

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. José R. Espinoza C.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Uso de Capacidad Ociosa de Convertidores Estáticos de Plantas Solares para Compensación de Potencia Reactiva

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. José R. Espinoza C.

Uso de Capacidad Ociosa de Convertidores Estáticos de Plantas Solares para Compensación de Potencia Reactiva

Manuel Adolfo Varela Yáñez

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Marzo 2016

Resumen

En este trabajo se presenta la extensión de un sistema de generación fotovoltaico en base a Inversor Fuente de Voltaje Trifásico a la compensación de reactivos. El sistema genera potencia activa y reactiva, asegurando un factor de potencia total en el PCC (Point of Common Coupling), independiente de la presencia de luz solar. El sistema opera de tal forma que cuando no existe radiación solar éste también es capaz de entregar reactivos a la red, funcionando bajo el principio de un STATCOM (Static Synchronous Compensator). Esto con la finalidad de trabajar en los lapsos ociosos del convertidor y así aprovechar la subutilización que presenta la configuración. Es así como la topología presentada en este trabajo trabaja en dos modos y mediante el algoritmo propuesto se puede escoger el instante en que se requiera operar para cada caso. Para los dos tipos de funcionamiento se realiza una estrategia de control lineal que nos permite desacoplar el voltaje en el enlace DC de las corrientes que entrega el Inversor. Esto permite controlar la potencia a inyectar a la red, ya sea reactiva o activa, cuando opera como un VSI PV. Además para el caso que se esté trabajando solo como un compensador, el control es el encargado de realizar la compensación de Reactivos, y en ambos casos el control también es el encargado de mantener la tensión en el enlace DC fija. Finalmente se presenta la estrategia y algoritmo que permite la desconexión o conexión del arreglo de paneles cuando no existe radiación solar. El algoritmo está basado en el cálculo de la Potencia mediante celdas solares de referencia, en corto circuito y circuito abierto. En efecto, a través del cálculo de la potencia entregada por las celdas de referencia y para una potencia bajo la mínima requerida en los paneles, el sistema solo inyecta reactivos a la red. Los resultados muestran la operación correcta de la estrategia propuesta.



En la memoria de mi hermanita, y a mis padres.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por su incondicional apoyo de una u otra forma, en especial a mi madre Gladys, a mi padre Manuel y en especial a mi hermanita Nathalie, quienes siempre estuvieron ahí para apoyarme y entregarme todo su cariño, amor y amistad en todo el camino que ha significado la etapa universitaria, como también en todos los demás aspectos, siendo el pilar fundamental de mi vida, además de formarme para ser quien soy y a quienes siempre amare.

También quiero agradecer a mi profesor guía José R. Espinoza C., por todo su apoyo durante el proceso de memoria de título como también del recorrido académico, por su buena acogida en el LCDA, además de su buena disposición y la orientación que me brindo durante todo este periodo.

Agradecimiento a los aportes otorgados por los proyectos FONDECYT/REGULAR/1140594 y al FONDECYT/FONDAP/15110019, y al soporte técnico provisto por el Laboratorio de Control Digital Aplicado, LCDA, de la Universidad de Concepción.

De igual forma quiero agradecer a los integrantes del LCDA, ya que fueron de gran ayuda en este periodo, no solo en lo académico sino también en la convivencia diaria

Y por último y no menos importante quisiera agradecer a mis amigos quienes han sido parte fundamental en mi vida, brindándome su apoyo y amistad incondicional.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XI
ABREVIACIONES.....	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	2
1.2.1 <i>Generación de Energía Solar</i>	2
1.2.2 <i>Compensación Basada en Convertidores Estáticos</i>	3
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	5
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	6
CAPÍTULO 2. COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO	8
2.1. INTRODUCCIÓN	8
2.2. COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO.....	8
2.3. MODELACIÓN STATCOM.....	10
2.3.1 <i>Modelación en ejes abc</i>	10
2.3.2 <i>Modelación en ejes dq0</i>	12
2.4. SIMULACIÓN OPERACIÓN NOMINAL INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA	13
2.5. SIMULACIÓN CONTROL INYECCIÓN POTENCIA REACTIVA.....	17
2.5.1 <i>Cambio Referencia Potencia Reactiva</i>	18
2.5.2 <i>Perturbaciones en Voltaje de Red</i>	22
2.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	27
CAPÍTULO 3. INVERSOR FUENTE DE VOLTAJE PV	29
3.1. INTRODUCCIÓN	29
3.2. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	29
3.3. INVERSOR FUENTE DE VOLTAJE PV.....	32
3.3.1 <i>Desscripción de la Topología</i>	32
3.3.2 <i>Estados del Inversor</i>	33

3.3.3	<i>Implementación Técnica de Conmutación</i>	34
3.3.4	<i>Modelación ejes abc</i>	35
3.3.5	<i>Modelación ejes dq0</i>	38
3.4.	SIMULACIÓN OPERACIÓN NOMINAL VSI PV	39
3.4.1	<i>Inyección Potencia Activa a la Red</i>	40
3.4.2	<i>Inyección Potencia Activa y Reactiva a la Red</i>	43
3.5.	SIMULACIÓN CONTROL INYECCIÓN POTENCIA VSI PV	46
3.5.1	<i>Cambio Referencia Potencia Reactiva</i>	47
3.5.2	<i>Cambio Referencia Potencia Activa</i>	52
3.6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	56
CAPÍTULO 4. TRANSICIÓN TIPO DE SISTEMA		58
4.1.	INTRODUCCIÓN	58
4.2.	SISTEMA DE CONTROL	58
4.3.	IMPLEMENTACIÓN TRANSICIÓN SISTEMAS.....	61
4.4.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	64
CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN CAMBIO DE SISTEMAS		65
5.1.	INTRODUCCIÓN	65
5.2.	SIMULACIÓN IMPLEMENTACIÓN CAMBIO SISTEMAS.....	65
5.2.1	<i>VSI PV a Inyección de Reactivos Puro</i>	65
5.2.2	<i>Inyección de Reactivos puro a VSI PV</i>	69
5.3.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	73
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		74
6.1.	SUMARIO	74
6.2.	CONCLUSIONES	75
6.3.	TRABAJO FUTURO.....	77
BIBLIOGRAFÍA		78
ANEXO A. TRANSFORMADA DE PARK		81

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Parámetros Operación nominal Compensador.....	14
Tabla 3.1. Configuración estados admisibles VSI.....	33
Tabla 3.2 Parámetros Operación Panel.....	39
Tabla 3.3 Parámetros Operación nominal VSI PV.....	40



Lista de Figuras

Fig. 2.1. Topología propuesta para STATCOM.....	9
Fig. 2.2. Circuito equivalente por una fase del compensador a la frecuencia fundamental.....	10
Fig. 2.3. Formas de Onda Comportamiento Nominal STATCOM.....	15
Fig. 2.4. Formas de onda corrientes y Comparación Voltaje de Red.....	16
Fig. 2.5. Moduladoras ejes <i>abc</i> Operación Nominal Compensador.....	17
Fig. 2.6. Bloque Lazo control Compensador.....	17
Fig. 2.7. Lazo Control de Corriente Desacoplado.....	18
Fig. 2.8. Formas de onda Comportamiento Compensador frente a cambio escalón en referencia Potencia Reactiva de 150 (VAR).....	19
Fig. 2.9. Formas de Onda Corrientes Compensador frente a cambio escalón en referencia Potencia Reactiva de 150 (VAR).....	21
Fig. 2.10 Moduladoras en <i>abc</i> frente a cambio escalón en referencia Potencia Reactiva de 150 (VAR).....	22
Fig. 2.11. Formas de Onda Comportamiento Compensador frente a Sag de 10% en Voltaje de Red.....	24
Fig. 2.12. Formas de Onda Comparación Voltaje de Red y Corrientes de Red y carga fase a frente a SAG del 10% en la tensión de Red	24
Fig. 2.13. Formas de Onda Comportamiento Compensador frente a Swell de 10% en Tensión de Red.....	26
Fig. 2.14. Formas de Onda Comparación Voltaje de Red y Corrientes de Red y carga fase a frente SAG del 10% en la tensión de Red.....	27
Fig. 3.1 Modelo de la celda Panel Fotovoltaico.....	30
Fig. 3.2. Curvas Voltaje-Corriente para distintas Variaciones de Temperatura e Irradiación.....	32
Fig. 3.3. Comparación Señal Portadora Triangular y Moduladora sinusoidal. Señal SPWM.....	35
Fig. 3.4 Topología propuesta Inversor Fuente de Voltaje Trifásico PV.....	38
Fig. 3.5. Curvas Operación Nominal para una celda.....	39
Fig. 3.6. Formas de Onda Comportamiento VSI PV Inyección Potencia Activa.....	42
Fig. 3.7. Formas de Onda Corrientes VSI PV Inyección Potencia Activa.....	42
Fig. 3.8. Moduladoras <i>abc</i> VSI PV Inyección Potencia Activa	43
Fig. 3.9. Formas de Onda Comportamiento VSI PV Inyección Potencia Activa y Reactiva.....	44
Fig. 3.10. Formas de Onda Corrientes Sistema Inyección Potencia Activa y Reactiva.....	45
Fig. 3.11. Moduladoras <i>abc</i> VSI PV Inyección Potencia Activa y Reactiva.....	46
Fig. 3.12. Sistema y lazos de Control VSI PV.....	47
Fig. 3.13. Formas de Onda comportamiento VSI PV frente a escalón en referencia Potencia Reactiva.....	49
Fig. 3.14. Forma de Ondas de las Corrientes del Sistema frente a escalón en referencia Potencia Reactiva...	51

Fig. 3.15. Moduladoras *abc* del sistema frente a escalón en referencia Potencia Reactiva.....52

Fig. 3.16. Formas de Onda comportamiento VSI PV frente a escalón en referencia Potencia Activa.....53

Fig. 3.17. Forma de Ondas de las Corrientes del Sistema frente a caída en referencia Potencia Activa.....55

Fig. 3.18. Moduladoras *abc* del sistema frente a caída en referencia Potencia Activa.....55

Fig. 4.1. Topología Transición Sistemas.....60

Fig. 4.2. Algoritmo Elección Tipo Sistema.....61

Fig. 4.3. Formas de onda Perfiles Panel Solar Referencia.....62

Fig. 4.4. Respuesta sistema frente a Radiación solar.....63

Fig. 5.1. Variables de Interés Control selección tipo de sistema.....66

Fig. 5.2. Formas de onda transición entre VSI PV y Compensador Puro.....67

Fig. 5.3. Formas de ondas corrientes sistema transición PV a Compensador puro.....69

Fig. 5.4. Moduladoras *abc* cambio sistema VSI PV a STATCOM.....69

Fig. 5.5. Variables de Interés Control selección tipo de sistema.....70

Fig. 5.6. Comportamiento transición entre Compensador Puro y VSI PV.....71

Fig. 5.7. Formas de ondas corrientes sistema.....72

Fig. 5.8. Moduladoras *abc* cambio sistema STATOM a VSI PV.....72



Nomenclatura

Matrices

$\mathbf{T}_{abc-dq0}$: matriz de transformación de ejes abc a $dq0$.

$\mathbf{T}_{dq0-abc}$: matriz de transformación de ejes $dq0$ a abc .

Escalares

M : magnitud de las moduladoras en ejes abc .

θ : ángulo desfase moduladoras ejes abc (en grados).

f_s : frecuencia moduladoras ejes abc (en Hz).

f_{tri} : frecuencia señal triangular (en Hz).

Vectores

x : vector variables de estado



Definiciones

Drive : Accionamiento en base a un Inversor Fuente de Voltaje.

Sag : Perturbación eléctrica, disminución del voltaje de red.

Swell : Perturbación eléctrica, aumento del voltaje de red.

Abreviaciones

Mayúsculas

DSP	: Procesador Digital de Señales.
PV	: Photovoltaic (referente a panel solar fotovoltaico).
PWM	: Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de Pulso).
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation (PWM con Moduladora Sinusoidal).
VSI	: Voltaje Source Inverter (Inversor Fuente de Voltaje).
DC	: Direct current (corriente continua).
AC	: Altern current (corriente continua).
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
LCK	: Ley de Corriente de Kirchoff.
LVK	: Ley de Voltaje de Kirchoff.
PCC	: Point of Common Coupling (Punto de Unión Común).
MPPT	: Maximum Power Point Tracking (Seguimiento de Punto de Máxima Potencia).
STATCOM.	: Static Synchronous Compensator (Compensador Estático Sincrónico).
D-STATCOM	: Distributed STATCOM
FACTS	: Flexible AC Transmission Systems.
DG	: Distributed Generation (Referencia a Generación de energía inyectada a la red de distribución)
L.A.	: Lazo Abierto.
L.C.	: Lazo Cerrado.
PI	: Controlador Proporcional Integrativo.

Minúsculas

<i>fp.</i>	: Factor de Potencia.
<i>dq</i>	: Ejes rotatorios.
<i>abc:</i>	: Ejes abc.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

Es sabido que las energías renovables no convencionales o alternativas, están tomando una gran relevancia en los últimos años a nivel mundial como también nacional. Una de estas en particular es la generación de energía solar a través de paneles solares fotovoltaicos [1] [2], ya sea para la generación eléctrica, con potencias en el rango de Mega watts, como también para la implementación domiciliaria o industrial, en el rango de kilowatts, para la inyección a la red de distribución.

Uno de los inconvenientes de la generación de energía solar es su comportamiento durante el ciclo diario, puesto que existen largos periodos de tiempo en el cual no es posible obtener potencia. En efecto, esto es debido a la nula existencia de luz solar (radiación) durante la noche, la cual es la fuente de la generación de energía a través de paneles fotovoltaicos. Por esto existe una sub-utilización de los dispositivos de electrónica de potencia convertidores de energía. En este caso los inversores, debido a que estos son diseñados para operar con tal de obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar. Es decir, las componentes se diseñan con el rating para trabajar en el Punto de Máxima Potencia [6], que corresponde a los instantes en que existe presencia de radiación solar. Este trabajo se basa en el uso de la capacidad ociosa que presenta la generación en base a PV, en particular, durante la noche o cuando no hay radiación solar disponible.

Por otra parte, una de las restricciones de conectarnos a la red eléctrica es mantener una calidad mínima y la red estable [20], dentro de ciertos márgenes [21]. Es por esto que en la literatura se puede encontrar que existe una gran cantidad de topologías que permiten compensar reactivos o mantener el factor de potencia requerido por la red. Es así como con el paso del tiempo y el avance de la tecnología y la electrónica de potencia, se logró pasar desde compensadores pasivos a la compensación que utiliza semiconductores, como lo son los convertidores estáticos.

Tomando en cuenta estas dos problemáticas presentes en sistemas eléctricos de potencia, es que nace la alternativa de utilizar inversores en aplicaciones de PV como compensadores de potencia

reactiva sin cambiar su configuración, siendo ésta una solución al problema de la capacidad ociosa en los sistemas PV. En particular la topología que presenta mayores cualidades en su utilización y que es empleada en este trabajo es el STATCOM o compensador paralelo [8] [9]. Éste consiste en un VSI al cual se le puede modificar la potencia a entregar mediante estrategias de control y de esta forma poder inyectar potencia reactiva en los lapsos ociosos o no del convertidor, siendo esto el tema fundamental de este trabajo.

1.2. Trabajos Previos

En esta sección se revisan diferentes trabajos que tienen relación con el tema de esta Memoria de Título. Estos se dividen en dos, en primer lugar se hace una revisión a la generación de Energía Fotovoltaica, donde se entrega una visión general de ésta. En la sección siguiente se revisan los trabajos que describen algunas de las topologías de compensación de reactivos mediante convertidores estáticos.



1.2.1 Generación de Energía Solar

Como se ha mencionado la generación fotovoltaica ha crecido en los últimos años [1], donde es posible ver el incremento que ha tenido la generación de energía a través de paneles solares. Además el alto potencial que presenta nuestro país a escala de la radiación presente, no sólo en el Norte de Chile, sino también el incremento de ésta a nivel nacional [15]. Ésta acompañada de la electrónica de potencia correspondiente, es común ver en la literatura aplicaciones de diferentes técnicas de control presentes en los convertidores estáticos. Por ejemplo, como los encontrados en las plantas solares como también diferentes topologías de implementación de estos, ya sean DC-DC o Inversores, y de igual manera el estudio de su comportamiento frente a diferentes condiciones, ya sea de su conexión como ambientales.

El gran inconveniente de la generación de energía solar, como se ha mencionado, es que no es constante en el tiempo, es por eso que en la bibliografía es común ver diversos algoritmos de control sobre la performance de la generación PV [13] [16]. Además, se abordan técnicas que permiten operar

a máxima potencia con tal de obtener un mejor aprovechamiento de la energía solar disponible [25]. Por ejemplo, la estrategia utilizada es la de MPPT, donde se quiere operar en el punto de la curva de Potencia-Voltaje máximo. Este algoritmo lo que busca es operar con la tensión del panel que entrega la mayor Potencia, existiendo diversos algoritmos de control para calcular dicho voltaje, siendo los más comunes de implementar el método de Perturbar y Observar (P&O) como también el de Conductancia Incremental (Incremental Conductance), y de esta forma obtener la tensión de referencia requerido para dicha condición.

De igual manera de un tiempo a esta fecha en la literatura se ha trabajado en la capacidad de utilizar los paneles solares no sólo para la entrega de potencia activa sino también inyectando reactivos [24]. Así se aprovecha la conexión que presentan con tal de asegurar una buena calidad del suministro eléctrico para plantas conectadas a la red de transmisión o distribución [23]. Por otra parte otro de los avances en las topologías de control o implementación de sistemas de generación solar ha sido la utilización de celdas de referencia [17], las cuales sirven de equivalente a la planta solar para la obtención del Punto de Máxima Potencia.

1.2.2 Compensación basada en Convertidores Estáticos.

La red como ya se mencionó requiere de ciertos estándares, ya sea por un tema de imposición legal de nuestro país o con tal de asegurar una correcta operación de los sistemas eléctricos de potencia [20]. Por lo tanto el factor de potencia juega un papel fundamental [21] en la calidad del suministro eléctrico, y es así como se compensan los efectos reactivos producidos por las cargas conectadas al sistema, como también de los producidos por las líneas de transmisión en sí.

Por esta razón, es que con el paso de los años se pasó de tener elementos pasivos para el uso de compensación, como lo son los Bancos de condensadores, a la utilización de la electrónica de potencia, teniendo ambos el mismo principio de funcionamiento. Éste consiste en generar o presentar una capacitancia variable al sistema. La utilización de la electrónica de potencia da vida a los FACTS, pudiendo de esta forma controlar de forma más eficiente los sistemas de compensación, como también la capacidad de obtener una mayor flexibilidad para la calidad de la energía suministrada [14] [18].

Las topologías presentes en los FACTS no solo operan de forma tal de compensar los reactivos de la red, sino que también son capaces de operar frente a otras problemáticas presentadas por la red, de esta forma obtener una buena calidad del suministro [22]. Por un lado se tiene la compensación serie, la cual nos permite corregir caídas o aumentos de la tensión en la red de alimentación y por otro lado la compensación paralela, que está encargada de corregir el factor de potencia y la distorsión armónica de corriente [9] [10].

De este desglose se llega a la compensación en paralelo, en particular la topología STATCOM [8] [9], la cual permite compensar los reactivos presentes en la red. Éste se basa en poder operar un Inversor Fuente de Voltaje sin la necesidad de hacer arreglos en la topología de este, el cual puede no solo inyectar reactivos, sino también potencia activa mientras se tenga una fuente de alimentación DC independiente.

1.3. Hipótesis de Trabajo

- Un sistema de generación fotovoltaico puede operar como compensador de potencia reactiva independiente de la existencia de radiación solar. De esta forma es posible dividir la operación del sistema ante radiación o no, en base al nivel de potencia generado por un panel auxiliar, para el correcto funcionamiento del equipo inversor. Además estrategias de control lineal permiten la operación estable y regulada del equipo tanto en presencia o no de radiación solar.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Proponer un algoritmo que permita el máximo aprovechamiento de la capacidad instalada de convertidores estáticos utilizados en paneles solares para la compensación de reactivos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las diferentes topologías de Compensación de Potencia Reactiva, en específico Compensadores Estáticos.
- Analizar el funcionamiento de un STATCOM.
- Analizar el funcionamiento de Inversor Fuente de Voltaje PV.
- Determinar el punto de operación nominal para ambos casos.
- Implementación de las topologías en LA.
- Simulación de una estrategia de compensación de reactivos para convertidores estáticos PV.
- Proponer una estrategia de control para mantener la inyección adecuada de Potencia Activa como Reactiva a la Red, cuando sea necesario.
- Simulación estrategia de control para la topología propuesta.
- Implementación de un algoritmo para la transición entre ambos tipos de sistemas.
- Evaluar el desempeño de la topología propuesta mediante simulación.

1.5. Alcances y Limitaciones

- La propuesta se realizará en base a modelos obtenidos de la literatura estándar.
- Las pruebas se realizarán mediante simulación en PSIM, Mathcad, Matlab.
- El sistema se encuentra sometido a temperatura ambiente constante de 25 °C.
- El voltaje en el lado de DC para la operación del STATCOM se considera fijo.
- Los semiconductores utilizados en el inversor serán ideales, sin embargo, las pérdidas por conducción pueden ser representadas a través de una resistencia en paralelo conectada en el lado DC.
- El análisis matemático se realiza considerando un sistema trifásico balanceado.
- Las líneas de transmisión se consideran ideales, es decir, no presentan resistencia ni inductancias.
- Se trabajara con carga lineal del tipo RL.

1.6. Temario y Metodología

El trabajo de Memoria Título está compuesto por 4 capítulos más un capítulo introductorio y otro referente a las conclusiones propiamente tal. En el primer capítulo se presenta la topología propuesta mediante el estudio bibliográfico de diferentes trabajos publicados relacionados con los temas de interés, como lo son la generación PV, Inversores Fuente de Voltaje y Compensadores Estáticos de Potencia, además se ubica el tema en el contexto general de la ingeniería electrónica. A su vez también se detalla la hipótesis de trabajo, los objetivos, alcances y las limitaciones a considerar en su desarrollo.

En el segundo capítulo se muestra el funcionamiento del Inversor como un compensador de Potencia Reactiva en paralelo puro, en este caso la topología utilizada es el STATCOM. Se presenta todo el modelo matemático referente a éste pasando de los ejes *abc* a los ejes rotatorios, para de esta forma poder operar el sistema adecuadamente con su consiguiente estrategia de control.

En el capítulo número tres se presentara la teoría sobre VSI, en especial la utilización de estos para la interconexión de una fuente de alimentación Fotovoltaica en el lado DC y en el lado AC la red, en este caso de distribución, como también la implementación de las señales de conmutación PWM, de tal manera de poder inyectar potencia ya sea esta activa o reactiva, mediante la estrategia de control propuesta.

Habiendo operado el Inversor en los dos tipos de sistemas, como compensador puro y como un acondicionador de potencia con la tensión DC mantenida mediante una fuente solar fotovoltaica, en el capítulo cuatro se presenta una estrategia la cual nos permite la transición entre estos dos tipos de comportamiento del Drive.

Luego habiendo interconectado ambos sistemas, y teniendo la estrategia de control que nos permite el traspaso de un sistema a otro, se realizan las simulaciones pertinentes para cada caso, es decir, teniendo el Inversor funcionando como acondicionador de potencia fotovoltaico a compensador puro y viceversa.

Finalmente se realizará un sumario del trabajo realizado como también la presentación de las conclusiones obtenidas a través de todos los resultados encontrados, además de la presentación de trabajos futuros a realizar para el sistema propuesto.



Capítulo 2. Compensador Estático Sincrónico

2.1. Introducción

En este capítulo se muestra el análisis del convertidor operando como compensador de potencia reactiva en paralelo, mediante la topología STATCOM. Se desarrolla la modelación matemática de la topología tanto en ejes abc como en $dq0$. Se realiza la simulación de éste en un punto de operación nominal, como también en LC, con su consiguiente estrategia de control asociada. De esto se obtienen resultados referentes a la respuesta del sistema y su control mediante cambio en la referencia de la potencia reactiva, como también frente a perturbaciones en la red.

2.2. Compensador Estático Sincrónico (STATCOM)

Como se ha mencionado el STATCOM consiste en la utilización de un Inversor Fuente de Voltaje trifásico, conectado en paralelo al sistema entre la alimentación y la carga en el PCC, la configuración del sistema es la mostrada en la Fig. 2.1. La carga corresponde a una carga lineal tipo RL la cual se determina según el factor de potencia y potencia aparente elegidos, al igual que demás componentes según Tabla 2.1. Como se puede observar en la Fig.2.1 la topología de STATCOM a implementar, utiliza la red AC como fuente de alimentación con tal de mantener el voltaje en el enlace DC.

El compensador en paralelo es capaz de generar o absorber de forma controlada tanto potencia reactiva como potencia activa, este es análogo a una máquina síncrona ideal que genera un conjunto de voltajes balanceados a frecuencia fundamental con amplitud y ángulo controlable. Esta máquina ideal al ser un convertidor estático, no tiene inercia y su respuesta es prácticamente instantánea. El intercambio de potencia reactiva entre el compensador y la red se logra variando la amplitud del voltaje entregado por el Inversor Fuente de Voltaje, de esta forma existen tres modos de operación, los cuales se detallarán a continuación:

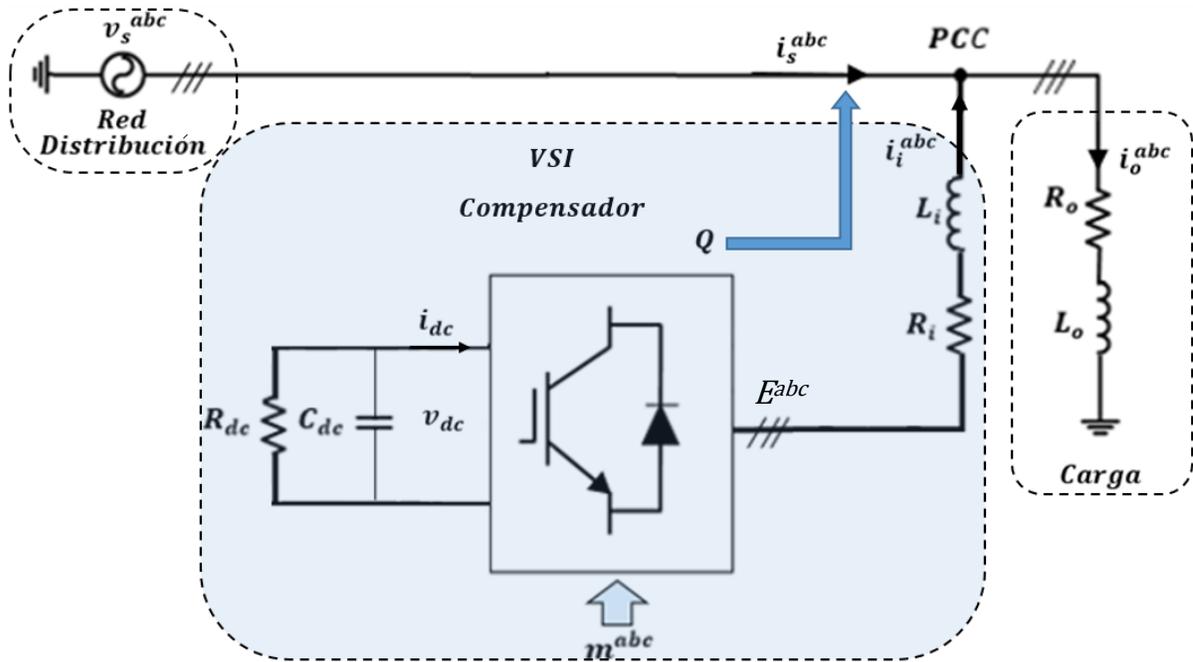
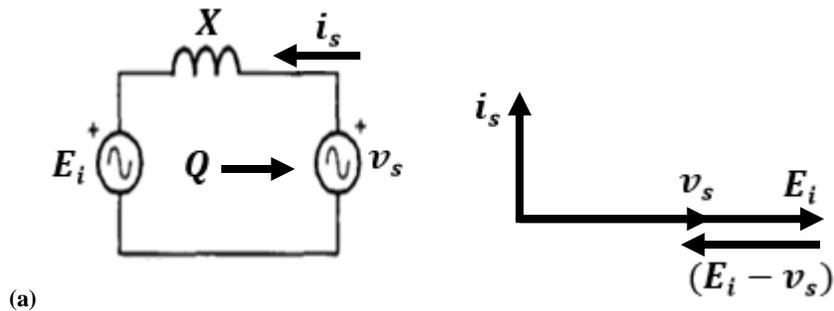


Fig. 2.1. Topología propuesta para STATCOM.

-Si la amplitud del voltaje del compensador es superior al voltaje de la red, entonces la corriente fluirá desde el STATCOM a la red. En éste caso el compensador se comporta como un capacitor inyectando potencia reactiva a la red Figura 2.2 (a).

-Si la amplitud de voltaje en la red es mayor al voltaje del compensador, entonces la corriente fluirá de la red al compensador, comportándose así como un inductor, es decir, consumiendo reactivos Figura 2.2 (b).

-Si los voltajes son iguales entre la red y el compensador, entonces no existe intercambio de potencia reactiva.



(a)

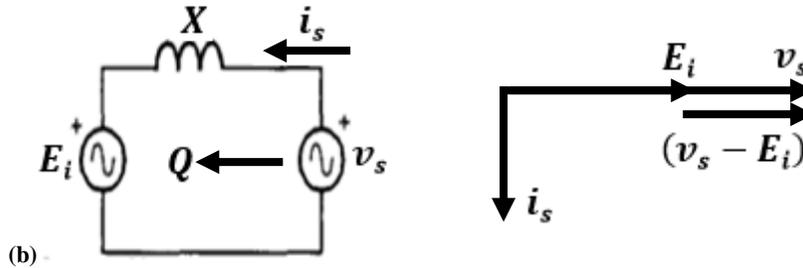


Fig. 2.2. Circuito equivalente por una fase del compensador a la frecuencia fundamental.

(a) Diagrama fasorial para factor de potencia en atraso. (b) Diagrama fasorial para factor de potencia en adelante.

De forma similar el intercambio de potencia activa entre el compensador y la red se puede lograr controlando el ángulo del voltaje del compensador respecto al ángulo del voltaje en la red. Si éste ángulo es igual entre ambos no hay intercambio de potencia activa sólo reactiva. El compensador se representa por una fuente sinusoidal de frecuencia fundamental como la mostrada en la Fig. 2.2.

2.3. Modelación STATCOM

2.3.1 Modelación en ejes abc



Para modelar matemáticamente el sistema se utilizan las Leyes de Voltaje y Corriente de Kirchoff correspondientes, las cuales definen las ecuaciones de estado del sistema. Éstas están dadas según la cantidad de elementos almacenadores de energía y describen el comportamiento dinámico de las variables de estado.

Utilizando LVK correspondientes en los inductores y aplicando LCK en el enlace DC, se obtienen las ecuaciones (2.1) a (2.3).

$$-v_s^{abc} = L_i \frac{di_i^{abc}}{dt} + R_i i_i^{abc} - E^{abc} \quad (2.1)$$

$$v_s^{abc} = L_o \frac{di_o^{abc}}{dt} + R_o i_o^{abc} \quad (2.2)$$

$$i_{dc} = -C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R_{dc}} \quad (2.3)$$

- v_s^{abc} : voltajes alimentación red de distribución en ejes abc ,
 i_i^{abc} : corrientes salida inversor en ejes abc ,
 i_o^{abc} : corrientes carga en ejes abc ,
 E^{abc} : voltaje salida inversor en ejes abc ,
 v_{DC} : voltaje enlace DC, voltaje que cae en el condensador,
 i_{DC} : corriente continua que entra al convertidor,
 R_i : resistencia del filtro de salida del inversor,
 L_i : inductancia del filtro de salida del inversor,
 R_o : resistencia de la carga,
 L_o : inductancia de la carga,
 R_{dc} : resistencia del enlace DC, simula las pérdidas del convertidor,
 C_{dc} : condensador de enlace DC.

