



Modelamiento y simulación de una micro-red híbrida aislada de la red con capacidad de proporcionar respuesta primaria de frecuencia

Montes Silva, Bryan Alejandro y Tapia Pruna, Hernán Alejandro

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo. MSc. Ph.D.

01 de marzo del 2024

Latacunga



TESIS MONTES BRYAN - TAPIA HERNA...

Scan details

Scan time:
March 1th, 2024 at 0:56 UTC

Total Pages:
47

Total Words:
11726

Plagiarism Detection



6%

Types of plagiarism		Words
Identical	2.2%	259
Minor Changes	1.7%	204
Paraphrased	1.6%	182
Omitted Words	8%	940

AI Content Detection

N/A

Text coverage

- AI text
- Human text

Alerts: (1)

Cross Language: Same Document Language

Submitted language and cross-language text are the same language. No credits were used.

2/5 Severity



Plagiarism Results: (16)

Microsoft Word - Documentos JWG C6.C5.4 ABRIL 2021-UPDATE 1.6%

<http://www.cigrecolombia.org/documents/documentos-t%c3%a9cnicos/dt%20jwg%20c6.c5.4.%20regulaci%c3...>

Eduardo

Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa Join G...

211107164.pdf 1.5%

<https://core.ac.uk/download/pdf/211107164.pdf>

Pablo Pérez

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES Grado en Ingeniería Eléctrica DESCRIPCIÓN E INFRAESTRUCTURA DE UNA MICRORR...

Tesis.pdf?sequence=5 1.4%

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/repofi/17843/tesis.pdf?sequence=5>

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA Las microrredes energéticas en México, su impacto en el Sistema Eléctrico...

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo MSc. Ph.D.

C.C.: 1803225414



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación “**Modelamiento y simulación de una micro-red híbrida aislada de la red con capacidad de proporcionar respuesta primaria de frecuencia.**”. Fue realizado por los estudiantes **Montes Silva, Bryan Alejandro y Tapia Pruna, Hernán Alejandro**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 01 de marzo del 2024

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Diego Edmundo Ortiz Villalba', is written over a horizontal line.

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo MSc Ph.D.

C.C.: 1803225414



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Montes Silva, Bryan Alejandro y Tapia Pruna, Hernán Alejandro**, con cédulas de ciudadanía n° 0605519578 y n° 0503795213 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Modelamiento y simulación de una micro-red híbrida aislada de la red con capacidad de proporcionar respuesta primaria de frecuencia”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 01 de marzo del 2024

Montes Silva, Bryan Alejandro

C.C.: 0605519578

Tapia Pruna, Hernán Alejandro

C.C.:0503795213



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Montes Silva, Bryan Alejandro y Tapia Pruna, Hernán Alejandro**, con cédulas de ciudadanía n° 0605519578 y n° 0503795213, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Modelamiento y simulación de una micro-red híbrida aislada de la red con capacidad de proporcionar respuesta primaria de frecuencia**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 01 de marzo del 2024

Montes Silva, Bryan Alejandro

C.C.: 0605519578

Tapia Pruna, Hernán Alejandro

C.C.:0503795213

Dedicatoria

Este presente trabajo de titulación está dedicado:

A mis padres ya que el esfuerzo y las metas alcanzadas refleja la dedicación y amor que le brindan a mi hermana y a mí.

A mi hermana quien con su cariño y paciencia me hace comprender que siempre vamos a estar para apoyarnos.

A Darek por ser un pilar fundamental en este proceso de titulación y una motivación para seguir superándome día a día.

A mi familia que siempre se preocupa por mi bienestar y en especial a mi enamorada Stefi que siempre me brinda su amor incondicional.

Bryan Alejandro Montes

Dedicatoria

Este trabajo de titulación está dedicado:

A mis padres que me brindan su esfuerzo y apoyo a mi hermano y a mí para seguir adelante en el cumplimiento de nuestras metas.

A mi hermano que siempre ha estado ahí para apoyarme con sus consejos y su amor incondicional.

A toda mi familia que me ha acompañado en cada paso, su apoyo incondicional y sus consejos que siempre me han guiado por el camino correcto.

A mi enamorada que ha estado en cada momento apoyándome y por su amor incondicional.

Hernán Alejandro Tapia

Agradecimiento

Agradezco:

A mi madre María Elena Silva y mi padre José Luis Montes que con sus consejos, trabajo y principios que me inculcaron, me ayudaron a culminar esta etapa universitaria, A Abi que siempre estuvo al pendiente de mí a pesar de la distancia que mantuvimos durante mi período académico.

A Stefi mi enamorada por estar presente en todo mi proceso de titulación con su apoyo incondicional, consejos y ayuda cuando más lo necesite, y también agradezco a mi hijo Darek, quien fue un pilar fundamental para cumplir con mi objetivo de graduarme.

A mis compañeros de aula, Henry Jami, Kevin Rea, Alejandro Romero, Bryan Pinto, Hernán Tapia, Angie Cedeño, Ludwig Martínez, etc. Que fueron un pilar fundamental para cumplir esta meta creando excelentes recuerdos durante toda mi vida universitaria. A los docentes que fueron partícipes fundamentales en mi proceso de formación profesional, pero en especial agradezco al Dr. Diego Ortiz por toda la paciencia que nos tuvo a lo largo de este proceso, con sus consejos y conocimientos compartidos.

Bryan Alejandro Montes

Agradecimiento

Agradezco:

A mis padres María y Ernesto que me guiaron siempre por el buen camino, los consejos, y los principios que cultivaron en mí, porque gracias a su constante apoyo pude cumplir esta meta. A mi hermano que siempre estuvo pendiente de mí, que a pesar de las dificultades siempre estaba ahí durante todo el camino.

A mis compañeros y amigos que fueron partícipes de este camino y formaron parte de creando buenos recuerdos. A todos los docentes que formaron parte de mi formación estudiantil, en especial al Dr. Diego Ortiz que, gracias a sus consejos, paciencia, apoyo y sus conocimientos compartidos para desarrollar este trabajo.

A Bryan, por su ayuda y a pesar de tantas dificultades siempre estuvo ahí en el transcurso de todo este tiempo hasta cumplir nuestra meta.

Finalmente agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas por abrirme las puertas y brindarme los mejores años de mi vida, junto con buenas y malas experiencias que me ayudaron a crecer como persona.

Hernán Alejandro Tapia

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de Contenidos	10
Índice de figuras	14
Índice de tablas.....	15
Nomenclatura	16
Resumen	17
Abstract.....	18
Capítulo I: Problemática.....	19
Antecedentes.....	19
Justificación e importancia.....	22
Alcance del proyecto.....	23
Objetivos	24

<i>Objetivo general</i>	24
<i>Objetivos específicos</i>	24
Capítulo II: Estado del arte	25
Energía Solar	25
<i>Energía Solar Fotovoltaica</i>	25
<i>Paneles Solares</i>	25
Energía Eólica	26
Micro-redes	27
<i>Tipos de Micro-redes</i>	27
<i>Control de una micro-red</i>	28
<i>Operación de una micro-red</i>	29
<i>Convertidores Grid following and Grid forming</i>	30
<i>Infraestructura de las micro-redes</i>	31
<i>Desafíos de una micro-red</i>	32
<i>Control de frecuencia en micro-redes</i>	33
Regulador MPPT	34
<i>Algoritmo Perturb and Observe</i>	35
Inercia Sintética	36
<i>Diseño de control de inercia sintética</i>	37
Estudios relacionados	39
Capítulo III: Metodología	41

Modelamiento de la micro-red.....	41
<i>Modelamiento del sistema fotovoltaico.....</i>	<i>42</i>
<i>Modelado del sistema de generación eólica.....</i>	<i>45</i>
<i>Modelamiento de la red eléctrica.....</i>	<i>46</i>
Simulaciones en el dominio del tiempo	47
Análisis de resultados de la micro-red.....	48
Capítulo IV: Caso de estudio.....	49
Diseño de la planta fotovoltaica	50
Diseño de los convertidores CC/CC	51
<i>Diseño del convertidor Boost.....</i>	<i>51</i>
<i>Diseño del convertidor Buck</i>	<i>53</i>
Diseño del convertidor CC/CA fotovoltaico.....	55
Diseño de la planta eólica	60
Diseño del Inversor Trifásico de la planta fotovoltaica.....	61
Diseño del convertidor Flyback	62
Diseño del Inversor Trifásico de la Planta eólica.....	63
Diseño del Algoritmo MPPT modificado para control por derrateo	64
Escenarios de simulación.....	65
Capítulo V: Análisis de resultados	67
Simulaciones en la Planta de Generación Eólica.....	67
Simulaciones en la Planta de Generación Fotovoltaica.....	70

Derrateo en la Micro-red.....	72
<i>Voltaje y Frecuencia de la micro-red</i>	73
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	77
Conclusiones.....	77
Recomendaciones	79
Bibliografía	80
Anexos	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Infraestructura de una micro-red</i>	31
Figura 2 <i>Descripción del algoritmo MPPT</i>	36
Figura 3 <i>Estructura de control del modelo de inercia sintética</i>	38
Figura 4 <i>Diagrama metodológico</i>	41
Figura 5 <i>Convertidores CC/CC</i>	43
Figura 6 <i>Algoritmo P&O modificado</i>	44
Figura 7 <i>Convertor Flyback CC/CC</i>	46
Figura 8 <i>Topología de la micro-red aislada</i>	50
Figura 9 <i>Arreglo y modelo de panel solar elegido</i>	51
Figura 10 <i>Convertidor Boost</i>	52
Figura 11 <i>Convertidor Buck</i>	54
Figura 12 <i>Convertidor CC/CA fotovoltaico</i>	56
Figura 13 <i>Puente IGBT y diodos</i>	57
Figura 14 <i>Bloque de parámetros: puente universal</i>	58
Figura 15 <i>Muestreo Natural</i>	59
Figura 16 <i>Bloque de PWM de dos niveles</i>	60
Figura 17 <i>Convertidor por tiristores prácticos</i>	62
Figura 18 <i>Convertidor Flyback</i>	63
Figura 19 <i>Diagrama de bloques del algoritmo MPPT modificado</i>	65
Figura 20 <i>Derrateo en la Planta de Generación Eólica</i>	68
Figura 21 <i>Simulaciones de derrateo PV</i>	70
Figura 22 <i>Derrateo en la Micro-red</i>	72
Figura 23 <i>Frecuencia de la Micro-red</i>	74
Figura 24 <i>Voltaje en la Micro-red</i>	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Características del aerogenerador</i>	61
Tabla 2 <i>Escenarios de simulación de la micro-red</i>	65
Tabla 3 <i>Simulaciones de derrateo de la WP</i>	69
Tabla 4 <i>Simulaciones de derrateo de la Planta Fotovoltaica</i>	71
Tabla 5 <i>Derrateo en la Micro-red</i>	73

Nomenclatura

BESS: Sistema de almacenamiento de energía en baterías, *Battery Energy Storage*

System por sus siglas en inglés.

CA: Corriente Alterna.

CC: Corriente Continua.

CGT: Tecnologías de Generación Basadas en Convertidores, *Converter-based Generation*

Technologies por sus siglas en inglés.

FV: Fotovoltaica

GD: Generación Distribuida.

MG: Micro-redes, *Micro-grids* por sus siglas en inglés.

MPPT: Seguimiento del Punto de Máxima Potencia, *Maximum Power Point Tracker* por sus

siglas en inglés.

RoCoF: Tasa de cambio de frecuencia, *Rate of Change of Frequency* por sus siglas en inglés.

SoC: Estado de Carga, *State of Charge* por sus siglas en inglés.

WP: Energía eólica, *Wind Power* por sus siglas en inglés.

Resumen

Las tendencias contemporáneas de integrar fuentes de energía renovables para reemplazar los generadores convencionales permiten que las micro-redes satisfagan la demanda de energía. Sin embargo, las micro-redes aisladas enfrentan varios desafíos que aún deben resolverse, por ejemplo, problemas de desequilibrios de carga relacionados con la variabilidad y estocasticidad de los recursos naturales lo que conlleva a variaciones de frecuencia. Convencionalmente, las micro-redes aisladas cuentan con un BESS que mantiene la frecuencia en valores nominales determinados en los códigos de red. Sin embargo, su vida útil se reduce cuando ocurre una descarga profunda en el equipo BESS. Este trabajo de investigación propone utilizar generadores renovables como unidades generadoras de energía fotovoltaica y eólica para participar en la respuesta primaria de frecuencia, considerando un sistema de derrateo de potencia a nivel de convertidor, con lo cual se podría reducir el uso de equipos BESS durante las excursiones de frecuencia cuando ocurre un desequilibrio de potencia. Este trabajo de investigación evalúa el desempeño de una micro-red aislada cuando ocurre un desequilibrio de potencia desde la perspectiva de la estabilidad de frecuencia. Los resultados de la simulación muestran la contribución de los generadores renovables en la respuesta primaria de frecuencia considerando que el control de derrateo podría reducir la descarga profunda de los equipos BESS en la micro-red, extendiendo su vida útil.

Palabras Clave: Batería, Energías Renovables, Estabilidad de Frecuencia.

Abstract

The contemporary trends of integrating renewable energy sources to replace conventional generators allow micro-grids to meet energy demand. However, stand-alone micro-grids face several challenges that have yet to be solved, for example, load imbalance problems related to the variability and stochasticity of natural resources leading to frequency variations.

Conventionally, isolated micro-grids have a BESS that maintains the frequency at nominal values determined in the grid codes. Nevertheless, their lifespan is reduced when a deep discharge occurs in the BESS equipment. This research work proposes to use renewable generators such as photovoltaic and wind power generating units to participate in the primary frequency response, considering a power derating system at the converter level, which could reduce the use of BESS equipment during frequency excursions when a power imbalance occurs. This research work evaluates the performance of an isolated micro-grid when power imbalance occurs from a frequency stability perspective. Simulation results show the contribution of renewable generators in the primary frequency response considering that derating control could reduce the deep discharge of BESS equipment in the micro-grid, extending its lifespan.

Keywords: Battery, Renewable Energy, Frequency Stability.

Capítulo I

Problemática

Antecedentes

Las micro-redes son sistemas de distribución de electricidad que contienen cargas y recursos energéticos distribuidos (como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento o cargas controlables), que se pueden operar de manera controlada y coordinada, ya sea mientras están conectados a la red eléctrica principal o se encuentren en modo isla (CIGRE, 2020).

Actualmente, las micro-redes aisladas basadas en fuentes de energía renovables, como la generación eólica y fotovoltaica, han proporcionado suministro energético a lugares desconectados de la red, mejorando la calidad de vida de sus habitantes. Sin embargo, la integración de estas tecnologías y la transición gradual de la generación convencional a la generación basada en energías renovables ha presentado retos en términos de fiabilidad y estabilidad en las micro-redes aisladas (Sitompul, 2020).

Uno de los principales retos en la implementación de las tecnologías de generación basadas en convertidores (CGT) es su impacto en la estabilidad de la frecuencia, ya que la mayoría de las fuentes de generación distribuida utilizan convertidores de potencia que no contribuyen a mantener la estabilidad de la frecuencia en situaciones de contingencia. Además, en muchos casos, las CGT no responden adecuadamente a las variaciones de carga (Bianchi, 2019), (Ortiz-Villalba, 2020).

La integración de tecnologías de generación distribuida (GD) como la eólica y la solar plantea retos en el servicio energético. Los autores (Hossain, 2019) y (Gao, 2017), explican que las micro-redes pueden estar completamente aisladas de la red principal. Sin embargo, para

lograr un funcionamiento óptimo, es necesario abordar los problemas de la baja inercia, las fluctuaciones de voltaje y el equilibrio entre la generación y la demanda.

En este sentido, según (Gonzalez-Longatt, 2013) las micro-redes aisladas con GD, necesitan utilizar BESS para mitigar las interrupciones características de este tipo de fuentes de energía. Esto se debe a que los sistemas de almacenamiento de energía BESS tienen mejor respuesta que los generadores síncronos utilizados para satisfacer la demanda en ausencia de fuentes renovables o baterías.

