

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A UNA RED DISTRIBUIDA EN BAJA TENSIÓN

ANALYSIS AND SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTERCONNECTED TO A LOW VOLTAGE DISTRIBUTED NETWORK

Sergio David Franco de Santiago

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México
desantiagofranco12@gmail.com

José Luis Díaz Bernabé

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, México
jldiaz@cinvestav.mx

Recepción: 23/noviembre/2023

Aceptación: 13/junio/2024

Resumen

La generación distribuida está creciendo opuestamente a la generación convencional de energía la que produce contaminación por CO₂. En este trabajo se analiza y simula un sistema fotovoltaico de 4.5 kW interconectado a una red trifásica ideal de 220 V línea-línea. Se emplean modelos de comportamiento analógico para simular las ecuaciones del sistema en un software orientado a circuitos como SPICE. De acuerdo con la norma IEEE 1547, la configuración del sistema incluye una carga con factor de potencia unitario en el punto de acoplamiento común (PAC). La potencia activa que absorbe la carga permanece constante antes y después de un transitorio de irradiancia solar, lo que se comprueba con el análisis de los resultados de simulación del flujo de potencia en cada componente del circuito. El sistema simulado puede servir como una guía para el diseño de modelos de generación fotovoltaica más complejos en futuras investigaciones.

Palabras Clave: Generación distribuida, Inversor trifásico, Sistema fotovoltaico.

Abstract

Distributed generation is continuously increasing as a converse response for conventional energy generation which emanates CO₂ pollution. This study analyzes

and simulates a 4.5 kW photovoltaic system which is tied to an ideal 220 V three-phase grid. System equations are implemented by means of analog behavioral models (ABM) in circuit-oriented software as SPICE. According to the IEEE standard 1547, the system layout involves a load with unity power factor at the point of common coupling (PCC). The active power absorbed by the load remains constant under a solar irradiance transient which is verified by analysis of the simulated results of the power flow in each component. The simulated system might serve as a guide for the design of more complex photovoltaic generation models in future research.

Keywords: *Distributed generation, Photovoltaic system, Three-phase inverter.*

1. Introducción

El sol es una fuente de energía renovable relativamente inagotable que puede utilizarse como una fuente de energía eléctrica, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mitigando el impacto ambiental [Harper, 2014]. La radiación solar fuera de la atmósfera terrestre tiene una alta densidad de energía, llegando a ser de hasta $1.353 \text{ kW}/\text{m}^2$. Sin embargo, esta densidad de energía se reduce al llegar a la Tierra debido a tres factores: (a) la absorción de parte de la energía por diversos gases y vapor de agua en la atmósfera terrestre, (b) el ángulo de proyección de los rayos solares conocido como el ángulo cenital, y (c) las diferentes reflexiones y dispersión de los rayos solares [Rashid, 2014]. La celda solar es el dispositivo que convierte la irradiancia solar en energía eléctrica y su comportamiento se describe por las curvas características corriente-tensión y potencia-tensión a diferentes niveles de irradiancia solar y temperatura. En [Sultana, 2013] se analiza las curvas características de una celda fotovoltaica con variaciones en los parámetros de temperatura, irradiancia solar, resistencia en serie y resistencia en derivación. [Redzuan, 2022] utiliza un modelo de circuito equivalente con doble diodo en paralelo para incrementar la precisión de las curvas de desempeño estáticas bajo la variación de los parámetros de temperatura e irradiancia solar. Un diodo representa la región de agotamiento del semiconductor monocristalino y otro diodo representa la región cuasi-neutral. El modelo de doble

diodo es más complejo necesitando más parámetros a estimar, la respuesta es similar al modelo de un solo diodo y la precisión aportada no es un factor determinante en un sistema de varios kilowatts. En [Díaz, 2015] se presenta un simulador de módulo fotovoltaico comercial desarrollado en Spice y Simulink donde la estimación de parámetros se basa en las especificaciones del fabricante. La técnica descrita es aplicable a sistemas fotovoltaicos con diferente rango de potencia.