Luego de haber obtenido las ecuaciones se procede a despejar, para de esta manera obtener las ecuaciones de estado en abc presentes en las ecuaciones (2.4) a (2.6).

$$\frac{di_i^{abc}}{dt} = -\frac{v_s^{abc}}{L_i} - \frac{R_i}{L_i} i_i^{abc} + \frac{E^{abc}}{L_i} \quad (2.4)$$

$$\frac{di_o^{abc}}{dt} = \frac{v_s^{abc}}{L_o} - \frac{R_o}{L_o} i_o^{abc} \quad (2.5)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C_{dc}} + \frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{dc}} \quad (2.6)$$

Así se tiene que reemplazado las ecuaciones (2.7) y (2.8), ecuaciones de ligazón, en las ecuaciones anteriores, se obtienen las ecuaciones de estado finales (2.9) a (2.11), para de esta forma poder determinar el punto de operación nominal del sistema.

$$i_{dc} = m^{abc} i_i^{abc} \quad (2.7)$$

$$E^{abc} = m^{abc} v_{dc} \quad (2.8)$$

$$\frac{di_i^{abc}}{dt} = -\frac{v_s^{abc}}{L_i} - \frac{R_i}{L_i} i_i^{abc} + \frac{m^{abc} v_{dc}}{L_i} \quad (2.9)$$

$$\frac{di_o^{abc}}{dt} = \frac{v_s^{abc}}{L_o} - \frac{R_o}{L_o} i_o^{abc} \quad (2.10)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -m^{abc} \frac{i_i^{abc}}{C_{dc}} + \frac{v_{dc}}{R_{dc} C_{dc}} \quad (2.11)$$

m^{abc} : moduladora en abc .

2.3.2 Modelación en ejes $dq0$

Con las ecuaciones de estado del sistema ya definidas en los ejes abc , se procede a encontrar una representación en los ejes rotatorios $dq0$ utilizando la Transformada de Park invariante en el tiempo, de esta forma se puede operar con cantidades continuas, así obteniendo una mejor y fácil forma de poder operar el sistema en LC con sus lazos de control respectivos, además tomando en cuenta que el sistema trifásico es balanceado se tiene que la componente 0 se omite.

$$m^{dq} = \mathbf{T}_{abc-dq} m^{abc} \quad (2.12)$$

$$E^{dq} = m^{dq} v_{dc} \quad (2.13)$$

$$i_{dc} = (m^{abc})^T i_i^{abc} \quad (2.14)$$

Por lo cual las moduladoras en dq quedan expresadas en la ecuación (2.12), para así obtener las ecuaciones de estados matriciales en los ejes rotatorios, ecuaciones (2.15) a (2.17).

$$\frac{di_i^{dq}}{dt} = -\frac{v_s^{dq}}{L_i} + \mathbf{W} i_i^{dq} - \frac{R_i}{L_i} i_i^{dq} + \frac{m^{dq} v_{dc}}{L_i} \quad (2.15)$$

$$\frac{di_o^{dq}}{dt} = \frac{v_s^{dq}}{L_o} + \mathbf{W}i_o^{dq} - \frac{R_o}{L_o}i_o^{dq} \quad (2.16)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -m^{dq} \frac{i_i^{dq}}{C_{dc}} + \frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{dc}} \quad (2.17)$$

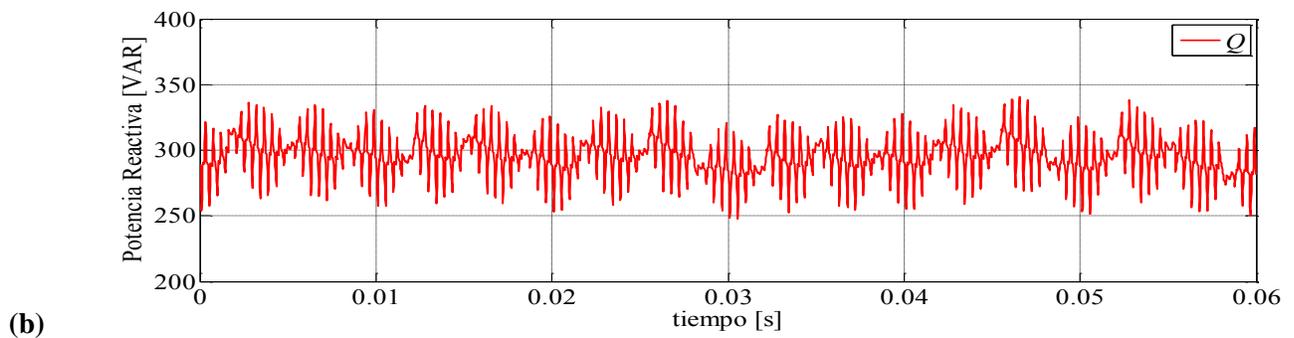
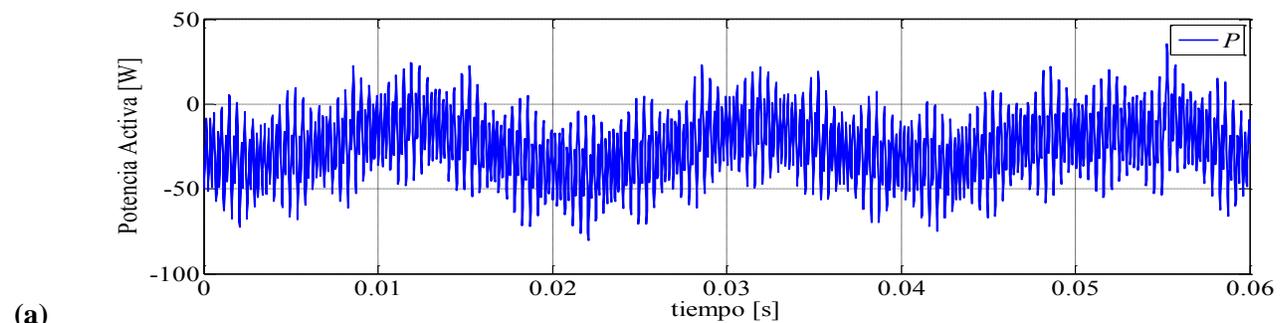
2.4. Simulación Operación Nominal Inyección de Potencia Reactiva

Teniendo las ecuaciones de estado en los ejes dq se procede a calcular un punto de operación nominal para el STATCOM, y así se obtienen los valores de las moduladoras, las corrientes y la tensión DC, las cuales son variables de estado, mediante software matemático en dq , y de esta forma se obtiene los resultados en abc , luego se simula y opera el sistema en forma nominal con las características de carga y parámetros del sistema presentadas en la Tabla 2.1.

Como se puede observar en las gráficas el sistema se comporta de acuerdo a los valores antes indicados en la Tabla 2.1, es decir, operando en condiciones nominales, teniendo una potencia reactiva inyectada como la deseada en la Fig. 2.3. de 300 (VAR). Una potencia activa de -25 (W), por lo que en este caso el Drive se encuentra consumiendo potencia y no entregando, puesto que no posee fuente independiente de alimentación en el lado continuo. Por su parte el voltaje DC se encuentra en el punto de operación deseado, además del resultante voltaje PWM a la salida del inversor, teniendo un peak igual a la tensión en el enlace DC, de 219.593 (V), como es de esperar.

Tabla 2.1 Parámetros Operación nominal Compensador.

Parámetro	Valor	Valor por Unidad (p.u.)
$f_{p_{carga}}$	0.8	-
$f_{p_{PCC}}$	1	-
Q_{DRIVE}	300 (VAR)	0.6
S_{carga}	500 (VA)	1
$v_{s_{RMSl}}$	50 (V)	1
v_{dc}	219.593 (V)	4.392
L_i	15 (mH)	0.001
R_i	1 (Ω)	0.067
L_o	29 (mH)	0.001933
R_o	12 (Ω)	0.8
C_{dc}	300 (μ F)	222.222
R_{dc}	5 (k Ω)	333.333
M^{abc}	0.725793	-
θ	-1.671 $^\circ$	-
f_s	50 (Hz)	-
f_{tri}	2.25 (kHz)	-



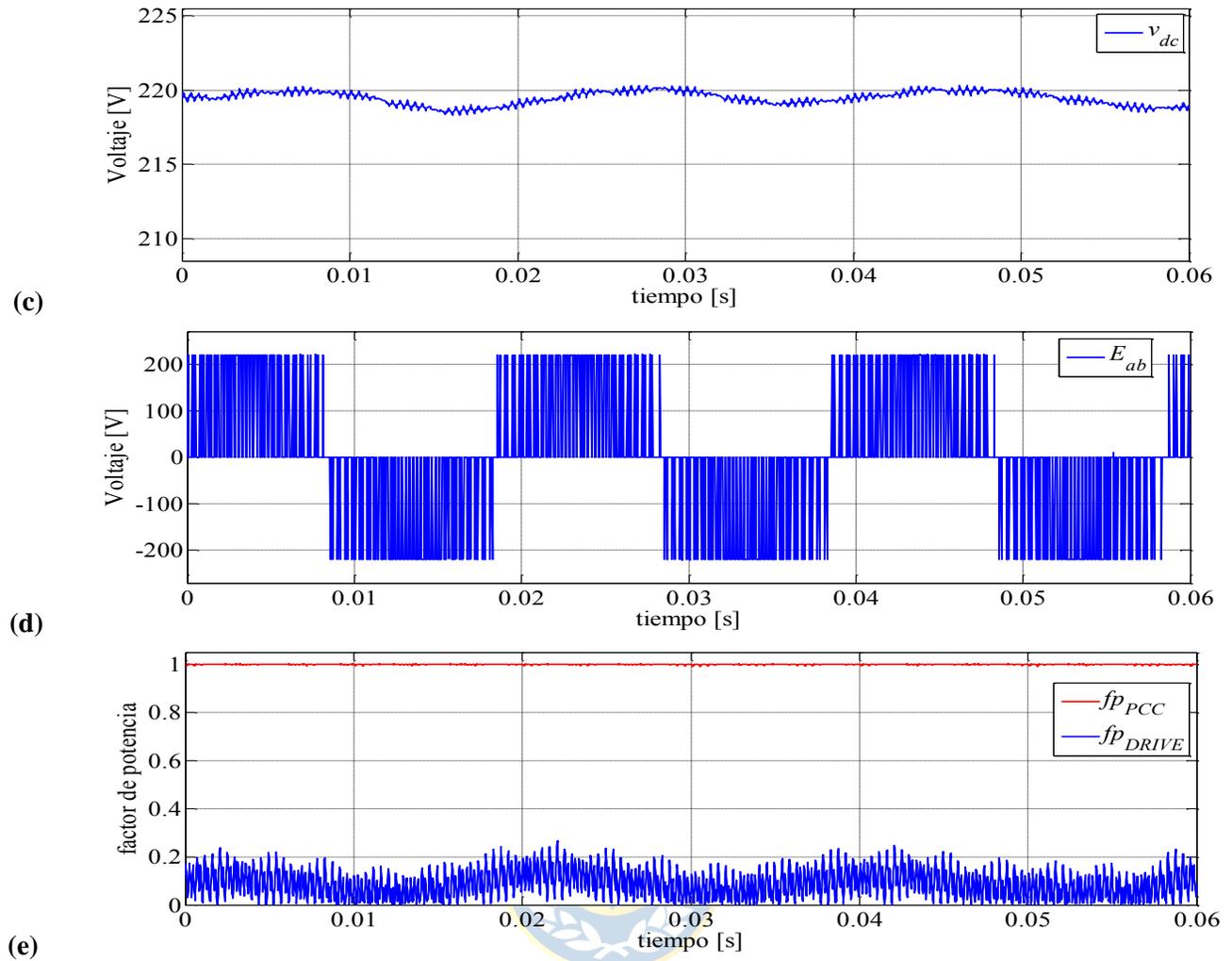


Fig. 2.3. Formas de Onda Comportamiento Nominal STATCOM.

(a) Potencia Activa Salida VSI P . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q . (c) Voltaje enlace DC v_{dc} . (d). Voltaje PWM Salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC e Inversor.

Además se tiene que las corrientes se encuentran en los valores deseados. Las corrientes de salida del Drive se encuentran balanceadas, por otro lado la corriente DC presenta valores positivos y negativos debido a la componente de inductividad Fig. 2.4 (b), es decir, el sistema está entregando reactivos a la red.

El sistema se encuentra compensando los reactivos de la red, como se puede apreciar en las señales de la Fig. 2.4 (c), donde se aprecia que la corriente de red está en fase con el voltaje a diferencia de la corriente de carga, la cual se encuentra con un desfase con respecto a la tensión, esto puede ser visto de igual manera en las gráficas de la Fig. 2.3 (e), donde el factor de potencia en el PCC es unitario a diferencia del de la carga, el cual permanece constante en 0.8, también se observa que el fp del Drive

es distinto de uno, por lo cual el sistema se encuentra entregando reactivos a la red, en este caso los necesarios con tal de asegurar la calidad del suministro.

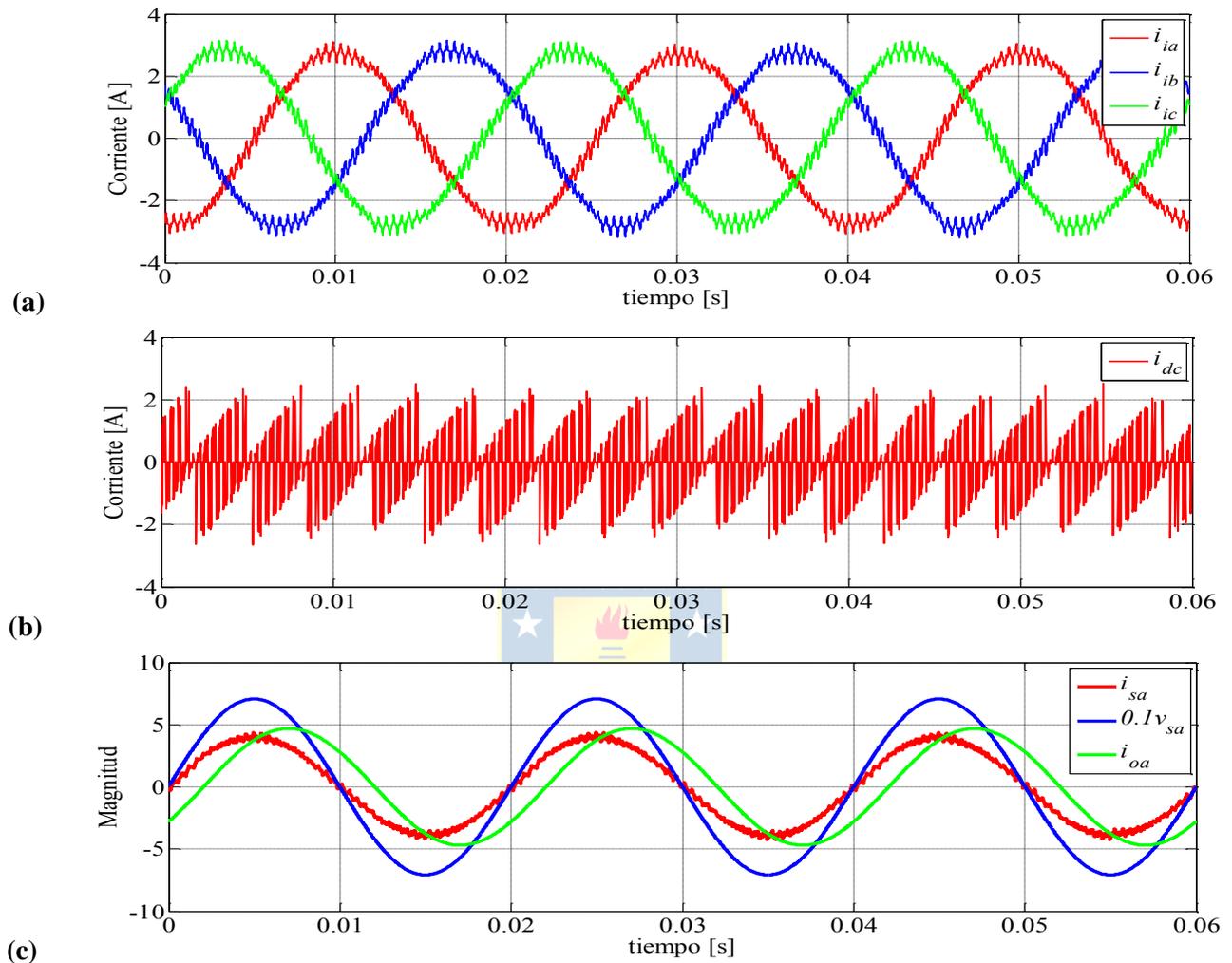


Fig.2.4. Formas de onda corrientes y Comparación Voltaje de Red.

(a) Corrientes Salida Compensador i_i^{abc} . (b) Corriente lado DC i_{dc} (c) $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

Las moduladoras calculadas para la condición nominal están bajo el valor unitario, por lo tanto el sistema no se encuentra sobre modulado.

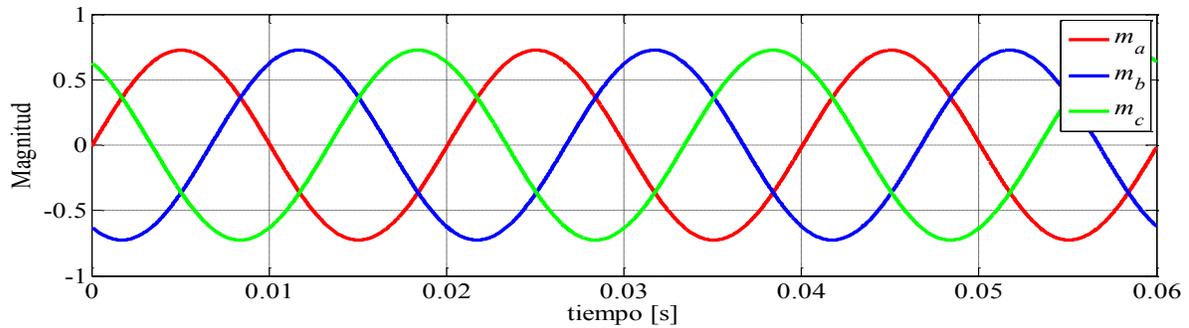


Fig.2.5. Moduladoras ejes abc Operación Nominal STATCOM.

2.5. Simulación Control Inyección de Potencia Reactiva

Se procede a implementar un sistema de control el cual nos permita operar el sistema en LC de forma eficiente y fiable, para esto se utiliza la configuración mostrada en la Fig.2.5, la cual consiste en un lazo de corriente desacoplado del lazo de voltaje. Este lazo desacoplado Fig. 2.6. consiste en obtener un modelo del sistema, para de esta forma poder desacoplar el lado DC del AC del convertidor. Así se puede controlar la potencia reactiva necesaria a inyectar como también el valor del voltaje DC requerido, pudiendo operar a distintos valores de voltaje evitando sobre modulación.

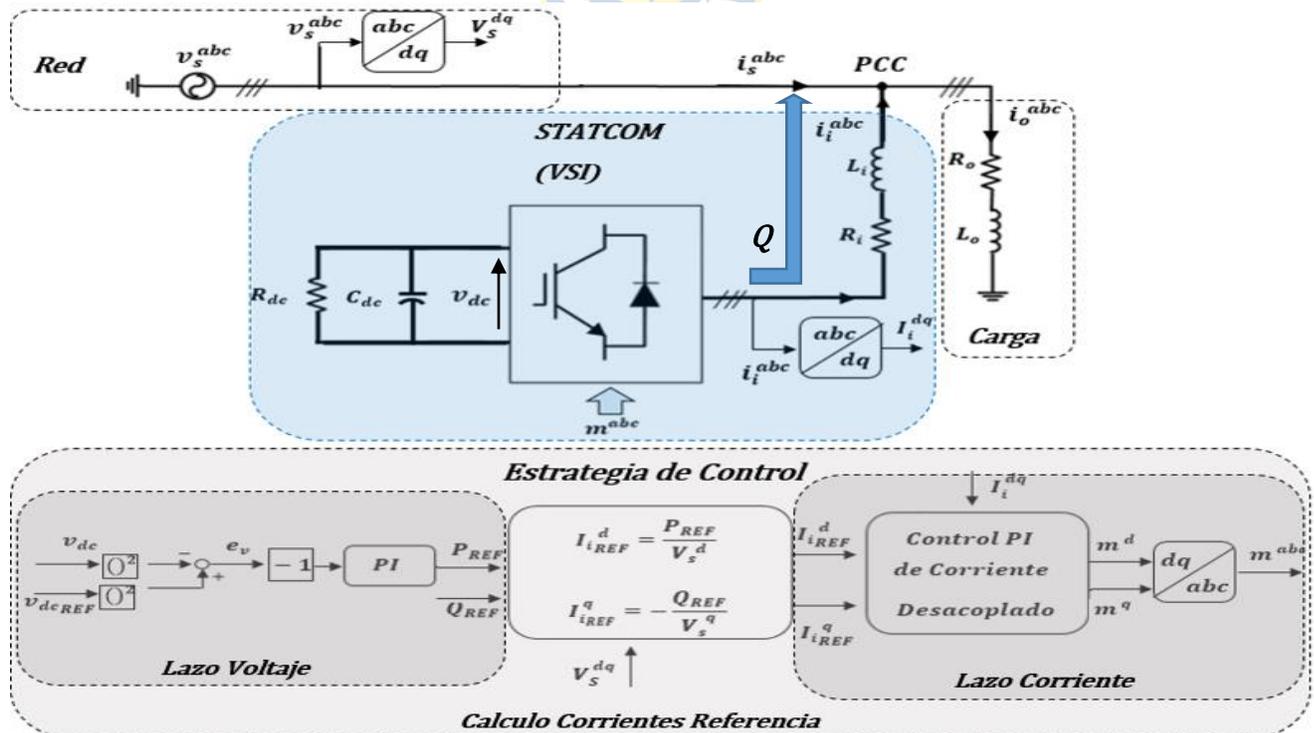


Fig.2.6. Bloque Lazo control Compensador.

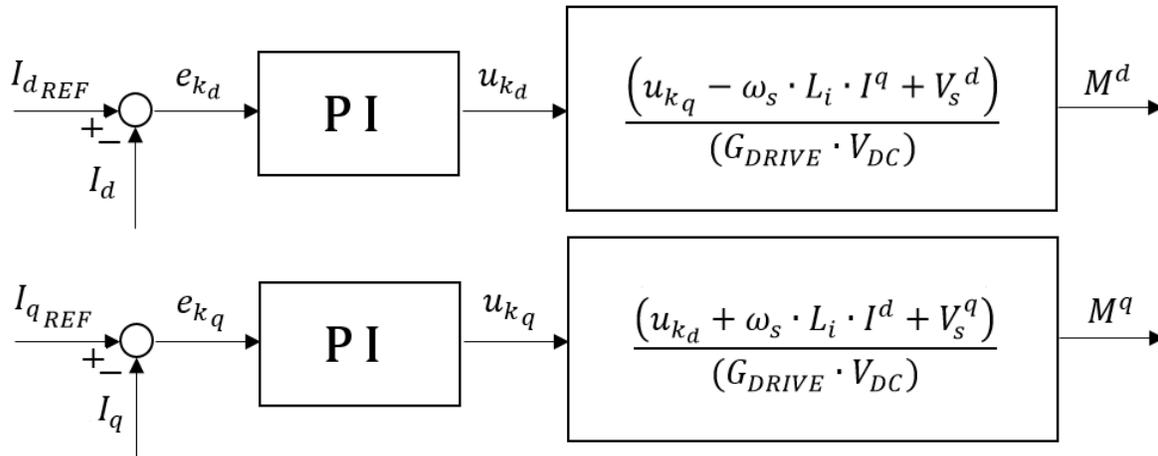
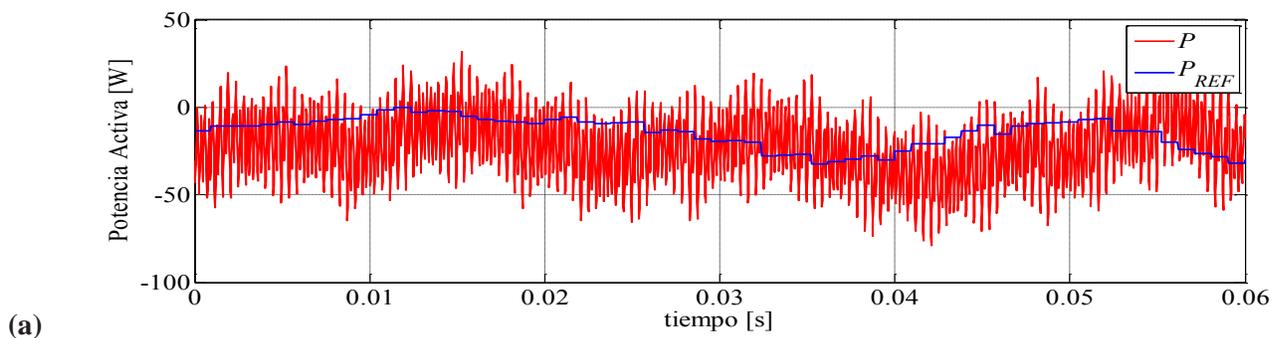


Fig. 2.7. Lazo Control de Corriente Desacoplado.

2.5.1 Cambio Referencia Potencia Reactiva

En este subcapítulo se realiza la simulación del sistema de la Fig. 2.6, es decir, el compensador con el esquema de control correspondiente, para entrada escalón en la potencia reactiva. En este caso como se puede ver en la Fig. 2.8 (b), el sistema estaba operando con una inyección de 150 (VAR) para luego pasar en forma escalón a un valor de 300 (VAR). Se aprecia que el sistema responde de forma eficaz, pues la potencia reactiva sigue a su referencia. De igual modo pasa con la tensión en el enlace DC, donde la referencia se mantiene fija y el voltaje en el enlace se mantiene en el valor deseado Fig. 2.8 (c), pasando por un pequeño transiente al momento de exigir más reactivos al sistema.



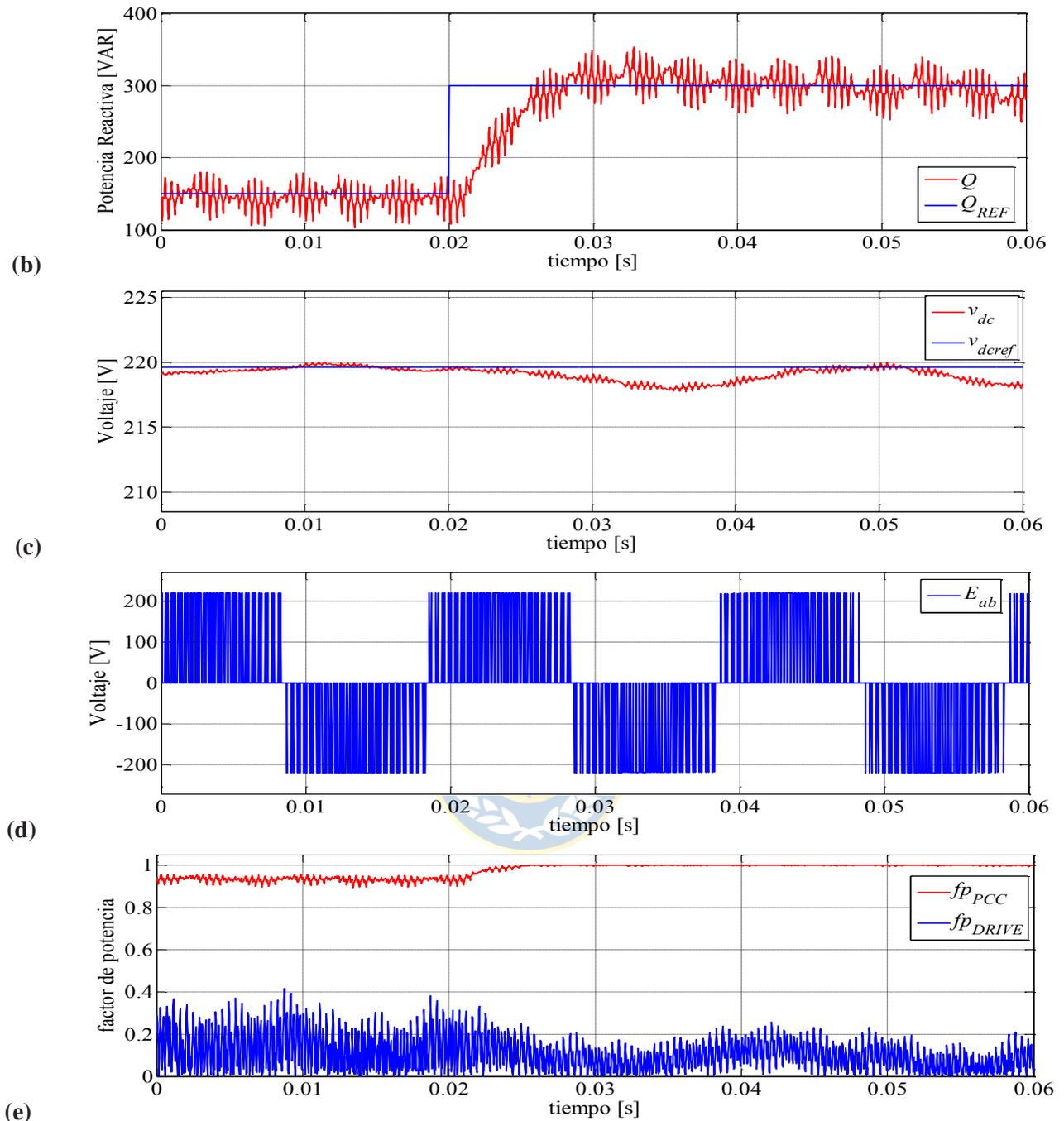


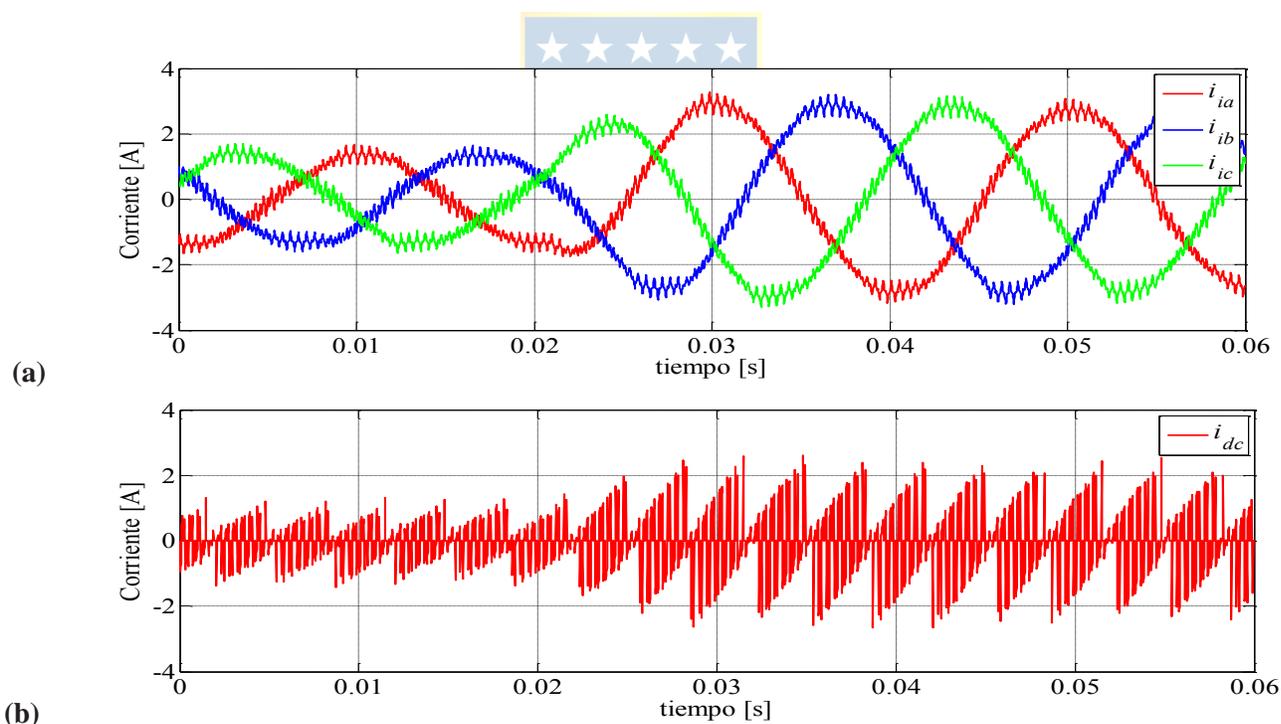
Fig. 2.8. Formas de onda Comportamiento Compensador frente a cambio escalón en referencia Potencia Reactiva de 150 (VAR).

(a) Potencia Activa Salida Compensador P y Potencia de Referencia P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida Compensador y Referencia Q_{REF} . (c) Tensiones lado DC: v_{dc} y referencia v_{dcREF} . (d). Voltaje PWM Salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC y Drive.

