

**CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA  
EMPELANDO UN CONVERTIDOR POR FUENTE DE  
TENSIÓN PARA APLICACIONES DE GENERACIÓN  
DISTRIBUIDA**

NICOLÁS ANDRÉS RAMÍREZ BELTRÁN

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
**Ingeniero Electricista**

Director

M.Sc. Oscar Danilo Montoya G.

Co-Director

Ph.D. Alejandro Garcés Ruíz

Pereira, Junio de 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Programa de Ingeniería Eléctrica



# Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

M.Sc. Oscar Danilo Montoya G.. Director

---

Ph.D. Alejandro Garcés Ruíz . Co-Director

---

Jurado

Pereira, Junio de 2017

CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EMPELANDO UN CONVERTIDOR  
POR FUENTE DE TENSIÓN PARA APLICACIONES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA  
©NICOLÁS ANDRÉS RAMÍREZ BELTRÁN

Pereira, Junio de 2017

Programa de Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira

Carrera 27 No 10-02 Barrio Alamos - Risaralda - Colombia

TEL: (+57)(6)3137122

*www.utp.edu.co*

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

# Dedicatoria

Este trabajo esta dedicado a:

A Dios por el apoyo que encontré en Él en los momentos más difíciles.

A la gran familia que DIOS me regalo por alentarme todo el tiempo, mi abuelita María Fernández Arias, , y en especial a mis padres Mary Isabel Beltrán Fernández y Ricardo Ramírez Sánchez .

Mis hermanos Ivan Ricardo y Carlos Alfredo por su gran apoyo.

A mi adorable novia María Fernanda, por su amor, entusiasmo y su apoyo incondicional.

# Agradecimientos

A mis asesores Ph.D Alejandro Garcés Ruiz, en especial, al M.Sc Oscar Danilo Montoya Giraldo por permitir trabajar con él, y por ayudar en mi formación académica y en la realización de este trabajo de grado.

De manera especial agradecimientos a la Familia Beltrán y Familia Ramírez, por su apoyo incondicional.

# Resumen

En este proyecto de grado, se plantea el problema de la gestión del flujo de potencia activa y reactiva desde un recurso energético distribuido explorando el diseño de controladores para convertidores por fuentes de tensión garantizando así, la estabilidad global del control. Se demuestra con pruebas formales de estabilidad, como las estrategia de control basadas en pasividad para una representación no lineal y lineal puede resolver este problema, estableciendo una solución viable y de fácil implementación.

La evaluación de la estrategia de control se llevó a cabo en dos etapas. En la primera, se evaluó numéricamente las propiedades del controlador pasivo para cuando solo se presentan cambios de potencia activa de entrada. En la segunda etapa, se evaluó numéricamente las propiedades de estabilidad del controlador pasivo para cuando se presentan inyección o consumo de potencia reactiva por parte del convertidor. El desarrollo se realizó mediante la herramienta de solución de ecuaciones diferenciales ordinarias ODE45 disponible para MATLAB.

Los resultados aquí presentados son de gran utilidad, ya que se tiene información acerca de la gestión de la potencia activa que se obtiene a partir de una fuente de generación de energía renovable la cual se simula a partir de una inyección de potencia  $P_s$  y también del consumo o suministro a la red de potencia reactiva por parte del convertidor, permitiendo con ello determinar cual de los diseños aquí presentados presentan un mejor desempeño.

# Índice general

Resumen	III
Índice general	v
Índice de tablas	VI
Índice de figuras	VII
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	4
1.2. Alcance del trabajo . . . . .	6
1.3. Estructura del documento . . . . .	6
<b>2. Sistemas Dinámicos Pasivos</b>	<b>8</b>
2.1. Sistemas dinámicos autónomos y no autónomos . . . . .	8
2.2. Generalidades de la energía en el control . . . . .	9
2.3. Control basado en pasividad . . . . .	10
2.4. Sistemas de Hamilton . . . . .	12
2.5. Método IDA-PBC . . . . .	15
2.6. Análisis de estabilidad . . . . .	17
<b>3. Modelo del Convertidor</b>	<b>19</b>
3.1. Sistema . . . . .	19
3.2. Modelado matemático . . . . .	20
3.3. Equivalente no lineal de Hamilton . . . . .	21
3.4. Equivalente lineal de Hamilton . . . . .	23

<b>4. Metodología Propuesta</b>	<b>24</b>
4.1. Aspectos considerados . . . . .	24
4.2. Descripción diseño del controlador . . . . .	25
4.2.1. Diseño del controlador no lineal . . . . .	27
4.2.2. Diseño del controlador lineal . . . . .	27
<b>5. Aplicación y Resultados</b>	<b>29</b>
5.1. Consideraciones . . . . .	29
5.2. Cambio de potencia activa de entrada . . . . .	31
5.2.1. Caso I . . . . .	31
5.2.2. Caso II . . . . .	33
5.3. Cambio de potencia reactiva . . . . .	36
5.4. Análisis de resultados . . . . .	39
<b>6. Conclusiones</b>	<b>41</b>
6.1. Futuros trabajos de investigación . . . . .	42
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>

# Índice de tablas

5.1. Parámetros del Controlador . . . . .	30
5.2. Parámetros del FEC y la red . . . . .	30

# Índice de figuras

2.1. Función de energía de un sistema pasivo . . . . .	12
2.2. Moldeo de energía del sistema pasivo . . . . .	13
3.1. Convertidor de frente activo - FEC . . . . .	19
5.1. Configuración del sistema de prueba . . . . .	30
5.2. Tensión de la barra de DC . . . . .	32
5.3. Potencia activa . . . . .	32
5.4. Potencia reactiva . . . . .	33
5.5. Tensión de la barra de DC . . . . .	34
5.6. Potencia activa . . . . .	35
5.7. Potencia reactiva . . . . .	35
5.8. Tensión de la barra de DC . . . . .	37
5.9. Potencia activa . . . . .	38
5.10. Potencia reactiva . . . . .	38
5.11. Tensión de la barra de DC . . . . .	40
5.12. Corrientes $i_d$ e $i_q$ . . . . .	40

# Capítulo 1

## Introducción

El constante crecimiento de la demanda, en conjunto con el agotamiento de los combustibles fósiles y la creciente preocupación asociada a los devastadores efectos del cambio climático, han impulsado a los gobiernos a generar incentivos económicos para las empresas del sector eléctrico que fomenten la inclusión de fuentes de energía alternativa para que operen de manera confiable, eficiente y segura [1].

Para atender el problema del cambio climático se recomienda integrar la generación distribuida a la red de distribución mediante el uso de fuentes renovables, el termino de generación distribuida es comúnmente utilizado para describir la generación de electricidad cerca de los centros de consumo, cuyas ventajas principales son : minimizar las pérdidas de energía y minimizar el costo de la generación distribuida; bajo impacto ambiental; aumento de indicadores de calidad; entre otros [2].

La integración de recursos energéticos distribuidos, presupone nuevos retos entorno a la operación del sistema eléctrico bajo el concepto de red inteligente, y más recientemente, bajo el concepto de micro-red. Una micro-red, es en esencia la integración eficiente, segura y confiable de recursos energéticos distribuidos que tienen la capacidad de atender a la demanda considerando dos posibles modos de operación. En primer lugar está el modo interconectado, donde la micro-red opera conjuntamente con la red de distribución, la cual asegura la frecuencia y el nivel de tensión del sistema; y en segundo lugar se presenta un escenario de operación en modo isla, en el cual la micro-red se encarga de atender de manera eficiente, confiable y segura a toda la demanda [3].

En la operación de micro-redes es necesario replantear el concepto de flujo de potencia como se ha trabajado de manera clásica en los sistemas de distribución convencionales; situación que se presenta debido a que la integración eficiente de recursos energéticos distribuidos implica la necesidad de emplear convertidores electrónicos de

potencia de tipo DC/AC, con los cuales es posible acoplar el sistema de generación alternativa, como paneles solares, generación eólica o sistemas de almacenamiento de energía, como baterías, supercondensadores o superconductores, entre otros, al sistema eléctrico de potencia. Cuando son integrados estos recursos energéticos distribuidos, los sentidos de flujos de potencia cambian, lo cual requiere del desarrollo de nuevas estrategias de operación y control [4].

Los convertidores electrónicos de potencia juegan un papel importante en los sistemas eléctricos, ya que permite una conexión eficiente y flexible entre las etapas de generación y la red eléctrica. Además, en los últimos años las investigaciones han demostrado que los dispositivos electrónicos de potencia son opciones viables y competitivas para la operación de la red de distribución bajo el concepto de red inteligente. Mediante la utilización de estos dispositivos, se obtienen considerables beneficios: 1) Atender a los clientes desconectados por la ocurrencia de una falla en la red principal a través de la transferencia de potencia sin interrupciones del alimentador secundario (generación distribuida); 2) El flujo de potencia a través del alimentador secundario puede ser controlado para equilibrar la carga.

En las referencias [5]- [6], se presentan diferentes estudios de casos donde muestran los efectos de la electrónica de potencia sobre el control de tensión de DC, reducción de pérdidas, y el control de flujo de potencia [7].

Con la ayuda del convertidor AC/DC basado en los convertidores tipo fuente de tensión (VSCs), estos ofrecen un método típicamente usado para procesar eficientemente el flujo de potencia en sistemas híbridos, con lo que permite el control independiente de los flujos en ambas direcciones, a partir del diseño de técnicas de control basadas en la dinámica del sistema [8].

En este tipo de sistemas, el convertidor que está conectado a la red, es conocido con el nombre de convertidor de frente activo (FEC) y está constituido por un VSC y un filtro resistivo-inductivo que permite suavizar las corrientes inyectadas a la red. La utilización de un VSC para implementación del FEC presenta características muy atractivas para la operación del sistema eléctrico, tales como; el flujo de potencia bidireccional y baja distorsión armónica en la salida, lo cual implica, que si existen recursos energéticos suficientes un control adecuado sobre los VSC tienen la capacidad de ofrecer soporte de tensión y frecuencia para atender a todos los usuarios finales [6].

## 1.1. Estado del arte

En esta sección se presenta un breve panorama sobre las distintas tendencias que se involucran en esta temática.

Se han propuesto un gran número de soluciones basadas en la electrónica de potencia para el control del flujo de potencia en los sistemas eléctricos, como se muestra en [9], la administración de potencia activa y reactiva de forma independiente de un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red eléctrica utilizando un nuevo enfoque de control no lineal para el VSC, donde en lugar de controlar las corrientes del eje directo y del eje de cuadratura, son empleadas las potencias activas y reactivas instantáneas como parámetros de control.

En [3] proponen la interconexión de dos micro-redes mediante VSCs junto con controladores locales, con el fin de mantener la frecuencia en situaciones de emergencias, estas dos micro-redes podrían desempeñar un auxilio en potencia para el uno y al otro sin la necesidad de implementar un enlace de comunicación entre los dos micro-redes. Los resultados de simulación muestran que los VSCs con la estrategia de control propuesta puede mejorar con eficacia la tarea de control de frecuencia de los dos micro-redes de forma simultánea.

En [4] se presenta un método para mejorar la calidad de la energía mediante el control del flujo de potencia activa y reactiva entre la red principal y la micro-red a través del inversor. Es utilizada la transformada de *Park* para obtener las corrientes  $i_d$  y  $i_q$ , y así desacoplar la potencia activa y reactiva para realizar un control proporcional-integral (PI) con realimentación y otro con métodos basados en modelos predictivos de control.

En [10] presentan un controlador de lógica difusa para el funcionamiento autónomo (en isla) de una unidad de generación distribuida interconectado electrónicamente con su carga. En el modo conectado a la red, el VSC hace funcionar en el modo de control de potencia activa y reactiva (PQ), y se utiliza un esquema de control convencional para controlar el intercambio de potencia activa y reactiva con la red. En el modo en isla, el controlador difuso propuesto se utiliza para controlar la tensión del sistema, a pesar de la variabilidad de la carga y las incertidumbres por lógica difusa, en donde el VSC gestiona el control de potencia entre la generación distribuida y la red de distribución, en ese sentido ponen de manifiesto la superioridad del controlador propuesto en relación los controladores proporcionales-integrales convencionales a través de la comparación de las respuestas transitorias del sistema.

En [11] proponen un nuevo método de control para el sistema de VSC-HVDC. El modelo de la red es transformador en un equivalente entre la entrada y la salida. Luego

al modelo resultante le es aplicada una técnica clásica de realimentación de variables de estado por re-ubicación de polos.