La interconexión de sistemas fotovoltaicos a las redes de distribución es un paso importante en la integración fluida y segura en el suministro de energía renovable. Sin embargo, la interconexión debe cumplir las normas técnicas y de calidad vigentes para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema. La sincronización, estabilidad, protección, diseño, control y coordinación entre el generador y la red eléctrica son campos de estudio extensos del proceso de interconexión tal como se menciona en [Blaabjerg, 2015], [IEEE1547, 2018], [Rocabert, 2012], [Teodorescu, 2011], [Yang, 2014], [Wang, 2020]. En [Li, 2021] buscan mejorar la interconexión de inversores a redes eléctricas débiles para evitar problemas de estabilidad y garantizar un suministro eléctrico más confiable y eficiente mediante un filtro LCL que reduce la influencia de las variaciones de impedancia de red. El inversor proporciona una corriente de salida más estable y de mejor calidad en un entorno de conexión a redes distribuidas en baja tensión. La estimación de la impedancia es importante para mejorar el control y la estabilidad de los convertidores conectados a la red. En [Fang, 2021] y [He, 2013], la diferencia de dos muestras consecutivas de corriente y la tensión de la red se usan para calcular la impedancia dinámica de la red en un ciclo de medición. El funcionamiento del método se observa mediante simulaciones y su efectividad se valida con pruebas experimentales. Este método ofrece la estimación de la impedancia de la red en tiempo real, mejora el rendimiento y proporciona la operación segura de convertidores conectados a la red.

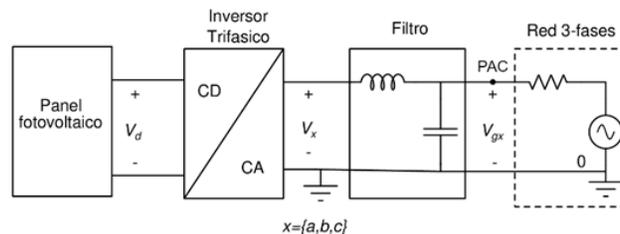
SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) es una herramienta de simulación de circuitos electrónicos analógicos de código abierto desarrollado en 1999 en la Universidad de California, Berkeley. El programa está disponible para sistemas operativos Windows, Linux y MacOS en distintas versiones como Pspice,

HSPICE, LTspice, Ngspice, PSIM, y Simulink entre otros. Se empleó en el impulso de los circuitos integrados y en diseño a nivel tarjeta para estimar la respuesta de un circuito. La herramienta permite desarrollar modelos de comportamiento analógico [Duran, 2012] con dispositivos elementales, fuentes de voltaje y de corriente para simular ecuaciones no-lineales, circuitos y redes eléctricas complejas.

Este trabajo tiene como objetivo realizar el análisis y simulación del comportamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a una red de distribución trifásica. En la sección de métodos se presentan las ecuaciones del panel fotovoltaico, del inversor trifásico y de la red eléctrica a implementarse en un simulador orientado a circuitos. En la sección de resultados se verifica el funcionamiento de los componentes principales del sistema, su interconexión y el flujo de potencia bajo un transitorio de irradiancia solar.

2. Métodos

La figura 1 muestra el diagrama simplificado de un sistema fotovoltaico interconectado a una red distribuida de baja tensión. El sistema está formado por un panel fotovoltaico sensible a las variaciones de la irradiancia solar, un inversor trifásico, un filtro pasa-bajas tipo LC y una red eléctrica trifásica ideal de 220 V línea a línea interconectada en el punto de acoplamiento común (PAC).



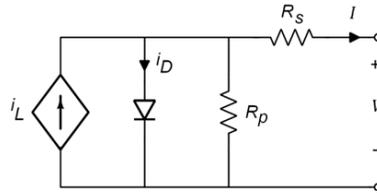
Fuente: elaboración propia

Figura 1 Sistema fotovoltaico interconectado a una red de distribución en baja tensión.

Modelo de panel fotovoltaico

La figura 2 muestra el circuito equivalente de un diodo para un módulo fotovoltaico. Una fuente de corriente describe la fotocorriente i_L , las pérdidas en

dirección del flujo de corriente se representan con la resistencia R_S [Castañer, 2002], y las pérdidas por corriente de fuga se describen por la resistencia R_P .



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Circuito equivalente de un módulo fotovoltaico.