Además, (Yang, 2018) señala que los equipos BESS no sólo ayudan a mitigar las fluctuaciones de frecuencia, sino que también mejoran la fiabilidad del sistema. También cumplen otras funciones, como equilibrar la generación y la demanda, así como mejorar el factor de potencia y la calidad del suministro eléctrico en sistemas eléctricos con una elevada inserción de generación distribuida (Gao, 2017).

Actualmente, existen dificultades asociadas a los CGT que afectan a las baterías (Reihani, 2018). La variabilidad y estocasticidad de los recursos renovables provocan fluctuaciones en el suministro de energía, lo que genera desequilibrios en el sistema eléctrico y la posibilidad de que no se cubra la demanda (Gao, 2017).

La forma en que se utilizan las baterías puede tener diferentes consecuencias en su rendimiento operativo. Factores de estrés como los ciclos parciales y los largos periodos de bajo estado de carga (SoC) pueden acelerar el envejecimiento de las baterías, provocando cambios en su estado físico y químico, comprometiendo su rendimiento y vida útil (Gonzalez-Longatt, 2013) (Wu, 7140- 7145).

En los sistemas de generación eléctrica, el objetivo es proporcionar estabilidad y fiabilidad reduciendo los desequilibrios que surgen debido a la conexión o desconexión de

cargas (Taczi, Enhancing power system frequency stability with synthetic inertia, 2017). En una micro-red aislada con generación distribuida, los equipos BESS desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la estabilidad del sistema, absorbiendo o suministrando energía para amortiguar las oscilaciones de frecuencia (Neto, 2020).

Para mejorar la estabilidad de frecuencia en micro-redes aisladas, se han propuesto diferentes métodos, como el uso de inercia sintética en fuentes de generación distribuida fotovoltaica y eólica.

En (Nguyen H. T., 2017) se aborda el uso de la inercia sintética con una estrategia de control cuyo objetivo es añadir algunos lazos de control adicionales, permitiendo que los parques eólicos basados en generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) funcionen de forma similar a los generadores convencionales, liberando la energía cinética almacenada en las masas giratorias de los aerogeneradores.

En (Vokony, 2017) se evaluaron los efectos de añadir inercia sintética a la generación eólica, y los resultados mostraron que la potencia adicional suministrada por el aerogenerador puede reducir sustancialmente el RoCoF (tasa de cambio de frecuencia), así como proporcionar más tiempo de respuesta a los reguladores de velocidad activos.

Esta investigación se centra en el modelado y simulación de una MG aislada formada por un Sistema Fotovoltaico y una Planta Eólica, que disponen de un algoritmo MPPT. Posteriormente, se modifica el algoritmo MPPT para que las unidades de generación realicen un derrateo, reduciendo la potencia inyectada por el CGT.

De esta forma, se pretende aportar a la inercia del sistema empleando paneles FV que no poseen partes móviles por lo que en forma natural no contribuyen a la inercia del sistema. De igual forma, realizar un aporte de potencia por parte de las unidades de generación eólica,

para poder responder a los desequilibrios entre oferta y demanda, realizando un control primario de frecuencia en la MG. Al provocar que las unidades de generación renovable participen de la regulación de frecuencia se podrían reducir los ciclos de utilización y degradación de los equipos BESS. Para el modelado de la micro-red se utiliza el software Matlab, en donde se realizan simulaciones en el dominio del tiempo para evaluar el desempeño de los controladores de la micro-red aislada.

Justificación e importancia

En respuesta al desarrollo sostenible, cada vez más generadores síncronos convencionales basados en combustibles fósiles están siendo reemplazados por fuentes de energía renovable para la producción de electricidad en sistemas de energía modernos (Robin Preece, 2017), siendo uno de los principales problemas de integración, la estabilidad del sistema eléctrico con alta penetración de generación no sincrónica, debido a que ocasionan una reducción de la inercia del sistema que podría conducir a un mayor RoCoF ante desequilibrios de carga.

Debido a que la estructura del sistema eléctrico está cambiando de centrales eléctricas convencionales a una generación de energía descentralizada y de bajas emisiones basada en fuentes de energía renovables como turbinas eólicas o unidades fotovoltaicas (Abu-elzait, 2019). Las centrales renovables (eólica y fotovoltaica), a diferencia de las centrales convencionales se acoplan a través de convertidores a la red de CA lo que provoca que no contribuyan a la respuesta inercial del sistema (Taczi, Enhancing Power System Frequency Stability with Synthetic Inertia, 2017).

En este trabajo de investigación se propone una metodología que permita obtener un modelo de micro-red híbrida en donde se trabaje con una planta FV y una planta WP que incluyan un algoritmo de control por derrateo, con el fin de lograr una rápida respuesta ante la

variación de frecuencia en la micro-red y así afrontar los desequilibrios existentes entre generación-demanda, obteniendo un control primario de frecuencia en micro-redes, con lo cual se podría reducir el degradamiento de los BESS y alargar su vida útil al no someterlos a grandes profundidades de descarga.

Alcance del proyecto

El presente trabajo de investigación tiene como propósito demostrar el uso del derrateo en convertidores en GD, como plantas fotovoltaicas y eólicas, puede ser utilizado como estrategia de control para que las unidades de generación renovables (FV y WT) puedan participar de la regulación primaria de frecuencia ante variaciones entre generación-demanda, logrando así mantener la confiabilidad y estabilidad de una micro-red aislada.

La metodología propuesta está compuesta de cinco etapas: modelamiento de la planta fotovoltaica, modelamiento de la planta eólica, modelamiento de la red eléctrica, simulaciones en el dominio del tiempo, análisis de resultados.

El modelamiento de la planta fotovoltaica se realiza con la selección del arreglo de paneles necesario, los convertidores CC-CC y CC-CA para luego aplicar un algoritmo MPPT modificado para realizar el control por derrateo. El modelamiento de la planta eólica se realiza con la selección de la turbina, los convertidores y el algoritmo MPPT modificado, al igual que en la FV. El modelamiento de la micro-red se realiza uniendo las plantas de generación conectadas a una carga trifásica.

En las simulaciones en el dominio del tiempo se realiza la simulación de la MG conectada a una carga trifásica, se definen escenarios en donde se tendrá un porcentaje de variación de carga y se medirá el desempeño de los convertidores con derrateo para mantener el equilibrio de la red. El análisis de resultados ayuda a obtener los datos y verificar la viabilidad del control por derrateo en los CGT.

Este modelo servirá para medir el desempeño de los convertidores de potencia aplicando el control por derrateo para dar respuesta primaria de frecuencia al sistema y ayudar en esta tarea a los BESS, abriendo la posibilidad de la reducción de su desgaste y aumentando en su vida útil.

Objetivos

Objetivo general

Modelar una micro-red aislada conformada por un sistema fotovoltaico, y una granja eólica que posee un sistema MPPT modificado con un control por derrateo para contribuir al control primario de frecuencia, con la posibilidad de minimizar la degradación de los equipos BESS.

Objetivos específicos

- Modelar un sistema fotovoltaico con un regulador MPPT para la obtención de su máxima potencia
- Modelar un sistema eólico con un sistema de control por derrateo con el propósito de participar en la regulación primaria de frecuencia.
- Validar el modelo de la planta fotovoltaica y de la turbina eólica ante condiciones de desequilibrio.
- Realizar simulaciones en el dominio del tiempo para validar los algoritmos de control implementados y verificar que participan de la respuesta primaria de frecuencia.

Capítulo II

Estado del arte

Energía Solar

Energía Solar Fotovoltaica

En la actualidad los paneles fotovoltaicos se han visto como una solución óptima para la generación de energía, ya que utilizan un recurso natural infinito y necesitan menos mantenimiento, sin embargo en condiciones ambientales cambiantes se genera menos potencia de salida, una condición ambiental importante es el cambio de temperatura del sistema ya que al aumentar la temperatura en los módulos solares, se produce una gran disminución en el voltaje y un pequeño aumento en la corriente, a diferencia de una disminución de temperatura en donde aumenta el voltaje y ocurre una pequeña disminución en la corriente.

Paneles Solares

Las instalaciones solares fotovoltaicas se pueden combinar para proporcionar electricidad a escala comercial, o disponerse en configuraciones más pequeñas para mini redes o uso personal (IRENA, 2020). Al usar energía solar fotovoltaica para alimentar mini redes se considera una excelente manera de brindar acceso a la electricidad a personas que se encuentran fuera del servicio eléctrico urbano, particularmente en países en desarrollo con excelentes recursos de energía solar.

Un panel solar se encuentra formado de un conjunto de células fotovoltaicas por lo que la célula fotovoltaica comúnmente conocida como la célula solar convierte la energía luminosa del sol en energía eléctrica a través de un proceso físico químico.

Aproximadamente una célula solar produce un voltaje máximo de circuito abierto de 0.5 a 0.7 V. Prácticamente la eficiencia de una célula fotovoltaica es muy baja debido a muchos aspectos, entre los cuales el más destacado es la ausencia de luz solar directa que golpea el panel solar.

La celda PV proporciona una salida de CC que puede almacenarse en una batería, preferiblemente una batería de polímero de litio y puede usarse para alimentar electrodomésticos. El resto se puede almacenar en UPS solar para uso futuro o alimentar otros dispositivos de CA. Además, el UPS solar ayuda a convertir la casa del sistema solar híbrido al sistema fuera de la red.

Para la máxima efectividad de la célula solar es necesario que el panel solar permanezca perpendicular al sol para que el panel solar reciba la máxima intensidad de luz, esto se debe tener en cuenta ya que el sol tiene diferentes posiciones durante el día y hace que la intensidad solar sea variable, dando como una gran desventaja que la eficiencia de la célula fotovoltaica disminuya.

Energía Eólica

La energía eólica se produce utilizando generadores eólicos (turbinas eólicas) para aprovechar la energía cinética del viento. Esta forma de energía está ganando popularidad mundial como una fuente de energía viril porque representa una fuente inagotable de energía renovable y no causa contaminación. Sin embargo, la energía eólica todavía solo proporciona menos del uno por ciento del consumo de energía global. El viento se ha utilizado como fuente de generación de energía durante décadas convirtiéndose en una de las formas de energías más antiguas renovables (Castruonova & Lopez, 2004).

En una granja de generación eólica se tiene rotores en donde se almacena inercia que luego puede utilizarse en el sistema cuando existe algún desequilibrio entre carga y generación

lo cual produzca una variación de frecuencia y mediante la inercia almacenada en los rotores se pueda hacer un control primario de frecuencia deteniendo la desviación y creando un nuevo punto de operación. De esta manera se tendría a la planta de generación eólica sin trabajar a su máxima capacidad y tener reservas que se puedan ocupar para un control de frecuencia (Nguyen H. T., 2017).

Una de las mayores preocupaciones con respecto a la penetración de parques eólicos a gran escala en el sistema de energía es su impacto en la estabilidad de frecuencia del sistema de energía debido a la falta de respuesta de frecuencia positiva a las excursiones de frecuencia, es decir, grandes fluctuaciones de carga o disparos del generador. Según (Nguyen H. T., 2017) la inercia aportada por los generadores eólicos puede mejorar la capacidad de adopción de la red para un parque eólico y promover aún más su desarrollo sostenible.

Micro-redes

En la actualidad las micro-redes son un tema de alto interés debido a su potencial para lograr una infraestructura eléctrica confiable. El enfoque de los estudios incluye ser un medio de contingencia durante eventos catastróficos, debido a la habilidad de una MD para ser funcional tanto conectada a la red principal como en forma de isla independiente con sus propias fuentes de energía limpia de generación distribuida (Sturario, Silvestri, & Conti, 2016).

En una micro-red inteligente, cada carga y generador deberá poder ser controlado, por tanto, cada actor de la red deberá participar activamente en un ambiente desregulado donde los usuarios finales puedan participar en el comercio de la energía, recibiendo y entregando energía según su necesidad. (Arboleya, 2015)

Tipos de Micro-redes

Micro-red aislada: Las micro-redes que se aíslan de la red deben continuamente buscar el balance entre la generación y la demanda, por ello los sistemas de adquisición de

información son muy importantes para una operación óptima. En experiencias desarrolladas en Europa y Japón, se ha determinado que este equilibrio puede mantenerse con un error menor al 3% durante el 99% del tiempo por ello la gestión activa de la demanda es un punto muy importante en la operación desconectada sobre todo si la capacidad de almacenamiento o la energía disponible de las fuentes no gestionables no es notablemente grande (Pérez, 2017).

La instalación debe ser capaz de suplir la demanda eléctrica y ser suficientemente robusta como para afrontar las averías y períodos de mantenimiento de manera autónoma.

Micro-red conectada a la red: La micro-red procura abastecer la mayor cantidad de la demanda, gestionar la carga/descarga de los sistemas de almacenamiento, de manera que la red funcione como un nodo slack (nodo de balance), absorbiendo o entregando las diferencias de energía. Además, el punto de conexión provee una referencia de voltaje y frecuencia que ayuda a mantener estos parámetros también en la micro-red (Pérez, 2017).

En esta situación no es necesario que toda la energía demandada por las cargas sea producida por los generadores de la micro-red ya que el desfase entre generación y consumo será cubierto por la energía que fluye a través del punto de conexión.

Micro-red con autoconsumo: En estas instalaciones, el particular posee de medios de generación distribuida, normalmente paneles fotovoltaicos o turbinas eólicas que usa para suplir una parte de su demanda eléctrica. Aquella porción que no haya sido cubierta se satisface por medio de la conexión a la red eléctrica general.

Control de una micro-red

En la literatura, la técnica de control más popular utilizada en micro-redes aisladas es el control Droop. Consiste en ajustar la frecuencia de los inversores en función de la potencia activa de salida para lograr el reparto de potencia.

Cuando se utilizan sistemas de control jerárquico multicapa, este método se define dentro de los controladores locales primarios. Aunque esta técnica funciona bien cuando se tiene generadores totalmente despachables, como sistemas de suministro de energía ininterrumpida o unidades integradas de almacenamiento de energía, sin embargo, cuando se combina fuentes de energía renovable (RES) como energía fotovoltaica (PV) o granjas eólicas (WPPT), el despacho se limita al seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y no tiene sentido obtener un intercambio de corriente igual entre RES y ESS.

Operación de una micro-red

Las versiones más tradicionales de micro-redes se empezaron a usar para suministrar energía eléctrica a las zonas rurales más remotas del planeta, especialmente en regiones de África y Asia. Estas instalaciones integraban generadores diésel y baterías para suministrar a pequeñas aldeas. Un ejemplo es el estudio realizado entre 2013 y 2014 por investigadores de la Universidad de Malaya donde se contempla la posibilidad de abastecer aldeas de en torno a 20 viviendas en tres regiones distintas de Irán. El estudio fue realizado utilizando el método de optimización MOPSO (Multi Objective Particle Swarm Optimizers) y demostró que la implantación de los sistemas híbridos de micro-redes es una buena alternativa para favorecer el uso de energía eléctrica en países en vías de desarrollo con condiciones climáticas similares a Irán.

La micro-red se puede operar de dos maneras: interconectada a la red de distribución o en modo isla. Según (Jianqing, 2017) son capaces de optimizar la asociación de diferentes GD y cargas según los requisitos de operación.

La estabilidad en micro-redes aisladas es de gran importancia ya que se busca un comportamiento coordinado entre las DG y BESS, en donde se tiene una combinación de varias fuentes de energía en donde se ayuda a mantener el funcionamiento de la micro-red

relativamente estable asegurando la disponibilidad de energía eléctrica cuando las condiciones ambientales varían o existe una fuerte demanda de consumidores.