Los autores de [12] utilizan la transformada el marco de referencia  $0dq$  para desacoplar las componentes activas y reactivas del sistema AC en los modelos de control PI, en donde los VSC juegan un papel importante junto con la generación distribuida, con lo que compensan el desequilibrio de tensión en una micro-red. Para esto, el control de potencia activa, control de frecuencia, los esquemas del control de potencia reactiva y la caída de tensión, deciden las referencias del esquema positivo de control de tensión. Con el fin de cumplir el objetivo de utilizar los mismos esquemas de control para ambos modos de operación de la micro-red.

En [13] se tiene un sistema fotovoltaico con máximo punto de transferencia de potencia conectado a una red eléctrica mediante un inversor VSC en una sola etapa, la estrategia de control que aplicada se basa en la teoría p-q. De acuerdo con esta estrategia, durante el tiempo en que la luz del sol este disponible, el sistema envía la potencia activa a la red y al mismo tiempo compensa la potencia reactiva de carga por medio del inversor. En caso de que no hay luz solar (durante la noche), el convertidor solo compensa la potencia reactiva de la carga. La ventaja de esta estrategia de control es que el sistema fotovoltaico se hace funcionar todo el día. Además, la teoría p-q utiliza cálculos algebraicos simples sin exigir el uso de un PLL para sincronizar el inversor con la red.

Para [14], el objetivo de este documento es proponer un controlador de corriente multivariable de convertidores con fuente de tensión conectadas a la red a través de un filtro inductivo-capacitivo-inductivo. La propuesta es un servo-control lineal cuadrático, que utiliza un estimador de orden completo para obtener el vector de estados. Hay dos tipos de estimadores que proponen y se compararon: estimador de predicción y estimador de *Luenberger*. El comportamiento y la robustez del controlador es ensayada en presencia de perturbaciones de la red y los desajustes en los parámetros del modelo.

En [15] propone un nuevo modelo dinámico multivariable y un enfoque de control para el VSC, basado en la obtención de componentes de potencia reactiva real e instantáneas como la variable dinámica del VSC. El uso de componentes de potencia, como las variables dinámicas, reduce el grado de no linealidades del modelo VSC en comparación con el modelo VSC convencional que utiliza  $qd$  componentes actuales como variables. Además, puesto que las formas de onda de las componentes de potencia son independientes de los seleccionados en las coordenadas  $qd$ , hace que el control propuesto sea más robusto.

Los autores de [16], con el fin de mejorar el rendimiento de rectificadores PWM

de fuente de tensión trifásica, presentan una estrategia de control basado en pasividad (PBC). Emplean un modelo Hamiltoniano controlado por puertos con disipación (PCHD) formulado a partir del circuito de potencia de los rectificadores. .

En la breve revisión bibliográfica realizada, es evidente la gran utilidad de los convertidores DC/AC en los sistemas eléctricos de potencia, ya que presentan grandes beneficios a la hora de una conexión eficiente y flexible de las fuentes de generación distribuida a la red eléctrica. Por lo cual en este proyecto de grado se propone el diseño de controladores lineales y no lineales para un VSC con el fin de gestionar el flujo de potencia activa y reactiva desde una fuente de generación distribuida hacia la red eléctrica o viceversa.

## 1.2. Alcance del trabajo

Con la realización de este trabajo se pretende diseñar un sistema de control de potencia activa y reactiva empleando un VSC para aplicaciones de generación distribuida con lo que se procesa eficientemente el flujo de potencia en sistemas híbridos, ya que permite el control independiente de los flujos en ambas direcciones, a partir del diseño de técnicas de control basadas en la dinámica del sistema.

Dados los beneficios que trae el control de potencia activa y reactiva empleando los VSC, en este trabajo se propone una metodología de que garantice la estabilidad global del sistema en lazo cerrado, en donde se desea que este trabajo investigativo demuestre formalmente que un controlador IDA-PBC puede usarse para controlar de manera eficiente y segura el flujo de potencia activa y reactiva entre un sistema de generación eléctrica y la red eléctrica. Para esto se recurre a la teoría Hamiltoniana, que ha demostrado resolver problemas de regulación de puntos de equilibrio de manera eficiente y sencilla. Se recurre a la utilización de la teoría de Hamilton desde la óptica de sistemas pasivos, ya que el modelo del sistema encaja perfectamente en esta formulación.

## 1.3. Estructura del documento

Este proyecto de grado está dividido de la siguiente forma. En el capítulo 2 se presenta algunas generalidades de la energía en el control, además de la metodología del control basado en pasividad, así como los sistemas Hamiltonianos, método IDA-PBC y finalmente el análisis de estabilidad del sistema.

En el capítulo 3 se describe la constitución del convertidor de frente activo, la

dinámica de su modelo y las posibles simplificaciones que se pueden hacer desde un punto de vista práctico, posteriormente la transformación del modelo del FEC en el marco de referencia  $0dq$  y finalmente la representación del sistema mediante el PCH, para poder así diseñar los controladores mediante el método IDA-PBC.

En el capítulo 4 se presentan las estrategias de control propuestas, con la finalidad de inyectar toda la potencia disponible del lado DC a la red y controlar la potencia reactiva intercambiada con la misma.

En el capítulo 5 se presentan los escenarios de trabajo que se utilizaron. Con la ayuda de las herramientas que ofrece MATLAB se puede establecer el desempeño de los controladores basados en la teoría de pasividad y así mostrar finalmente que se alcanzaron las propiedades de estabilidad deseadas.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y las propuestas sobre trabajos futuros relacionados con la temática estudiada en este trabajo de grado.

# Capítulo 2

## Sistemas Dinámicos Pasivos

En el análisis de sistemas físicos, el concepto de energía resulta de gran utilidad para deducir el comportamiento del sistema dinámico. Además para el análisis de estabilidad, es muy útil manejar este concepto para estudiar las propiedades que describen un sistema, como es el caso de los sistemas disipativos. Estos sistemas se definen en [17] como sistemas para los cuales una función de energía de entrada y una de energía almacenada pueden ser encontradas con la propiedad de que siempre disipara energía.

Existen diferentes tipos de sistemas disipativos, los cuales se definen de acuerdo al tipo de entrada de control (energía de entrada) del sistema. Una importante clase de sistemas disipativos es la clase de sistemas pasivos, en los cuales, como en el caso de las redes eléctricas, la energía de entrada está dada por el producto escalar entre las variables de entrada y salida del sistema.

Una clase de controladores que surgen bajo este concepto es el llamado controlador basado en pasividad, esto debido a que explota las propiedades de pasividad propias del sistema dinámico. Comparado con los métodos de linealización, lo que se espera de estos esquemas que usualmente son llamados controladores, pasivos es que tengan unas características operativas más robustas, al tiempo que se minimiza la complejidad en el diseño del control.

### 2.1. Sistemas dinámicos autónomos y no autónomos

Un sistema dinámico es autónomo si está representado por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que no dependen explícitamente del tiempo, con la forma:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.1)$$

Si al sistema dinámico lo modela un conjunto de ecuaciones diferenciales que dependen explícitamente del tiempo se denominan sistemas dinámicos no autónomos y toman la forma:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.2)$$

La diferencia entre (2.1) y (2.2) radica en que la primera no contiene ningún estímulo externo al sistema que fuerce el comportamiento natural de la dinámica del sistema, mientras que (2.2) sí. La función que fuerza el comportamiento del sistema (2.2) puede ser constante, periódica, aleatoria, etc.

## 2.2. Generalidades de la energía en el control

Ahora bien, el concepto de energía provee una magnitud escalar cuya evolución resume de alguna forma, la del propio sistema dinámico. Con esto se quiere decir, que el sistema evoluciona de la forma autónoma hacia el estado en el que la energía se hace mínima, esto desde la perspectiva física. Bajo el concepto de transformar del sistema hacia el estado de energía mínima, le sirvió a Lyapunov para idear su conocido método el cual es una extensión matemática de las observaciones físicas, es decir, si la energía total de un sistema se disipa de manera continua, entonces dicho sistema, ya sea lineal o no lineal, se estabiliza en un punto de equilibrio, concluyendo que la estabilidad de un sistema se puede determinar con la variación de una sola función escalar. Con el tiempo este método se conoció como como funciones de Lyapunov, que es en esencia una función  $V(x)$  que tiene las mismas propiedades matemáticas que la energía, es decir:

- La función de energía en el punto de equilibrio es nula, es decir,  $V(x^*) = 0$ .
- La función de energía del sistema es definida positiva para todo punto diferente al punto de equilibrio es nula, es decir,  $V(x^*) = 0$  y  $V(x) > 0$ ,  $\forall x \neq x^*$ .
- El sistema disipa energía a medida que el tiempo incrementa, es decir,  $\dot{V}(x) < 0$ ,  $\forall x \neq x^*$

Con la participación de las funciones de Lyapunov  $V(x)$ , el enigma del control se puede proponer, de forma abstracta y simple. Suponga que se tiene una planta la cual se representa con un función no lineal como se plantea en la ecuación (2.1).

Se sabe que la solución al problema de control es determinar una función  $u = k(x)$ , y con esto tener un sistema en bucle cerrado de la forma:

$$\dot{x} = f(x, k(x)) = F(x) \quad (2.3)$$

Este comportamiento intuye la propiedad de estabilidad en el origen, lo que lleva a que estas trayectorias de (2.3) tiendan al mínimo establecido por la función de Lyapunov  $V(x)$ , es decir:

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x, k(x)) < 0 \quad (2.4)$$

Con la gran contribución de Lyapunov a la solución de los problemas de control y a los conceptos de comportamiento de la energía, a planteado la situación aunque no tenga el mismo significado físico que la función  $V(x)$  posee las mismas propiedades matemáticas que las que se tiene en la energía. De este modo se puede generalizar considerablemente el control basado en la energía al control basado en la existencia de la función de Lyapunov.

Una generalización adicional, que se esta adoptando en nuestros días con mayor frecuencia, y es de moldear un problema de control a una estructura Hamiltoniana, la cual conserva algunas propiedades de las funciones de Lyapunov, por lo que se puede obtener una simplificación para el procesamiento de los sistemas dinámicos que acepten esta formalización [18]. Una herramienta fundamental para el análisis de estabilidad de los sistemas dinámicos es el método directo de Lyapunov el cual se muestra en la sección 2.6.

## 2.3. Control basado en pasividad

Una de la técnicas que mayor interés ha despertado en la comunidad del control de sistemas subactuados por sus múltiples aplicaciones y por su entorno al uso de la intuición física en la labor del ingeniero, es la teoría de *pasividad*. Para su entendimiento es preciso establecer el papel de la energía en el control.

Si al analizar una ley de control que actúa sobre un sistema, sabemos discernir qué términos mantienen la energía constante, cuales tiene un efecto disipativo, y cuales inyectan energía al sistema, se arroja una luz necesaria para el problema de la estabilización, abriendo paso a las tareas subsiguientes de ajuste y refinamiento del comportamiento transitorio.

En la literatura especializada [19] y [20] reportan que el control PBC es una de las técnicas más eficientes y robustas de diseño para el control de sistemas lineales y no lineales. Además, en [21] reporta que el método está dirigido a los sistemas en que los parámetros concentrados están interconectados a su entorno por algún puerto de potencia, las cuales se caracterizan por tener unidades de potencia, como es el ejemplo para los sistemas eléctricos las variables de corriente y voltaje. En esa dirección se puede resumir a los sistemas pasivos a partir de la ecuación de balance de energía.

$$\underbrace{H(x(t)) - H(x(0))}_{\text{Energía almacenada}} = \underbrace{\int_0^t u^T(s)y(s)ds}_{\text{Energía suministrada}} + \underbrace{E(x(t))}_{\text{Energía generada internamente}} \quad (2.5)$$

donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estados,  $H(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  es la función de energía total del sistema y  $E(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  es la función que representa la energía generada internamente en el sistema.

Si se observa la ecuación (2.5) el término de la derecha es llamado energía generada internamente y es la que constituye la naturaleza pasiva de un sistema, ya que para estos sistemas se les suministra una energía y este solo puede almacenarlo o disiparlo. Entonces para un sistema pasivo se puede compactar en términos de la energía que se disipa de la siguiente manera,

$$\underbrace{H(x(t)) - H(x(0))}_{\text{Energía almacenada}} = \underbrace{\int_0^t u^T(s)y(s)ds}_{\text{Energía suministrada}} - \underbrace{D(x(t))}_{\text{Energía disipada}} \quad (2.6)$$

donde  $D(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  es una función positiva que recoge los efectos de disipación de energía en el sistema, por ejemplo, los que se presentan en los sistemas eléctricos asociados a las resistencias y en los sistemas electromecánicos asociados a los efectos de la fricción, entre otras.

