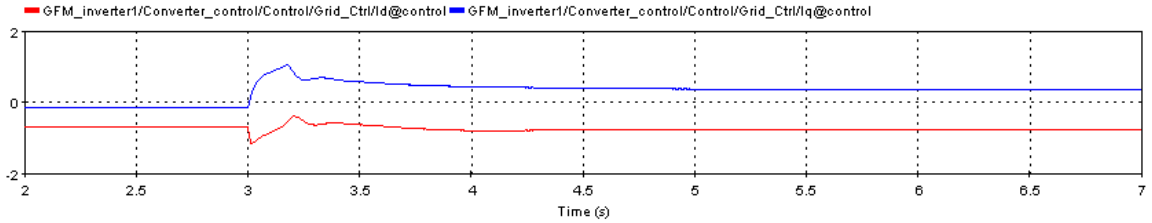


Figura 1. Resultados de Iq (señal azul) e Id (señal roja) en A, con aumento de voltaje al 80%.

Que tanto las gráficas para el voltaje de la fase a del inversor (señal roja), la red (señal azul) y la carga (señal verde), tienen el mismo comportamiento, llegan a caer drásticamente desde su valor nominal que es de 34.5 KV a 27.6 KV, para posteriormente volver a aumentar y luego bajar, esto hasta llegar a un valor estable 27.2KV del lado de la red, que no es el valor nominal, ni tampoco el de la caída, pero del lado de la carga si se llega a tener 27.6KV y la MR mantiene un voltaje de 28.4KV. Mostrando como la MR aumenta el valor del V y trata de compensar la caída con la capacidad que tiene. Las señales de corriente en su componente d y q intentan apoyar a mantener el voltaje mediante la inyección de un valor de corriente, especialmente en la componente q.

Respuesta voltaje 1.2

Ante una subida del 20% del voltaje nominal en el sistema de prueba, la respuesta en las señales de voltaje se puede observar desde la Figura 17,

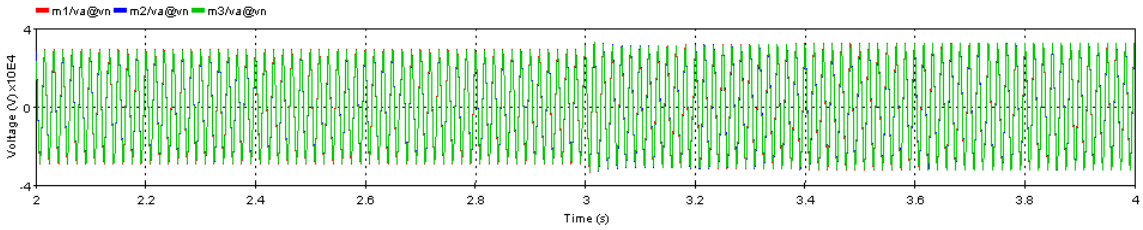


Figura 17. Voltaje 120% en la red.

En la figura 18 se puede observar que el aumento del 20% en el voltaje de generación provoca una sobretensión que afecta a la red, la carga y al inversor; esto provoca que los valores nominales de voltaje de los dispositivos se incrementen drásticamente. Este incremento de voltaje ocasiones que el inversor intente apoyar a mantenerlo bajo mediante una disminución de la inyección de potencia reactiva, lo que resulta en un consumo de potencia reactiva.

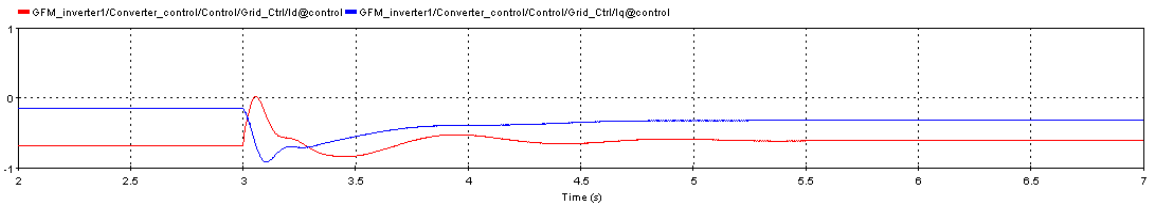


Figura 18. Resultados de Iq (señal azul) e Id (señal roja) en A, con aumento de voltaje al 120%.