La ecuación 1 describe la corriente de salida I como una función de la tensión de salida.

$$I = i_L - I_S \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{AN_S V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (1)$$

Donde:

i_L : Fotocorriente dependiente de la irradiancia solar

I_S : Corriente de saturación inversa del diodo

V : Tensión de salida

N_S : Número de celdas solares en serie que se encuentran en el módulo

V_{th} : Tensión de unión térmica

A : Coeficiente de idealidad del diodo

En la ecuación 1, el voltaje de circuito abierto V_{oc} varía en forma proporcional al inverso de la función exponencial de la fotocorriente i_L , mientras que la corriente de saturación inversa del diodo I_S contribuye con el efecto de la temperatura de las celdas en el comportamiento de la curva corriente-tensión.

La fotocorriente i_L como una función de la irradiancia solar G y de la temperatura está dada por la ecuación 2.

$$i_L = I_L \left(\frac{G}{1000} \right) (1 - K_{SC}(T_{cel} - 25)) \quad (2)$$

Donde:

I_L : Fotocorriente del módulo fotovoltaico en STC

i_L : Fotocorriente instantánea del módulo fotovoltaico

K_{SC} : Coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito

T_{cel} : Temperatura promedio de las celdas del módulo fotovoltaico

G : Irradiancia solar en W/m^2

El panel fotovoltaico está conformado de módulos fotovoltaicos del mismo tipo conectados en serie con el objetivo de incrementar la tensión y la potencia máxima generada. Para simular la respuesta del panel fotovoltaico, se aplican reglas de escalamiento eléctrico al módulo fotovoltaico, que consiste en multiplicar las variables de tensión por el número de módulos conectados en serie en la ecuación. Por lo tanto, el circuito equivalente de la figura 1 es útil para representar el panel fotovoltaico en un ambiente de programación y simulación de circuitos.

La tabla 1 muestra los parámetros de un módulo fotovoltaico convencional de 245 W, obtenidos en condiciones de prueba controladas, utilizados en las ecuaciones 1 y 2 para reproducir el comportamiento característico del panel fotovoltaico, [Díaz, 2015]. En condiciones controladas, la temperatura promedio de las celdas solares es 25 °C, la irradiancia solar es 1 Sol ($1 S = 1000 W/m^2$) con el espectro aire-masa 1.5.

Tabla 1 Parámetros significativos de módulo fotovoltaico de 245 W.

Condiciones de Operación	Símbolo	Valor
Tensión en punto de potencia máxima	V_m	30.5 V
Corriente en punto de potencia máxima	I_m	8.04 A
Tensión de circuito abierto	V_{OC}	37.3 V
Corriente de corto circuito	I_{SC}	8.52 A
Punto de potencia máxima	P_m	245 W
Número de celdas	N_s	60

Fuente: elaboración propia

Modelo conmutado para inversor trifásico

La figura 3a muestra el diagrama de circuito del inversor trifásico, donde se observa que está formado por tres medios puentes H. Las señales de control para cada medio puente son independientes y están desfasadas 120 grados eléctricos. Un interruptor consta de un transistor y un diodo en antiparalelo, este último permite el paso de la corriente de retorno para cargas de tipo inductivas. En una

implementación práctica la señal de control requiere un tiempo muerto para evitar la conducción simultánea de los transistores de una rama. La modulación senoidal de ancho de pulso (SPWM), comúnmente implementada en una estructura reductora de tensión, permitirá el flujo de potencia del panel fotovoltaico a la red [Mohán, 2009].

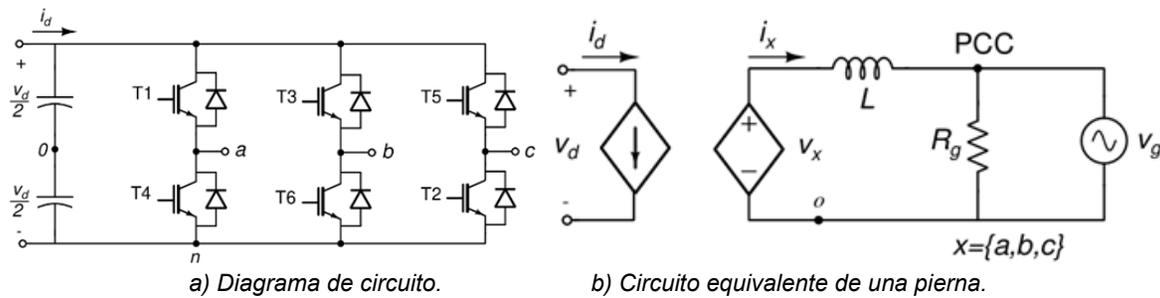


Figura 3 Diagrama del Inversor trifásico.

