

# Compensación de factor de potencia y desbalance de carga mediante un inversor fotovoltaico seguidor de red

## Power factor and unbalanced load compensation by a grid-following photovoltaic inverter

Fausto Osorio-Silva <sup>1A</sup>, María A. Mantilla-Villalobos <sup>1B</sup>, Johann F. Petit-Suárez <sup>1C</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: 0009-0007-3662-7998<sup>A</sup>, 0000-0002-8388-3886<sup>B</sup>, 0000-0003-2283-3268<sup>C</sup>. Correo electrónico: fosorsil@correo.uis.edu.co<sup>A</sup>, marialem@uis.edu.co<sup>B</sup>, jfpetit@uis.edu.co<sup>C</sup>.

Recibido: 15/07/2023. Aceptado: 22/08/2023. Versión final: 19/10/2023

### Resumen

Los sistemas de generación distribuida conectados a la red mediante inversores juegan un rol importante en los sistemas eléctricos modernos de distribución. Funcionalidades adicionales para mejorar la calidad de la energía y dar soporte a la red pueden ser incorporadas a los inversores de potencia, siendo este un campo de investigación y desarrollo de gran relevancia en la actualidad. Teniendo en cuenta esta tendencia mundial en donde los sistemas de generación distribuida han aumentado considerablemente su participación en la matriz energética, los códigos de red se están actualizando constantemente, y la operación y control de los dispositivos electrónicos de potencia deben considerar las dinámicas actuales que conlleven a un escenario de transición seguro y confiable. En este contexto, este trabajo presenta un sistema de control para un inversor fotovoltaico trifásico operando en modo de seguidor de red, el cual permite incorporar funcionalidades de corrección de factor de potencia y compensación de desbalance de carga al sistema fotovoltaico. Mediante este sistema de control es posible seleccionar las componentes de potencia de la carga a compensar, las cuales definen las funcionalidades de filtrado activo a integrar al sistema fotovoltaico con el fin de mejorar la calidad de la energía en el sistema de distribución. La operación del sistema fotovoltaico es evaluada mediante simulaciones en la plataforma Matlab/Simulink, considerando una carga lineal desbalanceada y cuatro diferentes modos de operación del inversor según las componentes de potencia de la carga a compensar. Los resultados obtenidos permiten verificar el cumplimiento de los objetivos de control y evidencian ventajas y desventajas de los diferentes modos de operación considerados para el inversor de potencia.

**Palabras clave:** Inversor Fotovoltaico; Calidad De La Energía; Filtrado Activo De Potencia; Convertidores De Potencia; Control De Potencia Reactiva; Inversores Inteligentes; Generación Distribuida.

---

Como citar: F. Osorio, M. Mantilla, J. Petit., "Compensación de factor de potencia y desbalance de carga mediante un inversor fotovoltaico seguidor de red" in *XI Simposio Internacional de Calidad de la Energía Eléctrica*, Valledupar: Universidad Nacional de Colombia, Nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.15446/sicel.v11.110052>

## Abstract

Inverter-interfaced distributed generators play an important role in modern electrical distribution systems. Additional functionalities to improve power quality and support the grid can be incorporated into power inverters, making it a top trending topic. Considering this global trend where distributed generation systems have significantly increased their contribution to the energy matrix, grid codes are constantly being updated, and the operation and control of power electronic devices must consider current dynamics that lead to a safe and reliable transition scenario. In this context, this work presents a control system for a three-phase photovoltaic inverter operating in grid-following mode, which allows incorporating power factor correction and unbalanced load compensation functionalities into the photovoltaic system. Through this control system, it is possible to select the power components of the load to be compensated, which define the functionalities of active filtering to be integrated into the photovoltaic system to improve the power quality in distribution systems. The operation of the photovoltaic system is evaluated through simulations in the Matlab/Simulink platform, considering an unbalanced linear load and four different operating modes for the inverter according to the power components of the load to be compensated. The obtained results allow verifying the achievement of control objectives and show the advantages and disadvantages of the different operating modes considered for the power inverter.

**Keywords:** Photovoltaic Inverter; Power Quality; Active Power Filtering; Power Converters; Reactive Power Control; Smart Inverters; Distributed Power Generation.

## 1. Introducción

La integración de los sistemas de generación distribuida a la red ha presentado grandes avances en los últimos años con mejoras y nuevos retos en pro de aumentar la estabilidad del sistema, la regulación, y la calidad de la energía eléctrica, dando cumplimiento a los nuevos requisitos de conexión a la red que están siendo actualizados constantemente [1], [2].

Entre los requisitos exigidos actualmente por los códigos de red a los generadores distribuidos se encuentra la capacidad para permanecer conectados a la red y dar soporte ante fallas durante cortos periodos de tiempo. Estas capacidades se conocen como *fault ride through* (FRT). Asimismo, funcionalidades de regulación de tensión y/o frecuencia están siendo incorporadas a los sistemas de generación distribuida brindando de esta manera soporte a la red y mejorando su operación.

Si bien el desarrollo de estrategias de control que buscan la inclusión de capacidades para dar soporte a la red es un tema de gran interés, existen otros tipos de funcionalidades que también llaman la atención y pueden ser incorporadas a los generadores distribuidos interconectados a la red mediante inversores de potencia, como, por ejemplo, a los sistemas fotovoltaicos (PV, del inglés *photovoltaics*). Entre este tipo de funcionalidades se destacan las acciones de filtrado activo de potencia, enfocadas en la compensación de perturbaciones asociadas a cargas que demandan corrección del factor de potencia y compensación de corrientes desbalanceadas o distorsionadas, entre otras perturbaciones. Estas funcionalidades permiten mejorar la calidad de la energía

en las redes de distribución. Dada la gran similitud entre los filtros activos de potencia de conexión en paralelo y los sistemas PV seguidores de red, este tipo de funcionalidades pueden ser incorporadas a los inversores fotovoltaicos mediante un adecuado tratamiento de las señales de referencia y del control del sistema [3]–[5].