Se aprecia el incremento de la corriente suministrada por el inversor y de igual forma se incrementa la corriente en el lado DC. Esto queda demostrado en las corrientes dq , donde se puede

ver que el sistema al pedir más reactivos se incrementa la referencia de corriente en cuadratura en el mismo porcentaje. Debido a que éstas están directamente relacionadas, puesto que la corriente I_q es igual a la potencia reactiva dividido por el voltaje de red en cuadratura, siendo este último constante. Por lo cual al ser estas corrientes convertidas a abc se incrementan las corrientes i_i .

También se observa que con el sistema operando con una inyección de 150 (VAR) se tiene un fp en el PCC de 0.93, el cual es el mínimo permitido, de aquí al incrementar la inyección de reactivos al valor nominal antes señalado, alcanzándose el valor esperado, es decir, se mantiene el fp unitario en la red, para esta condición. De igual forma se puede observar en la gráfica donde se compara la tensión de red y las corrientes Fig. 2.9 (c), en la cual la corriente de red en el lapso donde aún no se realiza el incremento de reactivos se encuentra levemente más atrasada que la corriente de la carga, puesto que el fp en el PCC es mayor al de la carga, de esta forma al inyectar los reactivos necesarios se tiene que la corriente i_s queda totalmente en fase con el voltaje de red.



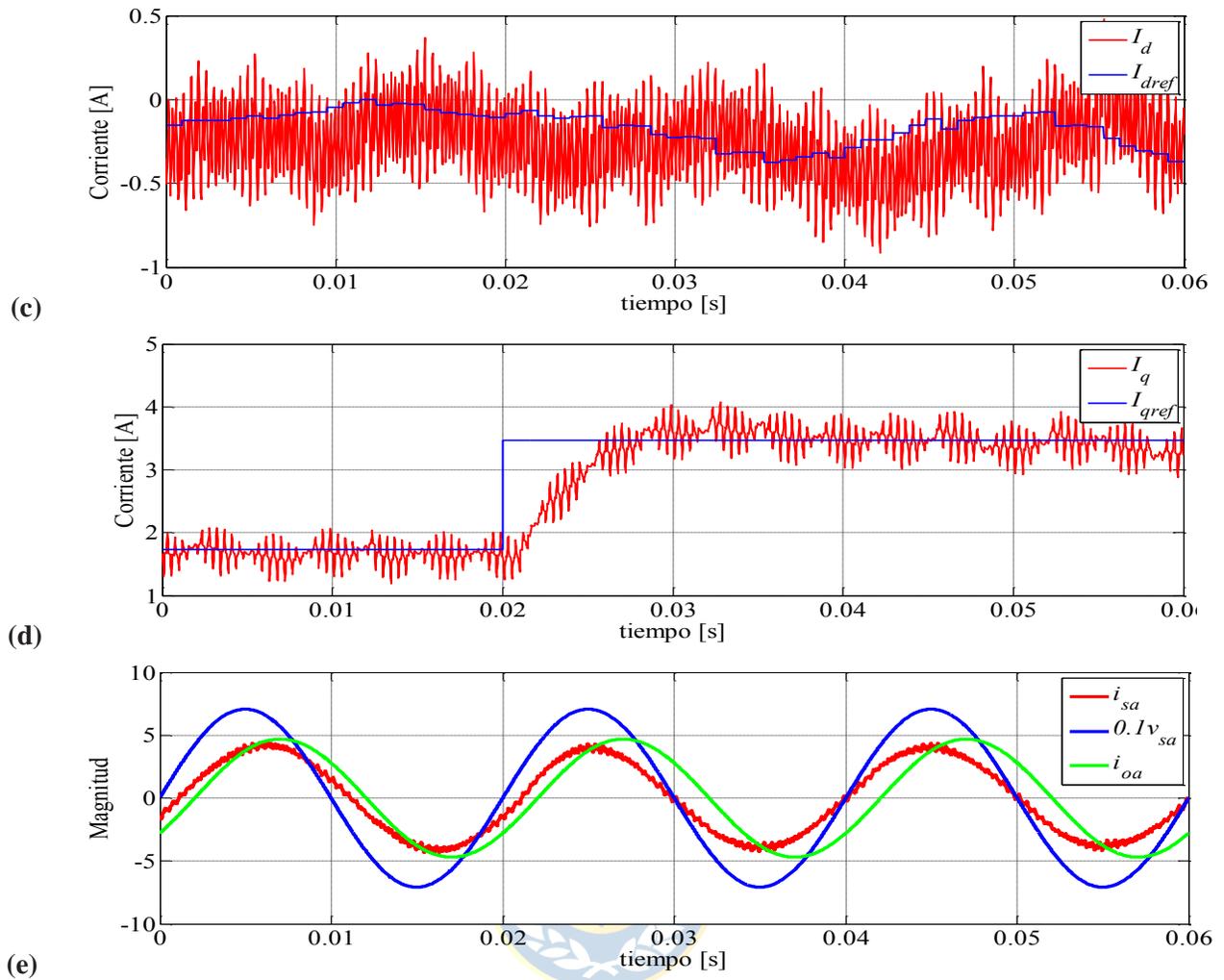


Fig. 2.9. Formas de Onda Corrientes Compensador frente a cambio escalón en referencia Potencia Reactiva de 150 (VAR).

- (a) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (b) Corriente lado DC i_{dc} . (c) Corrientes I_d e I_{dREF} . (d) Corrientes I_q e I_{qREF} .
 (e) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes i_{sa} e i_{oa} .

El sistema no se encuentra sobre modulando en ninguno de los dos instantes, como muestran las gráficas de las moduladoras Fig.2.10, esto se ve reflejado en el Voltaje PWM que entrega el convertidor Fig. 2.8 (d). El cual permanece casi intacto debido a la poca variación del voltaje DC Fig. 2.8 (c) al momento de realizar el cambio en la referencia de reactivos, no presentando surcos vacíos en los cantos de conmutación.

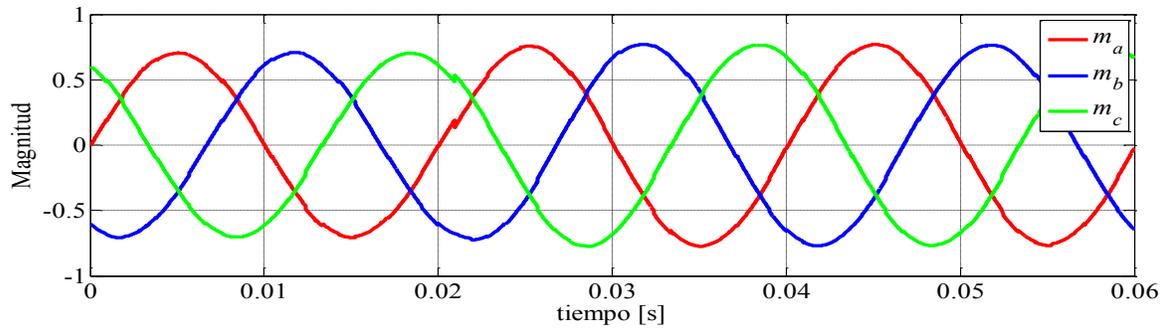


Fig. 2.10 Moduladoras en *abc* frente a cambio escalón en referencia Potencia Reactiva de 150 (VAR).

2.5.2 Perturbaciones en Voltaje de Red

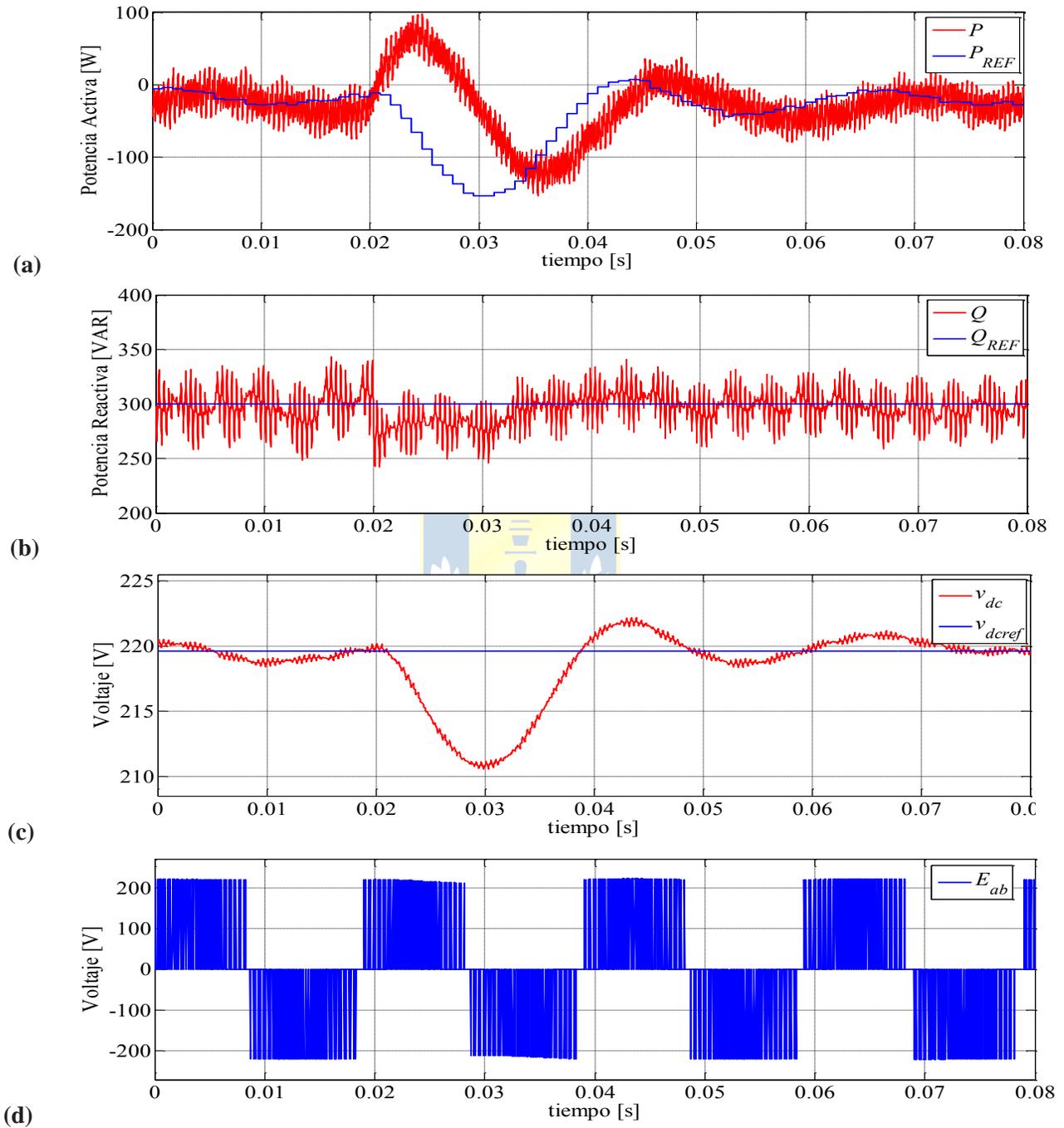
Teniendo el sistema de compensador de reactivos STATCOM con su estrategia de control correspondiente se procede a simular diversas variaciones en el voltaje de la red, en este caso se presentarán perturbaciones del 10% para el sistema.

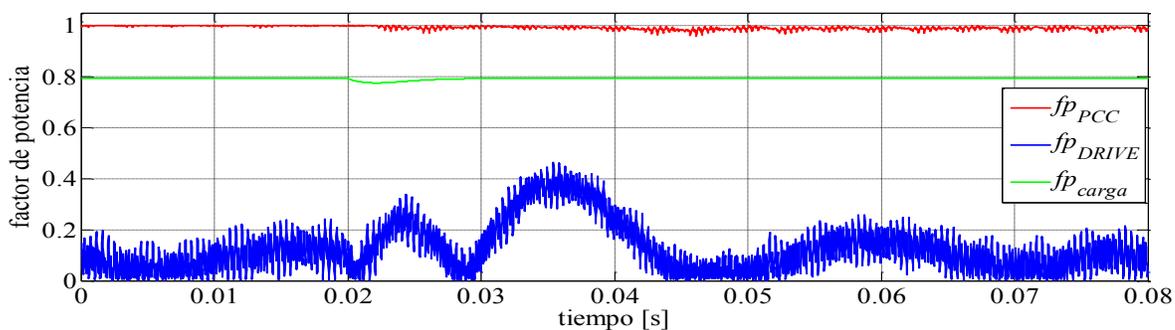
Para el primer caso se determina el comportamiento y la respuesta del sistema frente a perturbación de un Sag de 0.1 (p.u.) Fig.2.11 y Fig. 2.12. Teniendo como referencia una potencia reactiva de 300 (VAR) y v_{dcREF} en el enlace DC de 219.593 (V), ambas condiciones de operación nominal.

De aquí se observa que la potencia reactiva inyectada no sufre cambios al momento de realizarse la perturbación, es así como ésta sigue a la referencia de forma constante. Por otro lado la potencia activa consumida se ve incrementada en un pequeño porcentaje debido al incremento en la cantidad de corriente que debe proporcionar el Drive. De igual forma se puede observar un pequeño incremento en la corriente del lado DC. Así también la tensión del enlace DC pasa por un transiente al instante de suceder el Sag, para luego recuperarse debido a la acción de la estrategia de control habilitada, puesto que la referencia se mantiene constante en el valor antes mencionado Fig. 2.11 (c).

Por otro lado se puede ver el cambio casi imperceptible que sufre el factor de potencia del PCC, éste debido al transiente en el voltaje DC antes mencionado, como también al cambio en la corriente de salida del inversor. Es así como al variar el voltaje de red, en este caso habiendo una disminución de éste, se obtiene un factor de potencia un pequeño porcentaje menor a la unidad Fig.

2.11 (e), siendo esto reflejado en un adelanto en la corriente de la red respecto a la tensión Fig. 2.12 (c). El factor de potencia de la carga se ve disminuido Fig. 2.11 (e) debido a la caída del voltaje de alimentación, retrasándose la corriente con respecto a la tensión Fig. 2.12(c).

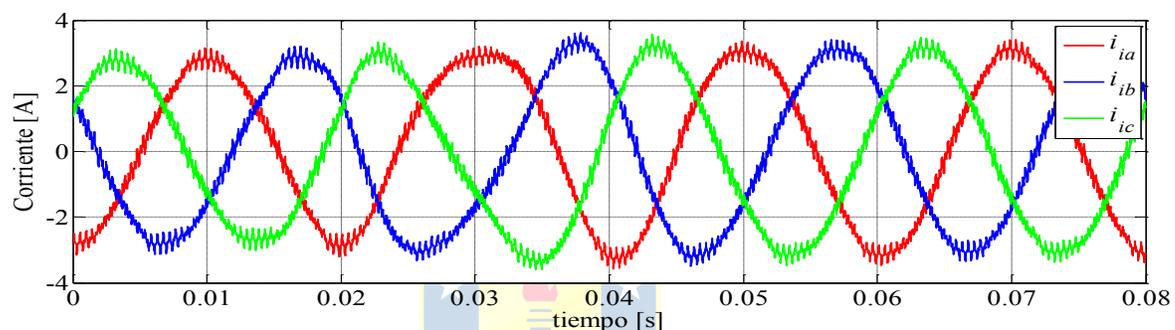




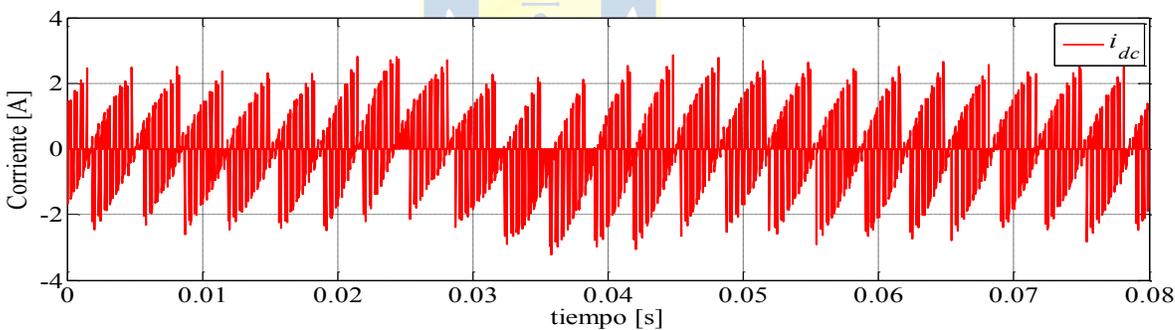
(e)

Fig. 2.11. Formas de Onda Comportamiento Compensador frente a Sag de 10% en Voltaje de Red.

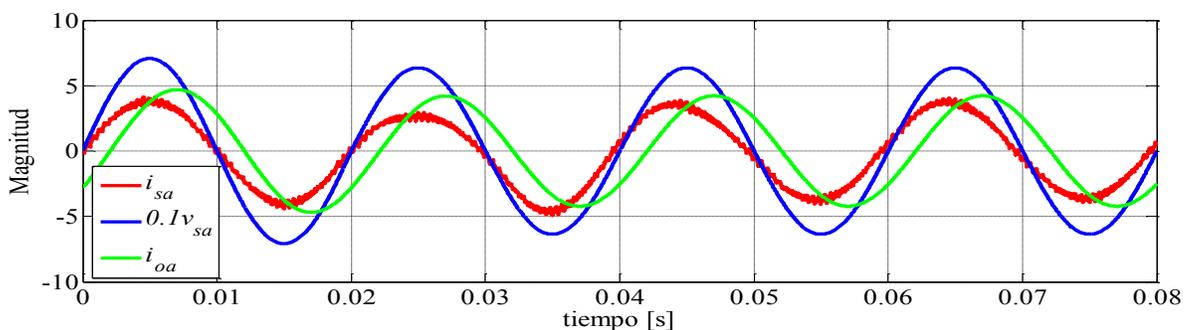
(a) Potencia Activa Salida VSI P y P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q y Q_{REF} . (c) Voltaje Enlace DC v_{dc} y voltaje de referencia v_{dcREF} . (d) Voltaje Salida Compensador E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC, Carga y Drive.



(a)



(b)

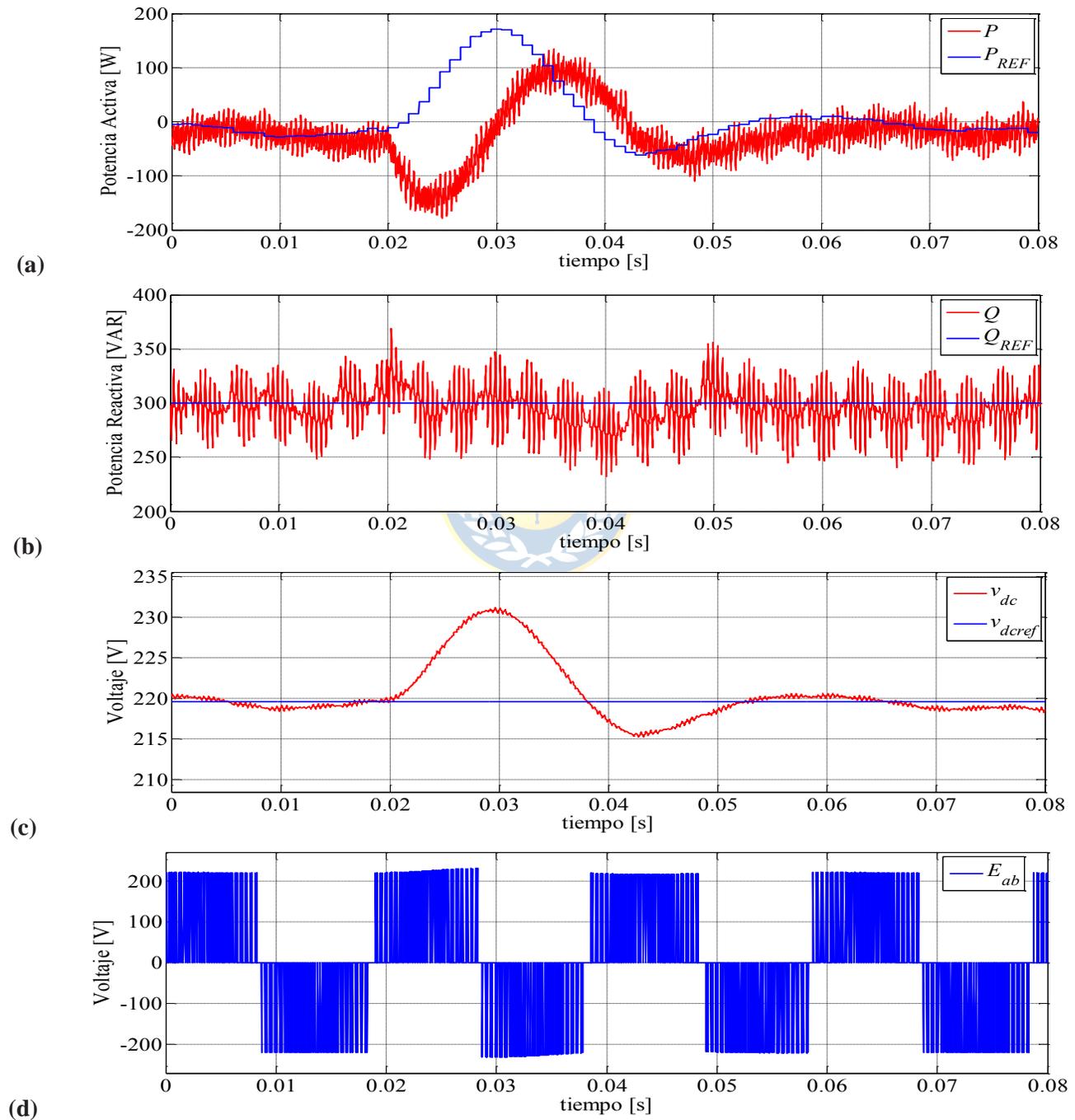


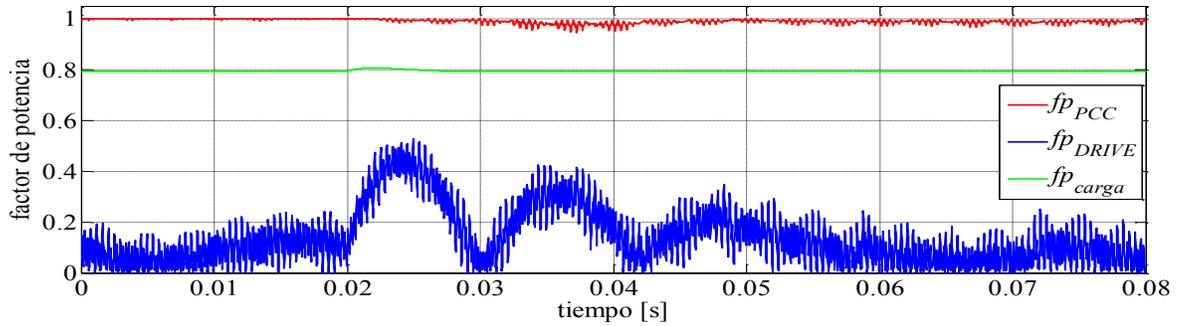
(c)

Fig. 2.12. Formas de Onda Comparación Voltaje de Red y Corrientes de Red y carga fase a frente a SAG del 10% en la tensión de Red.

(a) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (b) Corriente lado DC i_{dc} . (c) Comparación $0.1v_{sa}$ con i_{sa} e i_{oa} .

Luego se tiene la respuesta del sistema para un Swell de 0.1 (p.u.), a los 0.02 segundos de simulación Fig.2.13 y Fig.2.14. Donde se puede apreciar que para las gráficas correspondientes a la potencia reactiva y activa existe un comportamiento similar al anterior, en este caso una pequeña disminución en la potencia activa consumida por el inversor, y manteniéndose la inyección de reactivos igual a la referencia de 300 (VAR).





(e)

Fig. 2.13. Formas de Onda Comportamiento Compensador frente a Swell de 10% en Tensión de Red.

(a) Potencia Activa Salida VSI P y P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q y Q_{REF} . (c) Voltaje Enlace DC v_{dc} y voltaje de referencia v_{dcREF} . (d). Voltaje Salida Compensador E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC, Carga y Drive.

El voltaje DC presenta una perturbación en el instante en cual sucede el Swell, en este caso su sobrepaso es positivo debido al incremento de la tensión proveniente de la red, este también se ve reflejado en el voltaje PWM a la salida del inversor, y así luego por acción del control del enlace DC mantener el sistema siguiendo el voltaje de referencia, el cual se mantiene constante en el valor nominal, de igual forma que en el Sag.

Para este caso se tiene una disminución en la corriente suministrada por el convertidor al igual que para la corriente DC, esto debido al incremento de la tensión de línea, por lo cual se deben disminuir éstas para obtener una inyección de reactivos constante como lo mostrado en las gráficas de la Fig.2.13.

Así también se tiene que el factor de potencia en el PCC al momento de suceder el Swell disminuye en una pequeña cantidad, pues esta vez existe un pequeño adelantamiento de la corriente con respecto al voltaje de red, debido en este caso al incremento de éste, siendo el factor de potencia en el PCC un reflejo de las corrientes de red, las cuales son las utilizadas para el cálculo de este. Como es de esperar en el factor de potencia de la carga aumente en un pequeño porcentaje haciendo que la corriente de esta se vea retrasada en una pequeña cantidad Fig. 2.14 (c).

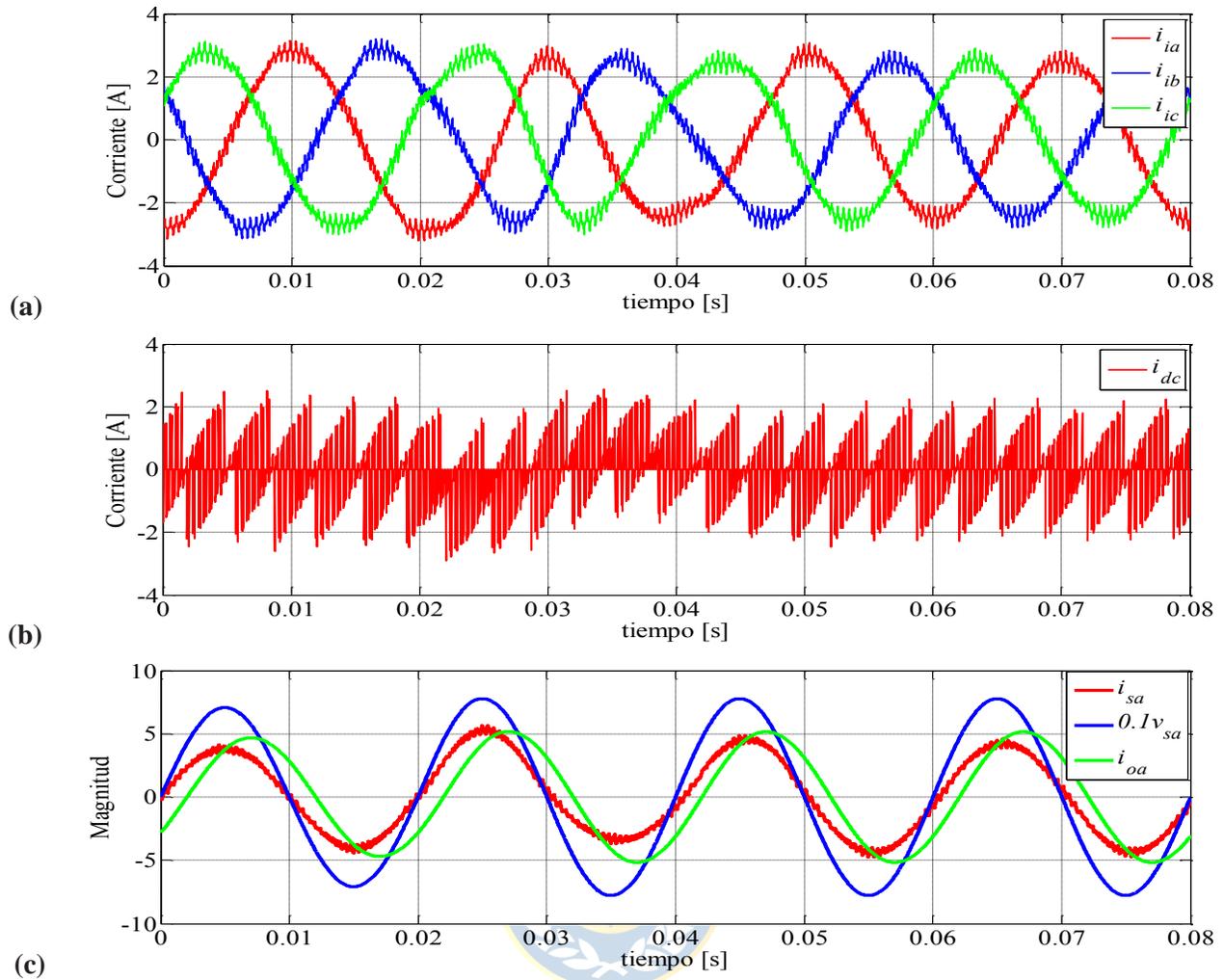


Fig. 2.14. Formas de Onda Comparación Voltaje de Red y Corrientes de Red y carga fase a frente a SAG del 10% en la tensión de Red.

(a) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (b) Corriente lado DC i_{dc} . (c) Comparación $0.1v_{sa}$ con i_{sa} e i_{oa} .

2.6. Discusión y Conclusiones

Se concluye en un principio que el sistema se comporta perfectamente para las condiciones nominales dadas, entregando la simulación valores iguales a los obtenidos teóricamente para llevarlo a cabo, mostrados en la Tabla 2.1.

Se puede apreciar que el voltaje DC nunca presenta un sobrepaso mayor al 5%, cuando existen variaciones en la red. De mejor forma se ve que la potencia reactiva entregada permanece constante

frente a cualquiera de estas variaciones, debido a la estrategia de control realizada. Similarmente, como se ha mencionado el Voltaje DC sigue la referencia consistentemente, luego de pasar por un transiente, al igual que la potencia reactiva. Además se tiene un sistema estable y sin sobre modulación para las diferentes condiciones ilustradas.

También se tiene que el sistema siempre está operando dentro de la normativa de calidad de suministro eléctrico, teniendo un factor de potencia igual al límite (0.93) cuando se inyectan 150 (VAR), y unitario para 300 (VAR). Similarmente, el sistema se comporta correctamente al experimentar perturbaciones en la red de alimentación, manteniéndose el factor de potencia por sobre 0.98. El sistema frente a Sag y Swell presenta el comportamiento esperado, siendo la estrategia de control la encargada de mantener las cantidades de acuerdo a las referencias. Esto se logra para tensión del enlace DC como la potencia reactiva, existiendo una dinámica más lenta para el lazo de voltaje que para las corrientes de salida del inversor. Una mejor aproximación a la compensación sería utilizar un esquema en el cual la referencia fuese el factor de potencia deseado en el PCC, y de esta forma determinar la cantidad de reactivos necesarios a suministrar, y su consiguiente corriente en cuadratura requerida, teniendo esto un grado de complicación mayor debido a la forma matemática para el cálculo del factor de potencia.



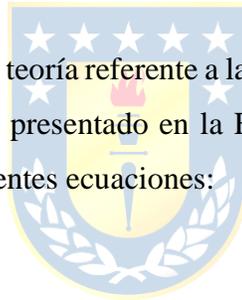
Capítulo 3. Inversor Fuente de Voltaje PV

3.1. Introducción

En este capítulo se abordará uno de los temas base de este trabajo como es la generación de energía a través de paneles solares y su respectivo acondicionamiento de potencia, pasando de DC a AC mediante un VSI trifásico, es así como se presentará la teoría relevante a éstos como también su forma de operación y el esquema de control que permite operar el sistema adecuadamente frente a los cambios en las condiciones requeridas.

3.2. Generación Fotovoltaica

Como punto de partida se tiene la teoría referente a la generación de energía a través de paneles solares, es así como se tiene el modelo presentado en la Fig. 3.1 el cual corresponde a su circuito equivalente, donde se obtienen las siguientes ecuaciones:



$$v_{oc} = V + IR_{sh} \quad (3.1)$$

$$I_d = I_D \left(\frac{Qv_{oc}}{AKT} - 1 \right) \quad (3.2)$$

R_s : resistencia a la circulación de la corriente la cual es función de las impurezas de la juntura p-n.

R_{sh} : resistencia inversamente proporcional a la corriente de fuga a tierra.

I_d : corriente de saturación del diodo.

Q : carga del electrón.

K : constante de Boltzmann.