El comportamiento a altas frecuencias del medio puente H (de cada pierna) de la figura 3 está dado por las ecuaciones 3, 4, y 5 [Erickson, 2020].

$$V_{an} = (2d - 1) \frac{V_d}{2} \quad (3)$$

$$I_{d,a} = (2d - 1) \frac{I_a}{2} \quad (4)$$

$$d = (0,1) \quad (5)$$

Donde d , que toma un valor binario 0 y 1, es un pulso que corresponde al ciclo de trabajo, $I_{d,a}$ es la corriente de entrada en una de las piernas, I_a es la corriente de salida promedio y V_{an} representa la tensión instantánea. La ecuación 3 produce una tensión V_{an} que varía entre el valor de $+\frac{V_d}{2}$ y $-\frac{V_d}{2}$ debido al control SPWM de dos niveles representado por el término $(2d - 1)$. La ecuación 4 estima la corriente de entrada como el producto de la corriente de salida y el factor $(2d - 1)$. En la figura 3b, una fuente de corriente y una fuente de voltaje dependientes implementan las ecuaciones 3 y 4. Un filtro pasa-bajos es necesario para reducir las componentes armónicas contaminantes de alta frecuencia de la corriente de salida. En este trabajo se usó un filtro L ya que es simple y su comportamiento a bajas frecuencias

es similar al del filtro LCL, pero este último es más complejo de analizar. La interconexión del inversor a la red puede ser modelada por ecuaciones 6 y 7.

$$L \frac{dI_a}{dt} = V_{ao} - V_{ga} \quad (6)$$

$$V_{ao} = V_{an} - \frac{V_d}{2} \quad (7)$$

Donde L es la inductancia del filtro, V_{ao} es la tensión entre la fase a y el nodo de referencia o , V_{an} es la tensión de fase con respecto al nodo negativo de la fuente de alimentación, y V_{ga} es la tensión de fase de la red de distribución. La ecuación 6 describe el comportamiento de la corriente de fase I_a como una función de la tensión de la red y la tensión promedio del inversor. La ecuación 7 representa la relación de transformación entre la tensión V_{ao} y la tensión V_{an} [Mohan, 2009]. El modelo completo del inversor trifásico se obtiene al expandir las ecuaciones 3 a 7 y el circuito equivalente de la figura 3b a las ramas restantes e implementarlas con modelos de comportamiento analógico en el simulador de circuitos.

Balance de potencia de un sistema fotovoltaico

El balance de potencia involucra el cálculo del flujo de potencia activa de salida del inversor observada en el punto PAC y de la red de distribución. La potencia que consume la carga R_L con factor de potencia unitario ($\cos(\theta) = 1$), debe ser constante y su magnitud igual a la suma de la potencia activa que entregan el inversor y la red. Para un sistema trifásico ideal, el flujo de potencia se determina mediante la ecuación 8.

$$P = 3V_p I_p \cos(\theta) \quad (8)$$

Donde P es la potencia máxima, V_p la tensión de fase efectiva (RMS), I_p la corriente de fase efectiva (RMS) y $\cos(\theta)$ el factor de potencia se toma como unitario

Considere ahora la potencia máxima ideal del panel fotovoltaico en la ecuación 9. Donde V_m es la tensión máxima, I_m la corriente máxima, A_S y A_P corresponden a el número de módulos en serie y paralelo respectivamente, y P_m es la potencia máxima afectada por los cambios en los niveles de irradiancia solar.

$$P_m = A_S V_m A_P I_m \quad (9)$$

La eficiencia de conversión (η), toma un valor del 100% en el caso ideal cuando no hay pérdidas de potencia en el inversor trifásico y establece la equivalencia entre P y P_m . Con los valores de corriente y la ecuación 9, se verifica el cumplimiento del teorema de Tellegen, el cual indica que la suma algebraica de la potencia instantánea en los componentes de un circuito eléctrico debe sumar cero en todo instante de tiempo. Esto garantiza la conservación de la energía y asegura el correcto funcionamiento del circuito [Bansal, 2020].