En la literatura se encuentran propuestas de sistemas PV con funcionalidades de soporte ante condiciones de baja o nula irradiancia operando como un compensador síncrono estático (STATCOM, del inglés *Static Compensator*) en granjas solares [4], [6]–[14]. Asimismo, se encuentran propuestas de algoritmos de control para incorporar funcionalidades de compensación de carga a inversores PV seguidores de red [15]. Sin embargo, a pesar de los avances realizados en el tema, aún quedan muchos vacíos por llenar en términos de operabilidad, limitaciones, restricciones, y estrategias de control ante gran variedad de escenarios y condiciones en el punto de acoplamiento común.

En este trabajo se aborda la aplicación de compensación de carga integrada a un sistema fotovoltaico trifásico considerando cargas lineales desbalanceadas. Se presenta un sistema de control el cual permite incorporar funcionalidades de corrección del factor de potencia y compensación de desbalance de carga en inversores PV seguidores de red. Mediante este sistema de control es posible seleccionar las componentes de potencia de la carga a compensar, las cuales definen las funcionalidades de filtrado activo a integrar al sistema PV. Para esto, las componentes de la potencia demandada por la carga son analizadas a través de las componentes de secuencia de

la corriente y la tensión en el marco de referencia estacionario  $\alpha\beta$ , obteniendo las potencias activa y reactiva instantáneas requeridas para generar las corrientes de referencia del inversor.

Este trabajo se encuentra estructurado en cinco secciones. La sección 1 muestra una introducción sobre funcionalidades que pueden incorporarse en los sistemas PV de conexión a la red. La sección 2 presenta el modelo del sistema PV abordado en este trabajo. La sección 3 describe el funcionamiento del inversor PV y su sistema de control para la implementación de la aplicación de compensación de carga. La sección 4 presenta los resultados de simulación del sistema bajo cuatro modos de operación del inversor PV. Finalmente, la sección 5 presenta las principales conclusiones del trabajo.

## 2. Sistema fotovoltaico conectado a la red.

Un sistema fotovoltaico conectado a la red está compuesto por un arreglo de paneles solares los cuales pueden estar conectados en serie y/o paralelo para aumentar los niveles de tensión y corriente y, por ende, la potencia generada. Seguido del arreglo fotovoltaico, se encuentra un sistema para el acondicionamiento de la energía compuesto de convertidores electrónicos de potencia junto a su sistema de control. Esta conversión de potencia puede implementarse a través de dos configuraciones definidas como de una o dos etapas. En la configuración de una etapa, un inversor de potencia se conecta como interfaz de acoplamiento, en donde éste debe realizar las tareas de extraer la máxima potencia del arreglo de paneles solares, controlar el nivel de tensión del bus de corriente continua (DC, por sus siglas en

inglés) y ajustar las señales de salida de tal forma que cumpla con los requisitos de conexión a la red. En la configuración de dos etapas, dos convertidores de potencia se conectan en cascada, un convertidor DC/DC seguido de un inversor de potencia, los cuales permiten desacoplar las dinámicas del lado de corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés) del lado de DC, proporcionando mayor flexibilidad para su operación y control. Finalmente, la conexión con la red se realiza a través de un filtro pasivo que atenúa las componentes de alta frecuencia debidas a la conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia presentes en los convertidores. Este filtro puede ser inductivo, o una combinación inductivo-capacitivo.

En la

Figura 1 se presenta un diagrama general del sistema fotovoltaico de dos etapas conectado a la red de distribución considerado en este trabajo, con el flujo de señales correspondientes a la operación y control. Respecto a las topologías de los convertidores electrónicos de potencia, se utiliza un convertidor DC/DC elevador y un inversor de potencia trifásico en topología de puente completo tipo fuente de tensión (VSI, por sus siglas en inglés). El inversor se conecta a la red de distribución mediante un filtro pasivo LCL amortiguado. En este diagrama, el sistema de distribución se representa mediante un modelo simplificado correspondiente a una fuente de tensión trifásica independiente en corriente alterna. Adicionalmente, el diagrama presenta la conexión de una carga en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés), lo cual completa el sistema de análisis del presente artículo.

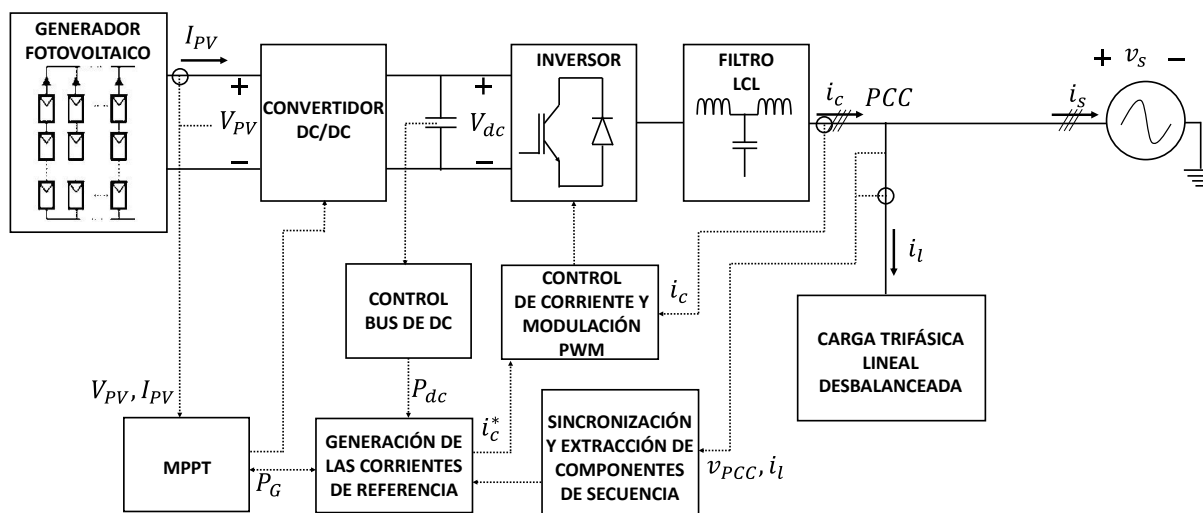


Figura 1. Modelo general del sistema fotovoltaico conectado a la red con funcionalidad de compensación de carga.  
Nota: Adaptado de [15].

