



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

“CONTROL DE VOLTAJE Y CORRIENTE PARA CONVERTIDORES
DE POTENCIA DE FORMACIÓN DE RED EN MICRORREDES
AISLADAS”

AUTOR: ALISON ANDREA HERRERA TAPIA

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO

IBARRA-ECUADOR
2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

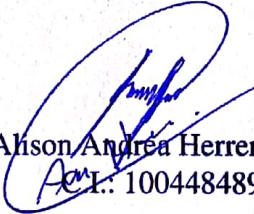
| DATOS DEL AUTOR | | | |
|-------------------------|---|----------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD | 1004484893 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES | HERRERA TAPIA ALISON ANDREA | | |
| DIRECCIÓN | Otavalo, 4-44 Miguel de Jijón y León | | |
| EMAIL | aaherrerat@utn.edu.ec - alison.herrera1996@gmail.com | | |
| TELÉFONO FIJO | 062921095 | TELÉFONO MÓVIL | 0993403353 |
| DATOS DE LA OBRA | | | |
| TÍTULO | "CONTROL DE VOLTAJE Y CORRIENTE PARA CONVERTIDORES DE POTENCIA DE FORMACIÓN DE RED EN MICRORREDES AISLADAS" | | |
| AUTOR | HERRERA TAPIA ALISON ANDREA | | |
| FECHA | 15 DICIEMBRE 2022 | | |
| PROGRAMA | PREGRADO | | |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA | INGENIERO EN MECATRÓNICA | | |
| DIRECTOR | CARLOS XAVIER ROSERO C. | | |



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
DECLARACIÓN

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 15 diciembre de 2022

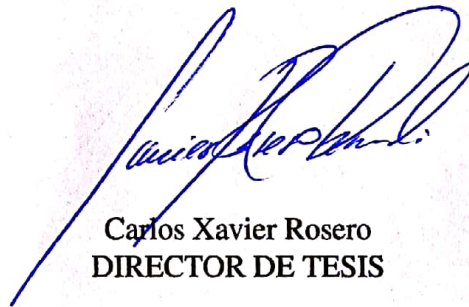

Ahson/Andréa Herrera Tapia
A.C.I.: 1004484893



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado “Control de voltaje y corriente para convertidores de potencia de formación en microrredes aisladas”, presentado por la egresada Alison Andrea Herrera Tapia, para optar por el título de Ingeniera en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, diciembre de 2022



Carlos Xavier Rosero
DIRECTOR DE TESIS

Agradecimiento

Un sincero agradecimiento a mi tutor académico y amigo Xavier Rosero por su apoyo, paciencia y compartir sus conocimientos en el transcurso de este trabajo de titulación.

A la Universidad Técnica del Norte, por abrirme sus puertas y permitirme conocer a los docentes de CIME que impartieron sus conocimientos para lograr cumplir este tan anhelado sueño.

A los amigos que en mi paso por la universidad pude encontrar, fueron pocos, pero sinceros, en especial a Luis V., David G. y Danny O., por su ayuda, apoyo y siempre confiar en mí.

Al Señor de la Misericordia, por ser mi refugio y permitirme seguir compartiendo la vida con mi familia, por mantener siempre la salud de mis papis, en especial la de mi mami. Bajo tu manto siempre estaremos.

Alison

Dedicatoria

A mis padres, Eddy y Zulay, por su amor incondicional, por brindarme siempre su apoyo a pesar de los errores que pude cometer, por nunca dejarme sola por encima de lo difícil que puede llegar a ser la vida. A mi papi por formarme y educarme con el mismo corazón valiente que él, a mi mami por brindarme siempre sus palabras de aliento y enseñarme a ser tan fuerte como ella. Me faltaría vida para devolverles todo lo que ustedes han hecho por mí y por mi Mateo. Sin ustedes yo sería nada.

A mis hermanos, Lady y Sebastián por creer en mí y compartir la alegría de cada uno de nuestros pequeños y grandes logros, por estar a mi lado tanto en lo bueno como en lo malo, por apoyarme siempre, estén seguros de que yo haré lo mismo por ustedes toda mi vida.

A mi sobrina, la princesa Zoe por enseñarme a conocer el amor de madre, por demostrarme que siempre se puede ser mejor y por ser parte de tu inspiración, espero me permitas seguir siendo tu guía, cuenta siempre conmigo.

A mi hijo, Deyvid Mateo, el rey de mi vida, por ser la motivación de todo lo que hago a diario, por ser mi fortaleza y mi debilidad, por ser un buen niño, por destacarte en todo lo que haces, por demostrarme que tú puedes contra toda adversidad, por ser mi compañero fiel en este largo camino universitario, porque este título es tan esperado para ti como para mí. Me llenas de orgullo mi amor.

A Jonathan, por enseñarme a ponerme de pie cuando yo veía todo perdido, por demostrarme que entre tanta oscuridad siempre hay un rayo de luz, por enseñarme a ser mejor persona, por toda tu ayuda desinteresada, por compartir tu vida junto a mí, porque no existen las palabras suficientes para expresar todo lo que significas para mí. Amándote vivo mejor que nunca.

A mis abuelitos, Victoria (+) y Alfredo (+), Inés y José por demostrarme su amor y cariño toda mi vida, porque siempre quisieron verme cumpliendo esta meta. La promesa esta cumplida papá Alfredo.

Al escribir estas líneas con lágrimas en los ojos me doy cuenta de que les debo mucho, todos ustedes son mi vida.

De corazón.

Alison

Resumen

El ítem 11 de los objetivos de desarrollo sostenible emitidos por la ONU, tiene su relación con la producción de energía eléctrica y el aumento en la generación de energías renovables. Las redes eléctricas convencionales y/o antiguas son muy elevadas además conlleva muchas pérdidas en la transmisión y contaminación ambiental. Las alternativas ante este problema para reducir la emisión de gases a la atmósfera y combatir el calentamiento global se ha optado por un nuevo sistema de generación distribuida (GD). Esta nueva tecnología nos permite generar energía en pequeñas centrales que usan recursos naturales para la generación como: solar, eólica o térmica que se encuentran en ubicaciones cercanas a las localidades de consumo. A partir de esta tecnología se creó el término microrred (MG), como una solución que abarca la GB, cargas variables, dispositivos de control, almacenamiento y transmisión de energía solventando los problemas energéticos de la localidad aledaña de una manera flexible y confiable en entrega de energía para el usuario.

En este trabajo se describe el modelo de la control de voltaje y corriente para convertidores de potencia de formación de red en microrredes aisladas simplificando los procesos matemáticos y sin aumentar complejidad a la simulación. En cuanto a todas las variables trifásicas, se toman con un marco referencial estacionario ortogonal de dos ejes $\alpha\beta$; En la parte de control se contará con un control de potencia donde se realiza la conversión de consignas de potencia activa y reactiva en referencia de corriente $\alpha\beta$ además de contar con un control proporcional e integral en la fuente de corriente con la finalidad de minimizar el error en estado estable.

El modelo matemático que se usa, tiene una técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) que sustenta un inversor. El rendimiento de este modelo adicionando los lazos de control simulando diferentes condiciones de trabajo se confirman con el software matemático de simulación Matlab/Simulink.

Abstract

Item 11 of the sustainable development goals issued by the ONU, is related to the production of electricity and the increase in the generation of renewable energy. Conventional and old electrical networks are very expensive, and also entail many losses in transmission and environmental contamination. The alternatives to this problem are to reduce the emission of gases into the atmosphere and to combat global warming. Therefore, a new distributed generation (DG) system has been chosen. This new technology allows us to generate energy in small plants that use natural resources such as: solar, wind or thermal that are located in locations close to the consumption locations. Based on this technology, the term microgrid (MG) was created as a solution that encompasses the GB, variable loads, control devices, energy storage and transmission in order to solve the energy problems of the surrounding town in a flexible and reliable way in delivery energy for the user.

This paper describes the voltage and current control model for grid-forming power converters in isolated microgrids by simplifying the mathematical processes and without increasing the complexity of the simulation. With respect of all the triphasic variables, they will be taken with a stationary orthogonal reference frame of two axes $\alpha\beta$. In the control section, there will be a power control where the conversion of active and reactive power setpoints into current limit $\alpha\beta$ will be carried out. In addition to having a proportional and integral control in the current source with the purpose of minimizing the error in steady state.