La simulación confirma que, durante eventos de sobretensión severa, la prioridad a la potencia reactiva (Q) garantiza la estabilidad del sistema al sacrificar temporalmente la potencia activa para ofrecer soporte de voltaje

La evaluación dinámica del inversor *Grid-Forming* operando bajo la estrategia de control de Máquina Síncrona Virtual (VSM) en la plataforma EMTPWorks demuestra la capacidad intrínseca de esta tecnología para actuar como fuente de tensión autónoma y brindar soporte a la red ante contingencias severas. A continuación, se analizan críticamente los fenómenos físicos y de control observados en los distintos escenarios simulados:

Respuesta ante Fallas Trifásicas y Acción del Limitador de Magnitud (*Magnitude Limiter*)

Ante perturbaciones simétricas severas (fallas en el POI y en terminales del inversor), los resultados destacan el conflicto fundamental entre la naturaleza de fuente de tensión del inversor GFM y los límites de sobrecorriente de los dispositivos semiconductores.

- Falla en el POI (Nodo 2/3): En la Figura 8 se evidencia la activación del algoritmo *Magnitude Limiter* alrededor de los t = 2.9 s. Al saturarse la capacidad de corriente del inversor para evitar la destrucción del puente H, se observa un régimen transitorio caracterizado por sobreimpulsos y oscilaciones amortiguadas ($t \approx 3.1, d$) en las componentes de corriente I_d e I_q. Este amortiguamiento refleja el efecto combinado del coeficiente de amortiguamiento d_d y la inercia sintética m_f, garantizando la estabilidad y evitando la pérdida de sincronismo una vez despejada la falla.

- Falla en Terminales (Nodo 1): Como se ilustra en la Figura 9, el colapso total de tensión en el Nodo 1 es físicamente inevitable debido a la localización directa del cortocircuito. No obstante, la corriente del eje directo I_d conmuta de $-0.6\,A$ a un límite seguro sostenido de $-1.2\,A$ (Figura 10). La permanencia de tensión en la red (Nodo 2) valida el desacoplamiento numérico e impedancia equivalente entre el punto de falla y el resto de la red.

Comportamiento ante Fallas Asimétricas (Bifásicas y Monofásicas a Tierra)

El análisis de las fallas bifásicas y monofásicas en el Bus 1 (Figuras 11 a 14) revela la sensibilidad del control VSM estándar frente a componentes de secuencia negativa y cero:

- Falla Bifásica: El inversor logra sostener el nivel de tensión en la fase sana sin caídas drásticas, limitando la perturbación al nodo de interconexión. Esto demuestra la capacidad del bucle de control de voltaje para mantener referencias de fase independientes dentro de los márgenes de balance de potencia.

- Falla Monofásica a Tierra: Se observa un impacto más severo en la amplitud de tensión del inversor durante la fase fallada (Figura 13). Al no incorporar bucles explícitos de control de secuencia negativa o filtros de desbalance de corriente en la estructura VSM evaluada, la corriente de cortocircuito se concentra fuertemente en el canal de falla, alcanzando rápidamente las limitaciones térmicas/eléctricas del conversor.

Regulación y Soporte Dinámico de Voltaje (Q/V Droop y Priorización de Reactiva)

Los escenarios de hueco de tensión (*sag* al 80%) y sobretensión (*swell* al 120%) verifican la respuesta proporcional del bucle de estatismo de potencia reactiva (d_v y k_v):

- Depresión de Voltaje (80% / 27.6 kV): Ante la caída en la red, el inversor reacciona inyectando corriente reactiva mediante la componente I_q (Figura 16). Esta inyección logra elevar la tensión local en la carga a 27.6 kV y en el inversor a 28.4 kV, mitigando la profundidad del hueco de tensión en comparación con el valor de la red 27.2 kV.

- Sobretensión (120% / 41.4 kV): Frente a la sobretensión (Figura 17), el inversor invierte el flujo de potencia reactiva, pasando a absorber Q de la red. Como se corrobora en la Figura 18, para lograr este soporte reactivo sin sobrepasar la corriente máxima permisible del conversor, la estrategia de control aplica una priorización de potencia reactiva (Q-priority), sacrificando temporalmente la

inyección de potencia activa (P). Este comportamiento emula adecuadamente la reacción de un generador síncrono sobreexcitado/subexcitado.