### 3. Aspectos operativos del inversor en control y modos de compensación de carga.

En la presente sección se describe el funcionamiento y el sistema de control del sistema fotovoltaico conectado a la red con la funcionalidad de compensación de carga.

#### 3.1. Sistema de control

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al esquema de control propuesto para el sistema fotovoltaico conectado a la red con la funcionalidad de compensación de carga. El sistema de control está compuesto por los siguientes lazos:

- Seguidor del punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico (MPPT, por sus siglas en inglés).
- Sincronización con la red en el punto de acoplamiento común y extracción de componentes de secuencia de corriente y tensión.
- Cálculo de las componentes de la potencia demandada por la carga.
- Generación de las corrientes de referencia.
- Control de tensión del bus de DC.
- Control de corriente y modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés).

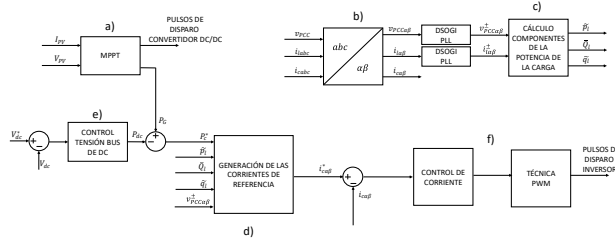


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control.  
Nota: Elaboración propia.

A continuación, se describe cada uno de los lazos de control.

#### a) Seguidor del punto de máxima potencia.

La máxima potencia disponible en el arreglo fotovoltaico es extraída mediante el convertidor DC/DC elevador, controlado a través del algoritmo de

Perturbar y Observar clásico (P&O) [16], [17]. El ciclo de trabajo del transistor de potencia del convertidor elevador de la primera etapa de potencia es actualizado según el resultado de la ejecución del algoritmo P&O.

#### b) Sincronización con la red y extracción de componentes de secuencia.

Para determinar las funciones de compensación a integrar al sistema fotovoltaico, es necesario estimar las componentes fundamentales de secuencia positiva y negativa de la tensión en el PCC y de la corriente en la carga. En este trabajo se considera un sistema trifásico de tres hilos, por lo que se desprecian las componentes de secuencia homopolar de las tensiones y corrientes. Para realizar la sincronización y estimación de las componentes de secuencia, se implementó el lazo de seguimiento de fase adaptado DSOGI-PLL (*Double Second Order Generalized Integrator- Phase Locked Loop*) [18] el cual presenta un alto desempeño en extraer las componentes de secuencia al tiempo que obtiene las señales de sincronismo con la red en el marco de referencia  $\alpha\beta$ .

#### c) Componentes de la potencia demandada por la carga.

De acuerdo con la teoría de la potencia instantánea [19], las potencias activa y reactiva instantáneas de la carga pueden ser expresadas en términos de la tensión en el PCC y la corriente en la carga en el marco de referencia  $\alpha\beta$ , esto es,  $v_{s\alpha\beta}$  e  $i_{l\alpha\beta}$ , respectivamente. Cada una de estas potencias instantáneas se puede descomponer en dos términos, uno constante ( $\bar{P}_l$  y  $\bar{Q}_l$ ) y otro oscilatorio ( $\tilde{p}_l$  y  $\tilde{q}_l$ ), tal como se presenta en las ecuaciones (1) y (2). Considerando una carga lineal desbalanceada, las componentes constantes y oscilatorias de las potencias pueden ser expresadas en función de la componentes de secuencia positiva y negativa de la tensión en el PCC ( $v_{s\alpha}^+$ ,  $v_{s\beta}^+$  y  $v_{s\alpha}^-$ ,  $v_{s\beta}^-$ , respectivamente) y corriente en la carga ( $i_{l\alpha}^+$ ,  $i_{l\beta}^+$  e  $i_{l\alpha}^-$ ,  $i_{l\beta}^-$ , respectivamente) en el marco de referencia  $\alpha\beta$ , tal como se presenta en las ecuaciones (3)-(6).

$$p_l(t) = \bar{P}_l + \tilde{p}_l \quad (1)$$

$$q_l(t) = \bar{Q}_l + \tilde{q}_l \quad (2)$$

$$\bar{P}_l = \frac{3}{2}(v_{s\alpha}^+ i_{l\alpha}^+ + v_{s\beta}^+ i_{l\beta}^+ + v_{s\alpha}^- i_{l\alpha}^- + v_{s\beta}^- i_{l\beta}^-) \quad (3)$$

$$\tilde{p}_l = \frac{3}{2}(v_{s\alpha}^+ i_{l\alpha}^- + v_{s\beta}^+ i_{l\beta}^- + v_{s\alpha}^- i_{l\alpha}^+ + v_{s\beta}^- i_{l\beta}^+) \quad (4)$$

$$\bar{Q}_l = \frac{3}{2}(-v_{s\alpha}^+ i_{l\beta}^+ + v_{s\beta}^+ i_{l\alpha}^+ - v_{s\alpha}^- i_{l\beta}^- + v_{s\beta}^- i_{l\alpha}^-) \quad (5)$$

$$\tilde{q}_l = \frac{3}{2}(-v_{s\alpha}^+ i_{l\beta}^- + v_{s\beta}^+ i_{l\alpha}^- - v_{s\alpha}^- i_{l\beta}^+ + v_{s\beta}^- i_{l\alpha}^+) \quad (6)$$

Una vez se obtienen las componentes de la potencia en la carga, se pueden establecer las opciones de compensación de interés, lo cual se expondrá en la sección 3.2 de este trabajo.