The mathematical model used has a pulse width modulation (PWM) technique that supports an inverter. The performance of this model adding the control loops simulating different working conditions is confirmed with the mathematical simulation software Matlab/Simulink.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Problema | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Justificación | 4 |
| 1.4. Alcance | 5 |
| 2. Revisión literaria | 6 |
| 2.1. Microrredes | 6 |
| 2.2. Clasificación de las microrredes | 7 |
| 2.3. Convertidores de potencia | 10 |
| 2.4. Convertidor formador de red | 11 |
| 2.5. Convertidor alimentador de red | 12 |
| 2.6. Controladores de corriente para formadores de red | 12 |
| 3. Control de voltaje y corriente | 15 |
| 3.1. Funciones de los convertidores de potencia | 15 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2. | Arquitectura de un convertidor de potencia formador de red | 17 |
| 3.3. | Esquema de control multi-maestro | 18 |
| 3.4. | Diseño de controladores | 22 |
| 4. | Simulación y pruebas | 25 |
| 4.1. | Escenario de simulación | 25 |
| 4.2. | Resultados de la simulación | 30 |
| 5. | Conclusiones y trabajo futuro | 35 |
| 5.1. | Conclusiones | 35 |
| 5.2. | Trabajo futuro | 36 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Estructura de una microrred DC [10]. | 8 |
| 2.2. Estructura de una MG híbrida [12] | 9 |
| 2.3. Estructura de una MG híbrida [14] | 10 |
| 2.4. Representación simple de a) convertidor formador de red, b) convertidor alimentador de red [20]. | 11 |
| 3.1. Fuente de generación distribuida basada en un red formador convertidor de poder [19]. | 17 |
| 3.2. Generador de referencia que incluye el esquema de control de caída para un convertidor de formación de red [19]. | 20 |
| 3.3. Fuente de inversor de voltaje de una fase [19] | 22 |
| 4.1. Descripción general de la plataforma de simulación [19]. | 26 |
| 4.2. Planta con control PI de corriente (Autor). | 27 |
| 4.3. Convertidor de potencia de formación de red virtual[19]. | 28 |
| 4.4. Impedancia inductivo-resistiva para simular transformadores, líneas y cargas[19]. | 30 |

| | |
|---|----|
| 4.5. Configuración de una microrred[19]. | 30 |
| 4.6. Configuración de la simulación de una microrred[19]. | 31 |
| 4.7. Sistema dinámico control droop (Autor). | 32 |
| 4.8. Control PI de la corriente (Autor). | 34 |
| 4.9. Voltaje de salida de la simulación (Autor). | 34 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| 3.1. Valores K_p , K_i , K_d del controlador PI-ITAE y PID-ITAE [19]. | 24 |
|---|----|

Capítulo 1

Introducción

1.1. Problema

La tecnología de producción de electricidad en base a renovable ha tenido avances y transformaciones en la actualidad [1], [2]. El conjunto formado por una fuente y su convertidor de energía se denomina fuentes de generación distribuida (DGS, Distributed Generation Source). Varias DGSs forman una microrred (MG, MicroGrid), que consiste en una red eléctrica de baja potencia. La MG puede trabajar en modo de conexión a la red eléctrica principal o también en modo aislado [3]. El modo más demandante de control es el aislado ya que la MG tiene que autorregular la calidad de voltaje [4].

La calidad de voltaje considera frecuencia y amplitud, y para el cumplimiento de este objetivo entran en escenario dos tipos de convertidores de potencia. El primero es el de alimentación de red (grid feeding) que sólo inyecta potencia en la MG. El segundo es el de formación de red (grid forming) que se encarga de asegurar la calidad de voltaje, y para ellos usa lazos de control de voltaje y de corriente [5]. Si bien las microrredes tienen un sustento teórico abundante, es necesario implementarlas. En este contexto, el convertidor de potencia de formación de red, in-

cluyendo los lazos de control de voltaje y corriente que lo gobiernan, es el elemento primordial a desarrollar. Además, es necesario determinar el rendimiento de estos lazos de control para condiciones particulares, en base a los análisis de respuesta dinámica y de retroalimentación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar los lazos de control de voltaje y corriente para convertidores de potencia de formación de red en microrredes aisladas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar los métodos de control de corriente y de voltaje en convertidores de potencia de formación de red de microrredes aisladas.
- Proponer un lazo de control de corriente y otro de voltaje para su posterior análisis dinámico considerando los problemas de estabilidad y de regulación.
- Implementar la propuesta a través de simulaciones en software matemático y someterla a diferentes escenarios de funcionamiento.

1.3. Justificación

Los recientes avances tecnológicos en el ámbito de la generación y la distribución adecuada de energía han hecho que el interés por el uso de las microrredes vaya en aumento. En particular, las microrredes aisladas que integran convertidores de potencia de formación de red son la nueva tendencia en la generación eléctrica [6]. Estos convertidores ofrecen una gran capacidad para gestionar de forma eficiente la calidad de voltaje [7].

Las microrredes aisladas tienen menor consumo de carbono y ofrecen mayor rapidez de respuesta a la demanda en comparación con las redes eléctricas tradicionales. Además, al integrar gran cantidad de fuentes de energía renovable, es imperativo que se empiece a entender su funcionamiento con el propósito de implementarlas en la realidad [8].

Por otro lado, en la realización de este trabajo de grado se aplicarán las destrezas y conocimiento adquiridos durante la formación en la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Se tendrá la oportunidad de resolver un problema del entorno a través de la ingeniería.

1.4. Alcance

Partiendo de la dinámica de los convertidores de potencia de formación de red que funcionan en microrredes aisladas, se prescribirán las funciones de transferencia en lazo cerrado para control de corriente y de voltaje. Estos modelos serán analizados en base a su respuesta dinámica y a las ecuaciones de control (retro-alimentación), para determinar su rendimiento.

Además, los dos lazos serán implementados en simulaciones con software matemático que consideren diferentes escenarios, con el fin de verificar la entrega de calidad de voltaje (frecuencia y amplitud).

Capítulo 2

Revisión literaria

En el presente capítulo se describe la información científica vinculada con el tema de transmisión y distribución de redes eléctricas y convertidores de potencia, de igual manera se integran las propuestas de sistemas de control para microrredes.

2.1. Microrredes

Según [8], una microrred (MG) se podría definir como un sistema eléctrico de escala reducida que tiene la capacidad de crear, transferir y distribuir energía. Una MG se considera como un sistema gestionable que tiene su propio controlador y paralelamente está formado por:

- Unidades de generación distribuida (DG): para estas unidades se pueden usar varias fuentes de energía como la fotovoltaica (PV), eólica, celdas de combustión, térmica entre otras.
- Unidades para el almacenamiento de energía (ES): normalmente suelen ser físicas, químicas,

cas y electromagnéticas, su funcionalidad son de vital importancia, ya que tienen la finalidad de asegurar el cambio de carga, arranque de la MG y gestión de la energía.

- Dispositivos de control: tienen la función de realizar el control de la MG en tiempo real, también son los encargados de las tareas de gestión energética que aportan en la red y a su vez en un modo de aislamiento.

2.2. Clasificación de las microrredes

Las MGs de acuerdo a su nivel de capacidad, la operatividad y recursos cuyo uso de ajusta al requerimiento local, las MGs se pueden dividirse de la siguiente manera [9]:

- Por la demanda: se categorizan en MG simples, MG con múltiples DGs y en MG de servicio público según la petición local.
- Por su cabida: la MG puede encontrarse como; simple, corporativa, de alimentación, MG de subestación y MG independiente por su capacidad de producción.
- Por el espécimen de tensión de operatividad: se encuentran el MG de corriente continua (DC), de corriente alterna (AC) y combinadas o híbridas (AC/DC).

- Microrredes DC

En esta clasificación de microrredes la presente categoría es utilizada en las áreas de aviación al igual que ramas del aero espacio y sistemas de navío. La principal razón de su uso radica en las características que maneja su sistema de corriente continua

pues existe la posibilidad de alimentar tanto las fuentes energéticas como sus cargas de forma mas instantánea y eficiente, evitando fases de conversión. Se aprecia a continuación en la fig 2.1, como las unidades DG, las ES y las cargas se enlazan a un bus común DC dentro de una microrred DC [10].

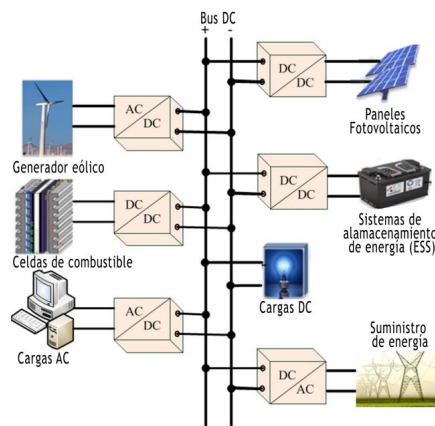


Figura 2.1: Estructura de una microrred DC [10].

- Microrredes AC

Una microrred AC se enlaza hacia una red principal por medio de un bus común AC y el bus AC tiene la función de controlar el empalme y la interrupción de la red principal por medio de un disyuntor en punto de acoplamiento común (PCC). En esta clase de microrredes las unidades DG y las ES son vinculadas al bus AC por medio de convertidores de potencia (ver fig. 2.2). En este sentido, la MG puede presentarse en el modo conectado a la red o en el modo apartado [11]. Haciendo referencia al primer modo la alusión de tensión y frecuencia están explícitas por la red principal y el reto está en mantener el control del flujo de potencia activa y reactiva. Sin embargo, en el siguiente que es el modo apartado la MG se desarrolla

de forma libre a la red principal. En esta situación la finalidad es guardar la tensión y frecuencia en los límites tolerables en los que los generadores puedan abastecerse con la demanda de carga local [12].