En la figura 2.1 se muestra esquemáticamente el comportamiento de la función de energía de un sistema pasivo, donde se destaca el hecho de que el sistema tiene un punto mínimo de energía.

Lo que busca la técnica PBC es influir en el diseño de los controladores de tal manera que adhiera unos principios energéticos. Con lo que se incluye una visión al control con interconexión, viendo a la planta y al controlador como procesadores de energía interconectados. Entonces si el sistema al que se le va a controlar tienen unos principios energéticos y satisfacen el balance de energía para un sistema pasivo, lo que

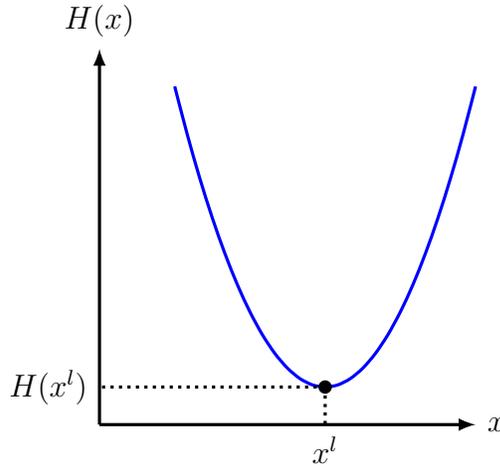


Figura 2.1: Función de energía de un sistema pasivo

resta es introducirle unas nuevas funciones de energía que conlleve a tener una condición deseada sin que esto llegue a destruir la esencia pasiva del sistema, como lo expresa [19]. La visión que se quiere obtener en la técnica de control se refleja en la figura 2.2, donde se evidencia la finalidad de plantear una nueva función de energía que conlleve a un punto deseado ( $x^*$ ) y este, esté definido en la función del sistema pasivo, donde es de mucha importancia asignarle esa condición con el fin de obtener estabilidad al momento de alcanzar las condiciones deseadas de operación.

Pero en las técnicas de control siempre surgen nuevos retos los cuales se ven reflejados a la hora de controlar los sistemas subactuados, donde el número de estados es mayor al número de grados de libertad, ya que es necesario moldear la función de energía total del sistema (potencial más cinética). Un claro ejemplo en donde se presentan este comportamiento son los sistemas electromecánicos (maquinas eléctricas rotativas). Para afrontar este comportamiento se requiere una intervención del sistema a lo largo de las trayectorias de referencia que fuerzan a obtener de alguna u otra manera los estados no actuados del sistema y esto es posible de solucionar con la ayuda que se desarrolló en [22] el cual refleja una metodología de control basado en PBC.

## 2.4. Sistemas de Hamilton

Siguiendo la definición dada en [23], la clase de sistemas PCH puede describirse

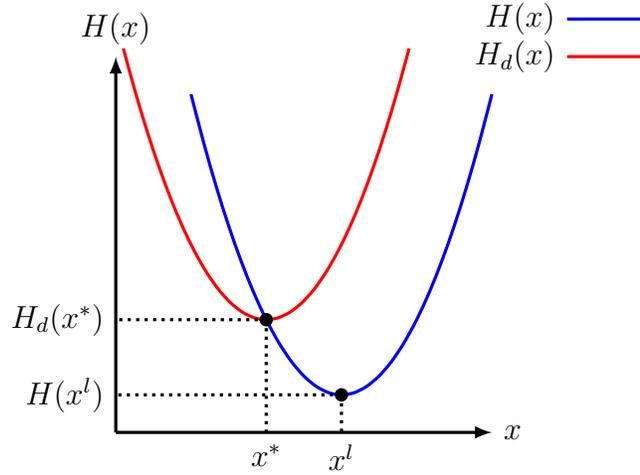


Figura 2.2: Moldeo de energía del sistema pasivo

$$\dot{x} = J(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u, \quad x \in X, \quad u \in \mathbb{R}^m \quad (2.7)$$

$$y = g(x)^T \frac{\partial H}{\partial x}, \quad y \in \mathbb{R}^m, \quad (2.8)$$

donde  $J(x)$  es una matriz  $n \times n$  con entradas continuas y derivables que dependen de  $x$ , la cual se asume *antisimétrica*, es decir:

$$J(x) = -J(x)^T, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n, \quad (2.9)$$

El sistema de ecuaciones (2.7) y (2.8) se define por un sistema de variables de múltiples estados  $x \in \mathbb{R}^n$ , caracterizado por tres términos, así:  $J(x)$  y  $g(x)$  capturan la estructura de interconexión del sistema, en particular  $g(x)$  modela los puertos del sistema; mientras el Hamiltoniano  $H(x)$  define la energía almacenada. Calculando la derivada temporal del Hamiltoniano  $H(x)$  a lo largo de las trayectorias del par de ecuaciones (2.7) y (2.8), se encuentra una propiedad básica de estos sistemas, la cual se refiere al balance energético.

$$\frac{dH(x(t))}{dt} = u(t)^T y(t), \quad (2.10)$$

Debido a la característica antisimétrica de  $J(x)$ , este sistema tiene una estructura interna de conservaciones de potencia; por otro lado,  $u$  y  $y$  corresponden a las de potencia de los puertos definidos por  $g(x)$ , por lo que  $u(t)^T y(t)$  es la potencia externa suministrada al sistema. Por lo tanto, si  $H(x)$  es no-negativo (o acotado por abajo) entonces el sistema Hamiltoniano de las ecuaciones (2.7) y (2.8) es conservativo.

La disipación de energía puede incluirse por medio de algunos puertos terminales considerado, en vez de  $g(x)u$ , el termino siguiente:

$$\begin{bmatrix} g(x) & g_R(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u_R \end{bmatrix} = g(x)u + g_R(x)u_R, \quad (2.11)$$

Extendiendo este término a la ecuación de salida  $y = g(x)^T (\frac{dH}{dx})$ , se llega a:

$$\begin{bmatrix} y \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(x)^T (\frac{\partial H(x)}{\partial x}) \\ g_R(x)^T (\frac{\partial H(x)}{\partial x}) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En (2.11) y (2.12), los términos  $u_R, y_R \in \mathbb{R}^{m_r}$  denotan las variables de potencia en los puertos donde se tienen los elementos resistivos estáticos, con  $\mathbb{R}^{m_r}$  como el espacio vectorial donde están definidos:

$$u_R = -F(y_R), \quad (2.13)$$

donde la característica resistiva  $F : \mathbb{R}^{m_r} \rightarrow \mathbb{R}^{m_r}$  satisface:

$$y_R^T F(y_R) \geq 0, \quad y_R \in \mathbb{R}^{m_r} \quad (2.14)$$

Para este caso, el termino de la energía disipada en la ecuación (2.6) en el intervalo  $[t_0, t_1]$  esta dado por,

$$D(x(t)) = \int_{t_0}^{t_1} y(t)^T F(y_R(t)) dt \quad (2.15)$$

Con la energía disipada definida en (2.15), la propiedad del balance de energía toma la forma siguiente:

$$H(x(t_1)) = H(x(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} u_T(t)y(t)dt - \int_{t_0}^{t_1} y(t)^T F(y_R(t))dt, \quad (2.16)$$

Si se define el efecto disipativo como un valor positivo, y si observa que si  $H(x)$  esta acotada por una constante  $c$  entonces el sistema es pasivo. Finalmente, si se considera que los elementos disipativos son lineales, es decir:

$$u_R = -Ay_R, \quad (2.17)$$

Existe entonces alguna matriz  $A = A_T \geq 0$ , entonces el sistema Hamiltoniano es llamado sistema Hamiltoniano Controlado por Puertos con Disipación (PCHD) y puede escribirse como:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u, \quad x \in X, \quad u \in \mathbb{R}^m \quad (2.18)$$

$$y = g(x)^T \frac{\partial H(x)}{\partial x}, \quad y \in \mathbb{R}^m \quad (2.19)$$

Si se sustituye (2.17) en (2.11), donde  $R(x) := g_R(x)A(g_R(X))^T$  es una matriz simétrica definida positiva, dependiente de  $x$  de tal manera que sea continua y derivable. Con ello, lo que se tiene en un PCHD. Es importante hacer notar que para este caso dos estructuras geométricas juegan un papel importante: la estructura interna de conexión dada por  $J(x)$ , y la estructura resistiva adicional por  $R(x)$ .

## 2.5. Método IDA-PBC

El método de diseño IDA-PBC es particularmente importante para sistemas subactuados y originalmente fue formulado para sistemas Hamiltonianos. En el capítulo 3 se mostrará la aplicación del método a sistemas eléctricos subactuados. Es por ello que en los inicios de esta técnica, se plantea una estructura Hamiltoniana, tanto para el sistema en lazo abierto, como para la dinámica deseada del sistema. La estructura Hamiltoniana con elementos disipativos se da en la ecuación (2.18).

El método basado en pasividad conocido como control basado en pasividad por asignación de interconexión y amortiguamiento o IDA-PBC fue introducido en [24]. Esencialmente consiste en partir de una estructura PCH en lazo abierto y obtener otra en lazo cerrado con las propiedades de estabilidad deseadas. Igualmente de las ecuaciones de lazo abierto y del sistema deseado se obtiene la ley de control. Sin embargo, la filosofía del mismo no es mas que la búsqueda de una función de energía y una estructura Hamiltoniana para el sistema en lazo cerrado.

EL diseño del control no requiere que el sistema en lazo abierto sea definido por un sistema de Hamilton; no obstante, la dinámica deseada si debe tener esa característica. Por ello, la técnica trabaja con sistemas con la siguiente forma:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + \zeta \quad (2.20)$$

donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estados del sistema,  $u \in \mathbb{R}^m$  son las entradas de control, con  $m < n$ , para denotar que el sistema es subactuado y con  $\zeta$  como el vector que corresponde a las perturbaciones del sistema.

El método IDA-PBC persigue una dinámica en lazo cerrado con función de Hamilton  $H_d(x)$  y una matriz antisimétrica también llamada de interconexión generalizada de la forma  $J_d(x) = -J_d(x)^T$ . Las ecuaciones de estado en lazo abierto y cerrado se deben ajustar exactamente, es decir, son equivalentes. Esto quiere decir que la ley de control  $u$  debe calcularse de modo que,

$$\dot{x} = [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = f(x) + g(x)u + \zeta \quad (2.21)$$

donde  $R_d(x) \geq 0$  la matriz de disipación en lazo cerrado. Las principales dificultades de este método aparece en el caso de sistemas subactuados, donde el conjunto de funciones de Hamilton  $H_d$  alcanzables en lazo cerrado es limitado, y depende de la resolubilidad de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. En efecto, en el caso subactuados existe una matriz  $G^\perp$  de rango  $r < i$  siendo  $i$  el número de grados de libertad, que represente las direcciones en las que la ley de control no tiene efecto, cumpliéndose que,  $G^\perp G = 0$ , es decir, si  $G$  es una matriz constantes, las filas  $G^\perp$  forman el núcleo de  $G$ . Si premultiplicamos la (2.21) por  $G^\perp$  se obtiene:

$$G^\perp [J_d(x) - R_d(x)] \left( \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right) = G^\perp f(x) \quad (2.22)$$

donde  $G^\perp$  es una matriz cuyas filas son ortogonales a las columnas de  $G$ , tal que  $G^\perp G = 0$ .

La ecuación (2.22) ha de cumplirse para cualquier valor de la ley de control y por lo tanto representa una restricción en el conjunto de sistemas Hamiltonianos alcanzables en lazo cerrado definidos por las matrices  $(H_d, J_d, R_d)$ . Una correcta elección de los parámetros  $(H_d, J_d, R_d)$  debe ser compatible con estas ecuaciones de ajuste y al mismo tiempo representar una dinámica en lazo cerrado con las propiedades deseadas en términos de estabilidad. Proporcionar métodos de cálculo de las  $(H_d, J_d, R_d)$  adecuadas y de leyes de control para el ajuste lazo abierto-lazo cerrado es la esencia del método IDA-PBC.

