

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL DE UN  
RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE MONOFÁSICO”**

**TESINA DE SEMINARIO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACIÓN EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN  
INDUSTRIAL**

Presentada por:

Galo Cesar Paredes Alvarez

Guido Andrés Díaz Salazar

GUAYAQUIL – ECUADOR

2012

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a nuestros padres por su constante apoyo.

Al Ing. Síxifo Falcones, Director de Tesis, por su ayuda y colaboración para la realización de este proyecto.

A todas las personas que colaboraron para la exitosa culminación de nuestro proyecto de tesis.

## **DEDICATORIA**

A nuestros padres.

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

.....

PhD. SIXIFO FALCONES

**PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN**

.....

MSc. HÓLGER CEVALLOS

**PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesina, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).

.....

GALO C. PAREDES ALVAREZ

.....

GUIDO A. DIAZ SALAZAR

## RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de un Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR) monofásico para el control de voltaje a cargas sensibles a perturbaciones en el voltaje de alimentación. El DVR es un compensador estático basado en un inversor PWM puente H cuyo propósito es regular el voltaje suministrado a una carga sensible monofásica.

Para la simulación del proyecto se utilizó el programa Matlab/Simulink®

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	II
DEDICATORIA .....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA .....	V
RESUMEN .....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVIII
ABREVIATURAS .....	XIX
SIMBOLOGÍA .....	XX
INTRODUCCIÓN .....	XXII

### **CAPÍTULO 1**

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Tecnología de los sistemas de acondicionamiento de energía.....	3
1.2. Restaurador Dinámico De Voltaje.....	6

**CAPÍTULO 2**

2. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	7
2.1. Problemas Que Afectan La Calidad De La Energía Eléctrica .....	8
2.2. Principios de Operación del DVR .....	10
2.3. Funciones que Puede realizar el DVR .....	11
2.4. Mitigación de Sags de Voltaje.....	12
2.5. Mitigación de Swells de Voltaje .....	13
2.6. Elementos Constitutivos .....	14
2.6.1. Controlador.....	15
2.6.2. Dispositivo de Almacenamiento de Energía.....	15
2.6.3. Inversor de Voltaje .....	15
2.6.3.1. Inversor Puente H .....	16
2.6.4. Circuito de Filtro Pasivo.....	18
2.6.5. Transformador de Inyección .....	19
2.7. Métodos de compensación con DVR.....	19
2.7.1. Compensación Pre-SAG .....	20
2.7.2. Compensación en fase.....	21
2.7.3. Compensación en fase avanzada .....	23

**CAPÍTULO 3**

3. DISEÑO DEL DVR.....	24
3.1. Especificaciones de las Condiciones de Operación .....	25
3.2. Valores nominales .....	25
3.2.1. Corriente.....	25
3.2.2. Voltaje .....	25
3.3. Topología.....	26
3.4. Dimensionamiento de la batería .....	26
3.5. Dimensionamiento del transformador .....	27
3.6. Dimensionamiento de la Inductancia .....	28
3.7. Dimensionamiento de la Capacitancia.....	34
3.8. Resonancia del Circuito.....	39
3.9. Dimensionamiento de la Impedancia de Salida.....	41

**CAPÍTULO 4**

4. DISEÑO DEL CONTROL.....	44
4.1. Estrategia de Control.....	45
4.2. Planteo de las Ecuaciones.....	47
4.3. Diseño del controlador para el lazo de corriente.....	50

4.3.1. Obtención de la función de transferencia .....	50
4.3.2. Diseño del controlador de corriente.....	51
4.4. Diseño del controlador para el lazo de voltaje .....	58
4.4.1. Obtención de la función de transferencia .....	58
4.4.2. Diseño del controlador de voltaje .....	59

## **CAPÍTULO 5**

5. SIMULACIONES .....	64
5.1 Compensación Pre-Sag.....	65
5.1.1 Sag de 10% de magnitud y con un desfase de 10° .....	65
5.1.1.1 Durante El Sag.....	66
5.1.1.2 Voltajes .....	67
5.1.1.3 Corrientes .....	68
5.1.1.4 Potencias .....	70
5.1.1.5 Diagramas De Tiempo De Valores RMS.....	71
5.1.2 Sag variable en el tiempo, fase constante.....	72
5.1.2.1 Durante El Sag.....	72
5.1.2.2 Voltajes .....	73
5.1.2.3 Corrientes .....	74
5.1.2.4 Potencias .....	76

5.1.2.5 Diagramas De Tiempo De Valores RMS.....	77
5.2 Compensación de Swell .....	78
5.2.1 Swell de 25% de magnitud con un desfase de 10° .....	78
5.2.1.1 Durante El Swell .....	78
5.2.1.2 Voltajes .....	79
5.2.1.3 Corrientes .....	80
5.2.1.4 Potencias .....	82
5.2.1.5 Diagramas De Tiempo De Valores RMS.....	83
5.2.2 Swell con el máximo desfase de 18° .....	84
5.2.2.1 Durante El Swell .....	84
5.2.2.2 Voltajes .....	85
5.2.2.3 Corrientes .....	86
5.2.2.4 Potencias .....	88
5.2.2.5 Diagramas De Tiempo De Valores RMS.....	89
5.3 Compensación de en fase .....	90
5.3.1. Durante El Swell de 5% con un desfase de 30° .....	90
5.3.2 Voltajes.....	91
5.3.3 Corrientes.....	92
5.3.4 Potencias.....	94

5.3.5 Diagramas De Tiempo De Valores Rms.....	95
5.4 Compensación en cuadratura.....	96
5.4.1 Sag de 5% de magnitud y 0° de desfase.....	96
5.4.1.1. Antes del sag.....	96
5.4.1.2. Durante el sag.....	97
5.4.1.3. Voltajes.....	98
5.4.1.4. Corrientes.....	99
5.4.1.5. Potencias.....	101
5.4.1.6. Diagramas De Tiempo De Valores RMS.....	102
Conclusiones y recomendaciones.....	103
Bibliografía.....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Dispositivos para el mejoramiento de la calidad de energía en mediana tensión.....	5
1.2. Esquema unifilar de un sistema con DVR.....	6
2.1. Sag de voltaje .....	8
2.2. Swell de Voltaje .....	9
2.3. Principio de operación del DVR .....	10
2.4. Mitigación de Sags de voltaje .....	12
2.5. Mitigación de Swells de voltaje .....	13
2.6. Elementos constitutivos del DVR .....	14
2.7. Configuración y disposición de conmutación de un Inversor tipo Puente H.....	17
2.8. Método de compensación pre- sag.....	21
2.9. Método de compensación en fase .....	22
3.1. Topología del convertidor.....	26
3.2. Esquema del DVR para el cálculo del voltaje del inductor.....	28
3.3. Voltaje del inductor.....	29
3.4. Voltaje integrado del inductor.....	30
3.5. Acercamiento en el Voltaje integrado del inductor .....	31
3.6. Corriente del inductor sin carga .....	32
3.7. Corriente del inductor a plena carga .....	33
3.8. Acercamiento en la Corriente del inductor a plena carga.....	33

3.9. Esquemático del DVR para el cálculo del capacitor.....	34
3.10. Corriente del capacitor .....	35
3.11. Corriente integrada del capacitor .....	36
3.12. Acercamiento en la Corriente integrada del capacitor.....	37
3.13. Voltaje del capacitor.....	38
3.14. Acercamiento en el Voltaje del capacitor .....	38
3.15. Diagrama de Bode del controlador .....	40
3.16. Diagrama de Bode del controlador con los demás componentes.....	40
3.17. Circuito del DVR para el dimensionamiento de la impedancia de salida .....	41
3.18. Circuito del transformador ideal en el DVR.....	41
3.19. Circuito del DVR reducido con el teorema de Thevenin.....	42
3.20. Topología del DVR conectado a la red y a la carga.....	43
4.1. Diagrama de bloques del DVR.....	45
4.2 Diagrama de bloques y de frecuencias del DVR.....	46
4.3. Esquemático del DVR operando en lazo abierto .....	47
4.4. Diagrama de bloques del lazo de corriente.....	50
4.5. Diagrama de bloques de la planta de corriente.....	50
4.6. Diagrama de bode de la función de transferencia de la planta en lazo abierto .....	53
4.7. Diagrama de bode de la planta de corriente con el integrador.....	54
4.8. Respuesta de la planta de corriente en lazo cerrado.....	55

4.9. Respuesta del lazo interno de corriente a una señal de referencia sinusoidal de 60 Hz .....	56
4.10. Respuesta de la planta a un escalón en la señal de referencia .....	57
4.11. Respuesta de la planta de corriente a un escalón de carga .....	57
4.12. Lazo de voltaje.....	58
4.13. Diagrama de bloques de la planta de voltaje .....	59
4.14. Diagrama de bode de la planta de voltaje en lazo abierto .....	59
4.15. Diagrama de Bode de la planta en lazo cerrado.....	60
4.16. Cálculo del compensador utilizado sisotool .....	61
4.17. Respuesta del lazo de voltaje a una señal de referencia senoidal.....	62
4.18. Respuesta de la planta de voltaje a un escalón en la señal de referencia .....	62
4.19. Respuesta de la planta de voltaje a un escalón de carga.....	63
5.1. Fasores antes de las perturbaciones de la red .....	65
5.2. Fasores durante el sag de 10% y con desfase de 10° .....	66
5.3. Voltajes durante el sag.....	67
5.4. Corrientes del DVR durante el sag .....	68
5.5. Corriente de la carga durante el sag.....	69
5.6. Intercambio de potencia durante el sag .....	70
5.7. Voltajes RMS de la red durante el sag.....	71
5.8. Fasores durante el sag variable en el tiempo con fase constante .....	72
5.9. Voltajes durante el sag.....	73

5.10. Corrientes del DVR durante el sag.....	74
5.11. Corriente de la carga durante el sag.....	75
5.12. Intercambio de potencia durante el sag .....	76
5.13. Voltajes RMS de la red durante el sag.....	77
5.14. Fasores durante el swell de 25% de magnitud y desfase 10°.....	78
5.15. Voltajes durante el swell .....	79
5.16. Corrientes del DVR durante el swell .....	80
5.17. Corriente de la carga durante el swell.....	81
5.18. Intercambio de potencia durante el swell.....	82
5.19. Voltajes RMS de la red durante el swell.....	83
5.20. Fasores durante el swell con el maximo desfase 18° .....	84
5.21. Voltajes durante el swell .....	85
5.22. Corrientes del DVR durante el swell .....	86
5.23. Corriente de la carga durante el swell.....	87
5.24. Intercambio de potencia durante el swell.....	88
5.25. Voltajes RMS de la red durante el swell.....	89
5.26. Fasores durante el swell de 5% de magnitud y desfase 30°.....	90
5.27. Voltajes durante el swell .....	91
5.28. Corrientes del DVR durante el swell .....	92
5.29. Corriente de la carga durante el swell.....	93
5.30. Intercambio de potencia durante el swell.....	94
5.31. Voltajes RMS de la red durante el swell.....	95

5.32. Fasores antes del sag de 5% de magnitud y 0° de desfase .....	96
5.33. Fasores durante el sag 5% de magnitud y 0° de desfase.....	97
5.34. Voltajes durante el sag.....	98
5.35. Corrientes del DVR durante el sag.....	99
5.36. Corriente de la carga durante el sag.....	100
5.37. Intercambio de potencia durante el sag .....	101
5.38. Voltajes RMS de la red durante el sag.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Criterio para elegir el tipo de controlador según el $\phi$ boost.....	65
---	----

**ABREVIATURAS**

CUPS	Custom Power Systems
DSTATCOM	Distribution Static Compensator
DVR	Dynamic Voltage Restorer
FACTS	Flexible AC Transmission System
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
SSB	solid state breaker
SSCL	solid state current limiter
SSTS	solid state transfer switch
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
VSI	Voltage source inverter

## SIMBOLOGÍA

$V_{grid}$	Voltaje de la Red
$V_{Load}$	Voltaje de la Carga
$V_{dvr}$	Voltaje de salida del DVR
$V_A$	Voltaje de Salida del convertidor
$V_P$	Voltaje aplicado al primario del transformador
$V_L$	Voltaje del Inductor
$V_C$	Voltaje del Capacitor
$V_{th}$	Voltaje Thevenin presente en la salida del equipo
$V_{DC}$	Voltaje de la Batería
$I_{dvr}$	Corriente del DVR
$I_C$	Corriente del Capacitor
$I_{Load}$	Corriente de la Carga
$I_{sec}$	Corriente del Devanado Secundario del Transformador
$I_{Bat}$	Corriente de la Batería
$\Delta V_{dvr}$	Rizo de Voltaje presente en el equipo

$\Delta I_{dvr}$	Rizo de Corriente presente en el equipo
$L$	Inductancia del Filtro
$R_L$	Resistencia de los devanados del inductor del filtro
$C$	Capacitancia del filtro
$R_C$	Resistencia equivalente serie del filtro capacitivo
$f_{res}$	Frecuencia de Resonancia
$n$	Relacion de vueltas del transformador
$BW$	Ancho de Banda
$PM$	Margen de Fase
$f_C$	Frecuencia de cruce
$\omega_c$	Frecuencia angular de cruce
$G_{sys}$	Magnitud de la ganancia de la planta en lazo abierto a la frecuencia de cruce.
$\varphi_{sys}$	Fase de la ganancia de la planta en lazo abierto a la frecuencia de cruce.
$\varphi_{boost}$	Angulo elevador de fase

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas modernos de energía son redes complejas, donde cientos de estaciones generadoras y miles de centros de cargas están interconectadas a través de largas redes de transmisión y distribución de energía. El principal interés de los consumidores es la calidad de la energía eléctrica que les llega por parte de las centrales eléctricas cercanas a su vivienda. Es necesario saber que tener una generación de energía bastante confiable no implica que la calidad del suministro sea también confiable.

Los sistemas de distribución de energía, idealmente, deberían proveer a sus consumidores de un ininterrumpido flujo de energía, con el voltaje sinusoidal en la magnitud y frecuencia contratada.

Para proporcionar una buena calidad de energía eléctrica a los consumidores se presenta a el Restaurador Dinámico de Voltaje como el dispositivo capaz de controlar el nivel voltaje en la carga y así poder brindarles la seguridad y la tranquilidad en la distribución de la energía ya sea en su residencia o empresa.

Los objetivos del proyecto son:

- Dimensionar los componentes para formar un DVR monofásico.
- Analizar, modelar y diseñar un controlador de lazo cerrado para el DVR.
- Realizar pruebas para verificar que el DVR funciona correctamente solucionando determinados problemas de la calidad de energía eléctrica.

La principal limitación es la no implementación de este proyecto que solo se centrará en el análisis y diseño de un DVR monofásico utilizando bloques elementales del Software de simulación Matlab en el ambiente Simulink.

# **CAPÍTULO 1**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los sistemas de energía, especialmente los sistemas de distribución, tienen numerosas cargas no lineales, las cuales afectan significativamente la calidad y pureza de la forma de onda de las fuentes de energía. Aparte de las cargas no lineales, algunos eventos usuales del sistema (switchero de un capacitor, arranque de un motor) e inusuales pueden también infligir problemas de calidad.

La consecuencia de problemas de calidad de energía pueden variar desde simples parpadeos molestos en la luz eléctrica o la pérdida de miles de dólares debido a las paradas de las maquinas en una fábrica.

Un Problema de calidad de Energía está definido como algún problema manifestado en el voltaje/corriente o que provoque una desviación de frecuencia, los cuales generan averías o fallos en el funcionamiento de los equipos o maquinas del cliente, muchas veces debido a repentinas sobretensiones, subtensiones o presencia de armónicos en la red de alimentación.

Debido a una variedad de presiones ecológicas, y reglamentos sobre el uso de la tierra, el crecimiento de las instalaciones eléctricas de transmisión y distribución de energía en muchas partes del mundo está limitado, a pesar de eso las transferencias masivas de energía y el acceso por terceros, están en aumento. El resultado de esto es un cuello de botella en la transmisión y una utilización no uniforme de las instalaciones eléctricas. A menudo, como las transferencias de energía crecen, el sistema de se hace cada vez más complejo de manejar, y puede ser más inseguro con flujos de energía de gran tamaño con un control inadecuado. El otro aspecto del problema se convierte entonces en la imposibilidad de utilizar todo el potencial de las interconexiones de transmisión y distribución de energía.

El problema a resolver en este proyecto es la variación de voltaje de corta duración, esta vaciacion se puede dar como:

- Depresiones de voltaje (sags)
- Hinchamientos de voltaje (swells)

Para esto se ha creado la tecnología de los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) y la tecnología de los sistemas de acondicionamiento de energía (Custom Power Systems, CUPS).

### **1.1 TECNOLOGIA DE LOS SISTEMAS DE ACONCIONAMIENTO DE ENERGÍA**

La tecnología CUPS utiliza equipamientos capaces de mitigar numerosos problemas de la calidad de energía. Sus funciones básicas son la rápida inyección de corriente o de voltaje y para la corrección de las anomalías en suministro de voltaje o de corriente de carga mediante la inyección o absorción de potencia reactiva y activa, respectivamente.

La tecnología FACTS permite el control de flujo de energía en las líneas de transmisión de corriente alterna y utilizar las instalaciones de transmisión existentes hasta llegar a sus límites térmicos sin sacrificar su fiabilidad. La base fundamental de las tecnologías FACTS son sofisticados sistemas de control, dispositivos de monitoreo y los programas informáticos también son componentes importantes de los FACTS

Los dispositivos FACTS solo mejoran la capacidad de transferencia de energía y los márgenes de estabilidad en los sistemas de transmisión, los CUPS utilizan controladores electrónicos para los sistemas de

distribución, especialmente para tratar con los problemas de calidad de energía.

La tecnología CUPS asegura a los consumidores que obtendrán la calidad y fiabilidad del suministro de energía eléctrica contratado, la cual contiene una combinación de las siguientes especificaciones:

Un nivel de desbalance de fases muy bajo, cero interrupciones de energía, bajo parpadeo en la tensión de carga, baja distorsión armónica de la tensión de carga, magnitud y duración de las sobretensiones y subtensiones dentro de límites permitidos. Esto se puede realizar desde para clientes individuales hasta para grandes parques industriales o comerciales.

Los controladores electrónicos que se utilizan los CUPS pueden ser de tipo "reconfiguración de red" y de tipo "compensación de red".

Entre los dispositivos del tipo reconfiguración de red están los equipos limitadores de corriente (Solid State Current Limiter, SSCL), dispositivos de corte de corriente (Solid State Breaker, SSB) y dispositivos de transferencia de corriente (Solid State Transfer Switch, SSTS). La función de estos dispositivos es cancelar, de forma abrupta, el paso de energía de la red a la carga en caso de que esta presente perturbaciones.

Los dispositivos del tipo compensación de red, es decir, que compensan el factor de potencia de la carga y sus condiciones de desequilibrio o mejoran la calidad de la energía de la red de alimentación, etc., están

conectados en paralelo o en serie o una combinación de ambos y en esta clase de dispositivo se incluye el compensador estático de distribución (Distribution Static Compensator, DSTATCOM), el restaurador dinámico de voltaje (Dynamic Voltage Restorer, DVR) y el acondicionador de calidad de energía unificado (Unified Power Quality Conditioner, UPQC).

En la figura 1.1 se muestran los diferentes equipos para tratar con los problemas de calidad en la distribución de energía eléctrica.

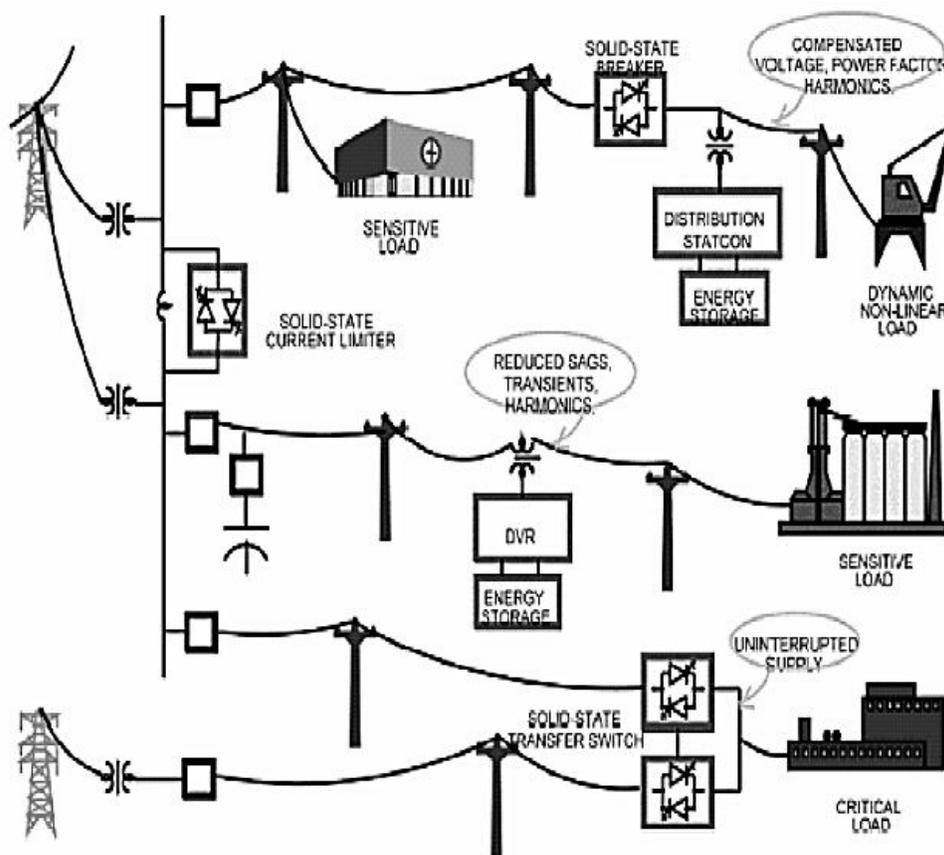


Figura 1.1. Dispositivos para el mejoramiento de la calidad de energía en mediana tensión [1].

El dispositivo de la tecnología CUPS que se utiliza en el presente proyecto para resolver los problemas de la calidad de energía antes mencionados es el restaurador dinámico de voltaje (DVR).

## 1.2 RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR)

Un DVR es un dispositivo que se conecta en serie a la red de alimentación como se observa en la figura 1.2 y que inyecta un voltaje controlado dinámicamente en serie y en sincronismo con el voltaje de la red por medio de un transformador elevador. Está basado en un convertidor electrónico de potencia que protege cargas sensibles a perturbaciones en el voltaje de alimentación.

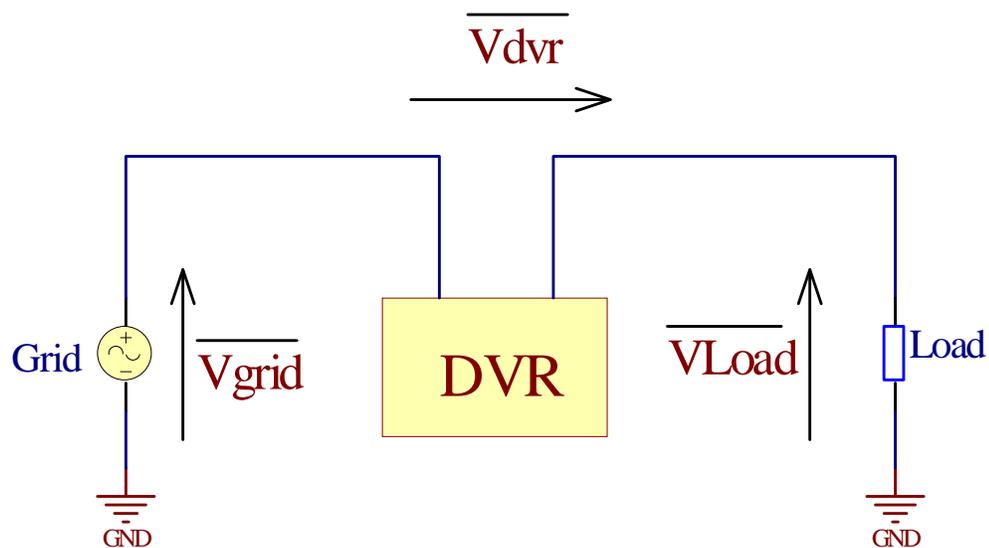


Figura 1.2. Esquema unifilar sistema con DVR.

## **CAPITULO 2**

### **FUNDAMENTO TEORICO**

En este capítulo se identifican los problemas más comunes que afectan a la calidad de energía principalmente los Sags y Swells de voltaje, se presenta el principio de operación del DVR, asimismo, se indica cuáles son las funciones que puede realizar y como mitiga dichos problemas de calidad de energía, se describen cada uno de los elementos constitutivos del DVR y se definen brevemente los métodos de compensación que existen.

## 2.1 PROBLEMAS MAS COMUNES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Los problemas más comunes que afectan la calidad de la energía eléctrica son:

- Distorsión armónica.
- Interrupciones.
- Desequilibrios de fases.
- Fluctuaciones de tensión.
- Sags.
- Swells.

Este proyecto estará enfocado en solucionar los dos últimos (sags y Swells) por lo cual no se profundizará en los restantes.

Un sag de voltaje está definido como la repentina reducción de la alimentación de voltaje. En la figura 2.1 se muestra como el voltaje cae del 90% al 10% del nominal, seguida por una recuperación después de un corto periodo de tiempo, normalmente el sag dura de 10ms a 1 minuto.

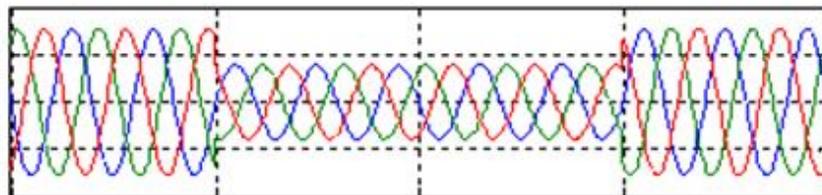


Figura 2.1. Sag de voltaje [2].

Un swell de voltaje está definido como el incremento repentino del voltaje de alimentación, como se observa en la figura 2.2, desde un 110% hasta 180% del voltaje RMS en la frecuencia fundamental de la red, con una duración de 10ms a 1 minuto.

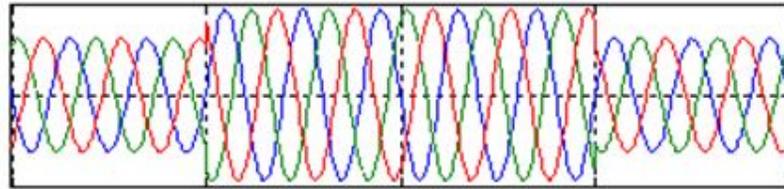


Figura 2.2. Swell de Voltaje [2].

Para compensar estos Sag/ Swell de voltaje en un sistema de distribución de energía se utiliza unos dispositivos especiales los cuales deben ser instalados en un punto de acoplamiento común el cual está definido como el punto donde la propiedad de la red cambia. El Restaurador Dinámico de Voltaje o DVR es uno de los dispositivos de acondicionamiento de energía que puede mejorar la calidad de la distribución de energía, el DVR ofrece protección contra fluctuaciones de tensión (Sags y Swells), protección contra armónicos y protección contra desequilibrios de fase, además de esto también puede realizar control de flujo de potencia.

## 2.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL DVR

El DVR es un compensador estático basado en un inversor PWM puente H cuyo principio de operación es controlar y regular el voltaje suministrado a una carga sensible monofásica, inyectando o absorbiendo un voltaje que compensa en amplitud y ángulo de fase a la red de distribución. La precisión del voltaje suministrado por el DVR para compensar el voltaje de la red depende del comportamiento dinámico y cuan exacto sea la síntesis del voltaje por modulación de ancho de pulso y el sistema de control adoptado. En la figura 2.3 se observa que de manera repentina aparece un Sag de voltaje en una subestación de distribución, entonces rápidamente el DVR inyecta el voltaje necesario para que a la carga le llegue la magnitud correcta de voltaje.

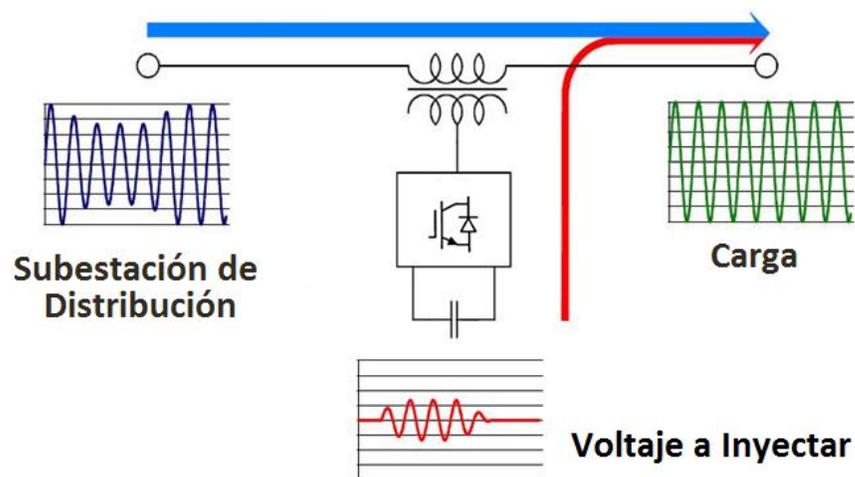


Figura 2.3. Principio de operación del DVR [3].