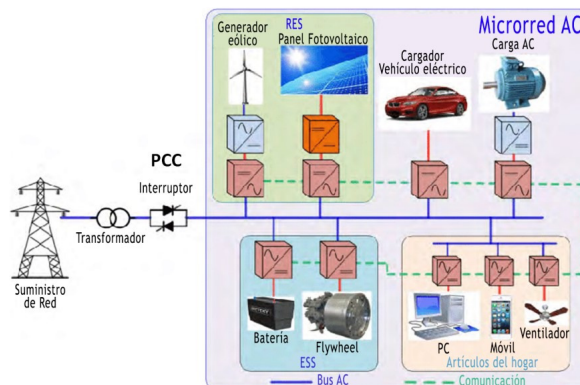


Figura 2.2: Estructura de una MG híbrida [12]

- Microrredes híbridas

La MG híbrida AC/DC presenta tanto los beneficios como los limitantes de la microred AC y microred DC, los tipos de provisión de energía son mucho más variados y flexibles. Se considera importante analizar el control de este tipo de MG ya que es mucho más complejo ya que la cantidad de elementos que posee es mayor a las anteriores. La conformación de una MG híbrida se muestra en la fig. 2.3, donde se observa la integración de un bus AC y un bus DC que a esta le acceden el suministro directo de las diferentes cargas [13].

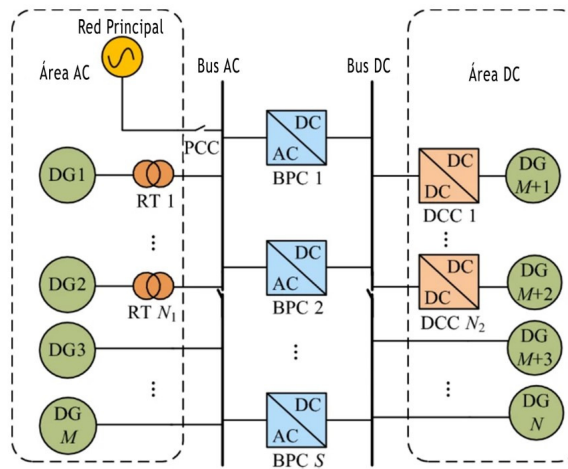


Figura 2.3: Estructura de una MG híbrida [14]

2.3. Convertidores de potencia

Las microrredes presentan elementos importantes como los convertidores de potencia, su razón se fundamenta en su capacidad de interconectar a las fuentes DG y los dispositivos de acaparamiento con los buses de la MG [15].

Fuera del estado del switch fundamental (PCC), donde la MG puede conectarse o no hacia una red principal, el convertidor de potencia puede actuar como seguidor de voltaje alojándose en la red principal donde el convertidor actúa como una fuente controlada de corriente cuya denominación es alimentador de red (grid-feeding) [16]. O por otra parte puede actuar como fuente de voltaje conociéndose como formador de red (grid-forming), mismo que se estructura cuando la MG opera en modo apartado [17].

2.4. Convertidor formador de red

La principal función del convertidor formador de red es verificar que la amplitud del voltaje y frecuencia de la red se encuentren adecuadamente. Se presente su estructura en la fig. 2.4 a) el convertidor se conecta a una impedancia en serie Z a través de su fuente adecuada de voltaje AC. Se establece la ecuación de la alusión (2.1). Las referencias de amplitud V podrán mantenerse en funcionamiento mientras se adapta el voltaje mediante sus lazos de control esto permite también que la frecuencia ω y las medidas de voltaje v y corriente i a la salida del convertidor de potencia puedan seguir operando [18].

$$v = f(V, \omega, v, i) \quad (2.1)$$

La fig. 2.4 b) Diagrama simple de un convertidor alimentador de red.

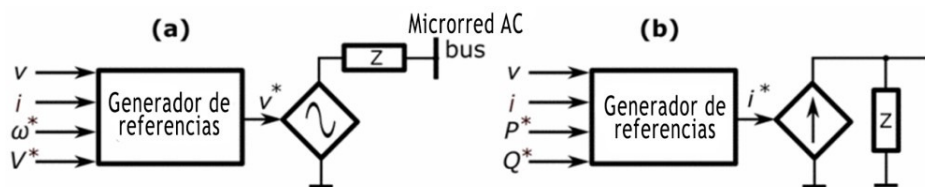


Figura 2.4: Representación simple de a) convertidor formador de red, b) convertidor alimentador de red [20].

2.5. Convertidor alimentador de red

En esta situación el convertidor debería inyectar corriente a la red por medio de referencias de potencia activa y reactiva. Indistintamente si está vinculado a la red o se encuentra aislado puede su convertidor funcionar como una fuente controlada de corriente. El convertidor de potencia requiere al menos un convertidor formador de red o un generador síncrono que le proporcione la tensión de red para poder desempeñar sus funciones de manera adecuada, caso contrario es imposible que se ejecute como en un modo asilado [19].

$$i = f(P, Q, v, i) \quad (2.2)$$

La corriente que se debería inyectar al convertidor se representa en la ecuación (2.2), donde la referencia de corriente se simboliza con (i), misma que se encuentra bajo la función de las referencias de potencia activa (P) y reactiva (Q) las medidas tomadas de voltaje (v) y corriente (i) a la salida del convertidor de potencia.

2.6. Controladores de corriente para formadores de red

Con el pasar del tiempo la evolución de los controladores de corriente en convertidores de potencia se presentó iniciando con el control de etapa y amplitud (PAC), uno de los primeros modelos de controladores de corriente [21]. Con este primer modelo surgen las versiones adaptadas a diferentes propósitos buscan llegar a cero en el error cuando se encuentran estables, tener una respuesta inmediata y lo más amortiguada viable. Algunos de los descubrimientos

literarios se muestran en [22],[23], con el control de corriente es dependiente de las mediciones de voltaje y la descomposición de la sucesión de corriente positiva, negativa y cero. El estudio de Kirchhoff en el inductor y los interruptores de la MG, muestra el control de corriente que se recibe aplicándose en ambos métodos de operación de la Miligrama. El nuevo enfoque opuesto se presenta en [24],[25], en este caso no es necesario dividir las corrientes de esta forma se reduce la complejidad del controlador y se perfecciona la contestación dinámica del sistema. En [26], se presenta la condición de fallo y se analizar el control limitado de corriente para un convertidor alimentador. Se integra el criterio de crecimiento en la potencia activa en l línea para delimitar la corriente del inversor. En [27] se analiza la posibilidad de implementar un controlador plug-and-play para el monitoreo de corriente de alimentación de red en microrredes DC.

Los enfoques representativos de los controladores de corriente lineales m habituales, se presentan desde dos perspectivas siendo los más usado por su solidez y fácil rutina.

- Controlador Proporcional Integral (PI), representados en [28]-[33], muestran su resultado de una señal de referencia de corriente, a partir de consignas de potencia activa y reactiva.
- Controlador Proporcional Resonante (PR), equivalente a dos controladores PI también maneja dos perspectivas de referencia síncronos compensando tanto las secuencias positivas como negativas [34]. Los resultados del modelado matemático y simulación de los controladores PR en convertidores alimentadores de red se pueden observar en [34]-[37].

Gracias a los aportes literarios se ha considerado al PI para el control de corriente gracias a

su fácil implementación y buenos resultados. El desenvolvimiento del lazo de control en el convertidor de formador de red en una MG aislada será validado en la plataforma de simulación.

Capítulo 3

Control de voltaje y corriente

3.1. Funciones de los convertidores de potencia

Según el modo de conexión de la MG, y si las fuentes de energía pueden o no ajustar su salida a los valores deseables, los convertidores de energía cumplen diferentes roles principales: formar y alimentar la red [38],[39].

1. Convertidor de potencia formador de red: se representa en la fig. 2.4 a), como una fuente ideal de voltaje de CA con una impedancia Z en serie de salida baja. La referencia para el voltaje debe ser v, i . Este voltaje inyectado los lazos de control adecuados dentro del generador de las MG viene referenciado por $v^* = f(V^*, \omega^*, v, i)$, a través de la función de amplitud V y la frecuencia y las medidas tomadas del voltaje v y la corriente i proporcionadas por el convertidor de potencia. Tanto en modo red conectado como en isla, a este convertidor regula la amplitud y la frecuencia de la tensión de red sin necesidad de

conectar ningún otro convertidor formador de red en la MG, como lo hace un generador síncrono en una red convencional [40].

