

Simulación de un restaurador dinámico de tensión para el mejoramiento de la calidad de la
energía en sistemas de distribución

Cristina Isabel Peinado Serrano

Nemesio Segundo Rodríguez Granados

Trabajo de Grado para Optar el título de Especialista en Sistemas de Distribución de Energía

Eléctrica

Director

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Especialización en sistemas de distribución de energía eléctrica

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Esta monografía la dedico a toda mi familia por todo el apoyo brindado incondicionalmente, la motivación constante para seguir creciendo como profesional y persona.

Gracias a Dios por esos seres amados que hoy no están y gracias por los que han llegado.

Gracias a la Universidad del Magdalena por la formación que me brindó como Ingeniero y a la Universidad Industrial de Santander por los estudios recibidos como Especialista.

Nemesio Rodríguez

Dedicatoria

A Dios por sus infinitas bendiciones.

A mi madre Jeaneth, mi ángel, mi guía, mi fortaleza.

A mis abuelas Bertha y Norys, a mi papa Javier, a mis hermanos Gabriela y Erik, a mi tío Rafael,

a mi Jhonny, a toda mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

A todos mis compañeros de la cohorte de especialización que de alguna manera u otra aportaron

un pequeño granito de arena para hacer esto una realidad.

A todas esas personas, Gracias.

Cristina Isabel

Agradecimiento

Un agradecimiento muy especial a la profesora María Alejandra Mantilla por todo su apoyo en el desarrollo de esta monografía. Al profesor Jairo Blanco quien ha sido nuestro evaluador. Ha ambos por todo el conocimiento transmitido. A todos los directivos y en especial al profesor Oscar Quiroga por su apoyo y ayuda. la Universidad Industrial de Santander por permitirnos hacer parte de ella y cumplir nuestro sueño de ser especialistas.

Nemesio y Cristina

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1 Calidad de la Energía Eléctrica.....	17
2.2 Perturbaciones de la onda de tensión	18
2.2.1 Hundimientos de tensión (voltage sag).....	18
2.2.2 Elevaciones de tensión (voltage swell)	19
2.2.3 Armónicos.....	19
2.2.4 Desequilibrios de tensión.....	20
2.2.5 Fluctuaciones de tensión (Flicker)	21
2.3 Dispositivos de compensación	22
3. Restaurador Dinámico de Tensión (DVR).....	23
3.1 Principio de operación	23
3.2 Topologías.....	25
3.2.1 Unidad de almacenamiento de energía	25
3.2.2 Filtro pasivo	30
3.2.3 Convertidor	32

3.2.4 Transformador de inyección	38
3.3 Técnicas de compensación.....	38
3.3.1 Compensación pre-falla	39
3.3.2 Compensación en fase.....	40
3.3.3 Tolerancia de tensión	41
3.3.4 Compensación avanzado en fase	42
3.4 Control del convertidor DC/AC.....	43
3.5 Estrategias para obtener la señal de referencia	46
4. Metodología	49
5. Simulación y análisis de resultados	56
6. Conclusiones y recomendaciones	83
Referencias Bibliográficas	85

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Hundimiento de tensión.....	18
Figura 2. Elevación de tensión.....	19
Figura 3. Forma de onda corriente armónica	20
Figura 4. Desequilibrio de tensión para un alimentador residencial.....	21
Figura 5 Ejemplo fluctuaciones de tensión causadas por el funcionamiento de un horno de arco.....	22
Figura 6. Principio de funcionamiento del DVR	24
Figura 7. Topología con tensión en la barra de continua no controlada	26
Figura 8. Topología con tensión en la barra de continua controlada.	28
Figura 9. Topología con convertidor en paralelo conectado a la fuente de alimentación	29
Figura 10. Topología con convertidos en paralelo conectado en el lado de la carga.	30
Figura 11. DVR con filtro en el lado de baja del transformador.	31
Figura 12. Circuito equivalente con filtro en el lado de baja del transformad.....	32
Figura 13. Convertidor monofásico de puente completo,.....	33
Figura 14. Convertidor trifásico de tres hilos,	34
Figura 15. Convertidor trifásico con condensador repartido,	35
Figura 16. Convertidor puente completo con cuatro ramas	36
Figura 17. Convertidor tres puentes completos monofásicos cuatro hilos	37
Figura 18. Diagramas fasoriales pre-falla.	39