## 2.3 FUNCIONES QUE PUEDE REALIZAR EL DVR

Las siguientes son las funciones para la cual fue desarrollado el DVR:

- Protección contra Fluctuaciones de Tensión (Sags, Swells).
- Protección contra armónicos de voltaje.
- Protección contra Desequilibrios de Fases.
- Control de Flujo de Potencia.

Las siguientes funciones también las puede realizar pero como no fue diseñado con ese propósito se dice que no es óptimo:

- Fluctuaciones de Tensión.
- Entrega de Potencia.

Hay que tener en cuenta que durante el funcionamiento normal de la red, el DVR no realiza acción alguna. Si se detecta alguna falla el DVR rápidamente inyecta los componentes necesarios de tensión para suavizar la tensión de carga.

## 2.4 MITIGACIÓN DE SAGS DE VOLTAJE

Para la Mitigación de Sags de voltaje, como se muestra en la figura 2.4, el DVR censa las “depressiones” en el voltaje de alimentación de la línea de distribución, luego el convertidor inyecta un voltaje de compensación de magnitud pre-calculada en fase con el voltaje de alimentación para que se sumen ambos voltajes compensando el voltaje de la red y obteniendo la magnitud y fase del voltaje deseado que debe mantener la carga.

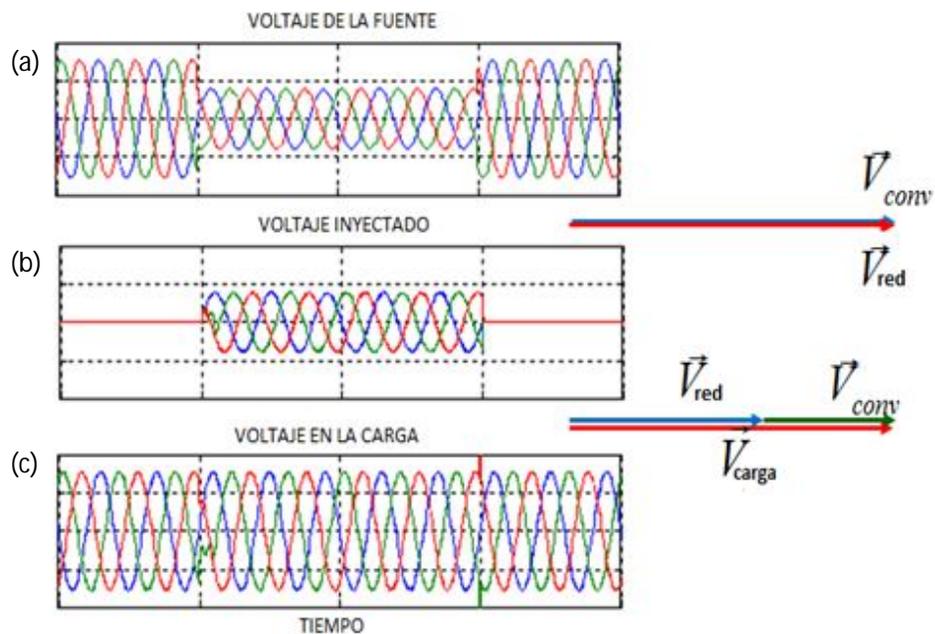


Figura. 2.4 (a) Sag de voltaje en la fuente, (b) Voltaje inyectado por el DVR, (c) voltaje restaurado en la carga.

## 2.5 MITIGACIÓN DE SWELLS DE VOLTAJE

Para aminorar los Swells de voltaje, el DVR censa los “hinchamientos” en el voltaje de alimentación de la línea de distribución como se muestra en la figura 2.5a, e inyecta un nivel de voltaje determinado y desfasado 180 grados con respecto al de la red (figura 2.5b) para que se produzca una resta y disminuya estos incrementos compensando el voltaje de la red y no se notara lo sucedido (figura 2.5c).

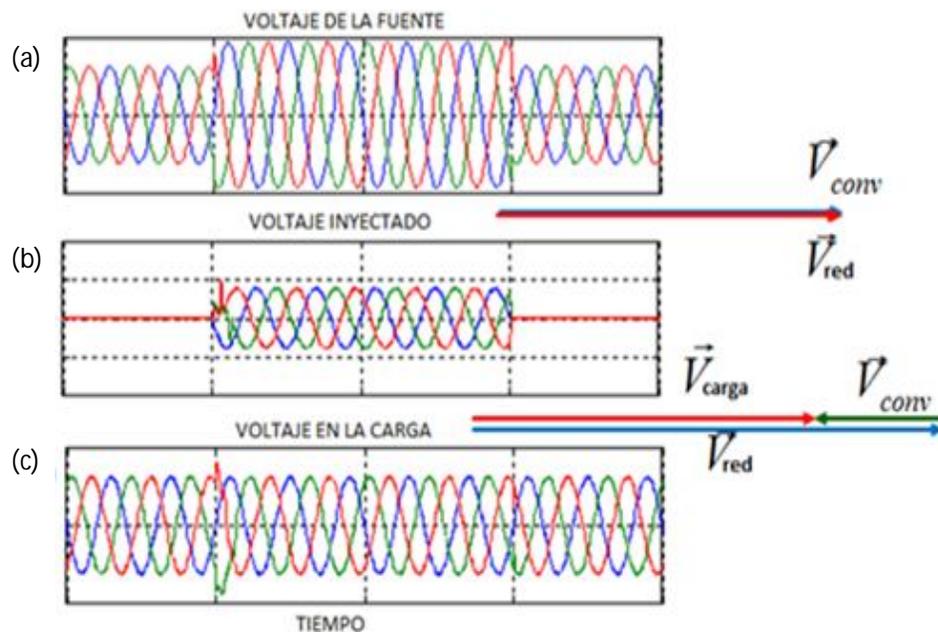


Figura. 2.5 (a) Swell de voltaje en la fuente, (b) Voltaje inyectado por el DVR, (c) voltaje restaurado en la carga.

## 2.6 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL DVR

- Dispositivo o unidad de almacenamiento de energía.
- Inversor de voltaje.
- Circuito de filtro pasivo.
- Transformador de inyección de voltaje.
- Controlador.

En la figura 2.6 se señalan los componentes del DVR

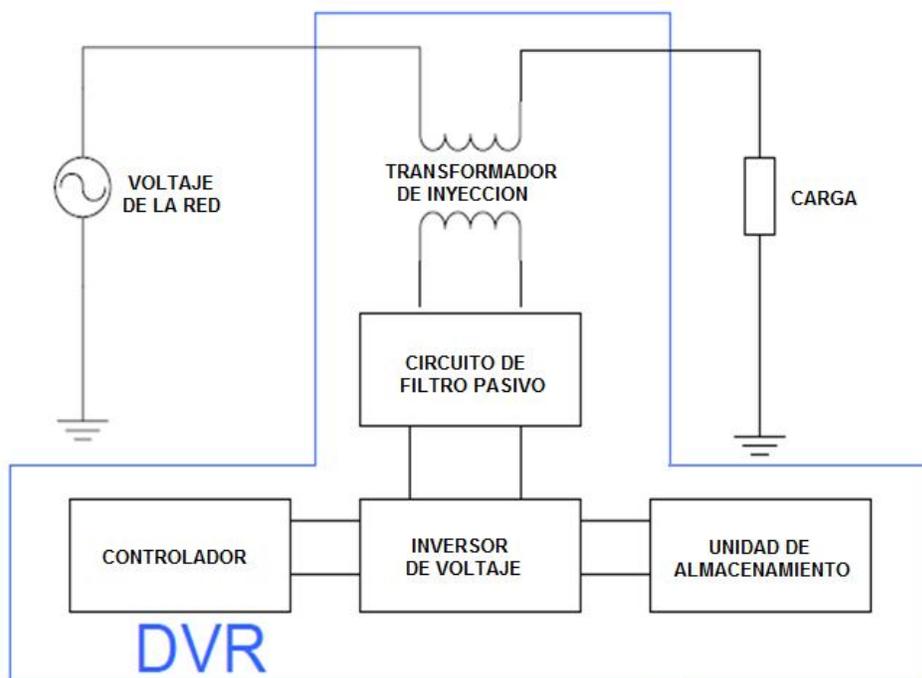


Figura 2.6. Elementos constitutivos del DVR.

### **2.6.1 CONTROLADOR**

El objetivo del sistema de control es mantener una tensión de carga equilibrada y constante en el valor nominal en virtud de las perturbaciones del sistema a partir del voltaje censado.

### **2.6.2 DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**

Son dispositivos externos conectados en los terminales DC del inversor, esencialmente son la fuente de generación de potencia activa al momento de compensar Sags de larga duración. Entre estos dispositivos se encuentran circuitos de conversión de voltaje DC, bancos de capacitores y bancos de baterías. La capacidad máxima compensación de la DVR para compensar Sags de voltaje en particular depende de la cantidad de la potencia activa suministrada por los dispositivos de almacenamiento de energía.

### **2.6.3 INVERSOR DE FUENTE DE VOLTAJE (VSI)**

El DVR emplea interruptores de electrónica de potencia de estado sólido IGBTs en una estructura de inversor de voltaje modulado por ancho de pulso (PWMVSI) que es capaz de absorber potencia real o activa independientemente de las condiciones de voltaje AC presente en su salida, para ello inyecta niveles de voltaje AC en serie y en sincronismo con las tensiones de alimentación

provenientes de la red de distribución. De acuerdo a la modulación empleada, se tiene diferentes ventajas en lo que respecta a controlar la salida del inversor.

La función básica del VSI es convertir la tensión DC suministrada por el dispositivo de almacenamiento de energía en voltaje AC. Como en la etapa de potencia del DVR se utiliza un transformador elevador entonces es suficiente utilizar un VSI con una calificación de bajo voltaje. El método de conexión del VSI que se utilizará será el de inversor puente H ya que el DVR de este proyecto es monofásico.

#### **2.6.3.1 INVERSOR PUENTE H**

En el inversor puente H, se utilizan cuatro IGBTs formando un circuito de conmutación unipolar. La Figura 2.7 muestra al inversor puente H. Los IGBT están equipados cada uno con un diodo antiparalelo que proporciona un camino de libre circulación para la corriente de carga. Si los IGBT 1 y 2 están activados, la corriente de carga fluye en la dirección F. Si los IGBT 3 y 4 están activados, la corriente fluye en la dirección R. Ambas direcciones son PWM para formar una onda AC a la salida. Para conmutación fundamental cada interruptor está activado por un ciclo de trabajo de 50%.

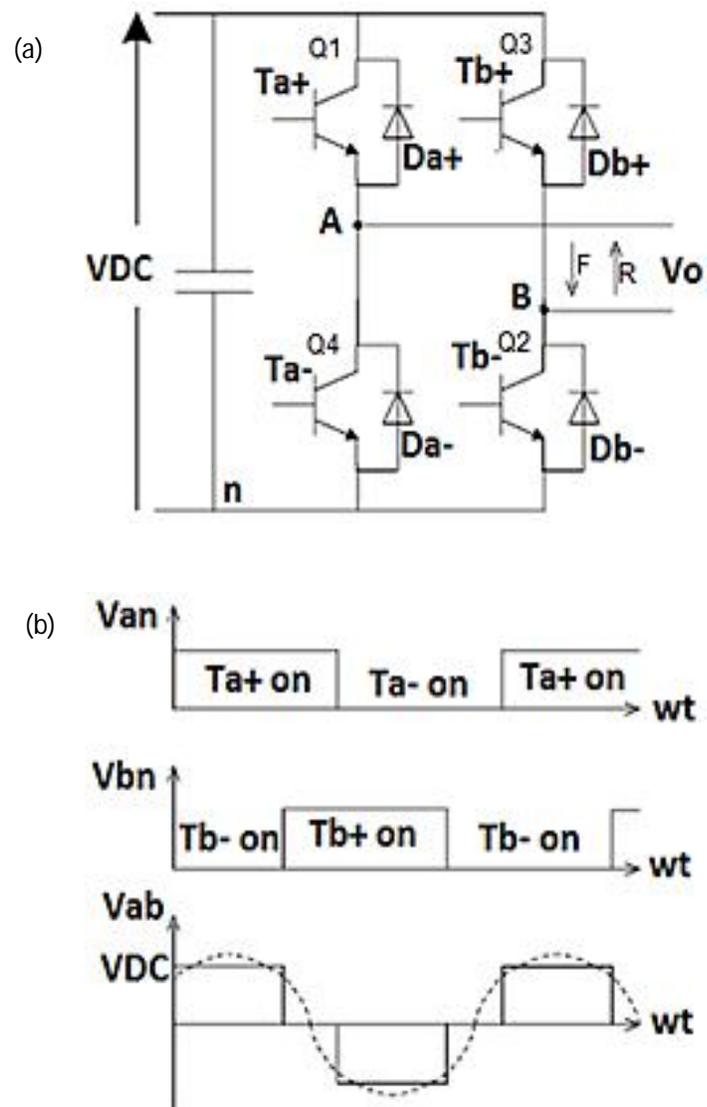


Figura 2.7. (a) Configuración y (b) disposición de conmutación de un Inversor Puentes H [5].

#### **2.6.4 CIRCUITO DE FILTRO PASIVO**

El circuito de filtrado consta de filtros pasivos que se utilizan para filtrar los armónicos de alta frecuencia introducidas por las frecuencias de trabajo del inversor, pudiendo ser colocados en el lado de alta tensión o de baja tensión de acuerdo a la conveniencia del diseño de los circuitos y algoritmos de control y del propio circuito de filtrado. Consiste en un circuito formado por inductores y capacitores llamado circuito LC, y su principal objetivo es remover los componentes de altas frecuencias en el voltaje de salida del inversor. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que los armónicos de las corrientes de la carga pueden distorsionar el voltaje de salida del filtro. El uso de grandes capacitancias incrementa la inmunidad del filtro. De esta manera a grandes capacitancias del filtro será necesario grandes corrientes reactivas quienes aumentan la tasa de potencia requerida de los interruptores del convertidor.

### **2.6.5 TRANSFORMADOR DE INYECCIÓN**

Es un transformador cuyo devanado de alta tensión es conectado en serie con la línea, mientras que el de baja tensión es conectado a la salida del filtro LC que viene del inversor. Hay que considerar que el transformador posee resistencias series en sus devanados que producen caídas de voltajes cuando se calcula el voltaje deseado de compensación.

### **2.7 METODOS DE COMPENSACIÓN CON DVR**

Los métodos de compensación por medio de un DVR dependen de varios factores limitantes tales como: Potencia del DVR, diversas condiciones de carga, y diferentes tipos de Sags de Voltaje. Algunas cargas son sensibles a los cambios de fase y otras son sensibles a los cambios en la magnitud y los demás son tolerantes a los mismos. Por lo tanto las estrategias de control dependen del tipo de características de la carga.

Hay tres métodos de compensación de tensión por medio del DVR

- Compensación Pre-SAG.
- Compensación en fase.
- Compensación sin inyección de Potencia.

### 2.7.1 COMPENSACIÓN PRE – SAG

El método de compensación pre-sag, como se muestra en la figura 2.8, rastrea la tensión de alimentación continuamente y si se detecta cualquier perturbación en la tensión de la red entonces inyectará la diferencia de tensión entre la depresión de tensión y la pre-condición falla, de modo que la tensión de carga puede ser restaurada de nuevo a la pre-condición de fallo. La compensación de los sags de tensión en las cargas sensibles se lograra mediante el método de compensación de pre-sag tanto en el ángulo de fase y amplitud. En este método, la potencia activa inyectada no puede ser controlada y se determina por las condiciones externas tales como el tipo de fallos y condiciones de carga.

$$V_{DVR} = V_{prefallo} - V_{Sag}. \quad (2.1)$$

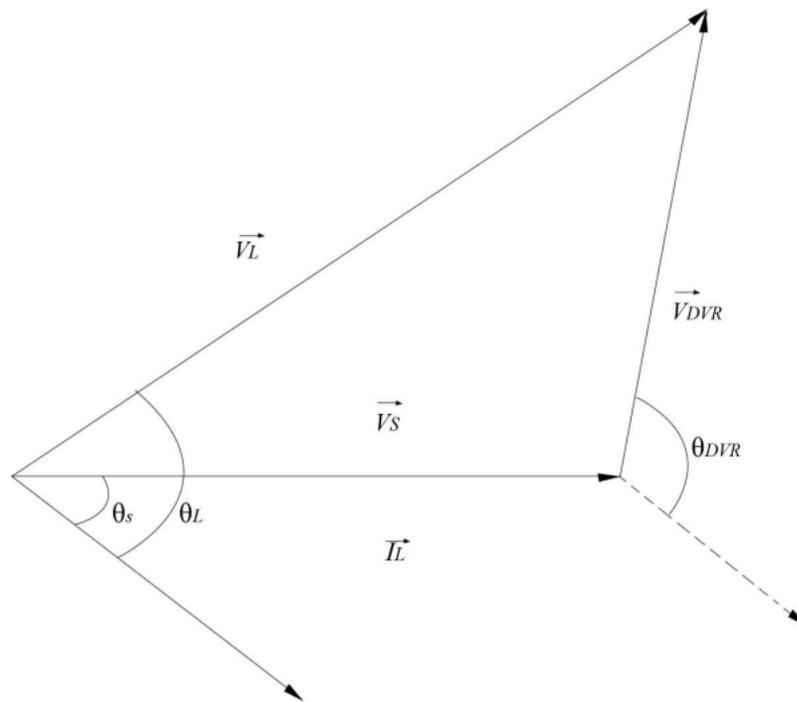


Fig. 2.8. Método de compensación pre- sag [5].

### 2.7.2 COMPENSACIÓN EN FASE

Este es el método más directo. En este método la tensión inyectada está en fase con la tensión de la red, independientemente de la corriente de carga y del voltaje de pre-falla. Los ángulos de fase del pre-sag y la tensión de carga son diferentes, como se muestra en la figura 2.9, pero el criterio más importante para una buena calidad de energía es que la magnitud de la tensión de la carga sea constante.

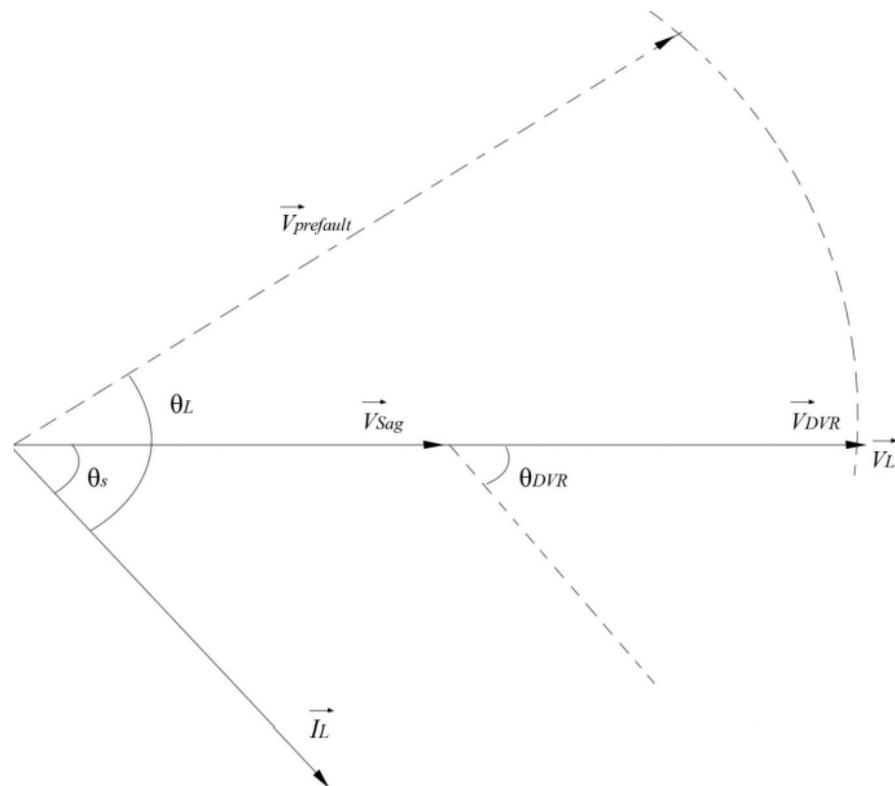


Fig. 2.9. Método de compensación en fase [5]

$$|V_L| = |V_{prefallo}|. \quad (2.2)$$

Una de las ventajas de este método es que la amplitud de la tensión de inyección del DVR es mínima para determinados Sags de voltaje en comparación con otras estrategias. La aplicación práctica de este método se encuentra en las cargas no sensibles a los cambios en los ángulos de fase.

### 2.7.3 COMPENSACIÓN SIN INYECCION DE POTENCIA

En este método la potencia real que consume el DVR se reduce al minimizar el ángulo de potencia entre el sag de tensión y la corriente de carga. En el caso del método de compensación pre-sag y compensación en fase, la potencia activa se inyecta en el sistema durante perturbaciones. La fuente de potencia activa se limita a la energía almacenada en los enlaces DC y esta parte es una de las más costosas de DVR.

La minimización de la energía inyectada se consigue haciendo cero al componente potencia activa teniendo el fasor de voltaje de inyección perpendicular al fasor de la corriente de carga.

En este método, los valores de corriente de carga y voltajes se fijan en el sistema por lo que sólo se puede cambiar la fase del sag de tensión. Este método utiliza sólo la energía reactiva y, por desgracia, no todos los Sags pueden ser mitigados, sin potencia real, como consecuencia, este método sólo es adecuado para una gama limitada de Sags de voltaje.

## **CAPITULO 3**

### **DISEÑO DEL DVR**

Este capítulo se centra en el diseño del Restaurador Dinámico de voltaje, especificando las principales condiciones de operación del DVR, la topología a utilizar, el voltaje máximo y la corriente máxima, asimismo se presenta el dimensionamiento de cada uno de los componentes que conforman el DVR los cuales son la capacitancia y la inductancia del filtro LC, el transformador de inyección, la batería y el convertidor recordando que los switches semiconductores son IGBT/Diodo modelados en Simulink.

### 3.1 ESPECIFICACIONES DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Cuando ocurre una depresión o un hinchamiento de voltaje, el DVR responde inyectando un voltaje monofásico en serie con la red de distribución inmediatamente. La fase y la magnitud del voltaje inyectado son controladas independientemente. El DVR entrega potencia activa y reactiva desde la batería hacia la carga sensible a través del transformador de inyección serie.

### 3.2 VALORES NOMINALES

#### 3.2.1 CORRIENTE

El equipo maneja corrientes de hasta 50 amperios RMS que se asume es un valor razonable límite en equipos monofásicos para propósito de simulación.

#### 3.2.2 VOLTAJE

Se podrán conectar al equipo cargas con un voltaje nominal de 220V RMS que es valor más utilizado en distribución monofásica.

El equipo corregirá sag y swells de hasta el 32% por lo que el voltaje de salida máximo del DVR será:

$$V_{dvr\ MAX} = 220 \cdot 32\% = 70.4V\ RMS. \quad (3.1)$$

### 3.3 TOPOLOGÍA

La topología del convertidor utilizado es la del inversor tipo puente H monofásico mostrado en la figura 3.1 se trata de dos de medio puente conectados para construir un inversor completo. Está construido por 4 Igbos y 4 diodos, y la potencia a suministrar proviene de una fuente de voltaje DC.

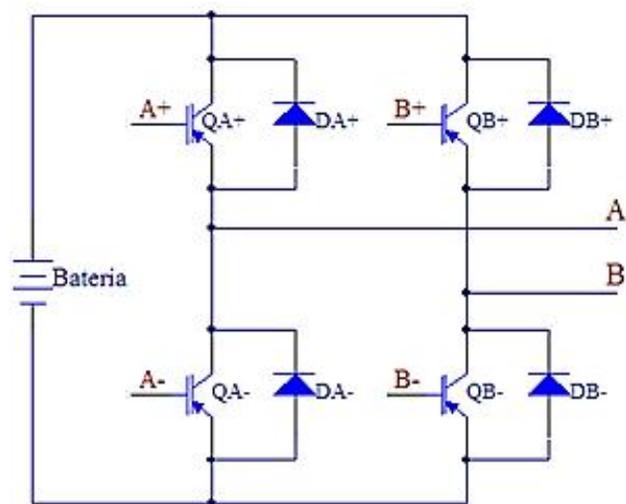


Fig. 3.1 Topología del convertidor.

Los IGBT y diodos deben soportar la corriente máxima del equipo de 50 A, por lo que se ajustara su corriente máxima a 60 amperios.

### 3.4 DIMENSIONAMIENTO DE DE LA BATERIA

Por motivos de simulación se utilizará un banco de baterías con un voltaje de 100V en corriente continua.

La corriente que circulará por la batería es el pico de la corriente máxima entregada por el equipo:

$$I_{BAT} = 50 \cdot \sqrt{2} = 70.7 \text{ A.} \quad (3.2)$$

Por lo que se simulan baterías con una corriente máxima de 100 amperios.

### 3.5 DIMENSIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

El transformador de inyección utilizado tiene las características:

Como es un transformador que se usa básicamente para aislar los dos circuitos se utiliza una relación de transformación 1:1 con la cual idealmente el voltaje del primario es igual al del secundario.

Las impedancias de magnetización y de los devanados han sido despreciadas, pero deben tomarse en cuenta si es necesario implementar físicamente el proyecto. La tensión nominal de los dos devanados es de 70V RMS pero por seguridad se ajustará a 100 VRMS a 60Hz. La potencia del transformador depende del voltaje y de la corriente por lo tanto:

$$S = V \cdot I = 70.7 \cdot 50 = 3.535 \text{ KVA.} \quad (3.3)$$

Por lo que el transformador a utilizar será de 5KVA, valor que está de acuerdo con los valores normales de potencia que se manejan en equipos monofásicos.

### 3.6 DIMENSIONAMIENTO DE LA INDUCTANCIA DEL FILTRO

El voltaje del inductor como se muestra en la figura 3.4 está dado por la diferencia entre los voltajes del convertidor y el requerido en el primario del transformador.

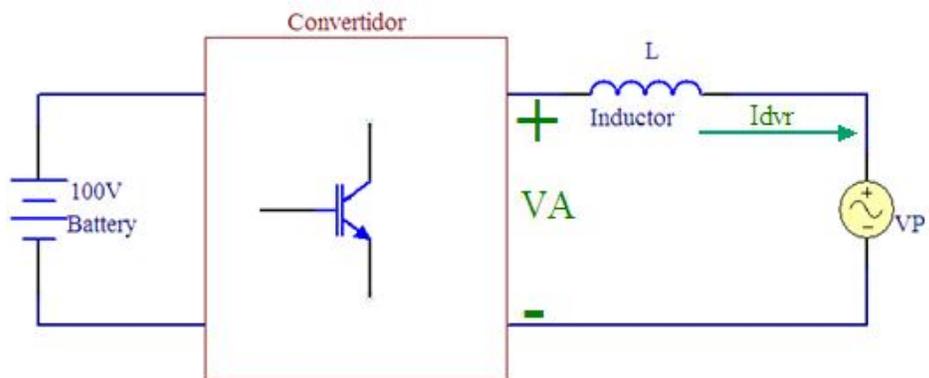


Fig. 3.2 esquema del DVR para el cálculo del voltaje del inductor.

$$V_L = V_A - V_P \quad (3.4)$$

- $L$ : Inductancia del Filtro
- $V_P$ : Voltaje aplicado al primario del transformador
- $V_A$ : Voltaje de salida del convertidor
- $V_L$ : Voltaje del inductor
- $I_{dvr}$ : Corriente del equipo que pasa a través del inductor

El inductor regulara el rizo presente en la corriente integrando el voltaje al que esté sometido. La figura 3.3 muestra el voltaje del inductor.