T : temperatura.

A : constante.

v_{oc} : voltaje de circuito abierto para una celda.

i_{sc} : corriente de corto circuito para una celda.

Luego se tiene que la corriente de carga del panel está dada por la ecuación (3.5). La tensión de circuito abierto (v_{oc}) puede ser calculada en base al circuito de la Fig. 3.1 de la forma mostrada en la ecuación (3.4).

$$I = I_L - I_D \left(e^{\frac{Qv_{oc}}{AKT}} - 1 \right) - \frac{v_{oc}}{R_{SH}} \quad (3.3)$$

$$v_{oc} = \frac{AKT}{Q} \ln \left(\frac{I_L}{I_D} + 1 \right) \quad (3.4)$$

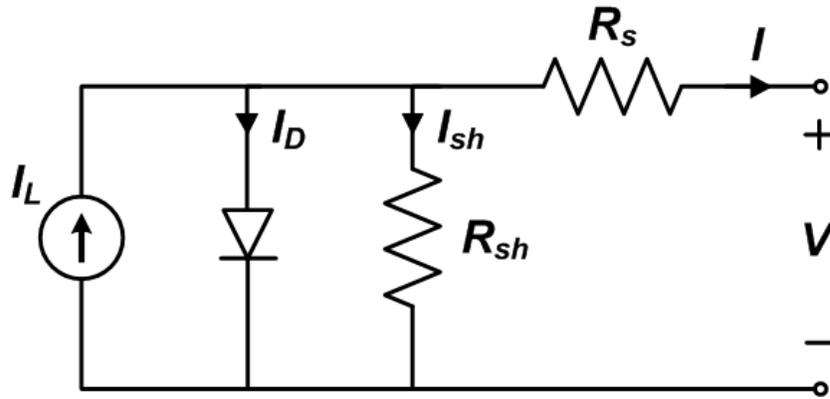


Fig. 3.1 Modelo de la celda Panel Fotovoltaico.

Modelando el circuito de la Fig. 3.1. frente a diversas condiciones meteorológicas, es decir, a variaciones en la radiación (G) y temperatura (T), se obtienen las ecuaciones (3.5) y (3.7) referentes a la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto, las cuales quedan expresadas en función de los parámetros antes mencionados, tomando como característica nominal SOL 1, esto es una temperatura de 25°C y radiación de $1000(\text{W}/\text{m}^2)$.

$$i_{sc}(G, T) = n_p i_{sc} \left(\frac{G}{G_{nom}} \right) + \alpha i_{sc} (T - T_{nom}) \quad (3.5)$$

$$V_t = m \cdot n_s \frac{K(T+273)}{Q} \quad (3.6)$$

$$v_{oc}(G, T) = v_{oc} + V_t \ln \left(\frac{G}{G_{nom}} \right) + \beta (T - T_{nom}) \quad (3.7)$$

m : factor de idealidad del diodo.

n_s : número de celdas en serie.

n_p : número de celdas en paralelo

T : temperatura en °C.

G : radiación.

Aplicando teoría de generación fotovoltaica, se tiene que para calcular el voltaje que se desea que entregue el arreglo de paneles, v_{PV} , estos deben ser conectados en serie con tal de obtener la tensión deseada, de esta forma se tiene la ecuación (2.8), y por otro lado para la obtención de la corriente requerida estos son conectados en paralelo, ecuación (2.9).

$$v_{PV} = n_S \cdot v_{celda} \quad (3.8)$$

$$i_{PV} = n_P \cdot i_{celda} \quad (3.9)$$

v_{PV} : voltaje continuo entregado por el arreglo de paneles,

v_{celda} : voltaje continuo de cada panel.

i_{PV} : corriente continua entregado por el arreglo de paneles,

i_{celda} : corriente continua de cada panel.

Los paneles solares fotovoltaicos como se presentó en las ecuaciones (3.5) y (3.7) presentan una performance dependiente de la radiación (W/m^2) y la temperatura (°C). Es así como con estos valores es posible determinar las curvas características de voltaje y corriente, en todo el rango de operación del panel, es decir, de voltaje 0 (V) a tensión de circuito abierto (v_{oc}) y corriente de 0(A) a corriente de corto circuito (i_{sc}), obteniendo a partir de estas curvas la correspondiente de potencia, y así obtener los puntos de operación a máxima potencia para cada una de las respectivas curvas. De esta forma cada panel comercial presenta curvas Voltaje-Corriente, para variaciones en temperatura y radiación como las de la Fig. 3.2, las cuales sirven de referencia para la elección de éstos de acuerdo al voltaje y corriente que se desea, ya sea de acuerdo a la potencia requerida, como también la corriente o tensión soportadas por las distintas cargas o acondicionadores de potencias conectados a los terminales de los paneles.

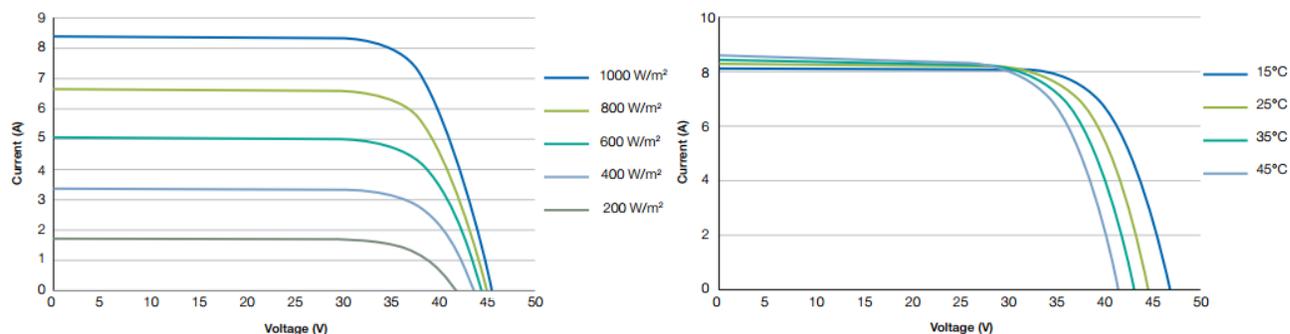


Figura 3.2. Curvas Voltaje-Corriente para distintas Variaciones de Temperatura e Irradiación (Panel comercial de Referencia).

3.3. Inversor Fuente de Voltaje PV

En esta parte del capítulo se presenta el análisis del convertidor VSI trifásico fotovoltaico, puesto que teniendo en cuenta el tipo de panel que se requiere conectar, como también habiendo calculado el número de estos en paralelo y en serie para la determinada potencia, luego se requiere un acondicionador de potencia el cual nos permita inyectar esta Potencia a la red o para ser suministrada a cargas de corriente alterna, por lo cual para este caso se utiliza un VSI. Es así como en este subcapítulo se mostrará una descripción general de la operación de dicha topología, las señales de disparo necesarias como también la simulación en un punto de operación determinado y el control de la inyección de potencia hacia la red, ya sea esta activa como reactiva.

3.3.1 Descripción de la Topología

El convertidor VSI nos permite obtener en su salida una tensión pulsante AC (PWM) producto de una selección y configuración adecuada de los switch. Por otro lado, debido a esta tensión pulsante es que se necesita una carga que no sea capacitiva, puesto que se producen altos dV/dt , por lo que se conecta una carga inductiva en los terminales de salida, y a su vez la corriente que entrante al VSI es pulsante, por lo cual se conecta un condensador con tal de evitar los cambios brusco de di/dt .

Como se muestra en la Figura 3.3, la topología cuenta con un condensador en el enlace DC y seis semiconductores, IGBT en este caso ya que son los más aptos para la utilización de Convertidores

PWM, pues satisfacen la necesidad de una frecuencia de switcheo elevada (kilo Hertz) y además de ser lo más adecuados para baja-media tensión. En los terminales de salida se encuentra el filtro AC y luego la carga RL, estos conectados al PCC.

3.3.2 Estados del Inversor

Un aspecto importante de considerar en el esquema modulador son los estados admisibles para realizar la conmutación de los semiconductores. Tanto en los convertidores fuentes de corriente como en los convertidores fuente de voltaje existen ciertas restricciones que limitan las combinaciones de encendido y apagado de los semiconductores. En el caso de los convertidores fuente de voltaje, nunca se debe seleccionar una combinación de pulsos de disparo que rompa las reglas mostradas a continuación:

- El enlace DC nunca debe estar cortocircuitado dada su característica capacitiva, es decir, nunca encender dos switch de una misma pierna en un mismo instante, condición prohibitiva.
- En los terminales de salida del convertidor nunca debe generarse una tensión indeterminada, no apagar dos switch de una misma pierna, esta condición no es prohibitiva.

Los pulsos de disparo seleccionados para el Inversor Fuente de Voltaje son mostrados en la TABLA 3.1.

Tabla 3.1. Configuración estados admisibles VSI.

S_a	S_b	S_c	$S_a - S_b$	$S_b - S_c$	$S_c - S_a$	i_{dc}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	1	i_c	0	$-V_{dc}$	V_{dc}
0	1	0	-1	1	0	i_b	$-V_{dc}$	V_{dc}	0
0	1	1	-1	0	1	$i_b + i_c$	$-V_{dc}$	0	V_{dc}
1	0	0	1	0	-1	i_a	V_{dc}	0	$-V_{dc}$
1	0	1	1	-1	0	$i_a + i_c$	V_{dc}	$-V_{dc}$	0
1	1	0	0	1	-1	$i_a + i_b$	0	V_{dc}	$-V_{dc}$
1	1	1	0	0	0	$i_a + i_b + i_c$	0	0	0

3.3.3 Implementación Técnica de Conmutación

La técnica de modulación SPWM es una de las técnicas más utilizada para determinar las señales de conmutación de los semiconductores debido a su simplicidad de implementación. Esta técnica se basa en comparar una señal moduladora del tipo sinusoidal (pues se desea obtener una señal que posea una frecuencia fundamental igual a la frecuencia de ésta a la salida del convertidor), con una señal portadora triangular. Al realizar la comparación entre ambas señales se puede obtener una forma de onda modulada por ancho de pulsos de amplitud variable entre 0 y 1, las cuales son enviadas a cada semiconductor, lo que corresponde al apagado y al encendido de cada switch.

Para el VSI trifásico operando mediante modulación por ancho de pulso Fig.3.4. se tiene que las moduladoras están representadas por las ecuaciones (3.10) a (3.12).

$$m_a = M \text{sen} \left(w_s t - 0 \frac{\pi}{3} \right) \quad (3.10)$$

$$m_b = M \text{sen} \left(w_s t - 2 \frac{\pi}{3} \right) \quad (3.11)$$

$$m_c = M \text{sen} \left(w_s t - 4 \frac{\pi}{3} \right) \quad (3.12)$$



Luego para obtener las señales SPWM, es necesario como se mencionó comparar estas moduladoras con una señal triangular Fig. 3.3, obteniendo así las señales de disparo cada semiconductor de la Fig.3.3., mediante el siguiente criterio:

s_1 : si $m_a >$ triangular, entonces vale 1,

s_3 : si $m_b >$ triangular, entonces vale 1,

s_5 : si $m_c >$ triangular, entonces vale 1,

s_4 : si $m_a >$ triangular, entonces vale 0,

s_6 : si $m_b >$ triangular, entonces vale 0,

s_2 : si $m_c >$ triangular, entonces vale 0.

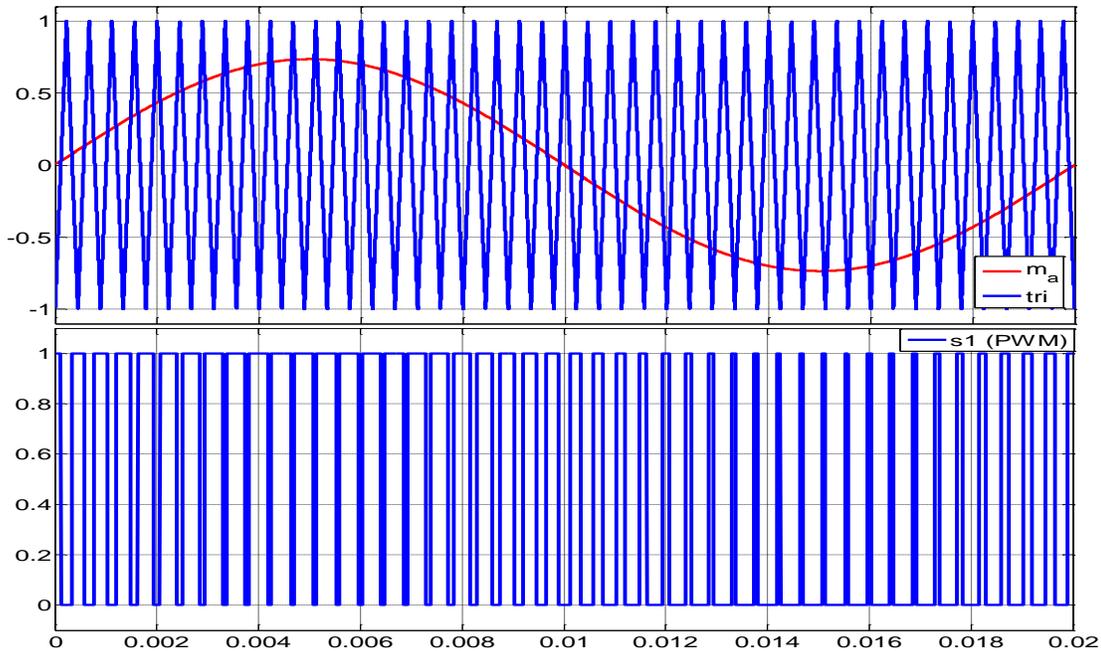
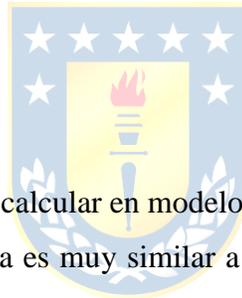


Fig. 3.3. Comparación Señal Portadora Triangular y Moduladora sinusoidal. Señal SPWM.

3.3.4 Modelación ejes abc.



En este subcapítulo se procede a calcular en modelo del sistema de la Fig.3.4. Como se puede apreciar la configuración de la topología es muy similar a la mostrada en el capítulo anterior salvo que en este caso si se encuentra presente una fuente de alimentación DC independiente. Por lo tanto, las ecuaciones del lado AC se mantienen iguales y las del lado DC las cuales son calculadas, siendo el procedimiento de obtención el mismo. Teniendo como variables de estado las mismas que para el caso anterior, las que son mostradas en la ecuación (3.13).

Se tiene por teoría de convertidores estáticos que para el Inversor Fuente de Voltaje Trifásico mostrado en la Fig. 3.4, operando mediante modulación por ancho de pulso, si la suma de las corrientes de carga es igual a cero y estas son balanceadas, se pueden obtener las ecuaciones presentadas en (3.14) a (3.16).

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \\ i_{oa} \\ i_{ob} \\ i_{oc} \\ v_{dc} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$-v_s^{abc} = L_i \frac{di_i^{abc}}{dt} + R_i i_i^{abc} - \frac{v_i^{abc}}{L_i} \quad (3.14)$$

$$v_s^{abc} = L_o \frac{di_o^{abc}}{dt} + R_o i_o^{abc} \quad (3.15)$$

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} - \frac{(v_{PV} - v_{dc})}{R_s} + \frac{v_{dc}}{R_{dc}} \quad (3.16)$$

v_s^{abc} : voltajes alimentación Red de distribución en ejes abc,

i_i^{abc} : corrientes salida inversor en ejes abc,

i_o^{abc} : corrientes carga en ejes abc,

v_i^{abc} : voltaje salida inversor en ejes abc,

v_{DC} : voltaje enlace DC, voltaje que cae en el condensador,

i_{DC} : corriente continua que entra al convertidor,

R_i : resistencia del filtro de salida del inversor,

L_i : inductancia del filtro de salida del inversor,

R_o : resistencia de la carga,

L_o : inductancia de la carga,

v_{PV} : voltajes alimentación enlace DC, proveniente del arreglo de paneles fotovoltaicos,

R_s : resistencia conectada en serie entre arreglo de paneles y el enlace DC del convertidor,

R_{DC} : resistencia del enlace DC, simula las pérdidas del convertidor,

C_{DC} : condensador de enlace DC.

Habiendo utilizado las LVK y LCK correspondientes, luego se procede a despejar para de esta manera obtener las ecuaciones de estado en *abc*, presentadas en las ecuaciones (3.17) a (3.19).

$$\frac{di_i^{abc}}{dt} = -\frac{v_s^{abc}}{L_i} - \frac{R_i}{L_i} i_i^{abc} + \frac{v_i^{abc}}{L_i} \quad (3.17)$$

$$\frac{di_o^{abc}}{dt} = \frac{v_s^{abc}}{L_o} - \frac{R_o}{L_o} i_o^{abc} \quad (3.18)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{i_{dc}}{C_{dc}} - \frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{dc}} + \frac{v_{PV}-v_{dc}}{R_sC_{dc}} \quad (3.19)$$

$$i_{dc} = m^{abc} i_i^{abc} \quad (3.20)$$

$$v_i^{abc} = m^{abc} v_{dc} \quad (3.21)$$

m^{abc} : moduladora en abc .

Luego para la obtención de las ecuaciones de estado finales (3.22) a (3.24), se reemplazó las ecuaciones de ligazón (3.20) y (3.21), y de esta forma obtener el modelo en abc . Así poder determinar un punto de operación nominal para el sistema.

$$\frac{di_i^{abc}}{dt} = -\frac{v_s^{abc}}{L_i} - \frac{R_i}{L_i} i_i^{abc} + \frac{m^{abc}}{L_i} v_{dc} \quad (3.22)$$

$$\frac{di_o^{abc}}{dt} = \frac{v_s^{abc}}{L_o} - \frac{R_o}{L_o} i_o^{abc} \quad (3.23)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{(v_{PV}-v_{dc})}{R_sC_{dc}} - m^{abc} \frac{i_i^{abc}}{C_{dc}} - \frac{v_{dc}}{R_{dc}C_{dc}} \quad (3.24)$$

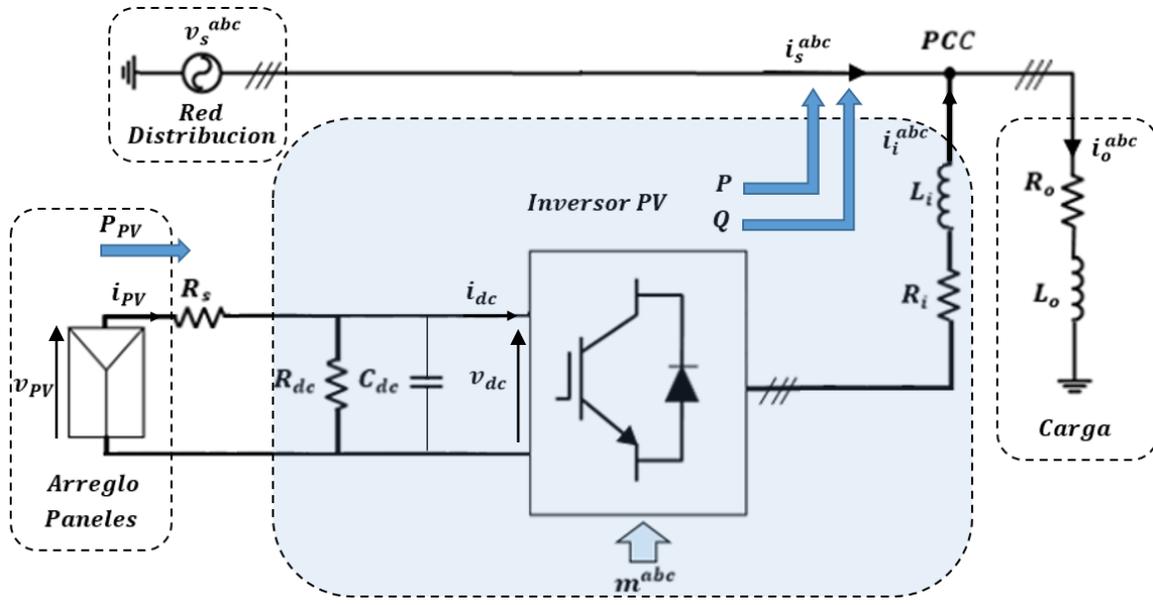


Fig. 3.4 Topología propuesta Inversor Fuente de Voltaje Trifásico PV.

3.3.5. Modelo en ejes dq0

Teniendo el modelo en abc es necesario realizar la transformación a ejes rotatorios, dado que todas las técnicas de control lineal están orientadas a trabajar con señales continuas. En el caso de trabajar con sistemas trifásicos el cambio de referencia a ejes $dq0$ se puede realizar utilizando una matriz de transformación invariante en potencia. Así, aplicando esta transformación al modelo obtenido anteriormente en abc , se obtiene las ecuaciones (3.26) a (3.28) las cuales representan las ecuaciones de estado del Inversor Fuente de Voltaje Fotovoltaico, teniendo como moduladoras en $dq0$ la presentada en la ecuación (3.25). Además tomando en cuenta que el sistema trifásico es balanceado, al igual que para el caso anterior la componente 0 se omite.

$$m^{dq} = \mathbf{T}_{abc-dq} m^{abc} \quad (3.25)$$

$$\frac{di_i^{dq}}{dt} = -\frac{v_s^{dq}}{L_i} + \mathbf{W}i_i^{dq} - \frac{R_i}{L_i}i_i^{dq} + \frac{m^{dq}v_{dc}}{L_i} \quad (3.26)$$

$$\frac{di_o^{dq}}{dt} = \frac{v_s^{dq}}{L_o} + \mathbf{W}i_o^{dq} - \frac{R_o}{L_o}i_o^{dq} \quad (3.27)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{(v_{PV} - v_{dc})}{R_s C_{dc}} - m^{abc} \frac{i_i^{dq}}{C_{dc}} - \frac{v_{dc}}{R_{dc} C_{dc}} \quad (3.28)$$

3.4. Simulación Operación Nominal VSI PV

Habiendo presentado la teoría referente a generación PV y al VSI, se procede a calcular los parámetros para la operación del sistema en condiciones nominales, los cuales son mostrados en la Tabla 3.3. De igual forma se procede a determinar los valores nominales del panel Tabla 3.2, y de esta forma poder simular el sistema para las condiciones presentes en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros Operación Panel.

Parámetro	Valor	Volar por Unidad (p.u.)
v_{oc}	33.8 (V)	0.676
v_{MP}	31.5 (V)	0.63
n_s	7	7
n_s	1	1
v_{PV}	220.5 (V)	4.41
i_{sc}	1.2 (A)	0.45
i_{PV}	1.2 (A)	0.36
P_{PV}	264.6 (W)	0.529
Radiacion	1000 (W/m ²)	1
Temperatura	25 (°C)	1

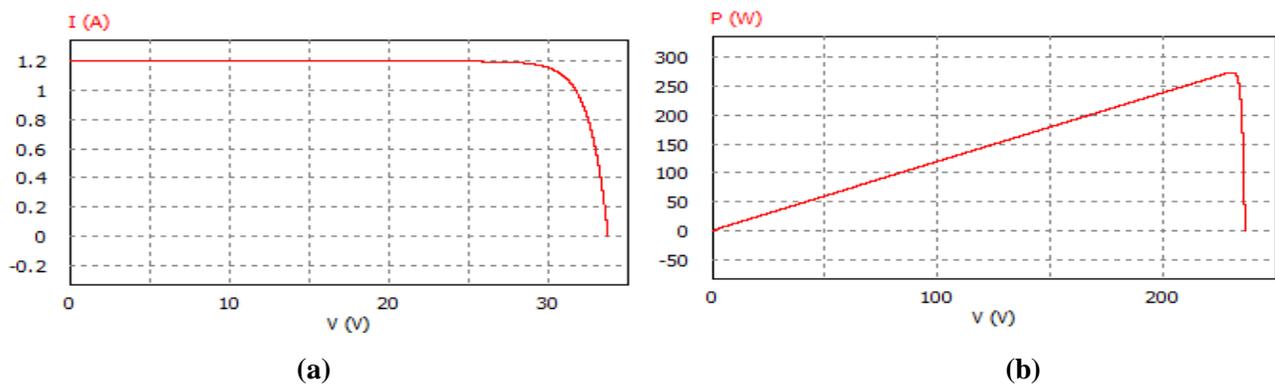


Fig. 3.5. Curvas Operación Nominal arreglo paneles.

(a) Curva Voltaje-Corriente. (b) Curva Potencia-Voltaje

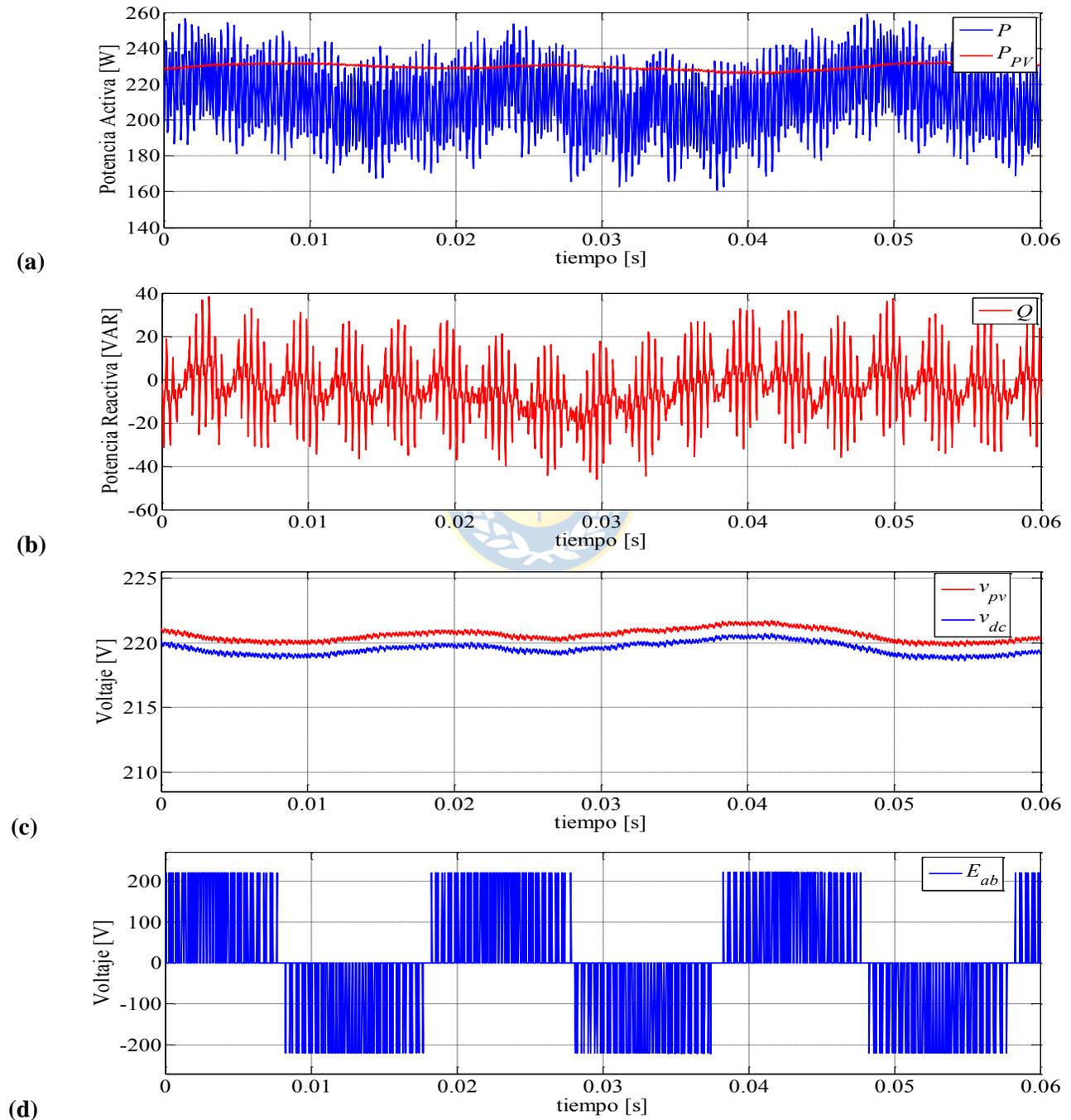
Tabla 3.3 Parámetros del sistema Operación nominal VSI PV.

Parámetro	Valor	Valor por Unidad (p.u.)
$f_{p_{carga}}$	0.8	-
$f_{p_{PCC}}$	1	-
V_{SRMSI}	50 (V)	1
S_{carga}	500 (VA)	1
P_{DRIVE}	200 (W)	0.4
Q_{DRIVE}	300 (VAR)	0.6
V_{dc}	219.593 (V)	4.392
L_i	15 (mH)	0.001
R_i	1 (Ω)	0.0667
L_o	29 (mH)	0.001933
R_o	12 (Ω)	0.8
C_{dc}	300 (μ F)	222.222
R_{dc}	5 (k Ω)	333.333
R_s	1(Ω)	0.0667
$M_{Q=300}^{abc}$	0.742478	-
$M_{Q=0}^{abc}$	0.66413	-
$\theta_{Q=300}$	4.296°	-
$\theta_{Q=0}$	6.471°	-
f_s	50 (Hz)	-
f_{tri}	2.25 (kHz)	-

3.4.1 Inyección Potencia Activa a la Red

Simulando el sistema de la Fig. 3.4. para condiciones nominales dadas en las Tablas 3.2 y 3.3, y para un Q_{DRIVE} igual a cero, se tiene que la potencia entregada por el sistema es la esperada Fig.3.6(a). De igual manera se tienen los voltajes en el lado DC y la potencia reactiva presentan formas de ondas de acuerdo a lo requerido en la Tabla 3.2. Fig. 3.6 (b) y (c)

Además se tiene que para el sistema operando con un Q_{DRIVE} igual a cero, el fp en el PCC no es unitario, por lo cual el sistema se encuentra absorbiendo reactivos, por otro lado el fp en la salida del inversor es unitario debido a que este sólo se encuentra entregando potencia activa. Así también se puede apreciar en la Fig. 3.7(c) la corriente de la red presenta un desfase con respecto al voltaje al mayor de la carga.



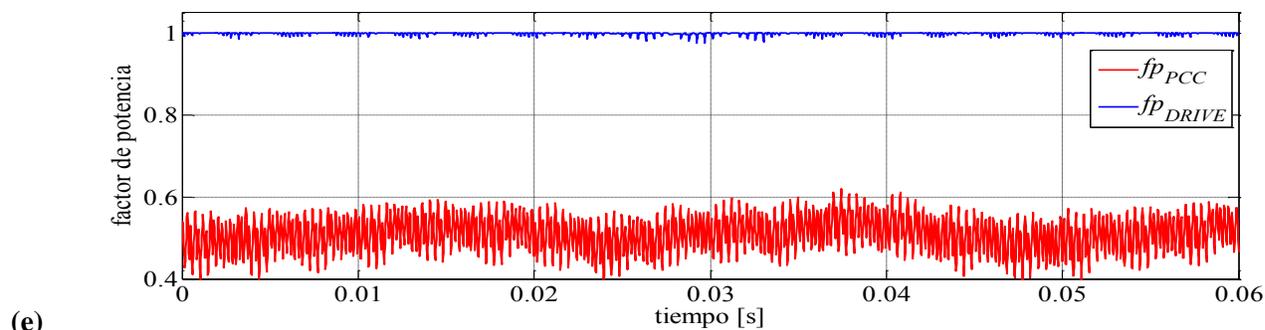


Fig. 3.6. Formas de Onda Comportamiento VSI PV Inyección Potencia Activa.

(a) Potencia Activa: Panel P_{PV} y Potencia Salida VSI P . (b) Potencia Reactiva Inyectada a la Red. (c) Voltaje lado DC: v_{dc} y v_{PV} . (d) Voltaje Salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC y Drive.