**d) Generación de las corrientes de referencia.**

Las corrientes de referencia ( $i_{c\alpha}^*$  e  $i_{c\beta}^*$ ) son generadas a partir de las tensiones en el PCC en el marco de referencia  $\alpha\beta$  y las potencias activas ( $P^*$ ) y reactiva ( $Q^*$ ) instantáneas de referencia del sistema fotovoltaico, tal como se presenta en las siguientes ecuaciones [19]:

$$i_{c\alpha}^* = \left( \frac{v_{s\alpha}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \right) P^* + \left( \frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \right) Q^* \quad (7)$$

$$i_{c\beta}^* = \left( \frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \right) P^* - \left( \frac{v_{s\alpha}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \right) Q^* \quad (8)$$

Las potencias de referencia se establecen considerando varios factores: la potencia generada por el conjunto de paneles fotovoltaicos ( $P_G$ ), la potencia necesaria para controlar la tensión del bus de DC del inversor ( $P_{dc}$ ), y los propósitos de compensación de carga. Estas potencias se describen con las ecuaciones:

$$P^* = P_G - P_{dc} + \tilde{p}_c = \bar{P}_c + \tilde{p}_c \quad (9)$$

$$Q^* = \bar{Q}_c + \tilde{q}_c \quad (10)$$

De acuerdo con la ecuación (9), la cantidad de energía que el sistema fotovoltaico entrega a la red está influenciada por la generación de los paneles y el manejo del bus de DC del inversor. Las componentes oscilatorias y constantes de las potencias activa y reactiva instantáneas de referencia se definen basándose en los criterios de compensación, aspecto que se aborda en la sección 3.2.

**e) Control de tensión del bus de DC.**

La tensión del condensador del bus de DC del inversor de potencia debe ser controlada con el propósito de seguir un valor de referencia ( $V_{dc}^*$ ) que permita el correcto funcionamiento del inversor y, además, manejar el flujo de potencia activa a inyectar por parte

del inversor. Para ello, se utiliza un controlador PI como se ilustra en la Figura 2.

**f) Control de corriente y técnica PWM**

Este lazo de control busca generar los pulsos de disparo del inversor de potencia requeridos para que la corriente inyectada a la red siga la corriente de referencia. Para esto, se utiliza un controlador proporcional resonante (PR) y la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) aplicada para inversores trifásicos.

En la Figura 3 se observa el diagrama de bloques del control del lazo de corriente.

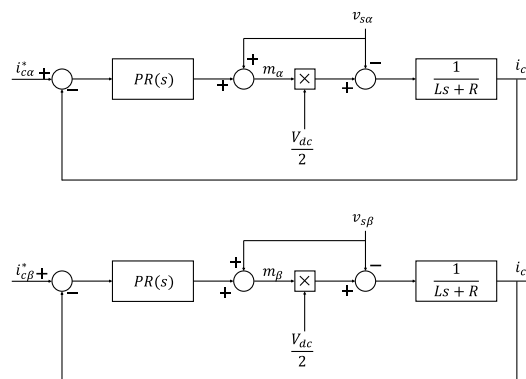


Figura 3. Diagrama controlador proporcional resonante. Nota: Adaptado de [20].

El controlador proporcional resonante fue implementado para seguir las referencias de corriente generadas de naturaleza sinusoidal, cuya función de transferencia es de la forma:

$$PR(s) = K_P + \frac{2K_I s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (11)$$

En donde las constantes  $K_P$  y  $K_I$  se ajustan de tal forma que el margen de fase sea mayor a  $30^\circ$  [21], y  $\omega_0$  corresponde a la frecuencia de resonancia que se iguala a la frecuencia fundamental de la red. La salida de este controlador es transformada del marco de referencia  $\alpha\beta$  al  $abc$ , obteniendo finalmente las señales moduladoras utilizadas en la técnica PWM para generar los pulsos de conmutación del inversor.

**3.2. Modos de operación del inversor.**

Los modos de operación del inversor se definen según las componentes de potencia de la carga a compensar.

En este trabajo, se considerarán cuatro modos de operación

- Modo 1: Potencia activa generada. En este modo el inversor PV entregará solo potencia activa promedio según la potencia entregada por el arreglo de paneles PV y la potencia requerida para controlar la tensión del bus de DC, es decir:

$$P^* = P_G - P_{DC} \quad (12)$$

$$Q^* = 0 \quad (13)$$

- Modo 2: Compensación de la componente constante de la potencia reactiva de la carga. Adicional a la función del modo 1, en este modo de operación se incluye la capacidad de compensación de la componente constante de la potencia reactiva instantánea de la carga, es decir:

$$P^* = P_G - P_{DC} \quad (14)$$

$$Q^* = \bar{Q}_l \quad (15)$$

- Modo 3: Compensación de la componente oscilatoria de la potencia reactiva de la carga. Adicional a la función del modo 1, en este modo de operación se incluye la capacidad de compensación de la componente oscilatoria de la potencia reactiva instantánea de la carga, es decir:

$$P^* = P_G - P_{DC} \quad (16)$$

$$Q^* = \tilde{q}_l \quad (17)$$

- Modo 4: Compensación de la potencia reactiva total y de la componente oscilatoria de la potencia activa instantánea de la carga. Adicional a la función del modo 1, en este modo de operación se incluye la capacidad de compensación de toda la potencia reactiva instantánea de la carga y de la componente oscilatoria de la potencia activa instantánea de la carga, es decir:

$$P^* = P_G - P_{DC} + \tilde{p}_l \quad (18)$$

$$Q^* = \bar{Q}_l + \tilde{q}_l \quad (19)$$

Los cuatro modos de operación del inversor y las ecuaciones (12)-(19) consideran tensiones de red ideales (tensiones balanceadas de secuencia positiva sin distorsión armónica), por lo tanto, se desprecia la componente de secuencia negativa de la tensión en el PCC en las ecuaciones (3)-(6). Trabajos futuros considerarán tensiones de red no ideales y algoritmos que permitan limitar las componentes de compensación y las potencias de referencia del sistema fotovoltaico según los valores nominales de corriente y tensión del inversor.

#### 4. Resultados

La operación del sistema fotovoltaico considerando los cuatro modos de operación descritos en la sección anterior, es evaluada mediante simulaciones en el software Matlab/Simulink. En la Tabla 1 se muestran los parámetros del sistema.

Tabla 1. Parámetros sistema.