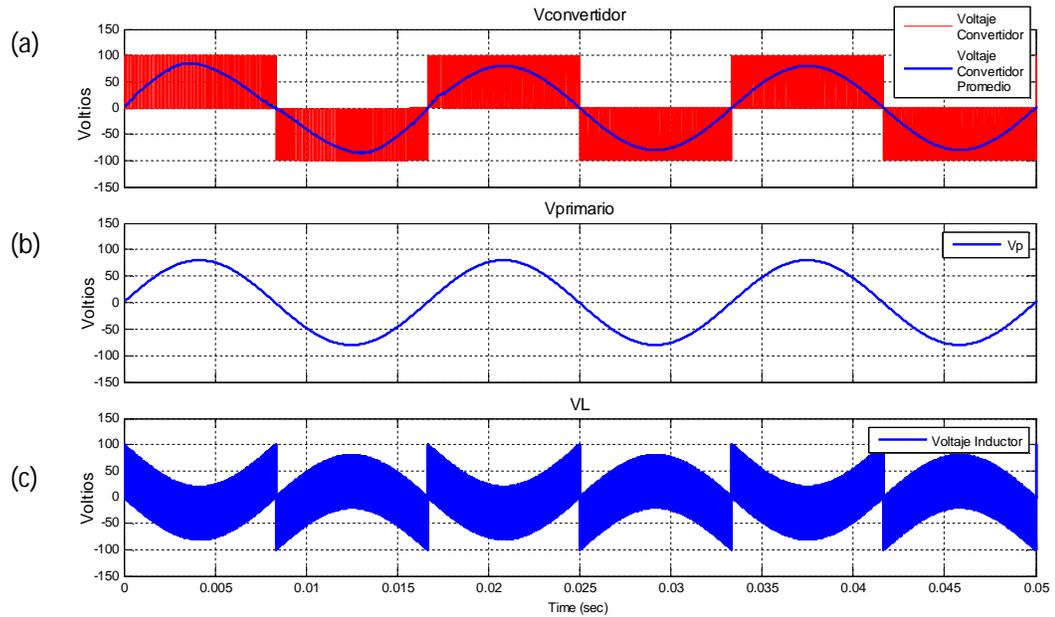


Fig. 3.3 (a) voltaje de la salida del convertidor, (b) Voltaje del primario del transformador, (c) voltaje de la inductancia del filtro.

La ecuación de voltaje del inductor en el equipo es:

$$V_L = L \frac{dI_{dvr}}{dt} , \quad (3.5)$$

Para intervalos pequeños es equivalente a:

$$V_L = L \frac{\Delta I_{dvr}}{\Delta t} , \quad (3.6)$$

Y al despejar el inductor  $L$  se obtiene:

$$L = \frac{V_L \cdot \Delta t}{\Delta I_{dvr}} . \quad (3.7)$$

$\Delta I_{dvr}$  representa el valor del rizo máximo que será tolerado. Este valor será fijado en 3% de la corriente máxima.

$V_L \cdot \Delta t$  representa el área bajo la curva de la señal  $V_L$  versus tiempo. Por lo que se puede integrar este voltaje para obtener el pico de área:

$$V_L \cdot \Delta t = \int V_L \cdot dt. \quad (3.8)$$

Al integrar el área bajo la curva del voltaje del inductor se obtiene la figura 3.4.

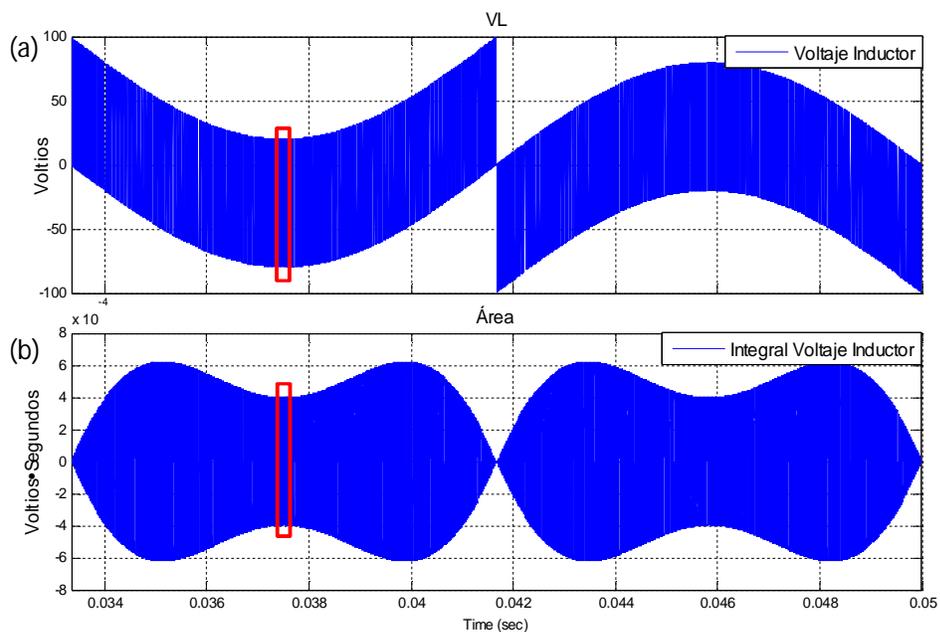


Fig. 3.4 (a) voltaje en el inductor (b) VL integrado.

La figura 3.5 muestra un acercamiento en el área encerrada de la figura 3.4.

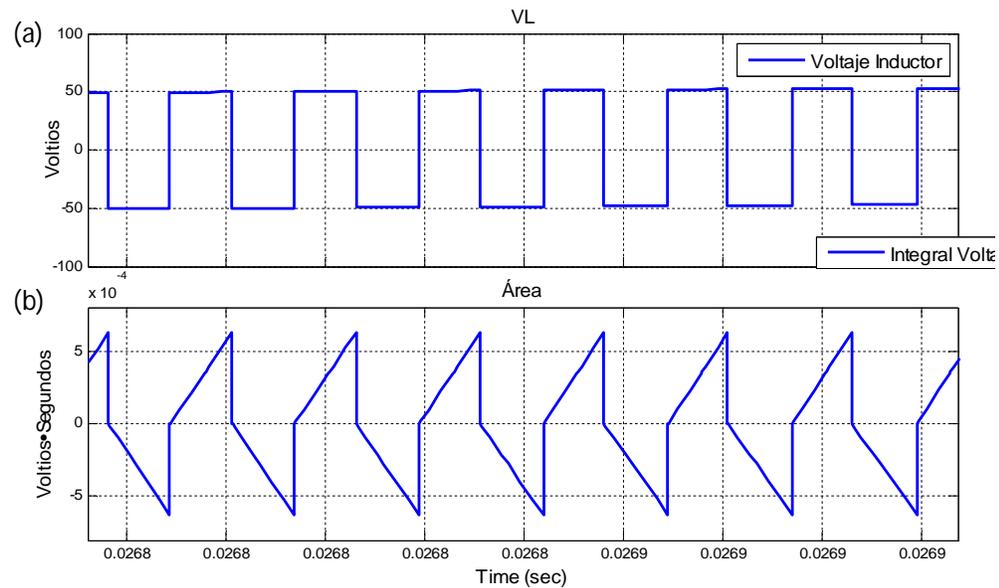


Fig. 3.5 acercamiento en el (a) voltaje en el inductor (b) VL integrado.

Por lo que la mayor área bajo la curva de la gráfica es:

$$V_L \cdot \Delta t_{MAX} = 6.25 \cdot 10^{-4} [V \cdot s]. \quad (3.9)$$

Se ajusta el valor de rizo máximo:

$$\Delta I_{dvr} = 50 \cdot \sqrt{2} \cdot 3\% = 2.12 [A], \quad (3.10)$$

Por lo que el valor de inductancia será:

$$L_{min} = \frac{V_L \cdot \Delta t_{MAX}}{\Delta I_{dvr}} = \frac{6.25 \cdot 10^{-4}}{2.12} = 0.3 \text{ mH}. \quad (3.11)$$

Para hacer que la simulación tenga unas condiciones más cercanas al mundo físico se colocará una resistencia en serie con la inductancia, para modelar un inductor más real. Esta resistencia será lo suficientemente pequeña para no cambiar las características del filtro. El valor que se elige es de:  $R_L=0.1\text{m}\Omega$ .

La figura 3.6 muestra la corriente del inductor sin carga.

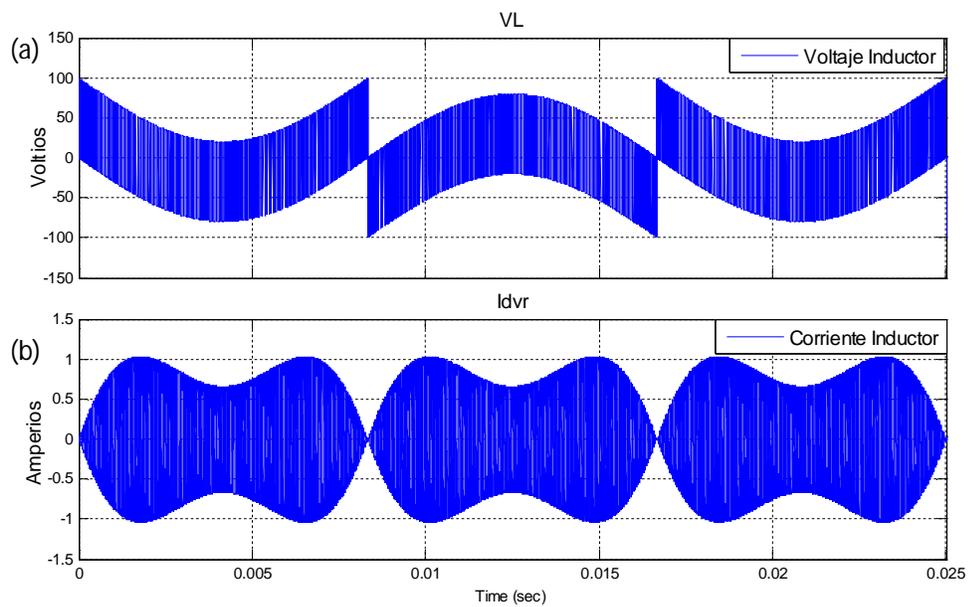


Fig. 3.6. (a) Voltaje del inductor, (b) corriente del inductor sin carga.

En la figura 3.7 se observa la corriente del DVR a plena carga donde se puede observar el pequeño rizo presente.

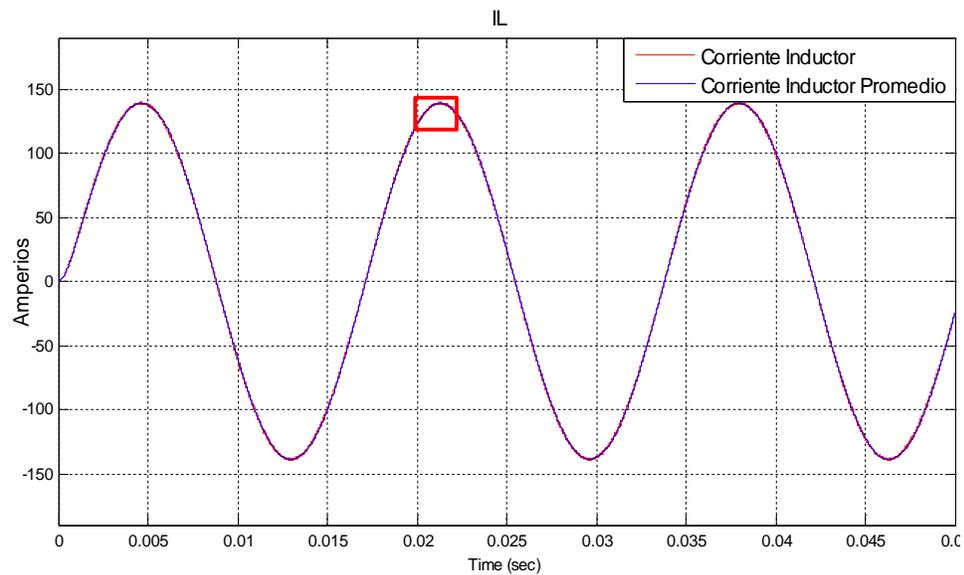


Fig. 3.7. Corriente del DVR a plena carga.

La figura 3.8 es un acercamiento del área encerrada de rojo en la figura 3.7.

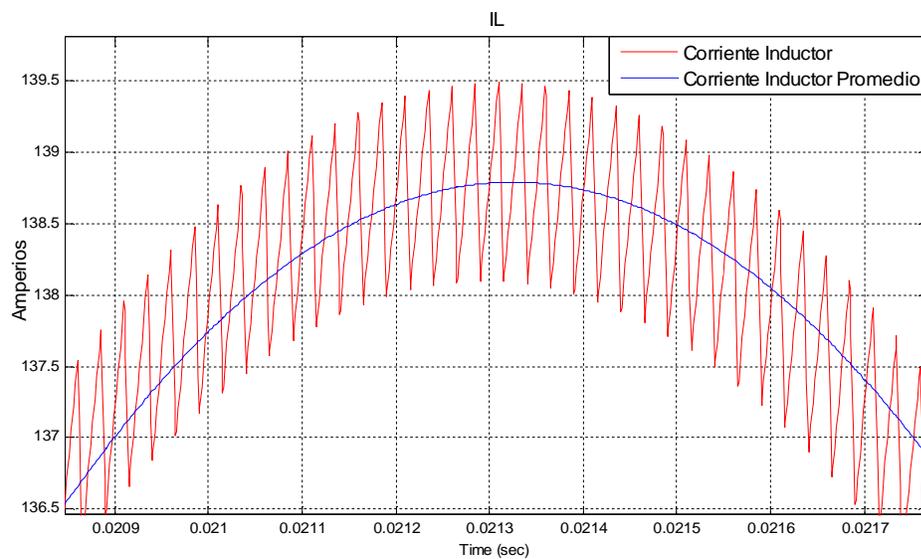


Fig. 3.8. Acercamiento en la corriente del DVR a plena carga.

### 3.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA CAPACITANCIA DEL FILTRO

La corriente del capacitor está dada por la diferencia entre la corriente que circula por el secundario del transformador y la corriente que circula por la carga. En la figura 3.9 se muestra el esquemático del circuito del cual se obtendrá las corrientes para el cálculo del capacitor.

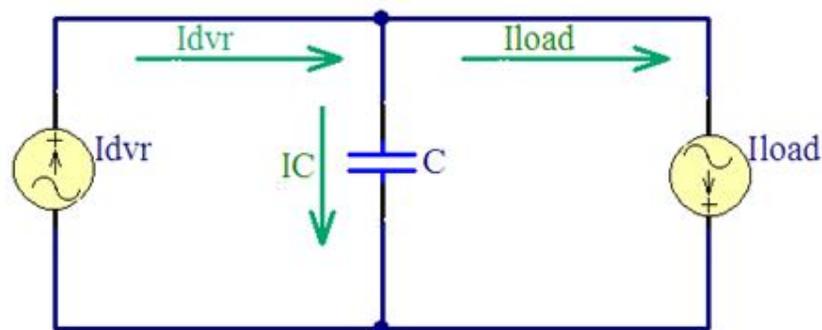


Fig. 3.9. Esquemático del DVR para el cálculo del capacitor.

$C$ : Capacitancia del Filtro.

$I_{sec}$ : Corriente del Devanado Secundario del Transformador.

$I_{Load}$ : Corriente de la Carga.

$I_C$ : Corriente del Capacitor.

$V_{dvr}$ : Voltaje de Salida del Equipo.

$$I_C = I_{Load} - I_{sec}. \quad (3.12)$$

El capacitor regulará el rizo presente en el voltaje integrando la corriente que absorbe. Al graficar la corriente del capacitor se obtiene la figura 3.10.

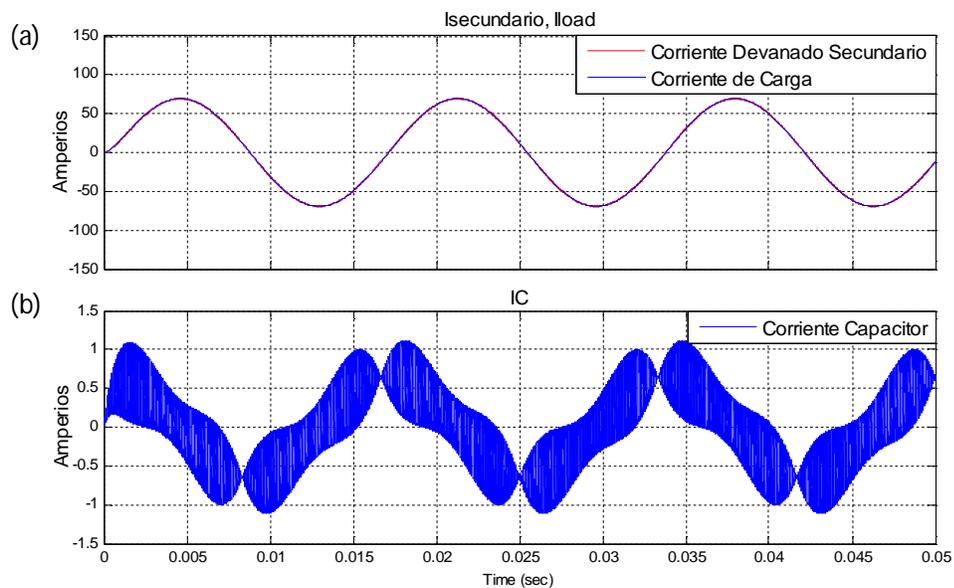


Fig. 3.10. (a) corriente de la carga, (b) corriente del capacitor.

La ecuación de corriente del capacitor en el equipo es:

$$I_C = C \frac{dV_{dvr}}{dt}, \quad (3.13)$$

Para intervalos pequeños es equivalente se tiene:

$$I_C = C \frac{\Delta V_{dvr}}{\Delta t}, \quad (3.14)$$

Y al despejar el capacitor  $C$  se obtiene:

$$C = \frac{I_C \cdot \Delta t}{\Delta V_{dvr}}. \quad (3.15)$$

$\Delta V_{dvr}$  representa el valor del rizo máximo que será tolerado. Como este es un equipo de corrección de voltaje el valor del rizo es muy importante. Este valor será fijado en 0.5% del voltaje máximo de salida del equipo.

$I_C \cdot \Delta t$  representa el área bajo la curva de la señal  $I_C$  versus tiempo. Por lo que se puede integrar esta corriente para obtener el pico de área:

$$I_C \cdot \Delta t = \int I_C \cdot dt. \quad (3.16)$$

Al integrar el voltaje del inductor se obtiene la figura 3.11, y al hacerle un acercamiento al área encerrada en la figura 3.11 se obtiene la figura 3.12.

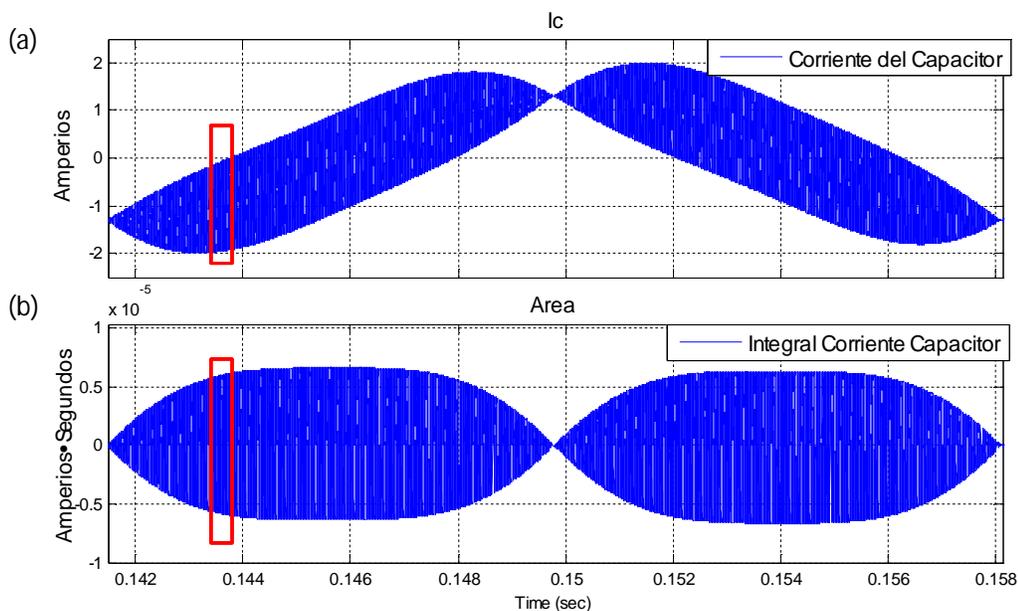


Fig. 3.11. (a) Corriente del capacitor, (b) integral de la corriente del capacitor.

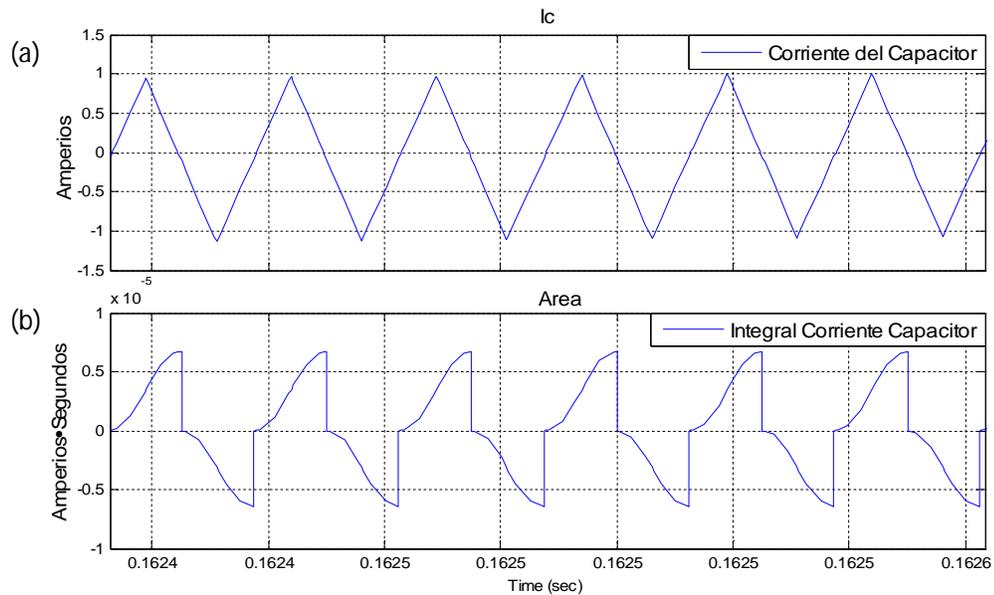


Fig. 3.12. (a) acercamiento en el área encerrada en la corriente del capacitor, (b) integral de la corriente del capacitor.

Por lo que la mayor área bajo la curva de la gráfica es:

$$I_C \cdot \Delta t_{MAX} = 6.7 \cdot 10^{-6} [A \cdot s]. \quad (3.17)$$

Se ajusta el valor de rizo máximo de:

$$\Delta V_{dvr} = 100 \cdot 0.5\% = 0.5 [V], \quad (3.18)$$

Y por lo que el valor de capacitancia mínima será

$$C_{min} = \frac{I_C \cdot \Delta t_{MAX}}{\Delta V_{dvr}} = \frac{6.7 \cdot 10^{-6}}{0.5} = 13.5 \mu F. \quad (3.19)$$

Para hacer que la simulación tenga unas condiciones más cercanas al mundo físico se colocará una resistencia en serie con el capacitor, para modelar un componente más real. Esta resistencia es lo suficiente pequeña para no cambiar las características del filtro  $RL=0.1\Omega$ .

En la figura 3.13 se grafica el voltaje del capacitor y en la figura 3.14 se muestra un acercamiento en el área encerrada de rojo.

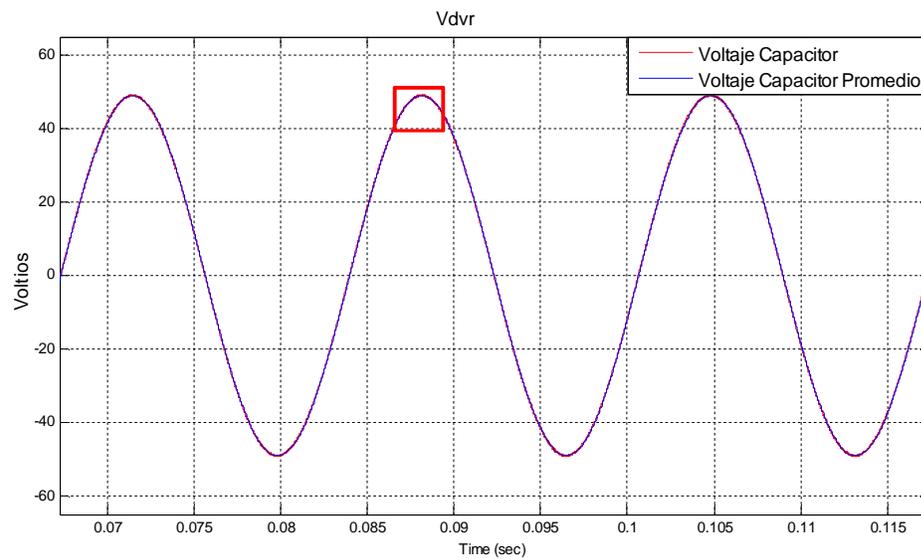


Fig. 3.13 voltaje del capacitor.

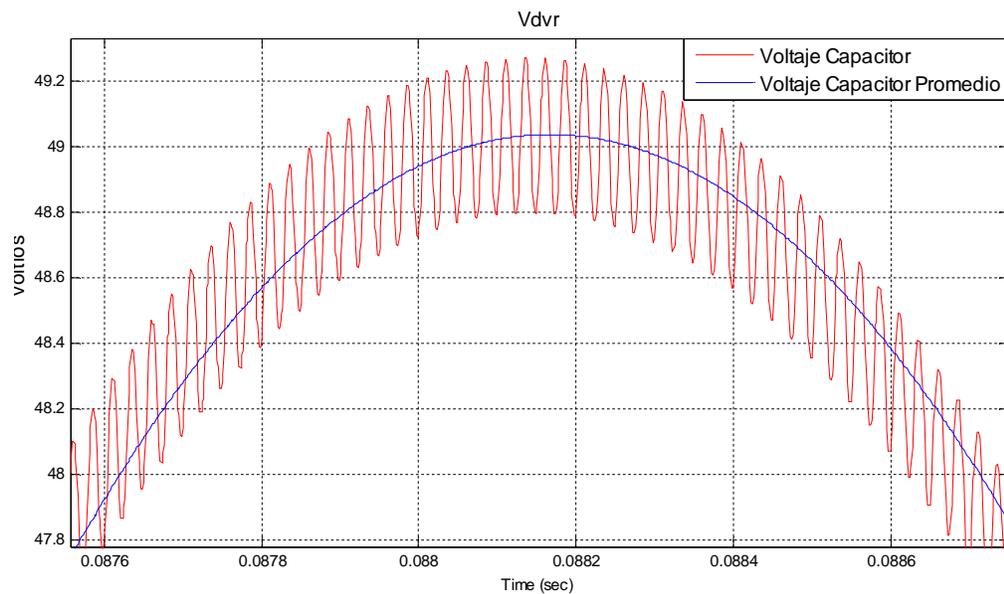


Fig. 3.14 acercamiento en el Voltaje del capacitor.

### 3.8 RESONANCIA DEL CIRCUITO

Para evitar el mal diseño del controlador y así evitar un mal funcionamiento del equipo se debe tener en cuenta donde se encuentra la frecuencia de resonancia.

$f_{res}$ : Frecuencia de Resonancia del filtro.

$n$ : Relación de vueltas del transformador.

$L$ : Inductancia del filtro.

$C$ : Capacitancia del filtro.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{n^2 \cdot L \cdot C}} = 2500 \text{ Hz.} \quad (3.20)$$

Al graficar la función de transferencia del filtro en un diagrama de bode como se muestra en la figura 3.15 se puede comprobar la ubicación de la frecuencia de resonancia.

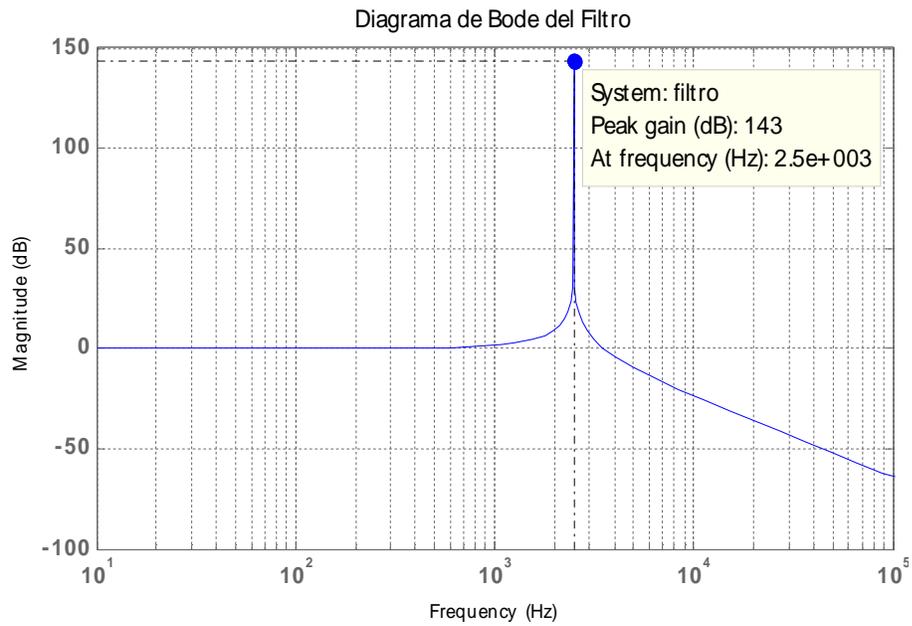


Fig. 3.15. Diagrama de Bode del controlador.