Figura 19. Diagramas fasoriales compensación en fase	40
Figura 20. Diagramas fasoriales tolerancia de tensión	41
Figura 21. Diagramas fasoriales compensación avanzado en fase	42
Figura 22. Técnicas de control para el convertidor DC/AC en el DVR	44
Figura 23. Esquema de control DVR.....	51
Figura 24. Circuito de potencia DVR	51
Figura 25. Conexiones de DVR a la carga seleccionada.	52
Figura 26. Control por histéresis de los DVRs conectados a cada una de las fases de la carga ...	53
Figura 27. Utilización de phase-locked loop (PLL) para la obtención de la señal de referencia .	53
Figura 28. Implementación de hueco de tensión en Simulink.....	55
Figura 29. Implementación de la elevación de tensión en Simulink.	56
Figura 30. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 1).....	58
Figura 31. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 1).	59
Figura 32. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 1).....	60
Figura 33. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 1).....	61
Figura 34. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 1).	61
Figura 35. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 1).....	62

Figura 36. Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 1).....	63
Figura 37. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 2).....	64
Figura 38. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 2).	65
Figura 39. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 2).....	66
Figura 40. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 2).....	67
Figura 41. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 2).	67
Figura 42. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 2).....	68
Figura 43. Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 2).....	69
Figura 44. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 3).....	71
Figura 45. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 3).	72
Figura 46. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 3).....	73

Figura 47. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 3).....	74
Figura 48. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 3).	74
Figura 49. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 3).....	75
Figura 50. Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 3).....	76
Figura 51. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 4).....	77
Figura 52. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 4).	78
Figura 53. a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 4).....	79
Figura 54. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 4).....	80
Figura 55. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 4).	80
Figura 56. Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 4).....	81
Figura 57. Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 4).....	82

Lista de Tablas

	Pág,
Tabla 1. Carga seleccionada para evaluar el comportamiento del DVR	49
Tabla 2. Valores utilizados en la batería y filtro de los DVRs..	54
Tabla 3. Tiempos de perturbación según estándar IEEE 1159.	54
Tabla 4. Amplitudes tomadas para las diferentes perturbaciones.	55
Tabla 5. Parámetros usados en los casos de simulación.	57
Tabla 6. Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 1.	57
Tabla 7. Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 2.	64
Tabla 8. Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 3.	70
Tabla 9. Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 4.	77

Resumen

Título: Simulación de un restaurador dinámico de tensión para el mejoramiento de la calidad de la energía en sistemas de distribución.*

Autor: Cristina Peinado, Nemesio Rodriguez**

Palabras Clave: sistemas de distribución, hundimiento de tensión, elevación de tensión, restaurador dinámico de tensión, calidad de la energía eléctrica.

Descripción:

Con el desarrollo y uso generalizado de equipos electrónicos que pueden provocar perturbaciones electromagnéticas en los sistemas de distribución de energía, o que pueden ser sensibles y menos tolerantes a estos fenómenos, ha aumentado el interés por la calidad de la energía eléctrica. En este campo, el uso de Restauradores Dinámicos de Tensión (DVR), por sus siglas en inglés) se presenta como una solución para mitigar el impacto de los problemas de calidad de energía producidos en la red de distribución. Por lo tanto, este trabajo pretende realizar una revisión sobre el Restaurador Dinámico de Tensión, incluyendo los fenómenos electromagnéticos que pueden ser mitigados mediante el uso de este dispositivo, las topologías de convertidores de potencia, y las estrategias de control empleadas. Asimismo, se analizará el funcionamiento del DVR por medio de la simulación de un caso de estudio para una carga en particular, que permita identificar limitaciones y alcances con respecto al mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Especialización en sistemas de distribución de energía eléctrica Director María Alejandra Mantilla Villalobos Doctora en Ingeniería

Abstract

Title: Simulation of a dynamic voltage restorer for improving energy quality in distribution systems*

Autor: Cristina Peinado, Nemesio Rodriguez**

Keywords: distribution systems, voltage sinking, voltage elevation, dynamic voltage restorer, electrical power quality.

Description:

With the widespread development and use of electronic equipment that can cause electromagnetic disturbances in energy distribution systems, or that may be sensitive and less tolerant to these phenomena, interest in the quality of electrical energy has increased. In this field, the use of Dynamic Voltage Restorers (DVRs) is presented as a solution to mitigate the impact of power quality issues caused in the distribution network. Therefore, this work aims to conduct a review on the Dynamic Voltage Restorer, including electromagnetic phenomena that can be mitigated by using this device, power converter topologies, and control strategies employed. The operation of the DVR will also be analysed by simulating a case study for a particular load, which allows to identify limitations and scopes with respect to the improvement of the quality of electrical energy.