Parámetro	Valor
Vs (tensión de fase RMS)	120 Vrms
Frecuencia de la red	60 Hz
Potencia nominal del generador fotovoltaico ( $P_{PV}$ ) <sup>1</sup>	4260 Wp
$v_{DC}^*$	560 V
$C_{DC}$	4,4 mF
Filtro LCL	3mH, 7,6μF, 0,5mH
Frecuencia de conmutación del inversor	10 kHz
Frecuencia de conmutación del convertidor DC/DC	20 kHz
Inductancia convertidor DC/DC	10 mH
Carga RL fase a	0,1 Ω, 3mH
Carga R fase b	20 Ω
Carga RL fase c	0,2 Ω, 10mH

Se considera una tensión en el PCC ideal balanceada de secuencia positiva a 60Hz con valor RMS de fase de 120 V.

Respecto a la carga, la Tabla 1 presenta los parámetros por fase para una carga RL trifásica desbalanceada. En la Figura 4 se observan las potencias activa y reactiva instantáneas demandadas por la carga. Como se puede apreciar, estas potencias presentan oscilaciones debido a la interacción de la componente de secuencia negativa de la corriente con la componente de

<sup>1</sup> Potencia nominal del generador fotovoltaico a condiciones de prueba estándar (irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> y temperatura de la celda de 25°C).

secuencia positiva de la tensión en el PCC, como se indica en (4) y (6).

En la Figura 5 se muestran las corrientes en la carga. Como se puede apreciar, las corrientes están desbalanceadas por la naturaleza de la carga. Lo anterior conlleva a que la potencia suministrada por la red a la carga fluctúe al doble de la frecuencia de la red. Las amplitudes de las corrientes de la carga para las fases *a*, *b* y *c* son de 50 A, 13 A, y 62 A, respectivamente.

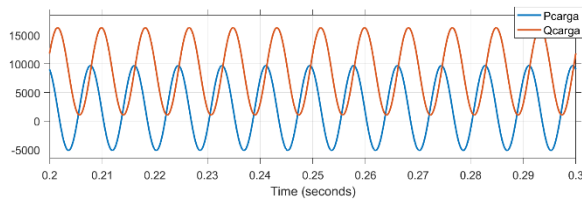


Figura 4. Potencias activa y reactiva instantáneas de la carga. Nota: Elaboración propia.

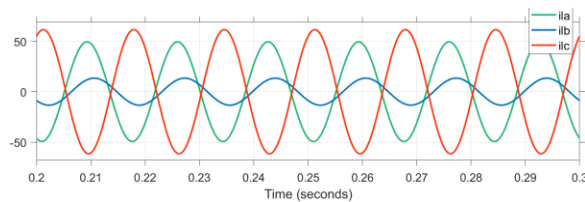


Figura 5. Corrientes en la carga desbalanceada. Nota: Elaboración propia.

Las pruebas de simulación se realizaron considerando condiciones estándar de irradiancia ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) y temperatura de celda ( $25^\circ\text{C}$ ) en el generador fotovoltaico. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada modo de operación.

#### 4.1. Modo 1: Potencia activa generada.

En la Figura 6 se muestran la potencia activa generada por el arreglo fotovoltaico, la potencia activa instantánea entregada por el inversor PV y la potencia activa instantánea entregada a la red de distribución.

En este caso la potencia generada es de 4260 W. El inversor PV entrega a la red solo potencia activa promedio la cual es igual a la potencia generada menos la componente requerida para controlar la tensión del bus de DC (la cual es mayor al momento de inicializar el sistema). Como la carga consume 2307 W, el sistema fotovoltaico proporciona la totalidad de la potencia activa promedio de la carga y el excedente es entregado a la red en el punto de acoplamiento común.

Las potencias reactivas instantáneas entregadas a la red y por el inversor se presentan en la Figura 7.

Este modo de operación no incorpora funciones de compensación de carga, por lo tanto, la potencia reactiva instantánea entregada por el convertidor es cero, y la red de distribución debe proporcionar a la carga toda la potencia reactiva instantánea y la componente oscilatoria de la potencia activa instantánea.

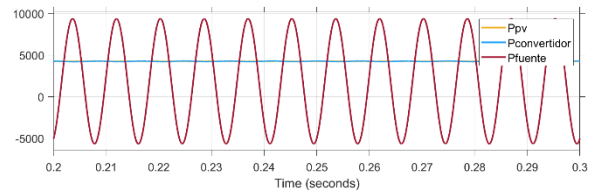


Figura 6. Potencia activa generada ( $P_{pv}$ ), potencia activa instantánea entregada por el inversor PV ( $P_{convertidor}$ ), y potencia activa instantánea entregada a la red ( $P_{fuente}$ ). Nota: Elaboración propia.

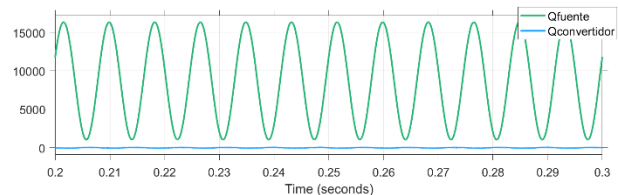


Figura 7. Potencia reactiva instantánea entregada a la red ( $Q_{fuente}$ ) y entregada por el inversor ( $Q_{convertidor}$ ). Nota: Elaboración propia.

En la Figura 8 se observan las corrientes resultantes por la red y las inyectadas por el inversor PV. Las amplitudes de las corrientes resultantes en la red para las fases *a*, *b* y *c* son de 58 A, 5 A, y 55 A respectivamente, mientras que las corrientes inyectadas por el inversor son balanceadas con una amplitud de 17 A.



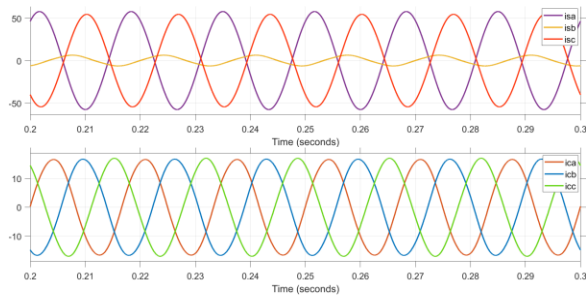


Figura 8. Corrientes de la red ( $i_s$ ) e inyectadas por el inversor ( $i_c$ ). Nota: Elaboración propia.