2. Convertidor de potencia de alimentación a la red: se representa como una fuente de corriente CA ideal conectada con una alta impedancia Z paralela, como se ilustra en la fig. 2.4 b). Entrega energía a una red energizada a través de la inyección de corriente. La referencia de corriente, i es fijada por un generador de referencias en función de las referencias de MG de potencias activa y reactiva a entregar, P^* y Q^* respectivamente, y medidas tomadas de la tensión v y corriente i proporcionadas por el convertidor de potencia, como en $i^* = f(P^*, Q^*, v, i)$. Este convertidor de potencia requiere como mínimo un i formador de red o un generador síncrono para formar la tensión de red para poder funcionar, no puede funcionar de forma independiente en modo isla.
3. Discusión: en modo conectado, el voltaje de CA de la red principal se forma convencionalmente por generadores síncronos.

En este escenario, un convertidor de potencia de alimentación de red entrega energía a la red energizada y no es necesario un convertidor de potencia de formación de red. Por otro lado, en modo isla el convertidor de potencia formador de red sirve de referencia para el resto de convertidores de potencia de alimentación de red conectados a él. Por lo tanto, un convertidor de formación de red toma acciones coordinadas para garantizar la sincronización, la regulación de voltaje, el balance de potencia y el reparto de carga [38].

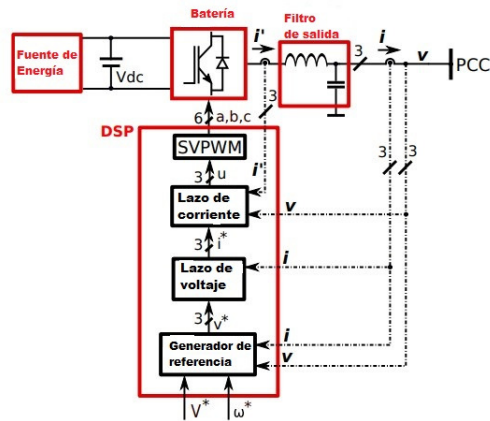


Figura 3.1: Fuente de generación distribuida basada en un red formador convertidor de poder [19].

3.2. Arquitectura de un convertidor de potencia formador de red

En la fig. 3.1, se ilustra un esquema simplificado de un DGS basado en un convertidor de potencia de formación de red trifásico que se conecta a un punto de acoplamiento común (PCC). Se puede reconocer una fuente de energía, un procesador de señal digital dedicado (DSP), una pila de energía y un filtro de salida, todo delimitado por cuadros rojos.

1. Fuente de energía: se requiere generación de energía despachable para que el convertidor de energía que forma la red tenga un suministro continuo de voltaje de DC, VDC.
2. Procesador de señal digital: dentro del DSP, las funcionalidades básicas de control digital en tiempo real incluyen el generador de referencia, los bucles de tensión y corriente en cascada y una unidad de modulación de ancho de pulso de vector espacial (SVPWM) [41].

El generador de referencia establece la referencia de voltaje v por el convertidor de potencia para que $v = v^*$ para la amplitud de voltaje V^* requerida en el PCC. El bucle de tensión fija en un valor la tensión de salida del convertidor para que coincida con su referencia, mientras que el bucle de corriente regula la corriente suministrada por el convertidor [38]. La unidad SVPWM genera el vector de voltaje trifásico que se aplicará a través del banco de energía.

3. Power stack: un power stack cuyo núcleo principal es un puente completo trifásico más un módulo de transistores de potencia, se utiliza para rectificar y amplificar las señales moduladas por ancho de pulsos de baja potencia proporcionadas por el SVPWM perteneciente al DSP.
4. Filtro de salida: un filtro LC de paso bajo compuesto por una inductancia trifásica y un banco de condensadores, se utiliza para suavizar las señales de potencia que alimentan las cargas.

3.3. Esquema de control multi-maestro

Teniendo en cuenta el cumplimiento de la tarea de regular constantemente la amplitud y frecuencia de la tensión de red, se pueden identificar dos esquemas de control para microrredes aisladas: maestro-esclavo y multi-maestro. El enfoque maestro-esclavo comprende un solo nodo maestro que actúa como fuente de voltaje de formación de red, mientras que el resto de los nodos esclavos actúan como alimentación de red. Esta solución carece de fiabilidad, porque la

red completa podría colapsar si el convertidor maestro de formación de la red falla.

Por otro lado, el esquema multi-maestro se aplica cuando varios DGS que funcionan como convertidores de energía que forman la red aseguran la calidad del voltaje de la red; si alguno de ellos falla, este objetivo aún se cumple [42]. En este contexto, se han diseñado varias estrategias en una arquitectura jerárquica para controlar las GD en paralelo, que van desde centralizadas hasta completamente descentralizadas, en la mayoría de los casos interconectadas a través de canales de comunicación. Esta arquitectura consta de tres niveles, a saber, control primario, secundario y terciario. El control primario a menudo aplica el conocido método drop para lograr compartir la energía, el control secundario corrige la desviación de frecuencia de estado estable introducida por la caída usando un control integral y el control terciario ajusta los puntos de ajuste a largo plazo para todo el sistema de potencia [43].

El método drop es uno de los enfoques de control más robustos para conectar convertidores de potencia de formación de red en paralelo que comparten la carga y mantienen la calidad del voltaje [44]. Considere nuevamente el convertidor de potencia que forma la red en la fig. 3.1 y específicamente el generador de referencia. Este bloque ahora se llena con el esquema de caída que se muestra en la fig. 3.2, cuya descripción se hace en las subestaciones que siguen. Antes de comenzar, se debe considerar que las variables AC se trasladan del marco de referencia trifásico al marco de referencia estacionario ortogonal de dos ejes [45], para simplificar los cálculos y reducir la complejidad de la simulación.

- Cálculo de potencia: los componente de la instantánea activa, las potencias activa y reac-

tiva se calculan mediante

$$p = \frac{3}{2}(v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta}) \quad (3.1)$$

$$q = \frac{3}{2}(vi + vi) \quad (3.2)$$

donde $v_{\alpha,\beta}$ son los voltajes detectados localmente, mientras que $i_{\alpha,\beta}$ son las corrientes detectadas a la salida de los filtros LC. Se aplica un filtro de paso bajo a (1) para atenuar el ruido. Entonces, las potencias activa y reactiva filtradas en el dominio de la frecuencia son

$$w^* = w_0 - m_p P \quad (3.3)$$

donde w_0 es la frecuencia de corte y m_p es la variable de frecuencia compleja.

- Control Drop: su objetivo principal es calcular el punto de ajuste con bucles de control interno de voltaje, para cada inversor de corriente y de frecuencia w^* y amplitud V^* [18]. Su principio de funcionamiento consiste en reducir la frecuencia y la amplitud de la tensión de salida para controlar los flujos de potencia activa y reactiva. Esto provoca la divergen-

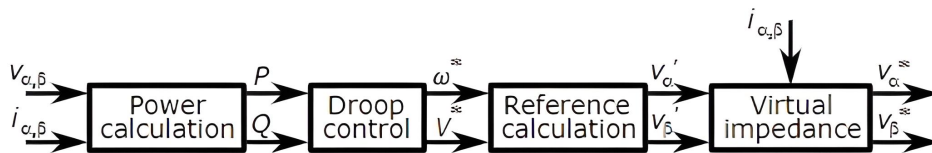


Figura 3.2: Generador de referencia que incluye el esquema de control de caída para un convertidor de formación de red [19].

cia de frecuencia y amplitud con respecto a sus valores nominales. Su formulación básica está dada por

$$V^* = V_0 - n_q Q \quad (3.4)$$

donde w_0 y V_0 son la frecuencia y amplitud de la tensión nominal del convertidor de potencia, P y Q son las potencias activa y reactiva de salida, m_p y n_q son las ganancias de control proporcionales.

- Calculo de referencia: los voltajes de referencia son v_α y presionando en función de los puntos de ajuste locales para la frecuencia Y y voltaje V como en

$$v_\alpha 0 = V * \sin(w^*), v_\beta 0 = -V * \cos(w^*) \quad (3.5)$$

donde v_α y V^* son la frecuencia y amplitud de la tensión nominal del convertidor de potencia, P y Q son las potencias activa y reactiva de salida, m_p y n_q son las ganancias de control proporcionales.

- Impedancia virtual: la caída de frecuencia (3.3) y la caída de tensión (3.4) han demostrado ser soluciones efectivas cuando las líneas tienen un comportamiento inductivo predominante [38]. Además, la impedancia equivalente de la red vista por el convertidor de potencia debe ser predominantemente inductiva para garantizar la capacidad de control del sistema. En este sentido, es necesario sumar una inductancia virtual a la impedancia

de línea vista por el inversor, para garantizar una impedancia principalmente inductiva [48]. Entonces, (3.5) se convierte en

$$v_{\alpha}^* = V * \sin(w * t) + Z_v i_{\beta} \quad (3.6)$$

$$v_{\beta}^* = V * \sin(w * t) + Z_v i_{\beta} = -V^* \cos(w^* t) - Z_v i_{\alpha} \quad (3.7)$$

donde Z_v es un valor de inductancia pura.