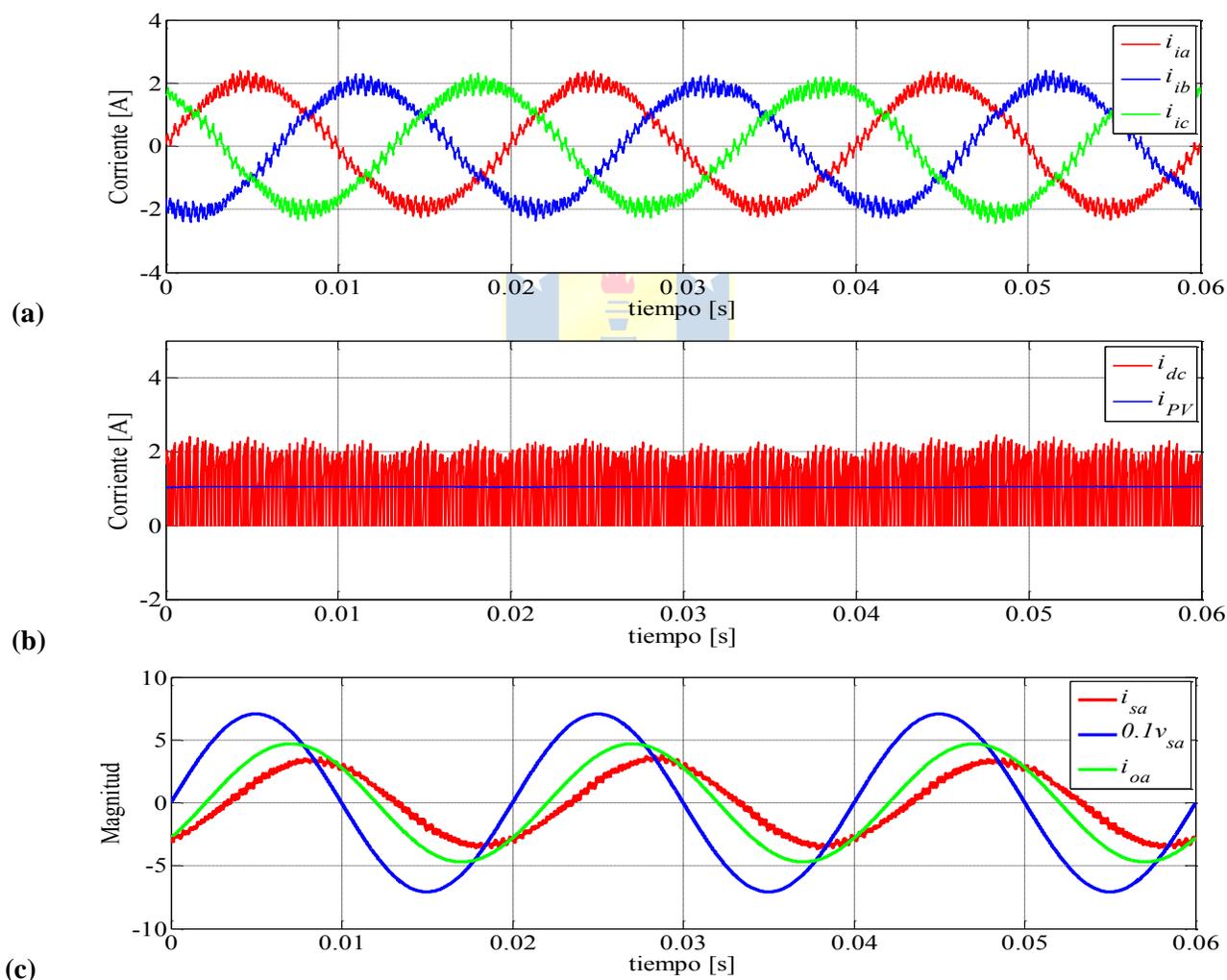


Fig. 3.7. Formas de Onda Corrientes comportamiento VSI PV Inyección Potencia Activa.

(a) Corriente lado DC: i_{dc} e i_{PV} . (b) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (c) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

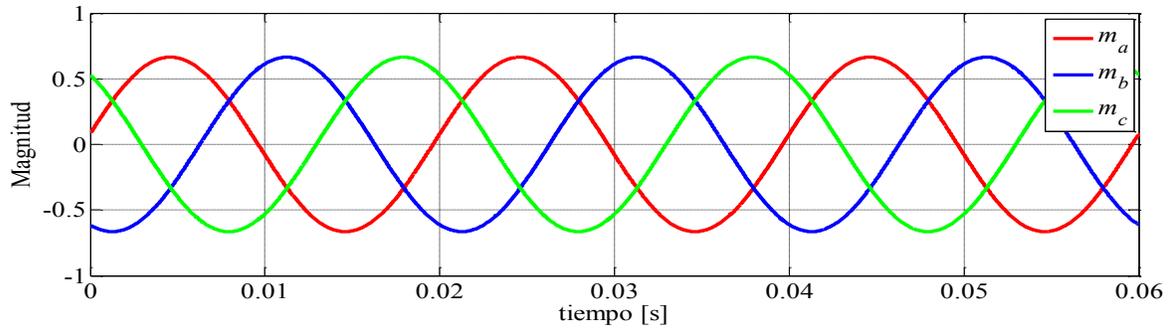
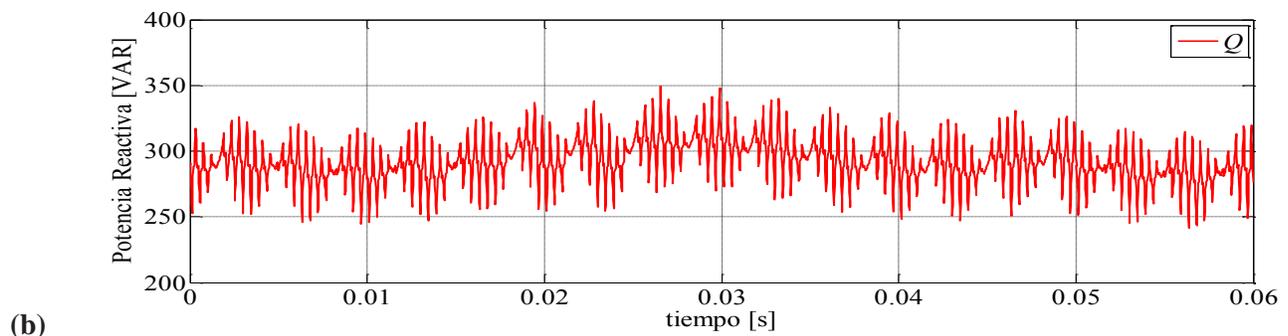
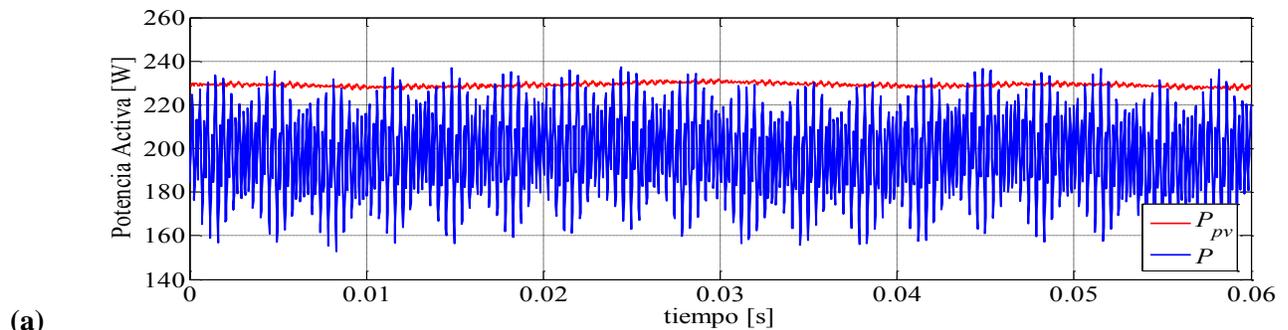


Fig. 3.8. Moduladoras abc VSI PV Inyección Potencia Activa.

3.4.2 Inyección Potencia Activa y Reactiva a la Red

Para este caso ahora el sistema se comporta de tal forma de entregar tanto potencia activa como reactiva, Q_{DRIVE} igual a 300 (VAR), y como se puede apreciar en la Fig. 3.9(c), la simulación está operando a un voltaje del arreglo de paneles de 202.5 (V) teniéndose en el enlace DC un voltaje requerido de 219.593 (V) debido a la caída de tensión presente en la resistencia de interconexión entre los paneles y el convertidor. El voltaje PWM Fig. 3.9 (d) de acuerdo a teoría de convertidores estáticos debe tener un peak equivalente al voltaje DC, con una frecuencia fundamental de 50 (Hz) y un switcheo igual a 2.25 (kHz), lo cual concuerda con la gráfica.



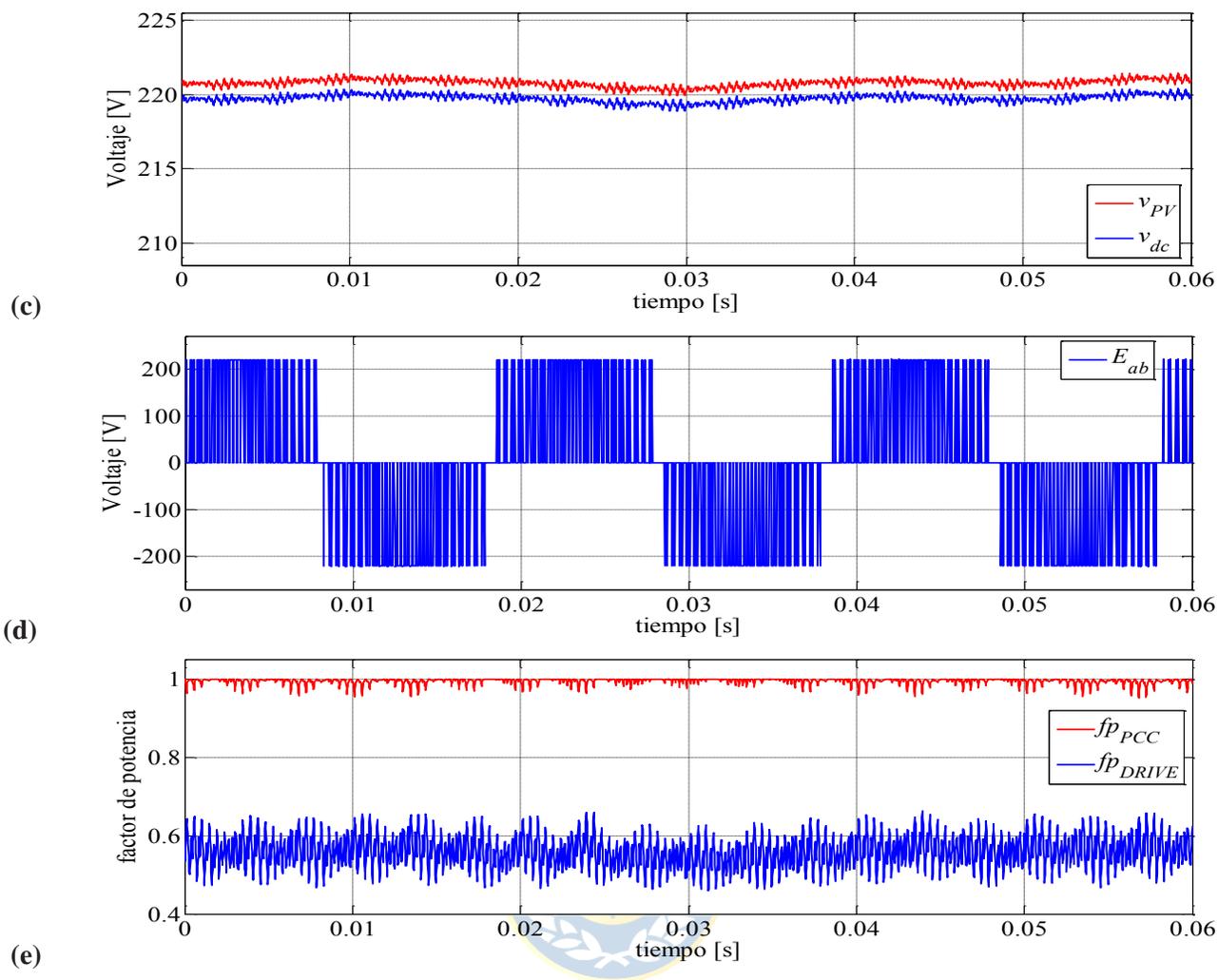


Fig. 3.9. Formas de Onda Comportamiento VSI PV Inyección Potencia Activa y Reactiva.

(a) Potencia Activa: Panel P_{PV} y Potencia Salida VSI P . (b) Potencia Reactiva Inyectada a la Red. (c) Voltaje lado DC: v_{dc} y v_{PV} . (d) Voltaje Salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC y Drive.

Se aprecia de la Fig. 3.9 (e), que el factor de potencia es unitario en el PCC, por lo cual se cumple con los valores nominales de la Tabla 3.3., de esta forma se corrige el desfase de las corrientes como lo mostrado en la Fig. 3.10 (c), donde se puede apreciar un desfase mayor entre la corriente de carga y el voltaje de red que entre la corriente de red y la tensión de esta, estando estas en fase. Lográndose una compensación de la red mediante el VSI PV. Como se puede apreciar el factor de potencia del convertidor no es unitario debido al comportamiento capacitivo del Inversor.

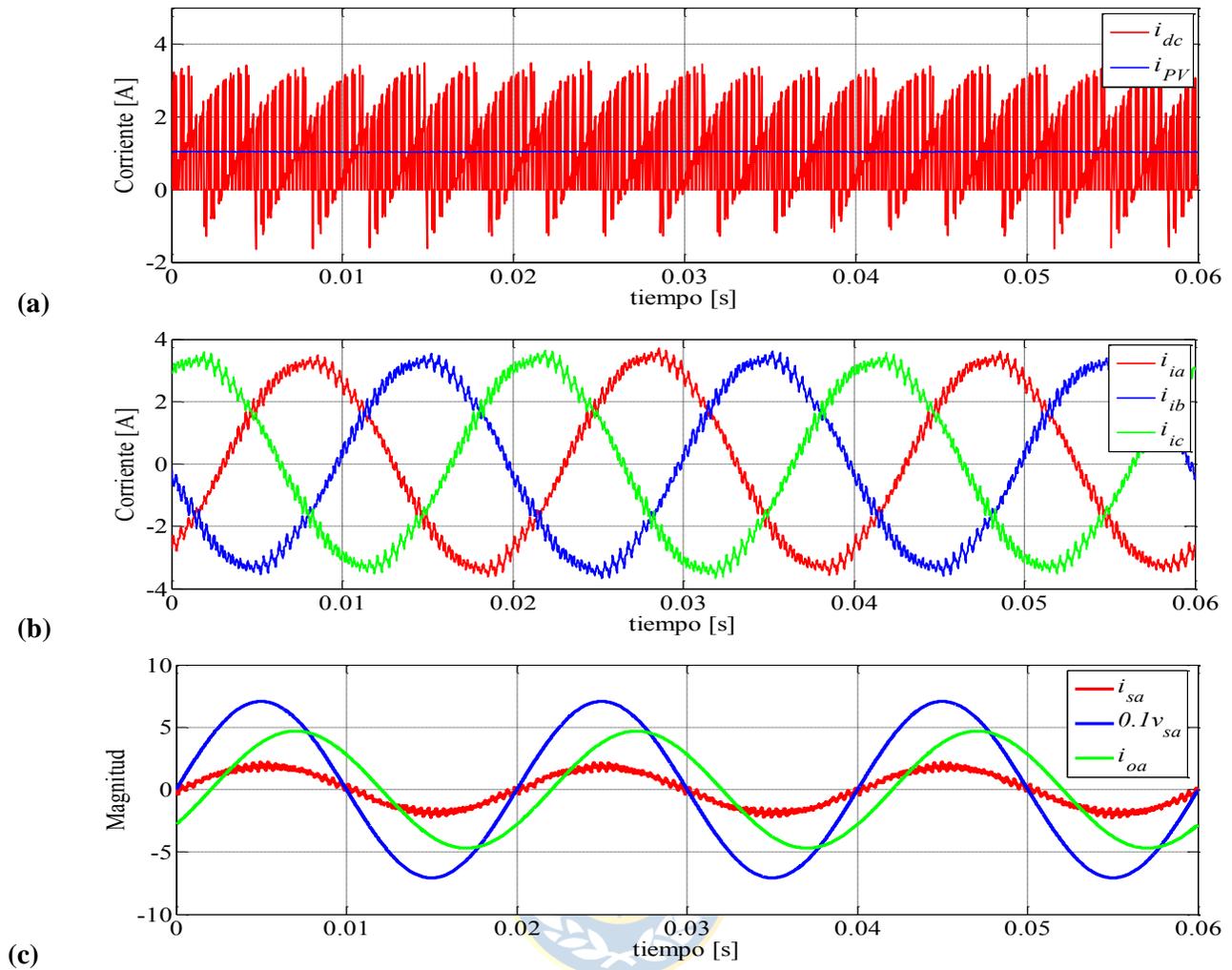


Fig. 3.10. Formas de Onda Corrientes VSI PV Inyección Potencia Activa y Reactiva.

(a) Corriente lado DC: i_{dc} e i_{pv} . (b) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (c) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

La moduladora obtenida para la operación nominal del sistema se encuentra en el rango menor a uno Fig. 3.11, teniendo una magnitud de 0.742478 y un ángulo de desfase de 4.296° , por lo cual el sistema no se encuentra sobre modulado, también puede ser visto en el voltaje línea a línea a la salida del inversor Fig. 2.6 (d), donde se tiene un voltaje PWM perfecto, es decir, no se presentan pérdidas o vacíos en su forma de onda.

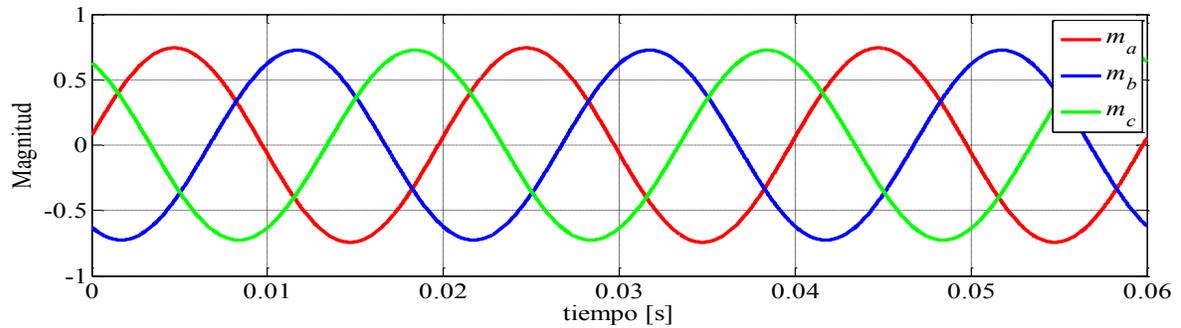


Fig. 3.11. Moduladoras abc VSI PV Inyección Potencia Activa y Reactiva.

3.5. Simulación Control Inyección Potencia VSI PV

La estrategia de control es la misma que la utilizada para el caso del uso del VSI como compensador puro (STATCOM), es decir, se tiene un lazo de corriente desacoplado Fig. 2.3. y un lazo de voltaje externo, para de esta forma poder controlar la potencia reactiva y activa necesaria a inyectar a la red, en este caso. Como también mantener el valor la tensión en el enlace DC deseada.

Con el consiguiente lazo de control se desea poder operar el sistema, para el punto de operación nominal y distintos cambios en las entradas, ya sea para potencia activa como reactiva, teniendo de esta forma la respuesta del sistema en LC.

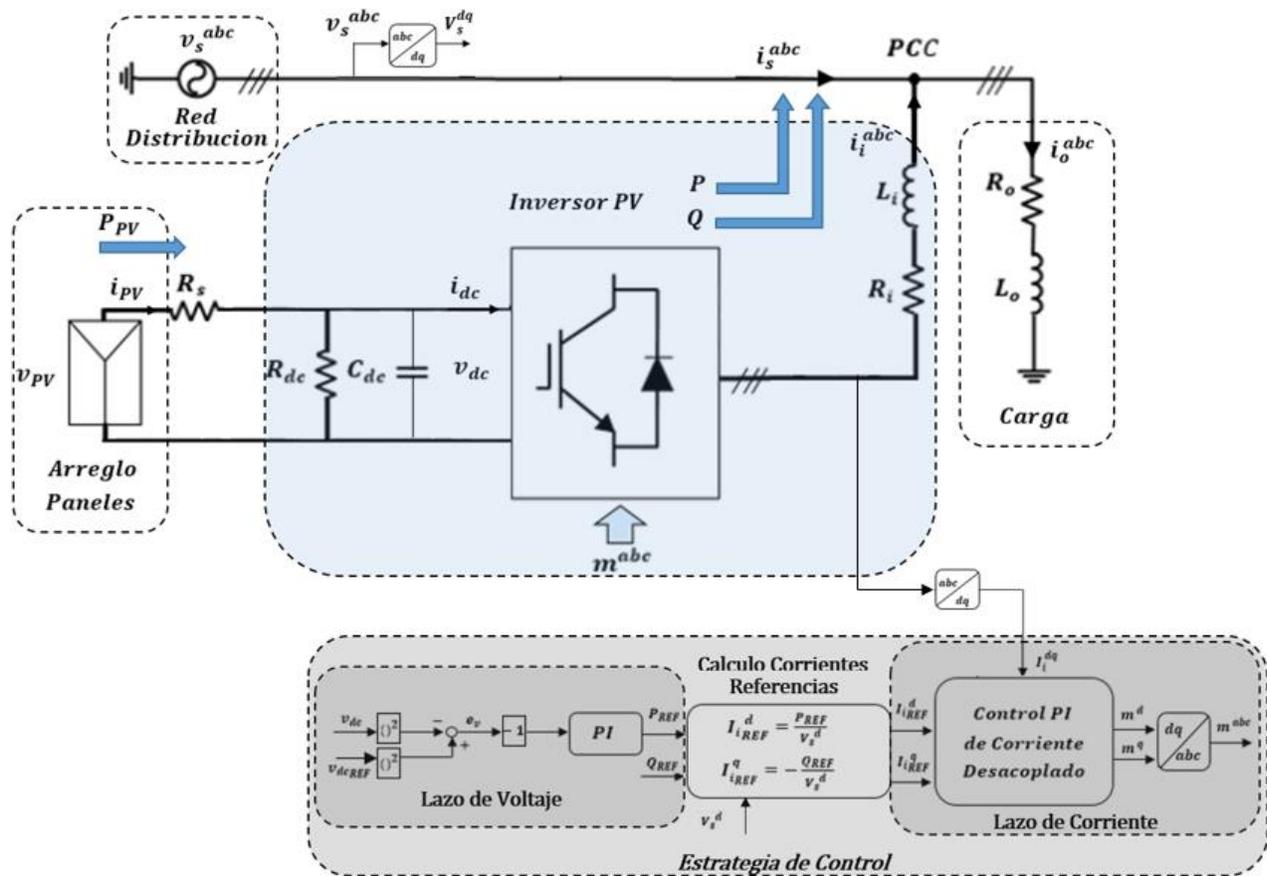


Fig. 3.12. Sistema y lazos de Control.

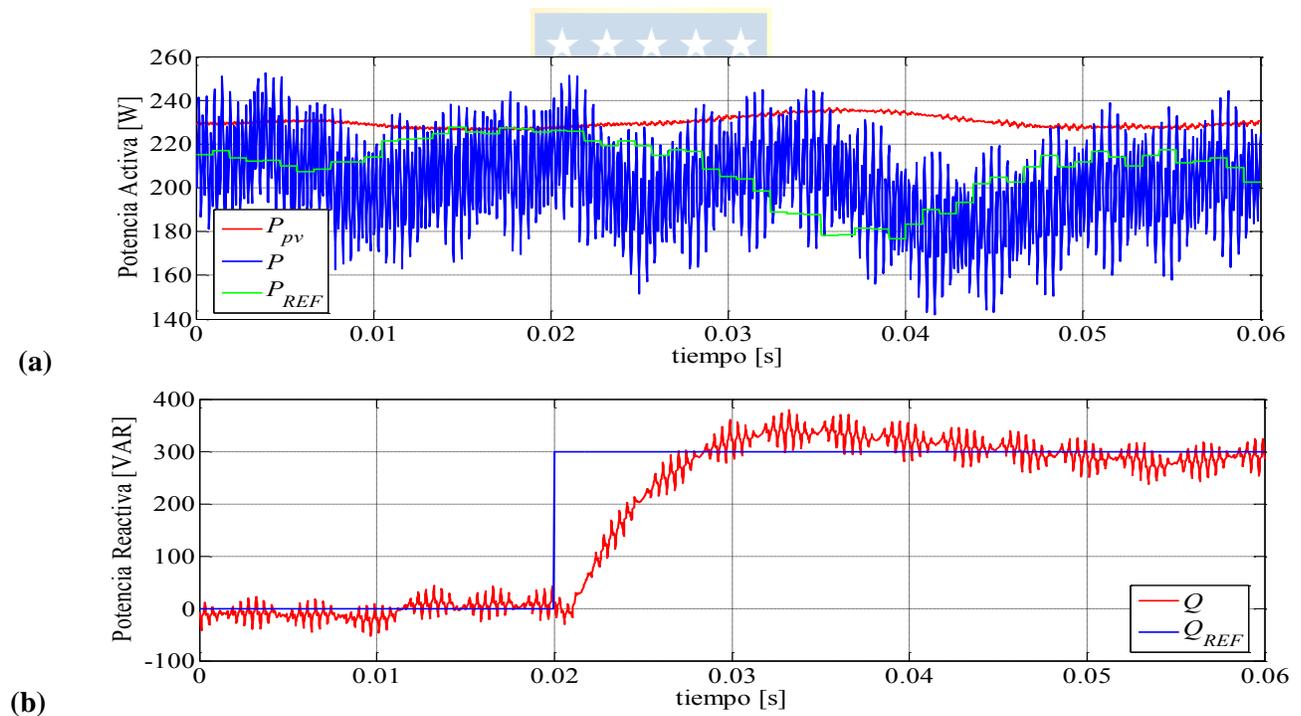
3.5.1 Cambio Referencia Potencia Reactiva

Para poder ver el comportamiento de la estrategia mostrada se procede a simular el sistema de la Fig.3.13. En un primer caso se realiza una prueba frente a entrada escalón en la potencia reactiva suministrada por el inversor. Es así como se muestra en la Fig.3.14 (b), que primero se tiene el sistema operando sin inyección de potencia reactiva, para luego aplicar el escalón de 300 (VAR). Obteniendo una buena respuesta de la potencia reactiva frente de acuerdo a la referencia, por otro lado se puede apreciar que la inyección de potencia activa también se mantiene casi constante, presentando una pequeña disminución debido al impacto de la inyección de reactivos. Esto no ocurriendo para la potencia entregada por el panel, puesto que ésta no se ve afectada a este impacto debido a que el panel se encuentra operando en un punto fijo de la curva de potencia.

Los voltajes del enlace DC, es decir, la tensión que suministra el arreglo de paneles y la tensión

que cae en el condensador, presentan una pequeña caída al instante de suceder el impacto del cambio escalón en la potencia reactiva pedida, para luego recuperarse debido a la acción del control de voltaje. De igual forma se puede apreciar que el voltaje PWM permanece casi inalterable frente al cambio en la referencia de reactivos, manteniendo este su peak igual al voltaje DC. También se puede apreciar de la Fig. 3.13(c), que los voltajes DC presentan una menor variación al aumentar la inyección de reactivos.

De la Fig.3.13(e) se puede ver cómo reacciona el sistema frente al cambio en la referencia de inyección de reactivos, en este caso mediante el factor de potencia, siendo este unitario en la salida del Drive, cuando éste no se encuentra entregando potencia reactiva y disminuyendo cuando se requiere inyectar reactivos a la red. Por otro lado el factor de potencia presente en el PCC se encuentra en un valor aproximado de 0.5 y al inyectar los reactivos necesarios se lleva a un fp unitario cumpliendo con la compensación necesaria de la red, para lo cual fueron calculados los reactivos.



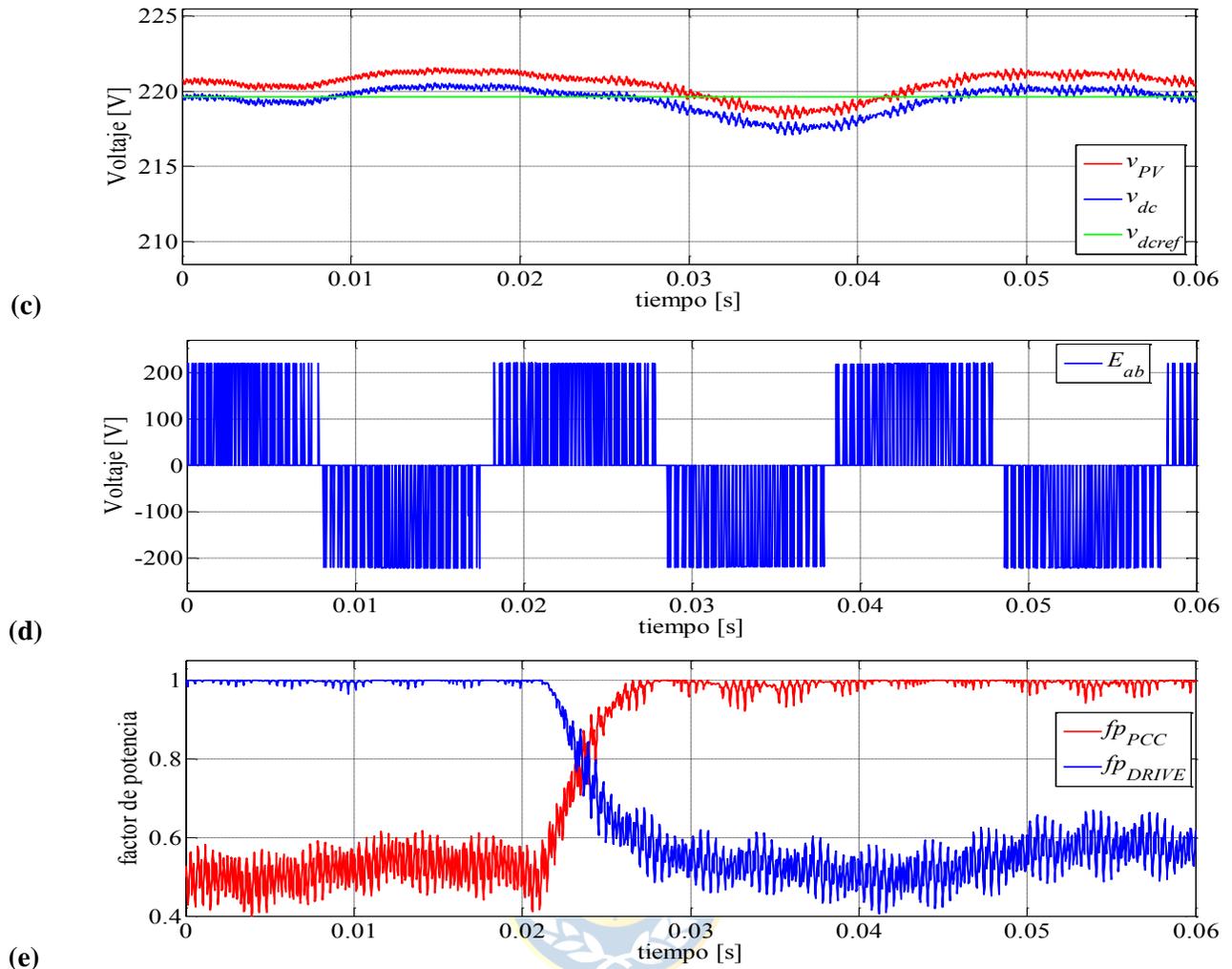


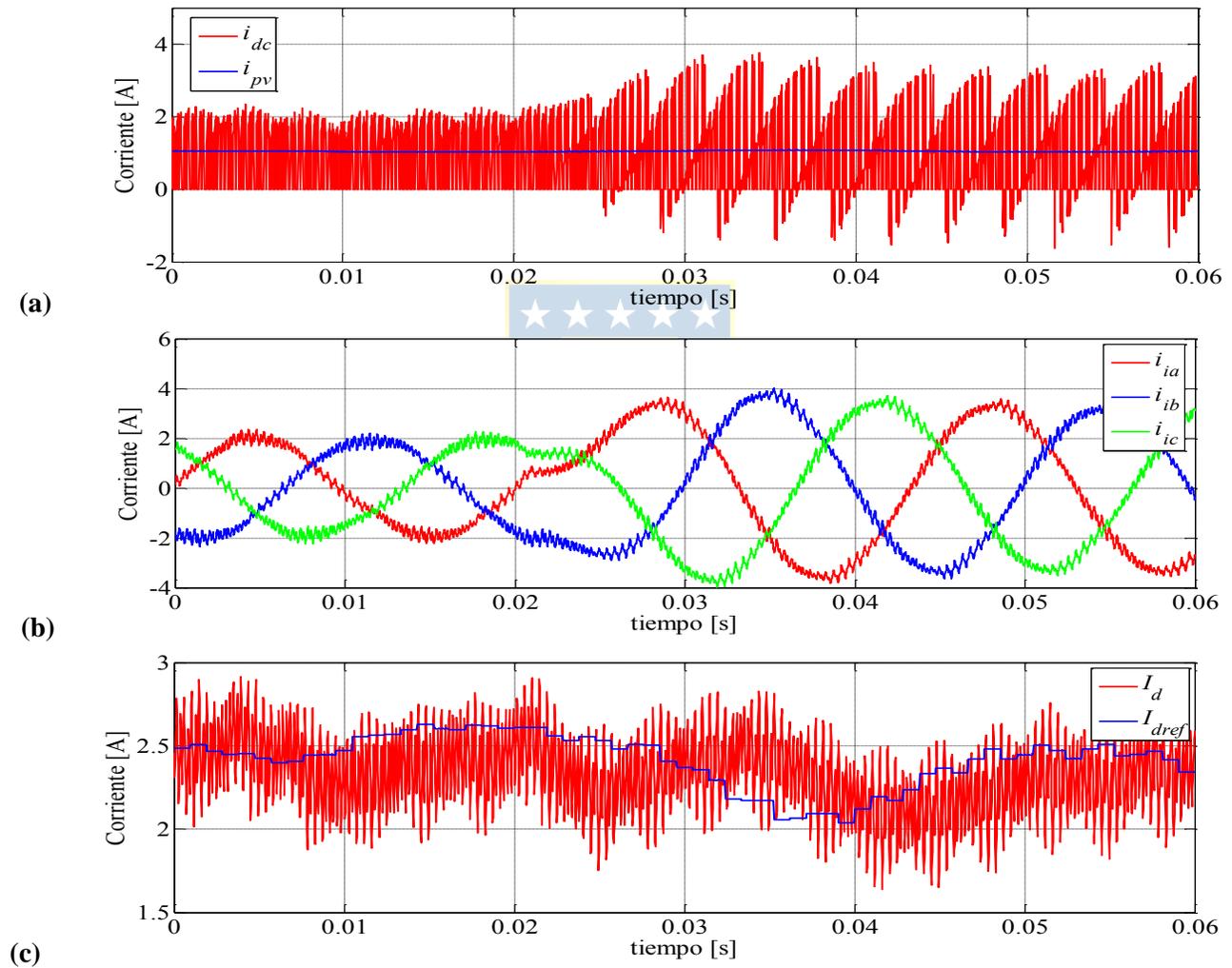
Fig. 3.13. Formas de Onda comportamiento VSI PV frente a escalón en referencia Potencia Reactiva.