La tensión del condensador del bus de DC se mantiene constante en el valor de referencia de 560 V una vez se realiza el proceso de carga inicial, tal como se ilustra en la Figura 9. En este modo de operación, esta tensión no presenta oscilaciones después del proceso de inicialización.

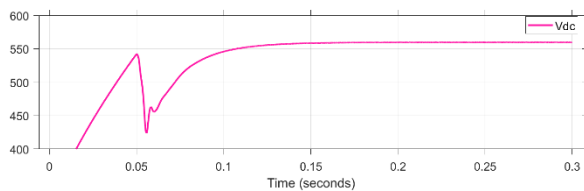


Figura 9. Tensión del bus de DC ( $V_{dc}$ ). Nota: Elaboración propia.

#### 4.2. Modo 2: Compensación de la componente constante de la potencia reactiva de la carga

En la Figura 10 se presentan las potencias activa y reactiva instantáneas entregadas por el inversor PV y entregadas a la red de distribución.

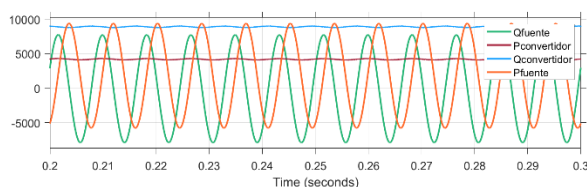


Figura 10. Potencias activa y reactiva instantáneas de la red ( $P_{fuente}$  y  $Q_{fuente}$ ) y del inversor PV ( $P_{convertidor}$  y  $Q_{convertidor}$ ). Nota: Elaboración propia.

La componente promedio de la potencia reactiva instantánea de la red tiene un valor de cero, ya que el inversor está proporcionado justamente la componente promedio de la potencia reactiva de la carga. El inversor sigue inyectando la potencia activa generada.

En la Figura 11 se observa el efecto del inversor al incluir la función de compensación de la componente promedio de la potencia reactiva de la carga.

Las amplitudes de las corrientes en la red han disminuido para las fases  $a$  y  $c$  debido al efecto de la compensación. Las amplitudes de las corrientes de las fases  $a$ ,  $b$ , y  $c$  de la red son de 37 A, 30 A, 25 A, respectivamente. El convertidor mantiene el comportamiento balanceado en las corrientes inyectadas y la amplitud de estas corrientes ha aumentado a 39 A.

La tensión en el bus de DC sigue con el mismo comportamiento que el modo de operación anterior, como se observa en la Figura 12. Esta tensión no presenta oscilaciones después del proceso de inicialización.

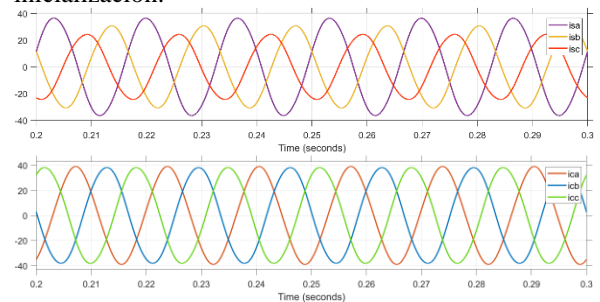


Figura 11. Corrientes de la red ( $i_s$ ) e inyectadas por el inversor ( $i_c$ ). Nota: Elaboración propia.

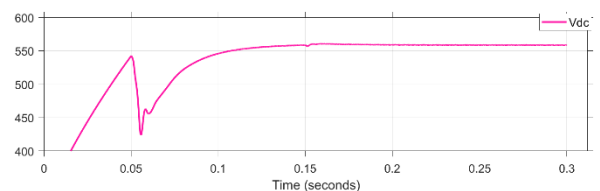


Figura 12. Tensión en el bus de DC ( $V_{dc}$ ). Nota: Elaboración propia.

#### 4.3. Modo 3: Compensación de la componente oscilatoria de la potencia reactiva de la carga.

En la Figura 13 se presentan las potencias activa y reactiva instantáneas entregadas por el inversor PV y entregadas a la red de distribución.



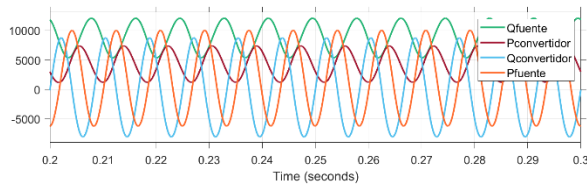


Figura 13. Potencias activa y reactiva instantáneas de la red ( $P_{fuente}$  y  $Q_{fuente}$ ) y del inversor PV ( $P_{convertidor}$  y  $Q_{convertidor}$ ). Nota: Elaboración propia.

De la Figura 13 se puede observar que mediante el algoritmo de control propuesto para el modo de operación 3, no es posible eliminar la oscilación en la potencia reactiva instantánea de la red, aunque se evidencia una atenuación significativa de las oscilaciones. Lo anterior se da debido a que no se incluyó también la componente oscilatoria de la potencia activa instantánea de la carga en la potencia de referencia del inversor, dado que esta componente está estrechamente relacionada con la componente oscilatoria de la potencia reactiva. Tal como se observa en la Figura 13, la potencia activa instantánea entregada por el inversor también contiene oscilaciones, a pesar de que estas no fueron incluidas en las potencias de referencia del inversor. Este efecto produce oscilaciones en la tensión del bus de DC como se observa en la Figura 15.