3.4. Diseño de controladores

3.4.1. Fuente de voltaje de inversor

En la fig 3.3 se muestra un inversor con puente de diodos de una sola fase.

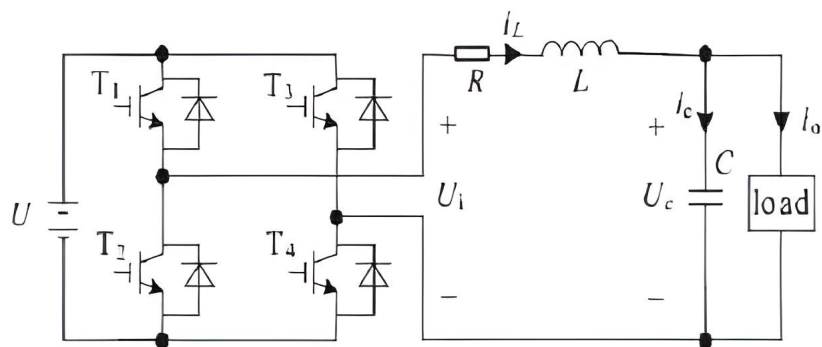


Figura 3.3: Fuente de inversor de voltaje de una fase [19]

Aplicando la Ley del Voltaje de Kirchhoff y la Ley de Corriente de Kirchhoff,

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{C}i_0, \quad (3.8)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_i - \frac{1}{L}V_c - \frac{R}{L}i_L. \quad (3.9)$$

La función de transferencia del inversor sin carga se puede derivar de (3,8) y (3,9), así:

$$(P_s) = \frac{U_c}{U_i} = \frac{1}{LC + RC + 1}, \quad (3.10)$$

donde, U_c es el voltaje de la capacitancia del filtro C y U_i es el voltaje de salida del puente inversor. Al poner valores, $L = 0,55\text{mH}$, $R = 0,3$, $C = 140\mu\text{F}$, la función de transferencia de VSI es

$$P(s) = \frac{1}{77,28 * 10^{-9}s^2 - 42 * 10^{-6}s + 1}. \quad (3.11)$$

3.4.2. Optimización con criterios de desempeño integral de tiempo multiplicado de error absoluto para controlador PI y PID

Los valores K_p , K_i , K_d de los controles PI y PID se diseñan utilizando el criterio de desempeño integral de tiempo multiplicado de error absoluto para el sistema VSI se muestran en la cuadro 3.1 [19].

Cuadro 3.1: Valores K_p , K_i , K_d del controlador PI-ITAE y PID-ITAE [19].

| | K_p | K_i | K_d | ITAE |
|------------|-------|-------|-------|----------|
| PID | 1.69 | 3.13 | 0.002 | 0.5931 |
| PI | 10 | 1110 | _____ | 0.022804 |

Capítulo 4

Simulación y pruebas

El enfoque de simulación de MG en isla comprende tres elementos básicos: convertidor de potencia, interruptor activo e impedancia (para transformador, línea de transmisión y carga). El convertidor de potencia imita el funcionamiento de uno formador de red (trabajando como inversor de fuente de tensión); incluye un kernel en tiempo real (con sus correspondientes características de temporización) y una fuente de voltaje. El interruptor activo permite la conexión/desconexión de elementos eléctricos durante la simulación. Cualquier transformador, línea de transmisión y carga comprende impedancias inductivas - resistivas.

4.1. Escenario de simulación

La imitación de los componentes eléctricos como convertidores de potencia, cargas y líneas de transmisión y sus interacciones, así como los componentes informáticos como procesadores y relojes (incluso redes digitales) y sus interacciones se realizan a través de la plataforma de simulación. Con este fin, se ha desarrollado un enfoque de co-simulación basado en Simscape Power Systems [10] y Truetime [11].

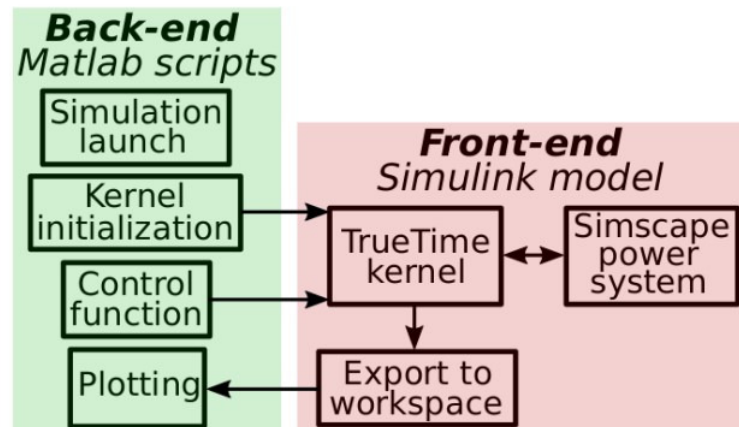


Figura 4.1: Descripción general de la plataforma de simulación [19].

El funcionamiento de la plataforma de simulación sigue el principio básico de funcionamiento del modelo de simulación TrueTime en [11], que se muestra en la fig 4.1. El entorno consta de dos capas: un backend de datos compuesto por varios scripts de Matlab y un frente gráfico -extremo que comprende un modelo de Simulink.

En la interfaz gráfica, el bloque del núcleo TrueTime ejemplifica un procesador digital que ejecuta un algoritmo encargado de monitorear el sistema de energía de Simscape. Es por tal razón que el núcleo tiene responsabilidad sobre la adquisición de datos de este sistema eléctrico, de su procesamiento y crear una salida de control para los mismos. De igual forma, el kernel desarrolla nuevas funciones vinculadas con la aplicación de desfases de reloj, desplazamientos de reloj y gerencia de comunicaciones de red.

El back-end de datos entra en escena a través de dos scripts de Matlab, a saber, la inicialización del núcleo y la función de control. El script de comienzo esencialmente establece la estructura de datos local como la labor de inspección que se ejecutará en el dispositivo.

También se declaran algunos problemas relacionados con la activación de la tarea de control, como la periodicidad, la prioridad y el algoritmo de programación. De lo contrario, el script contiene la tarea de control que se ejecutara en el núcleo.

En referencia a la interacción con la plataforma y nuevamente atendiendo al diagrama de la fig 4.1, en la etapa de programación, el usuario es libre de modificar el modelo de Simulink dependiendo de la configuración requerida para la microrred. Además, tanto los scripts de inicialización como los de control deben cambiarse en función de la ley de control que debe implementarse. Posteriormente, para ejecutar la simulación, se debe ejecutar el script de lanzamiento de la simulación. Este archivo contiene configuraciones generales en cuanto a variables globales, valores eléctricos en los elementos del sistema de potencia, tiempo de simulación, nombre del script de Simulink a ejecutar, entre otros. Después de que se detiene la simulación, toda la información generada se envía a Matlab a través de la función exportar al espacio de trabajo para finalmente mostrarse al usuario a través del script de trazado. Estos datos también están disponibles si se desea un análisis más detallado.

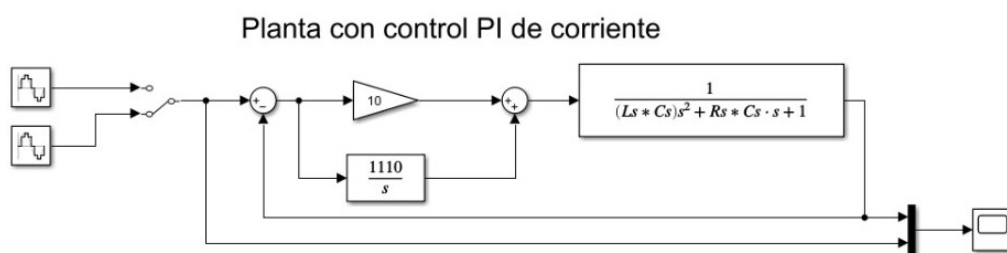


Figura 4.2: Planta con control PI de corriente (Autor).

- Convertidor de potencia formador de red virtual En la fig. 4.3 se muestra una implementación virtual del convertidor de formación de cuadrícula presentado en la fig. 4.3 El

kernel TrueTime ejecuta el esquema de control multi-maestro presentado en la fig. 3.2 y expresado a través de los modelos (3.1) a (3.6).

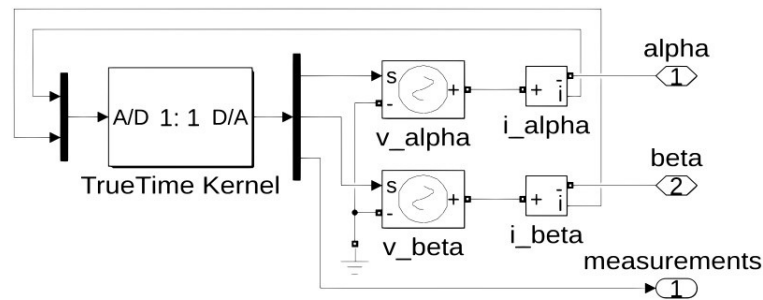


Figura 4.3: Convertidor de potencia de formación de red virtual[19].