* Project of grade

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Especialización en sistemas de distribución de energía eléctrica Director María Alejandra Mantilla Villalobos Doctora en Ingeniería

Introducción

El sistema de distribución de energía eléctrica en Colombia se divide en dos: Sistemas de Transmisión Regional (STR) y Sistemas de Distribución Local (SDL), donde los parámetros de calidad de la energía de estos sistemas se miden en términos de corriente, tensión o desviación de frecuencia. Si los parámetros fluctúan fuera de los rangos permitidos por la normatividad colombiana, se podrían ocasionar consecuencias no deseables como: inestabilidad en el sistema, pérdidas de energía, daños de producción y equipos, entre otras.

Las redes de distribución residenciales, comerciales e industriales alimentan un gran número de cargas sensibles como equipos electrónicos, motores de inducción, sistemas de telecomunicaciones. En estos elementos y en los componentes del sistema eléctrico pueden presentarse fallas las cuales afectan la calidad de energía y pueden perturbar la forma de onda de tensión en el sistema, generando fenómenos como elevaciones de tensión (*Swells*), hundimientos de tensión (*Sags*), y fluctuaciones (*Flicker*), entre otros (Christian & Alder, 2010; Sepulveda & Alzate, 2011)

Debido a lo mencionado anteriormente y la necesidad de los usuarios por recibir un óptimo servicio del suministro de energía eléctrica, se han desarrollado dispositivos de compensación que tienen como objetivo principal mitigar perturbaciones de las señales de tensión y/o corriente del sistema de distribución, y por ende brindar una prestación del servicio eficiente y eficaz en cuanto a la calidad de la energía.

Teniendo en cuenta estos efectos de mejora que ofrece la implementación de este tipo de compensadores en la red, se plantea realizar una revisión y simulación del restaurador dinámico

de tensión (DVR, de su nombre en inglés *Dynamic Voltage Restorer*), dispositivo que, mediante la inyección directa de tensión en serie entre la fuente de alimentación y la carga, permite compensar algunas de las perturbaciones que afectan la calidad de la energía en sistemas de distribución.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión sobre el restaurador dinámico de tensión y la simulación de un caso de estudio de su aplicación a una carga en particular.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar los diferentes tipos de fenómenos electromagnéticos que pueden ser mitigados mediante el uso de DVR.
- Realizar una revisión sobre las topologías y estrategias de control empleadas para los DVR.
- Evaluar el funcionamiento del DVR mediante la simulación de una topología y una estrategia de control seleccionada, identificando limitaciones y alcances respecto al mejoramiento de la calidad de la energía en una carga en particular.

2. Marco Teórico

En este capítulo se describen la teoría básica para el desarrollo del proyecto, definiendo aspectos generales como calidad de la energía eléctrica, perturbaciones de la onda de tensión y los dispositivos de compensación usados para mejorar la calidad del servicio.

2.1 Calidad de la Energía Eléctrica

“La calidad de la energía eléctrica se define como el conjunto de características físicas de las señales tensión y corriente de un sistema de potencia, para un tiempo y lugar determinados, que tienen el propósito de satisfacer las necesidades de los usuarios” [NTC 5000 & IEC 61000-4-30].

La función principal de un sistema eléctrico de potencia es abastecer a todos los usuarios de energía eléctrica, con un nivel aceptable de calidad, confiabilidad y seguridad. La calidad hace referencia a la forma de onda, regulación de tensión y frecuencia; la confiabilidad y estabilidad a la continuidad del servicio. Las perturbaciones que se presentan en el sistema son causadas principalmente por cargas no lineales, maniobras en el sistema, y descargas atmosféricas, que afectan la calidad de la energía.

Teniendo en cuenta lo anterior y la necesidad de cumplir con los indicadores de calidad de la energía establecidos en la norma de cada región, se han estudiado y desarrollado dispositivos de compensación cuyo objetivo principal es mitigar perturbaciones de las señales de tensión y/o

corriente que se presenten en los sistemas de distribución, y así, lograr brindar un buen suministro de energía eléctrica a los usuarios finales.