Convertidores Grid following and Grid forming

Las micro-redes permiten coordinar múltiples recursos operando en modo aislado o en modo interconectado. Para lograr altos estándares de eficiencia y confiabilidad se debe usar dos elementos tecnológicos clave: los convertidores tipo formadores de red (Grid forming) y los seguidores de red (Grid following). (COLOMBIA, 2021)

- **Convertidores formadores de red**

Elementos distribuidos como paneles solares y sistemas de almacenamiento de energía requieren de un convertidor de potencia que cumple varias funciones:

- Primero, transformar las variables DC en corrientes y voltajes AC
- Segundo, controlar el recurso primario, por ejemplo, la carga y descarga de la batería o extraer máxima potencia de los paneles solares
- Tercero, sincronizarse con el sistema trifásico. (COLOMBIA, 2021)

Una de las acciones más importantes que pueden cumplir estos convertidores es estabilizar el sistema, especialmente cuando la micro-red pasa a modo isla.

Los convertidores formadores de red pueden generar un control primario local, emulando la estructura de control primario de frecuencia en sistemas de potencia. (COLOMBIA, 2021)

- **Seguidores de red**

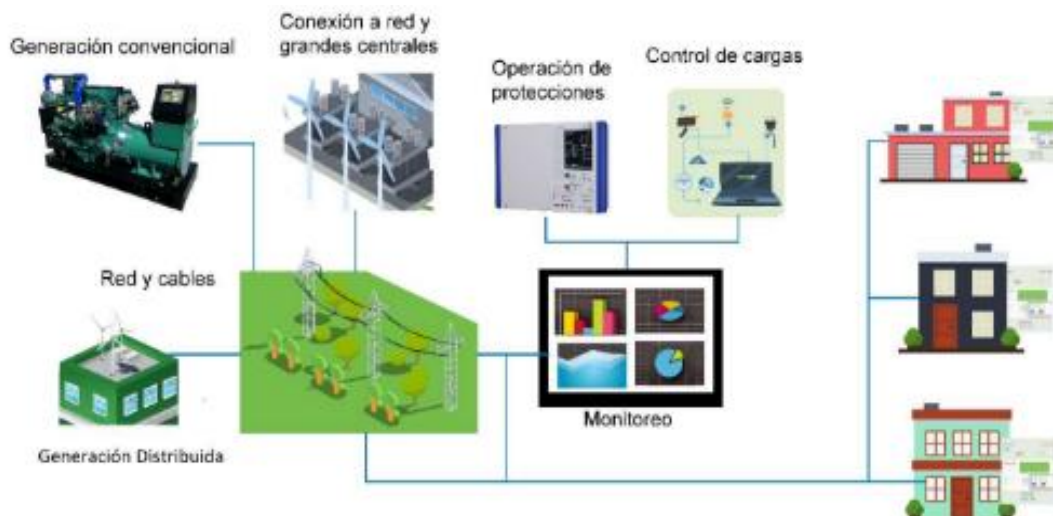
Se sincronizan a la frecuencia dada por la red principal. Como consecuencia de lo anterior, una micro-red no puede operar en isla a menos que cuente con uno o varios convertidores formadores de red.

Infraestructura de las micro-redes

Una micro-red posee varios componentes que permiten su funcionamiento autónomo o acoplado a una red eléctrica. Se la divide en elementos de generación de pequeña potencia que pueden ser sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, pequeñas centrales hidráulicas, así también generadores térmicos no renovables, en donde los generadores renovables contarán con sistemas de acoplamiento a la red por ejemplo inversores trifásicos y reguladores (Falahati & Fu, 2012).

Figura 1

Infraestructura de una micro-red



Nota. En la figura se indica la infraestructura de una micro-red. Tomada de Falahati, B., & Fu, Y. (2012). *IEEE Trans Smart Grid*. (p.1515-1524)

Un punto importante por considerar como parte de la infraestructura de una micro-red son medios de almacenamiento de la energía inmediatos, de tal forma que, en ausencia de generación, la mayor cantidad de cargas puedan continuar siendo alimentadas. El almacenamiento normalmente es una combinación de bancos de baterías y super capacitores.

Se debe contar con elementos electrónicos que permitan el acoplamiento a la red eléctrica en un punto de acoplamiento común (PCC) o la desconexión según se requiera. El elemento de este acoplamiento es un transformador elevador de voltaje con sus respectivas protecciones correctamente dimensionadas.

A ello se le debe añadir la necesidad de un sistema complejo de monitoreo y control que permita mantener la estabilidad del sistema y asegurarse que se satisface a la demanda en cada instante de tiempo; por tanto, se deben monitorear todos los elementos de la micro-red, considerando parámetros adecuados para cada tipo de elemento, incluyendo el nivel de carga de las baterías.

Desafíos de una micro-red

A continuación, se detalla los diferentes desafíos que se presenta

- Estocacidad en los recursos.
- Cambio de modo isla a conectada a la red.
- Cambio de baterías.
- Estabilidad de la micro-red.
- Calidad de la energía.
- Control de la micro-red.
- Políticas y marcos regulatorios.
- Generación renovable como la eólica y solar conectada por convertidores

de potencia, que por lo general trabajan en MPPT. Tienen un bajo o nulo aporte de inercia en el sistema ante desbalances entre generación-demanda.

Control de frecuencia en micro-redes

Control primario de frecuencia en micro-redes

Para mejorar los problemas económicos y ambientales conocidos con las micro-redes basadas en diésel, especialmente en micro-redes remotas, los sistemas híbridos se pueden utilizar como una alternativa rentable que combine la generación de diésel convencional con fuentes de energía renovable (RES). Esta combinación de suministro de energía ofrece una opción más limpia para aumentar la seguridad energética, reducir el consumo de diésel y reducir los precios de la electricidad. Sin embargo, mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda en una micro-red híbrida es un desafío debido a la naturaleza variable de las FER.

Como resultado, el sistema opera bajo desequilibrios de potencia continuos que, si no se compensan, pueden provocar grandes desviaciones de frecuencia. En consecuencia, entre los principales desafíos de la integración de las fuentes de energía renovable, se encuentra la necesidad de mecanismos de control de frecuencia con mayor flexibilidad basados en tecnologías de almacenamiento de energía para contrarrestar el estrés causado por las fuentes de energía renovable, en lugar de obligar a los costosos grupos electrógenos diésel a responder rápidamente para mantener la estabilidad de la frecuencia (Cieslak & Grunwald, *Modelling Synthetic Inertia of Wind Turbines for Dynamic Power System Stability Studies*, 2019).

Una posibilidad para aliviar la variabilidad de las fuentes de energía renovable y proporcionar reservas de frecuencia es realizar ajustes estratégicos en la demanda de energía, lo que se conoce como respuesta a la demanda. Mediante el uso de cargas controlables termostáticamente, mediante una estrategia de DR, se pueden proporcionar muchos servicios de soporte de red. Estos tipos de cargas, es decir, calentadores de agua eléctricos, acondicionadores de aire, bombas de calor de fuente terrestre calentadores eléctricos de espacio, refrigeradores y congeladores, mientras brindan servicios térmicos, tienen inercias

térmicas desacoplamiento instantáneo de la carga térmica de su consumo eléctrico sin comprometer la comodidad de los usuarios finales (Cieslak & Grunwald, Modelling Synthetic Inertia of Wind Turbines for Dynamic Power System Stability Studies, 2019).

Regulador MPPT

Un rastreador de punto de máxima potencia es un eficiente convertidor de CC a CC que se utiliza como una carga eléctrica óptima para una celda fotovoltaica (PV) y proporciona potencia, voltaje o nivel de corriente correspondiente al nivel de carga que se ha hecho para conducir (Sahay, 2018), el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia rastrea la máxima potencia y controla el pulso de activación del circuito convertidor.

El controlador MPPT obliga al módulo fotovoltaico a operar a voltajes cercanos al punto de máxima potencia (MPP) para obtener la máxima potencia disponible (Sahay, 2018). Las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) tienen muchas aplicaciones en las que el módulo fotovoltaico es la fuente de energía.

Algunas técnicas comunes para MPPT son Perturb and Observe (método de escalada en pendientes), método de conductancia incremental, corriente difusa de cortocircuito, control difuso, voltaje de circuito abierto fraccional, control de red neuronal (Sahay, 2018).

De las cuales la más utilizada es la Perturb and Observe que se usa más comúnmente porque su implementación es simple, menor tiempo para rastrear el MPP y razones económicas. Esta técnica del MPPT tiene ciertas restricciones ya que funciona con ciertas condiciones climáticas como es la irradiancia y el MPP cambia continuamente.

Es por eso que conocer el método de conductancia incremental será de gran ayuda ya que él mismo toma medidas de voltaje y de corriente para calcular el MPP dando una mayor eficiencia al sistema, pero su alto costo y su alta complejidad hace que sea una técnica

descartable, pero que se la debe tener muy en cuenta para la implementación del algoritmo del MPPT.

Algoritmo Perturb and Observe

Consiste en monitorear la potencia de entrada del MPPT y, ante perturbaciones que originan cambios en dicha potencia, se observa si la misma aumentó o disminuyó con respecto a la potencia anterior de entrada (Murdoch, 2013).

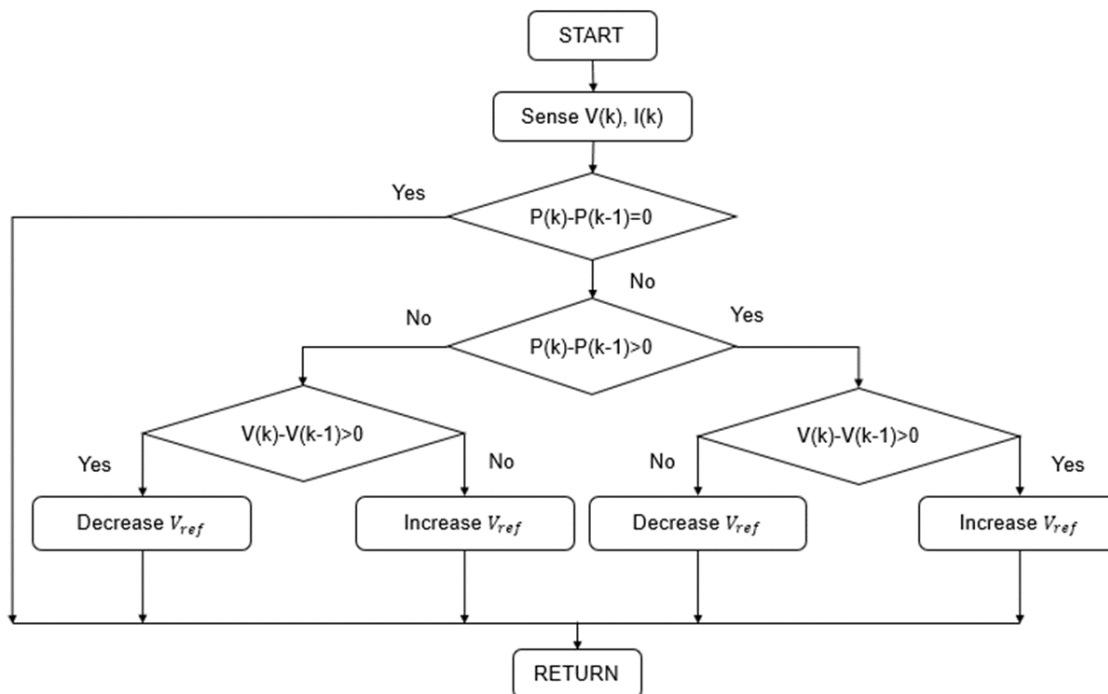
En el método, los valores instantáneos de voltaje y corriente en el módulo fotovoltaico $V_{pn}(n)$, $I_{pn}(n)$, se utilizan para medir la potencia seguida por la ecuación:

$$P_{pv}(n) = V_{pn}(n) * I_{pn}(n) \quad (\text{Ec. 1})$$

En la figura 2 se puede observar una descripción del algoritmo MPPT la misma que es obtenida de (Murdoch, 2013) en la cual se detalla los pasos que debe seguir el algoritmo MPPT en base a condiciones establecidas del sistema.

Figura 2

Descripción del algoritmo MPPT



Nota. En la figura se indica la descripción del algoritmo MPPT. Tomada de Murdoch. Diseño e implementación de un circuito MPPT para un circuito Solar UAV (2013) IEEE Latin American Vol.11

Inercia Sintética

La producción “sin inercia” e intermitente de generadores renovables ha aumentado significativamente en los últimos años. Basándose en interfaces de convertidores electrónicos, los generadores intermitentes, como dispositivos fotovoltaicos o molinos de viento, están conectados y gestionados por un sistema de control inteligente. Cuando el sistema de control inteligente también gestiona consumidores locales y dispositivos de almacenamiento de

energía, el sistema constituye una micro-red (Cieslak & Grunwald, Modelling Synthetic Inertia of Wind Turbines for Dynamic Power System Stability Studies, 2019).

Estos modernos generadores de energía son altamente eficientes, confiables, modulares, ecológicos, silenciosos y controlados con alta precisión. Debido a esto, serán un competidor importante en los futuros mercados de energía. Sin embargo, es posible que un mayor predominio de este tipo de generadores pueda tener un impacto negativo en la estabilidad de la red de distribución ya que durante una perturbación de la frecuencia del sistema, se pierde el equilibrio de potencia de generación/demanda, y las unidades de nueva generación basadas en convertidores de potencia crean un efecto de desacoplamiento de la inercia real y la red de CA (Cieslak & Grunwald, Modelling Synthetic Inertia of Wind Turbines for Dynamic Power System Stability Studies, 2019).

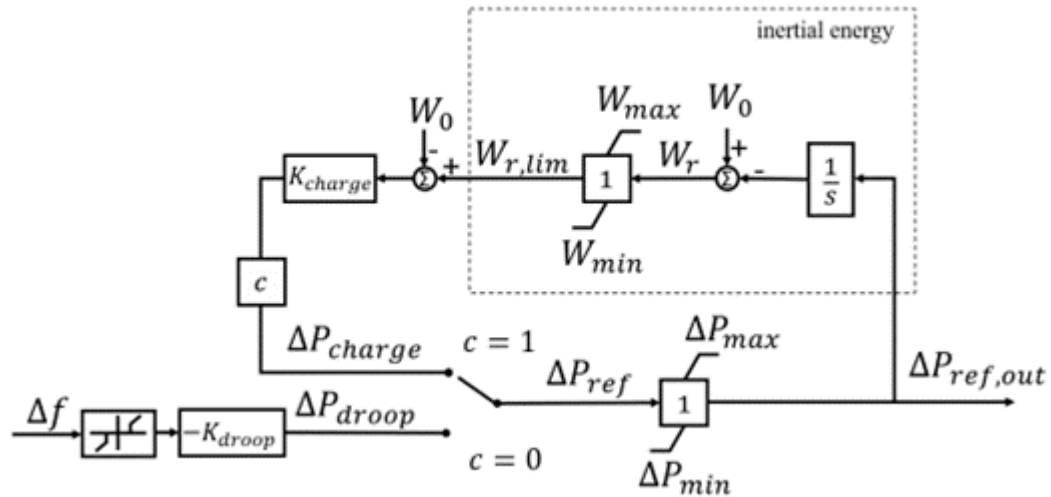
El resultado son excursiones de frecuencia más profundas de las perturbaciones del sistema. La respuesta inercial del sistema podría verse afectada negativamente con consecuencias devastadoras para la seguridad y confiabilidad del sistema.

Diseño de control de inercia sintética

El principio del control de inercia sintética es emular el comportamiento de respuesta inercial de un generador síncrono acoplado directamente en caso de desviación de frecuencia del sistema. Por tanto, se propone la estructura de control que se muestra en la Fig. 3.