## 2.6. Análisis de estabilidad

En esta sección se aplicarán los criterios de estabilidad bajo el teorema de Lyapunov con la finalidad de deducir la naturaleza del sistema dinámico. Entonces si se tiene un sistema dinámico de la forma:

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.23)$$

Considérese que este sistema tiene un punto de equilibrio en  $x^*$ , tal que  $f(x^*) = 0$ . Entonces debe de existir una función  $V(x)$  que es definida positiva, y que  $V(x^*) = 0$  para  $x \in D$  y además que  $V(x) > 0$  para  $x \neq x^*$ .

Si además se tiene que;

$$\frac{d}{dt}V(x) \leq 0 \Leftrightarrow \left[ \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right]^T \frac{\partial x}{\partial t} \leq 0 \Leftrightarrow \left[ \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right]^T f(x) \leq 0 \quad (2.24)$$

Dado que para el caso de interés en este proyecto, el sistema  $f(x)$  toma en lazo cerrado la forma:

$$f(x) = [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \quad (2.25)$$

Al substituir (2.25) en (2.24), se llega a:

$$\frac{\partial V^T}{\partial x} [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \leq 0 \quad (2.26)$$

Recordando que por definición, la matriz de interconexión deseada  $J_d(x)$  es antisimétrica, entonces  $\frac{\partial V^T}{\partial x} [J_d(x)] \left( \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right) = 0$ , con lo cual (2.26) se reduce a:

$$- \frac{\partial V^T}{\partial x} R_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \leq 0 \quad (2.27)$$

Considerando además que la función candidata de Lyapunov  $V(x)$  corresponde a la función Hamilton en lazo cerrado, es decir,  $V(x) = H_d(x)$ , entonces se llega a:

$$- \frac{\partial H_d^T}{\partial x} R_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \leq 0 \quad (2.28)$$

Por ultimo, teniendo en cuenta que la matriz de amortiguamiento se considera positiva definida ( $R_d(x) \succ 0$ ), entonces se garantiza que (2.28), siempre sea definida negativa,

lo cual implica que por definición, un sistema de Hamilton con la estructura (2.25) es asintóticamente estable en una región de operación.

# Capítulo 3

## Modelo del Convertidor

A continuación se presenta el convertidor, luego se obtiene el modelo del convertidor aplicando la primera y segunda ley de kirchhoff, posteriormente se representa el sistema en coordenadas de Park utilizando la transformación invariante en tensión, y finalmente se describe este modelo en la forma Hamiltoniana controlada por puertos.

### 3.1. Sistema

Como se puede apreciar en la figura 3.1 , El FEC esta constituido por un VSC genérico que emplea transistores bipolares de compuerta aislada o IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistors*) y un filtro RL de salida; nótese que quien actúa como filtro es el transformador trifásico.

La corriente  $i_s$  proviene de una fuente de potencia lentamente variable que modela al sistema de generación considerado. Esta corriente puede obtenerse mediante el cociente entre la potencia de dicha fuente ( $P_s$ ) y la tensión de la barra de DC ( $v_{dc}$ ). la red

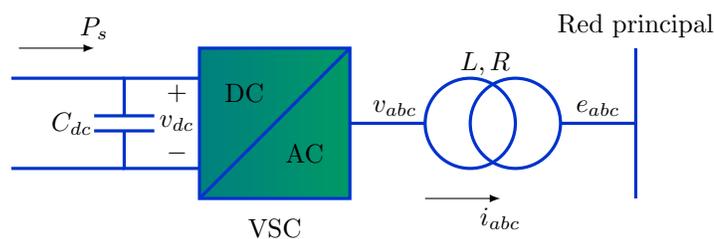


Figura 3.1: Convertidor de frente activo - FEC

eléctrica se modela utilizando tres fuentes de tensión sinusoidales puras,  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$ , soportadas por el equivalente AC de la red principal.

## 3.2. Modelado matemático

Para obtener las ecuaciones que me describen dinámicamente el sistema se parte de aplicar la segunda ley de Kirchhoff en el lado AC, con lo que se obtiene:

$$v_{abc} = L \frac{d}{dt} i_{abc} + R i_{abc} - e_{abc} \quad (3.1)$$

Ahora se aplica el teorema de Tellegen, en ambos lados del convertidor, se obtiene:

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = -m_{abc} i_{abc} + i_s, \quad (3.2)$$

Las ecuaciones (3.1) y (3.2) describen la dinámica del VSC en el marco de referencia  $abc$ . Si se aplica la transformada de *Park*  $dq$  invariante en tensión, se obtienen el modelo dinámico en  $0dq$ .

Nótese que para transformar desde el marco de referencia  $abc$  al marco de referencia  $0dq$ , se requiere de la utilización de un observador de fase bien sintonizado (PLL, por sus siglas en inglés). Sin embargo, en este trabajo se asume que existe un observador de fase ideal y que es posible transformar el sistema dinámico del marco  $abc$  al marco  $0dq$  sin pérdida de generalidad; además si se considera que la red es balanceada y libre de armónico, es posible, eliminar la secuencia cero del modelo, con lo que se llega a:

$$L \dot{i}_d = -R_L i_d - \omega_{dq} L i_q + m_d v_{dc} - e_d \quad (3.3)$$

$$L \dot{i}_q = -R_L i_q + \omega_{dq} L i_d + m_q v_{dc} - e_q \quad (3.4)$$

$$C \dot{v}_{dc} = i_s - m_d i_d - m_q i_q \quad (3.5)$$

donde  $\omega_{dq}$  es la velocidad angular de referencia de las señales trifásicas del lado AC;  $i_d$  e  $i_q$  son las corrientes en el marco de referencia de referencia seleccionado, obtenidas mediante la transformación de  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ;  $e_d$  y  $e_q$  son las tensiones de red obtenidas mediante la transformación de  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$ ;  $m_d$  y  $m_q$  son los índices de modulación y, finalmente,  $L$  y  $R_L$  son la inductancia y la resistencia del filtro, respectivamente.

El sistema formado por las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5) se puede escribir en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} L\dot{i}_d \\ L\dot{i}_q \\ Cv_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_L & -\omega_{dq}L & m_d \\ \omega_{dq}L & -R_L & m_q \\ -m_d & -m_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e_d \\ -e_q \\ i_s \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Observando el modelo definido en (3.6), es posible determinar que este sistema claramente puede ser modelado como un sistema de Hamilton controlado por puertos, tal y como se verá en la siguiente sección.

### 3.3. Equivalente no lineal de Hamilton

Para poder diseñar un control mediante IDA-PBC, se debe representar al sistema mediante su modelo PCH, según se presentó en el capítulo 2.

El modelo PCH de un sistema dinámico con representación no lineal se puede escribir como,

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + \zeta \quad (3.7)$$

donde  $x$  es el vector de estado,  $u$  es un vector cuyas componentes son las entradas de control del sistema,  $J(x)$  es la matriz de amortiguamiento,  $R(x)$  es la matriz de amortiguamiento,  $H(x)$  es la función de energía del sistema,  $g(x)$  es la matriz que relaciona los estados y las entradas, y  $\zeta$  es un vector de perturbaciones externas.

En este trabajo, el vector de estado se define como,

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [Li_d \quad Li_q \quad Cv_{dc}]^T \quad (3.8)$$

Además el vector de entradas de control está dado por,

$$u = [m_d \quad m_q]^T \quad (3.9)$$

Por otro lado, las matrices de interconexión y amortiguamiento se definen a partir de (3.6) según:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{dq}L & 0 \\ \omega_{dq}L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_L & 0 & 0 \\ 0 & R_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Donde  $J(x)$  y  $R(x)$  preservan las características de antisimetría y definición semi-positiva, respectivamente,

$$J(x) = -J(x)^T, \quad y \quad R(x) \succeq 0 \quad (3.12)$$

En particular, para este sistema las matrices  $J$  y  $R$  no dependen de los estados ni de las entradas.

La matriz  $g(x)$  esta dada por,

$$g(x) = \begin{bmatrix} v_{dc} & 0 \\ 0 & v_{dc} \\ -i_d & -i_q \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

La función de energía del sistema,  $H(x)$ , puede obtenerse como la suma de la energía almacenada en los inductores del filtro mas la energía almacenada en el capacitor conectado en la barra de DC, como se muestra a continuación:

$$H(x) = \frac{x_1^2}{2L} + \frac{x_2^2}{2L} + \frac{x_3^2}{2C} = \frac{Li_d^2}{2} + \frac{Li_q^2}{2} + \frac{Cv_{dc}^2}{2} \quad (3.14)$$

De la ecuación (3.14) es fácil determinar que el gradiente de de la función de Hamilton corresponde a:

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x} = \left[ \frac{x_1}{L} \quad \frac{x_2}{L} \quad \frac{x_3}{C} \right]^T = [i_d \quad i_q \quad v_{dc}]^T \quad (3.15)$$

Finalmente, el vector de perturbaciones externas  $\zeta$  esta dado por,

$$\zeta = [-e_d \quad -e_q \quad i_s]^T \quad (3.16)$$

donde  $e_d$  y  $e_q$  son las tensiones medidas de la red e  $i_s$  es la corriente de la barra de DC proveniente del sistema de generación alternativa.

### 3.4. Equivalente lineal de Hamilton

En la representación lineal, basta con reescribir la función de balance de potencia entre ambos lados del convertidor, como una función del lado DC y una función aproximada de la tensión de la red AC equivalente, según:

$$\frac{1}{2}C\frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_s - e_{abc}^T i_{abc} - \sum_{k=a,b,c} Ri_k^2 \quad (3.17)$$

Despreciando las pérdidas en el cobre del transformador es posible reducir (3.17) a (3.18), según se muestra a continuación:

$$\frac{1}{2}C\frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_s - e_{abc}^T i_{abc} \quad (3.18)$$

Al modelo descrito por las ecuaciones 3.1 y 3.18 se le aplica la transformada de Park invariante en tensión, bajo las mismas condiciones del modelo no lineal, con lo que se llega a:

$$L\frac{di_d}{dt} = -R_L i_d - \omega_{dq} L i_q + m_d v_{dc} - e_d \quad (3.19)$$

$$L\frac{di_q}{dt} = -R_L i_q + \omega_{dq} L i_d + m_q v_{dc} - e_q \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{2}C\frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_s - e_d i_d - e_q i_q \quad (3.21)$$

El sistema formado por las ecuaciones (3.19), (3.20) y (3.21) se puede escribir en forma matricial definiendo,  $u_d = m_d v_{dc}$  y  $u_q = m_q v_{dc}$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{dv_{dc}^2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_L & -\omega_{dq}L & u_d \\ \omega_{dq}L & -R_L & u_q \\ -e_d & -e_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \\ \frac{2}{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e_d \\ -e_q \\ P_s \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Nótese que si se define  $v_{dc}^2$  como una nueva variable de estado  $z$ , el sistema (3.22) toma exactamente una forma lineal de Hamilton, al cual se le puede aplicar el mismo análisis que el empleando en el caso no lineal, por lo cual las matrices de interconexión y amortiguamiento permanecen iguales.

# Capítulo 4

## Metodología Propuesta

En este trabajo se lleva a cabo a partir de considerar que la FEC se modela como se muestra en la figura 3.1, considerando que la dinámica de los subsistemas que lo conforman pueden expresarse como se evidencia en el conjunto de ecuaciones (3.6) para una representación no lineal y en (3.22) como una representación del sistema lineal.

El problema de control de flujos de potencia activa y reactiva a la red eléctrica se aborda con la técnica de control conocida como IDA-PBC, la cual se basa en llevar al sistema en lazo cerrado a una estructura *Hamiltoniana* con la condición deseada de operación. El objetivo de esta estrategia de control es aprovechar las propiedades de los sistemas pasivos para asegurar propiedades de estabilidad de la estrategia de control  $u(x)$  que se propondrá.

### 4.1. Aspectos considerados

La estrategia de control propuesta tiene por objetivo principal inyectar toda la potencia activa disponible del lado DC a la red, manteniendo la tensión de la barra DC constante, además de estas consideraciones también se desea controlar la potencia reactiva intercambiada con la red AC. Una forma de realizar este control de potencia es mediante el control de las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  en la salida del convertidor, lo cual se logra modificando los índices de modulación  $m_d$  y  $m_q$  del convertidor. Por otro lado el control de la potencia reactiva se puede hacer directamente controlando la corriente  $i_q$ .