Agregando al inductor y al capacitor las pequeñas resistencias para hacerlos mas reales se obtiene la figura 3.16.

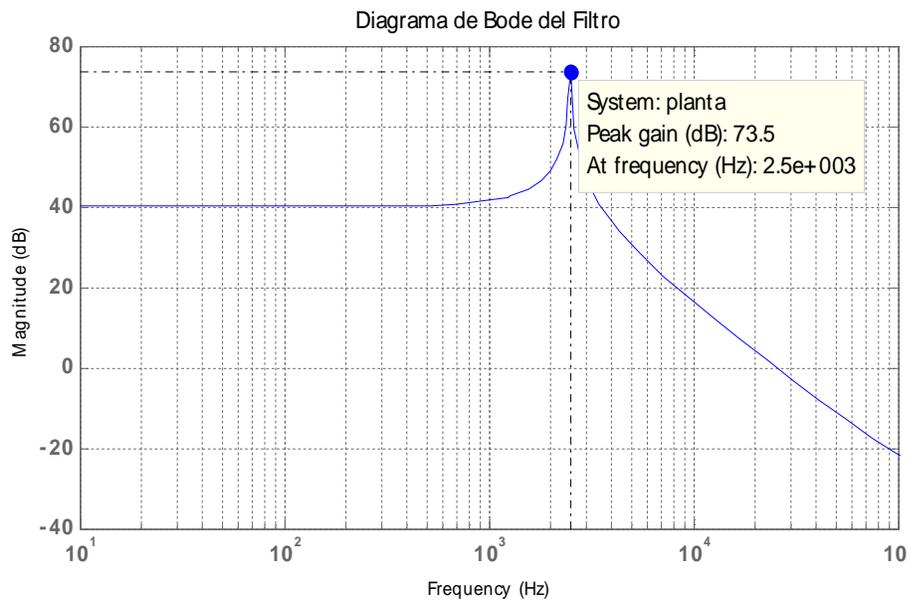


Fig. 3.16. Diagrama de Bode del controlador con los demás componentes.

### 3.9 DIMENSIONAMIENTO DE LA IMPEDANCIA DE SALIDA

El circuito original del DVR es presentado en la figura 3.17.

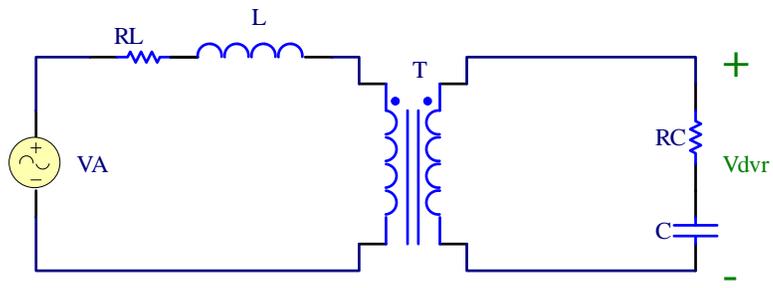


Fig. 3.17 circuito del DVR.

Como el transformador es casi ideal, por practicidad se tiene el siguiente circuito de la figura 3.18.

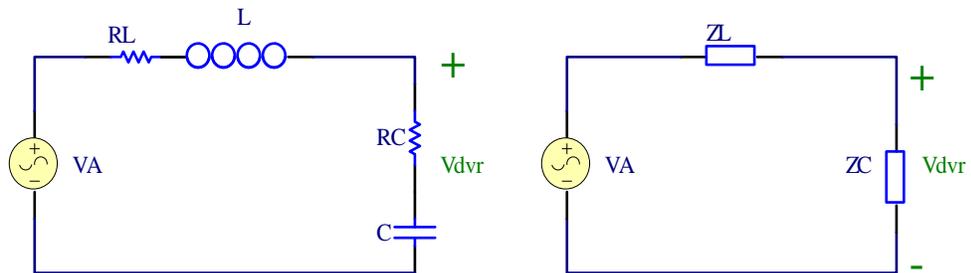


Fig. 3.18 circuito del transformador ideal en el DVR.

Se aplica el teorema de Thevenin para reducir el circuito y se obtiene el circuito de la figura 3.19.

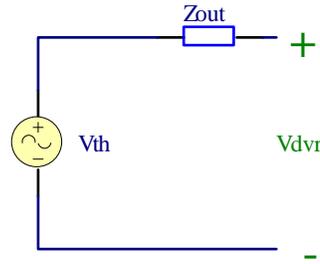


Fig. 3.19 circuito del DVR reducido con el teorema de Thevenin.

Se aplica divisor de tensión para hallar el voltaje Thevenin:

$$V_{th} = V_A \left( \frac{Z_C}{Z_L + Z_C} \right) = V_A \left( \frac{\frac{-j}{\omega C} + R_C}{j\omega L + R_L - \frac{j}{\omega C} + R_C} \right) \quad (3.21)$$

$$V_{th} = V_A \left( \frac{Z_C}{Z_L + Z_C} \right) \quad (3.22)$$

$$V_{th} = V_A \left[ \left( \frac{R_C(R_L + R_C) - \frac{1}{\omega C} \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + (R_L + R_C)^2} \right) - j \left( \frac{\left( \frac{R_L + R_C}{\omega C} \right) + R_C \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + (R_L + R_C)^2} \right) \right] \quad (3.23)$$

$$V_{th} = V_A [1.0005 - j8.028 \cdot 10^{-7}] = V_A [1.0005 \angle -4.59 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ] \quad (3.24)$$

$$Z_{th} = Z_C \parallel Z_L \quad (3.25)$$

$$Z_{th} = \frac{\left( \frac{-j}{\omega C} + R_C \right) (j\omega L + R_L)}{\frac{-j}{\omega C} + R_C + j\omega L + R_L} \quad (3.26)$$

$$Z_{th} = \left[ \frac{R_C^2 R_L + R_C R_L^2 + R_C \omega L^2 + \frac{R_L}{\omega^2 C^2}}{\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + (R_C + R_L)^2} \right] + j \left[ \frac{R_C^2 \omega L - \frac{R_L}{\omega C} - \frac{\omega L^2}{C} + \frac{L}{\omega C^2}}{\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + (R_C + R_L)^2} \right] \quad (3.27)$$

$$Z_{th} = 1.001 \cdot 10^{-4} + j0.113 = 0.113 \angle 89.94^\circ \quad (3.28)$$

En la figura 3.20 se observa el circuito equivalente del DVR con la impedancia de salida conectado a la red y a la carga.

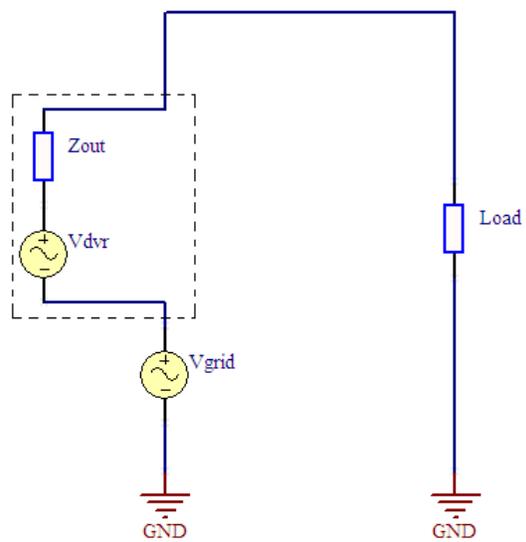


Fig. 3.20 Topología del DVR conectado a la red y a la carga.

## **CAPITULO 4**

### **DISEÑO DEL CONTROL**

Este capítulo se centra en el diseño del controlador. Primero se realiza el cálculo de los parámetros para encontrar los valores de las constantes del controlador proporcional-integral. Luego se diseñan los controladores de corriente y de voltaje a partir de sus respectivas funciones de transferencia.

## 4.1 ESTRATEGIA DE CONTROL

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques del DVR, Se utilizaran dos controladores en cascada para que además del control de la tensión de salida se tenga una protección de sobrecorriente en el lazo interno.

La figura 4.1 muestra el diagrama un diagrama de bloques de la planta donde se observan los dos lazos que se utilizarán, un lazo interno de corriente y un lazo externo de voltaje.

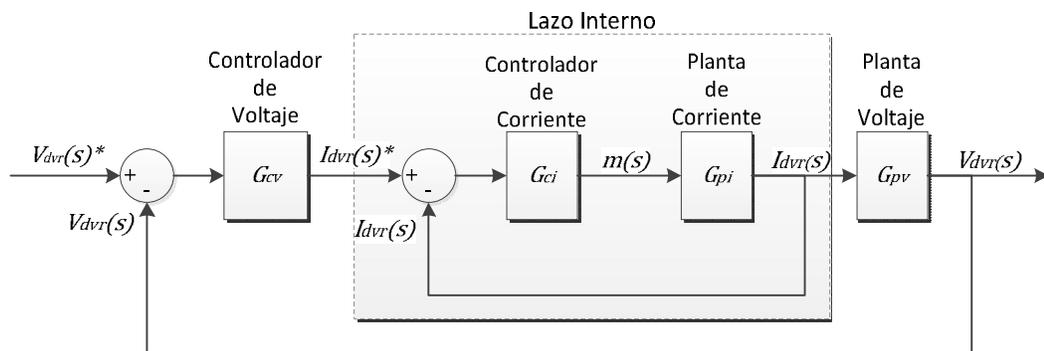


Fig. 4.1 Diagrama de bloques del control del DVR.

Se desea que las frecuencias de cruce de cada los controladores estén separadas una década entre ellas y además estén separadas otra década de la frecuencia de conmutación, para evitar que estas frecuencias afecten el desempeño del controlador, como se puede observar en la figura 4.2.

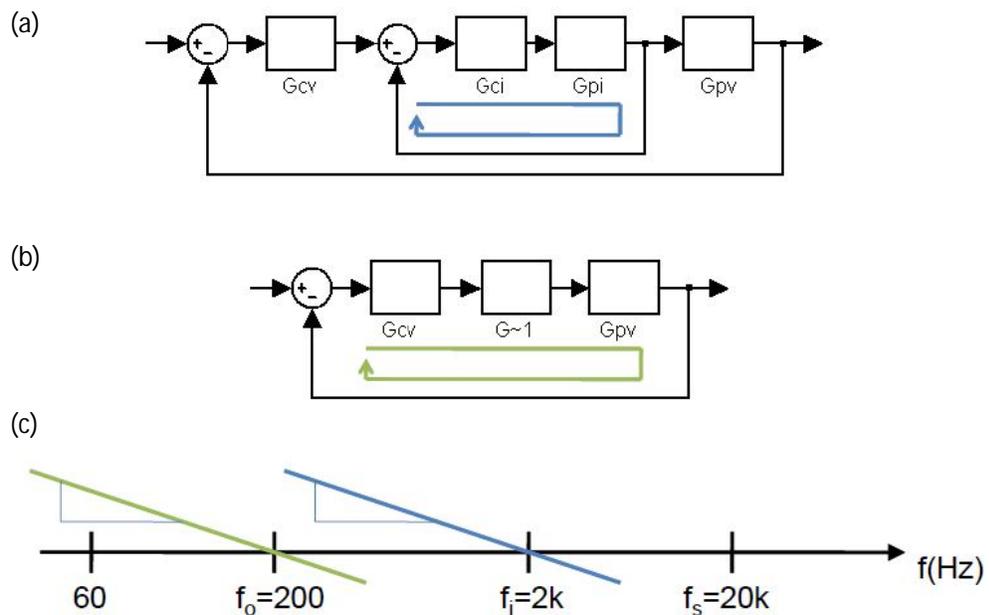


Fig. 4.2 (a) Diagrama de bloques original, (b) diagrama de bloques reducido, (c) frecuencias de conmutación.

El método que se va a utilizar será el de controlador “K-factor” disponible en la teoría básica de control.

Para el control en cascada se debe obtener dos funciones de transferencia independientes debido a lo cual primero se obtendrá la de corriente y luego la de voltaje.

## 4.2 PLANTEO DE ECUACIONES

Para obtener las funciones de transferencia de las plantas necesarias para calcular los dos controladores, se ha planteado las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del sistema.

En la figura 4.3 se puede observar el circuito esquemático del DVR operando en lazo abierto.

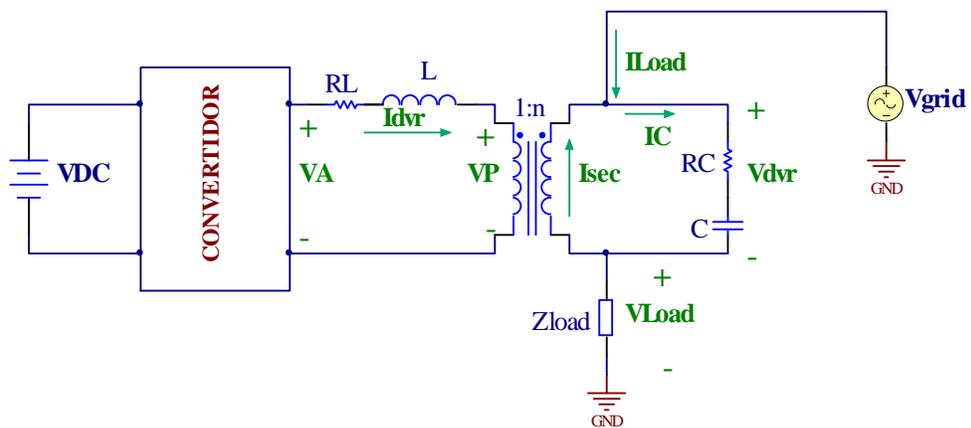


Fig. 4.3 Esquemático del DVR operando en lazo abierto.

- $V_{DC}$ : Voltaje de la Batería.
- $V_A$ : Voltaje de salida del convertidor.
- $V_{dvr}$ : Voltaje en el secundario del transformador y en el capacitor.
- $V_{grid}$ : Voltaje de la red.
- $V_{Load}$ : Voltaje presente en la carga.
- $V_L$ : Voltaje en los Terminales del Filtro inductivo.
- $V_P$ : Voltaje en el primario del transformador.
- $I_{dvr}$ : Corriente del Restaurador dinámico de Voltaje.

- $I_{Load}$ : Corriente de la Carga que es igual a la de la red.
- $I_C$ : Corriente que es absorbida por el capacitor.
- $I_{sec}$ : Corriente en el secundario del transformador.
- $L$ : Inductancia del filtro inductivo.
- $R_L$ : Resistencia presente en los devanados del filtro inductivo.
- $C$ : Capacitancia del filtro capacitivo.
- $R_C$ : Resistencia Equivalente serie del filtro capacitivo.
- $n$ : Relación de numero de vueltas del Transformador.

Las ecuaciones en el dominio del tiempo son:

$$V_A = m \cdot V_{DC} \quad (4.1)$$

$$V_A - V_P = V_L \quad (4.2)$$

$$V_{dvr} = n \cdot V_P \quad (4.3)$$

$$V_A - \frac{V_{dvr}}{n} = V_L \quad (4.4)$$

$$I_{sec} + I_{Load} = I_C \quad (4.5)$$

$$I_{dvr} = n \cdot I_{sec} \quad (4.6)$$

$$\frac{I_{dvr}}{n} + I_{Load} = I_C \quad (4.7)$$

$$V_L = L \frac{dI_{dvr}}{dt} + R_L \cdot I_{dvr} \quad (4.8)$$

$$V_{dvr} = \frac{1}{C} \int_0^t I_C \cdot dt + R_C \cdot I_C \quad (4.9)$$

Aplicando la transformada de Laplace se obtienen las ecuaciones en el dominio de la frecuencia:

$$V_A(s) = m(s) \cdot V_{DC} \quad (4.10)$$

$$V_A(s) - \frac{V_{dvr}(s)}{n} = V_L(s) \quad (4.11)$$

$$\frac{I_{dvr}(s)}{n} + I_{Load}(s) = I_C(s) \quad (4.12)$$

$$V_L(s) = (sL + R_L) \cdot I_{dvr} \quad (4.13)$$

$$V_{dvr}(s) = \left( \frac{1}{sC} + R_C \right) \cdot I_C \quad (4.14)$$

Con estas ecuaciones se puede elaborar diagramas de control para obtener las funciones de Transferencia que se necesitan para el diseño del controlador del DVR.

### 4.3 DISEÑO DE CONTROLADOR PARA LAZO DE CORRIENTE

#### 4.3.1 OBTENCION DE FUNCION DE TRANSFERENCIA

La figura 4.4 muestra el diagrama de bloques del lazo de corriente.

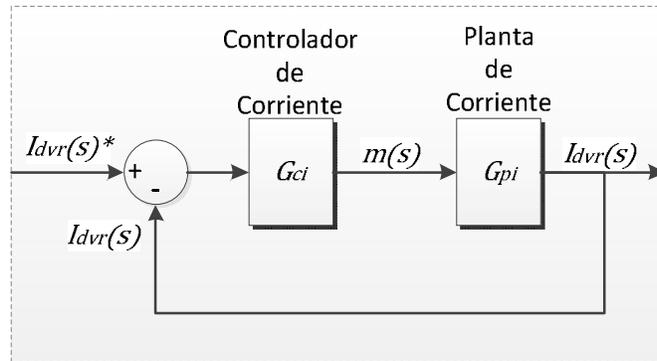


Fig. 4.4. Diagrama de bloques del lazo de corriente.

La planta de corriente de la figura 4.5 es la relación entre la corriente de salida del equipo  $I_{dvr}$  y el ciclo de trabajo que recibe el convertidor  $m$ .

$$G_{pi}(s) = \frac{I_{dvr}(s)}{m(s)} \quad (4.15)$$

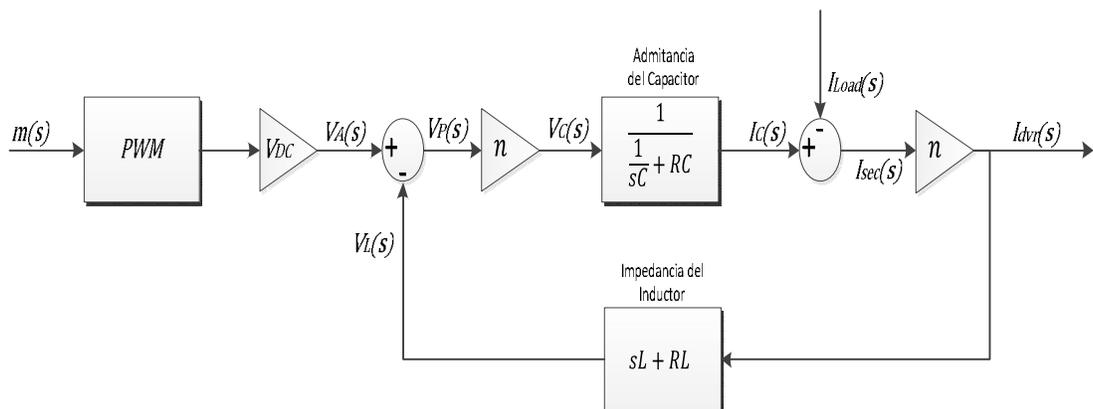


Fig. 4.5. Diagrama de bloques de la planta de corriente.

La función de transferencia de corriente es:

$$G_{pi}(s) = \frac{s \cdot VDC \cdot C}{s^2 \cdot L \cdot C + s(C \cdot RL + C \cdot RC) + 1} \quad (4.16)$$

#### 4.3.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR DE CORRIENTE

Para el diseño del controlador se utilizara la técnica de K-factor, ya presenta un mejor decaimiento en frecuencia mayores a la de cruce por lo que es optimo en circuitos de conmutación.

El tipo de controlador que se puede obtener es:

<p><b>Tipo I</b></p> $G_c(s) = \frac{K_c}{s}$	<p><b>Tipo II</b></p> $G_c(s) = \frac{K_c \left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)}$ <p><math>\omega_z &lt; \omega_p</math></p>	<p><b>Tipo III</b></p> $G_c(s) = \frac{K_c \left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)^2}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)^2}$ <p><math>\omega_z &lt; \omega_p</math></p>
---	---	--

Para la elección del controlador se debe determinar el margen de fase y la frecuencia de cruce.

Como este controlador funciona como una protección tendrá un ancho de banda de una década menos que la frecuencia de conmutación, lo que le dará la suficiente rapidez para reaccionar ante las perturbaciones.

Para el margen de fase se ha escogido 60 grados que proporcionan un overshoot y tiempo de estabilización aceptables.

**BW:** Ancho de Banda = 2kHz.

**PM:** Margen de Fase = 60°.

Por lo tanto la frecuencia de corte estará a 2kHz.

$$\omega_c = 2\pi f_c = 12566.37 \left[ \frac{rad}{seg} \right]. \quad (4.17)$$

$f_c$ : Frecuencia de cruce.

$\omega_c$ : Frecuencia angular de cruce.

$G_{sys}$ : Magnitud de la ganancia de la planta en lazo abierto a la frecuencia de cruce.

$\varphi_{sys}$ : Fase de la ganancia de la planta en lazo abierto a la frecuencia de cruce.

Luego se debe obtener la magnitud y la fase de la planta en la frecuencia de cruce.

La figura 4.6 muestra el diagrama de bode de la función de transferencia de la planta en lazo abierto.

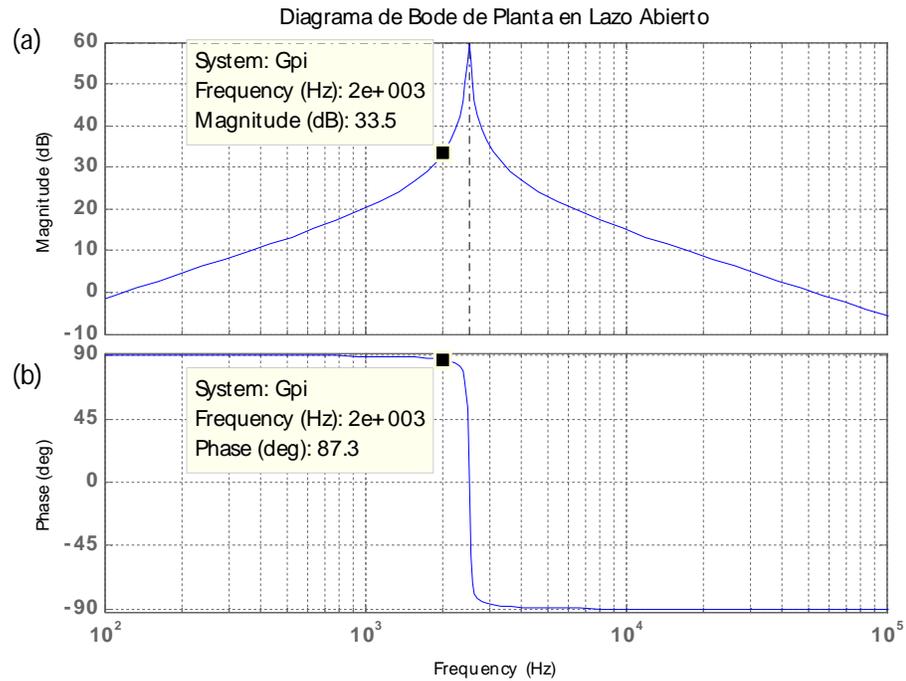


Fig. 4.6. diagrama de bode de la función de transferencia de la planta en lazo abierto (a) magnitud, (b) fase.

$$G_{sys} = 33.5 \text{ dB} = 47.5 \quad (4.18)$$

$$\varphi_{sys} = 87.3^\circ \quad (4.19)$$

Todos los controladores tienen un integrador que introduce un retraso de 90 grados. Debemos calcular el ángulo necesario para elevar la fase que es modificada por los demás polos y ceros.

$\varphi_{boost}$ : Angulo elevador de fase

$$\phi_{boost} = PM - \phi_{sys} - 90^\circ \quad (4.20)$$

$$\phi_{boost} = -117.3^\circ \quad (4.21)$$

La elección de tipo de controlador se realiza según el criterio de la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Criterio para elegir el tipo de controlador según el  $\phi_{boost}$ .

$\phi_{boost}$ REQUERIDO	TIPO DE CONTROLADOR
$0^\circ$	TIPO I
$<90^\circ$	TIPO II
$>90^\circ$	TIPO III

Por lo tanto el controlador es de TIPO I que tiene la siguiente forma:

$$G_{ci} = \frac{K_c}{s}, \quad (4.22)$$

Es decir una constante y un integrador.

El único parámetro a calcular es la constante  $K_c$  para lo cual se debe graficar la función de transferencia en lazo abierto con el integrador y obtener su magnitud. Para esto se utilizará el diagrama de Bode de la planta y el integrador de la figura 4.7.

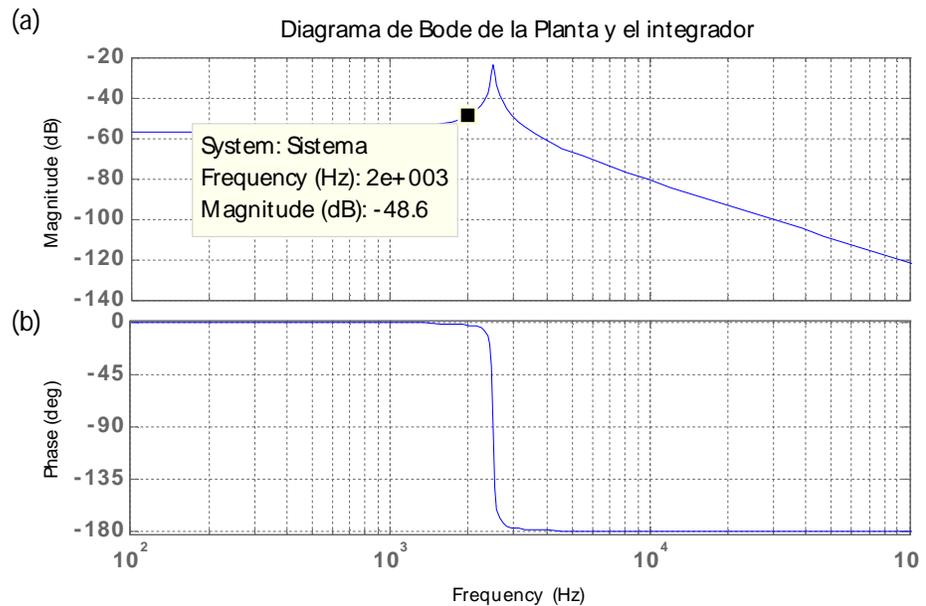


Fig. 4.7. diagrama de Bode de la planta y el integrador. (a) magnitud, (b) fase.

$$G_{sys} = -48.6 \text{ dB} = 3.7153 \cdot 10^{-3}. \quad (4.23)$$

La constante del controlador será el inverso de esta magnitud para agregarle todos los decibeles necesarios para a la frecuencia de cruce la magnitud tenga un valor de cero.

Por lo tanto el controlador será:

$$K_c = \frac{1}{G_{sys}} = 269.15, \quad (4.24)$$

Y el controlador del lazo de corriente será:

$$G_{ci} = \frac{269.15}{s}. \quad (4.25)$$

La respuesta de la planta en lazo cerrado de corriente se muestra en la figura 4.8.

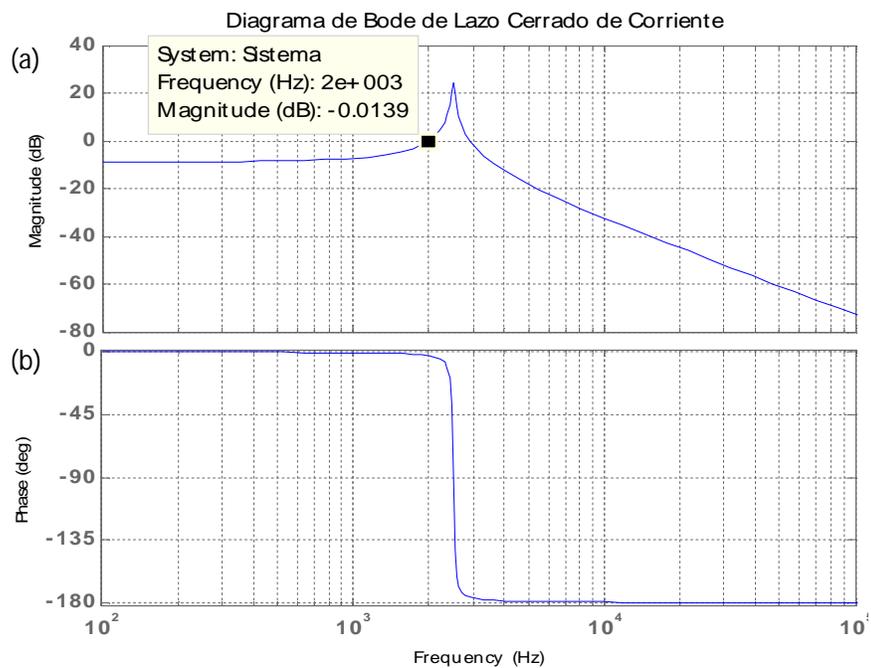


Fig. 4.8. diagrama de Bode de lazo cerrado de corriente. (a) magnitud, (b) fase.