Figura 3

Estructura de control del modelo de inercia sintética



La frecuencia en el bus de acoplamiento se supervisa constantemente. Si la desviación de frecuencia Δf excede una banda muerta predefinida DB después de una perturbación de frecuencia inicial, la inercia resultante El valor de respuesta ΔP_{Droop} se calcula mediante:

$$\Delta P_{Droop} = \Delta f * k_{Droop} \quad (Ec. 2)$$

Donde:

ΔP_{Droop} = Desviación de potencia de referencia

Δf = Desviación de frecuencia

Inicialmente, el indicador de carga “c” se establece en cero y, por lo tanto, la desviación de potencia de referencia ΔP_{ref} es igual a ΔP_{Droop} . La desviación de la potencia de referencia está limitada dependiendo de la potencia nominal de la turbina eólica, las limitaciones del inversor y la energía inercial limitada restante W_{rlim} . La desviación de potencia de referencia

final $\Delta P_{ref,out}$ sirve como entrada para el control externo del inversor, pero también determina el cambio en la energía inercial de la turbina eólica. La energía inercial restante W_r está dada por:

$$W_r = W_o - \frac{1}{s} * \Delta P_{ref,out} \quad (Ec. 3)$$

con la energía inercial inicial W_o se puede dimensionar en función de la información disponible. Si no se proporciona información detallada, para una turbina eólica con alimentación de potencia activa inicial P_{ref} , W_o se puede establecer en:

$$W_o = P_{SI} * T_{SI} * P_{ref} \quad (Ec. 4)$$

Bajo el supuesto de que la turbina eólica puede proporcionar alimentación activa adicional P_{SI} [pu] durante el tiempo T_{SI} [s]. El límite W_{max} se establece para proteger la turbina eólica de un estrés mecánico extremo, mientras que W_{min} garantiza una velocidad mínima de la turbina eólica para evitar una pérdida aerodinámica.

El modelo propuesto satisface todos los requisitos mencionados anteriormente para el modelado de inercia sintética para análisis de estabilidad de sistemas eléctricos y es aplicable tanto para estudios de sub frecuencia como de sobre frecuencia.

Estudios relacionados

- a. *Mejora de la estabilidad de frecuencia en sistemas de energía de baja inercia utilizando inercia sintética de turbinas eólicas*

Este documento tiene como objetivo mejorar la estabilidad de frecuencia en sistemas de energía de baja inercia mediante el uso de inercia sintética de turbinas eólicas basadas en un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG). El modelo de prueba se elige para ser un sistema de energía conectado por un parque eólico integrado basado en DFIG. Después de

la modificación y validación, el modelo de prueba elegido se aplica para simular el modelo de sistema equivalente de GB. (Quence Gao, 2017)

b. *Control de frecuencia primaria en micro-redes aisladas usando cargas termostáticamente controlables.*

Este artículo presenta modelos termoeléctricos dinámicos novedosos, computacionalmente eficientes y adecuados de acondicionadores de aire y bombas de calor de fuente terrestre, junto con un modelo existente de calentadores de agua eléctricos, para adaptar y mejorar una estrategia de respuesta a la demanda descentralizada para el control de carga directa (DLC) para la regulación de frecuencia micro-redes aisladas. Se presentan diferentes estudios de casos para una micro-red real para analizar y comparar la respuesta de frecuencia del sistema y determinar la idoneidad del enfoque y los modelos propuestos, demostrando su efectividad para la provisión de control de frecuencia primaria para facilitar mayores penetraciones de RES. (Mendieta & Canizares, 2020)

c. *Modelado de inercia sintética de turbinas eólicas para estudios de estabilidad de sistemas de energía dinámica*

Este artículo presenta un enfoque de modelado para la inercia sintética de turbinas eólicas para simulaciones RMS en el dominio del tiempo. El modelo combina el control de caída con un modelo de almacenamiento de energía inercial. Se muestra que el modelo representa adecuadamente la capacidad limitada de sobreproducción y los períodos de recuperación en escenarios de sub frecuencia y sobre frecuencia. Las diferentes configuraciones del modelo propuesto permiten la investigación de varios esquemas de activación de inercia sintética a nivel del sistema. (Cieslak & Grunwald, c. Modelado de inercia sintética de turbinas eólicas para estudios de estabilidad de sistemas de energía dinámica, 2019)

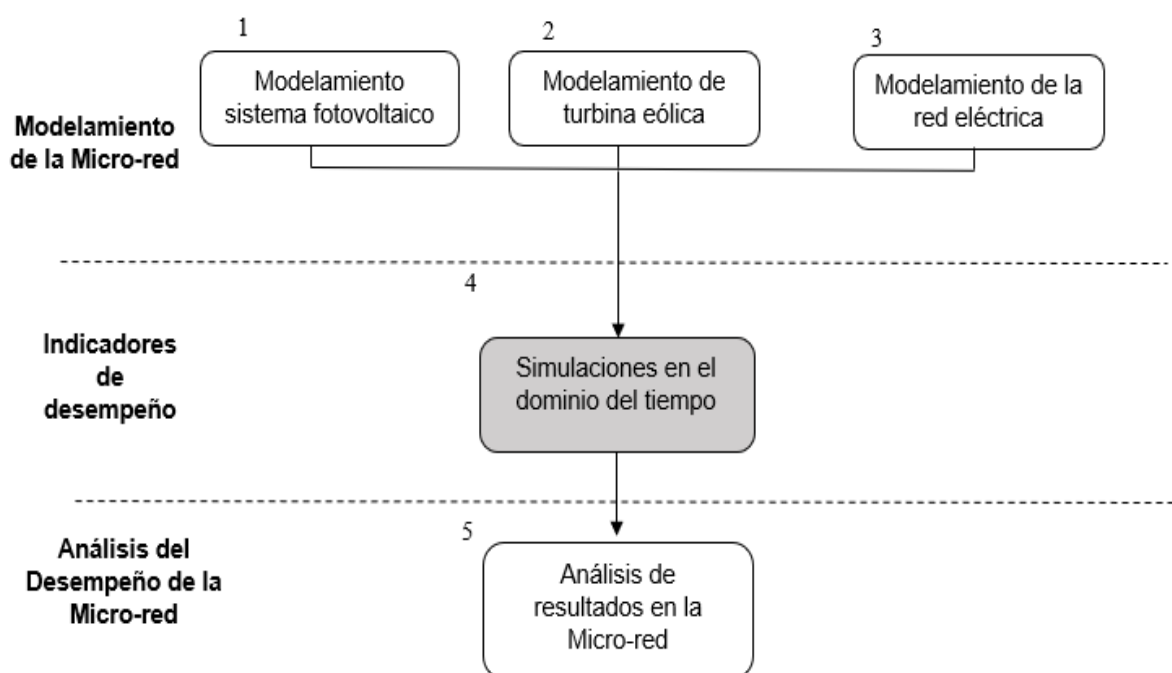
Capítulo III

Metodología

El marco metodológico propuesto tiene como objetivo la planificación óptima de MG en zonas aisladas y consta de cinco pasos principales, que se detallan a continuación en la figura 4.

Figura 4

Diagrama metodológico



Nota. En la figura mostrada se puede observar la metodología de la investigación. Se dan a conocer las etapas y subetapas de la metodología.

Modelamiento de la micro-red

En la primera etapa se realiza el modelamiento de las plantas de generación que se ocupan en la micro-red aislada, con sus respectivos convertidores de potencia. Se realiza el

arreglo de los paneles solares y se selecciona la turbina eólica para luego realizar el modelamiento de la red eléctrica.

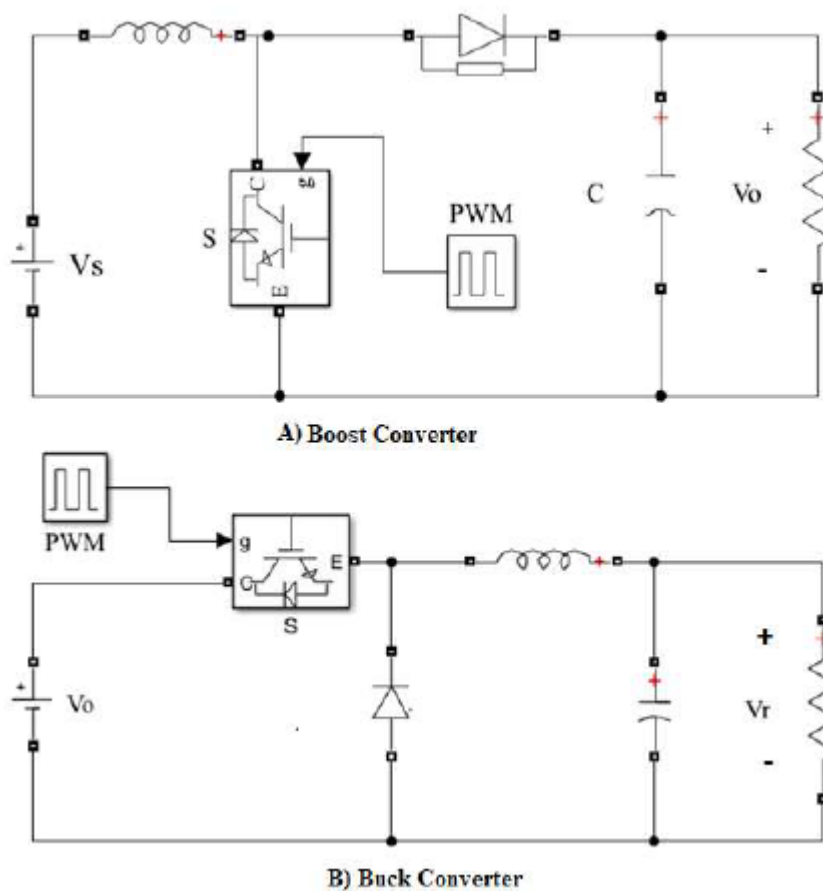
Modelamiento del sistema fotovoltaico

En esta etapa se modela la planta de generación de energía fotovoltaica considerando un arreglo de paneles solares para obtener la potencia deseada, de los que se obtiene la señal de voltaje que sirve como entrada para los convertidores CC/CC.

Luego, se diseñó un convertidor Boost (CC/CC), Fig. 5(A), que recibe la señal de voltaje (V_s), tiene un interruptor unidireccional con un ciclo de trabajo controlado por una señal de Modulación de ancho de pulso PWM y un capacitor C antes de la salida, lo que ayuda a reducir los armónicos, obteniendo una señal de voltaje (V_o). La señal PWM que controla el ciclo de trabajo del convertidor Boost proviene de un algoritmo MPPT, que se modifica para obtener un control por derrateo para realizar el control primario de frecuencia. A continuación, se modela un convertidor Buck (CC/CC), Fig. 5(B), que recibe la señal de voltaje V_o , este convertidor dispone de un conmutador unidireccional controlado por una señal PWM, al que se le ha implementado un control PID, obteniendo un voltaje de salida V_r .

Figura 5

Conversores CC/CC



Nota. Estos convertidores se encuentran conectados a los paneles solares, con los cuales se puede obtener la señal final de voltaje V_r .

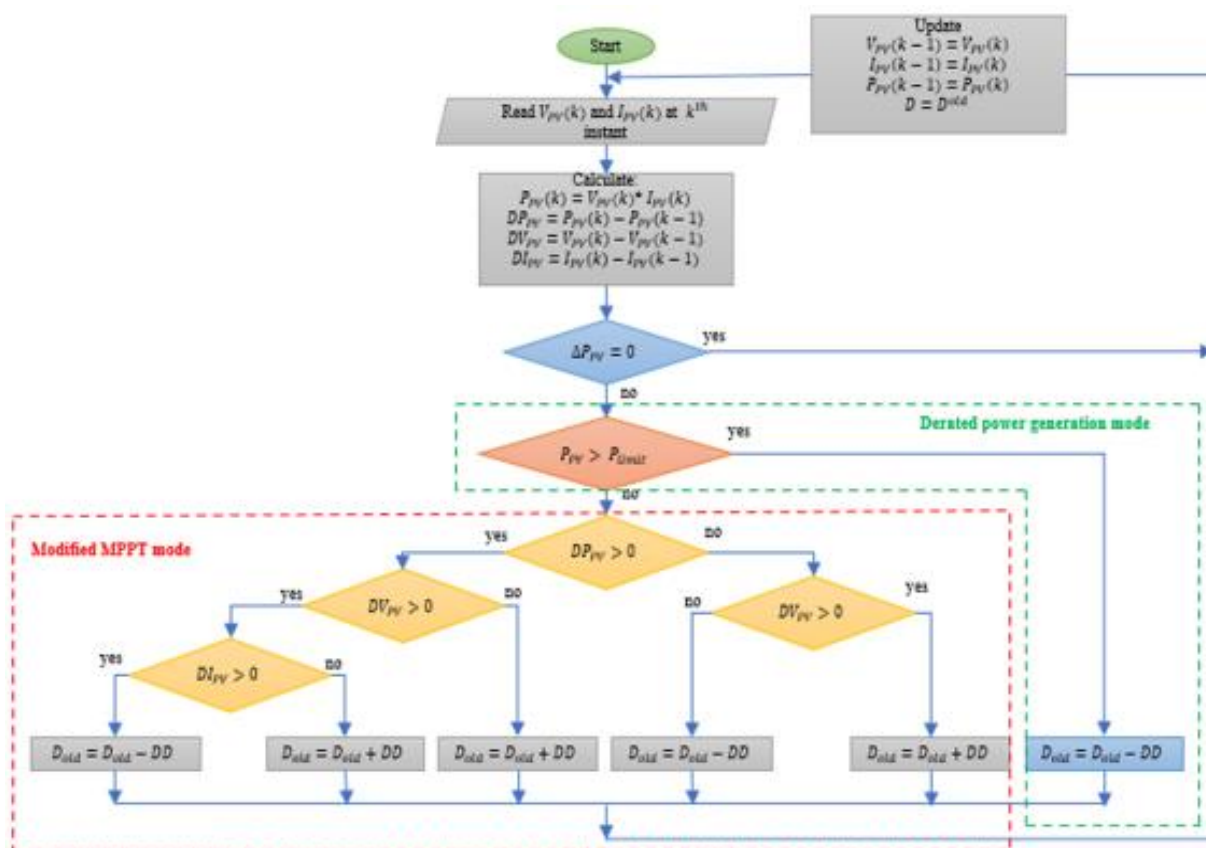
Con la señal V_r , se modeló un convertidor CC/CA trifásico, el cual contiene un puente de IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), controlado por una señal PWM de dos niveles, seguido de un filtro LC que ayuda a reducir los armónicos, obteniendo señales sinusoidales más puras hacia las cargas trifásicas.

Finalmente, se modifica el algoritmo MPPT para realizar el control por derrateo con lo cual se reduce la generación de potencia, a pesar de la existencia de un alto nivel de recursos y se obtiene mediante la modificación del algoritmo Perturbación y Observación (P&O) del PPT,

Fig. 6, manteniendo el excedente disponible en los CGTs, para ser utilizado cuando se produzca un desequilibrio de potencia entre la oferta – demanda y sea necesario recuperar el equilibrio de la micro-red.

Figura 6

Algoritmo P&O modificado



Nota. Este algoritmo P&O se encuentra modificado, mediante el incremento de lazos de control con los cuales se puede realizar el control por derrateo.

El algoritmo P&O modificado contiene la variable k que representa cada nuevo valor tomado del PV para comparar los datos y determinar si existe una variación (D), tomando valores como voltaje (V_{PV}), corriente (I_{PV}) y determinando la potencia (P_{PV}), con estos valores se evalúa si se cumple la condición para tener una señal de salida llamada D_{old} , la cual aumenta o disminuye su valor dependiendo del caso, ecuación 5, con pasos de $DD = 0.005$. La

condición de derrateo se establece según la ecuación 6, determinando si la generación P_{gen} , es mayor que la demanda P_{carga} , existiendo una variación de potencia Δp_i y reduciendo el ciclo de trabajo según la ecuación 6.

$$D_{old} = D_{old} \pm DD \quad (Ec. 5)$$

$$\Delta p_i = \frac{E_{kin}}{dt} = Jw \frac{dw}{dt} = P_{gen} - P_{load} = 0 \quad (Ec. 6)$$

Del mismo modo, según (Liu, 2014), para ajustar la potencia de las CGT, debe utilizarse la ecuación 7:

$$\frac{df_{sys}}{dt} = \frac{f_o}{2H_{sys}} * \Delta p_i \quad (Ec. 7)$$

Donde df_{sys} es la variación de frecuencia del sistema, f_o es la frecuencia de referencia, H_{sys} es la inercia del sistema.