3. Resultados

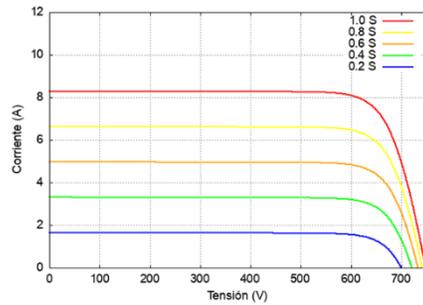
El sistema fotovoltaico se simuló con el software orientado a circuitos Ngspice, que está basado en spice3f5, e incluye una extensa biblioteca de dispositivos analógicos, digitales, analógico-digital, y modelos de comportamiento analógico [Vogt, 2024]. La tabla 2 muestra los valores de tensión, corriente y potencia máxima para diferentes configuraciones de panel fotovoltaico. La configuración 20S1P consta de 20 módulos serie, genera una potencia de operación máxima de 4.54 kW a una tensión de 622 V, que es adecuado para alimentar a un inversor trifásico de baja tensión.

Tabla 2 Punto de potencia máxima para diferentes configuraciones.

Configuración	V_m (V)	I_m (A)	P_m (kW)
6S1P	187	7.7	1.44
9S1P	281	7.6	2.13
12S1P	374	7.5	2.81
15S1P	468	7.4	3.46
20S1P	622	7.3	4.54

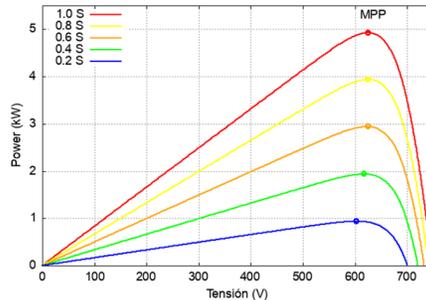
Fuente: elaboración propia

La figura 4 muestra las curvas de corriente contra tensión para diferentes niveles de irradiancia solar a temperatura constante del panel fotovoltaico 20S1P. Conforme la irradiancia decrementa las curvas corriente-tensión disminuyen y por consecuencia la I_m disminuye. En la figura 5 que muestra las curvas de potencia contra tensión respectivamente. La disminución de la irradiancia solar reduce el punto de máxima potencia P_m localizado en la rodilla de la curva.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Curvas corriente-tensión con variación de irradiancia solar.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Curvas de potencia-tensión con variación de irradiancia solar.

La tabla 3 muestra los valores de tensión y corriente en el punto de potencia máxima para niveles discretos de irradiancia solar del panel fotovoltaico 20S1P.

Tabla 3 Punto de potencia máxima de panel fotovoltaico 20S1P.

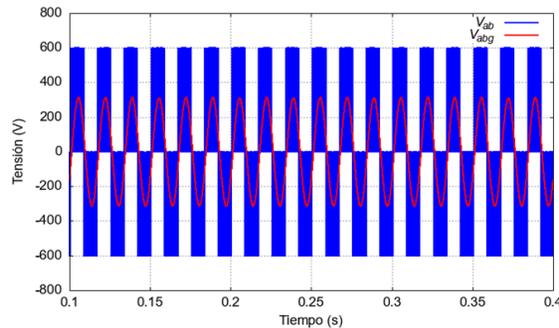
Irradiancia solar (S)	V_m (V)	I_m (A)	P_m (kW)
0.2	566	1.01	0.57
0.4	606	2.54	1.54
0.6	616	4.11	2.53
0.8	621	5.70	3.53
1.0	622	7.30	4.51

Fuente: elaboración propia

En la figura 6, se muestran las tensiones de línea del inversor trifásico V_{ab} y la tensión de la red eléctrica V_{abg} . La señal de tensión de línea toma tres valores discretos de 600, 0 y -600 V, debido a que la técnica SPWM compara una señal triangular (en este caso de 10 kHz) con una señal de control senoidal cuya frecuencia fundamental es la frecuencia de la red. La frecuencia fundamental de V_{ab} puede ser de 50/60 Hz según sea el caso y una tensión efectiva del inversor mayor