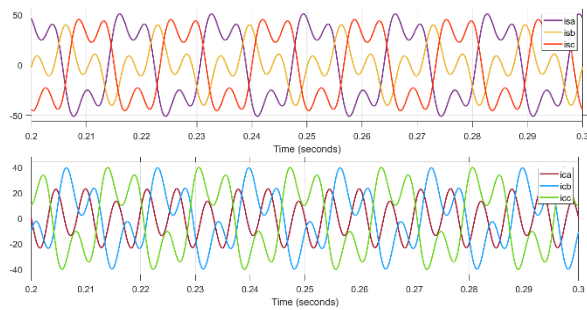


Figura 14. Corrientes de la red ( $i_s$ ) e inyectadas por el inversor ( $i_c$ ). Nota: Elaboración propia.

En este modo de operación, las corrientes de la red y del inversor pierden su forma sinusoidal (ver Figura 14) al intentar compensar las oscilaciones en la potencia reactiva instantánea de la carga sin incluir la componente oscilatoria de la potencia activa. Esta situación debe evadirse ya que inyecta corrientes distorsionadas a la red.

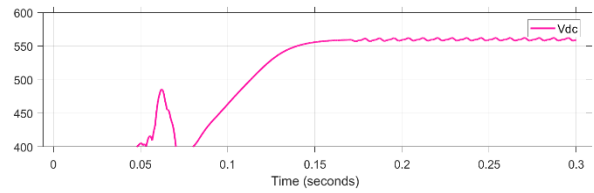


Figura 15. Tensión en el bus de DC ( $V_{dc}$ ). Nota: Elaboración propia.

#### 4.4. Modo 4: Compensación de la potencia reactiva total y de la componente oscilatoria de la potencia activa instantánea de la carga.

En la Figura 16 se aprecian los resultados para las potencias activa y reactiva instantáneas obtenidas considerando la funcionalidad de compensación total de la carga.

La potencia reactiva instantánea es completamente compensada por el inversor PV. Las oscilaciones de potencia presentes por el desbalance de la carga son mitigadas en la red al inyectar simultáneamente las componentes oscilatorias de la potencia activa y de la potencia reactiva instantánea de la carga, comprobando así la relación existente entre las oscilaciones de estas dos componentes de potencia. Debido a que el inversor está compensando la componente oscilatoria de la potencia activa de la carga, la tensión del bus de DC presenta oscilaciones. Estas oscilaciones se deben a la relación entre la potencia activa instantánea entregada por el inversor y la tensión del condensador del bus de DC. Esta dinámica se puede apreciar en la Figura 18.

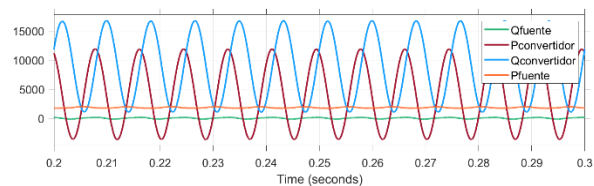


Figura 16. Potencias activa y reactiva instantáneas de la red ( $P_{fuente}$  y  $Q_{fuente}$ ) y del inversor PV ( $P_{convertidor}$  y  $Q_{convertidor}$ ). Nota: Elaboración propia.

En la Figura 17 se presentan las corrientes resultantes en la red y las inyectadas por el inversor. Para este modo de operación, se puede apreciar que las corrientes resultantes por la red son balanceadas de secuencia positiva. Además, estas corrientes están en fase con la tensión en el PCC, por lo que el factor de potencia también es corregido.

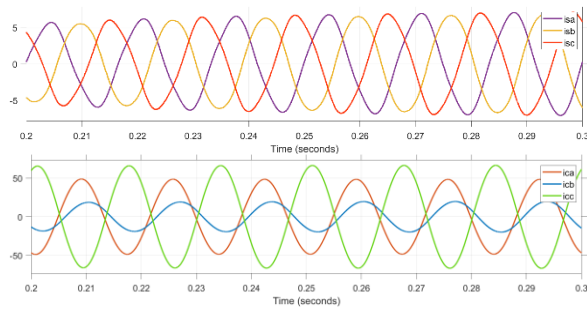


Figura 17. Corrientes de la red ( $i_s$ ) e inyectadas por el inversor ( $i_c$ ). Nota: Elaboración propia.

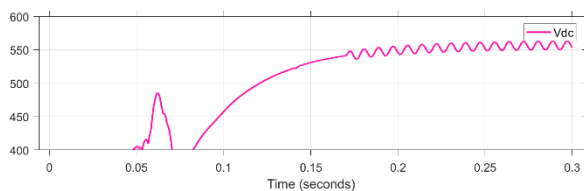


Figura 18. Tensión del bus de DC ( $v_{dc}$ ). Nota: Elaboración propia.

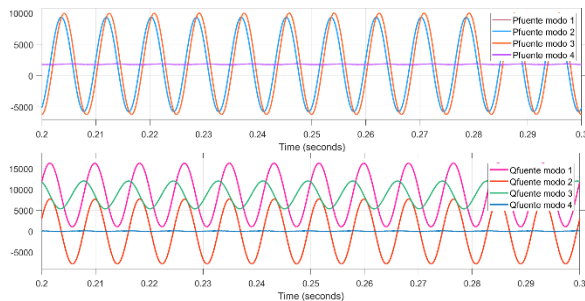


Figura 19. Potencias activa y reactiva instantáneas de la red para los 4 modos de operación. Nota: Elaboración propia.

La amplitud de las corrientes de la red es de 7.5 A, mientras que las amplitudes de las corrientes inyectadas por el inversor para las fases  $a$ ,  $b$ , y  $c$  son de 48.5 A, 20.5, y 67 A, respectivamente.

Finalmente, la Figura 19 muestra el comportamiento de las potencias activa y reactiva instantáneas de la red cuando el inversor opera en sus cuatro modos. Esto proporciona una visión integral de su funcionamiento ante estos distintos escenarios.

## 5. Conclusiones

Incluir funcionalidades de compensación activa de carga en los sistemas fotovoltaicos seguidores de red es posible mediante el adecuado control y generación

de las corrientes de referencia. Analizando los diferentes modos de operación del inversor fotovoltaico, se puede discernir la importancia de tales compensaciones. En el contexto de cargas lineales desbalanceadas y con tensiones en el PCC ideales, una compensación total del factor de potencia y del desbalance de carga solo se logra incluyendo en las potencias de referencia del inversor tanto la componente oscilatoria de la potencia activa como la potencia reactiva total de la carga. La ausencia de cualquiera de estas componentes limita la consecución de este objetivo.