## 4.2. Descripción diseño del controlador

A continuación se describe el diseño del controlador, el cual consiste en lograr que las variables de estado del sistema (3.7) sigan la trayectoria definida por el vector de referencia o deseado,

$$\hat{x} = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{x}_3]^T = [L\hat{i}_d \quad L\hat{i}_q \quad Cv\hat{d}_c]^T \quad (4.1)$$

donde  $\hat{x}$  significa los puntos de operación deseados

Para ello se propone diseñar una ley de control  $u$ , tal que la dinámica del sistema a lazo cerrado pueda ser descrita por un sistema PCH con la forma del conjunto de ecuaciones presentada (3.6),

$$\dot{x}_d = [J_d(x, u) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \quad (4.2)$$

Para que  $\hat{x}$  sea un punto de equilibrio de la ecuación (4.2),

$$\left. \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (4.3)$$

donde  $H_d(x)$  es la función de energía deseada para el sistema,  $J_d(x, u)$  y  $R_d(x)$  son las matrices de interconexión y amortiguamiento deseados, las cuales se pueden escribir como,

$$J_d(x, u) = J(x, u) + J_a(x, u) \quad (4.4)$$

$$R_d(x) = R(x) + R_a(x) \quad (4.5)$$

Las matrices  $J_a(x)$  y  $R_a(x)$  son utilizadas para sintetizar la estrategia de control propuesta. Para este caso particular estas matrices se pueden escribir de forma general como:

$$J_a(u) = -J_a(u)^T = \begin{bmatrix} 0 & \dot{j}_{12} & \dot{j}_{13} \\ -\dot{j}_{21} & 0 & \dot{j}_{23} \\ -\dot{j}_{31} & -\dot{j}_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$R_a = R_a^T = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Para tener la finalidad que los estados del sistema  $x$  tiendan a su valor de referencia  $\hat{x}$  asintóticamente, es posible elegir  $H_d(x)$  como,

$$H_d(x) = \frac{1}{2}(\epsilon^T P^{-1} \epsilon). \quad (4.8)$$

donde,

$$P = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Sabiendo que  $\epsilon = x - \hat{x}$ , y utilizando la ecuación (4.8) podemos obtener  $\frac{\partial H_d(x)}{\partial x}$  como:

$$\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - \hat{x}_1}{L} \\ \frac{x_2 - \hat{x}_2}{L} \\ \frac{x_3 - \hat{x}_3}{C} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

También se puede calcular la derivada en el tiempo de  $H_d(x)$  como,

$$\frac{dH_d(x)}{dt} = \epsilon^T P^{-1} R_d P^{-1} \epsilon < 0, \quad (4.11)$$

Lo cual puede conseguirse haciendo que  $R_d$  sea una matriz definida positiva. Esto puede lograrse eligiendo adecuadamente los elementos de  $R_d$ .

Los elementos de la matriz  $J_a(u)$  pueden elegirse para cancelar los acoplamientos existentes entre las variables de estado,

$$J_a(u) = \begin{bmatrix} 0 & w_{dq}L & m_d \\ -w_{dq}L & 0 & m_q \\ -m_d & -m_q & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Haciendo uso de la ecuación (3.5) y (4.2) se puede obtener la ecuación diferencial,

$$[J(x, u) - R(x)] \frac{\partial H_a(x)}{\partial x} = -[J_a(u) - R_a(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} + g(x)u + \zeta \quad (4.13)$$

donde,

$$H_a(x) = H_d(x) - H(x) \quad (4.14)$$

### 4.2.1. Diseño del controlador no lineal

Resolviendo el sistema de ecuaciones definido en la ecuación (4.13) y sabiendo que  $\frac{\partial H_a(x)}{\partial x} = \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} - \frac{\partial H(x)}{\partial x}$  se obtiene las leyes de control para  $m_d$  y  $m_q$  como,

$$m_d = \frac{R_L \hat{i}_d + w_{dq} L i_q - R_1 (i_d - \hat{i}_d) + e_d}{\hat{v}_{dc}} \quad (4.15)$$

$$m_q = \frac{R_L \hat{i}_q - w_{dq} L i_d - R_2 (i_q - \hat{i}_q) + e_q}{\hat{v}_{dc}} \quad (4.16)$$

También para  $\hat{i}_d$  se puede conseguir a partir de (4.13) como,

$$\hat{i}_d = \frac{i_s - m_q \hat{i}_q - R_3 (v_{dc} - \hat{v}_{dc})}{m_d} \quad (4.17)$$

Si se observa en la ecuación (4.17) se evidencia que el modelo del sistema es no lineal ya que, la igualdad presenta una división de la referencia de  $i_d$  y la señal de control  $m_d$ .

Para implementar las ecuaciones de control de los índices de modulación  $m_d$  y  $m_q$  es necesario resolver la ecuación (4.17).

Esto se puede realizar analíticamente, reemplazando (4.15) y (4.16) en (4.17) y resolver para  $\hat{i}_d$ , o bien en forma recursiva. La cual depende principalmente del tiempo de actualización de las variables para no comprometer la estabilidad de la ley de control propuesta [6].

### 4.2.2. Diseño del controlador lineal

Aplicando la teoría que se implementó en el numeral 4.2 a partir de nuestra sistema de ecuaciones (3.22), y sabiendo que el vector de variables de estados son;

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [i_d \quad i_q \quad v_{dc}^2]^T \quad (4.18)$$

Además se define el vector de referencia como,

$$\hat{x} = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{x}_3]^T = [\hat{i}_d \quad \hat{i}_q \quad \hat{v}_{dc}^2]^T \quad (4.19)$$

Finalmente se describe las leyes de control  $u_d$  y  $u_q$  como;  $u_d = m_d v_{dc}$  y  $u_q = m_q v_{dc}$ , con lo que se puede obtener,

$$u_d = R_L x_1 + \omega_{dq} L x_2 - R_d (x_1 - \hat{x}_1) + e_d \quad (4.20)$$

$$m_q = R_L x_2 - \omega_{dq} L x_1 - R_q (x_2 - \hat{x}_2) + e_q \quad (4.21)$$

$$\hat{x}_1 = \frac{1}{e_d} (P_s - e_q x_2 - R_{dc} (x_3 - \hat{x}_3)) \quad (4.22)$$

Es importante mencionar que, tanto el modelo no lineal como la representación lineal son completa y exactamente equivalentes, puesto que no se aplicó ninguna estrategia de linealización en su desarrollo.

# Capítulo 5

## Aplicación y Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a través de la implementación computacional de la metodología propuesta en el capítulo 4. Esta es aplicada a un sistema de prueba, que permitirá evaluar el funcionamiento del controlador propuesto por el método IDA-PBC para distintas condiciones de trabajo, donde para cada condición se consideraron dos modelos como lo son; el modelo no lineal y su equivalente lineal. Para resolver las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico del VSC utiliza la función ODE45 de MATLAB.

### 5.1. Consideraciones

En el sistema de prueba simulado se muestra en la figura 5.1, la corriente  $i_s$  es la que alimenta la barra DC, la cual es obtenida a partir de un sistema de generación que aprovecha la energía suministrada de una fuente renovable y esta a su vez hace parte de una micro-red; sin embargo, se debe aclarar que para este trabajo no se pretende controlar dicha micro-red.

Para las simulaciones se consideró que el sistema de generación como una fuente de potencia  $P(t)$  tal que,

$$P(t) = i_s(t)v_{dc}(t) \tag{5.1}$$

Los parámetros del modelo de control empleados para las simulaciones son mostrados en la Tabla 5.1 y las especificaciones del FEC y la red en la Tabla 5.2.

En este apartado se presentan el valor de los parámetros de amortiguamiento que se utilizaron para el controlador pasivo, estos parámetros de amortiguamiento del con-

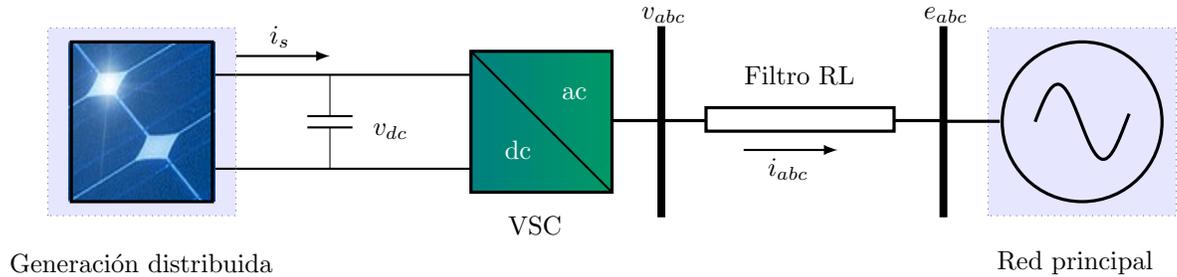


Figura 5.1: Configuración del sistema de prueba

trolador son los mismos para cada condición de trabajo y para ambos controladores propuestos (controlador lineal y no lineal), estos parámetros de amortiguamiento son muy sensibles a la hora de garantizar la estabilidad para grandes cambios de potencia, el cual para el caso del numeral 5.2.2 fue el más crítico.

Tabla 5.1: Parámetros del Controlador

Parámetro	Valor
$R_1$	1,23
$R_2$	46
$R_3$	0,8

Tabla 5.2: Parámetros del FEC y la red

Parámetro	Valor
L	2,5 mH
$R_L$	1 m $\Omega$
C	3600 $\mu$ F
$ e_a ,  e_b ,  e_c $	311 V
f	60 Hz

En la sección 5.2 se muestra el desempeño del sistema frente a cambios en la potencia activa de entrada, y en la sección 5.3 se muestra el desempeño del sistema de control frente a cambios en la potencia reactiva que se desea inyectar o consumir por parte del convertidor a la red.

## 5.2. Cambio de potencia activa de entrada

En las figura 5.2, se muestra la tensión en la barra DC para el control lineal, la tensión en la barra DC para el control no lineal y la tensión de referencia, con sus respectivas etiquetas. En la figura 5.3 se observa la potencia activa AC para el control lineal, para el control no lineal y para la potencia de referencia, la figura 5.4 se muestra la potencia reactiva para el control lineal, no lineal y su referencia de potencia reactiva con la misma nomenclatura que se nombro anteriormente.

### 5.2.1. Caso I

Los resultados que se pudieron obtener a partir de definir la referencia  $\hat{V}_{DC} = 780V$  con un cambio de potencia en el instante  $t = 0,05 s$  de  $P_s = 30kW$  a  $P_s = 15kW$  correspondiente del lado DC sin tener un cambio de potencia reactiva, la cual se consigue con la corriente  $\hat{i}_q = 0$ .

En este caso, la evaluación de los controladores basados en pasividad se lleva a cabo para unas condiciones iniciales diferentes de cero y tener así una operación más real. Como primera observación importante de la figura 5.2 se tiene que las señales de control convergen de manera adecuada a la referencia, con unas pequeñas oscilaciones o errores que se pueden observar más para el control lineal, además cuando se presenta el cambio de potencia en el instante  $t = 0,05 s$  decrece a un más el control lineal que el no lineal, pero esto ocurre temporalmente hasta que el esquema de control logra establecer el balance de potencia entre entrada y salida.

Abordando la interpretación de la figura 5.3 se evidencia una pequeña oscilación alrededor de la referencia para el control lineal. Cuando ocurre el cambio de potencia, los controladores tienen un decrecimiento, que para el no lineal es más leve, esto se puede restablecer en un tiempo de 0,02 s mientras los controles responden.

Ahora si se observa la figura 5.4 a pesar del cambio de corriente en el eje directo, este no influye de manera considerable para que la corriente en el eje de cuadratura cambie para el caso del control lineal, pero para el control no lineal si se puede observar que influye levemente cuando ocurre el cambio de potencia en  $t = 0,05s$ .