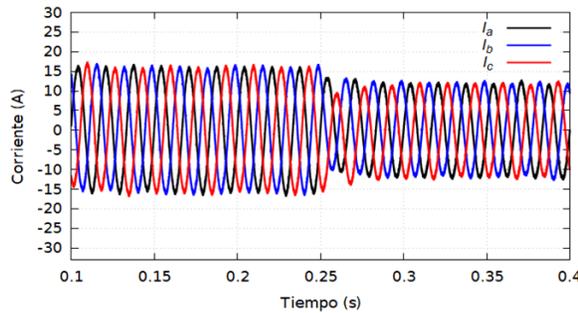
a 220 V garantiza el flujo de potencia y la interconexión a la red eléctrica. Un filtro inductivo de 10 mH se implementó para reducir la distorsión de armónicos contaminantes en la corriente.

La figura 7 muestra las corrientes de salida del inversor. Estas tienen una fase de 120 grados eléctricos entre sí. En un transitorio de irradiancia solar de 1.0 a 0.8 S, el valor efectivo de las corrientes son 11.22 A antes del transitorio y 8.37 A después del transitorio.



Fuente: elaboración propia

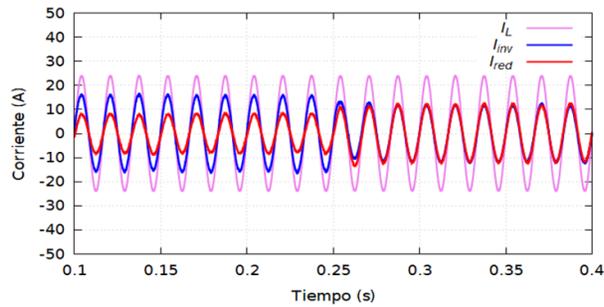
Figura 6 Tensiones de línea del inversor y de red.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Corrientes a la salida de un inversor trifásico.

En la figura 8 se identifican tres corrientes: la corriente en la carga I_L , la corriente generada por el inversor I_{inv} y la corriente proporcionada por la red I_{red} . La red eléctrica distribuida es forzada a mantener un flujo de potencia constante en las cargas. Después del transitorio en 0.250 s, la corriente del inversor I_{inv} disminuye de 11.22 a 8.37 A efectivos, la red compensa esa disminución aumentando la corriente I_{red} de 5.71 a 8.52 A efectivos y la corriente en la carga I_L se mantiene constante.

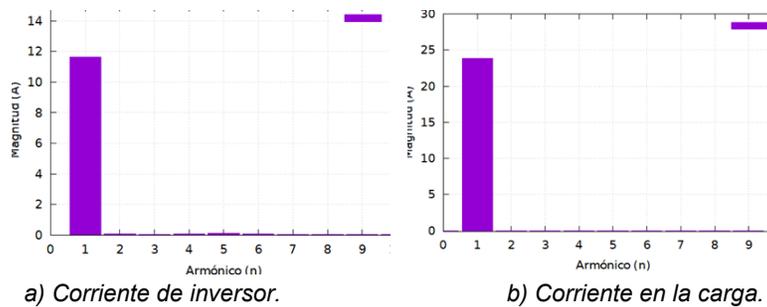


Fuente: elaboración propia

Figura 8 Comportamiento de las corrientes en un transitorio de irradiancia solar.

En la figura 8, las corrientes de inversor, carga y red están en fase debido a que continuamente se monitorea la tensión de la red para el control de frecuencia y fase. Esta sincronización es necesaria para no exceder las desviaciones máximas permitidas de fase y frecuencia que se mencionan en [IEEE1547, 2018]. Una desviación de fase mayor entre la tensión de red y la corriente de inversor, por variaciones de la impedancia de red, produciría un flujo de potencia negativa.

La figura 9 muestra el perfil de armónicos contaminantes de la corriente del inversor y de la carga.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Perfil de armónicos de las corrientes del inversor y de la carga.

La distorsión total de armónicos de la corriente del inversor fue de 1.03935% mientras que la distorsión total de armónicos de la corriente de carga fue de 0.00678968%. En ambos casos el contenido de armónicos es menor al 5% que establece la norma vigente en [IEEE1547, 2018]. En el caso ideal se consideró que la tensión de red no tiene armónicos de bajo orden, originados por otras fuentes en la red distribuida, que pueden afectar las corrientes del inversor y carga.