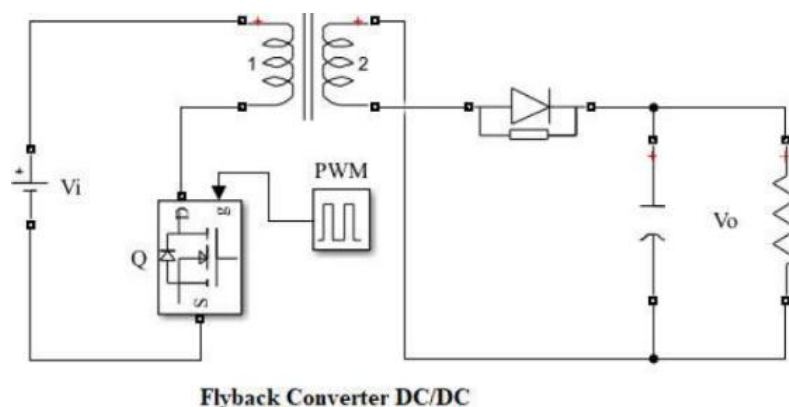
Modelado del sistema de generación eólica

En esta etapa se realiza el modelado de la generación eólica, donde se seleccionó el aerogenerador a utilizar y se conectó a un convertidor CA/CC que contiene un puente de diodos, cambiando la señal CA a una señal CC (V_i). A continuación, se modela un convertidor CC/CC del tipo Flyback, Fig. 7, que toma la señal V_i , y con el uso de un conmutador unidireccional, controlado por un PWM, obtiene como salida una señal V_o .

La señal PWM es activada por el algoritmo MPPT asociado a la central eólica, que posteriormente será modificado, al igual que en la central FV.

Figura 7

Convertor Flyback CC/CC



Nota. En la figura se muestra el convertidor Flyback asociado a la planta eólica en donde se implementa el algoritmo MPPT modificado.

Tras obtener una señal de voltaje V_o , se modela un convertidor CC/CA trifásico, con un puente de IGBTs, controlado por una señal de doble pulso PWM, que dispone de un filtro LC para reducir los armónicos, obteniendo señales sinusoidales más puras que llegan a la carga trifásica, como en la planta FV.

A continuación, se realizó una intervención en el algoritmo MPPT, para realizar el control por derrateo en la planta eólica, almacenando un porcentaje de la energía, y manteniéndola disponible para ser utilizada cuando se produzca un desequilibrio de potencia y sea necesario recuperar y/o mantener el equilibrio de la red.

El algoritmo MPPT se modificó utilizando las ecuaciones 5, 6 y 7, al igual que la planta FV.

Modelamiento de la red eléctrica

En esta etapa, se modela una micro-red aislada considerando los modelos FV y WP presentados en las subsecciones anteriores. Cabe mencionar que las CGT incluyen el

controlador de reducción de potencia para participar en la respuesta de frecuencia primaria cuando se produce un desequilibrio de potencia.

Se modela una carga de potencia trifásica para evaluar la respuesta de frecuencia primaria proporcionada por los CGT. Los CGT permiten evaluar la capacidad de mantener el equilibrio tanto de la frecuencia como del voltaje, evitando la pérdida de control de la micro-red.

Con el propósito de obtener la mejor respuesta de los CGT se definen escenarios en donde se realizará la variación de carga, determinando los niveles a los cuales se puede aplicar el control por derrateo.

Simulaciones en el dominio del tiempo

En esta etapa se realiza la simulación de la micro-red, una vez definidos los escenarios con los porcentajes de variación de carga, para observar el nivel de respuesta de las CGTs asociadas a la FV y WP, evaluando el nivel de respuesta en términos de regulación primaria de frecuencia y su capacidad para restaurar el sistema.

El nivel de respuesta de los CGTs determinará si se puede minimizar el uso de los equipos BESS, utilizados para mantener la estabilidad y suplir el déficit energético ante la variabilidad del recurso, lo que ayudará a reducir el cambio en sus propiedades físico-químicas y aumentar su vida útil.

Las pruebas miden las señales de voltaje y frecuencia que tiene la carga, haciendo posible observar las variaciones que existen en estas señales ante las variaciones de carga establecidas. Finalmente se medirá la variación máxima de la frecuencia y la frecuencia nadir, así como el tiempo de respuesta de los CGTs al utilizar el control por derrateo y el tiempo que tarda en recuperar el equilibrio del sistema, por tanto, se podrá determinar la contribución de las energías renovables en la regulación de la frecuencia.

Análisis de resultados de la micro-red

En esta etapa, tras realizar la simulación en el dominio del tiempo, se ha evaluado el comportamiento de los CGTs mediante el control por derrateo en términos de regulación primaria de frecuencia y su capacidad para restaurar el sistema ante variaciones de carga, buscando minimizar el uso de los equipos BESS y alargar su vida útil.

Las variables medidas son la frecuencia y el voltaje en la carga, además de medir la potencia individual de las plantas FV y WP, para observar las perturbaciones sufridas por las señales a medida que se realizan variaciones de carga y obtener los niveles mínimos alcanzados por las señales, antes de realizar la respuesta en frecuencia primaria. El tiempo de respuesta de los CGT ante la caída de frecuencia es menor a los 50 milisegundos, logrando una restauración completa de la señal en menos de 0,1 segundos, con lo cual se tendría una respuesta en frecuencia primaria ante variaciones de carga por parte de las fuentes de GD.

Capítulo IV

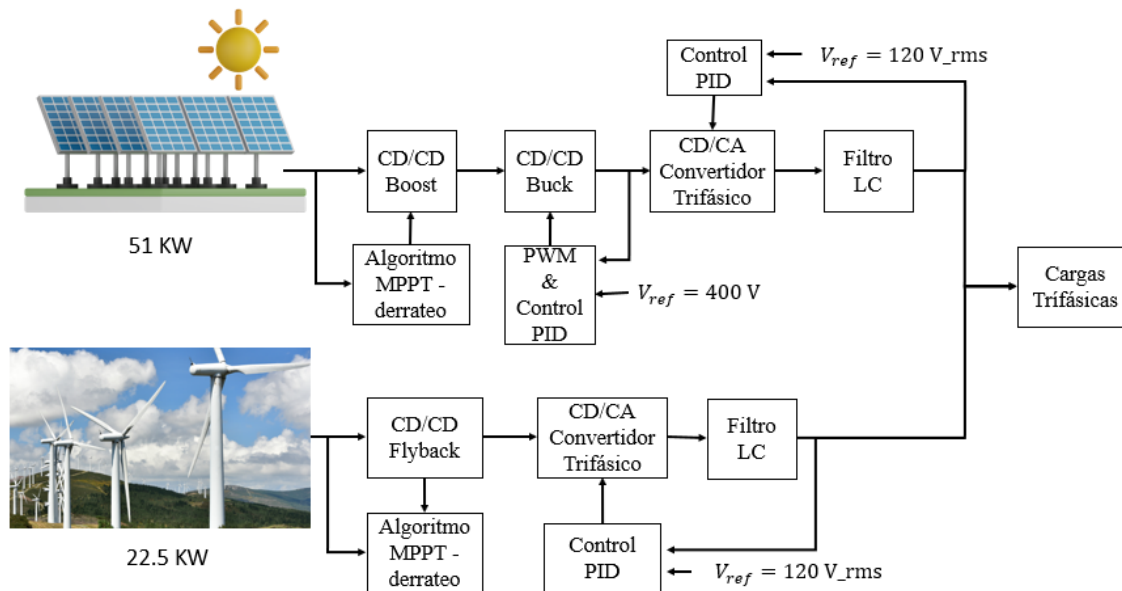
Caso de estudio

En esta sección se presenta la topología de la micro-red aislada con capacidad de respuesta primaria en frecuencia, realizando un control por derrateo a nivel de CGT, Fig. 8. Este diseño inicia con la planta fotovoltaica que se encuentra representada por el bloque de la planta FV, donde se conecta a un convertidor tipo Boost y un convertidor tipo Buck, posteriormente se conecta a un inversor trifásico que tiene un filtro LC para reducir los armónicos existentes en la señal y finalmente se conecta a una carga trifásica. En el convertidor Boost se implementó el control de derrateo en donde las variables de entrada del panel solar son el voltaje y la corriente, determinando su potencia, este control se realiza mediante el algoritmo de control MPPT P&O modificado, con el cual se modifica el ciclo de trabajo del transistor.

La planta eólica está conectada a un convertidor del tipo Flyback, que posteriormente se encuentra conectado a un inversor trifásico con un filtro LC para reducir los armónicos de la señal y finalmente se encuentra conectado a la misma carga trifásica que la FV, posee un control de derrateo mediante el uso del algoritmo MPPT P&O modificado que controla el ciclo de trabajo del transistor asociado al convertidor Flyback.

Figura 8

Topología de la micro-red aislada



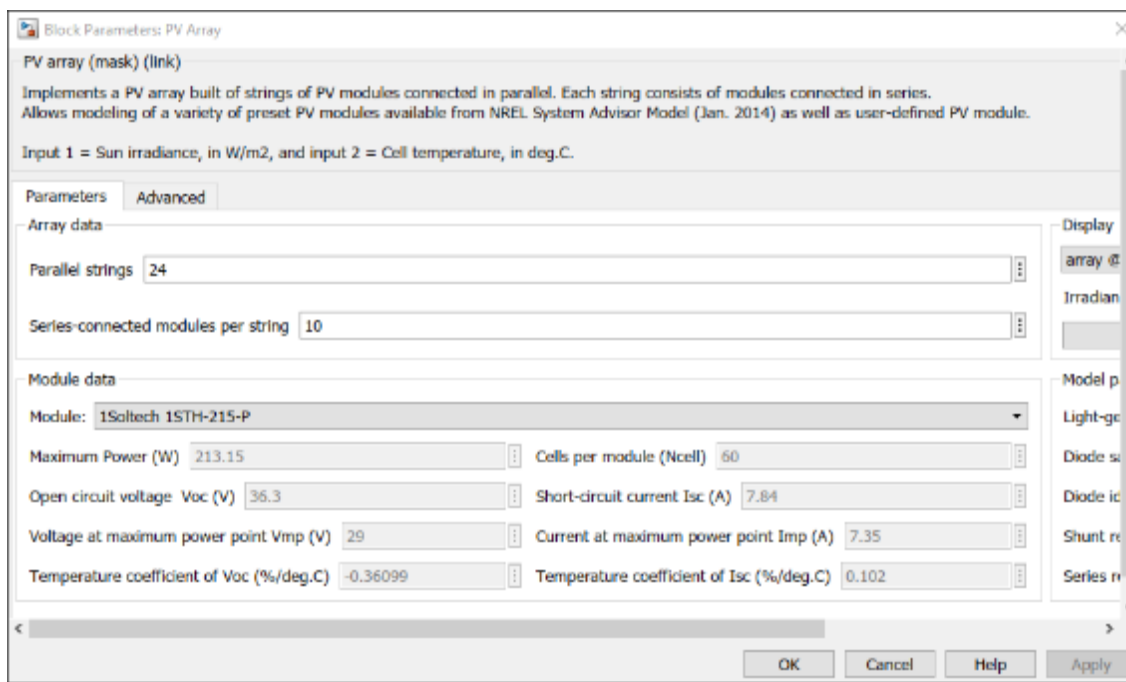
Nota. En la figura se muestra la topología de la micro-red aislada.

Diseño de la planta fotovoltaica

La planta fotovoltaica tiene una potencia total instalada de 51.3 kW, se utilizó un total de 240 paneles solares, los cuales están conectados en serie y paralelo, se usa la ecuación 8 para calcular la potencia total instalada. El panel solar ocupado es el modelo 1 **Soltech 1STH-215-P** que tienen una potencia máxima de 213,15 W y se conectaron en 24 paneles en paralelo por 10 paneles conectados en serie, como se muestra en la Fig. 9.

Figura 9

Arreglo y modelo de panel solar elegido



Nota. En la figura se muestran los parámetros de configuración para el sistema fotovoltaico implementado.

$$P_{PV} = \text{Potencia panel} * \text{paneles en serie} * \text{paneles en paralelo} \quad \text{Ec (8)}$$

$$P_{PV} = 213.15 [W] * 24 * 10$$

$$P_{PV} = 51,15 [kW]$$

Diseño de los convertidores CC/CC

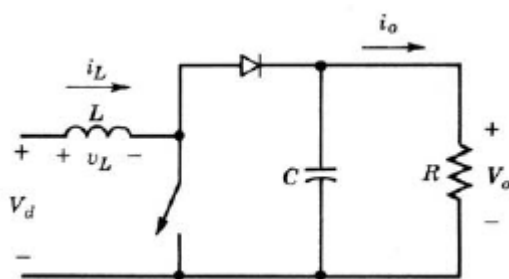
Diseño del convertidor Boost

El convertidor CC/CC que es un tipo elevador en donde el voltaje de salida es mayor que el de entrada. Cuando el interruptor se encuentra encendido, el diodo es de polarización

inversa, lo que provoca un aislamiento en la etapa de salida. Después, la entrada suministra energía al inductor. Posteriormente, sí el interruptor está apagado, la salida recibe energía del inductor al igual que de la entrada. Para el análisis del estado permanente, se tiene que el condensador (C) de filtrado de salida es de un gran valor, para obtener un voltaje de salida constante $V_o(t) = V_o$, como se muestra en la Fig. 10

Figura 10

Convertidor Boost



Nota. Tomado de (Ned Mohan, 2009)

Para realizar los cálculos de la inductancia se toma en cuenta la Ec. 9, que muestra la relación existente entre la combinación de la mínima inductancia (L_{min}) y la frecuencia (f) que tienen la conmutación, con ello se puede tener una corriente permanente en el convertidor, también tiene una relación con la potencia de salida (P_o) que es absorbida por la resistencia de la carga, V_{in} representa el voltaje de la entrada al convertidor y D representa el ciclo de trabajo del conmutador enviado. (Hart., 2013)

$$L_{min} = \frac{D * V_{in}^2}{2f * P_o} \quad (Ec. 9)$$

$$L_{min} = \frac{0,85 * (363V)^2}{2 * 10kHz * 51,15kW}$$

$$L_{min} = 109,48 \mu H$$

Para realizar el cálculo del condensador se utiliza la Ec. 10 que provienen a partir del rizado del voltaje de salida (V_o), en donde se toma en consideración $\frac{\Delta V_o}{V_o} = 0,001$ para tener un pequeño rizado en la señal, tomando en cuenta P_o , V_{in} y D como señales para el ciclo de trabajo del conmutador.

$$C = \frac{D * (1 - D)^2 * P_o}{\frac{\Delta V_o}{V_o} * f * V_{in}} \quad (Ec. 10)$$

$$C = \frac{0,85 * (1 - 0.85)^2 * 51,15kW}{0,001 * 10kHz * 363^2}$$

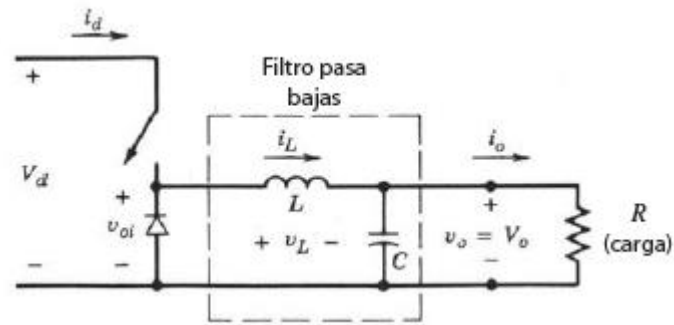
$$C = 742,39 \mu F$$

Diseño del convertidor Buck

El objetivo de realizar el diseño de este convertidor Buck es reducir la señal de voltaje CC y obtener una señal continua pura, este tipo de circuitos es muy usado en fuentes de energía de CC reguladas. En la Fig. 11 se muestra el diagrama que constituye un convertidor reductor, en donde se usa un interruptor (MOSFET), una bobina (L) y un condensador (C). Cuando el interruptor se encuentra abierto el diodo proporciona un camino a la corriente por la bobina, por el contrario, al estar cerrado el interruptor el diodo se polariza inversamente.