La figura 4.9 muestra la respuesta del lazo interno de corriente a una señal de referencia sinusoidal de 60 Hz; en la figura 4.10 se observa la respuesta de la planta a un escalón en la señal de referencia. Y la figura 4.11 muestra la respuesta de la planta de corriente a un escalón de carga.

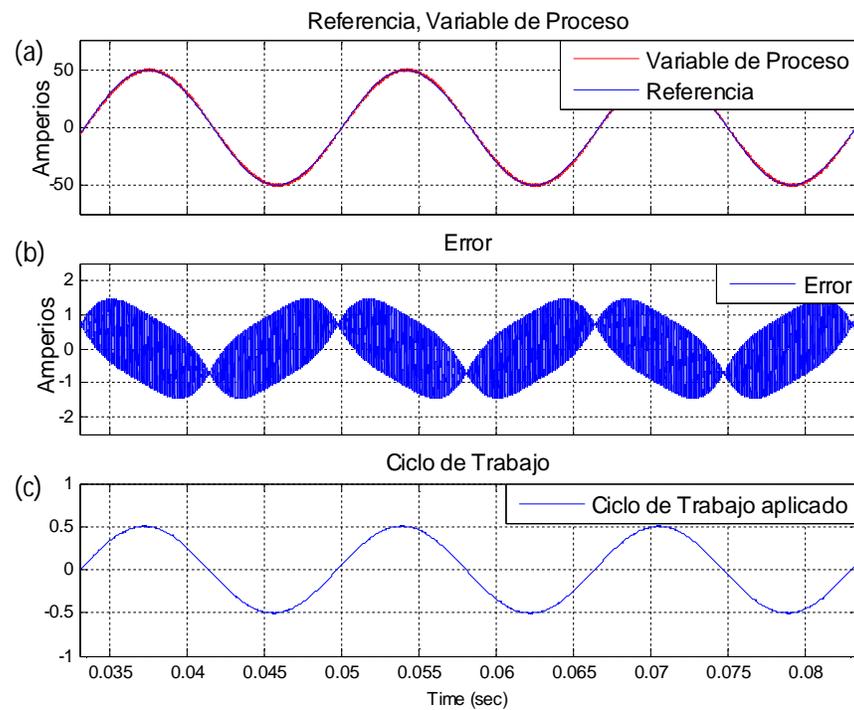


Fig. 4.9. (a) referencia sinusoidal de 60 Hz, (b) error, (c) respuesta del lazo interno de corriente a una señal de referencia sinusoidal.

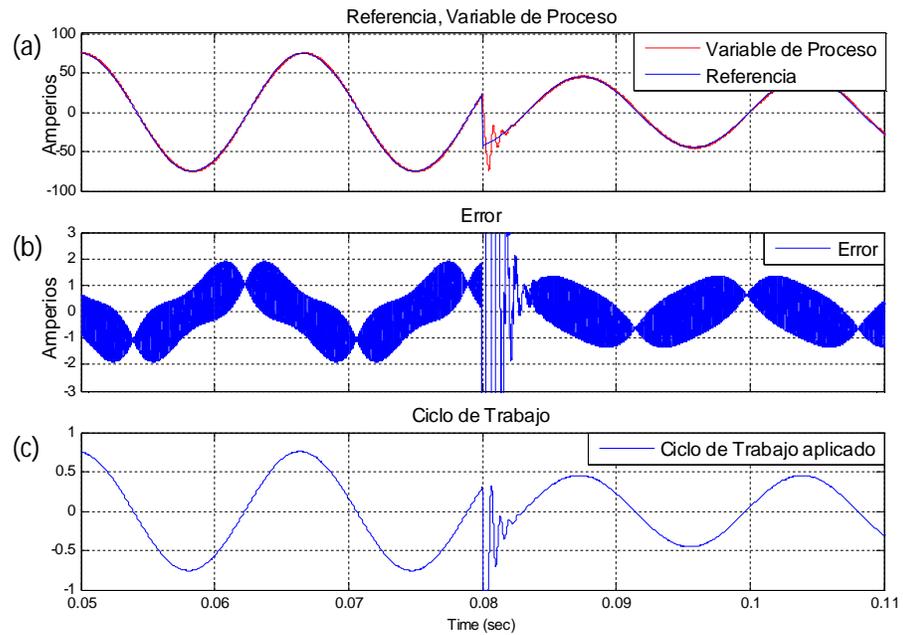


Fig. 4.10. (a) referencia sinusoidal de 60 Hz, (b) error, (c) respuesta de la planta a un escalón en la señal de referencia.

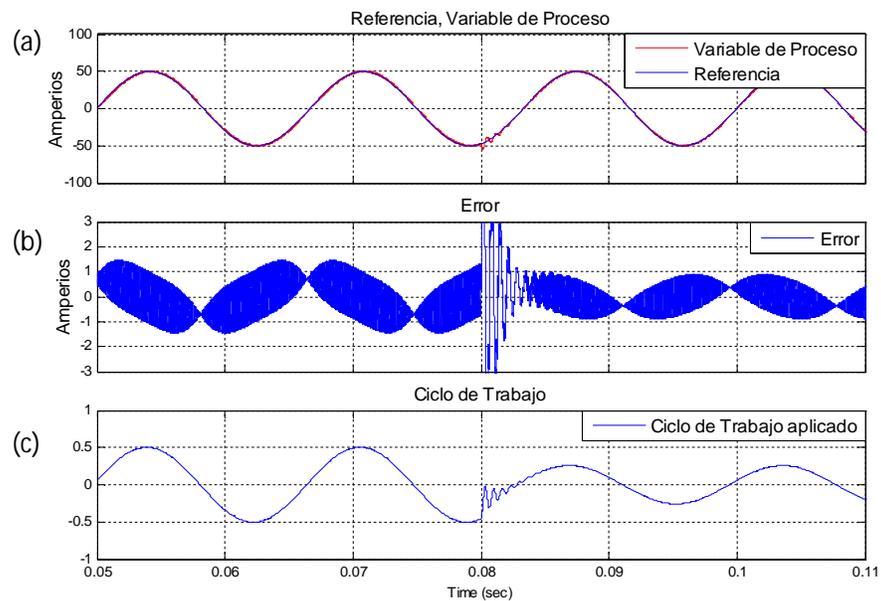


Fig. 4.11. (a) referencia sinusoidal de 60 Hz, (b) error, (c) respuesta de la planta de corriente a un escalón de carga.

## 4.4 DISEÑO DE CONTROLADOR PARA LAZO DE VOLTAJE

### 4.4.1 OBTENCION DE FUNCION DE TRANSFERENCIA

La figura 4.12 muestra el diagrama de bloques del lazo de voltaje. Para el cálculo del controlador de voltaje se asume que lazo interno de corriente es igual a uno, es decir, la señal de entrada es igual a la de salida.

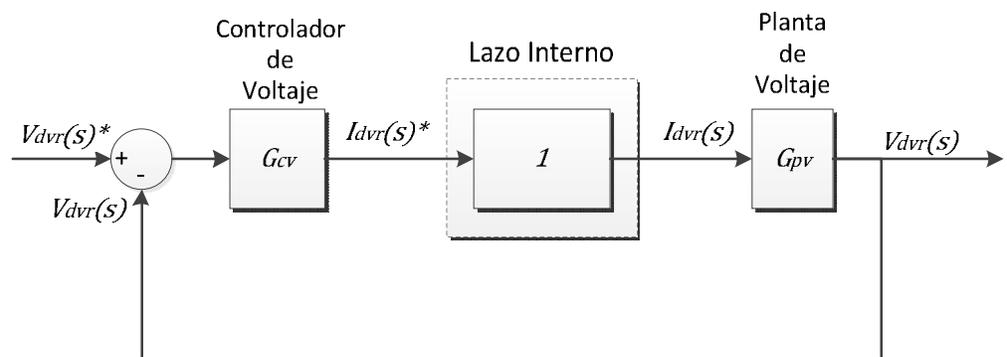


Fig. 4.12. Lazo de voltaje.

La planta de voltaje de la figura 4.13 es la relación entre el voltaje de salida del equipo  $V_{dvr}$  y la corriente de la salida del equipo  $I_{dvr}$ .

$$G_{pv}(s) = \frac{V_{dvr}(s)}{I_{dvr}(s)} . \quad (4.26)$$

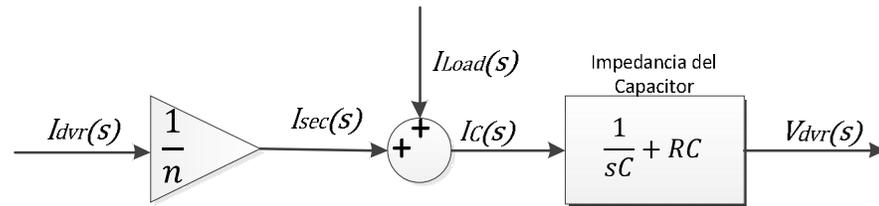


Fig. 4.13. Diagrama de bloques de la planta de voltaje.

La función de transferencia de la planta de voltaje es:

$$G_{pv}(s) = \frac{s \cdot C \cdot R_C + 1}{s \cdot n \cdot C}. \quad (4.27)$$

#### 4.4.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE

Para el controlador de voltaje no se pudo hacer uso de la técnica K-factor debido al escaso ancho de banda del que se dispone. Por lo tanto se utilizó la herramienta Sisotool de Matlab para crear el controlador manualmente. Primero el software grafica el diagrama de bode de la planta en lazo abierto mostrado en la figura 4.14.

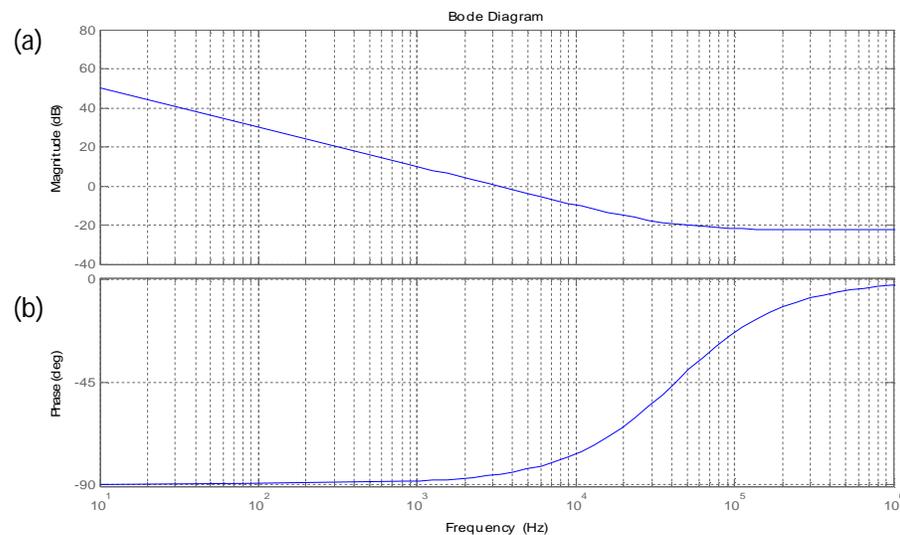


Fig. 4.14. Diagrama de Bode de la planta en lazo abierto. (a) Magnitud, (b) fase.

Después se agrega los polos y ceros requeridos para obtener la respuesta deseada.

Se agrega un polo complejo para aumentar la ganancia al máximo a la frecuencia nominal del equipo (60 Hz) mediante lo cual se obliga al controlador a seguir esta frecuencia. Luego se agregaron dos ceros reales uno en las cercanías de la frecuencia de cruce y uno en el origen para darle más estabilidad a la respuesta. Por último se ajusta la ganancia hasta hacer cruzar por cero a una frecuencia de 200 Hz y dejar un margen de fase de 54.6 grados que se observa en la figura 4.15.

El controlador del lazo de voltaje es:

$$G_{cv} = \frac{0.6(s + 500)(s + 60)}{s^2 + (120\pi)^2}. \quad (4.24)$$

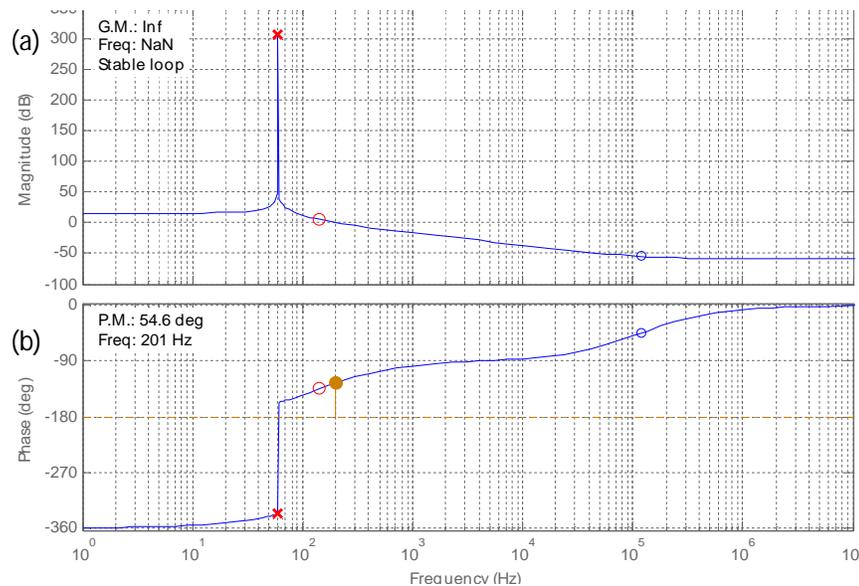


Fig. 4.15. Diagrama de Bode de la respuesta de la planta en lazo cerrado. (a) Magnitud, (b) fase.

En la figura 4.16 se observa el cálculo del compensador usando sisotool.

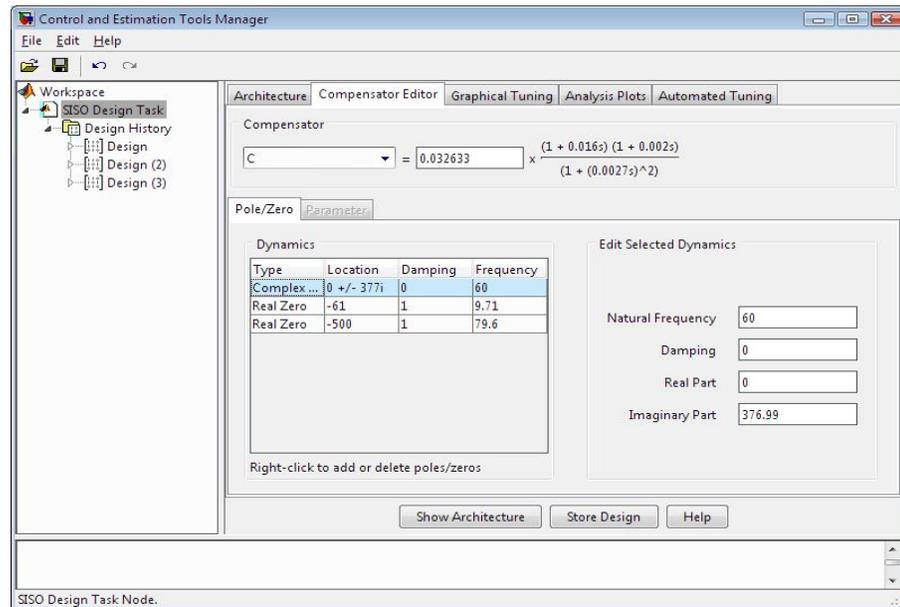


Fig. 4.16. cálculo del compensador utilizado sisotool.

En la figura 4.17 se observa la respuesta del lazo de voltaje a la señal de referencia sinusoidal. La figura 4.18 muestra la respuesta del sistema ante un escalón en la señal de referencia y la figura 4.19 muestra la respuesta de la planta de voltaje a un escalón de carga.

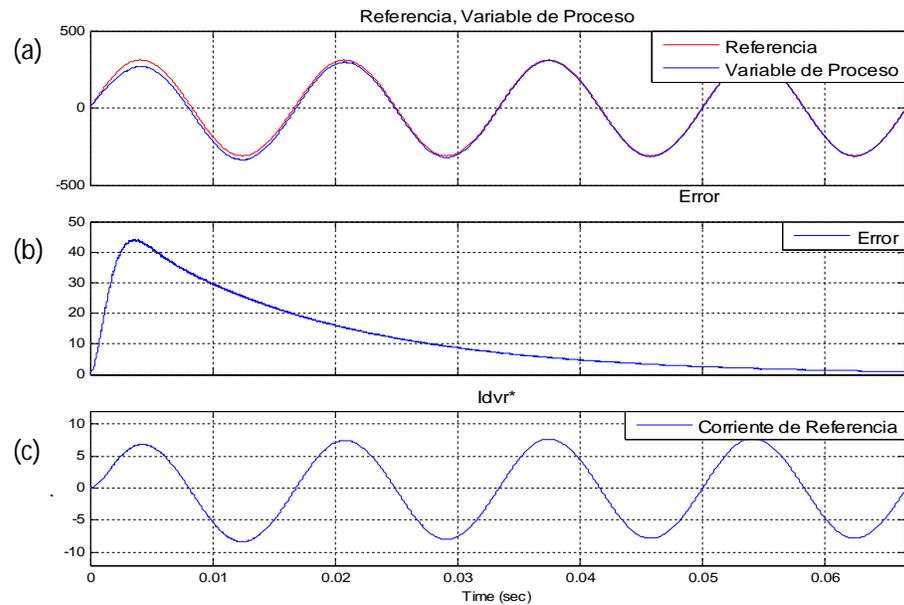


Fig. 4.17. (a) referencia sinusoidal de 60 Hz y variable del proceso, (b) error, (c) corriente de referencia.

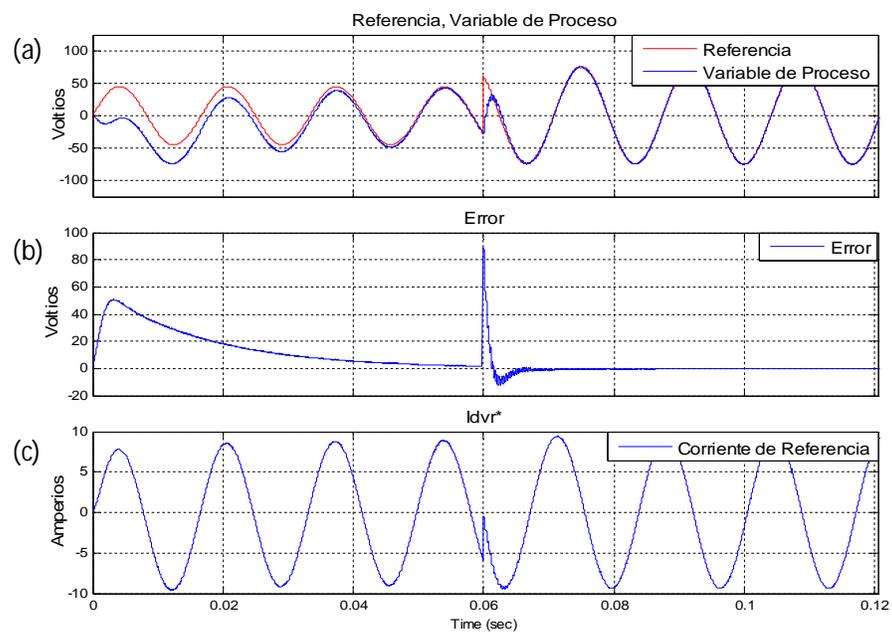


Fig. 4.18. (a) referencia sinusoidal de 60 Hz con escalón y variable de referencia, (b) error, (c) corriente de referencia.

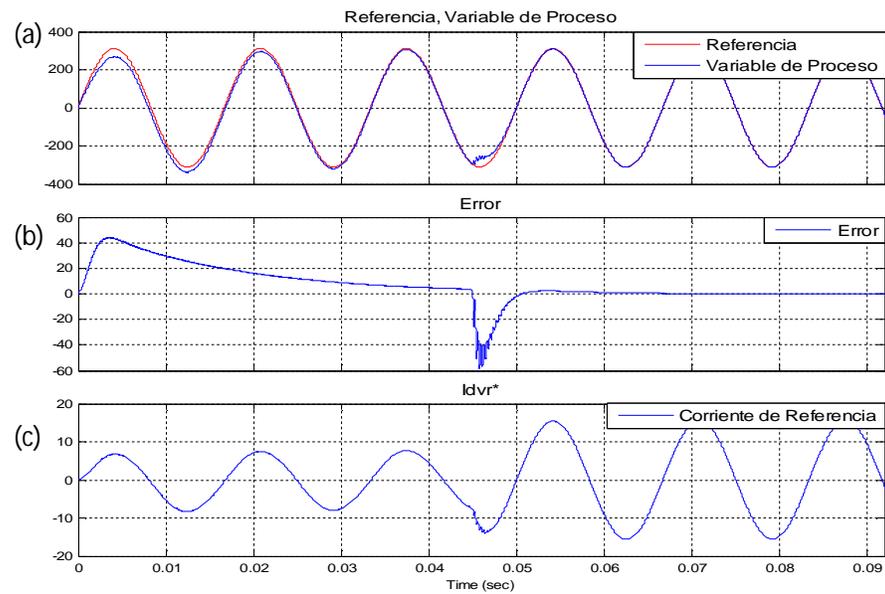


Fig. 4.19. (a) referencia sinusoidal de 60 Hz, (b) error, (c) respuesta de la planta de voltaje a un escalón de carga.

## **CAPITULO 5**

### **SIMULACIONES**

En este capítulo se presentan las simulaciones respectivas para comprobar que se hayan cumplido los objetivos del proyecto, verificando el correcto funcionamiento del DVR ante la presencia de Sags y Swells de voltaje que no solo varían su magnitud sino que también varían su fase.

La figura 5.1 muestra los fasores de voltaje antes de las perturbaciones ya sean Sags o Swells de Voltaje, se puede observar que el voltaje de la carga es igual al voltaje de la red.

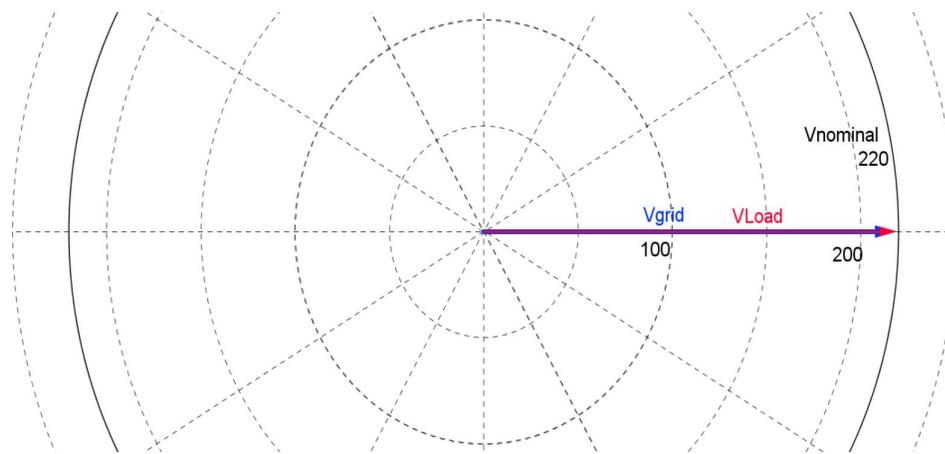


Fig. 5.1. fasores antes de las perturbaciones de la red.

## 5.1 COMPENSACIÓN PRE-SAG

### 5.1.1 SAG DEL 10% DE MAGNITUD Y CON UN DESFASE DE 10°

Para esto se retoma la figura 5.1 donde se muestran los fasores de voltaje antes del sag,

### 5.1.1.1 DURANTE EL SAG

En la figura 5.2 se observan los fasores durante el sag de 10% con un desfase de 10 grados. Durante el sag se observa que el fasor de voltaje de la red cae hasta el 90% de su magnitud nominal y además sufre un adelanto de  $10^\circ$  con respecto al fasor de que tenía antes de la perturbación.

Para compensar este problema se observa que el DVR genera un fasor de voltaje con la magnitud y fase adecuadas para que al sumarse con el fasor del voltaje de la red, arrojen como resultado el fasor de voltaje que la carga tenía antes de la perturbación.

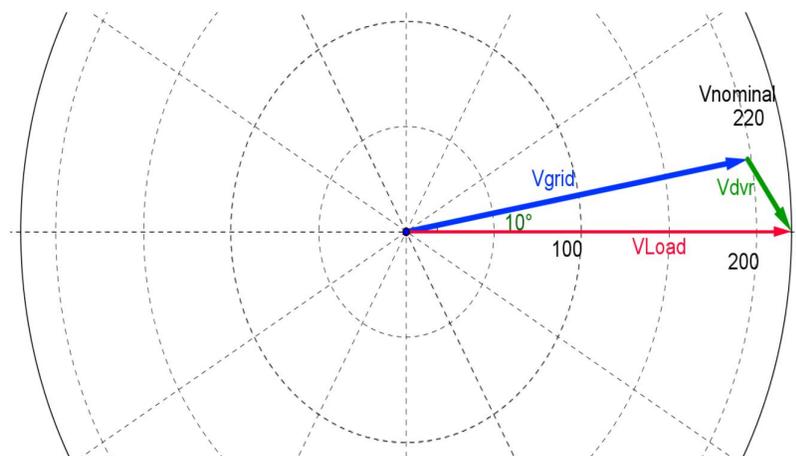


Fig. 5.2. fasores durante el sag de 10% con un desfase de 10 grados.

### 5.1.1.2 VOLTAJES

La figura 5.3 muestra la simulación de los voltajes en el tiempo. El voltaje de la red sufre una pequeña depresión del 10% y su fase se adelanta  $10^\circ$  por lo que el DVR genera una tensión que sumada al voltaje de la red, provoca que en la carga no se presente la perturbación. Como se observa en la imagen el voltaje de la carga permanece como una onda senoidal pura sin perturbaciones, mientras que en la red hubo una perturbación.

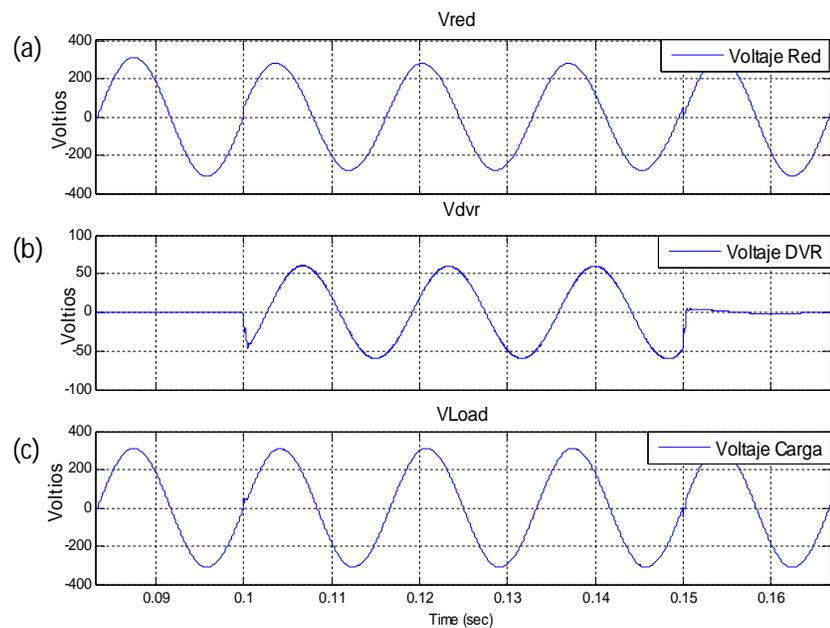


Fig. 5.3. (a) Sag en el voltaje de la red, (b) voltaje del DVR, (c) voltaje de la carga.

### 5.1.1.3 CORRIENTES

Al mantener el voltaje de la carga sin perturbaciones también está manteniendo la corriente de la carga sin perturbaciones como se observa en la figura 5.4.