En el inversor trifásico con SPWM se elimina naturalmente el tercer armónico, lo que es una ventaja significativa al trabajar con sistemas trifásicos en lugar de sistemas monofásicos o bifásicos. En esta topología se reduce la inyección de armónicos de orden bajo no deseados a la red eléctrica.

4. Discusión

El análisis y simulación de un sistema fotovoltaico interconectado a una red de distribución trifásica de baja tensión, permitió observar el comportamiento esperado de un sistema de generación distribuida con energías renovables mediante el uso de herramientas de simulación. El sistema se simuló con un factor de potencia unitario y se analizó el flujo de potencia activa entre el inversor, la carga y la red antes y después de un transitorio abrupto de irradiancia solar de 1 S a .0.8 S en el tiempo $t = 0.250$ s.

Se desarrolló un dispositivo de panel fotovoltaico que puede integrarse en un simulador de circuitos como Spice. Los parámetros de entrada del dispositivo son las especificaciones proporcionadas en la ficha técnica del módulo fotovoltaico. Con este dispositivo, se obtuvieron las curvas de corriente-tensión y potencia-tensión del panel fotovoltaico 20S1P con modelos de comportamiento analógico. El comportamiento mostrado en las figuras 4 y 5 corresponde con los datos proporcionados por el fabricante y con los trabajos de paneles fotovoltaicos que se plantearon en el estado del arte.

El inversor trifásico de tres piernas con modulación SPWM se implementó con fuentes de comportamiento analógico. A la salida del inversor se propuso una fuente de tensión trifásica ideal para emular el comportamiento de la red de baja tensión sin perturbaciones y equilibrada. Se utilizó un filtro inductivo en cada fase para reducir los armónicos contaminantes generados en las corrientes de salida del inversor. Antes del transitorio, el inversor entregó 4.23 kW de potencia activa y la red 2.12 kW, siendo la carga resistiva la responsable de absorber 6.35 kW. Después de transitorio de irradiancia solar ($t = 0.250$ s), la potencia activa del inversor disminuyó a 3.20 kW, la red aumentó su potencia alrededor de 3.12 kW y la potencia en la carga se mantuvo constante. La potencia entregada por el inversor disminuyó

debido a la disminución de la irradiancia solar, la red trifásica compensó esta caída, concluyendo así que el sistema está bien diseñado. El flujo de potencia en la carga se mantuvo constante después de un transitorio de irradiancia solar. En un transitorio alternativo, si la irradiancia solar cambia de bajo a alto se observaría una disminución de la potencia entregada por la red, un incremento de la potencia entregada por el inversor y un flujo de potencia constante en la carga,

La respuesta del sistema fotovoltaico se puede mejorar si se considera una temperatura de las celdas de los módulos mayor a los 47°C , que reducirá la potencia máxima y permitirá obtener resultados más reales. Se pueden estudiar y desarrollar algoritmos de aislamiento para observar cómo el sistema cambia de conexión a desconexión en caso de cortes o fallas a la red eléctrica. Otro estudio consiste en investigar algoritmos para calcular la impedancia dinámica de la red eléctrica y su impacto en el funcionamiento del sistema fotovoltaico y en el control de la red.

5. Conclusiones

Se analizó y simuló el funcionamiento de un sistema fotovoltaico de 4.5 kW interconectado a una red de distribución trifásica en baja tensión. El sistema contempla una red de distribución en baja tensión idealmente balanceada con una carga resistiva conectada en el punto de acoplamiento común. Se implementaron modelos de comportamiento analógico en un simulador de circuitos para las ecuaciones de los componentes principales del sistema. Se asumió un panel fotovoltaico en configuración 20S1P formado por 20 módulos conectados en serie, el cuál entrega una tensión suficiente alta y adecuada para el inversor fotovoltaico trifásico de una etapa. La potencia de corriente-directa del panel fotovoltaico se transforma en potencia de corriente-alterna por medio de un inversor trifásico ideal sin pérdidas por conmutación y conducción. Para reducir los armónicos contaminantes y cumplir con el requerimiento de calidad de energía se usó un filtro L en cada fase. Este filtro es efectivo y simple en comparación con filtros más complejos como LC y LCL, pero muy común en la reducción armónicos contaminantes de corriente. Los resultados de simulación mostrados comprueban

el balance de la potencia activa entre el inversor, la carga resistiva, y la red de distribución. En el transitorio de irradiancia solar mostrado, el inversor trifásico reduce la potencia, y la red de distribución la compensa la potencia en la carga para que se mantenga constante y no disminuya.