2.2 Perturbaciones de la onda de tensión

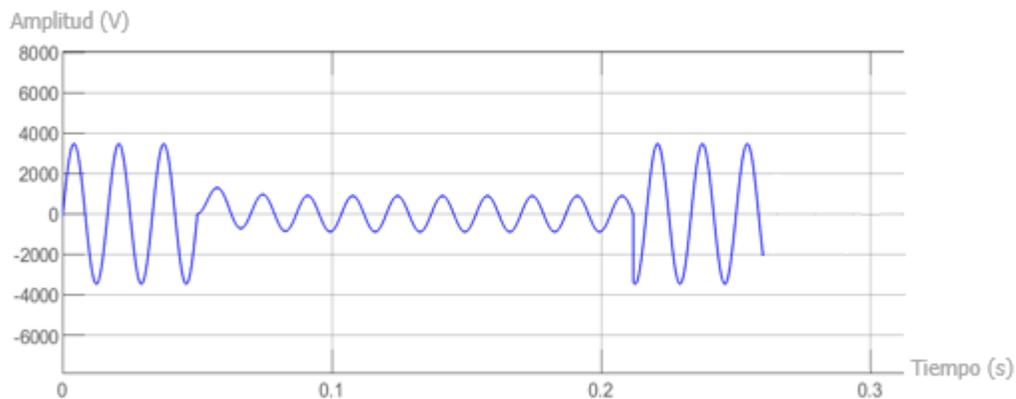
A continuación, se presentan algunos de los fenómenos electromagnéticos que pueden presentarse en los sistemas de distribución.

2.2.1 Hundimientos de tensión (*voltage sag*)

Los hundimientos o caídas de tensión son una disminución en el valor eficaz de la tensión entre 0,1 y 0,9 en p.u. que se presenta en un punto del sistema eléctrico durante 0,5 ciclos a 1 minuto. Se caracterizan por su duración y por la magnitud de la caída (ver figura 1) (ICONTEC, 2008; IEEE Std 1159, 2019; Special, On, & Interference, 2008).

Figura 1.

Hundimiento de tensión

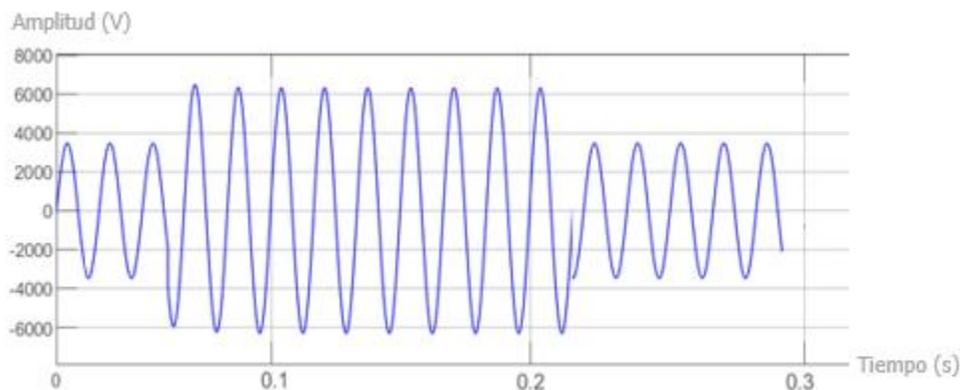


2.2.2 Elevaciones de tensión (voltage swell)

Las elevaciones o aumentos temporales de tensión son un aumento en el valor eficaz de la tensión por encima de 1,1 p.u. y 1,2 p-u. con duración de 0,5 ciclos a 1 minuto. La Figura 2 representan la tensión instantánea y el valor eficaz de la tensión cuando se presenta una elevación temporal de tensión en las fases no falladas durante una falla línea a tierra (ICONTEC, 2008; IEEE Std 1159, 2019; Special et al., 2008).

Figura 2.

Elevación de tensión



2.2.3 Armónicos

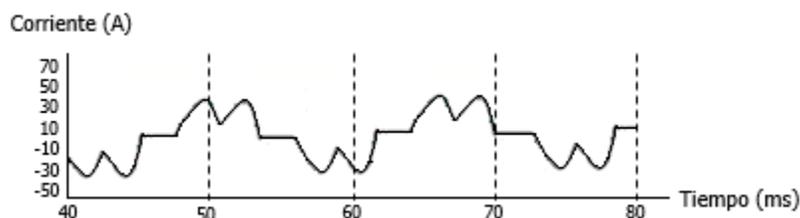
Los armónicos en tensión y/o corriente son señales sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual opera el sistema eléctrico. La frecuencia de operación es denominada frecuencia fundamental, así, la superposición de ondas de tensión y/o corriente a frecuencias diferente a la fundamental se le denominan ondas armónicas que producen distorsión.

Por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, el armónico 3, conocido como tercer armónico tiene una frecuencia de 180 Hz (Ver Figura 3) (IEEE Std 1159, 2019; Roger, 2014).

Los niveles de distorsión de una señal se pueden caracterizar por el espectro total de las componentes armónicas del modelado matemático, obteniendo las magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual, o puede usarse el criterio de distorsión armónica total (THD) (IEEE Std 1159, 2019).