Un efecto colateral de esta amplia compensación, como se ve en el modo 4, son las oscilaciones introducidas en la tensión del bus de DC del inversor. Estas oscilaciones requieren una atención especial: es imperativo contar con un valor de capacitancia en el bus de DC suficientemente robusto para mitigarlas. Contrariamente, el modo 2, centrado en la compensación de solo la componente constante de la potencia reactiva instantánea, evita tales oscilaciones en la tensión del bus de DC, pero con una compensación menos integral.

La implementación de funcionalidades de filtrado activo de potencia en sistemas fotovoltaicos conectados a la red constituye una piedra angular en la planificación de un sistema real. Es esencial recordar que existen otros factores a tener en cuenta para su operación segura y eficiente. Por ejemplo, la capacidad de los dispositivos implicados, como los valores nominales de corriente y tensión del inversor, debe ser primordial. Algoritmos específicos deben ser diseñados para limitar estas variables y así garantizar la vida útil y eficiencia del sistema. Además, la integración de otras funcionalidades, necesarias para alinearse con los estándares de conexión a las redes de distribución eléctrica, debe ser una prioridad en futuros desarrollos y estudios.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por Minciencias y la Universidad Industrial de Santander a través del proyecto de investigación titulado “Diseño de estrategias alternativas de operación y control para sistemas fotovoltaicos multifuncionales en redes de distribución con alta penetración de energías renovables” código 70416, desarrollado en el marco del “Programa de Investigación en Tecnologías Emergentes para Microrredes Eléctricas Inteligentes con Alta Penetración de Energías Renovables” contrato 80740-542-2020.

## 7. Referencias

- [1] B. Zhao, C. Wang, and X. Zhang, *Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems*. 2017. doi: 10.1002/9781119187349.
- [2] X. Zhao, “Power System Support Functions Provided by Smart Inverters—A Review,” *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 25–35, Mar. 2018, doi: 10.24295/cpsstea.2018.00003.
- [3] M. C. Cavalcanti, A. M. Farias, K. C. Oliveira, F. A. S. Neves, and J. L. Afonso, “Eliminating leakage currents in neutral point clamped inverters for photovoltaic systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 435–443, Jan. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2138671.
- [4] P. Flores, J. Dixon, M. Ortúzar, R. Carmi, P. Barriuso, and L. Morán, “Static Var Compensator and Active Power Filter With Power Injection Capability, Using 27-Level Inverters and Photovoltaic Cells,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 130–138, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.927229.
- [5] R. Noroozian and G. B. Gharehpetian, “An investigation on combined operation of active power filter with photovoltaic arrays,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 392–399, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.10.033.
- [6] F. J. Lin, K. H. Tan, Y. K. Lai, and W. C. Luo, “Intelligent PV Power System with Unbalanced Current Compensation Using CFNN-AMF,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 9, pp. 8588–8598, Sep. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2888732.
- [7] T. F. Wu, H. S. Nien, C. L. Shen, and T. M. Chen, “A single-phase inverter system for PV power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 41, no. 4, pp. 1075–1083, Jul. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.851035.
- [8] S. Devassy and B. Singh, “Implementation of Solar Photovoltaic System with Universal Active Filtering Capability,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2019, pp. 3926–3934. doi: 10.1109/TIA.2019.2906297.
- [9] R. Chilipi, N. Al Sayari, and J. Y. Alsawalhi, “Control of single-phase solar power generation system with universal active power filter capabilities using least mean mixed-norm (LMMN)-based adaptive filtering method,” *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 879–893, Apr. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2911852.
- [10] S. Devassy and B. Singh, “Control of a Solar Photovoltaic Integrated Universal Active Power Filter Based on a Discrete Adaptive Filter,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 7, pp. 3003–3012, Jul. 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2778346.
- [11] N. D. Tuyen and G. Fujita, “PV-Active Power Filter Combination Supplies Power to Nonlinear Load and Compensates Utility Current,” *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 2, pp. 32–42, 2015, doi: 10.1109/JPETS.2015.2404355.
- [12] R. K. Varma and E. M. Siavashi, “PV-STATCOM: A New Smart Inverter for Voltage Control in Distribution Systems,” *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1681–1691, Oct. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2018.2808601.
- [13] M. Reveles-Miranda, M. Flota-Banuelos, F. Chan-Puc, V. Ramirez-Rivera, and D. Pacheco-Catalan, “A Hybrid control technique for harmonic elimination, power factor correction, and night operation of a grid-connected pv inverter,” *IEEE J Photovolt*, vol. 10, no. 2, pp. 664–675, Mar. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2961600.
- [14] N. A. Gajjar and T. N. Zaveri, “A Review of DSTATCOM Used in Solar Photovoltaic System,” in *Proceedings of the Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy, ICUE*, IEEE Computer Society, Feb. 2019. doi: 10.23919/ICUE-GESD.2018.8635787.
- [15] M. A. Mantilla, J. F. Petit, and G. Ordóñez, “Control of multi-functional grid-connected PV systems with load compensation under distorted and unbalanced grid voltages,” *Electric Power Systems Research*, vol. 192, p. 106918, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106918.
- [16] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995, doi: 10.1049/IP-GTD:19951577.
- [17] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 20, no. 4, pp.

- 963–973, Jul. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.
- [18] “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems | IEEE eBooks | IEEE Xplore.” <https://ieeexplore.ieee.org/book/5732788> (accessed Mar. 29, 2021).
- [19] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning,” *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Feb. 2017, doi: 10.1002/9781119307181.
- [20] A. Yazdani and I. Reza, “Voltage source converter in power system,” *IEEE Press/John Wiley*, pp. 1–473, 2010.
- [21] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. C. Loh, “Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters,” *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 153, no. 5, p. 750, 2006, doi: 10.1049/ip-epa:20060008.