La integración de sistemas de generación distribuida experimenta un crecimiento constante para satisfacer la necesidad de reducir el CO₂ que emiten las centrales de generación convencional. En este sentido, el sector energético está obligado a explotar fuentes de recursos energéticos alternativos para satisfacer el aumento constante en la demanda de energía eléctrica. En conclusión, la generación distribuida ayuda a reducir en parte contaminación ambiental y a mejorar la robustez de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales son una parte clave en el desarrollo tecnológico e industrial de un país, como lo es México.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bansal, Y., & Sodhi, R. PMUs Enabled Tellegen's Theorem-Based Fault Identification Method for Unbalanced Active Distribution Network Using RTDS, in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, No. 3, 4567-4578, September 2020.
- [2] Blaabjerg, F., Yang, Y., Ma, K., & Wang, X. Power electronics-the key technology for renewable energy system integration. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 1618-1626. 2015.
- [3] Castañer, L., & Silvestre, S. *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice (1st Edition)*. John Wiley & Sons. England. 2002.
- [4] Díaz J., & Morales-Acevedo. A. Photovoltaic module simulator implemented in SPICE and Simulink. *12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*. México. 2015.
- [5] Duran, P. *A practical guide to analog behavioral modeling for IC system design*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. *Fundamentals of Power Electronics*, 3rd Edition, Springer Nature Switzerland. 215-272. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-43881-4.

- [7] Fang, J., Deng, H., & Goetz, S. M. Grid Impedance Estimation Through Grid-Forming Power Converters. in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 2, 2094-2104, Feb, 2021. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3010874.
- [8] Harper, E. Los conceptos básicos de la generación, transmisión, transformación y distribución de la energía eléctrica (1a Edición). LIMUSA. México. 8-9, 2014.
- [9] He, J., Li, Y., Guerrero J. M., Blaabjerg F., & Vasquez, J. C. An Islanding Microgrid Power Sharing Approach Using Enhanced Virtual Impedance Control Scheme. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, 5272-5282, Nov, 2013, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2243757.
- [10] IEEE1547. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," in *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, 1-138, 2018, DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112
- [11] Li, S., Li, X., & Lee, X. Weighted average current method for active damping control based on grid voltage feed-forward. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*. 10(1), 1-12, 2021.
- [12] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. *Electrónica de Potencia: Convertidores, Aplicaciones y Diseño*. 3a Edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores. México. 198-202, 2009.
- [13] Rashid, M. H. *Power Electronics*, 4th Edition. Pearson Education. 847-848, 2014.
- [14] Redzuan, M. R., & Abdul, N. H. Modelling and Simulation of Double Diode Model of PV Cell by Using LtSpice. *Journal of Engineering Technology*, 211-215, 2022.
- [15] Rocabert, J. Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodriguez, P. Control of power converters in AC microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, 27(11), 4734-4749. 2012.
- [16] Sultana, N., Ahad, A., & Hassan, M. K. Simulation and Analysis of the Effect of Change of Different Parameters on the Characteristics of PV Cell Using LTspiceIV. *International Journal of Science and Research*. 4(2), 63-68, 2013.

- [17] Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. John Wiley & Sons. 2011.
- [18] Vogt, H., Atkinson, G. & Nenzi, P. Ngspice User's Manual Version 42. Online version at: <http://ngspice.sourceforge.net/>. Accessed in February 2024.
- [19] Wang, X., Taul, M. G., Wu, H., Liao, Y., Blaabjerg, F., & Harnefors, L. Grid-synchronization stability of converter-based resources—An overview. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 1, 115-134. 2020.
- [20] Yang, Y., Chen, W., & Blaabjerg, F. Advanced control of photovoltaic and wind turbines power systems. *Advanced and intelligent control in power electronics and drives*, 41-89, 2014.