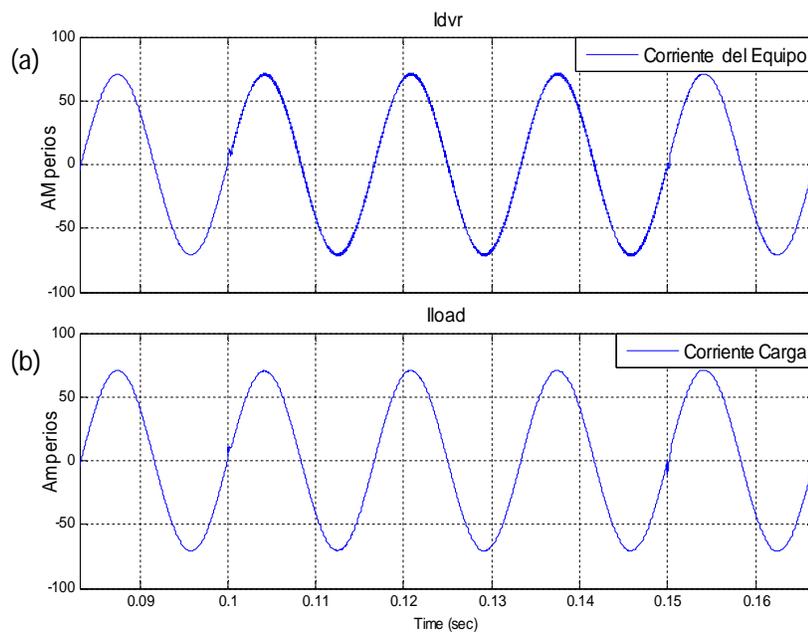


Fig. 5.4. (a) corriente del DVR, (b) Corriente en la carga.

La corriente del DVR es igual a la suma de la corriente de la carga mas la corriente del capacitor que en promedio es cero por que se observa que son tan similares.

En la figura 5.5 se puede observar la forma de onda de las corrientes de la carga, del secundario y la del capacitor durante el sag de voltaje.

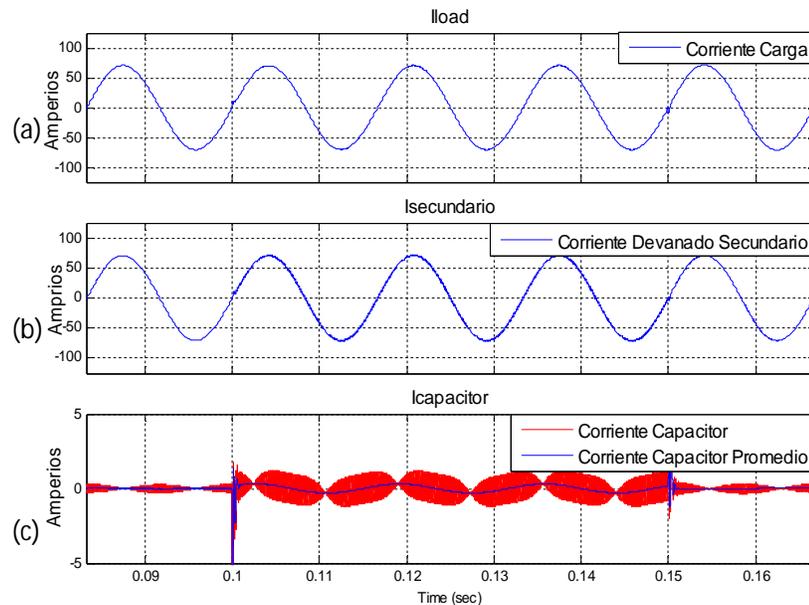


Fig. 5.5. (a) corriente de la carga, (b) Corriente en el secundario, (c) corriente en el capacitor.

En la imagen de la simulación se observa que cuando el compensador actúa el rizo de corriente aumenta el cual es absorbido por el capacitor y no se presenta en la corriente de la carga.

### 5.1.1.4 Potencias

En la figura 5.6 se observa de intercambio de potencia durante el sag de 10% en fase. El DVR inyecta una tensión que tiene una componente en fase con la corriente de la carga y otra perpendicular; debido a esto el equipo intercambia los dos tipos de potencia con la red. En este caso entrega potencia activa y consume potencia reactiva.

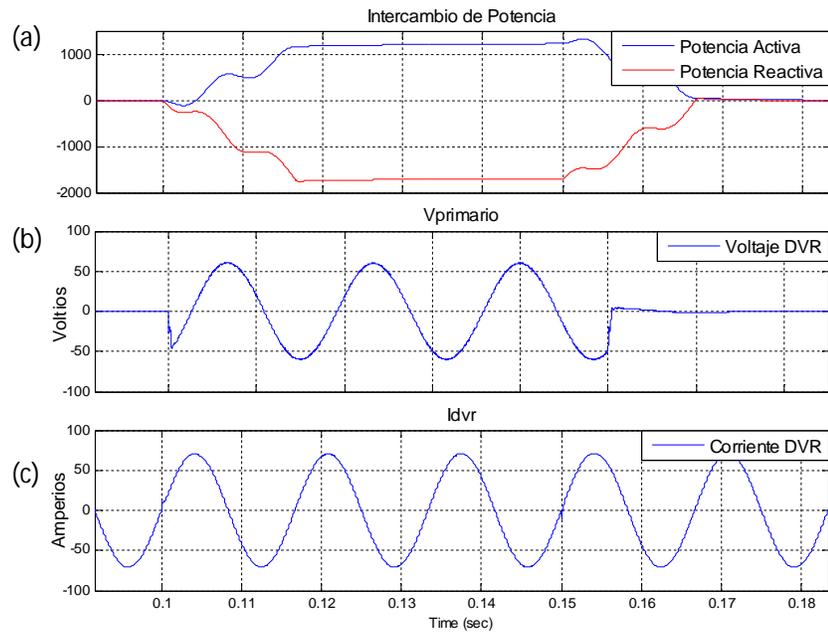


Fig. 5.6. (a) potencia reactiva y potencia activa, (b) voltaje del DVR, (c) corriente del DVR.

### 5.1.1.5 Diagramas de Tiempo de Valores RMS

En la figura 5.7 se observa la corriente RMS de la carga, los voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga en el transcurso del tiempo. Se observa que el DVR genera un voltaje con una magnitud mucho mayor a la perturbación del 10% de la red, debido a que la perturbación también tiene un desfase y la suma fasorial determina la magnitud generada por el DVR que es necesaria para compensar la perturbación. La magnitud del voltaje y corriente de la carga permanecen constantes en el tiempo.

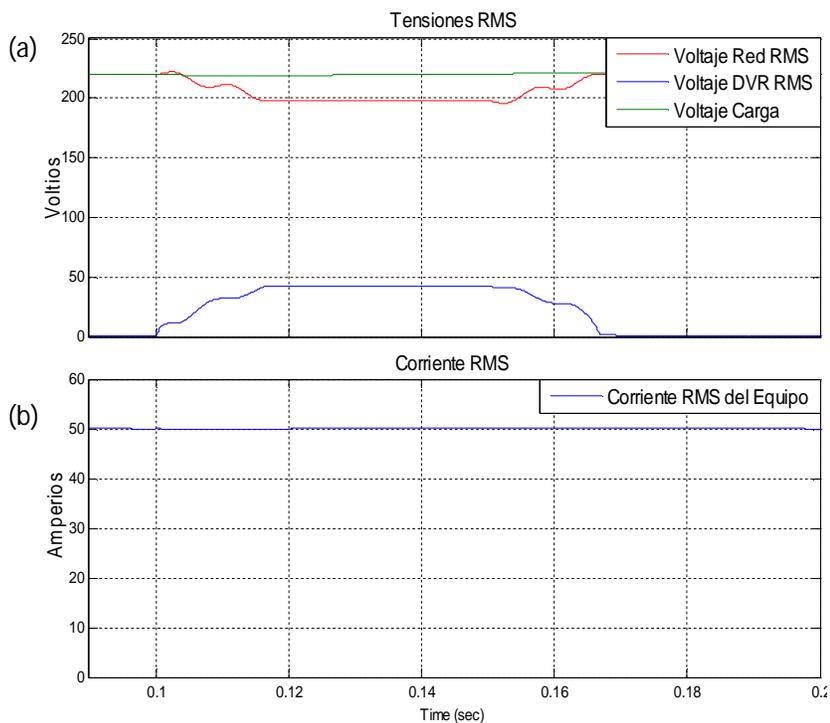


Fig. 5.7. (a) voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga, (b) Corriente RMS del DVR.

## 5.1.2 SAG VARIABLE EN EL TIEMPO, FASE CONSTANTE

En esta simulación se ha recreado una perturbación donde la magnitud del voltaje baja de durante un intervalo de tiempo, llega a un pico y vuelve a subir hasta el valor nominal.

Para esto se retoma la figura 5.1 donde se muestran los fasores de voltaje antes del sag, como se observa el voltaje de la carga es igual al voltaje de la red.

### 5.1.2.1 DURANTE EL SAG

La figura 5.8 muestra un instante de tiempo de la ubicación de los fasores en el plano durante el sag. A medida que la magnitud del sag cambia la magnitud de la tensión generada por el DVR, para mantener al fasor de voltaje de la carga constante.

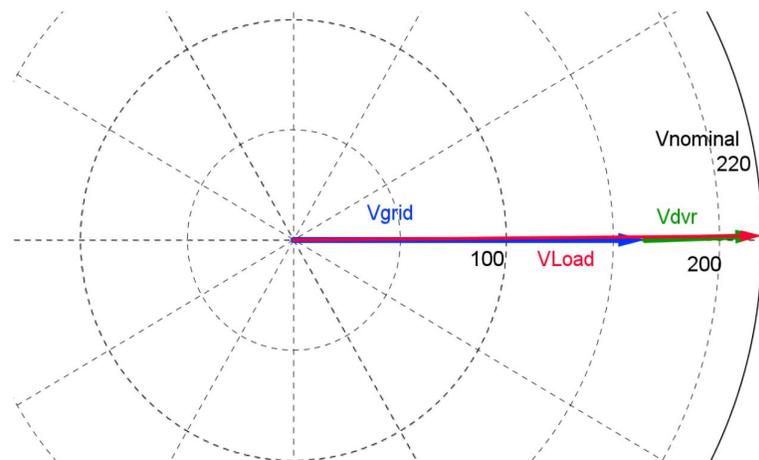


Fig. 5.8. Durante el sag variable en el tiempo con fase constante.

### 5.1.2.2 VOLTAJES

La figura 5.9 los voltajes en cuestión versus el tiempo.

El pico de voltaje de la red muestra una depresión que no es constante, el DVR actúa rápidamente ante la falla haciendo que le llegue el voltaje necesario a la carga.

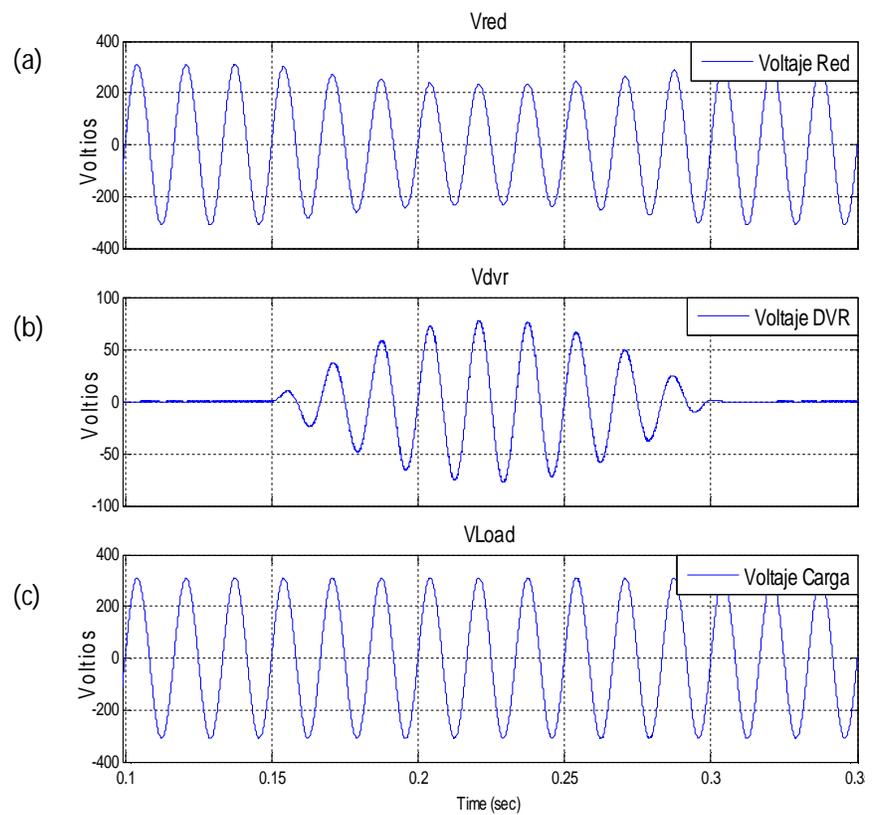


Fig. 5.9. (a) Sag en el voltaje de la red, (b) voltaje del DVR, (c) voltaje de la carga.

### 5.1.2.3 CORRIENTES

La figura 5.10 muestra que las corrientes del DVR y de la carga. Mientras el equipo está compensando el rizo de la corriente aumenta pero éste es absorbido por el capacitor por lo que se observa una corriente de carga casi senoidal pura.

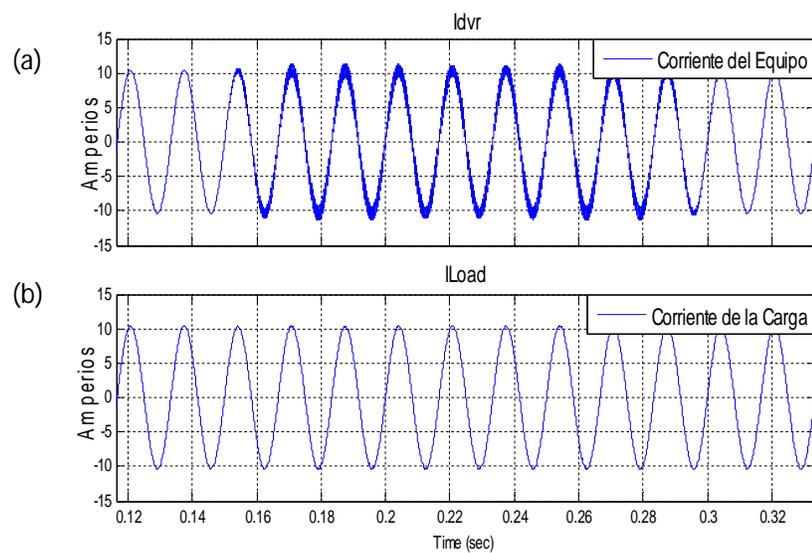


Fig. 5.10. (a) corriente del DVR, (b) Corriente en la carga.

En la figura 5.11 se puede observar la forma de onda de las corrientes de la carga, del secundario y la del capacitor durante el sag de voltaje.

La magnitud del rizo de corriente es proporcional al voltaje generado por el equipo por lo que el capacitor también absorberá una magnitud de corriente variable en el tiempo.

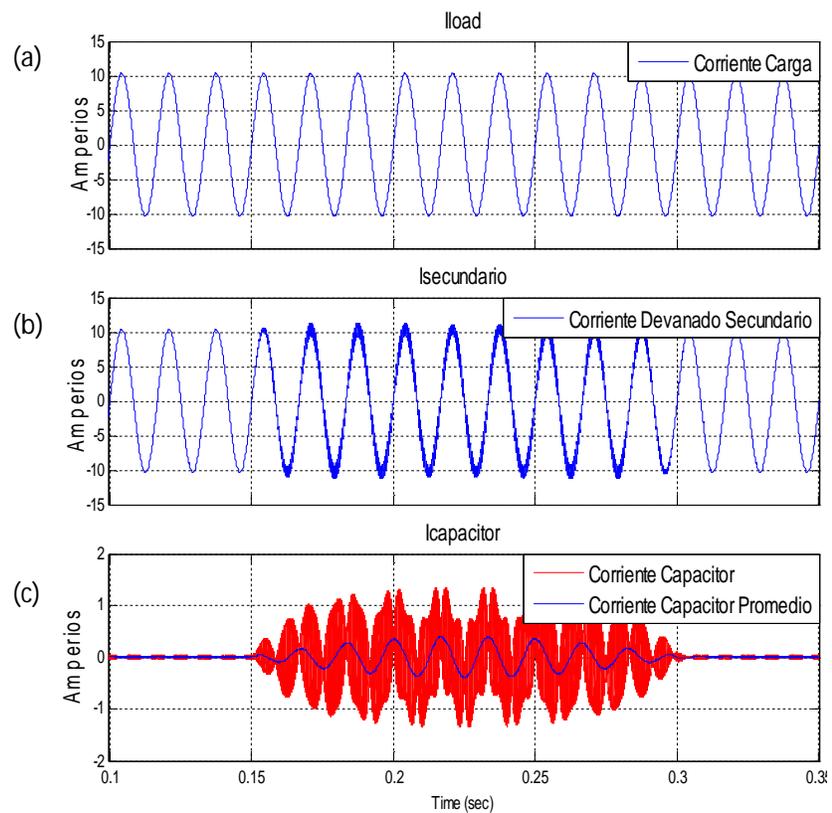


Fig. 5.11. (a) corriente de la carga, (b) Corriente en el secundario, (c) corriente en el capacitor.

### 5.1.2.4 POTENCIAS

La figura 5.12 muestra el intercambio de potencia durante el sag. Se observa que el sentido de la potencia reactiva depende directamente del valor del ángulo de desfase de la perturbación. La corriente del DVR y su voltaje generado al encontrarse en fase, no consume ni entrega potencia reactiva. La potencia activa entregada es proporcional a la magnitud de voltaje generado por lo que tiene esa la forma mostrada en la imagen.

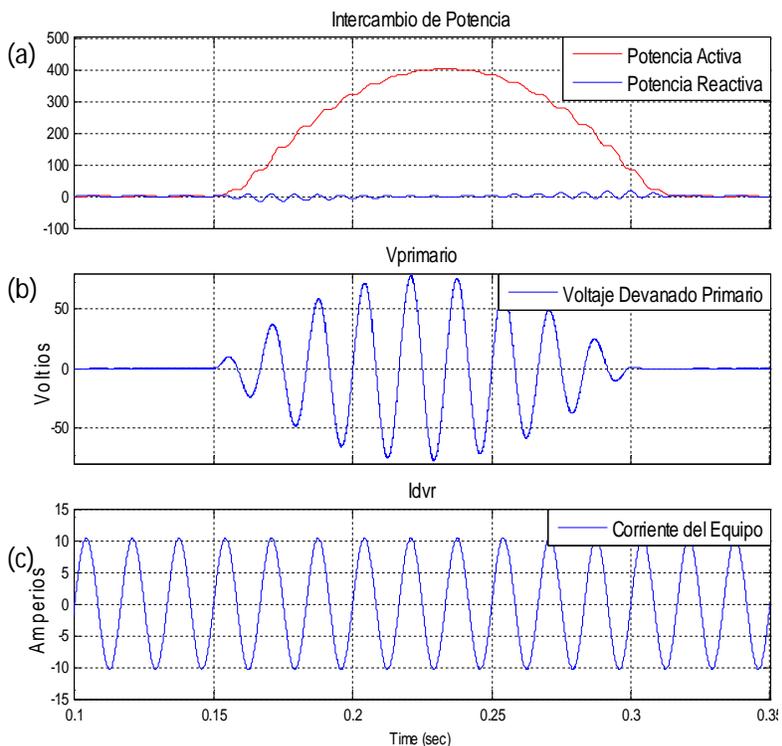


Fig. 5.12. (a) potencia reactiva y potencia activa, (b) voltaje del DVR, (c) corriente del DVR.

### 5.1.2.5 DIAGRAMAS DE TIEMPO DE VALORES RMS

En la figura 5.13 se observa los voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga. Al no haber una desviación de fase, la magnitud generada por el DVR es igual a la magnitud de la perturbación presente en la red. El voltaje y corriente de la carga permanecen constantes.

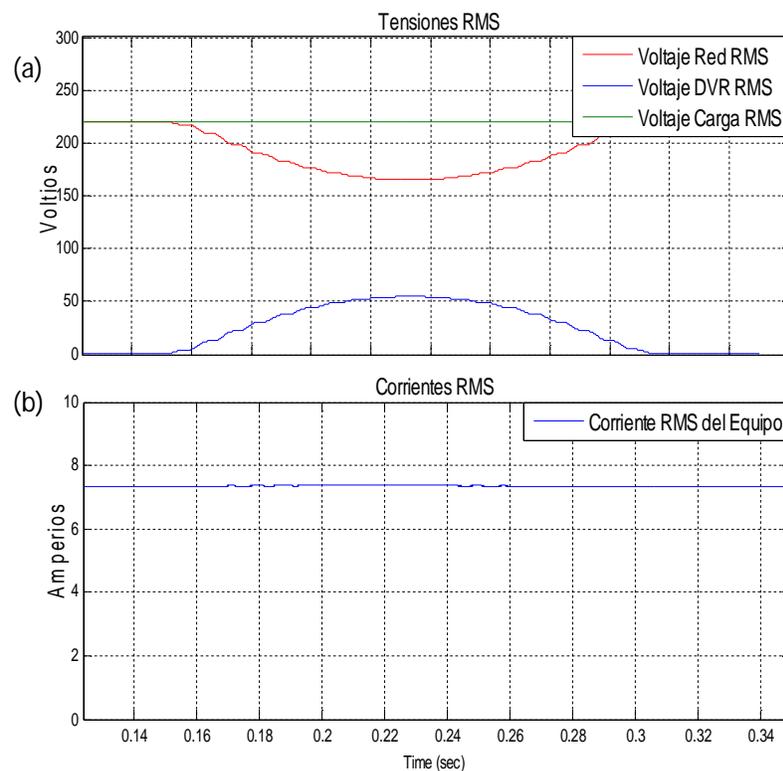


Fig. 5.13. (a) voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga, (b) Corriente RMS del DVR.

## 5.2 COMPENSACIÓN DE SWELL

### 5.2.1 SWELL DE 25% DE MAGNITUD CON UN DESFASE DE $10^\circ$

Para esto se retoma la figura 5.1 donde se muestran los fasores de voltaje antes del swell, como se observa el voltaje de la carga es igual al voltaje de la red.

#### 5.2.1.1 DURANTE EL SWELL

La figura 5.14 muestra la forma de los fasores durante el swell de 25% de magnitud con un desfase de  $10^\circ$ .

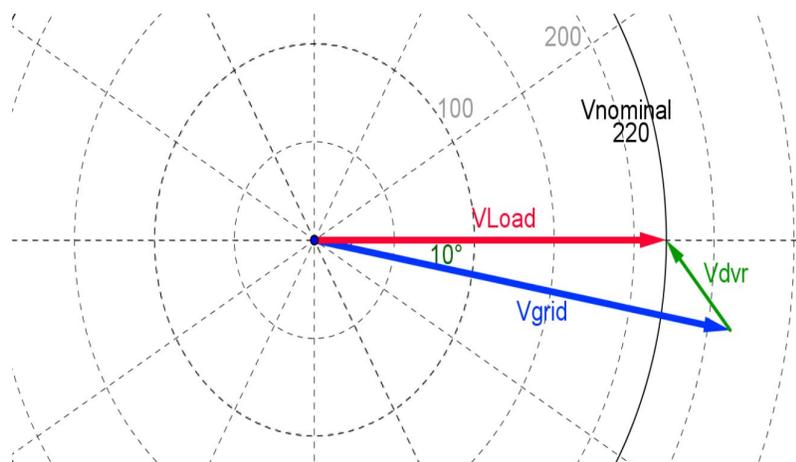


Fig. 5.14. fasores durante el swell con un desfase de  $10^\circ$ .

### 5.2.1.2 VOLTAJES

La figura 5.15 muestra una la sobretensión y el desfase en el voltaje de la red, el DVR actúa rápidamente ante la falla haciendo que le llegue el voltaje necesario a la carga.

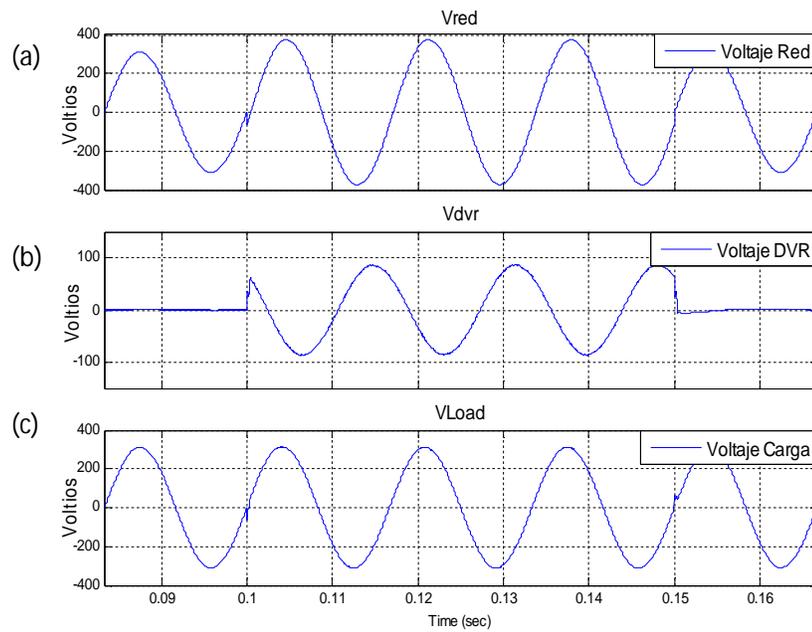


Fig. 5.15. (a) Sag en el voltaje de la red, (b) voltaje del DVR, (c) voltaje de la carga.

### 5.2.1.3 CORRIENTES

La figura 5.16 muestra que la corriente en el DVR tiene la misma forma que la corriente de la carga durante el swell.

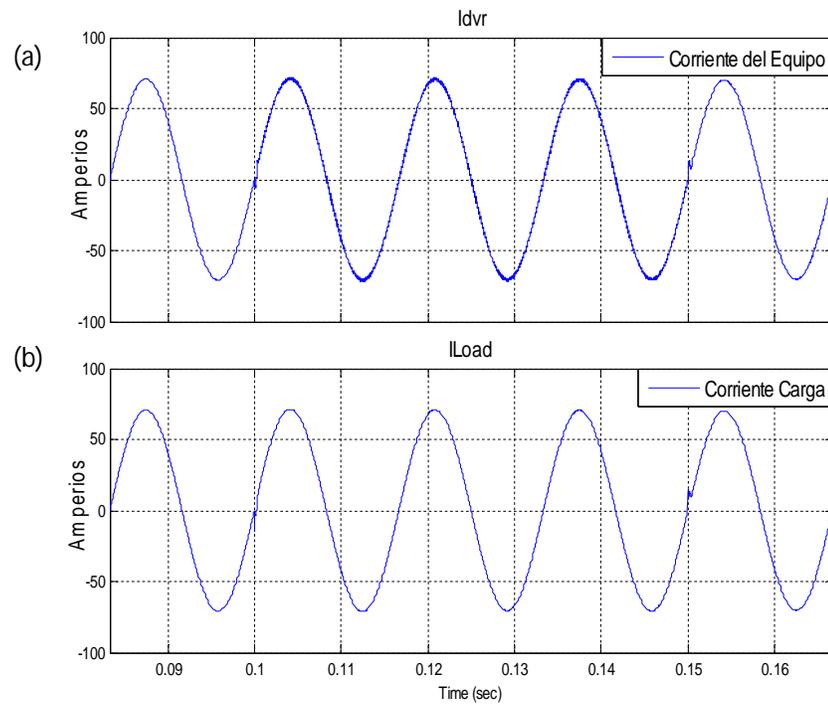


Fig. 5.16. (a) corriente del DVR, (b) Corriente en la carga.

En la figura 5.17 se puede observar la forma de onda de las corrientes de la carga, del secundario y la del capacitor durante el swell de voltaje.