Dos fuentes generan voltajes en el marco de referencia estacionario v tomando como referencias v que han sido calculados dentro del a través núcleo de TrueTime (6) y luego generados por su convertidor de digital a analógico. Las intensidades proporcionadas por cada fuente, i_α e i_β , se miden a través de sensores de corriente y se envían al núcleo para su digitalización a través de su convertidor de analógico a digital. Estos valores se introducen en el modelo (1) para el cálculo de potencia.

Haciendo una analogía entre las fig. 4.3 y 3.1 se puede ver la eliminación de los bucles de tensión y corriente así como el módulo SVPWM en la implementación virtual. Todos estos elementos han sido reemplazados por las fuentes de voltaje en la simulación. Además se ha suprimido la fuente de energía ya que en la simulación se considera un suplemento energético indefinido, lo mismo ocurre con el power stack y con el filtro de salida debido a que las tensiones no están moduladas y por tanto no es necesaria la eliminación de transitorios.

- Interruptores activos

Para recrear el contacto/desconexión física de componentes en la MG, por ejemplo, convertidores de potencia, cargas y líneas de transmisión, en la fig. 4.3 se muestran dos tipos de interruptores activos.

Ambos elementos son idénticos excepto por su mecanismo de disparo. Cada uno está compuesto por dos interruptores ideales, uno para cada línea en el marco de referencia. En estado encendido, los interruptores tienen una pequeña resistencia interna, mientras que en estado apagado esta resistencia es infinita.

El interruptor normalmente abierto (ON) en la fig. 6a permanece deshabilitado (resistencia infinita) hasta que el paso ascendente activa la compuerta del interruptor y la habilita (pequeña resistencia). El interruptor normalmente cerrado (NC) de la fig. 4.3 permanece conectado hasta que un escalón descendente activa la compuerta del interruptor y la desconecta. Los tiempos de activación para cualquiera de los bloques de pasos se establecen en el script de inicio de la simulación.

- Transformadores virtuales, líneas y cargas: todos estos elementos comparten la estructura de simulación indicada en la fig. 4.3, que comprende una rama RLC de la serie Simscape.

El valor de impedancia (inductancia y resistencia) se establece en el script de inicio de simulación descrito anteriormente.



Figura 4.4: Impedancia inductivo-resistiva para simular transformadores, líneas y cargas[19].

4.2. Resultados de la simulación

En esta sección se presenta un ejemplo completo para resaltar la flexibilidad y aplicabilidad de la plataforma de simulación para MG insulares. Cabe mencionar que el banco de pruebas la aplicabilidad no se limita a este ejemplo particular.

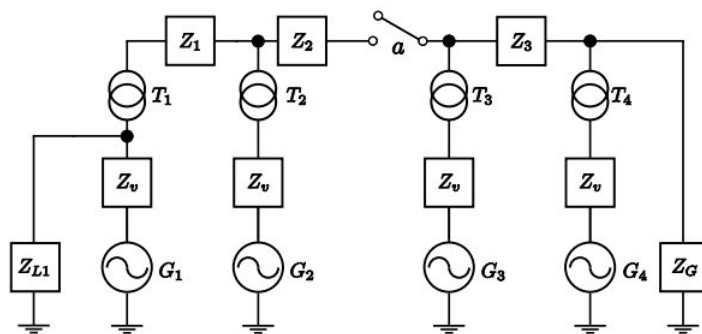


Figura 4.5: Configuración de una microrred[19].

4.2.1. Parámetros de simulación para la microrred

En primer lugar, es necesario establecer un montaje experimental como referencia [49] - [51]. Es un MG de pequeña escala trifásico de baja potencia, ilustrado esquemáticamente por un diagrama de una sola línea en la fig. 4.4. Los valores de los componentes se enumeran en la Tabla I. El sistema está compuesto por cuatro nodos de generación $G_{1,2,3,4}$ en el que la gene-

ración de energía de fuentes de energía distribuidas es emulado; cada uno está habilitado con impedancia virtual Z_v . La MG alimenta una carga global con impedancia Z_G y una local carga con impedancia Z_{L1} . Inductancias trifásicas en serie con resistencias se implementan para emular los cables de la líneas distribuidas, denominadas $Z_{1,2,3}$. El diagrama también incluye transformadores de aislamiento $T_{1,2,3,4}$ conectados a la salida de cada convertidor de poder. El MG también incluye un interruptor a para hacer una partición eléctrica en la MG. La configuración de la simulación en la fig. 4.5 sigue el esquema de la fig 4.4. Los principales actores son los convertidores de potencia de formación de red 1 a 4, que simulan G_1 a G_4 .

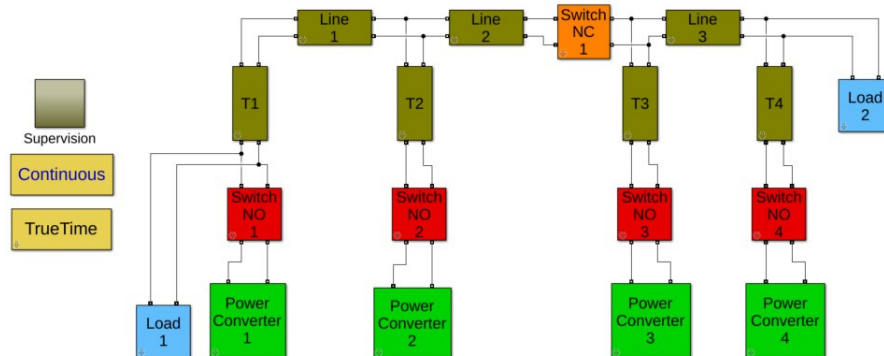


Figura 4.6: Configuración de la simulación de una microrred[19].

Las impedancias Z_v se implementan mediante código en el kernel de cada convertidor de potencia virtual. Para simular la electricidad conexión/desconexión de cada convertidor, se conectan a la red a través de los interruptores NO 1 a 4, de la fig. 4.5 (a). Los transformadores (T_1 a T_4), las líneas de transmisión (Línea 1 a Línea 3) y las cargas (Carga 1 y Carga 2) se implementan a través de las ramas RLC que se muestran en la fig. 4.5. En particular, la Carga 1 simula la carga local Z_{L1} mientras que la Carga 2, la carga global Z_G . El interruptor NC 1 corresponde

al interruptor a en la configuración de MG y se usa para simular una partición eléctrica. Entre varios elementos que no han sido descritos previamente en la fig. 4.5, se encuentra el bloque de supervisión que envía al espacio de trabajo los valores instantáneos de potencias activas/reactivas, frecuencia, amplitud y hora local. El bloque continuo contiene la configuración de los elementos Simscape presentes en la simulación, mientras que el bloque TrueTime contiene la configuración de red de los núcleos TrueTime dentro de cada convertidor de potencia. Es importante tener en cuenta que la deriva del reloj es una funcionalidad proporcionada por estos núcleos.

4.2.2. Resultados

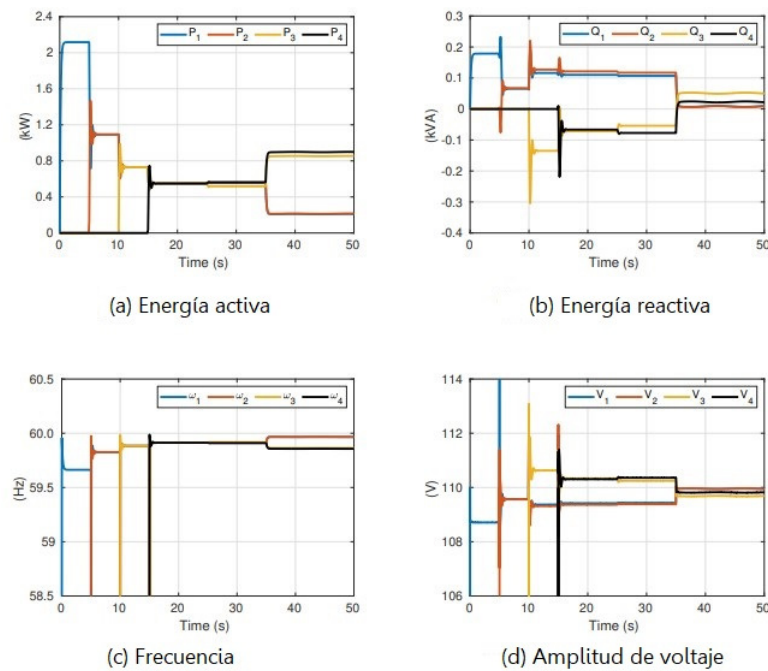


Figura 4.7: Sistema dinámico control droop (Autor).