Figura 11

Convertidor Buck



Nota. Tomado de (Ned Mohan, 2009)

Para determinar el valor mínimo de la bobina a utilizar se ocupó la Ec. 11, en busca de mantener una corriente permanente en el circuito. Las variables a ocupar son: la frecuencia $f = 25\text{kHz}$, el valor del voltaje es $V_o = 300\text{v}$, con un valor de potencia $P_o = 50\text{kW}$, el ciclo de trabajo del interruptor se encuentra entre los valores $D = 0 \sim 0,85$, de los cuales se reemplazará un valor mínimo de 0,2 y otro valor de 0,85 en la ecuación, para realizar un análisis dentro del rango de trabajo.

$$L_{min} = \frac{(1 - D) * V_o^2}{2f * P_o} \quad (\text{Ec. 11})$$

Reemplazando el valor $D = 0,2$ para el primer rango:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,2) * 300^2}{2 * 25000 * 50000}$$

$$L_{min} = 720 \text{ mH}$$

Reemplazando el valor $D = 0,85$ para el segundo rango:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,85) * 300^2}{2 * 25000 * 50000}$$

$$L_{min} = 135 \text{ mH}$$

Para el cálculo del condensador que ayuda a reducir el rizado del voltaje de salida del convertidor reductor, se utiliza la ecuación $\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8 * L * C * f^2}$, en donde se ocupa un valor de inductancia calculado para $D = 0,2$ y una frecuencia de $f = 25 \text{ kHz}$. Se despeja el valor de la capacitancia (C) máxima a utilizar y obtener un menor rizado en la señal, como se indica en Ec. 12

$$C = \frac{1 - D}{8L * \frac{\Delta V_o}{V_o} * f^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$C = \frac{1 - 0,2}{8(720 \text{ mH}) * 0,001 * 25000^2}$$

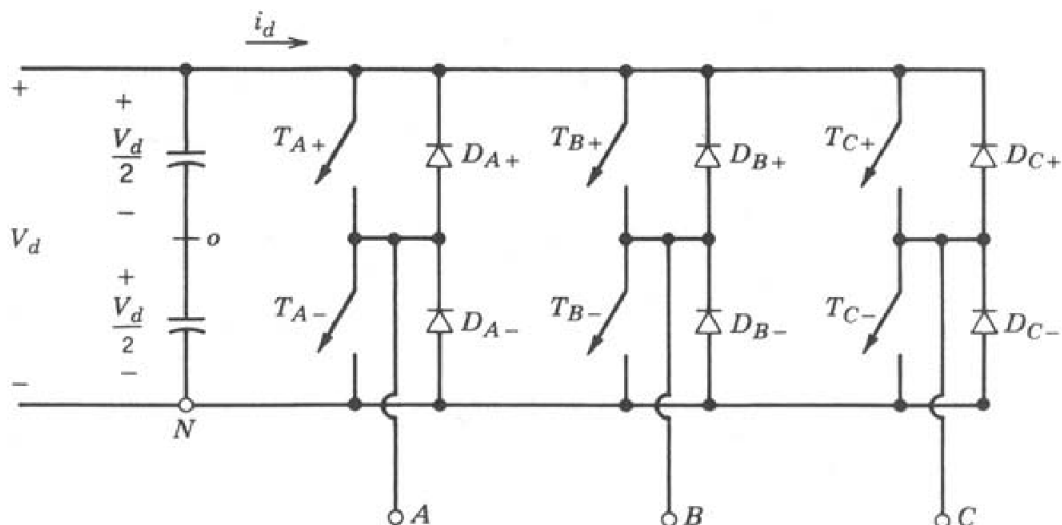
$$C = 555,55 \mu\text{F} \cong 560 \mu\text{F}$$

Diseño del convertidor CC/CA fotovoltaico

Los inversores son circuitos que ayudan a convertir la corriente continua en corriente alterna, controlan los voltajes de salida trifásicos tanto en magnitud como también en frecuencia con un ingreso de voltaje constante V_d . El circuito ocupado frecuentemente para un inversor trifásico es el mostrado en la Fig.12, en donde se requiere de seis interruptores.

Figura 12

Convertidor CC/CA fotovoltaico



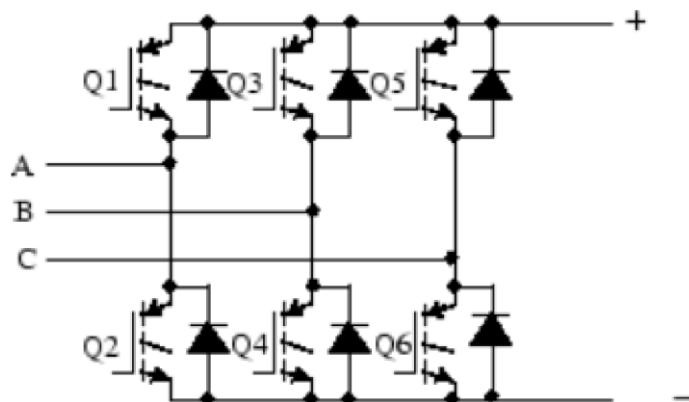
Nota. Tomado de (Ned Mohan, 2009)

Para obtener voltajes de salida trifásicos equilibrados en un inversor de PWM, se puede alimentar una carga mediante el uso de tres inversores monofásicos que se encuentren desfasados en 120 grados entre ellos.

Para realizar la simulación en Simulink se ocupó un bloque de puente universal utilizando un grupo de diodos que tienen conmutación natural y IGBTs con conmutación forzada, como se indica en la Fig. 13

Figura 13

Puente IGBT y diodos

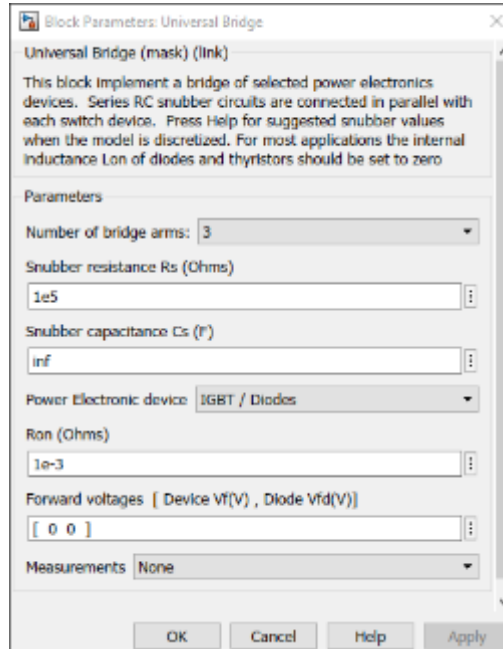


Nota. Tomado de (Ned Mohan, 2009)

Para la configuración de este puente mostrado, como primer elemento se tiene la resistencia Snubber (R_s), que se la mantiene con un valor predeterminado de $1e5 \text{ ohm}$, una capacitancia snubber (C_s) en faradios que tienen un valor predeterminado en inf , con lo cual se tiene un amortiguador resistivo, un valor de R_{on} de $1e - 3 \text{ ohm}$ y un valor de Forwards voltages [Dispositivo V_f , Diodo V_{fd} [V]] por defecto de [0,0], indicados en la Fig. 14

Figura 14

Bloque de parámetros: puente universal

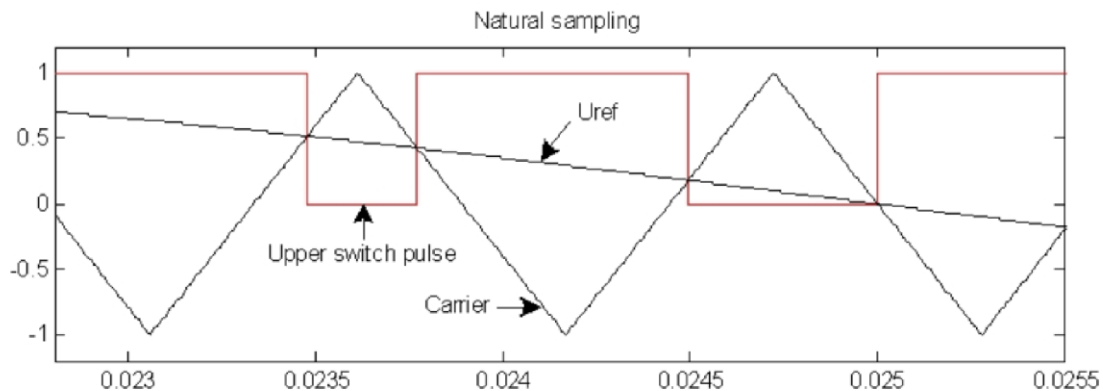


Nota. En la figura se muestran los bloques de parámetros para un puente universal. Obtenida del software de simulación MatLab

Los IGBT's tienen un parámetro g (compuerta) en donde ingresa una señal para controlarlos con el uso de una señal PWM de 2 niveles, en donde su funcionamiento se basa en tener una señal moduladora, que es comparada con una señal simétrica llamada *Carrier (portadora)*, en donde al tener la señal de referencia mayor que la portadora, se tiene un impulso del interruptor (Upper switch pulse) usado en el dispositivo de conmutación superior alto (1) y en el dispositivo inferior es bajo (0), como se indica en la Fig. 15.

Figura 15

Muestreo Natural



Para el funcionamiento del bloque PWM se tiene un modo de funcionamiento no sincronizado, que está determinado por la frecuencia, donde la frecuencia portadora (f_c) tiene una relación de conmutación (m_f) por la frecuencia de salida (f_o), como se muestra en la Ec. 13

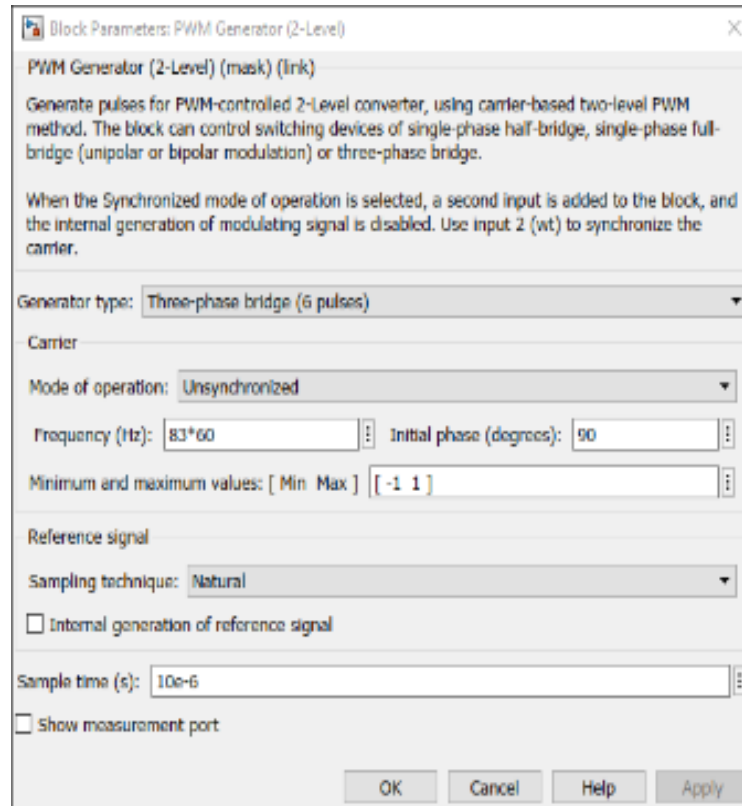
$$f_c = m_f * f_o \quad (Ec. 13)$$

$$f_c = 83 * 60Hz$$

Los valores ocupados en la configuración del bloque PWM, como la fase inicial tiene un valor predeterminado de 90 grados, que es un valor en donde se encuentra ubicada en el punto medio entre los valores máximo y mínimo con una pendiente positiva. Los valores del máximo y mínimo de la portadora se encuentran por defecto en [-1 1], y otros valores predeterminados que se detallan en la Fig. 16.

Figura 16

Bloque de PWM de dos niveles



Nota. En la figura se muestran los bloques de PWM de dos niveles. Obtenido del software Matlab.

Diseño de la planta eólica

Para el diseño de la planta de generación eólica se utilizaron tres turbinas eólicas SKU: AER75001, de una potencia de 7.5 kW, los cuales están conectados en paralelo para aumentar la potencia total del sistema. Este se conecta a un inversor de CA a CC.

Tabla 1*Características del aerogenerador*

Aerogenerador SKU: AER75001	
Potencia nominal	7.5 kW
Velocidad del viento	3 m/s
Velocidad nominal del viento	12 m/s
Velocidad del viento de corte	20 m/s
Diámetro de la hélice	6.4 m
Superficie del rotor	31.2 m ²
Número de hojas	3

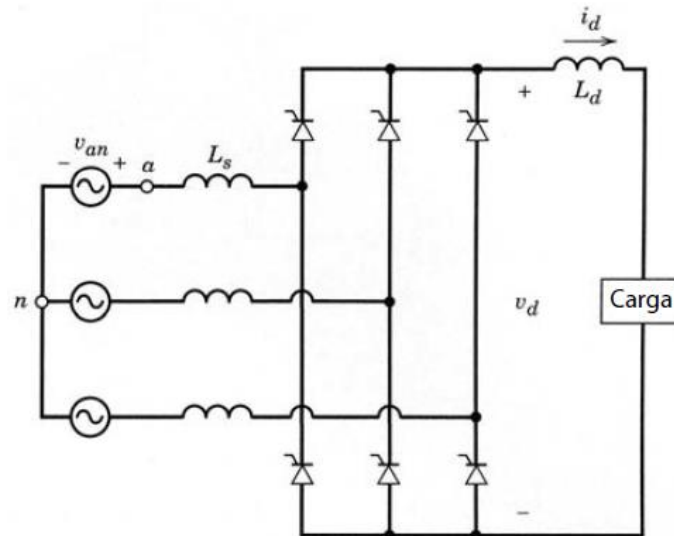
Nota. Tomado de (Matysik, 2011-2023)

Diseño del Inversor Trifásico de la planta fotovoltaica

Este tipo de componente es utilizado para convertir la corriente alterna en corriente continua, puede ser del tipo no controlado, ya que solo está compuesto por un puente de seis diodos, que se encuentra conectado al voltaje de salida del convertidor CC/CC asociado a la planta FV, como se muestra en la Fig. 17.

Figura 17

Convertidor por tiristores prácticos



Nota. Tomado de (Ned Mohan, 2009)

El voltaje en CC obtenido es medido mediante la siguiente Ec. 14, siendo V_{LL} el voltaje RMS de línea, medido en el lado de corriente alterna.

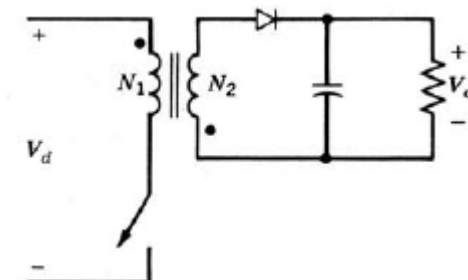
$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} = 1.35V_{LL} \quad (Ec. 14)$$

Diseño del convertidor Flyback

Este tipo de convertidores derivan del tipo reductor/elevador. Cuando se encuentra encendido, y a causa de las polaridades que tiene el devanado, el diodo D adquiere una polaridad inversa, mientras que, en modo apagado en este convertidor correspondiente a una desmagnetización incompleta del núcleo del inductor, como se muestra en la Fig. 18.