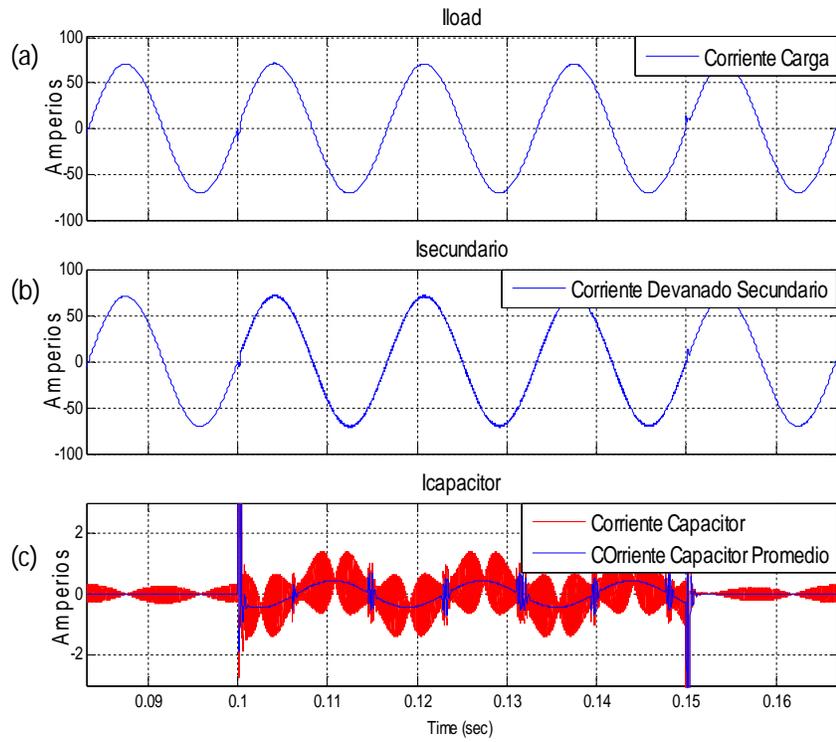


Fig. 5.17. (a) corriente de la carga, (b) Corriente en el secundario, (c) corriente en el capacitor.

### 5.2.1.4 POTENCIAS

En la figura 5.18 se observa de intercambio de potencia durante el swell. En este caso hay una componente de potencia reactiva que se entrega al circuito pero se absorbe potencia activa, esto sucede en los swells ya que el voltaje inyectado está desfasado  $180^\circ$  del original con el objetivo de que se resten.

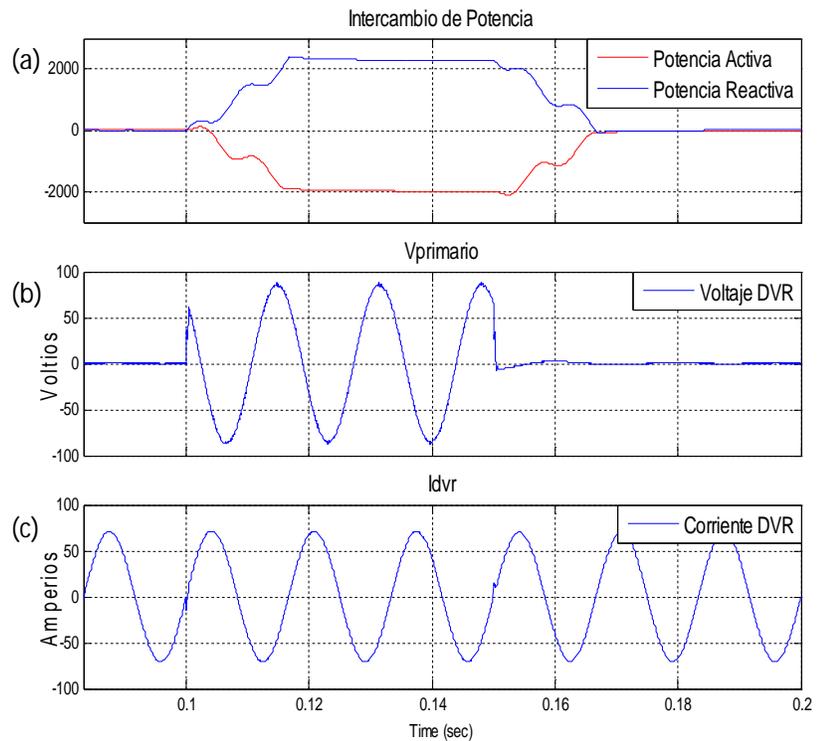


Fig. 5.18. (a) potencia reactiva y potencia activa, (b) voltaje del DVR, (c) corriente del DVR.

### 5.2.1.5 DIAGRAMAS DE TIEMPO DE VALORES RMS

En la figura 5.19 se observa los voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga mientras la corriente del DVR se mantiene constante.

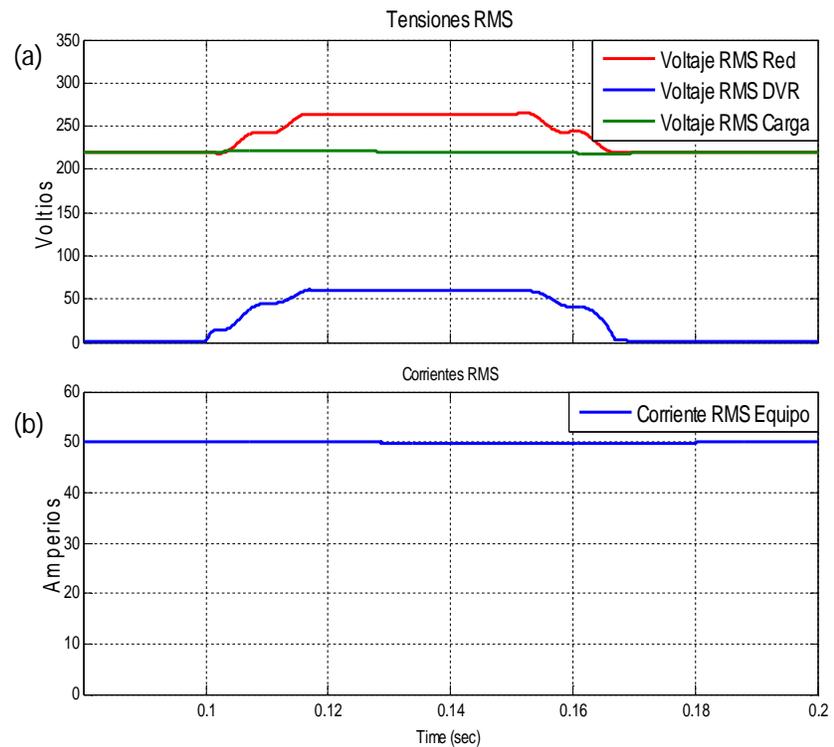


Fig. 5.19. (a) voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga, (b) Corriente RMS del DVR.

## 5.2.2 SWELL CON EL MÁXIMO DESFASE DE 18°

Para esto se retoma la figura 5.1 donde se muestran los fasores de voltaje antes del swell, como se observa el voltaje de la carga es igual al voltaje de la red.

### 5.2.2.1 DURANTE EL SWELL CON EL MÁXIMO DESFASE DE 18°

La figura 5.20 muestra la forma de los fasores durante el swell con el máximo desfase de 18°

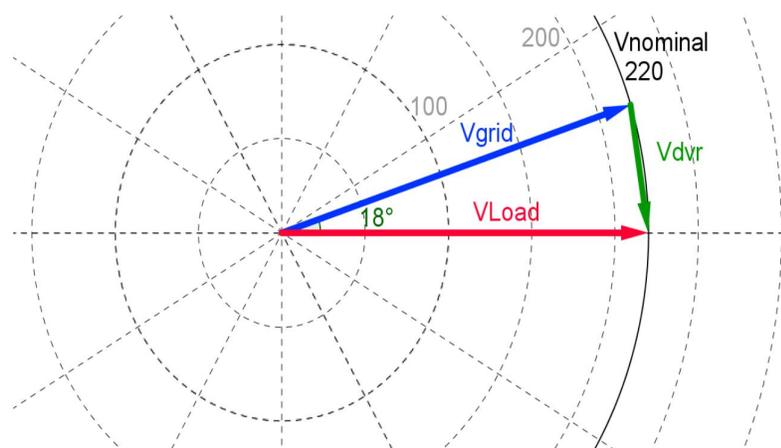


Fig. 5.20. fasores durante el swell con el máximo desfase de 18°

### 5.2.2.2 VOLTAJES

La figura 5.21 muestra una depresión en el voltaje de la red, el DVR actúa rápidamente ante la falla haciendo que le llegue el voltaje necesario a la carga.

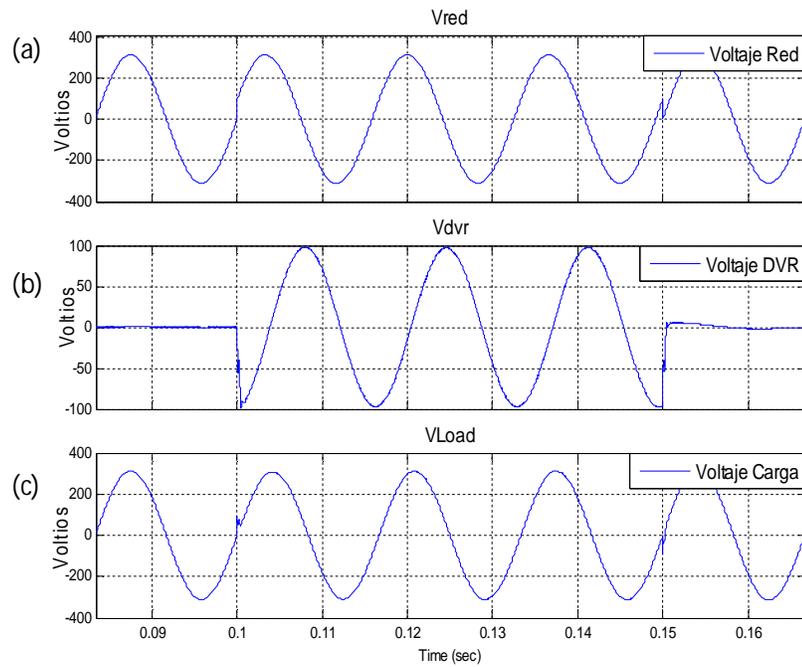


Fig. 5.21. (a) Sag en el voltaje de la red, (b) voltaje del DVR, (c) voltaje de la carga.

### 5.2.2.3 CORRIENTES

La figura 5.22 muestra que la corriente en el DVR tiene la misma forma que la corriente de la carga durante el swell con el máximo desfase de  $18^\circ$ .

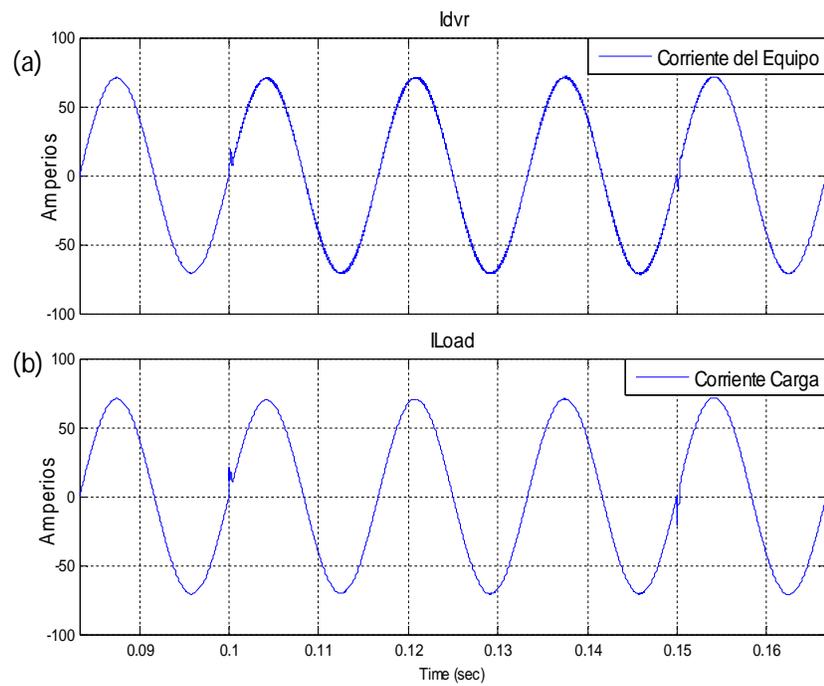


Fig. 5.22. (a) corriente del DVR, (b) Corriente en la carga.

En la figura 5.23 se puede observar la forma de onda de las corrientes de la carga, del secundario y la del capacitor durante el swell de voltaje.

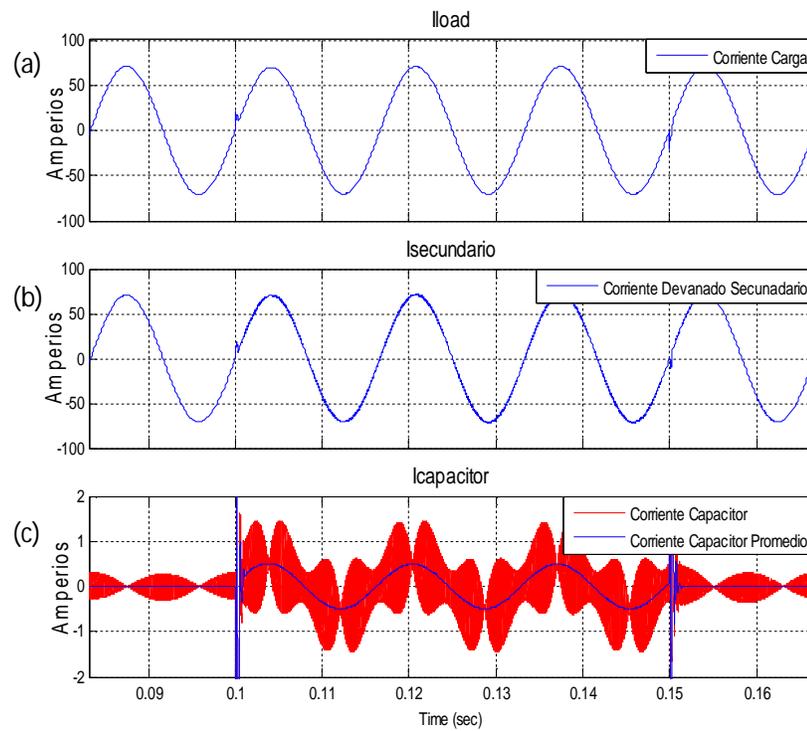


Fig. 5.23. (a) corriente de la carga, (b) Corriente en el secundario, (c) corriente en el capacitor.

### 5.2.2.4 POTENCIAS

En la figura 5.24 se observa de intercambio de potencia durante el swell con el máximo desfase de  $18^\circ$ . Se observa que el sentido de la potencia reactiva depende directamente del sentido del ángulo de desfase de la perturbación.

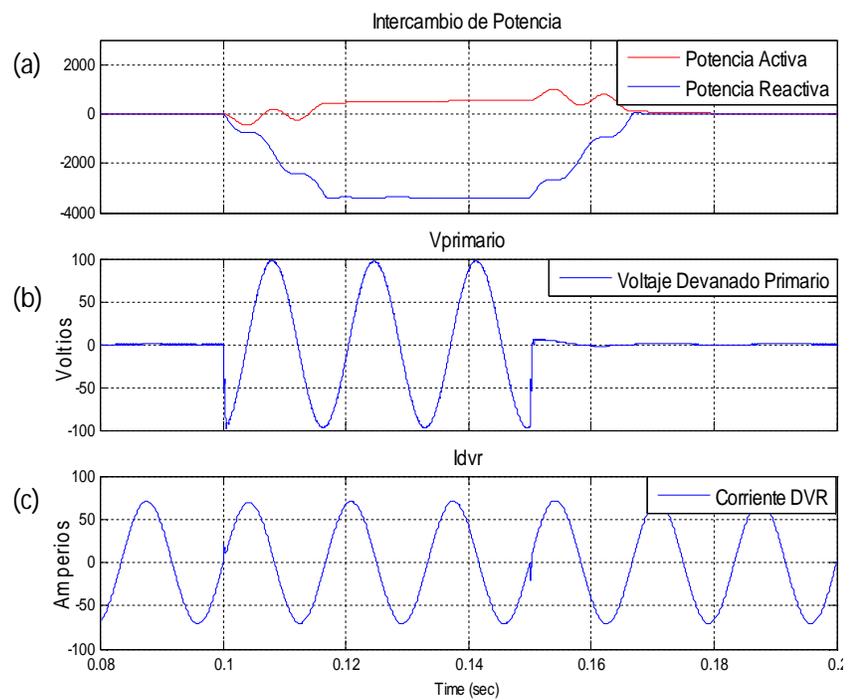


Fig. 5.24. (a) potencia reactiva y potencia activa, (b) voltaje del DVR, (c) corriente del DVR.

### 5.2.2.5 DIAGRAMAS DE TIEMPO DE VALORES RMS

En la figura 5.25 se observa los voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga. Claramente se nota que la magnitud de la tensión en la red es constante, pero igual el desfase es una perturbación y debe ser compensada por el equipo.

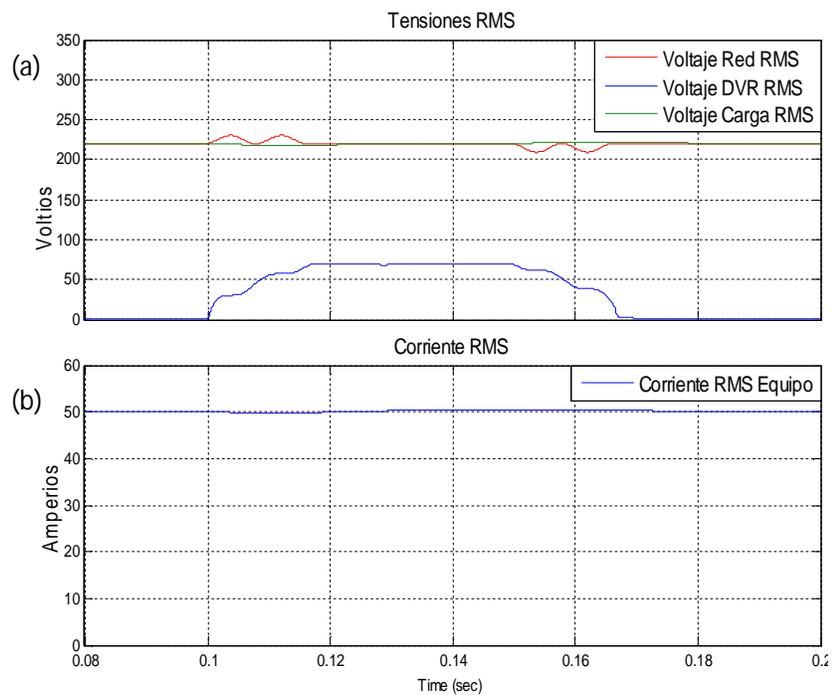


Fig. 5.25. (a) voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga, (b) Corriente RMS del DVR.

### 5.3 COMPENSACION EN FASE

Se retoma la figura 5.1 donde se muestran los fasores de voltaje antes del swell. En este caso se simulará una perturbación fuera de la zona donde se puede hacer compensación Pre-Sag.

#### 5.3.1 DURANTE EL SWELL DE 5% CON UN DESFASE DE 30°

Se simulará una fasor de voltaje de la red con un swell de 5% de magnitud y 30° de adelanto con respecto al fasor anterior al swell. La figura 5.26 muestra la forma de los fasores durante el swell de 5% con un desfase de 30°. El fasor voltaje del DVR se pone en fase con el fasor voltaje de la red y aumenta hasta que la magnitud de ambos sumados sea igual a la magnitud del voltaje nominal de la red.

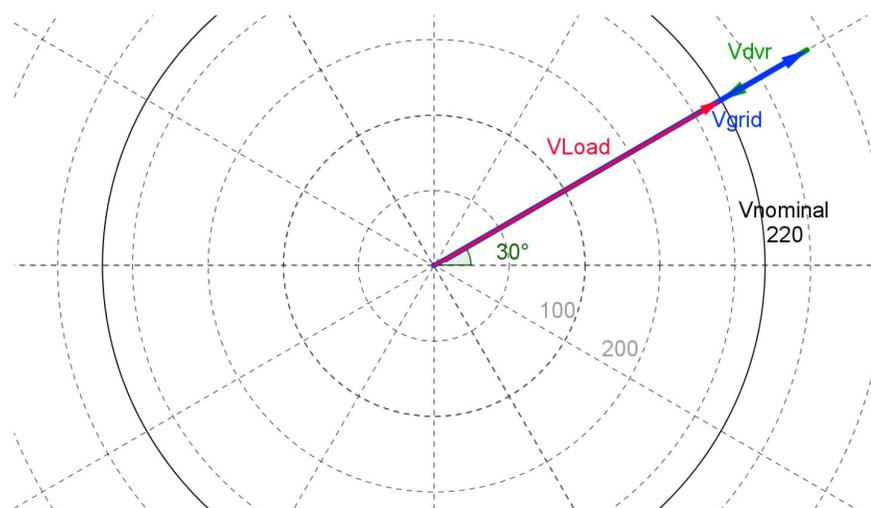


Fig. 5.26. fasores durante el swell de 5% con un desfase de 30°.

### 5.3.2 VOLTAJES

La figura 5.27 muestra una sobretensión en el voltaje de la red, el DVR actúa rápidamente ante la falla haciendo que le llegue la magnitud del voltaje necesario a la carga.

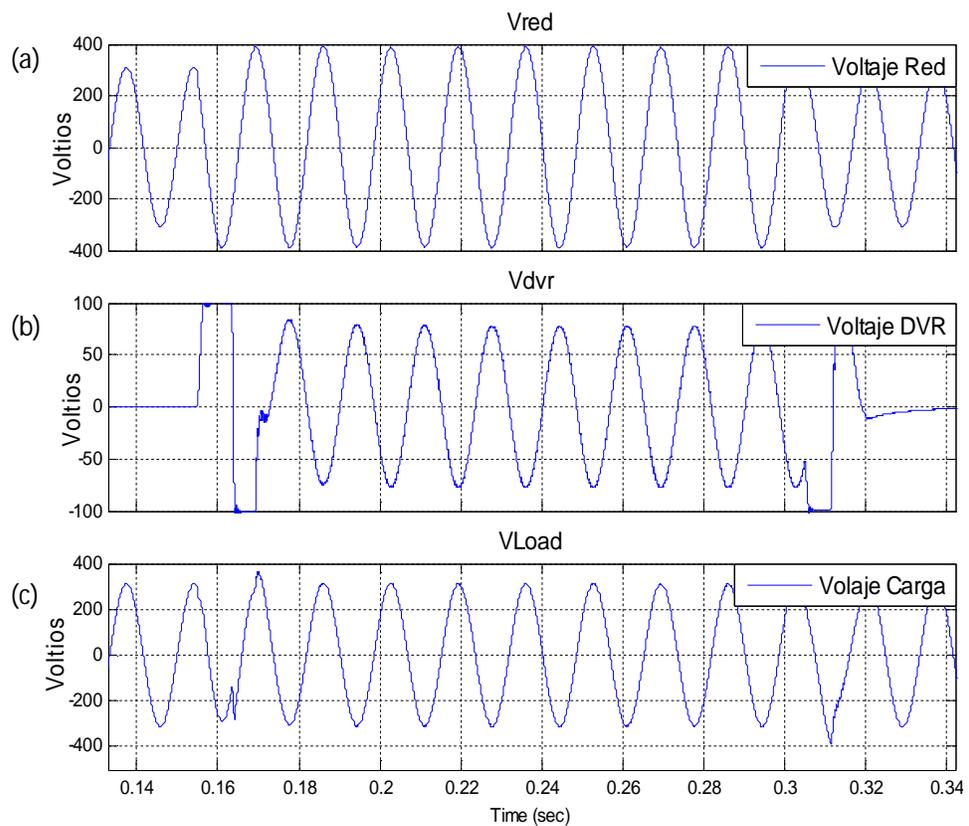


Fig. 5.27. (a) Swell en el voltaje de la red, (b) voltaje del DVR, (c) voltaje de la carga.

### 5.3.3 CORRIENTES

La figura 5.28 muestra que la corriente en el DVR tiene la misma forma que la corriente de la carga durante el swell.

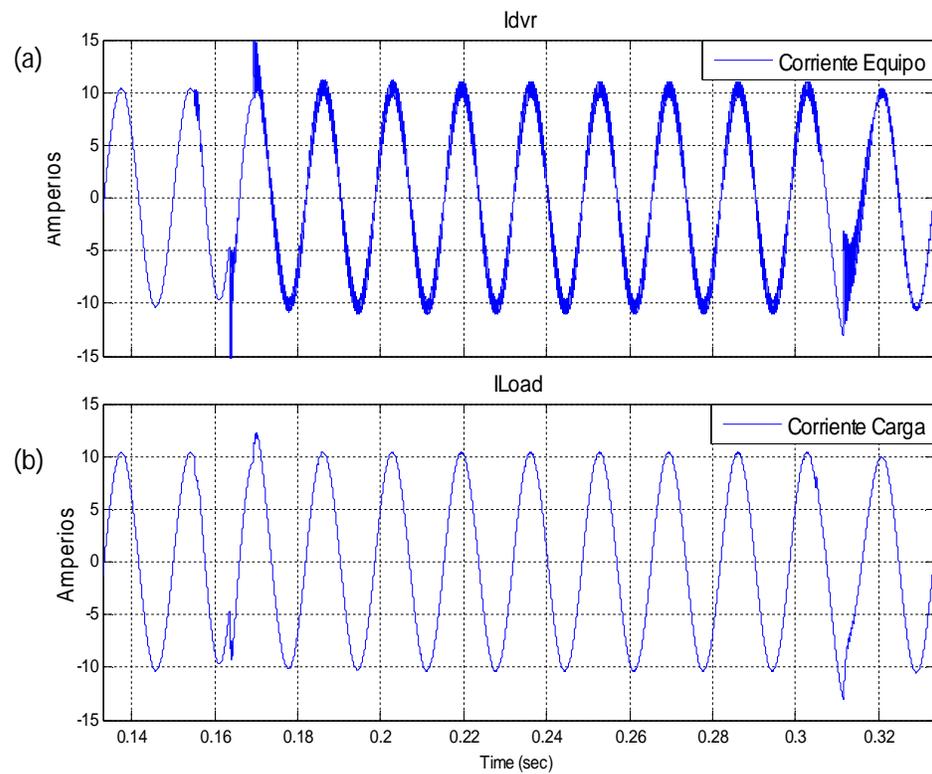


Fig. 5.28. (a) Corriente del DVR, (b) Corriente en la carga.

En la figura 5.29 se puede observar la forma de onda de las corrientes de la carga, del secundario y la del capacitor durante el swell de voltaje.

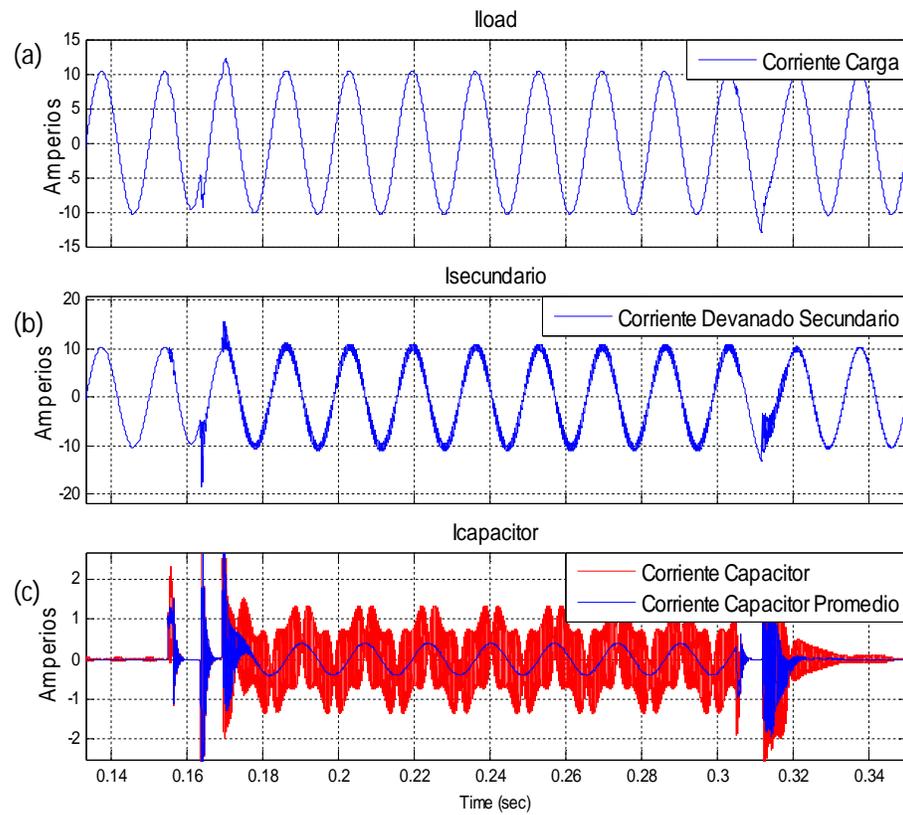


Fig. 5.29. (a) corriente de la carga, (b) Corriente en el secundario, (c) corriente en el capacitor.