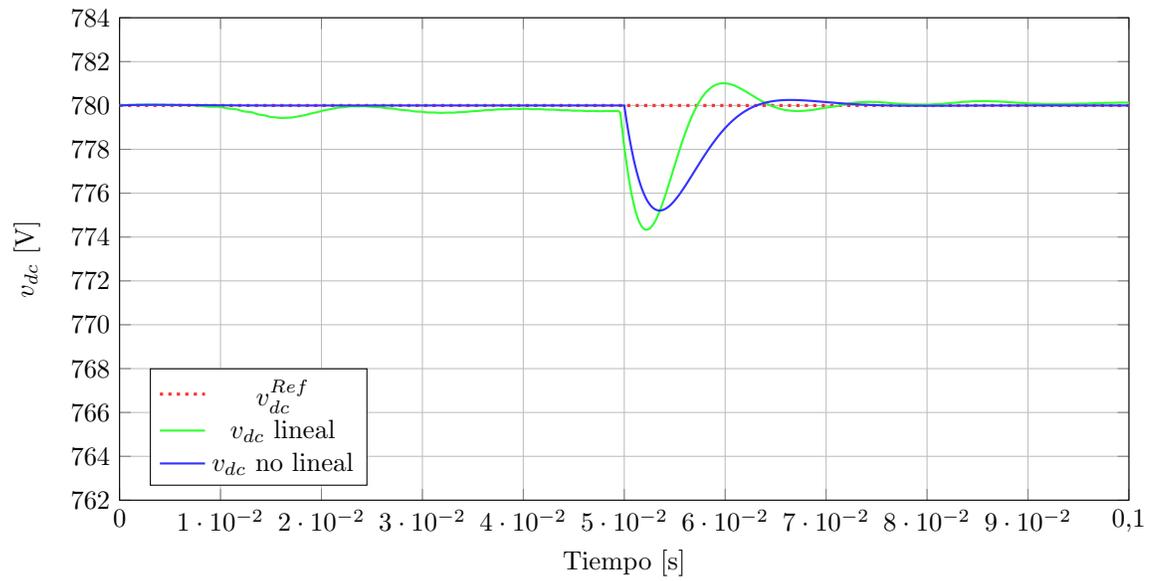


Figura 5.2: Tensión de la barra de DC

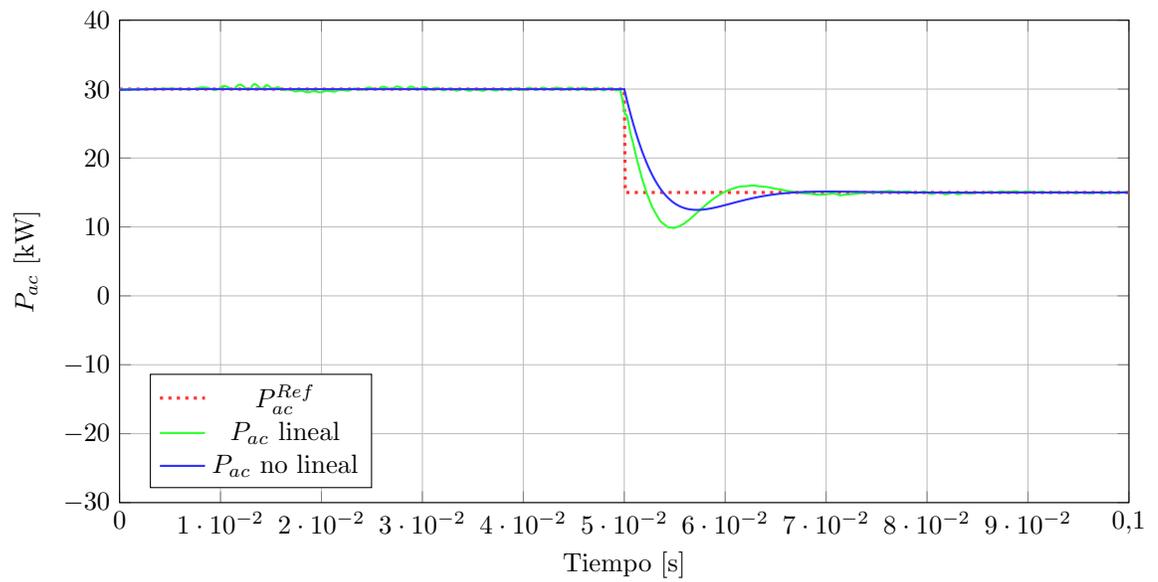


Figura 5.3: Potencia activa

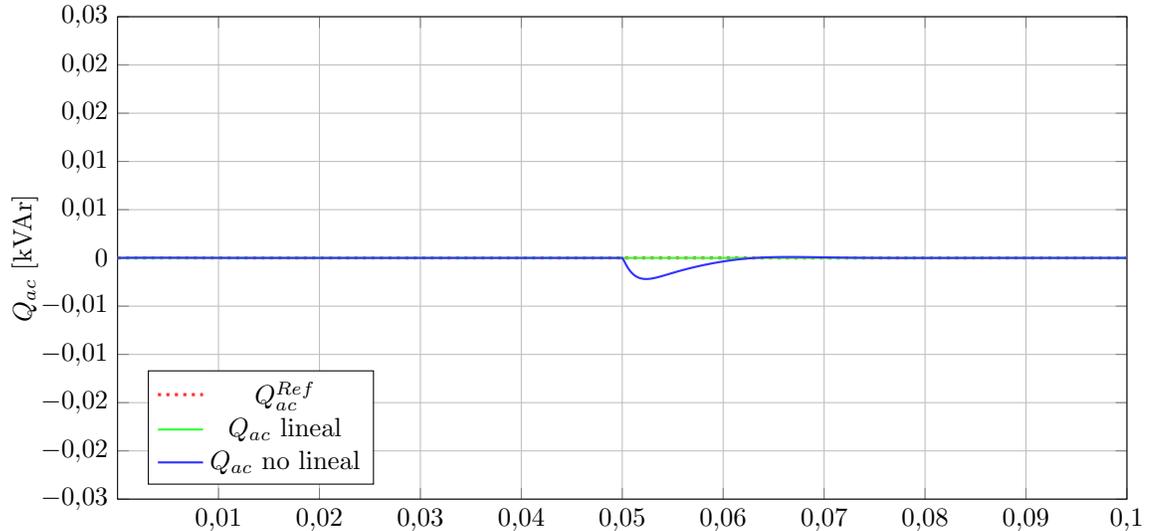


Figura 5.4: Potencia reactiva

### 5.2.2. Caso II

Para este caso se ilustra como el diseño de los controladores actuaron de forma adecuada para garantizar la estabilidad del sistema con un ensayo donde la potencia de entrada cambia de  $P = 30kW$  a  $P = -15kW$ , con lo que representa un cambio en el sentido del flujo de potencia en el convertidor con las mismas constantes de amortiguamiento. Lo que Primero se consideró en este caso, es que se entrega una cantidad de potencia activa de  $P = 30kW$  hasta en el instante  $t = 0,05s$  donde se invierte el flujo de potencia a  $P = -15kW$ , con una potencia reactiva igual a cero para todo instante de tiempo. Con el objetivo de evaluar los esquemas bajo condiciones drásticas, se asumió que el cambio del flujo de potencia se hiciera en forma de escalón.

En este caso se consideró que las condiciones iniciales eran diferentes de cero, como en el caso anterior. Las señales de salidas que obtuvieron exhiben una convergencia aceptable con los valores deseados ya que presentan unas variaciones transitorias.

Como se puede observar en la figura 5.5, la tensión de la barra DC en los primeros instantes de tiempo para el control lineal presentan unas oscilaciones cercanas al valor de referencia, las cuales para el control no lineal no se presentan. Cuando ocurre el cambio del flujo de potencia en el instante  $t = 0,05s$  se presenta un transitorio para el voltaje de la barra DC hasta que el sistema de control establece el nuevo valor de  $\hat{i}_d$  y la tensión de la barra de DC vuelve a su valor de referencia en un intervalo de tiempo

de 0,02 s, que es más notorio para el control lineal.

Si se observa la figura 5.6, se puede observar que en los primeros instantes de tiempo se presentan algunas oscilaciones al rededor del punto de referencia para el control lineal, que para el control no lineal no se presentan. Cuando ocurre el cambio en  $t = 0,05s$  se evidencian transitorios, los cuales son más evidentes para el control lineal, esto ocurre en un intervalo pequeño de tiempo hasta que el sistema de control se estabiliza.

Al igual que en el ensayo anterior, para el control lineal el cambio de corriente en el eje de directo no modifica apreciablemente la corriente en el eje en cuadratura, que para el control no lineal si presenta una leve variación, esto se puede evidenciar en la figura 5.7.