Figura 18

Convertidor Flyback



Nota. Tomado de (Ned Mohan, 2009)

Para el diseño del convertidor se ocupa la Ec. 15 en donde $V_o = 300v$, el valor del ciclo de trabajo oscila entre $D = 0,2$ y $0,85$, el rizado que tendrá la señal lo asumimos como un valor de $\frac{\Delta V_o}{V_o} = 0,01.$, la frecuencia $f = 100kHz$, y $P_o = 21,3kW$, con lo cual se podrá determinar el valor del condensador.

$$C_{min} = \frac{V_o^2 * D}{\Delta V_o * P_o * f} \quad (Ec. 15)$$

$$C_{min} = \frac{300^2 * 0,2}{0,001 * 21300 * 100000}$$

$$C_{min} = 845,07 \mu F$$

Diseño del Inversor Trifásico de la Planta eólica

El inversor ocupado tiene el mismo diseño de la sección 4.4 de la planta FV, ya que tiene la misma función de convertir la entrada de señal del convertidor tipo Flyback de voltaje en CC y transformarlo en una señal de CA trifásica.

Diseño del Algoritmo MPPT modificado para control por derrateo

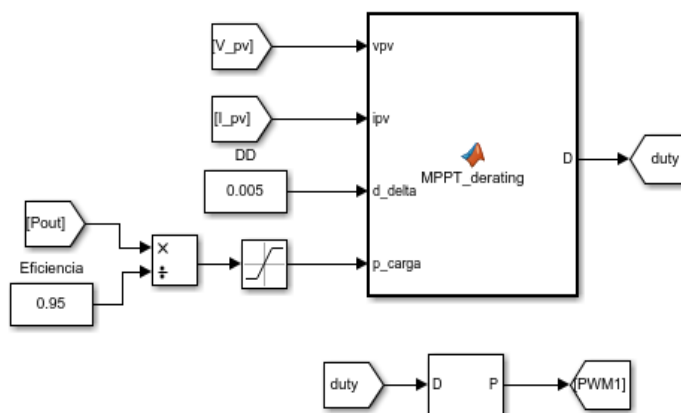
Para el diseño de este algoritmo fue necesario tomar una retroalimentación con los valores de potencia trifásica que se está entregando a la carga (P_{out}), tomando en cuenta la eficiencia que tiene los convertidores, para poder tener una potencia en la carga (P_{carga}), al utilizar la ecuación, siendo η la eficiencia que tiene el sistema, en donde se ha determinado que tienen un valor de eficiencia muy cercano al 95%.

$$P_{carga} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (Ec. 16)$$

Este algoritmo basado en el diagrama de la Fig. 6, en donde se tiene el diagrama de flujo del algoritmo MPPT Perturb and Observe modificado para realizar el control por derrateo, en donde se observa las mediciones de las variables como el voltaje V_{PV} y la corriente I_{PV} , con las cuales se pueden determinar la potencia de la planta fotovoltaica P_{PV} , para poder realizar un análisis con la potencia de la carga P_{carga} , y determina si la variable duty (D_{old}), que es la señal que controla el ciclo de trabajo, aumente o disminuya según sea necesario, mediante la suma o la resta de los pasos $DD = 0.005$ como se muestra en la Fig. 19, que posteriormente se dirigen al bloque generador PWM para la activación del interruptor MOSFET entre un ciclo de trabajo de 0 y 1.

Figura 19

Diagrama de bloques del algoritmo MPPT modificado



Nota. En la figura se muestra el diagrama de bloques y obtenido del software Matlab.

Escenarios de simulación.

Para realizar las simulaciones de datos se determinó las variaciones de carga en diferentes escenarios, como se muestra en la Tabla 2 y dado que ningún equipo BESS puede realizar la respuesta primaria de frecuencia, las fuentes de generación asumieron esa responsabilidad y restauraron el equilibrio de frecuencia en el sistema a sus niveles nominales.

Tabla 2

Escenarios de simulación de la micro-red

Escenarios	Potencia de la MG (kW)	Δ de Potencia (kW)	% variación de carga	Voltaje (V)
1	61.9	8.81	14.2	120
2	64.9	5.78	8.9	120
3	66.7	4.05	6.1	120

Estos escenarios ayudan a medir el desempeño de los CGT, además de medir el nivel mínimo de frecuencia alcanzado en cada prueba y el tiempo que tarda en restablecerse el nivel

de frecuencia/voltaje en la carga, manteniendo el equilibrio y fiabilidad de la MG. Las variaciones de carga en cada escenario se realizan en el segundo 0.9, una vez que el sistema ya se encuentre equilibrado.

Una respuesta rápida de los CGT ayuda a que el equipo BESS no sea el único que mantenga el equilibrio del sistema, reduciendo las descargas profundas en el BESS y aumentando su vida útil.

Capítulo V

Análisis de resultados

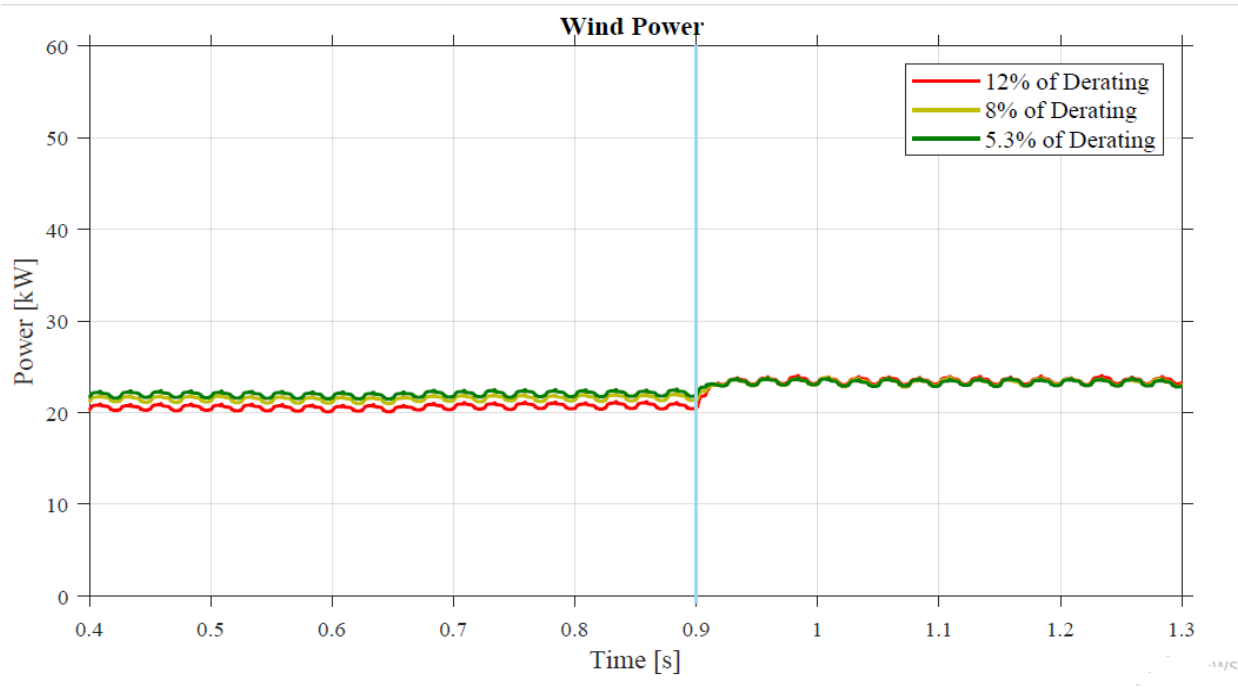
En esta sección se presentan los resultados al realizar las pruebas indicadas en la Tabla 2, con la MG conectada a una carga que varía en función del tiempo, ya que inicialmente presenta un valor, y en un momento determinado varía haciendo que la frecuencia y el voltaje se vean afectados, al disponer del algoritmo de derrateo en los CGTs se recupera el equilibrio del sistema lo antes posible cumpliendo con los criterios de seguridad de la MG.

Simulaciones en la Planta de Generación Eólica

En las simulaciones del WP, en la Fig 20, se observa la variación de la potencia con los tres escenarios mostrados en la Tabla 2, donde se realiza la perturbación en la carga, haciendo que la frecuencia baje y el algoritmo de derrateo actúa en los CGTs buscando corregir la perturbación, hasta lograr un equilibrio entre la generación y demanda, observando que la potencia se incrementó hasta lograr recuperar equilibrio en la MG, todas estas pruebas se las realiza cuando la turbina eólica trabaja a una velocidad de 12 m/s

Figura 20

Derrateo en la Planta de Generación Eólica



Nota. Tomado del software Matlab.

Los tres escenarios propuestos indican que el tiempo de respuesta de los CGT asociados a la WP es de aproximadamente 20 milisegundos, en donde se inyecta la potencia almacenada hasta que el sistema recupera el equilibrio.

Los valores se muestran en la Tabla 3, donde se detalla la variación existente en la potencia entregada a la carga por parte de la WP y los niveles de derrateo usados.

Tabla 3*Simulaciones de derrateo de la WP*

Escenarios	% Derrateo	Pre-contingencia			Δ de potencia (kW)	Potencia Post-contingencia (kW)
		Potencia (kW)	Voltaje fase (V)	Corriente (A)		
1	12	18.9	119.3	52.9	2.6	21.5
2	8	19.8	119.8	55.1	1.7	21.5
3	5.3	20.5	120.2	56.5	1.2	21.5

La potencia inicial de la figura 20, tiene un derrateo inicial, lo cual resulta en una potencia reducida hacia la carga, en segundo 0,9 se realiza un desequilibrio de carga obligando a que el algoritmo de derrateo aumente la potencia recuperando el equilibrio del sistema.

Para determinar el valor de la potencia que se entrega a la carga se tienen los valores de voltaje y corriente RMS medidos, con lo cual mediante la Ec. 15, se puede determinar la potencia máxima que puede entregar la turbina eólica a la carga trifásica.

$$P_{WP} = V_{WP} * I_{WP} * 3 \quad (Ec. 15)$$

$$P_{WP} = 120,22 * 59,67 * 3$$

$$P_{WP} = 21,52 \text{ kW}$$

Con este valor se puede determinar la eficiencia que tienen los CGTs, con la ayuda de la Ec. 16

$$\eta = \frac{P_{WP}}{P_{WP-nominal}} * 100\% \quad (Ec. 16)$$

$$\eta = \frac{21520,584}{22500} * 100\%$$

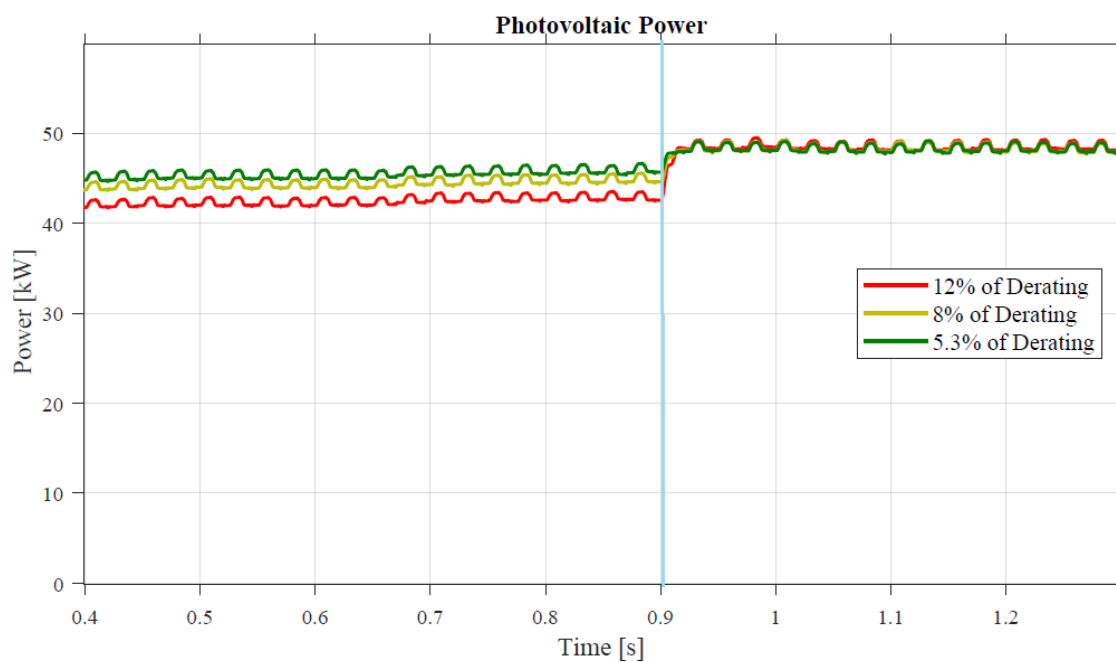
$$\eta = 95,647 \%$$

Simulaciones en la Planta de Generación Fotovoltaica

En la Figura 21, se puede observar el comportamiento de la planta FV ante los escenarios de la Tabla 2, los CGTs aumentan la potencia fotovoltaica hasta recuperar el equilibrio del sistema, corrigiendo la caída de frecuencia en la carga. Las pruebas son realizadas con una irradiancia del 1000 W/m^2 .

Figura 21

Simulaciones de derrateo PV



Nota. Tomado del software Matlab.

La velocidad de respuesta de los CGT de la FV es de aproximadamente 20 milisegundos, al igual que en el WP. Los CGTS de la PV y el WP tienen una velocidad de respuesta similar, lo que mejora la respuesta de la MG a las variaciones de carga, consiguiendo una mejor respuesta primaria de frecuencia.

A continuación, en la Tabla 4 se detalla la variación existente en la potencia entregada a la carga y los niveles de derrateo usados.

Tabla 4

Simulaciones de derrateo de la Planta Fotovoltaica

Escenarios	% Derrateo	Pre-contingencia			Δ de potencia (kW)	Potencia Post-contingencia (kW)
		Potencia (kW)	Voltaje fase (V)	Corriente (A)		
1	12	43.1	119.0	120.8	5.8	49.0
2	8	45.1	119.7	125.6	3.9	49.0
3	5.3	46.4	119.7	129.2	2.6	49.0

Nota. El funcionamiento es similar a la planta eólica, para poder recuperar el equilibrio del sistema ante una perturbación en la carga.

Para determinar el valor de la potencia que se entrega a la carga se tienen los valores de voltaje y corriente RMS medidos, con lo cual, mediante la Ec. 17 se puede determinar la potencia máxima que puede entregar la planta fotovoltaica a la carga trifásica, al igual que en la WT.

$$P_{PV} = V_{PV} * I_{PV} * 3 \quad (Ec. 17)$$

$$P_{PV} = 119,17 * 137,07 * 3$$

$$P_{PV} = 49,0 \text{ kW}$$

Con este valor se puede determinar la eficiencia que tienen los CGTs de la planta fotovoltaica, con la ayuda de la Ec. 18

$$\eta = \frac{P_{PV}}{P_{PV-nominal}} * 100\% \quad (Ec. 18)$$

$$\eta = \frac{49003,896}{51136} * 100\%$$

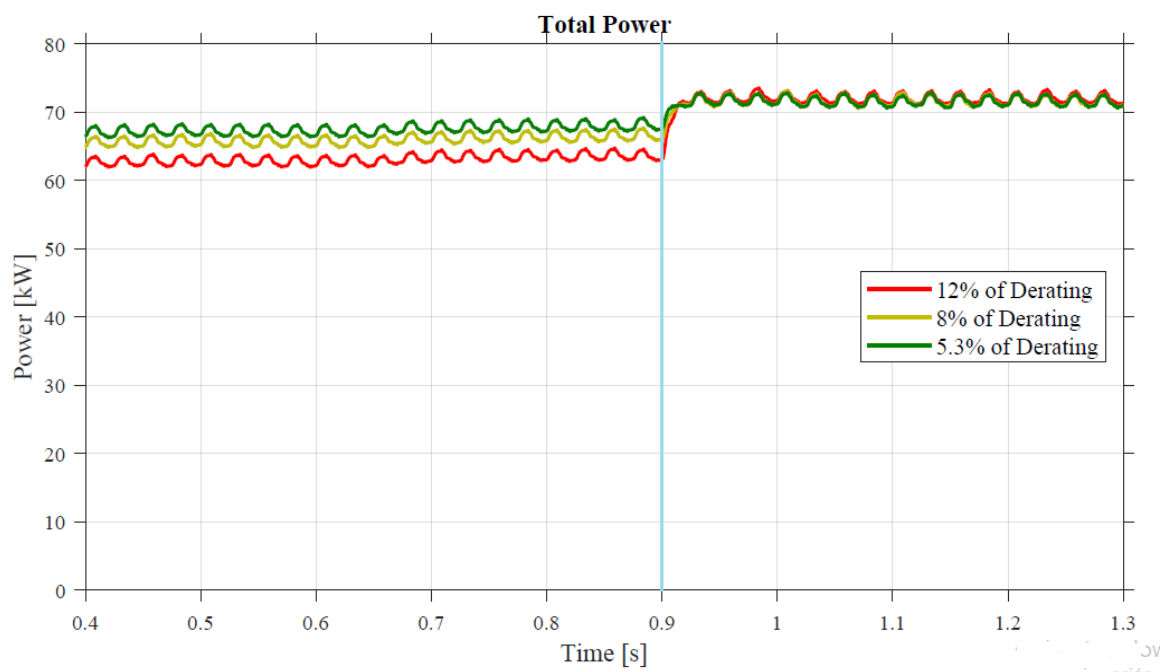
$$\eta = 95.831 \%$$

Derrateo en la Micro-red

La MG es la unión de la FV y la WP, en donde se observa la respuesta del sistema ante una perturbación de carga en los tres escenarios propuestos Fig 22., con recuperación del sistema logrando el equilibrio generación-demanda y asegurando la fiabilidad y el suministro eléctrico.