Síntesis y Trabajo Futuro

En conjunto, la implementación del control VSM demuestra que los inversores GFM son capaces de proporcionar inercia sintética y soporte dinámico de voltaje sin depender de la medición de frecuencia mediante PLL en régimen permanente. No obstante, los resultados sugieren áreas de mejora:

1. Control en Fallas Asimétricas: Incorporar bucles de desacoplamiento de secuencia positiva/negativa (DQSC / VNSC) para mejorar la respuesta del voltaje en fases no afectadas durante fallas monofásicas.

2. Estrategia del Limitador: Optimizar la dinámica de conmutación del *Magnitude Limiter* para suavizar las oscilaciones transitorias observadas en t=3.1s durante el restablecimiento del sistema.

Conclusiones

En conclusión, el proyecto permitió analizar la dinámica de un sistema eléctrico integrado por generación, el inversor con su sistema de control y cargas trifásicas frente a diversos escenarios de falla. Los resultados mostraron el comportamiento de cada subsistema ante perturbaciones severas, facilitando la evaluación de la estabilidad y las variaciones de tensión y corriente. Asimismo, se comprobó la efectividad en la coordinación de los esquemas de control para contener la propagación de fallas y asegurar la continuidad operativa. Finalmente, estas pruebas confirmaron que el análisis de fallas es una herramienta esencial para validar el diseño, optimizar el control y aumentar la confiabilidad en sistemas eléctricos complejos.

A partir de las simulaciones realizadas bajo diferentes condiciones de operación del inversor Grid-Forming, se comprobó que el inversor posee la capacidad de responder de manera dinámica ante las perturbaciones estudiadas. Durante los eventos transitorios, el sistema implementa acciones de control que ayudan a estabilizar un poco los niveles de voltaje y corriente, reduciendo el impacto de las perturbaciones y contribuyendo a preservar la estabilidad y continuidad operativa del sistema de prueba, influyendo positivamente nuestro inversor.

Referencias

Abudyak, Y. H., Rezaei, M. H., Abdelnabi, A. A., Rizi, H. S., Batarseh, I., & Huan, A. Q. (2026). Grid-Forming Inverters Review: Control, Stability, and the Next Stage With Artificial Intelligence and Digital Twins. *IEEE Open Journal of Power Electronics, 7*, 351-387. https://doi.org/10.1109/OJPEL.2026.3654526

B. Kroposki, Y. Z.-M. (2017). Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems With Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. *IEEE Power & Energy Magazine*. https://doi.org/10.1109/MPE.2016.2637122

Chatterjee, D., Triemstra, J., Macías, C., Cai, W., Tatkare, K., Mallik, R., & Johnson, B. (21 de Julio de 2025). *UNIFI's Grid-Forming (GFM) Inverter Reference Design: A Tutorial on Modeling, Control, and Experimental Implementation of GFM Inverters*. Johnson Lab – The University of Texas at Austin. https://johnsonlab.ece.utexas.edu/wp-content/uploads/2025/08/GFM-Tutorial.pdf

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). (Noviembre de 2022). *Modeling Grid-Forming Technologies and Standardization*. CSIRO Research. https://research.csiro.au/ired2022/wp-content/uploads/sites/477/2022/11/Modeling-Grid-Forming-Technologies-and-Standardization.pdf

EMTP-EMTPWorks. (2024). GFM Inverter. En EMTP-EMTPWorks, *GFM Inverter* (págs. 1-16).

N. Mohammed, H. U. (2024). Grid-Forming Inverters: A Comparative Study of Different Control Strategies in Frequency and Time Domains. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. https://doi.org/10.1109/OJIES.2024.3371985

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024). *Grid-Forming Inverter Research (Report No. 90260)*. NREL Document Repository. https://docs.nlr.gov/docs/fy24osti/90260.pdf

R. Aljarrah, B. B.-A. (2024). Issues and Challenges of Grid-Following Converters Interfacing Renewable Energy Sources in Low Inertia Systems: A Review. *IEEE Access*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3349630

R. H. Lasseter, Z. C. (2020). Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2959271

R. Rosso, X. W. (2021). Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. https://doi.org/10.1109/OJIA.2021.3074028