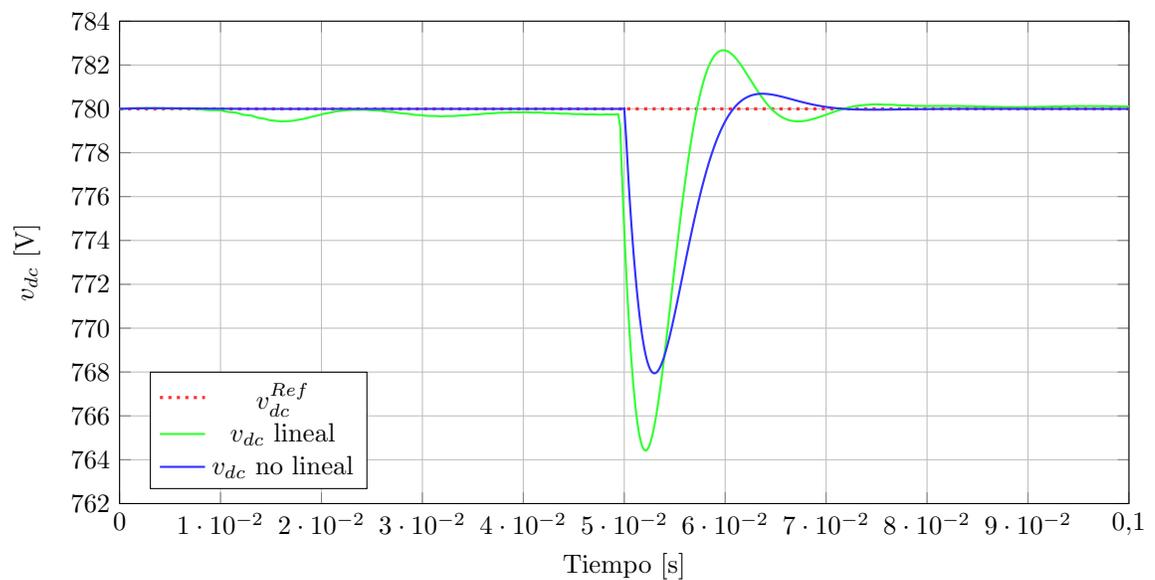


Figura 5.5: Tensión de la barra de DC

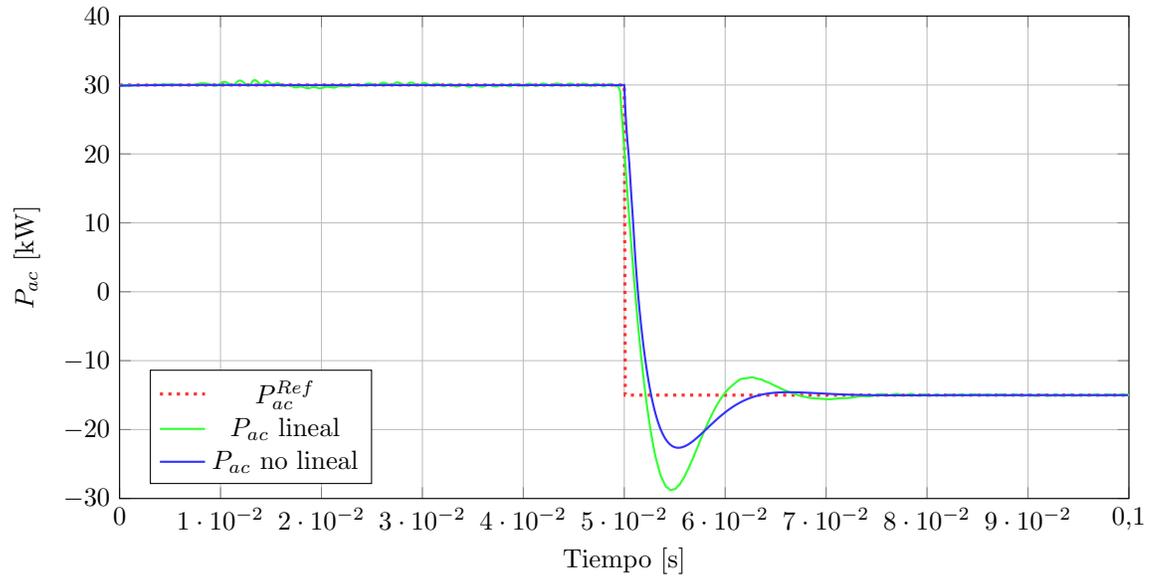


Figura 5.6: Potencia activa

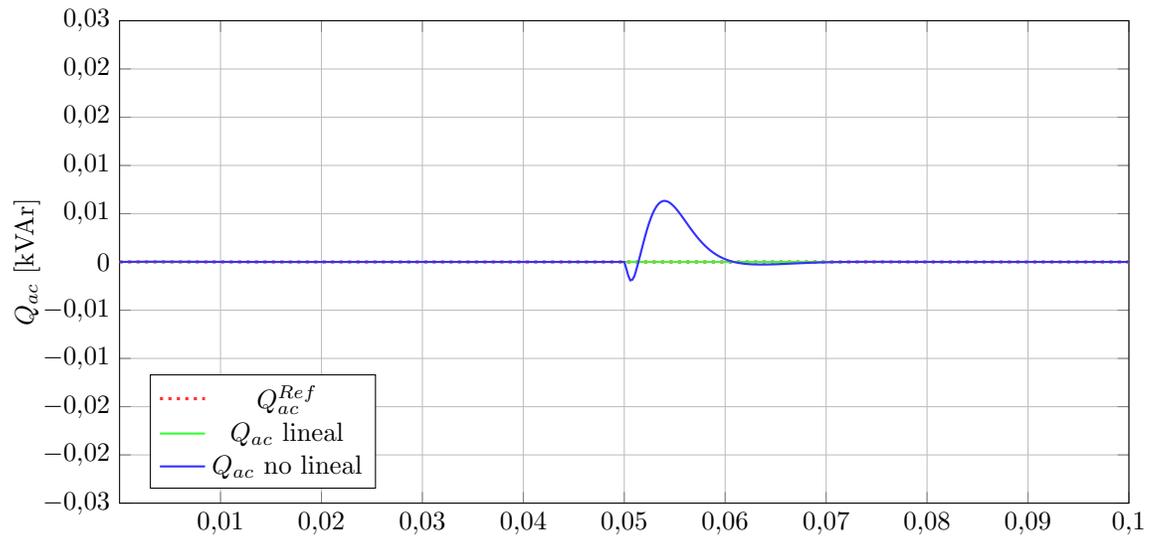


Figura 5.7: Potencia reactiva

### 5.3. Cambio de potencia reactiva

Para este caso se establece la potencia activa como fija y la potencia reactiva como el parámetro a variar, en las figura 5.8 se muestra la tensión en la barra DC para el control lineal, la tensión en la barra DC para el control lineal y la tensión de referencia, con sus correspondientes etiquetas. La figura 5.9 se observa la potencia activa  $AC$  para el control lineal, para el control no lineal y para la potencia de referencia y la figura 5.10 se muestra la potencia reactiva para el control lineal, no lineal y su referencia de potencia reactiva.

Para el ensayo de cambio en la consigna de potencia reactiva que se desea inyectar a la red o de consumir, se obtuvieron las siguientes figuras (5.8, 5.9, 5.10) para un ensayo donde se establece la tensión de la barra de DC en un valor constante de ( $\hat{V}_{DC} = 780V$ ) con potencia de entrada constante ( $P = 30kW$ ) con cambios en la potencia reactiva intercambiada con la red en diferentes intervalos de tiempo.

Este cambio de potencia reactiva se puede implementar cambiando la componente de corriente en el eje de cuadratura  $\hat{i}_q$  como se muestra en la ecuación 5.2:

$$\hat{i}_q = \begin{cases} 0 & si & t \leq 0,05 \\ 20 & si & 0,05 < t < 0,067 \\ -20 & si & t \geq 0,067 \end{cases} \quad (5.2)$$

Con el objetivo de evaluar el esquema de control bajo condiciones drásticas, se asumió el cambio de la potencia reactiva en forma de escalón como se puede observar en la ecuación 5.2. Como se evidencio en la figura 5.8, la tensión de la barra DC en los primeros instantes de tiempo para el control lineal presentan unas oscilaciones cercanas al valor de referencia ( $\hat{V}_{DC}$ ), que para el control no lineal no se presentan. Cuando ocurre los cambios del flujo de potencia reactiva, las tensiones presentan algunos transitorios, los cuales se restablecen en un corto tiempo gracias a los esquemas de control utilizados, que para este caso el control no lineal presenta el mayor transitorio frente al cambio que ocurrió en el tiempo  $t = 0,067s$ .

En la figura 5.9 se evidencia que para el control lineal la potencia activa presenta con mayor intensidad algunas perturbaciones alrededor del punto de referencia, caso

contrario ocurre para el control no lineal en los primeros instantes de tiempo. Cuando ocurre los cambios de flujo de potencia reactiva, que está asociado a los cambios de la corriente en el eje de cuadratura, este influye levemente a la corriente en el eje de directo, donde para el cambio en el instante  $t = 0,067s$  si se alcanza a evidenciar que produce un transitorio temporal para el control no lineal.

Para los controladores que se desarrollaron, se observa que para los cambios de potencia reactiva que se realizaron, los controladores respondieron de forma adecuada como se puede ver en la figura 5.10, esto quiere decir que los controladores pueden responder de una forma optima ya sea para la generación de potencia reactiva o para el consumo de esta.

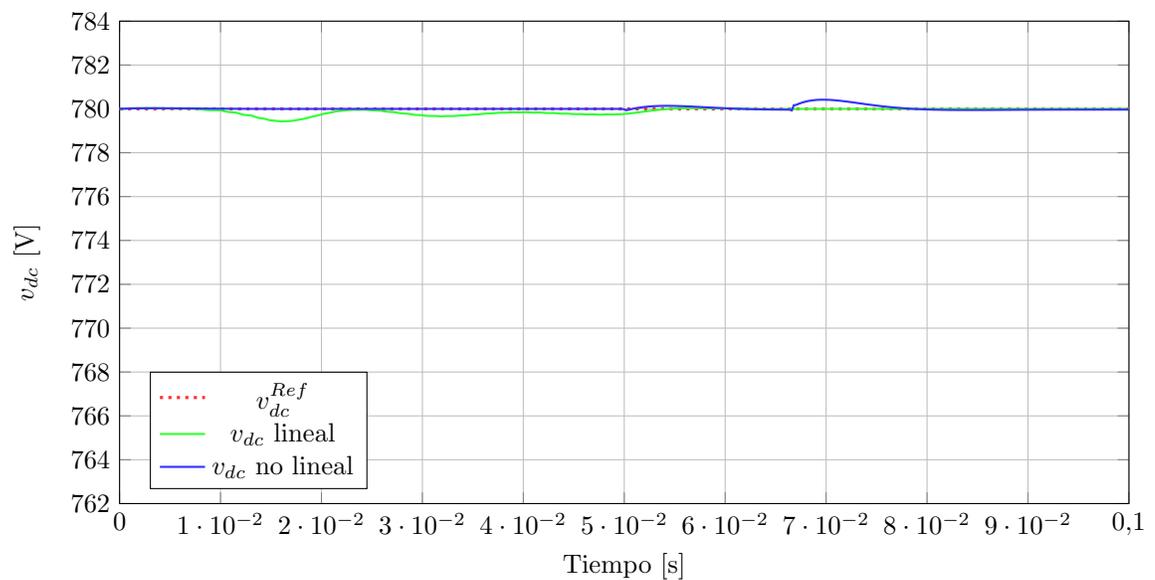


Figura 5.8: Tensión de la barra de DC

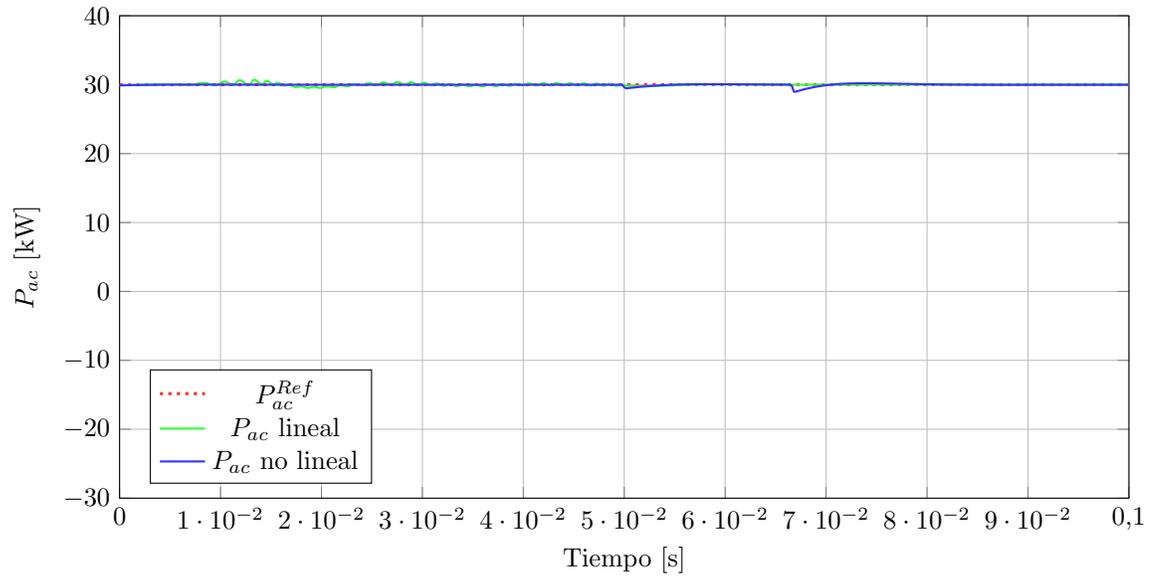


Figura 5.9: Potencia activa

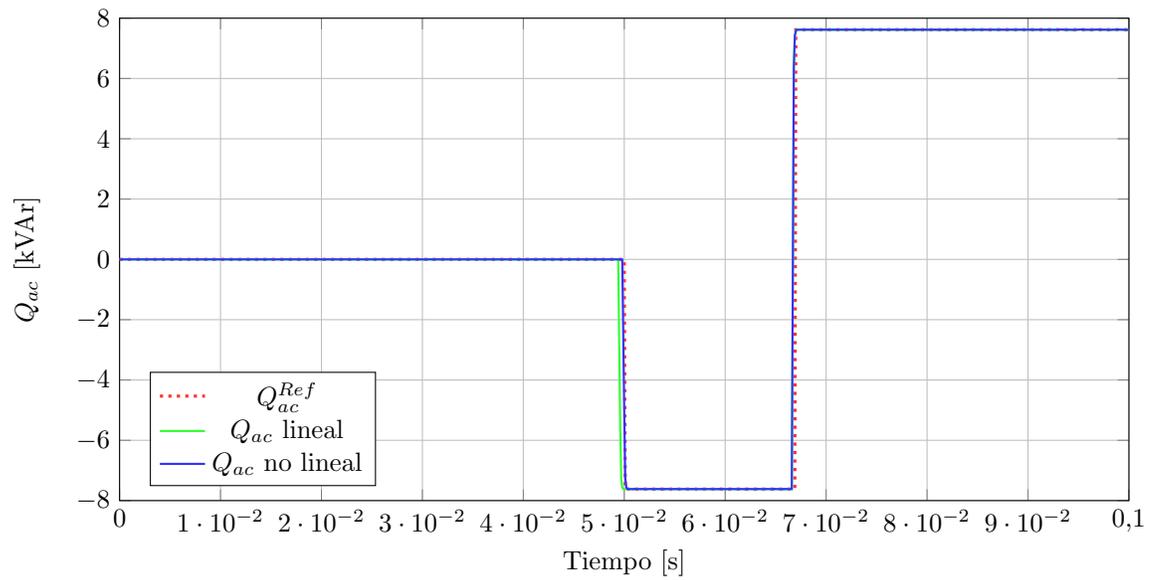


Figura 5.10: Potencia reactiva

## 5.4. Análisis de resultados

Para los tres casos de prueba se observó que las funciones salidas desempeñaron una buena labor, ya que respondieron a las referencias que se implementaron, con algunos errores o oscilaciones no tan drásticas. Es evidente que a los pequeños cambios de potencia activa como se pueden ver en el caso 5.2.1, el transitorio es más pequeño que el presentado en el caso 5.2.2, pero es más evidente para el controlador lineal, que para la función salida del voltaje ( $V_{DC}$ ) esto ocurre hasta que el esquema de control encuentre la corriente  $i_d$  necesaria para lograr el balance de potencia entre entrada y salida. Caso contrario ocurre cuando se considera el caso 5.3, en donde ocurren cambios en la potencia reactiva que están asociados a los cambios de corriente en el eje de cuadratura ( $i_q$ ) los cuales no reflejan transitorios considerables en la tensión de la barra de DC ni a la potencia activa, la cual está asociada a los cambios de la corriente ( $i_d$ ). Es evidente resaltar que frente a los cambios de referencia que se implementaron para el caso 5.3, los controladores respondieron eficientemente para la entrega o consumo de los reactivos.