(a) Potencia Activa Panel P_{PV} y Potencia Salida VSI P y referencia P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q y referencia Q_{REF} . (c) Voltajes enlace DC: v_{dc} y v_{PV} y referencia v_{dcREF} . (d) Voltaje PWM salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC y Drive.

De acuerdo a la gráfica de la Fig. 3.14 (a) se puede apreciar que la corriente DC del convertidor es continua sin presencia de negativos en el lapso que se quiere entregar puramente potencia activa desde los paneles y luego cuando se cambia la referencia de reactivos a un valor mayor, en este caso 300 (VAR), la corriente DC presenta ciertos cantos negativos. Estos son producto de la inyección de reactivos Fig. 3.14 (a), en la misma grafica se puede apreciar como la corriente suministrada por los paneles se mantiene constante debido a que este se encuentra trabajando en un punto de operación fijo en la curva de corriente, no siendo afectado por el cambio en la referencia de potencia reactiva.

Las corrientes suministradas por el Inversor en abc aumentan debido al incremento en la

potencia reactiva, manteniéndose estables y dentro del rango deseado, debido a que se cuenta con una estrategia de control para las corrientes. Similarmente, se puede ver cómo se comportan estas mismas en dq , donde se observa el cambio en la corriente en cuadratura la cual sigue perfectamente a la referencia, calculada por el bloque de transformación de potencias a corrientes. Se puede ver en la Fig. 3.14 (c) como la corriente directa no genera un gran cambio, siendo esta pequeña diferencia reflejada en la potencia suministrada, de igual forma ésta sigue su referencia, y de esta manera obtener las moduladoras deseadas.



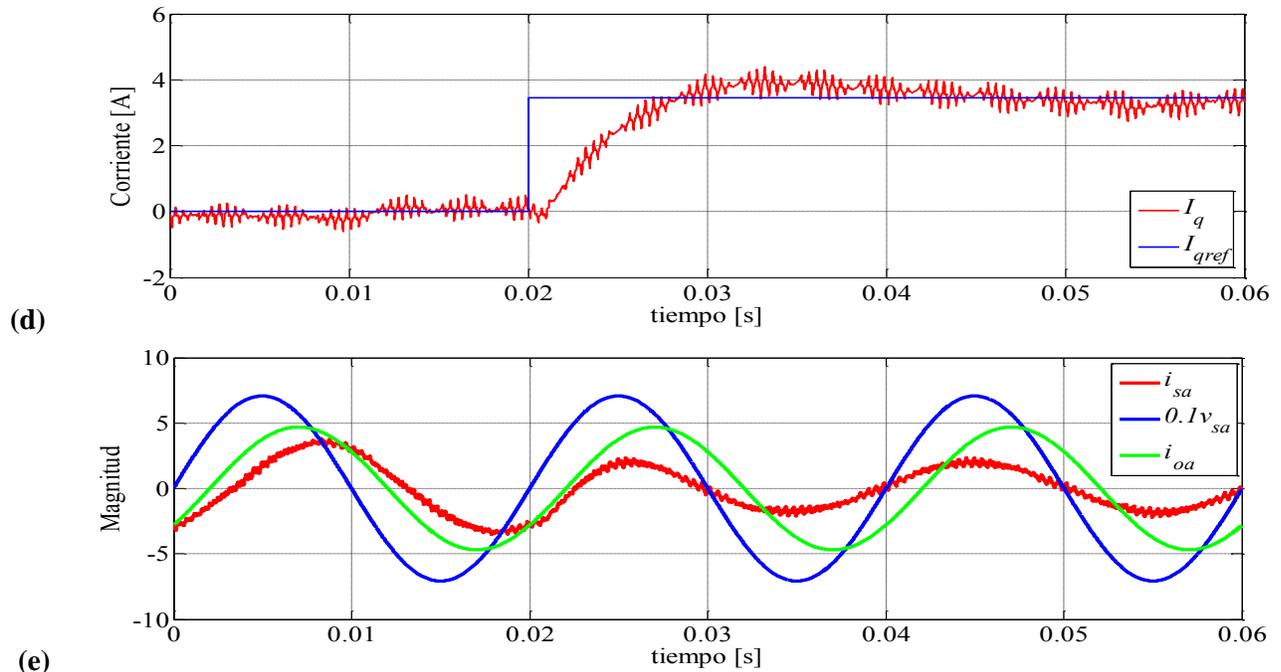


Fig. 3.14. Forma de Ondas de las Corrientes VSI PV frente a escalón en referencia Potencia Reactiva.

(a) Corriente lado DC. i_{dc} e i_{PV} . (b) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (c) Corriente I_d e I_{dREF} . (d). Corriente I_q e I_{qREF} .

(e) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

De la Fig. 3.14 (e) se aprecia, al igual que en la gráfica referente a los factores de potencia, que el sistema se encuentra operando en un principio con un desfase entre las corrientes y las tensiones de red. Siendo este desfase mayor al presente entre el voltaje y las corrientes de la carga. Luego esto es compensado al inyectar más reactivos a la red mediante el cambio de referencia de la potencia reactiva y la acción del control del sistema. De esta forma se dejan en fase las corrientes y voltajes de red, es decir, se obtiene un factor de potencia unitario en el PCC.

En el voltaje PWM entregado por el Inversor PV se aprecia que este no presenta lapsos de sobre modulación lo cual se confirma con la gráfica de la moduladora, las cuales se mantiene con una magnitud menor a uno, de igual forma se puede percatar del cambio en la fase y magnitud de esta para poder activar la inyección de reactivos desde el Inversor PV.

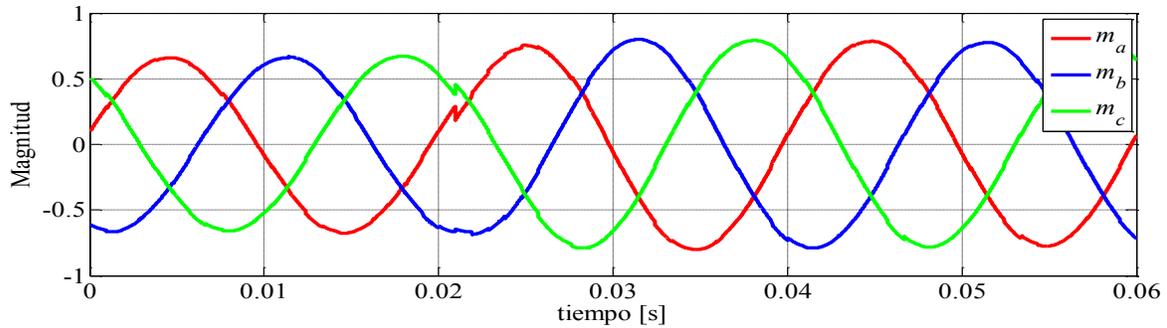
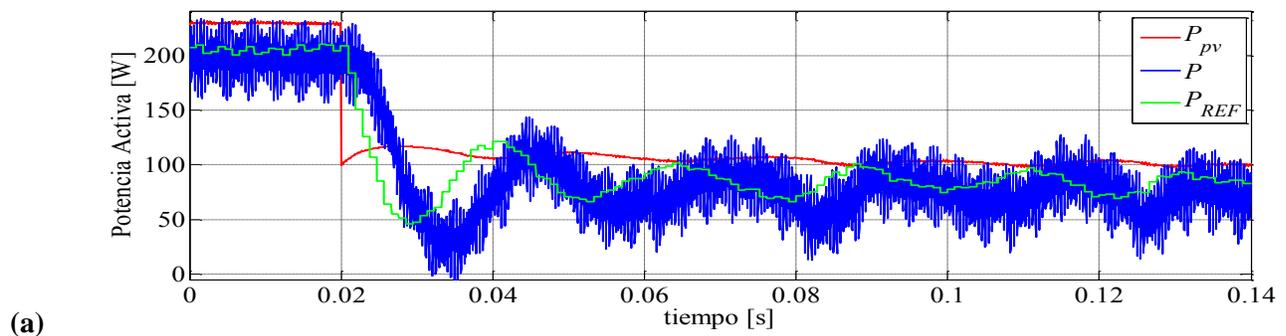


Fig. 3.15. Moduladoras abc VSI PV frente a escalón en referencia Potencia Reactiva.

3.5.2 Cambio Referencia Potencia Activa

En este subcapítulo se ilustra el comportamiento del sistema frente a un cambio en la referencia de la potencia activa, en particular frente a una caída de la Potencia presente en el panel, es decir, un decaimiento de la radiación que incide en los paneles, como se puede apreciar en la Fig. 3.16(a). Se puede observar que la potencia reactiva se mantiene constante e igual al valor deseado, referencia constante en 300 (VAR). El voltaje en el enlace DC se puede ver que presenta un sobrepaso al momento de ocurrir el decaimiento de la potencia, pasando por un transiente de 6 ciclos, para luego retomar la referencia, la cual se mantiene constante, esto debido a que la dinámica de la tensión es más lenta, por eso la elección del lazo externo de voltaje. Esto se ve reflejado en una pequeña disminución de la tensión de salida del inversor, la cual es casi imperceptible al paso de un ciclo desde ocurrido el sobrepaso, pues se tiene una variación menor al 2.5%.



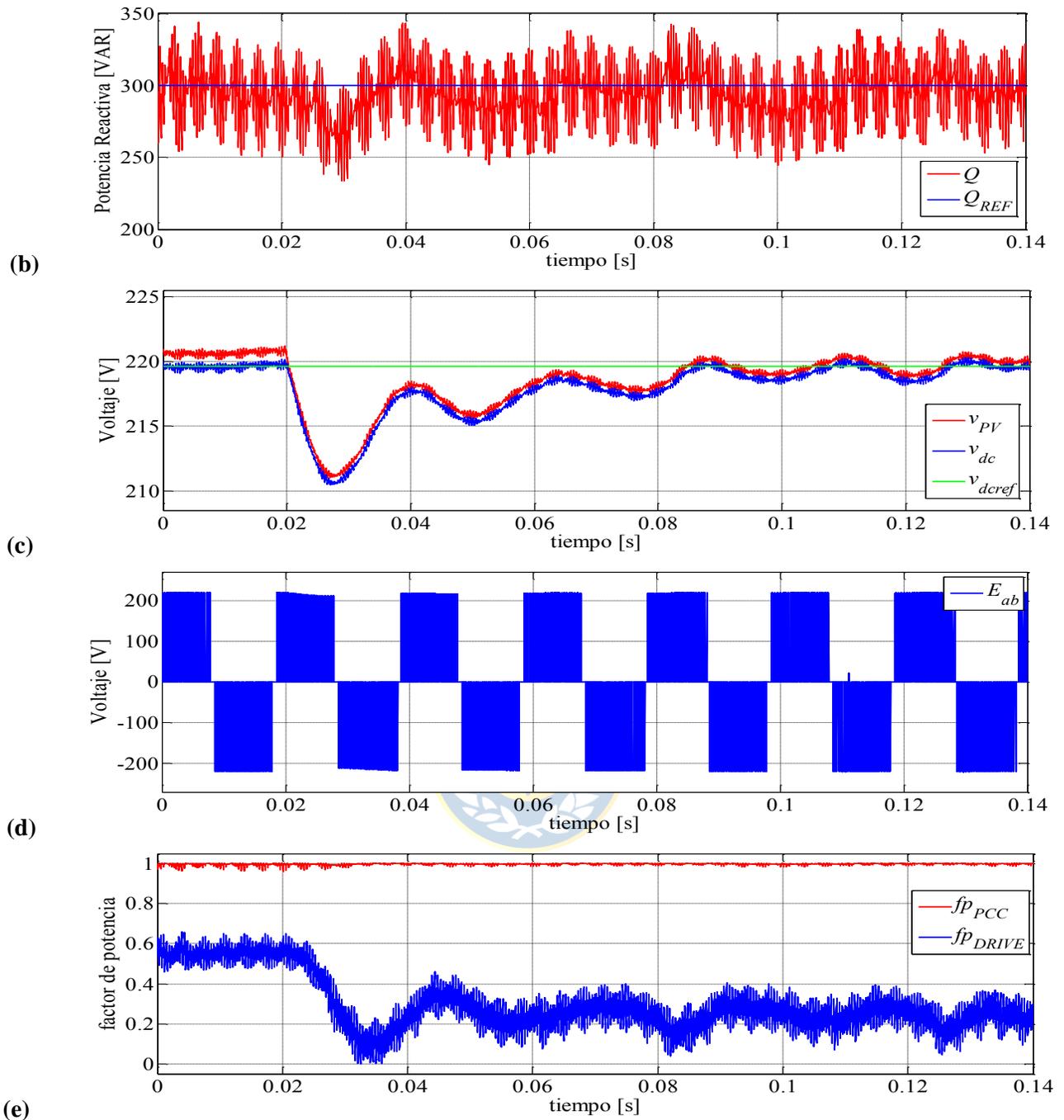
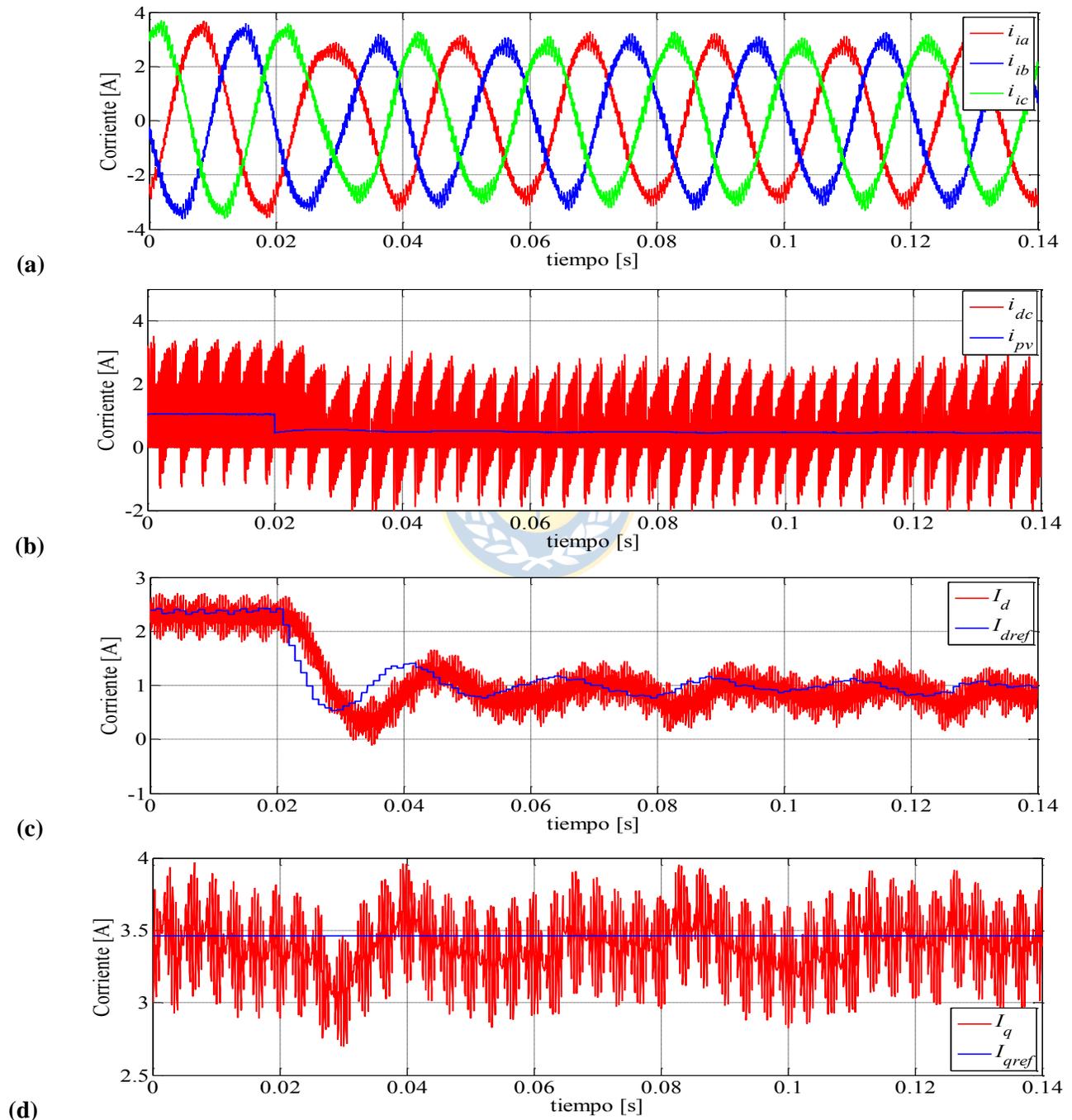


Fig. 3.16. Formas de Onda comportamiento VSI PV frente a caída en referencia Potencia Activa.

- (f) (a) Potencia Activa Panel P_{PV} y Potencia Salida VSI P y referencia P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q y referencia Q_{REF} . (c) Voltajes enlace DC: v_{dc} y v_{PV} y referencia v_{dcREF} . (d) Voltaje PWM salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC y Drive.

Como se puede apreciar en las curvas de las corrientes i_i^{abc} , estas presentan un pequeño transiente, de un ciclo, el cual es mucho menor al presente en el lazo de voltaje, en el cual existe una

disminución en sus magnitudes. Por otro lado se tiene una disminución en la corriente proveniente de los paneles al igual que la presente en el enlace DC, puesto que se disminuye la potencia y el sistema se encuentra operando a un valor de voltaje constante. Esta disminución provoca que el factor de potencia presente a la salida del convertidor también caiga, no así el fp_{PCC} , el cual se mantiene en el valor unitario deseado.



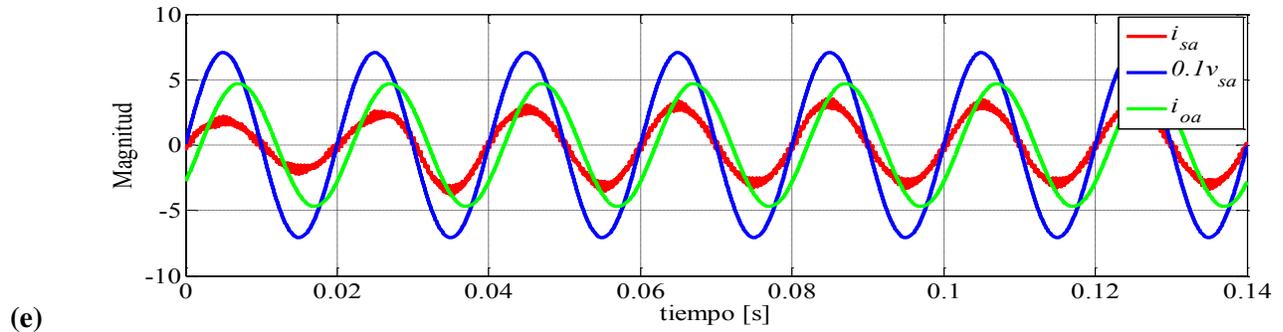


Fig. 3.17. Forma de Ondas de las Corrientes VSI PV frente caída en referencia Potencia Activa.

- (a) Corriente lado DC. i_{dc} e i_{pv} . (b) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (c) Corrientes I_d e I_{dREF} . (d) Corriente I_q e I_{qREF} .
 (e) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

Las corrientes en dq siguen a sus referencias adecuadamente, en la Fig.3.17(c) y (d), se aprecia como la corriente directa cambia de acuerdo a lo impuesto por el sistema, es decir, teniéndose una disminución de la potencia activa la corriente también lo hace. Por otro lado se aprecia que la corriente en cuadratura permanece constante de acuerdo al valor de la potencia reactiva, puesto que esta no varía. Así también se puede observar de la Fig.3.17 (e) que el desfase de la corriente de red con el voltaje es nulo y permanece constante, de la misma forma que se observó en el factor de potencia presente en el PCC.

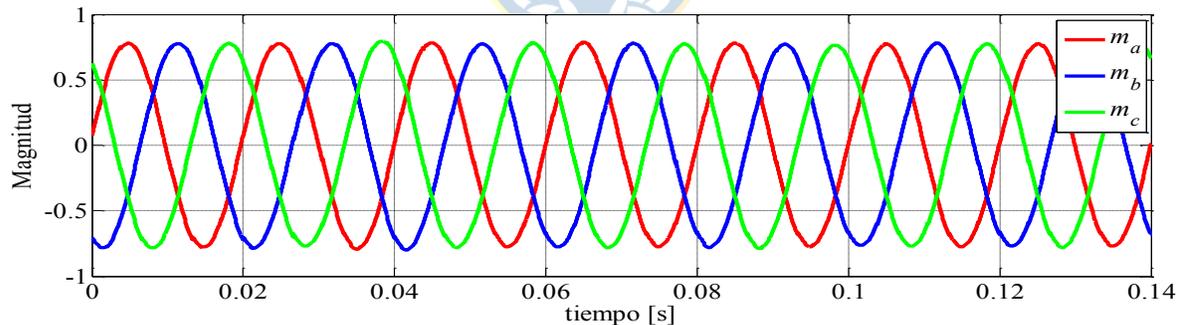


Fig. 3.15. Moduladoras abc del sistema frente a escalón en referencia Potencia Activa.

Las moduladoras se encuentran en el rango permitido para ambos puntos de operación, por lo cual no existe sobre modulación en el sistema.

3.6. Discusión y Conclusiones

Del presente capítulo se pueden obtener resultados referentes al comportamiento del sistema fotovoltaico y su acondicionamiento de potencia. Estos funcionan perfectamente en las condiciones nominales dadas, es así como se pudo apreciar que el sistema es capaz de entregar tanto potencia activa, en un primer caso, como también reactiva, proveniente desde los paneles. Así puede satisfacer las necesidades de la red, ya sea a la demanda Watts calculados, como también los reactivos necesarios a inyectar para lograr compensar el desfase presentes en esta, esto con tal de poder obtener un fp en el PCC unitario, logrando un desfase cero entre la corriente y el voltaje. Es así como se tiene que el sistema funciona similarmente como el compensador de reactivos puros presentado en el capítulo anterior.

De igual forma se tiene que la implementación de la estrategia de control funciona correctamente, puesto que se mantienen los valores esperados en la tensión del enlace DC como en la potencia reactiva y activa inyectada, siendo esta dependiente de las corrientes de salida del Drive. Esto permite tener un sistema que es estable y a su vez no presenta sobre modulación para las potencias requeridas en los puntos de operación simulados.

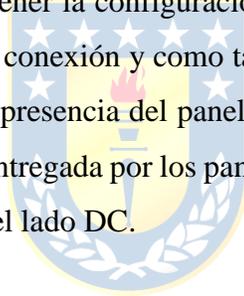
Se puede apreciar que la potencia entregada por los paneles no se ve afectada por la cantidad de potencia reactiva requerida en la salida del VSI, esto debido a que los paneles se encuentran operando en una de las curvas de potencia, para las diferentes condiciones simuladas, por lo cual esta debe mantenerse constante para una radiación y temperatura definida constante. Por otro lado la potencia activa que entrega finalmente el Inversor a la red se ve mermada, aproximadamente un 10%, al momento de querer suministrar reactivos junto con esta, para las cantidades ilustradas anteriormente.

Como se mencionó el sistema no se encuentra sobre modulado por lo cual se puede inyectar más reactivos a la red, si es que fuesen necesarios, con la consecuencia de una disminución de la potencia activa entregada por el convertidor. Por otro lado se podría aumentar la potencia entregada por los paneles, es decir, redefiniendo la configuración de estos, ya sea agregando más en serie, para aumentar la corriente proveniente de estos, o en paralelo, para obtener el mismo efecto pero en el

voltaje, o en otro caso implementando celdas de mayor potencia por unidad, para de esta forma obtener una mayor potencia en su totalidad, ya sea esta en el lado DC, como también a la salida del inversor.

Como resultado de la simulación y llevándolo a un caso práctico, se puede tener una granja solar la cual sea capaz no sólo de proveer potencia activa a la red o a cargas conectadas a ella, sino también puede ser capaz de inyectar reactivos y compensar la red sin tener complicaciones o requerimientos extras. Esto es de gran utilidad para granjas solares que estén presentes en industrias u otro tipo de sistemas que no sean generadores propiamente tal, las cuales estén conectadas a la red de distribución, para lo cual es necesario tener acceso al hardware que permite la implementación de las estrategias de control.

También se puede apreciar que la configuración de los sistemas ilustrados en el presente capítulo como en el anterior es similares, y es por esto que se concluye que el sistema operando como compensador en paralelo es idéntico a tener la configuración ilustrada en este capítulo, VSI PV. En efecto, presentan la misma topología de conexión y como también las mismas estrategias de control, pero para el caso del STATCOM sin la presencia del panel solar, es decir, con una radiación igual a cero, por lo tanto se tiene una potencia entregada por los paneles nula, o por otro lado teniendo el caso de la desconexión de los paneles desde el lado DC.



Capítulo 4. Transición Tipo de Sistema

4.1. Introducción

Debido a que se concluye que los sistemas analizados anteriormente presentan una configuración en topología similar y estrategias de control idénticas se procede a realizar un enlace entre ambas configuraciones. Por lo cual en este capítulo se presenta la estrategia que permite la transición entre los dos tipos de sistemas de tal forma de poder operar todo como una sola topología. Es decir, un Inversor Fuente de Voltaje Fotovoltaico el cual puede inyectar potencia activa cuando se encuentra trabajando con la presencia de luz solar, y de igual manera que sea capaz de entregar reactivos para cualquier nivel de radiación. Así se puede trabajar con el convertidor en los lapsos de subutilización u ociosos como un compensador puro de reactivos, sin la interrupción del suministro de potencia reactiva al momento de que no exista luz solar.



4.2. Sistema de Control

El sistema a implementar se muestra en la Fig. 4.1, el cual consiste en un Inversor Fuente de Voltaje conectado a la red de distribución mediante el filtro de enlace por el lado AC, luego por el lado continuo el VSI es alimentado con una fuente la cual proviene del arreglo de paneles, estando éste separado por una resistencia la cual hace el desacople entre el convertidor y los paneles. El sistema se encuentra en LC mediante las estrategias de control utilizadas anteriormente, lo cual nos permite mantener un voltaje DC estable, igual a la referencia, para cualquiera de los dos casos. Además de una inyección de potencia reactiva mediante el control desacoplado de corriente, ya sea comportándose como acondicionador de potencia, para lo cual en este caso también se controla la potencia activa a suministrar a la red, a través de la corriente en la componente directa, o como compensador puro, mediante la corriente en cuadratura, para ambas situaciones.

Para la selección del tipo de sistema con el cual se desea trabajar se añade un switch entre el arreglo de paneles y el enlace DC del convertidor. A este interruptor se le hace llegar una señal de

activación la cual proviene del algoritmo que decide en cual sistema se debe o desea trabajar, el cual es mostrado en la Fig. 4.2. También como se puede apreciar en la Fig. 4.1. además se agregó una etapa de paneles de referencia, la cual consiste en dos celdas (paneles), ubicados en el mismo lugar físico donde se encuentra la granja solar, uno de ellos en circuito abierto para de esta forma poder obtener la tensión v_{oc} , y otro en corto circuito para poder medir la corriente i_{sc} proveniente de este. Además al estar ambos sometidos a las mismas condiciones que el arreglo en su totalidad, estas son misma radiación y temperatura, nos sirven como su nombre nos lo indica de referencia o de equivalente de lo que es la granja solar, presentando las mismas respuestas a variaciones en estas condiciones. De las cantidades obtenidas del censado de los paneles de referencia antes señaladas, se puede obtener la potencia $P_{PV_{REF}}$ la cual sirve de referencia para poder utilizar el algoritmo de elección de tipo de sistema el cual es ilustrado en la Fig.4.2. Es así como se evita operar con una potencia pulsante para este algoritmo, como lo es la proveniente del arreglo de paneles, puesto que esta última al ser calculada desde un sistema con un inversor funcionando con técnica de conmutación SPWM, como se pudo observar en el capítulo anterior, el cual en su lado DC genera una potencia con un ripple o contenido armónico, la cual no es la indicada para servir de referencia al algoritmo de selección de sistema.



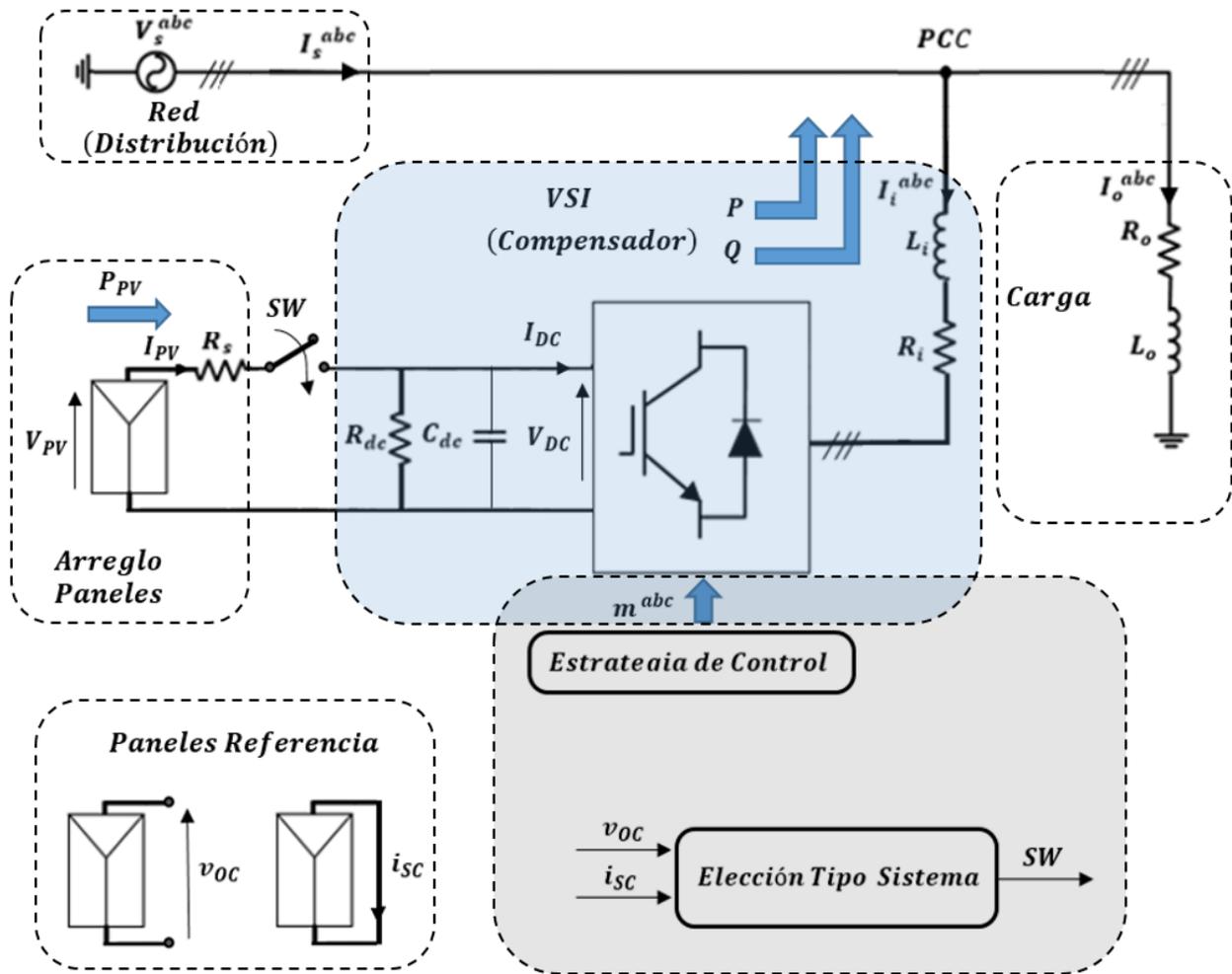


Fig. 4.1. Topología Interconexión y Transición Sistemas.