Figura 22

Derrateo en la Micro-red



Nota. Tomado del software Matlab.

La velocidad de respuesta de los CGTs es de aproximadamente 20 milisegundos, ya que es el tiempo de respuesta de las plantas PV y WT, con ello se recupera el equilibrio entre generación y demanda, en ese tiempo de desequilibrio se produce una caída de la frecuencia, que se presenta a continuación, donde los CGTs comienzan a proporcionar la respuesta primaria de frecuencia aumentando la potencia MG y recuperando el equilibrio en el menor tiempo posible.

Los valores de la potencia de la micro-red se muestran en la tabla 5, en donde se evidencia la unión de las unidades de generación individuales para alimentar una carga trifásica variable en el tiempo, en donde se puede ver los valores pre y post contingencia al realizar el desequilibrio de carga.

Tabla 5

Derrateo en la Micro-red

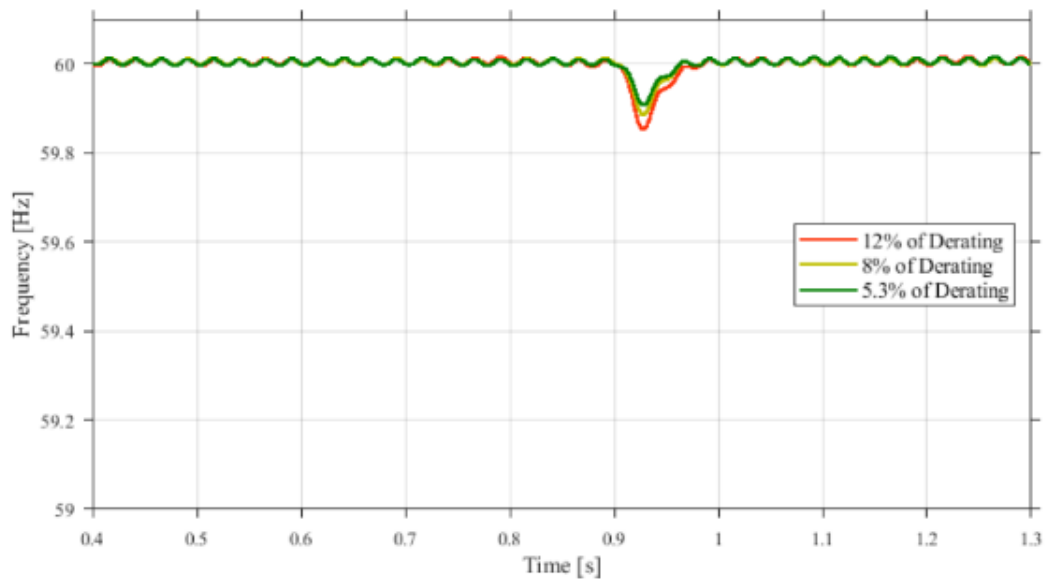
Escenarios	% Derrateo	Pre-contingencia			Δ de potencia (kW)	Potencia Post-contingencia (kW)
		Potencia (kW)	Voltaje fase (V)	Corriente (A)		
1	12	62.1	119.17	173.6	8.5	70.5
2	8	64.8	119.72	180.7	5.6	70.5
3	5.3	66.8	119.98	185.6	3.7	70.5

Voltaje y Frecuencia de la micro-red

Durante los desequilibrios de carga se puede observar una caída de la frecuencia, mientras los CGTs aumentan la potencia, hasta equilibrarse en un nuevo punto estable, donde comienza a realizar el control primario de frecuencia, el tiempo que observa en reestablecer la frecuencia es inferior a 0.1 segundos, como se observa en la Fig. 23.

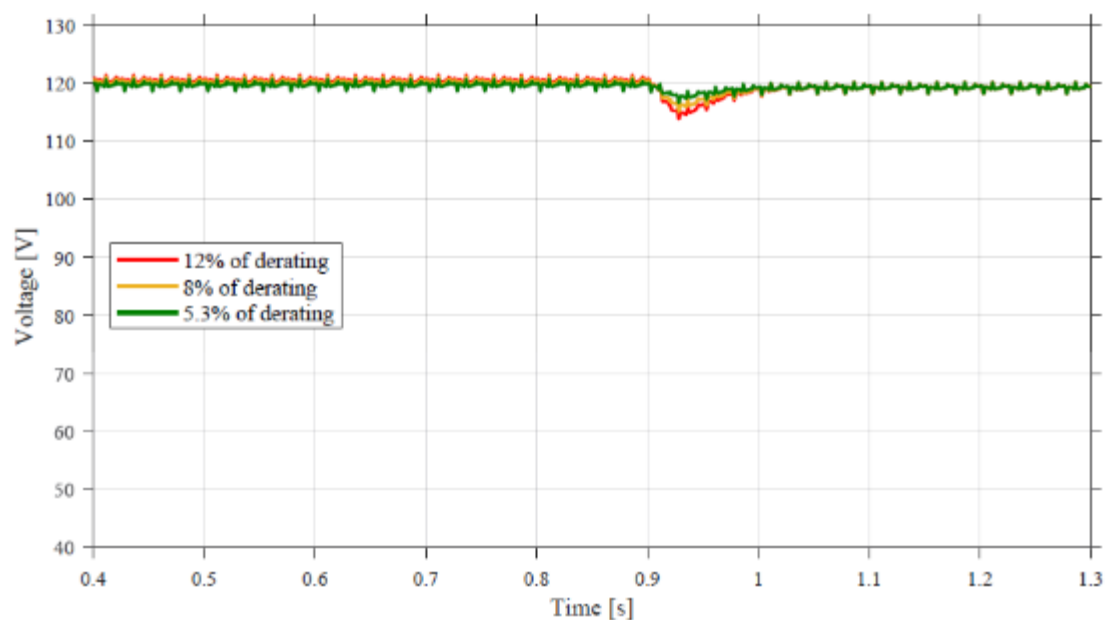
Figura 23

Frecuencia de la Micro-red



Nota. Tomado del software Matlab.

Adicionalmente durante los escenarios de variaciones de carga el nivel de voltaje también sufre variaciones, como se muestra en la Fig. 24, que pueden ser observadas con los diferentes escenarios, de igual manera observa su proceso para recuperar el equilibrio, al igual la frecuencia.

Figura 24*Voltaje en la Micro-red*

Nota. Tomado del software Matlab.

Las variaciones de carga también afectan al voltaje, produciendo perturbaciones que se corrigen recuperando el equilibrio del sistema mediante el uso de los CGT con el algoritmo de derrateo. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en los escenarios propuestos, tanto en los niveles de voltaje como de frecuencia pre - post contingencia.

Tabla 6*Variaciones de frecuencia y voltaje en la micro-red*

Escenarios	% Derrateo	Pre-contingencia		Contingencia		Post-contingencia	
		Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Δ Frecuencia (Hz)	Δ Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Δ Voltaje (V)
1	12	60.01	120	-0.146	-4.221	60.01	119.73
2	8	60.01	120.1	-0.113	-2.934	60.01	119.73
3	5.3	60.01	120.8	-0.091	-1.872	60.01	119.73

El nivel mínimo alcanzado en el escenario tres tiene una variación de frecuencia de aproximadamente 0,15 Hz antes de ser corregido. El voltaje de la micro-red también se ve afectado al tener un desbalance entre generación y demanda, pero al realizar la respuesta de frecuencia primaria con el uso de los CGTs recuperando el equilibrio de la MG, garantizando un suministro de energía estable y confiable.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- En el desarrollo de micro-redes aisladas hay que superar varios retos. Uno de ellos es el de la estabilidad de la frecuencia. Los equipos BESS regulan la frecuencia en una micro-red aislada convencional basada en convertidores de potencia. Sin embargo, las variaciones asociadas a la demanda de energía y a las fuentes renovables, como la velocidad del viento y la irradiación solar, provocan descargas profundas en el equipo BESS, acelerando así una degradación que afecta a la vida útil del BESS.
- Esta investigación demostró que las unidades de generación basadas en energías renovables, como los aerogeneradores y los generadores fotovoltaicos, podrían participar en la respuesta primaria en frecuencia teniendo en cuenta el sistema de reducción de potencia a nivel de los convertidores CC-CC y CC-CA, lo que permitiría minimizar el uso de los equipos BESS y aumentar su vida útil.
- Las variaciones en la demanda de potencia y la intermitencia de los recursos naturales requieren que los controladores de frecuencia proporcionen una respuesta rápida para reducir las variaciones de frecuencia. El esquema de control por derrateo en una micro-red aislada basada en convertidores de potencia mejoran la capacidad de respuesta del sistema frente a las variaciones de carga obteniendo un control óptimo de la frecuencia. La respuesta del sistema en los casos de estudio presentados es inferior a 0,1 segundos, evitando descargas profundas de los BESS. De este modo, la vida útil de los BESS no se ve afectada.

- El control de la potencia de derrateo presentado en este trabajo de investigación permite evitar incurrir en costes de sustitución anticipada asociados al reemplazo de los equipos BESS.

Recomendaciones

- Se recomienda la inserción de otra fuente de generación renovable para tener una micro-red eléctrica más robusta al momento de que se presenten variaciones altas de demanda.
- Realizar un estudio técnico-económico de los controladores que se utilizan en el sistema Fotovoltaico y en la planta eólica para el despacho de energía (activos/reactivos) e incorporar funcionamiento tipo grid-forming.

Bibliografía

- Abu-elzait, S. (2019). Economic and Environmental Advantages of Renewable-based Microgrids over Conventional Microgrids. *IEEE*.
- Arboleya, P. (2015). Efficient energy management in smart micro-grids: ZERO grid impact buildings. *IEEE Trans. Smart Grid*, 1055–1063.
- Bianchi, G. a. (2019). Design of a high-temperature heat to power conversion facility for testing supercritical CO2 equipment and packaged power units. *Energy Procedia*, 421--428.
- Castruonova, & Lopez. (2004). Operación óptima y dimensionamiento hidroeléctrico de una planta de energía eólica e hidráulica. *Internacional Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 771-778.
- Cieslak, C., & Grunwald, L. (2019). c. Modelado de inercia sintética de turbinas eólicas para estudios de estabilidad de sistemas de energía dinámica.
- Cieslak, C., & Grunwald, L. (2019). Modelling Synthetic Inertia of Wind Turbines for Dynamic Power System Stability Studies. *Institute for High Voltage Technology*.
- CIGRE, G. m. (Diciembre de 2020). *CIGRE for power system expertise*. Obtenido de <https://www.cigre.org/>
- COLOMBIA, C. (Abril de 2021). *CIGRE COLOMBIA*. Obtenido de <http://www.cigrecolombia.org/Documents/Documentos-t%C3%A9cnicos/DT%20JWG%20C6.C5.4.%20Regulaci%C3%B3n%2C%20normativa%20y%20nuevos%20mercados%20en%20microrredes%20en%20el%20sector%20el%C3%A9ctrico%20colombiano.pdf>
- Falahati, B., & Fu, Y. (2012). Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies. *IEEE Trans. Smart Grid*, 1515–1524.

- Gao, Q. a. (2017). Improving frequency stability in low inertia power systems using synthetic inertia from wind turbines. *2017 IEEE Manchester PowerTech*, 1--6.
- Gonzalez-Longatt, F. a. (2013). Effects of the synthetic inertia from wind power on the total system inertia after a frequency disturbance. *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 826--832.
- Hart., D. W. (2013). *Electrónica de Potencia*. Angewandte Chemie International Edition, 6(11).
- Hossain, M. A. (2019). Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 160--186.
- IRENA. (12 de Enero de 2020). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de <https://www.irena.org/>
- Jianqing, L. (2017). Operation and Regulation Scheme and the Application for Microgrids. *IEEE*.
- Liu, Z. a. (2014). An optimal under-frequency load shedding strategy considering distributed generators and load static characteristics. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 75--90.
- Matysik, L. B. (2011-2023). *Wind-Turbine-Models*. Obtenido de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/1372-windspot-7.5kw>
- Mendieta, W., & Canizares, C. (2020). Control de frecuencia primaria en microrredes aisladas usando cargas termostáticamente controlables. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*.
- Murdoch, S. (2013). Design and Implementation of a MPPT Circuit for a Solar UAV . *IEEE Latin America Transactions*, 11(1).

- Ned Mohan, T. M. (2009). Convertidores, aplicaciones y diseños. En N. Mohan, *Electronica de Potencia* (págs. 144--156). Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.
- Neto, P. B. (2020). The impact of equalization cycle on the storage system lifetime in PV-based isolated microgrids. *2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA)*, 1--5.
- Nguyen, H. T. (2017). Frequency stability enhancement for low inertia systems using synthetic inertia of wind power. *2017 IEEE power & energy society general meeting*, 1--5.
- Nguyen, H. T. (2017). Frequency Stability Enhancement for Low Inertia Systems using Synthetic Inertia of Wind Power. *IEEE*.
- Ortiz-Villalba, D. a. (2020). Practical framework for frequency stability studies in power systems with renewable energy sources. *IEEE Access*, 202286--202297.
- Pérez, P. (2017). *Descripción e infraestructura de una micro-red para un entorno residencial*. Valladolid.
- Quence Gao, R. P. (2017). Mejora de la estabilidad de frecuencia en sistemas de energía de baja inercia utilizando inercia sintética de turbinas eólicas.
- Reihani, E. a. (2018). Frquency regulation of microgrid with battery droop control. *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 1--5.
- Robin Preece, G. Q. (2017). Improving Frequency Stability in Low Inertia Power Systems Using Synthetic Inertia from Wind Turbines. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- Sahay, K. B. (2018). Implementation of MPPT Technique in PV Array For a Varying Load by Modeling and Simulation . *IEECON 2018, Krabi, Thailand*.

- Sitompul, S. a. (2020). Implementation of BESS load frequency control in islanded microgrid system by considering SOC. *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 980--984.
- Sturario, A., Silvestri, S., & Conti, M. (2016). Towards a realistic model for failure propagation in interdependent networks. *Int. Conf. Comput. Netw. Commun. . Washington*.
- Taczi, I. (2017). Enhancing power system frequency stability with synthetic inertia. *IEEE EUROCON 2017-17th International Conference on Smart Technologies*, 960--965.
- Taczi, I. (2017). Enhancing Power System Frequency Stability with Synthetic Inertia. *IEEE EUROCON*.
- Vokony, I. (2017). Effect of inertia deficit on power system stability-synthetic inertia concepts analysis. *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 1--6.
- Wu, D. a. (7140- 7145). Coordinated primary and secondary control with frequency-bus-signaling for distributed generation and storage in islanded microgrids. *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013.
- Yang, S. a. (2018). Synthetic-inertia-based modular multilevel converter frequency control for improved micro-grid frequency regulation. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 5177--5184.

Anexos