La fig. 4.6 muestra los resultados tomados de la ejecución de la simulación de la MG en la fig. 4.5. Todos los convertidores de potencia arrancan (y se conectan a través de interruptores ON) secuencialmente cada 5s, ejecutando el control de caída de tensión y frecuencia. Hasta el tiempo $t = 25s$ los relojes son ideales y a partir de este instante de tiempo el reloj impuesto derivas comienzan y ejercen su efecto sobre la dinámica de activos y potencias reactivas, así como frecuencia y amplitud. Arriba al tiempo $t = 35s$ la MG no se ve afectada por fallas, sin embargo, a partir de este momento se produce una falla eléctrica (por apertura NC interruptor 1), lo que lleva a un escenario eléctrico en el que dos coexisten sub-MG, uno con los convertidores de potencia 1 y 2 alimentando la carga local 1, y la otra con convertidores de potencia 3 y 4 alimentando la carga global 2.

1. *Rendimiento del control droop*: ambos métodos de caída introducen desviaciones en frecuencia y amplitud. La compartición entre convertidores de potencia se logra perfectamente debido a que la frecuencia de la MG es una variable global y, por tanto, todos los VSI tienen la misma frecuencia en estado constante [4], es decir, $w = w * 1 = 1 = w*$. Por otro lado, la distribución perfecta de la potencia reactiva no se logra con la caída en la amplitud de voltaje no es una variable global, y por lo tanto es diferente en cada potencia de convertidor [4], es decir, $V1=6, V2=6, Vi=6$. Así, este controlador solo proporciona una ligera ecualización de potencia reactiva.
2. *Efectos de las derivas de reloj*: cuando comienzan las derivas exageradas del reloj, el control de caída presenta pequeñas desviaciones en los valores de estado estable para las potencias activa y reactiva, así como para la frecuencia y el voltaje. El impacto de las

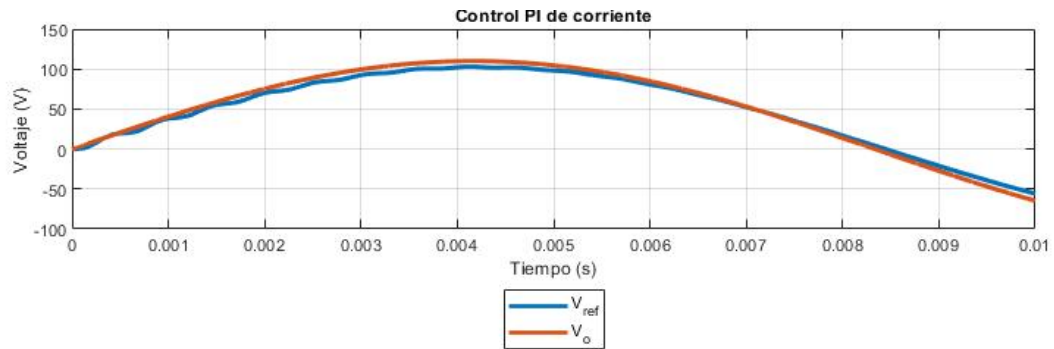


Figura 4.8: Control PI de la corriente (Autor).

desviaciones del reloj en el control de frecuencia y el reparto de potencia en las MG se investigó recientemente en [49]. Allí, se muestra que las MG basadas en VSI controladas por caída son resistentes a las desviaciones del reloj, aunque se observan pequeñas desviaciones de estado estable en el reparto de potencia activa.

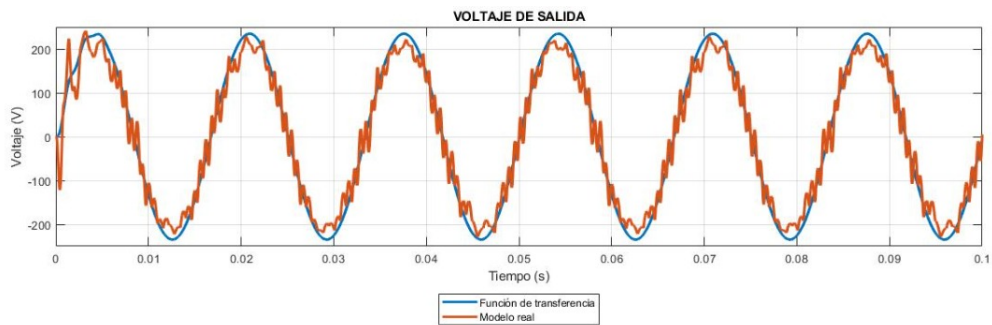


Figura 4.9: Voltaje de salida de la simulación (Autor).

3. *Efectos de las particiones:* después de que ocurre el desacoplamiento eléctrico de la partición, los flujos de energía no pueden transferirse entre las sub-MG aisladas. Luego, cada sub-MG alcanza diferentes puntos de equilibrio en estado estacionario. Así, este escenario recrea el estudiado en [51] y obtiene los mismos resultados.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

Se realizó un análisis del funcionamiento que tiene un convertidor alimentador de red, tanto en MGs aisladas como conectadas a la red. Adicionalmente, se presentan las diferentes categorías de convertidores al igual que el desenvolvimiento de los mismos, y se pudo observar que el controlador de corriente más utilizado debido a su fácil implementación y buenos resultados en este tipo de aplicaciones es el control PI. El control PI implementado rastrea de manera efectiva las referencias de corriente $i\alpha^*$ y $i\beta^*$, provistas por el control de potencia. Considerando la cantidad de elementos eléctricos, las variables de procesamiento y cambios en la entrada, las señales presentan un leve sobre-impulso y un tiempo de estabilización de 1,5s. El buen desempeño de este controlador se debe también a la implementación de un control PI de potencia, este lazo de control modifica los valores negativos de potencia activa y reactiva y

entrega una referencia corregida a la fuente de corriente. Se realizaron los cálculos pertinentes y se implementaron las ecuaciones en el software matemático.

5.2. Trabajo futuro

En este trabajo de grado se ha propuesto una plataforma de simulación flexible para microrredes aisladas. Su principal funcionalidad está relacionada con la co-simulación de dos herramientas de Matlab: Simscape Power Systems y Truetime. El funcionamiento de este enfoque ha sido corroborado por un ejemplo particular sometido a un escenario que combina conexión secuencial de convertidores de potencia. Los resultados obtenidos están de acuerdo con los resultados encontrados en el estado del arte. También se recomienda realizar pruebas en el laboratorio con los componentes para obtener resultados que se puedan analizar en contraste a los valores resultantes de la simulación y aquellos valores reales de la MG. El trabajo futuro ampliará la plataforma para implementar convertidores de potencia de alimentación a la red, así como la conexión/desconexión de la microrred a la red principal. También considerará escenarios de control más ricos utilizando la red de comunicación. Adicionalmente se puede utilizar este control para analizar el desempeño de una MG conectada a la red principal. Así mismo se puede implementar redes intercomunicadas e inspeccionar cada uno de los escenarios de control.

Bibliografía

- [1] R. B. T. Adefarati, Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review, Pretoria: IET Renewable Power Generation, 2016.
- [2] I. S. Association, «1547-2003 -IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems,» 28 JULIO 2003. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8676>. [Último acceso: 23 MAYO 2021].
- [3] J. Rocabert, G. M. Azevedo, Á. Luna, J. M. Guerrero, J. I. Candela y P. Rodríguez, Intelligent connection agent for three-phase grid-connected microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE, 2011.
- [4] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg y P. Rodríguez, Control of Power Converters in AC Microgrids, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012.
- [5] J. M. Guerrero, P. C. Loh, T.-L. Lee y M. Chandorkar, Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013.

- [6] C. Buccella, C. Cecati y H. Latafat, Digital Control of Power Converters—A Survey, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012.
- [7] J. Lopes, C. Moreira y A. Madureira, Defining control strategies for MicroGrids Survey, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012.
- [8] F.Guo,C.Wen,J.MaoyY.D.Song,Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop - Controlled Inverter - Based Microgrids,IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015.
- [9] F. Li, R. Li and F. Zhou., Overview of Microgrid., Microgrid Technology and Engineering Application., pp. 1-10, 2016.
- [10] Karami, Zeinab and Shafiee, Qobad and Khayat, Yousef and Yaribeygi, Meysam and Dragicevic, Tomislav and Bevrani, H.. (2019). Decentralized Model Predictive Control of DC Microgrids with Constant Power Load.
- [11] Kumar, Dinesh & Zare, Firuz & Ghosh, Arindam, (2017).DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications and Standardizations Aspects. IEEE Access. PP. 1-1.10.1109 ACCESS.2017.2705914.
- [12] R. Medina. Microrredes Basadas en Electronica de Potencia: Parte II: Control de Potencia Activa y Reactiva. INGENIUS, pages 24-34, 12 2014. doi: 10.17163/ings.n12.2014.03.