Se tiene que el algoritmo que permite la transición entre sistemas Fig.4.2. depende de la radiación presente en los paneles, la cual se ve reflejada directamente proporcional en la potencia que puede proporcionar dicho arreglo, como también en las celdas de referencia, como se ha mencionado. El algoritmo nos garantiza operar como VSI fotovoltaico para una potencia de los paneles mínima elegida, de acuerdo al porcentaje mínimo de potencia que se quiera tener a la entrada del inversor. Luego pasar a inyección de reactivos pura desconectando el arreglo de paneles del lado DC del convertidor, o en el caso contrario, estar trabajando con el sistema como un STATCOM, cuando la potencia que entreguen los paneles este bajo el límite requerido, esto es cuando la radiación solar sea menor a la necesaria para poder operar como VSI PV, para luego empezar a utilizar el convertidor como acondicionador de potencia cuando se pase el umbral requerido de potencia (radiación).

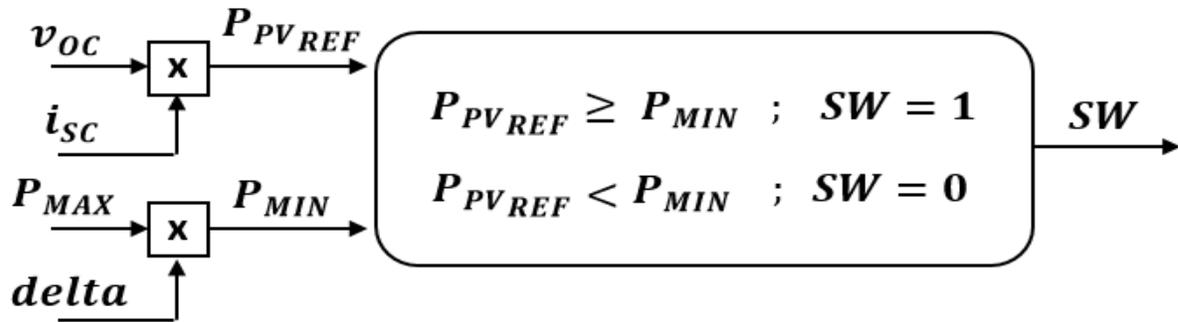


Fig. 4.2. Algoritmo Elección Tipo Sistema

SW : señal de activación switch definición tipo de sistema,

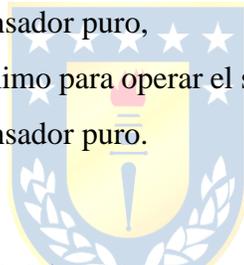
v_{oc} : voltaje de panel de referencia en circuito abierto,

i_{sc} : corriente de panel de referencia en circuito abierto,

P_{PVREF} : potencia calculada de los paneles de referencia en corto circuito y circuito abierto,

P_{MIN} : potencia mínima admisible para operar el sistema como acondicionador de potencia y empezar a operar como compensador puro,

$delta$: factor de porcentaje mínimo para operar el sistema como acondicionador de potencia y empezar a operar como compensador puro.



4.3. Implementación Transición Sistemas

Se tienen los perfiles de radiación y temperatura Fig4.3 (a) y (b) a los cuales se encuentran sometidos todos los paneles utilizados en el sistema de la Fig. 4.1. Mediante la respuesta del sistema frente a estas condiciones es que se tiene una transición desde un estado al otro. Así también se tiene que al momento del sombreado los paneles, en este caso cuando no exista radiación, se presenta la respuesta del voltaje y corriente Fig4.3 (c) y (d) frente a estas condiciones. Dichas cantidades censadas serán las utilizadas para el cálculo de la potencia del panel de referencia, la cual como se mencionó anteriormente es la encargada de ver en qué estado se operará.

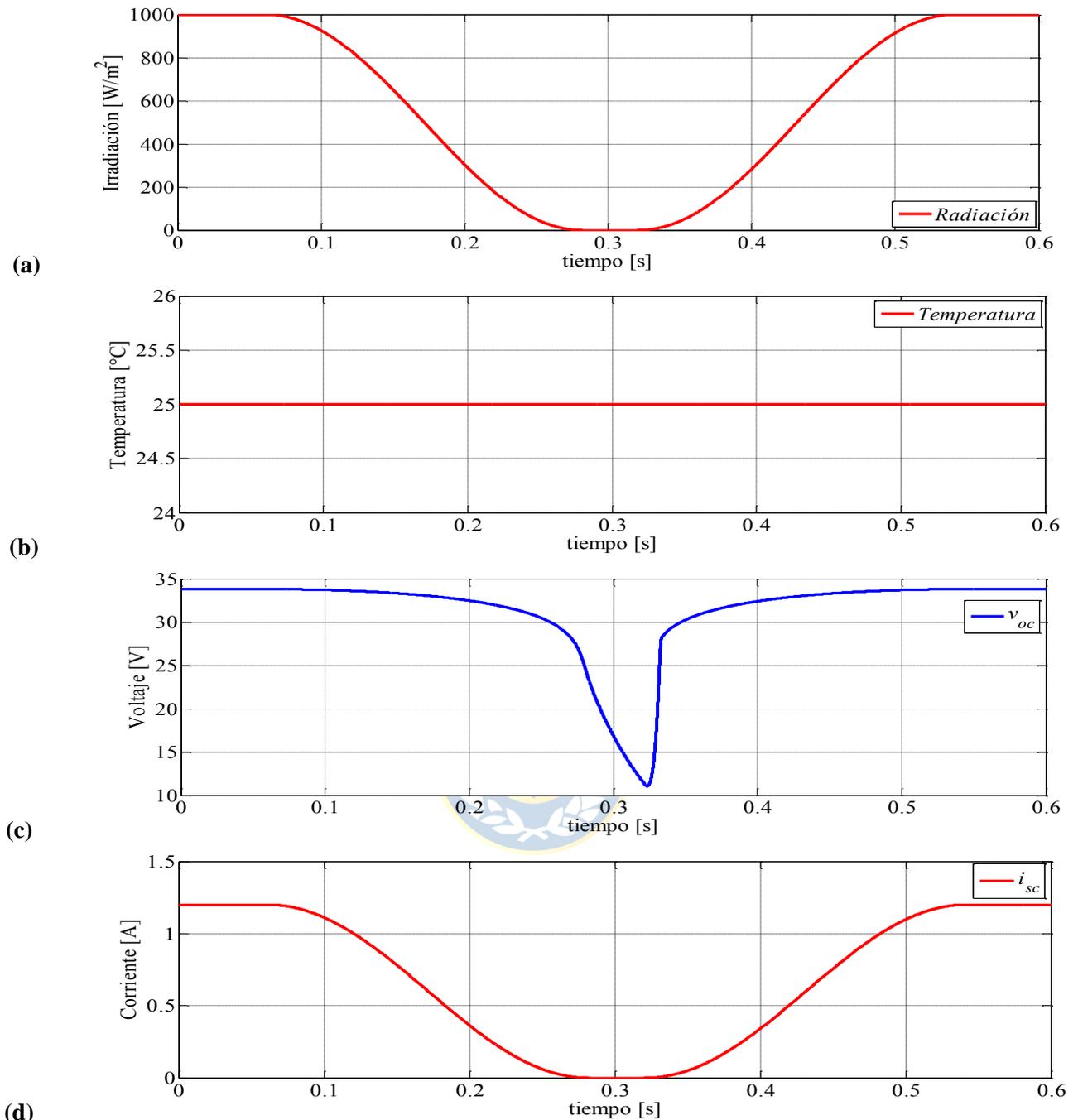


Fig. 4.3. Formas de onda Perfiles Panel Solar Referencia.

(a) Radiación. (b) Temperatura. (c) Voltaje Panel Referencia. (d) Corriente Panel Referencia.

La respuesta de voltaje de circuito abierto Fig. 4.3(c) se ve relentizada, en el caso de simulación, debido a que el software de simulación PSIM no permite la medición de un sistema en corto circuito puro, para lo cual se implanta un condensador en los terminales de este, con el fin de leer el voltaje que presentaría el circuito abierto, por lo cual al disminuir la tensión de la celda,

mediante la caída de la radiación, esta se ve ralentizada de acuerdo a la constante de tiempo que presenta dicho condensador. Para esto se ha utilizado el valor de capacitancia que nos permite poder simular a la menor constante de tiempo posible.

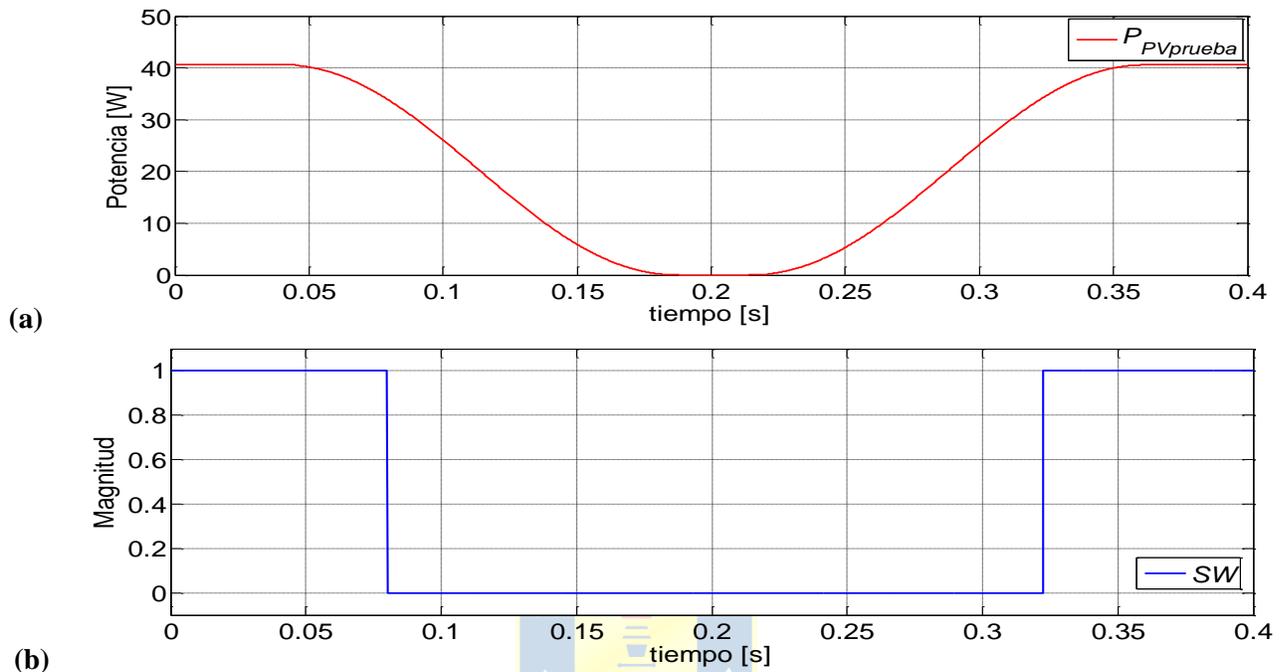


Fig. 4.4. Respuesta sistema frente a Radiación solar.

(a) Potencia de las celdas de referencia $P_{PVprueba}$. (b) Señal de switcheo SW .

Se tiene que la potencia que entregan las celdas de referencia en condiciones nominales es igual a 40.56 (W) Fig.4.3(a), donde se observa que presenta un comportamiento como se mencionó anteriormente directamente proporcional a la radiación Fig. 4.2(a). Por otro lado se tiene la señal de selección de tipo de sistema a trabajar, la cual se desactiva para un valor menor o igual al 83.1% de la potencia de las celdas de prueba, es decir, a los 33.705 (W), siendo esta la mínima potencia elegida para la simulación.

La desconexión de los paneles del arreglo se realiza para probar el comportamiento que presenta el sistema frente a la desconexión del voltaje que sostiene el enlace DC, esto siendo en un instante el arreglo de paneles, con la consiguiente inyección de potencia, para luego ser la propia red la que mantiene esta tensión constante, y el caso inverso, donde se requiere conectar los paneles para empezar a inyectar potencia activa.

4.4. **Discusión y Conclusiones**

La potencia se comporta de forma similar a la radiación solar, siendo esta última una variable de interés, ya que es la que indica bajo qué condiciones se está operando realmente. En otras palabras, si es que se está trabajando sin luz solar o si existe algún sombreado de los paneles. Así al utilizar las celdas de referencia se está trabajando con un piranómetro indirectamente, por lo cual el sistema durante la noche se encontraría inyectando reactivos, lapso de tiempo ocioso para las configuraciones de generación solar típicas. De esta forma se aprovecha la capacidad que presenta el convertidor durante todo el día, siendo la referencia de potencia la cual nos indicaría que el sistema debe inyectar solamente reactivos durante la noche, puesto que se estaría bajo el límite de la potencia activa proveniente de los paneles requerida para poder operar en alguno de los puntos de máxima potencia.



Capítulo 5. Simulación Cambio de Sistemas

5.1. Introducción

En este capítulo se realizará la simulación y obtención de resultados pertinentes para el sistema propuesto en el capítulo anterior. Para esto en primer lugar se realiza la simulación del sistema operando el Inversor como un acondicionador de potencia DC proveniente del arreglo de paneles a la red de distribución AC, para luego pasar a la utilización del Drive como un compensador puro, es decir, inyectando netamente potencia reactiva, cuando no se encuentra la presencia de la radiación solar necesaria. Esto mediante la estrategia de control de transición y desconexión señalada en el capítulo anterior. El segundo caso es el inverso, o sea, pasando de un compensador puro, durante el periodo nocturno, a un acondicionador de potencia cuando se restablece la radiación solar al valor establecido.

5.2. Simulación Implementación Cambio Sistemas

Para la simulación se utilizaron los valores nominales obtenidos de las Tablas 3.2 y 3.3, como también de la Tabla 2.1. El sistema se opera como VSI PV para una Potencia en el arreglo de paneles mayor al 83.1%, lo cual corresponde 200 (W), por lo tanto para valores menores a este se operará como compensador puro, desconectando los paneles de la topología y vice versa.

5.2.1 VSI PV a Inyección de Reactivos Puro

El perfil de radiación está dado en la gráfica de la Fig.5.1 (a), este multiplicado por 10^{-3} , donde en esta misma gráfica se ilustra la señal SW. En la gráfica siguiente se muestra la Potencia de las celdas de referencia, la cual como se aprecia, presenta un comportamiento idéntico a la curva de la radiación, por lo cual se tiene extrapolando esta situación que la señal de SW responde a valores de radiación que recibe el sistema, como se muestra en la gráfica de la Fig.5.1 (a) antes mencionada.

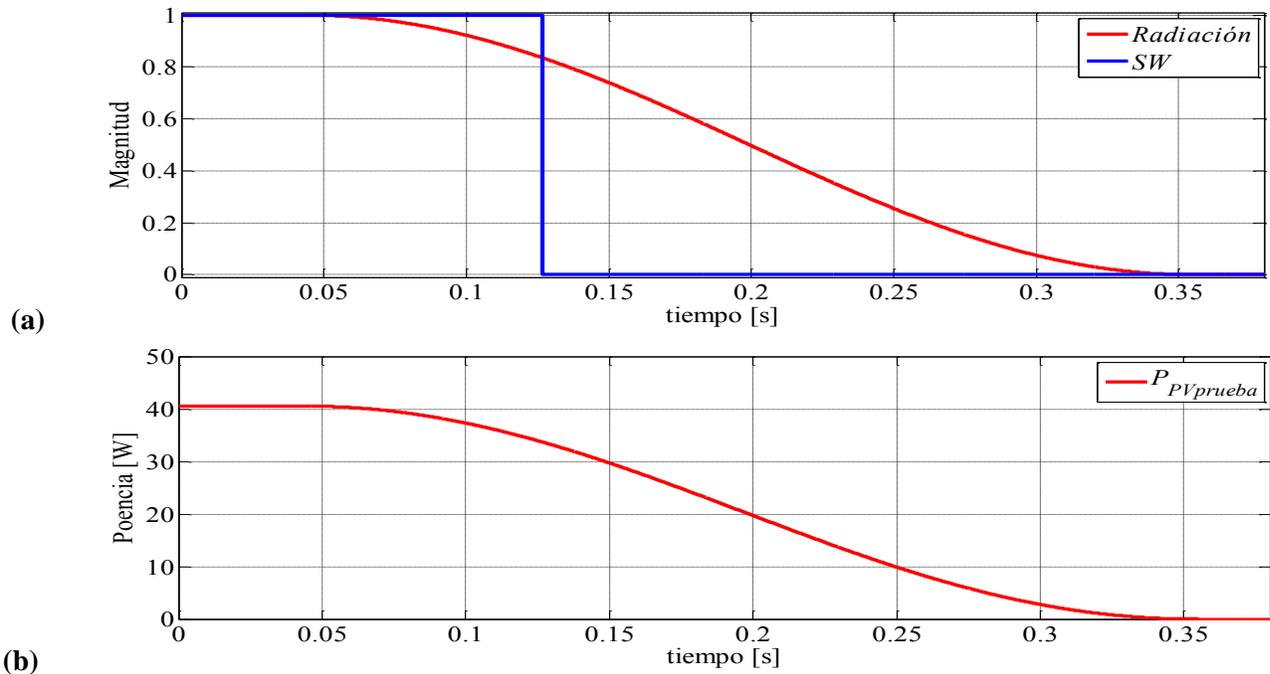
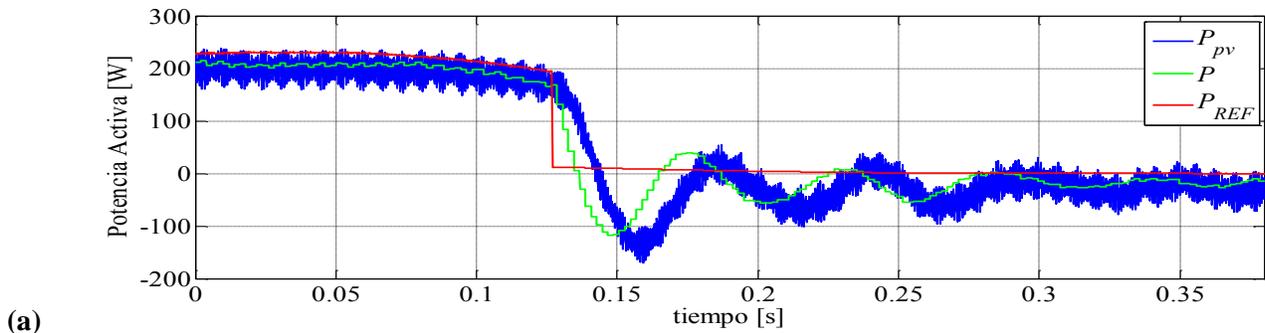


Fig. 5.1. Variables de Interés Control selección tipo de sistema VSI PV a STATCOM.

(a) Radiación y Señal de selección tipo de sistema SW. (b) Potencia medida en los paneles de referencia en corto circuito y circuito abierto $P_{PVprueba}$.

Para este caso se simula el primer tramo de curva de radiación correspondiente a un día, con radiación máxima igual a la nominal, y de esta forma es como el sistema pasa de esta condición a una con nula existencia de radiación, lo cual sería representado como el traspaso desde el día a la noche del ciclo diario Fig. 4.1 (a), y como se ha mencionado la curva de $P_{PVprueba}$ presenta una característica directamente proporcional a la radiación, comparación curvas de la Fig. 5.1.



(a)

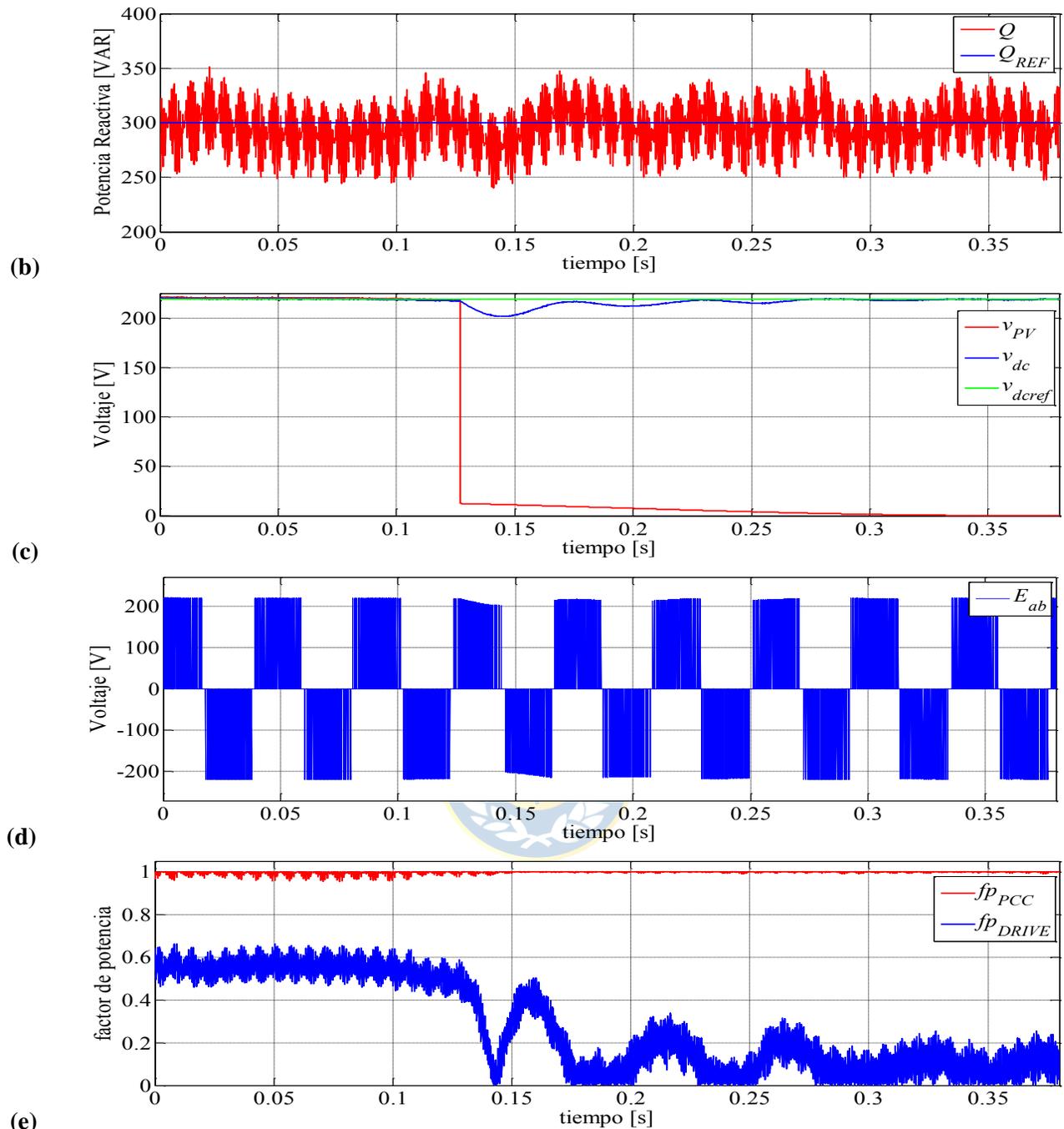


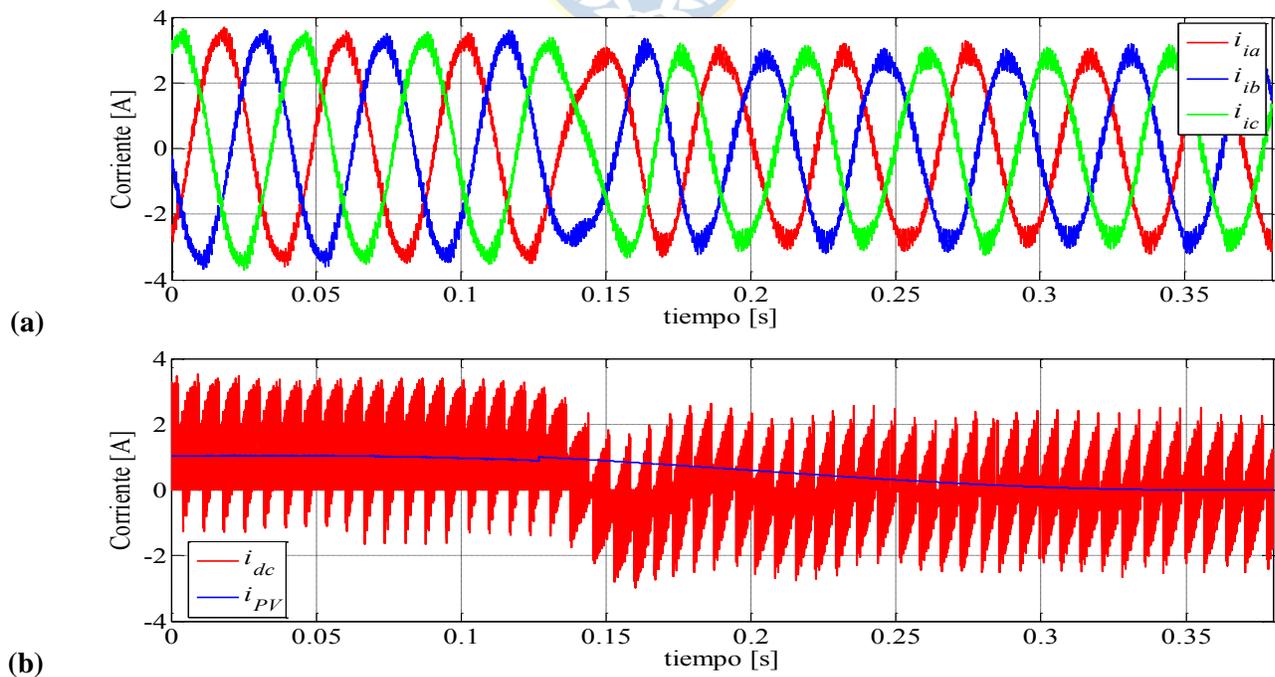
Fig. 5.2. Formas de onda transición entre VSI PV a Compensador Puro.

- (a) Potencia Activa Panel P_{PV} y Potencia Salida VSI P y referencia P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q y referencia Q_{REF} . (c) Voltajes enlace DC: v_{dc} y v_{PV} y referencia v_{dcREF} . (d) Voltaje PWM salida Inversor E_{ab} . (e) Factores de Potencia: PCC y Drive.

El sistema como se espera responde de forma símil a los casos ilustrados en los capítulos anteriores, es así que cuando la señal SW es igual a uno se tiene que el sistema está entregando potencia activa a los valores nominales, durante un ciclo, para luego decrecer proporcionalmente con

respecto a la disminución de radiación, para acto seguido desactivar la inyección de potencia PV cuando esta está por debajo de los 200 (W), pasando por un transiente, para luego comenzar a operar como compensador puro cuando la señal SW vale cero. Como se puede ver también la inyección de reactivos se mantiene constante y no se ve alterada por el cambio de funcionamiento de sistemas, ésta siguiendo la referencia perfectamente, como es lo esperado de acuerdo a la estrategia de control presente, de igual forma se aprecia que el factor de potencia en el PCC presenta una mejora al momento de trabajar como compensador puro, esto debido a que para estos instantes el sistema se encuentra inyectando solamente reactivos a la red. Aun así el fp_{PCC} siempre se encuentra por sobre la norma, para ambas condiciones.

La tensión v_{dc} pasa por un transiente de 3 ciclos para luego seguir la referencia perfectamente, teniendo un sobrepaso de a lo más el 10% Fig.5.1 (c), siendo esto reflejado en el voltaje E_{ab} donde el sobrepaso negativo es perceptible durante un ciclo Fig. 5.1 (d), para después operar de manera independiente del tipo de sistema en el cual se encuentre operando. Para las corrientes entregadas por el inversor se obtiene el resultado esperado referente a la simulación de los dos sistemas independientemente, habiendo un decrecimiento de estas corrientes debido a la no inyección de potencia activa, pasando por un transiente mucho más rápido como es de esperar Fig.5.2 (a).



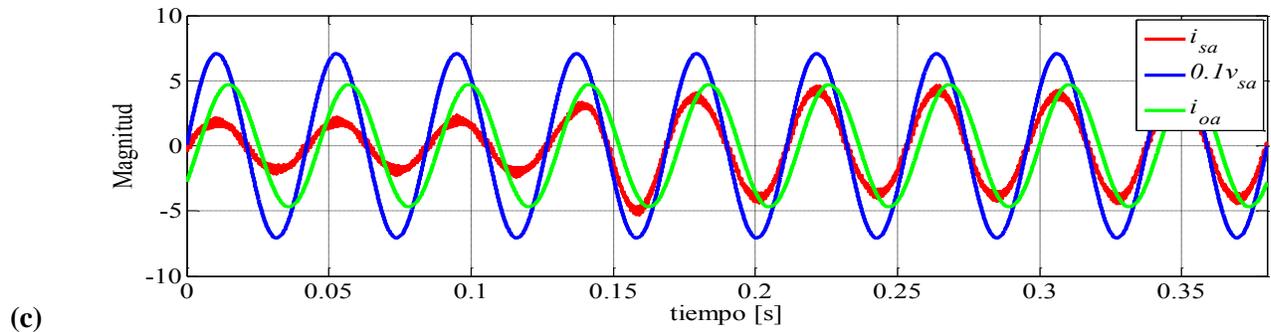


Fig. 5.3. Formas de onda corrientes sistema transición VSI PV a Compensador puro.

(a) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (b) Corrientes lado DC i_{dc} e i_{PV} . (c) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

En la comparación de las corrientes de carga y red con el voltaje de alimentación, se puede percatar que el desfase de la corriente i_{sa} con el voltaje es nulo durante todo el periodo de simulación mostrado. Teniendo una variación solamente en amplitud y en la cantidad de ripple presentada por esta corriente Fig.5.3(c) para los instantes donde el sistema se encuentra inyectando potencia activa. Lo cual se ve traducido en un fp_{PCC} más limpio para el sistema operando en compensación pura, como el mostrado en la Fig. 5.2 (e).

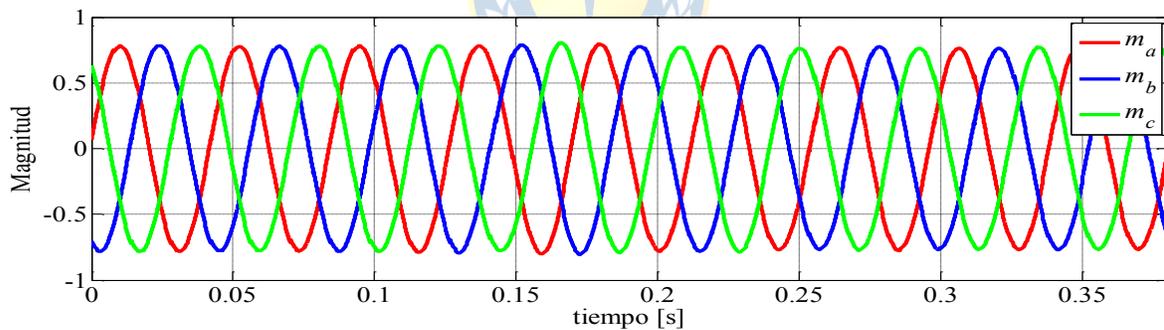


Fig. 5.4. Moduladoras abc Transición VSI PV a STATCOM.