A manera de comparar los resultados obtenidos con los que se presentan en [6], se podría evaluar la estrategia de control propuesta. Cabe recalcar que los parámetros utilizados son los mismos que utilizaron en [6] excepto los parámetros de amortiguamiento y el valor del condensador. En la figura 4 presenta los resultados que obtuvieron en [6] y en la figura 5.11 son los resultados que se obtuvieron para nuestra implementación con la teoría de pasividad. Como se puede observar en la referencia [6] y en la figura 5.11 para los resultados de la tensión de la barra de DC, los dos controladores permiten regular el valor medio de la tensión del enlace en DC, independientemente de los cambios en la potencia de entrada. Además, en ambos casos, el transitorio de la tensión del enlace de DC se mantiene entre límites aceptables. Sin embargo en [6] muestra un transitorio más notable cuando los cambios de potencia activa ocurren. Además se puede observar que las corrientes  $i_d$  y  $i_q$  para nuestra estrategia de control produce corrientes con menor distorsiones que la que se puede observar en [6].

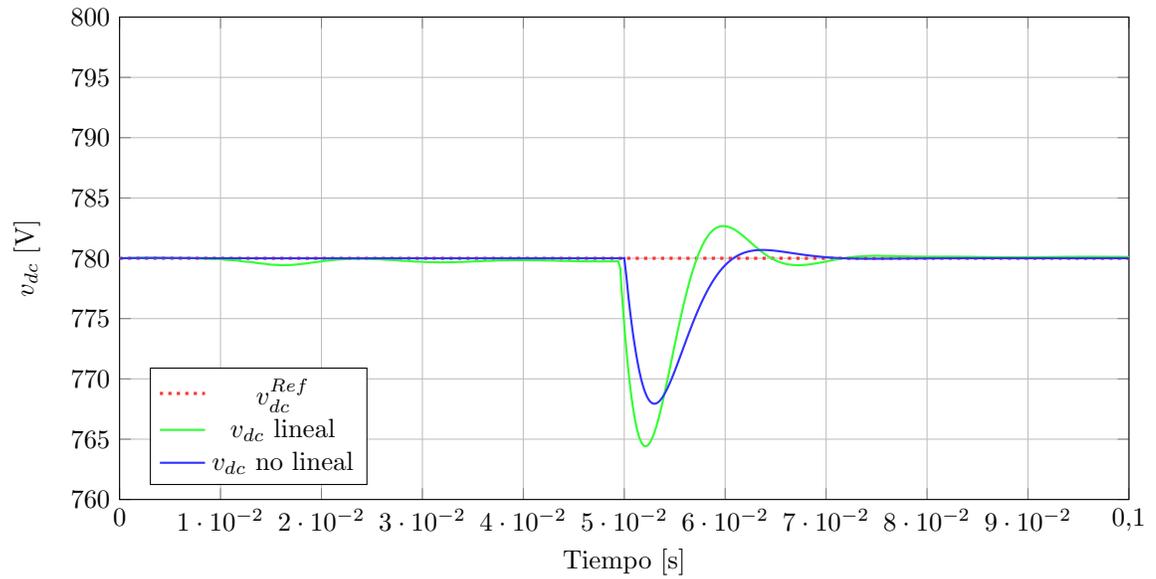


Figura 5.11: Tensión de la barra de DC

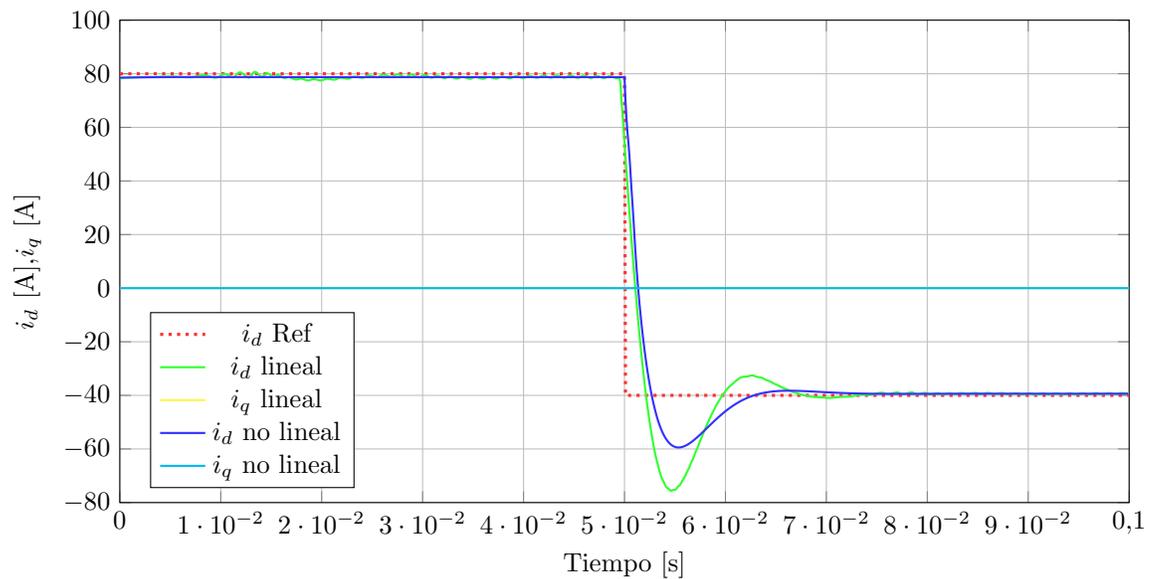


Figura 5.12: Corrientes  $i_d$  e  $i_q$

# Capítulo 6

## Conclusiones

Se implementó un modelo matemático no lineal y lineal utilizando la técnica PBC, con los que se pudo satisfacer los objetivos de inyectar toda la potencia disponible del lado en DC a la red y controlar la potencia reactiva intercambiada con esta.

Ante cambios drásticos en forma de escalón y junto a condiciones diferentes de cero los esquemas de control respondieron de forma correcta arrojando unas salidas correspondientes a las referencias dadas, con algunos pequeños transitorios.

Se evidenció que ante los cambio de potencia reactiva, el esquema de control alcanzó de manera satisfactoria su referencia sin que la corriente del eje de cuadratura que está asociada a este cambio, influya de manera considerable a las variables de  $i_d$  y  $V_{dc}$ .

Se presentó que el resultado de estabilidad cumplió de manera satisfactoria. Sin embargo, si se analizan desde una perspectiva del desempeño que presentan el control lineal y no lineal, es claro que el control no lineal tiene un mejor desempeño ya que no presenta oscilaciones alrededor de su referencia ni el transitorio que se presenta supera al presentado en el control lineal.

Como se pudo observar en la referencia [6] y la figura 5.11 se pudo comparar nuestra implementación de la técnica IDA, con la cual pudimos mejorar los resultados con la variación de los parámetros de amortiguamiento y el valor del condensador, ya que si utilizamos estos mismos parámetros el esquema de control no garantiza estabilidad, que esto se podría haber evitado si en la transición del cambio de potencia se hubiera realiza de una forma suave.

Se evidenció que la técnica control basada en pasividad sirve tanto para los sistemas lineales y no lineales, y en ambos casos garantizan estabilidad.

En este trabajo se observó la utilidad de implementar la técnica de control para integrar sistemas de energías renovables, la cual permite maximizar los recursos energéticos renovables y entregarlos al sistema de AC.

## **6.1. Futuros trabajos de investigación**

Como trabajos futuros se propone experimentar otra técnica de control que cumpla de manera satisfactoria los criterios de estabilidad y poder establecer que técnica es la más apropiada para implementar en estos tipos de sistemas. También se podría incluir un modelo que represente de mejor manera el sistema de generación y con todas estas bases ya realizadas se podría implementar experimentalmente la ley de control.

# Bibliografía

- [1] L. M. R. Fernández, V. P. G. Bote, and F. M. Anegón, “Análisis de la producción científica española en energías renovables, sostenibilidad y medio ambiente (scopus, 2003-2009) en el contexto mundial,” *Investigación Bibliotecológica: Archivonomía, Bibliotecología e Información*, vol. 27, no. 60, pp. 125 – 151, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187358X13725462>
- [2] R. Zubo, G. Mokryani, H.-S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, “Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 1177 – 1198, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306840>
- [3] M. Khederzadeh, H. Maleki, and V. Asgharian, “Frequency control improvement of two adjacent microgrids in autonomous mode using back to back voltage-sourced converters,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 74, pp. 126 – 133, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515002884>
- [4] D. H. Pham, G. Hunter, L. Li, and J. Zhu, “Advanced microgrid power control through grid-connected inverters,” in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Nov 2015, pp. 1–6.
- [5] A. Berzoy and M. Strefezza, “Control PI difuso paralelo para corregir la respuesta de un control PI clásico de corriente de línea en un rectificador trifásico,” *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 28, pp. 59 – 64, 03 2013. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652013000100007&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000100007&nrm=iso)

- [6] F. Serra, C. D. Angelo, and D. Forchetti, “Passivity based control of a three-phase front end converter,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 293–299, Feb 2013.
- [7] J. C.-G. V. y. A.-S. R. Nunez-Gutierrez, C; Lira-Perez, “Control de un rectificador PWM con funciones ampliadas basado en un procesador digital de señales,” *Ingeniera, investigacion y tecnologia*, vol. 10, pp. 51 – 62, 03 2009. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432009000100006&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432009000100006&nrm=iso)
- [8] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, “Power management and power flow control with back-to-back converters in a utility connected microgrid,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 821–834, May 2010.
- [9] S. Dhar and P. Dash, “A new backstepping finite time sliding mode control of grid connected {PV} system using multivariable dynamic {VSC} model,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 314 – 330, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516304793>
- [10] H. M. Hasanien and M. Matar, “A fuzzy logic controller for autonomous operation of a voltage source converter-based distributed generation system,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 158–165, Jan 2015.
- [11] G. Rigatos, P. Siano, P. Wira, and C. Cecati, “A global linearization approach to control and state estimation of a vsc-hvdc system,” in *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, June 2015, pp. 454–459.
- [12] N. Merritt, C. Chakraborty, and P. Bajpai, “New voltage control strategies for vsc based dg units in an unbalanced microgrid,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
- [13] G. Tsengenes and G. Adamidis, “Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 1, pp. 177 – 184, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610002075>
- [14] F. Huerta, E. Bueno, S. Cobreces, F. J. Rodriguez, and C. Giron, “Control of grid-connected voltage source converters with lcl filter using a linear quadratic servocontroller with state estimator,” in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 2008, pp. 3794–3800.

- [15] A. Tabesh and R. Iravani, “Multivariable dynamic model and robust control of a voltage-source converter for power system applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 462–471, Jan 2009.
- [16] P. Wang, J. Wang, and Z. Xu, “Passivity-based control of three phase voltage source pwm rectifiers based on pchd model,” in *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Oct 2008, pp. 1126–1130.
- [17] D. Hill and P. Moylan, “The stability of nonlinear dissipative systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 21, no. 5, pp. 708–711, Oct 1996.
- [18] H. Zhang, T. Yin, and J. Wang, “A control strategy of hamilton realization and mechanics lagrangization in doubly-fed wind power generation system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 569 – 575, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515004949>
- [19] R. Ortega, *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*, ser. Communications and Control Engineering. Springer, 1998. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=HeJSAAAAMAAJ>
- [20] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, ser. Pearson Education. Prentice Hall, 2002. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?id=t\\_d1QgAACAAJ](https://books.google.com.co/books?id=t_d1QgAACAAJ)
- [21] R. Ortega, A. J. V. D. Schaft, I. Mareels, and B. Maschke, “Putting energy back in control,” *IEEE Control Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 18–33, Apr 2001.
- [22] R. Ortega, A. Schaft, B. Maschke, and G. Escobar, “Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled hamiltonian systems,” *Automatica*, pp. 585–596, 2002, relation: <http://www.rug.nl/informatica/organisatie/overorganisatie/iwi> Rights: University of Groningen. Research Institute for Mathematics and Computing Science (IWI).
- [23] A. J. V. d. Schaft, *L<sub>2</sub>-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*, 1st ed. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1996.
- [24] R. Ortega, M. W. Spong, F. Gomez-Estern, and G. Blankenstein, “Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via interconnection and damping

assignment,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 8, pp. 1218–1233, Aug 2002.