- [13] G. Wang, X. Wang, F. Wang, and Z. Han, "Research on hierarchical control strategy of AC/DC hybrid microgrid based on power coordination control," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 21, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/app10217603.
- [14] F. Gao, X. Wang, P. Yang, S. Kou and M. Sun, "Research and Simulation of Hybrid AC/DC Microgrid," 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC), 2020, pp. 1276-1280, doi: 10.1109/HVDC50696.2020.9292793.
- [15] M. Castilla and L. Vicuna, Luis and J. Miret, *Control of Power Converters in AC Micro-grids*, Springer International Publishing, 2019, pp.139-170,doi=10.1007/978-3-319-98687-6_5, url=https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6_5.
- [16] hu, Y. Zheng, Y. Wang and Y. Yuan, "Isolated Microgrid Capacity Configuration Considering Economic Risk of Customer Interruption," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4070-4073, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881780.
- [17] Serban and C. Marinescu, "Flexible solution for grid-connected operation of micro grids, based on a leading inverter with supercapacitor energy storage," 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398776.
- [18] J. Miret, V. Garc´ıa, R. Guzman, A. Camacho and M. Moradi, "A Flexible Experimental Laboratory for Distributed Generation Networks Based on Power Inverters," *Energies*, vol. 10, 2017, url=https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1589, doi:10.3390/en10101589.

- [19] C. X. Rosero, C. Vaca, M. Gavilanez, I. Iglesias and R. Rosero, Towards a Simulation Platform for Islanded Microgrids based on Grid-Forming Power Converters, 2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCAC51819.2021.9633277.
- [20] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, Control of Power Converters in AC Microgrids, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.
- [21] . Wu, S. B. Dewan, and G. R. Slemon, "Analysis of an AC-to-DC Voltage Source Converter Using PWM with Phase and Amplitude Control," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 2, pp. 355-364, 1991, doi: 10.1109/28.73626.
- [22] . R. Merritt, C. Chakraborty, and P. Bajpai, "New Voltage Control Strategies for VSC-Based DG Units in an Unbalanced Microgrid," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 8, no. 3, pp. 1127-1139, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2657660.
- [23] S. Mortazavian, M. M. Shabestary, and Y. A. R. I. Mohamed, "Analysis and Dynamic Performance Improvement of Grid-Connected Voltage-Source Converters under Unbalanced Network Conditions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 10, pp. 8134-8149, 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2633994.
- [24] Kabiri, D. G. Holmes, and B. P. McGrath, "Double synchronous frame current regulation of distributed generation systems under unbalanced voltage conditions without sequen-

- ce current separation,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol.2015-May, no. May, pp. 1822–1829, 2015, doi: 10.1109/APEC.2015.7104594.
- [25] S. Zhou, J. Liu, L. Zhou, and H. She, “Dual sequence current controller without current sequence decomposition implemented on DSRF for unbalanced grid voltage conditions,” *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, pp. 60–67, 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953376.
- [26] F. Benyamina, A. Benrabah, F. Khoucha, M. F. Zia, Y. Achour, and M. Benbouzid, “Online current limiting-based control to improve fault ride-through capability of grid-feeding inverters,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 201, no. August, p. 107524, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107524.
- [27] R. Han, M. Tucci, R. Soloperto, J. M. Guerrero, and G. Ferrari-Trecate, “Plug-and-play design of current controllers for grid-feeding converters in DC microgrids,” *2017 Asian Control Conf. ASCC 2017*, vol. 2018-January, no. 200021, pp. 2182–2187, 2018, doi: 10.1109/ASCC.2017.8287513.
- [28] U. Mumtahina, S. Alahakoon, and P. Wolfs, “Comparative Analysis of Grid Forming and Grid following Converters in Time Domain and Phasor Domain Form,” *2020 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2020 - Proc.*, no. December, pp. 4–8, 2020.
- [29] P. Montero-Robina, K. Rouzbehi, F. Gordillo, and J. Pou, “Grid-Following Voltage Source Converters: Basic Schemes and Current Control Techniques to Operate with Unbalanced

- Voltage Conditions,” *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, vol. 2, no. August, pp. 528–544, 2021, doi: 10.1109/OJIES.2021.3121764.
- [30] A. Tobias, V. Cardenas, F. Quiroz-Vazquez, J. Gonzalez-Rivera, and D. Martinez-Padron, “Experimental Comparison of Control Strategies in a Single-Phase Grid-Feeding Converter for Microgrid Applications,” *2020 17th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Autom. Control. CCE 2020*, pp. 2–7, 2020, doi: 10.1109/CCE50788.2020.9299204.
- [31] . Ding, Z. Chuanzhi, L. Xianhong, Z. Peng, H. Bo, and G. Wanjiang, “The Optimization of PI Controller for Grid Feeding Converter with System Uncertainty Using Differential Evaluation Method,” *2017 Chinese Autom. Congr.*, pp. 7078–7084, 2017, doi: 10.1109/CAC.2017.8244054.
- [32] A. Ingalalli and S. Kamalasan, “An integrated state-space model for grid feeding and grid forming inverters,” *9th IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2020*, no. 1, 2020, doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379872.
- [33] C. Collados-Rodriguez, M. Cheah-Mane, F. J. Cifuentes-Garcia, E. Prieto-Araujo, and O. Gomis-Bellmunt, “Grid-Following and Grid-Forming Converter Control Comparison under Fault Conditions,” *Proc. Energy Convers. Congr. Expo. - Asia, ECCE Asia 2021*, pp. 598–603, 2021, doi: 10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479326.
- [34] M. Liserre, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating fra-

- me,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 836–841, 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.875566.
- [35] M. Dokus and A. Mertens, “Sequence Impedance Characteristics of Grid-Feeding Converters,” 2020 IEEE 9th Int. Power Electron. Motion Control Conf. IPEMC 2020 ECCE Asia, pp. 1216–1223, 2020, doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367825.
- [36] M. Mirhosseini, J. Pou, B. Karanayil, and V. G. Agelidis, “Resonant Versus Conventional Controllers in Grid-Connected Photovoltaic Power Plants under Unbalanced Grid Voltages,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1124–1132, 2016, doi: 10.1109/TS TE.2016.2529679.
- [37] . Velasco, P. Mart´ı, A. Camacho, J. M. Rey, J. Miret, and M. Castilla, “Enabling Grid-Feeding Converters with a Dissonant-Resonant Controller for Negative-Sequence Voltage Elimination,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 4, pp. 4342–4352, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2938906.
- [38] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodr´ıguez, “Control of Power Converters in AC Microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.
- [39] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, “A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, Jul. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.900456.

- [40] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, 1993.
- [41] C. Buccella, C. Cecati, and H. Latafat, "Digital Control of Power Converters-A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol.8, no. 3, pp. 437-447, Aug. 2012, doi: 10.1109/TII.2012.2192280.
- [42] J. Miret, J. L. Garcí'a de Vicuna, R. Guzmán, A. Camacho, and M. Moradi Ghahderijani, "A Flexible Experimental Laboratory for Distributed Generation Networks Based on Power Inverters," *Energies*, vol.10, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2017, doi: 10.3390/en10101589.
- [43] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011, doi 10.1109/TIE.2010.2066534.
- [44] C. X. Rosero, P. Martí, M. Velasco, M. Castilla, J. Miret, and A. Camacho, "Consensus for active power sharing and frequency restoration in islanded microgrids subject to drifting clocks," in *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Jun. 2017, pp. 70-75, doi: 10.1109/ISIE.2017.8001225.
- [45] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONIC*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, Mar. 2017, doi:10.1109/TPEL.2016.2569597.

- [46] W. C. Duesterhoeft, M. W. Schulz, and E. Clarke, "Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 2, pp. 1248-1255, Jul. 1951, doi: 10.1109/TAIEE.1951.5060554.
- [47] B. Li, L. Zhou, X. Yu, C. Zheng, and J. Liu, "Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 462-470, 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0608>.
- [48] J. He and Y. R. Li, "Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 2525-2538, Jan. 2012, doi: 10.1109/TIA.2011.2168592.
- [49] J. Miret, J. L. García de Vicuña, R. Guzmán, A. Camacho, and M. Moradi Ghahderijani, "A Flexible Experimental Laboratory for Distributed Generation Networks Based on Power Inverters," *Energies*, vol. 10, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2017, doi: 10.3390/en10101589.
- [50] P. Martí, J. Torres-Martínez, C. X. Rosero, M. Velasco, J. Miret and M. Castilla, "Analysis of the Effect of Clock Drifts on Frequency Regulation and Power Sharing in Inverter-Based Islanded Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10363-10379, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2805368.
- [51] C. X. Rosero, M. Velasco, P. Martí, A. Camacho, J. Miret and M. Castilla, "Analysis of Consensus-Based Islanded Microgrids Subject to Unexpected Electrical and Communica-

tion Partitions,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 5, pp. 5125-5135, Sept. 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2877218.