5.2.2 Inyección de Reactivos Puro a VSI PV

Teniendo los resultados de la transición entre VSI PV a compensador puro se realiza la simulación del sistema inverso al ilustrado en el subcapítulo anterior, es así que se tiene el sistema con señal SW operando en cero, para luego cambiar a uno cuando la potencia $P_{PV_{prueba}}$ sobrepasa el 83.1%, es decir, se tiene la potencia P_{PV} por sobre los 200 (W) y de esta forma el sistema comienza a

operar a condiciones nominales e inyectar la potencia activa necesaria, puesto que ya se encuentra en el periodo diario donde la luz solar está dentro del rango necesario.

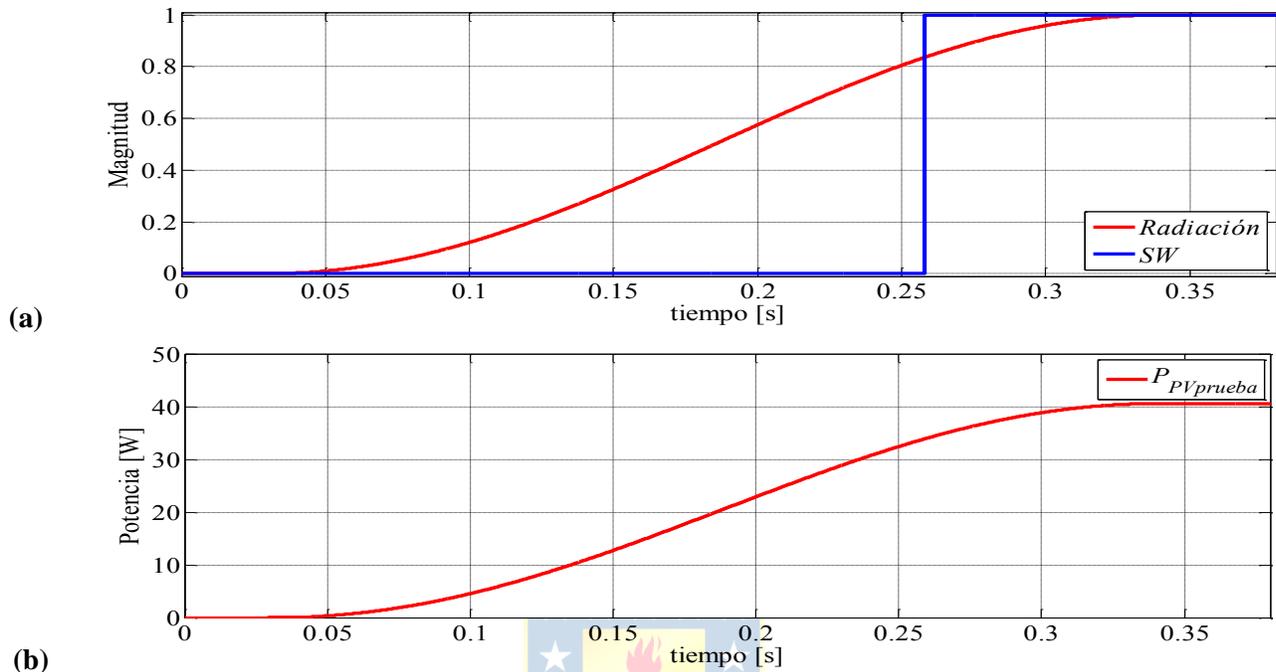
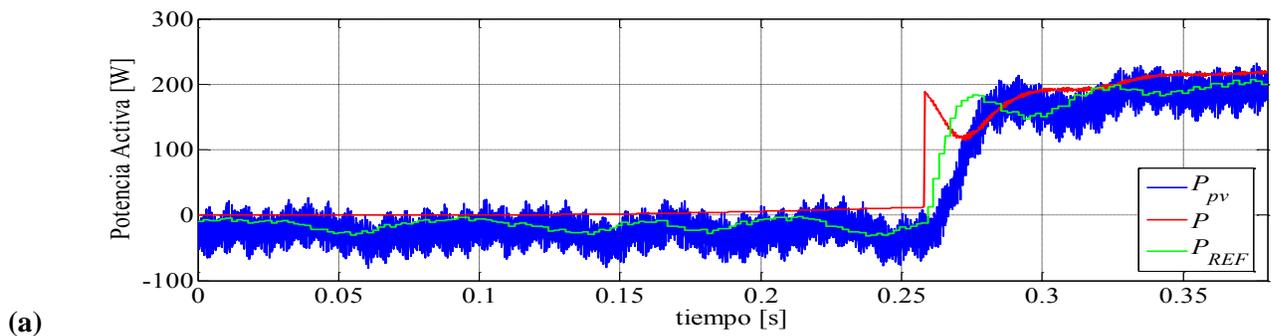


Fig. 5.5. Variables de Interés Control selección tipo de sistema STATCOM a VSI PV.

(a) Radiación y Señal de selección tipo de sistema SW. (b) Potencia medida en los paneles de referencia en corto circuito y circuito abierto $P_{PVprueba}$.

El sistema se comporta de manera muy similar a la forma de transición anterior, manteniéndose la potencia Q constante en el valor nominal sin sufrir variaciones. El voltaje v_{dc} para este caso presenta un sobrepaso positivo el cual de igual forma no es mayor al 10% del valor nominal, para luego mantener la referencia.



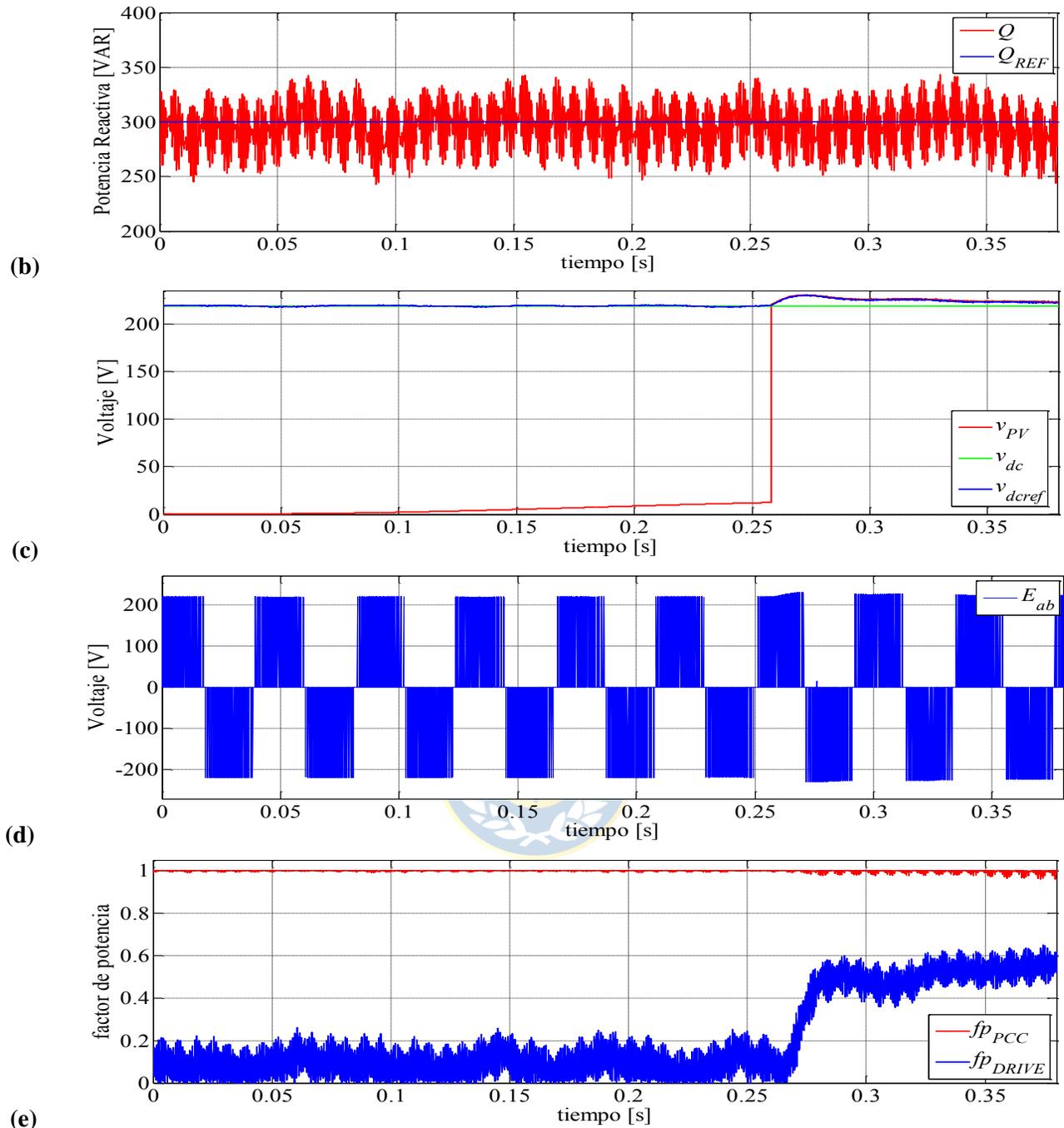


Fig. 5.6. Comportamiento transición entre Compensador Puro a VSI PV.

(a) Potencia Activa Panel P_{PV} y Potencia Salida VSI P y referencia P_{REF} . (b) Potencia Reactiva Salida VSI Q y referencia Q_{REF} . (c) Voltajes enlace DC: v_{dc} , v_{PV} y referencia v_{dcREF} . (d) Voltaje PWM salida Inversor E_{ab} .

(e) Factores de Potencia: fp_{PCC} y fp_{DRIVE} .

El factor de potencia en el PCC se mantiene unitario para todo instante, presentando el ripple correspondiente cuando el sistema pasa a entregar de igual forma potencia activa como reactiva, lo cual queda en evidencia en la gráfica de la corriente de red i_{sa} y la comparación de esta con el voltaje,

en la cual las formas de onda se encuentran en fase Fig. 5.7 (c), donde se aprecia que el desfase entre estas señales es nulo para todo el instante.

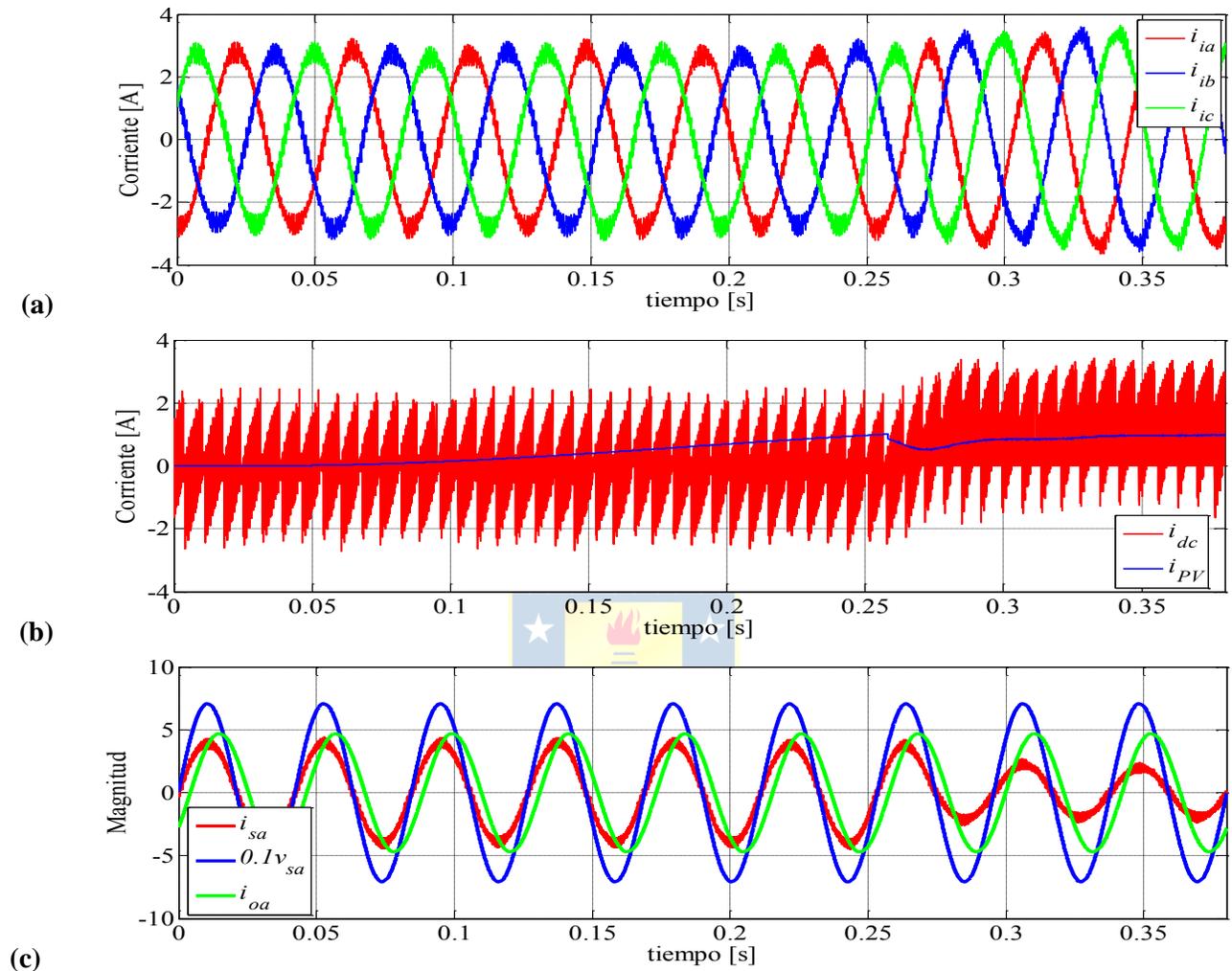


Fig. 5.7. Formas de onda corrientes cambio sistema STATCOM a VSI PV.

(a) Corrientes Salida Inversor i_i^{abc} . (b) Corrientes lado DC i_{dc} e i_{PV} . (c) Comparación Voltaje de Red $0.1v_{sa}$ y corrientes de red y carga, i_{sa} e i_{oa} .

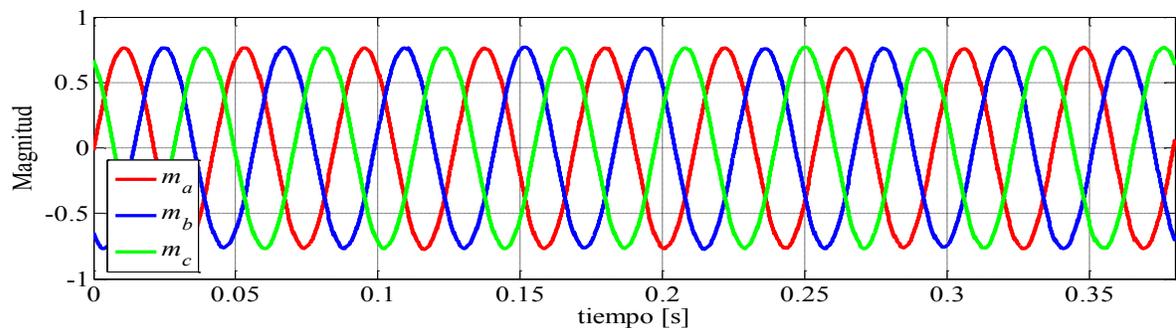


Fig. 5.8. Moduladoras abc cambio sistema STATOM a VSI PV.

5.3. Discusión y Conclusiones

Como se pudo ver la inyección de reactivos se mantiene constante y no se ve alterada por el cambio de sistemas, siendo esta una de las cualidades positivas de la topología. Así el factor de potencia en el PCC se mantiene unitario a todo instante para los valores dados, y este presenta una mejora al momento de trabajar como compensador puro, debido a que el sistema solo se encuentra inyectando reactivos. Esto es una ventaja frente a la no utilización del inversor durante lapsos donde no se tenga luz solar, es decir, la noche, puesto que estos reactivos como se puede apreciar son mucho mejores en comparación a cuando se está operando como VSI PV. Siendo esto de gran utilidad para mantener la calidad del suministro de la red de distribución, en este caso.

Una de las desventajas del sistema es el peak de potencia consumida que se produce al transitar de un sistema a otro, en el caso de VSI PV a compensador. Esto puede dañar el sistema si no se tienen los resguardos del dimensionamiento de los componentes, no ocurriendo de esta forma en el caso de transitar de compensador puro a inyección de potencia activa, puesto que en esta transición no se presenta un peak en la potencia activa, debido a que ésta queda limitada por la potencia que puede suministrar el arreglo de paneles, el cual está restringido a su valor máximo de diseño. Esta problemática se puede solucionar dejando la referencia de potencia igual a cero o al valor que presenta el consumo de potencia del convertidor al momento de transitar de PV a compensador, puesto que es esta la que produce este peak en la potencia activa consumida.

El sistema por completo se comporta de forma estable, para cualquiera de las dos transiciones, pasando por pequeños transientes que no afectan el funcionamiento en sí del sistema, puesto que estos presentan sobrepasos menores al 10% para todas las cantidades. Por otro lado para las condiciones dadas las moduladoras se encuentran bajo el valor unitario por lo cual la topología no presenta sobre modulación operándose adecuadamente.

El sistema responde de manera exacta a lo visto en los capítulos pasados para los rangos de operación nominal anteriores, por lo cual son válidas las respuestas del sistema presentadas en los capítulos dos y tres frente a los cambios en las entradas como las perturbaciones realizadas para cada sistema en particular.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

Se ha realizado la simulación de un sistema de compensación de reactivos, mediante la topología de compensador en paralelo STATCOM, el cual en primera instancia se opera a condiciones nominales con una inyección de 300 (VAR), con tal de tener un factor de potencia unitario en la red. Luego se realiza la implementación de una estrategia de control en el compensador mediante un control PI para el lazo de voltaje y un PI desacoplado para la corriente. Para comprobar el perfecto funcionamiento de la estrategia de control se realizaron dos pruebas al sistema. La primera consistió en ver la respuesta de este frente a entrada escalón en la potencia reactiva, de aquí se obtuvieron las formas de ondas deseadas. Luego se realizó la simulación del sistema para ver la respuesta del sistema frente a perturbaciones de red, para esto se realizó un Sag y un Swell en el sistema del 10% en cada caso, obteniéndose los resultados esperados frente a esta variación.

También se hizo la simulación de un sistema de generación de energía a través de paneles solares fotovoltaicos, con la implementación de etapa de potencia a cargo de un Inversor Fuente de Voltaje, operando de tal forma de inyectar a la red 200 (W) y 0 (VAR) y luego para otra condición en la cual se inyectan 200(W) y 300 (VAR), con tal de satisfacer la necesidad de tener un factor de potencia unitario en el PCC y operar a máxima potencia para los paneles, con los valores nominales dados se obtuvieron las diferentes formas de ondas del sistema. Luego se procede a simular la topología con un sistema de control, el cual consiste en la misma estrategia que la anterior, es decir, un lazo de corriente que cuenta con una estrategia de control PI desacoplada, y un lazo de voltaje con controlador PI. Para esto se realizan pruebas pertinentes para ver la respuesta del sistema frente a entrada escalón, es así como se parte operando el sistema a máxima potencia con una inyección de cero reactivos, para luego realizar un escalón de 300 (VAR), y el segundo caso frente a variación en la potencia activa proveniente de los paneles, esto con tal de ver la respuesta y contrastar con el sistema operando a condiciones nominales sin control.

Una vez realizada la simulación de ambos sistemas, se procede a realizar la conexión entre las topologías de STATCOM y VSI PV, debido a su similitud en operación, topología y forma de control.

Es así como a este último sistema se le agrega una etapa la cual consiste en un interruptor el cual es el encargado mediante una señal de control de indicar en cual sistema se requiere operar. Para esto se implementa un pequeño algoritmo el que es capaz de identificar en que topología se debe operar el convertidor. Para la etapa de selección se implementaron dos celdas solares las cuales sirven de referencia para la obtención de la potencia, y de esta manera operar los sistemas bajo el criterio de potencia mínima deseada.

6.2. Conclusiones

La estrategia de control funciona perfectamente para el sistema propuesto, no existiendo sobrepasos excesivos y con transiente dentro de los 3 a 4 ciclos para entradas escalón, por lo cual de acuerdo a su respuesta su implementación es la adecuada. Esto también debido a su simplicidad, puesto que solamente se cuenta con un controlador lineal Proporcional e Integrativo puro para el lazo de voltaje, y un control PI desacoplado, el cual no presenta mayor complejidad, para el lazo de corriente.

Como se mencionó ocupar el factor de potencia requerido en el PCC como variable de referencia haría mucho mejor el manejo y control de éste para mantenerlo unitario, que es lo que se desea. No obstante debido a la complejidad del cálculo es preferible calcular este de forma offline, de acuerdo a las variables censadas que se encuentran disponibles (corrientes y voltajes de red), y de esta manera obtener una estrategia de control más simple, como la implementada. Cabe destacar que para el sistema presentado en este trabajo, la variación de un 10% en la tensión de red no presenta un gran impacto del fp en el PPC. En efecto, se mantiene la inyección de reactivos constantes, éste presentando una caída de aproximadamente 1% para Sag y Swell, con un sobrepaso donde el factor de potencia alcanza el valor de 0.98, siendo este inductivo para Sag y capacitivo para Swell, por lo cual siempre se mantiene dentro de los márgenes mayores a 0.93. Es por esto que como se ha presentado la elección de trabajar con la potencia reactiva como referencia es una buena elección debido a su simplicidad y buena respuesta frente a perturbaciones.

Por otro lado teniendo en cuenta que no se requiere de gran cantidad de dispositivos extras a conectar y su simplicidad de conexión, la topología de transición presentada la hacen una buena

alternativa para la inyección de reactivos de tal forma de aprovechar la capacidad ociosa de convertidores estáticos de plantas solares en sistemas conectados a la red de distribución. En efecto, son estos sistemas los que requieren en su mayoría ajustarse a las normativas de calidad de suministro eléctrico de la red debido a la presencia de cargas inductivas en su entorno. Tomando en cuenta que la configuración es la común entre granjas solares, es decir, un arreglo de paneles conectados a convertidores estáticos, en su mayoría VSI trifásicos, solo cambiando la estrategia de control utilizada en los distintos equipos comerciales. Es así como cabe señalar que esta topología no es invasiva para el sistema, puesto que el interruptor, el cual es conectado entre los terminales del arreglo y el lado DC del convertidor, no requiere intromisión en estos dispositivos, al igual que la estrategia de control la cual puede ser implementada en hardware tanto fuera del sistema de control del convertidor como dentro éste mismo.

La utilización de celdas de referencia permite un mejor funcionamiento del sistema, debido a que si se desea trabajar con las cantidades provenientes de la granja, ya sea voltaje, corriente o la misma potencia, presentan ripple o variaciones de armónicos en sus formas de onda continua, provenientes de su conexión a convertidores PWM, que afectan el funcionamiento del sistema, provocando una salida pulsante en la señal de selección SW, lo cual se ve reflejado en estas cantidades antes mencionadas. Además estas celdas no son un inconveniente, puesto que por lo visto en la literatura éstas son utilizadas en el cálculo de algoritmos de MPPT para la utilización a máxima potencia de arreglos de paneles. De igual forma estas celdas de referencia no necesariamente necesitan ser del mismo tipo que las presentes en la granja, puesto que sólo se necesita medir el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito de ellas para la obtención de la Potencia de referencia. Así se puede conocer la relación entre ésta y la potencia de los paneles, valores conocidos, es decir, valores presentes en el datasheet de los paneles o calculados mediante pruebas realizadas antes de su instalación final. Por estas razones es que además se necesitan la utilización de dos paneles y no uno solo, debido a que al trabajar con potencia se trabaja indirectamente con la variación en radiación y temperatura, esta última no abordada en este trabajo. De esta forma se logra trabajar en las distintas curvas de voltaje-corriente del sistema.

Se realiza la desconexión del arreglo de paneles con tal de poder observar la dinámica que presenta el sistema frente a la desconexión del voltaje que sostiene el enlace DC. En la simulación ilustrada se realizó esta desconexión para un valor cercano a una pérdida del 20% de la potencia de

los paneles. Este caso resulta más ilustrativo que la desconexión de estos para el caso de tener una potencia cercana a cero. Además al realizar la desconexión para esta cantidad, se tiene que con tales valores de potencia se podría alimentar un banco de baterías, y de esta forma poder cargarlas con la potencia que proviene de los paneles, la cual puede ser suficiente. También existiría la opción de la implementación de los paneles desconectados para la alimentación de una carga en específico. Ambos casos no tratados en este informe

6.3. Trabajo Futuro

Trabajar con un perfil solar más acorde a la realidad, de esta forma se trabajaría con temperatura variable y radiación máxima distintas a la nominal.

Implementación de un sistema de control más complejo para obtener mejores resultados en el transiente que presenta el sistema, cuando se realiza la transición.

Realizar una estrategia de control la cual reciba como referencia el factor de potencia, y de esta forma poder contrastar realmente con lo existente.

Implementación topología en set-up real, con tal de contrastar resultados obtenidos mediante simulación.

Implementación de un sistema de bypass, en el cual se encuentre un banco de baterías, para la carga de estas en periodos donde la Potencia proveniente de los paneles no sea nula, con su consiguiente electrónica y control asociados.

Implementación de un algoritmo de transición mejorado, el cual presente una transición más suave, de esta manera obtener una respuesta menos perturbadora para la red y los componentes del sistema.

Bibliografía

- [1] 10 Years of Renewable Energies, The First Decade: 2004-2014, <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/e-paper/10YR/index.html>, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [2] Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 10: Plantas Fotovoltaicas, https://library.e.abb.com/public/e703d99268365a43c125791f002ce826/1TXA007109G0701_CT10.pdf, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [3] Página personal del Prof. José R. Espinoza C., material referente a Convertidores Estáticos y Sistemas de Control, <http://www2.udec.cl/jose.espinoza/asignaturas>, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [4] S. Das, K. Salim, “Design and Implementation of One kilowatt Capacity Single Phase Grid Tie Photovoltaic Inverter”, *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) 2014*.
- [5] T.R. Khrumshin, G.P. Kornilov, A.A. Murzikov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, “Mathematical Model Of The Static Reactive Power Compensator”, *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 2014*.
- [6] R. Benadli, B. Khiari, A. Sellami, “Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking Technique Based On Voltage-Oriented Control and Using Sliding Mode Controller”, *2015 6th International Renewable Energy Congress (IREC)*.
- [7] A. Spring, G. Wirth, G. Becker, R. Pardatscher, and R. Witzmann, “Grid Influences From Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters with a Power Factor Specification of One”, *IEEE Transactions On Smart Grid*.
- [8] L. Morán, P. D. Ziogas, and G. Joos, “Analysis and Design of a Three-phase Synchronous Solid-state Var Compensator”, *IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 25, NO. 4, July/August 1989*.
- [9] STATCOM and beyond Versatile Voltage Source technology for power transmission excellence, ABB, [http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/fd522c1e8add89d0c1257a620033999a/\\$fi](http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/fd522c1e8add89d0c1257a620033999a/$fi)

- [le/STATCOM+and+beyond+-+Versatile+Voltage+Source+technology+for+power+transmission+excellence.pdf](#), Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [10] Cuaderno de aplicaciones Técnicas n° 8 Corrección del factor de potencia y Filtrado de Armónicos en las instalaciones Eléctricas https://library.e.abb.com/public/897462d590876b5fc125791a003bd1e0/1TXA007107G0701_CT8.pdf, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [11] Datasheet DRIVE VS J7 mini, http://www.limasoft.cz/omron/pdf/Cimr_J7Z_en_man.pdf, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [12] Datasheet Power Module PS11032, <http://www.ineltron.de/english/mitsubishi-data/IPM/PS11032.pdf>, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [13] P. Geng, W. Wu, Y. Ye, and Y. Liu, “Small Signal Modeling of a Novel Single-Phase Photovoltaic Inverter, 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2009).
- [14] M. Rashid, *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, 3ra ed. Prentice Hall Latinoamérica, México.
- [15] Explorador Solar Ministerio de Energía, <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [16] D. B. Snyman, J. HR. Ensli, “Simplified Maximum Power Point Controller For PV Installations”, *Photovoltaic Specialists Conference, 1993., Conference Record of the Twenty Third IEEE*.
- [17] J. Silva, J. Espinoza, J. Rohten, M. Torres, E. Espinoza, “Grid Connected PV System with Maximum Power Point Estimation based on Reference Cells”, *IECON 2015-Yokohama, November 2015*.
- [18] Aplicación de FACTS en el Sistema Eléctrico Chileno, <http://web.ing.puc.cl/power/alumno07/FACTS/FACTS.htm> , Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [19] Irradiación Solar En Territorios De La República De Chile año 2008, <http://www.termic.cl/descargas/RegistroSolarimetrico%2013%20MB%20prof.%20Sarmientos.pdf>, Acceso 2 de Marzo de 2016.

- [20] Calidad De Servicio Eléctrico A Nivel De Distribución, http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/electricidad_calidadservicio/calidad_servicio.pdf, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [21] Norma Técnica De Seguridad Y Calidad De Servicio Para Sistemas Medianos, http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/ELECTRICIDAD_NORMASTECNICAS/NT_SIST_MEDIANOS.PDF, Acceso 2 de Marzo de 2016.
- [22] J. Dixon, L. Morán, J. Rodríguez, R. Domke, “Reactive Power Compensation Technologies, Stateof-the-Art Review”, *IEEE Volume: 93, Issue: 12, December 2005*.
- [23] Y. Yang, H. Wang, F. Blaabjerg, “Reactive Power Injection Strategies for Single-Phase Photovoltaic Systems Considering Grid Requirements”, *2014 Twenty-Ninth Annual IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*.
- [24] P. Martí, M. Velasco, J. M. Fuertes, A. Camacho, J. Miret and M. Castilla, “Distributed Reactive Power Control Methods to A void Voltage Rise in Grid-Connected Photovoltaic Power Generation Systems”, *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*.
- [25] F. El Aamr, H. Maker, A. Mouhsen, M. Harmouchi, “A New MPPT Using Gradient Method for Grid-Connected PV Inverter”, *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*.
- [26] J.Lee, “A Novel Decoupled Current Controller without Overshoot for PWM Converters”, *Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE (Volume 2)*.
- [27] A. Yazdani, R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, John Wiley & Sons Inc. Publication, IEEE Press, 2010.

Anexo A. Transformada de Park

Para la utilización de técnicas de control convencionales se requiere de una transformación que permite describir una señal sinusoidal a través de diferentes variables continuas y la transformada de Park nos permite realizar este cambio.

La transformada queda definida a través de una matriz \mathbf{T} , que multiplicada al vector de señales trifásicas permite obtener un vector resultante de parámetros constantes. La matriz de transformación está dada por:

$$\mathbf{T}_{\text{abc-dq}}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \text{sen}(\omega t) & \text{sen}\left(\omega t - 2\frac{\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\omega t - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ \text{cos}(\omega t) & \text{cos}\left(\omega t - 2\frac{\pi}{3}\right) & \text{cos}\left(\omega t - 4\frac{\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Luego la componente es cero nula, puesto que se considera un sistema trifásico balanceado. Así se tiene, considerando el vector trifásico (A.2), como resultado de la multiplicación por la matriz de transferencia el vector en ejes sincrónicos (A.3).

$$\mathbf{v}^{abc}(t) = \begin{pmatrix} v \text{sen}(\omega t + \phi) \\ v \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\ v \text{sen}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{V}^{dq} = \begin{pmatrix} V^d \\ V^q \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{\text{abc-dq}}(t) \mathbf{v}_s^{abc}(t) = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} v \text{cos}(\phi) \\ \sqrt{\frac{2}{3}} v \text{sen}(\phi) \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Para las derivadas se utiliza la matriz de transformación \mathbf{W} (A.4), y para la conversión inversa, es decir, de ejes rotatorios a abc se utiliza la ecuación se obtiene la magnitud y la fase por las ecuaciones representadas en (A.5) y (A.6).

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \omega & 0 \\ 0 & -\omega \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sqrt{(V^d)^2 + (V^q)^2} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V^q}{V^d} \right) \quad (\text{A.6})$$