### 5.3.4 POTENCIAS

En la figura 5.30 se observa de intercambio de potencia durante el swell. En este caso el voltaje y la corriente están en fase por lo que el equipo absorbe potencia activa.

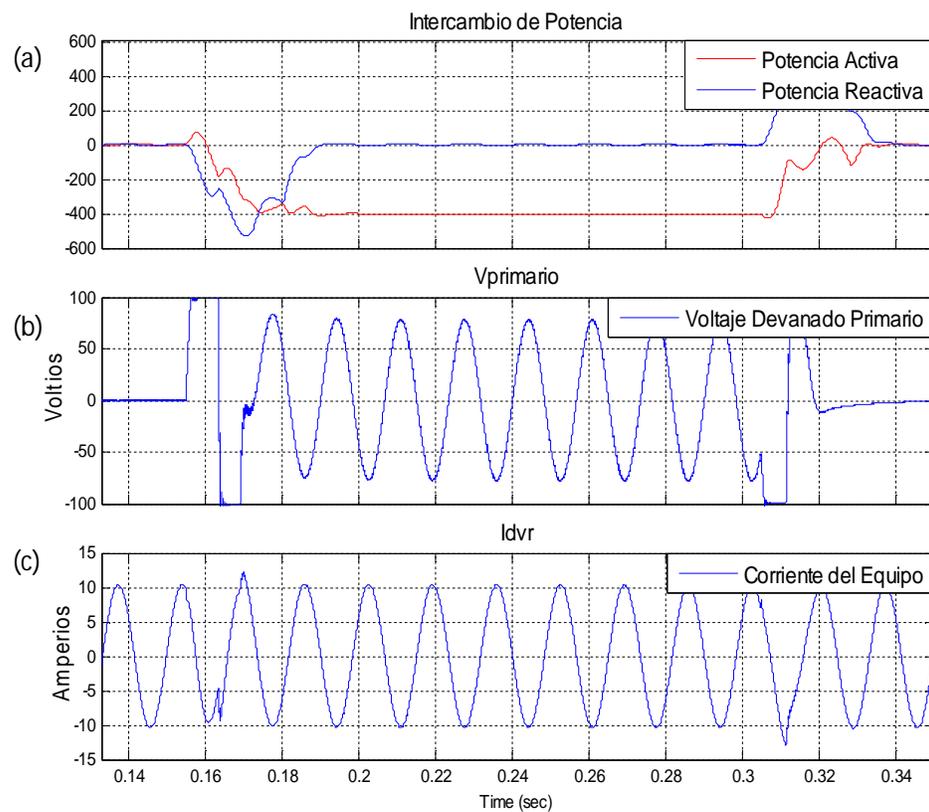


Fig. 5.30. (a) potencia reactiva y potencia activa, (b) voltaje del DVR, (c) corriente del DVR.

### 5.3.5 DIAGRAMAS DE TIEMPO DE VALORES RMS

En la figura 5.31 se observa la corriente del RMS DVR, los voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga. Claramente se nota que hay un pequeño transiente antes de hacer la compensación estable. Luego de los transientes en los extremos de la perturbación se observa que el voltaje y la corriente de la carga están perfectamente constantes.

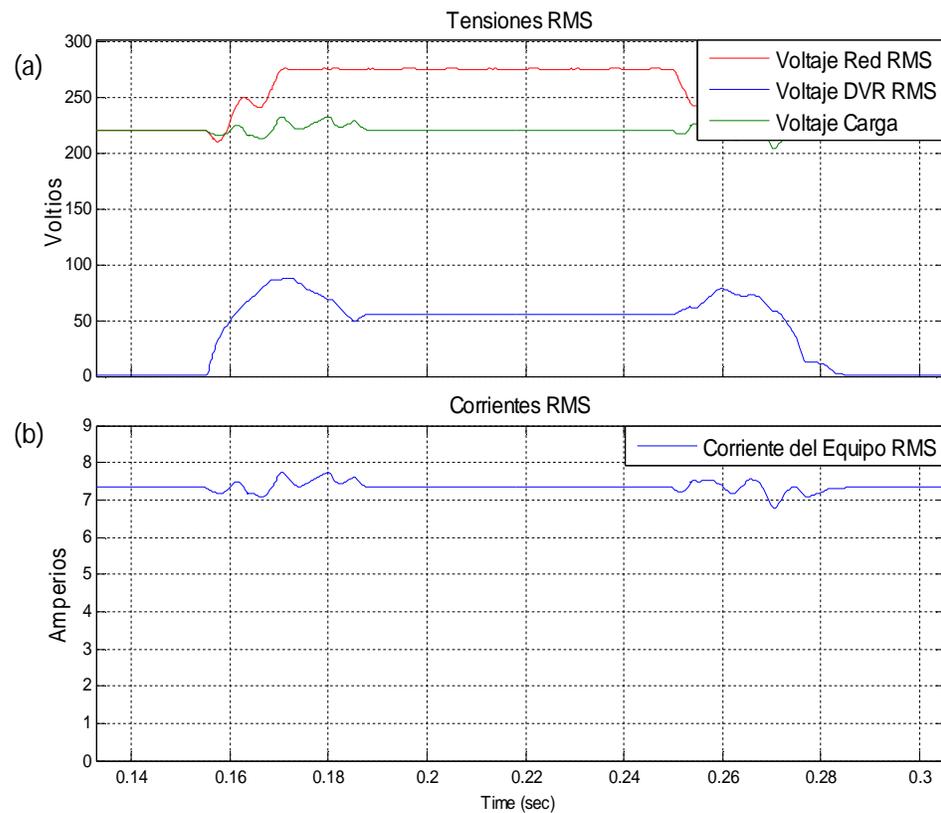


Fig. 5.31. (a) voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga, (b) Corriente RMS del DVR.

## 5.4 COMPENSACION EN CUADRATURA

Este tipo de compensación se puede aplicar en cargas un poco tan tolerantes con los parámetros del voltaje. A estas cargas solo les afectan perturbaciones en la magnitud de voltaje.

### 5.4.1 SAG DE 5% MAGNITUD Y 0° DE DESFASE

Se simulará un sag con 5% de magnitud sin cambio en la fase.

#### 5.4.1.1 ANTES DEL SAG

La figura 5.32 muestra la forma de los fasores antes del sag.

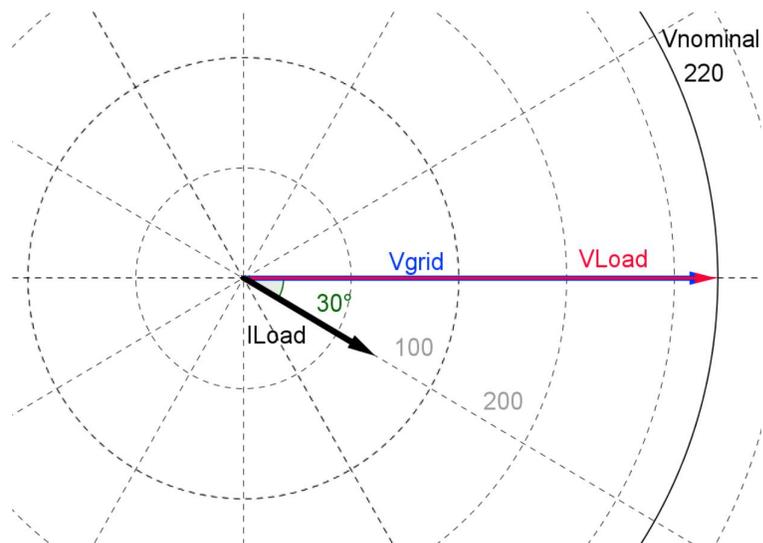


Fig. 5.32. fasores antes del sag.

### 5.4.1.2 DURANTE EL SAG

La figura 5.33 muestra la forma de los fasores durante el sag. El fasor  $I_{Load}$  es producido por una carga que se comporta como fuente de corriente, es decir, las perturbaciones no pueden cambiar a ese fasor. Se observa que este tipo de compensación busca que el fasor voltaje de carga tenga la magnitud nominal y que el fasor de voltaje inyectado esté a  $90^\circ$  con respecto a la corriente de la carga, para evitar inyectar potencia activa.

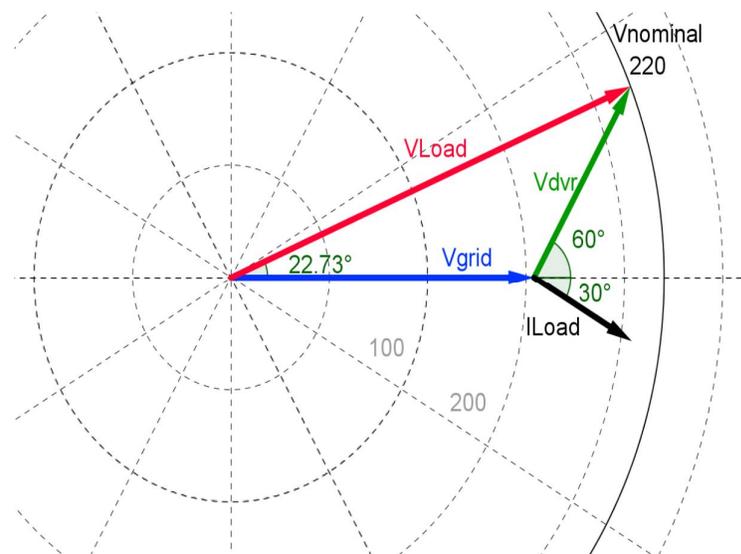


Fig. 5.33. fasores durante el sag.

### 5.4.1.3 VOLTAJES

La figura 5.34 muestra una depresión en el voltaje de la red, El DVR genera un voltaje en cuadratura con la corriente de la carga y al sumarse con el voltaje de la red, el voltaje de la carga es igual en magnitud y no en fase al voltaje que tenía antes de la perturbación.

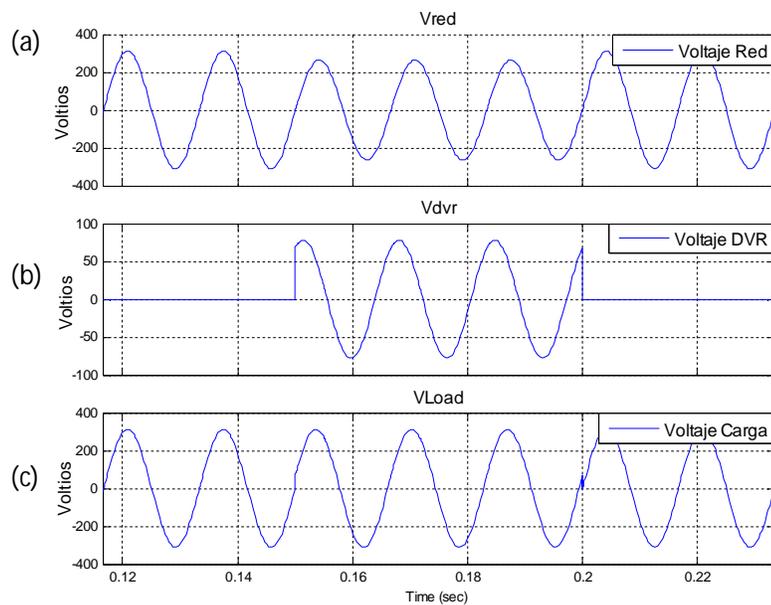


Fig. 5.34. (a) Sag en el voltaje de la red, (b) voltaje del DVR, (c) voltaje de la carga.

#### 5.4.1.4 CORRIENTES

La figura 5.35 muestra que la corriente en el DVR tiene la misma forma que la corriente de la carga durante el sag. Esta corriente es generada por una carga que se comporta como una fuente de corriente por lo que casi no es afectada por las perturbaciones en el voltaje de la red, como se observa en la imagen.

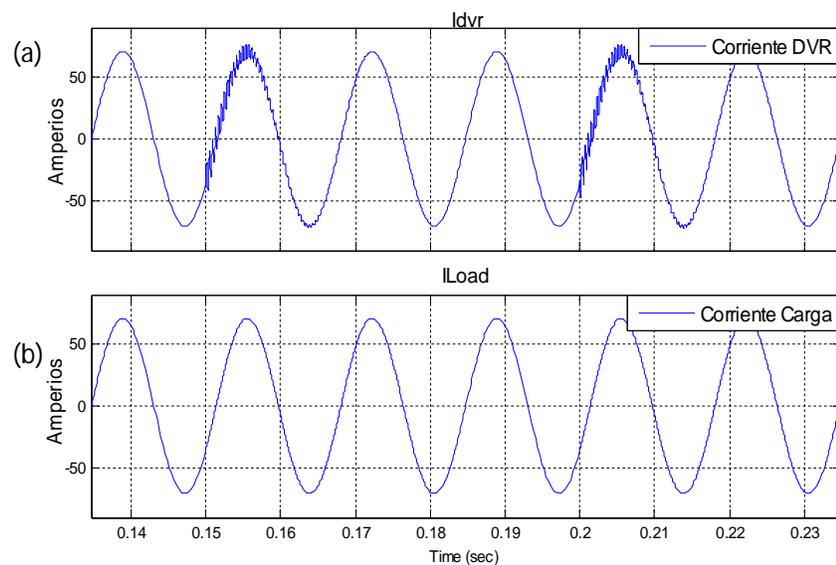


Fig. 5.35. (a) corriente del DVR, (b) Corriente en la carga.

En la figura 5.36 se puede observar la forma de onda de las corrientes de la carga, del secundario y la del capacitor durante el sag de voltaje.

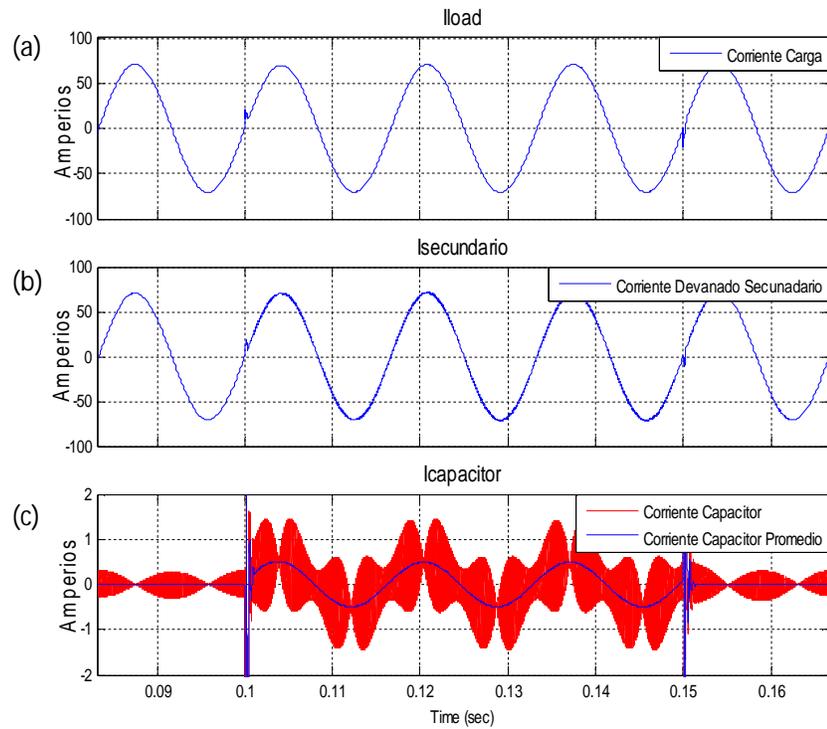


Fig. 5.36. (a) corriente de la carga, (b) Corriente en el secundario, (c) corriente en el capacitor.

### 5.4.1.5 POTENCIAS

En la figura 5.37 se observa de intercambio de potencia durante el sag. Debido a que el voltaje y la corriente del equipo se encuentran en cuadratura no se inyecta ni absorbe potencia activa, sino simplemente se intercambia potencia reactiva que no descarga las baterías.

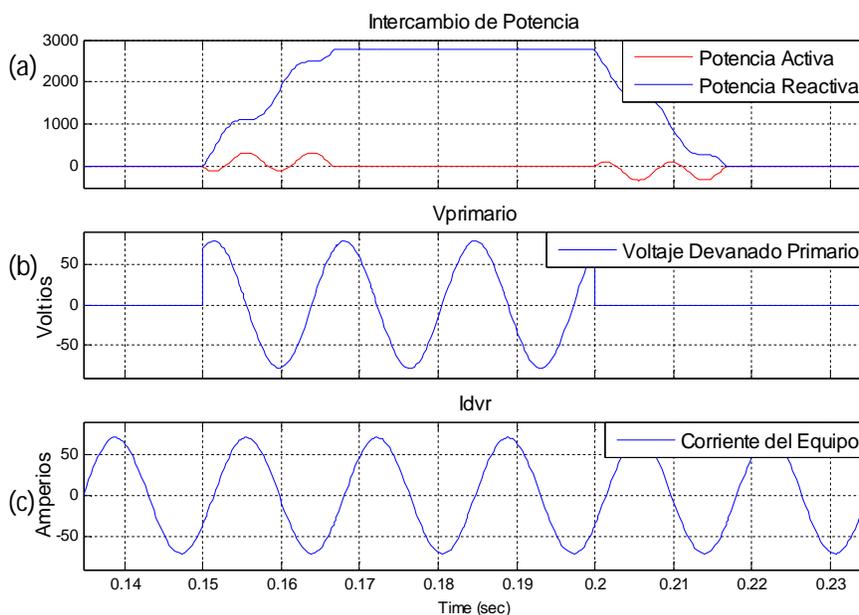


Fig. 5.37. (a) potencia reactiva y potencia activa, (b) voltaje del DVR, (c) corriente del DVR.

### 5.4.1.6 DIAGRAMAS DE TIEMPO DE VALORES RMS

En la figura 5.38 se observa la corriente RMS del DVR, los voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga. Se observa una pequeña perturbación en la magnitud de la red, provoca una gran magnitud en la compensación por parte del DVR, para mantener la magnitud del voltaje de la carga constante.

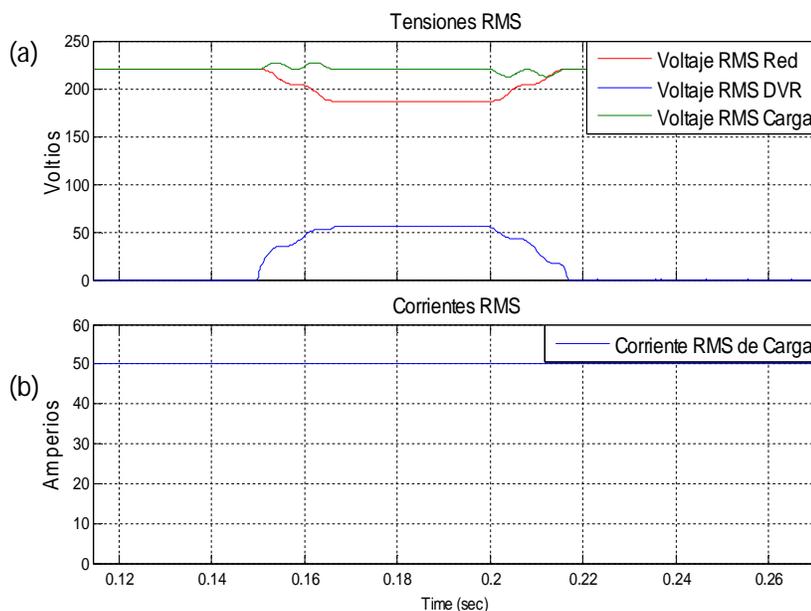


Fig. 5.38. (a) voltajes RMS de la red, del DVR y de la carga, (b) Corriente RMS del DVR.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES**

1. Uno de los principales inconvenientes durante el desarrollo de este proyecto es la velocidad de respuesta del controlador. El controlador de corriente cuya función es prevenir fallas de sobrecorriente se diseña lo más rápido posible sin que se vea afectado por la frecuencia de conmutación; debido a esto al controlador de voltaje no le queda suficiente ancho de banda para actuar y se vuelve lento. Para solucionar este problema fue necesario aumentar el ancho de banda disponible, lo cual fue conseguido mediante el aumento de la

frecuencia de conmutación, además al hacerlo los componentes del filtro disminuyeron y la frecuencia de resonancia se hizo mayor por lo que no afectó el desempeño del controlador.

2. Los equipos a los cuales está destinado este equipo a proteger son monofásicos y relativamente pequeños pero que desempeñan un papel muy importante en el ambiente en el que trabajan. Entre las industrias donde podría ser más útil la más evidente es la Medicina donde el DVR puede proteger un instrumento utilizado durante una cirugía.
3. Las mayores pérdidas de un compensador serie como el DVR se producen cuando el equipo está en Stand-by ya son constantes en el tiempo e involucran al transformador y los switches. Sin embargo éste equipo va dirigido hacia cargas pequeñas que no son cargas continuas sino que se encienden cierta fracción del día y el resto permanecen apagados minimizando las pérdidas de Stand-By.
4. Para la realización de este proyecto se escogió el solver (método de cálculo) a Ode23tb (stiff/TR-BDF2) ya que es el que mejor responde en velocidad y precisión cuando se trabaja con modelos de conmutación de frecuencia relativamente alta. Otro parámetro importante al ajustar las configuraciones del simulador es ajustar el paso, para este proyecto se escogió un paso variable para acelerar la

simulación pero se pone un límite máximo de éste, el valor de este límite es de:

$$Step\ MAX = \frac{1}{20 \cdot f_s}, \quad (6.1)$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de conmutación. Al ajustar a este paso el software realizará mínimo 20 iteraciones por cada cambio en la señal moduladora.

5. Dentro de las cosas que se pueden hacer para mejorar la simulación es colocar componentes parásitas a los elementos para hacerlos lo más real posible. Al inductor y capacitor del filtro se le ha colocado una pequeña resistencia en serie que no afecta demasiado su comportamiento pero es importante al diseñar un sistema que se va a implementar.
6. Es importante crear un modelo promedio del sistema y equipo compensador, ya que el tiempo de simulación se reduce considerablemente, proporciona una idea de lo que sucedería en el modelo de conmutación y se obtienen resultados relativamente confiables.
7. Para la realización de este proyecto ha sido necesario una lectura extensa de toda la literatura disponible en libros, páginas webs, etc. Para entender extensamente el funcionamiento y el rol que

desempeñan los equipos compensadores estáticos y principalmente el Restaurador dinámico de voltaje.

8. Otra ventaja que presenta frente a los grandes equipos trifásicos de distribución es la facilidad de protección contra sobrecorriente en la barra DC por que las corrientes son relativamente bajas y el transformador tiene una relación de transformación 1:1.
9. En simulaciones este equipo ha conseguido proteger una carga de voltaje nominal de 220V y corriente máxima de 50 amperios contra una perturbación en el nivel de tensión de la red de hasta  $\pm 35\%$  del valor nominal. Además el tiempo límite de compensación es mucho mayor al de un sag/swell promedio ya que la fuente en la barra DC es un banco de baterías.
10. El equipo puede realizar una compensación máxima en la fase (sin perturbación en la magnitud del voltaje) con retrasos y adelantos de hasta  $\pm 18^\circ$  para mantener el fasor de voltaje en fase con el fasor de voltaje anterior a la perturbación.

## **CONCLUSIONES**

1. El dimensionamiento de la inductancia y la capacitancia del filtro se ha realizado basado en las especificaciones de máximo rizado de corriente y voltaje, respectivamente. Las simulaciones del capítulo 3 confirman que el diseño satisface las especificaciones.

2. Para el diseño del controlador se construyó un control en cascada con dos lazos de control, uno interno de corriente y otro externo de voltaje. El lazo interno, diseñado con la técnica de K-factor, muestra estabilidad y buen desempeño dinámico tal como se muestra en las simulaciones del capítulo 4. El lazo externo, diseñado con la herramienta Sisotool de Matlab por la necesidad de incluir un controlador resonante, también se presenta un buen desempeño dinámico obteniendo un tiempo de estabilización menos de 5 milisegundos, partiendo de condiciones iniciales de cero, que representa menos de un tercio de un onda de voltaje a 60 Hertz. Esta es una proporción bastante buena para controladores que siguen señales senoidales.
3. Se logró demostrar que este diseño simulado de DVR funciona perfectamente restaurando el nivel necesario de voltaje que se pierde ante cualquier distorsión, esto se observa en el capítulo 5. A plena carga el DVR proporciona voltaje con rizo máximo definido de 0.5% del voltaje máximo del banco de baterías y rizo máximo de corriente de 3% de la corriente máxima del equipo. A estas dos medidas se les ha realizado un análisis de Fourier para obtener la Distorsión Armónica Total (THD). En el caso del voltaje se obtuvo el 0.3% y en la corriente el 0.1%, valores que son suficientemente pequeños para cumplir con las normas de calidad vigentes y no afectar el desempeño de los equipos protegidos.

# **ANEXOS**

## VALORES INGRESADOS EN MATLAB

```
%Definicion de Parámetros del DVR

clear all

clc

Vdc=100;          %Voltaje de la fuente DC

Vac=311;          %311 máximo

ampindice = 0.9;  %amplitud del índice de modulación

f = 60;           %frecuencia de salida del convertidor

w= 2*pi*f;        %frecuencia angular del convertidor

phase = 0*pi/180; %ángulo de fase de salida del
convertidor

fs = 20e3;        %frecuencia de conmutación. Ajustada
a 20kHz

ts = 1/fs;        %tiempo de conmutación. Ajustado a
0.5 ms

%Parámetros de la red

Vgrid = 220;      %Voltaje de la red

fgrid = 60;       %Frecuencia de la red

phasegrid = 0;    %Angulo de fase de la red

pr = 0.85;        %Porcentaje de Perturbación en la
calidad de energía

ti = 0.15;        %Tiempo de Inicio perturbación

te = 0.20;        %Tiempo final de perturbación
```

```

phasepr = 0;          %Fase de la perturbación
cuad=1;              %Perturbación cuadrática

%Parámetros del filtro
n=1;                 %Relación de transformación
L=0.3e-3;           %Inductancia del filtro
RL=0.1e-3;          %Resistencia de los devanados del
inductor
C=13.5e-6;          %Capacitancia del filtro
RC=0.1;             %Resistencia equivalente serie del
capacitor
R=5;                 %Resistencia de la Carga
filtro=tf(n,[L*C*n*n 0 1]);%Funcion de transferencia del
filtro sin amortiguamientos
bode(filtro,{1e0,1e6}); % Gráfico del filtro en el
dominio de la frecuencia
grid;

%Funciones de transferencia de la planta
Gpi=tf([n*n*Vdc*C 0],[L*C*(n*n) C*(RC+n*n*RL) 1]);
%Ganancia de la planta de corriente
Gpv=tf([C*RC 1],[n*C 0]);
%Ganancia de la planta de voltaje
planta=tf([n*Vdc*C*RC n*Vdc],[L*C*n*n C*(n*n*RL+RC) 1]);
% Ganancia de la planta global

```

```

%Controladores de corriente, Voltaje y Planta

PMi=60;          %Margen de Fase del lazo de corriente
BWi=2000;        %Ancho de Banda del lazo de corriente
Gci=K_Factor(Gpi,BWi,PMi); %Ganancia del Controlador de
Corriente mediante factor K
figure(2);
bode(Gci*Gpi); %Gráfico del filtro en el dominio de la
frecuencia
grid;
PMv=60;          %Margen de Fase del lazo de voltaje
BWv=200;         %Ancho de Banda del lazo de voltaje
Gcv=K_Factor(Gpv,BWv,PMv); %Ganancia del Controlador de
voltaje mediante factor K
figure(3);
bode(Gcv*Gpv);
grid;
Gcc=zpk([0 -903],[2*pi*60*i -
2*pi*60*i],0.0627249586313555); %Controlador de voltaje
obtenido mediante sisotool
figure(3);
bode(Gcd*Gpv);
grid;

```

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Mago, R. Chourio, A. Villegas, F. Guillén. (2008). “*Dispositivos para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica: STATCON y DVR*” [Paper], Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [2] P. Boonchiam and N. Mithulananthan. (2006). “*Understanding of Dynamic Voltage Restorers Through MATLAB Simulation*”. [Paper], Asian Institute of Technology, Thailand.
- [3] P. Dähler, R. Affolter, O. Apeldoorn . (2000). “*Requirements And Solutions For Dynamic Voltage Restorer A Case Study*”. [Diapositiva]. Switzerland, ABB. 20 diapositivas.
- [4] M.V.Kasuni Perera. (2007). “*Control of a Dynamic Voltage Restorer to compensate single phase voltage sags.*” [Master of Science Thesis], KTH VETENSKAP OCH KONST, Stockolm, Sweden.
- [5] J. Amit, M. Bhupen, P. Kalandi. (2008). “*Modeling and Simulation of a Dynamic Voltage Restorer.*” [Thesis], National Institute of Technology, Rourkela, Odisha.