Figura 3.

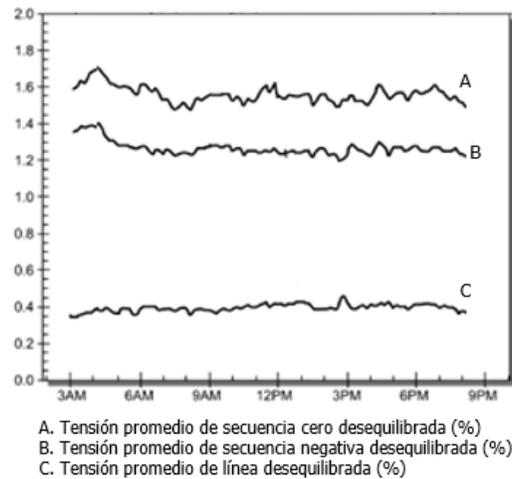
Forma de onda corriente armónica



Nota. Adaptado de (IEEE Std 1159, 2019)

2.2.4 Desequilibrios de tensión

Los desequilibrios de tensión caracterizan la magnitud y asimetrías del ángulo de fase de las tensiones trifásicas en operación de estado estable, se define como la relación entre la componente de secuencia negativa respecto a la de secuencia positiva de la tensión. La principal causa de estos desequilibrios son las cargas monofásicas no balanceadas sobre sistemas trifásicos. (Ver Figura 4) (IEEE Std 1159, 2019).

Figura 4.*Desequilibrio de tensión para un alimentador residencial*

Nota. Adaptado de (IEEE Std 1159, 2019)

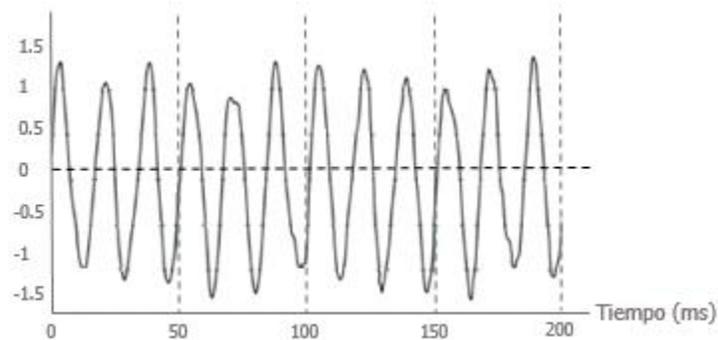
2.2.5 Fluctuaciones de tensión (*Flicker*)

Son fluctuaciones aleatorias o continuas de tensión producidas por cargas que tienen variaciones cíclicas significativas, en especial el componente reactivo. Unas de las causas más comunes de los *flickers* son los hornos de arco. En la Figura 5 se muestra una forma de onda de tensión que produce un parpadeo debido a un horno de arco. (IEEE Std 1159, 2019).

Es un indicador de la intensidad de la molestia provocada por el parpadeo evaluada en un período de 10 minutos (Special et al., 2008).

Figura 5

Ejemplo fluctuaciones de tensión causadas por el funcionamiento de un horno de arco



Nota. Adaptado de (IEEE Std 1159, 2019)

2.3 Dispositivos de compensación

Con la finalidad de mitigar los fenómenos electromagnéticos que afectan la calidad de la energía eléctrica en las redes de distribución, se han desarrollado diversas tecnologías que brindan solución a los problemas presentados y permite mantener los niveles de la calidad de la energía, dentro de las cuales se encuentran los compensadores activos de potencia (*Custom Power Devices*) (Villalobos, 2011).

Los dispositivos de compensación pueden ser conectados en serie, paralelo o un híbrido de estos, además, pueden clasificarse según su funcionalidad: reconfiguración y compensación. Los tipos reconfiguración son usados para limitar la corriente de alimentación, interrumpir el suministro de energía durante una falla, realizar transferencia de carga para proteger esta de hundimientos de tensión o fallas en el sistema. Los tipos compensación son utilizados como filtros activos para mitigación de armónicos, balance de carga, corrección del factor de potencia,

compensación de hundimientos y elevaciones de tensión y regulación de tensión (Villalobos, 2011).

Los dispositivos de compensación son: el compensador dinámico de potencia (DSTATCOM, *Distribution Static Compensator*), el restaurador dinámico de tensión (DVR, *Dynamic Voltage Restorer*) y el acondicionador de calidad de la energía unificado (UPQC, *Unified Power Quality Conditioner*).

Este trabajo se enmarca dentro de los dispositivos *Custom Power* de tipo compensación, en particular el restaurador dinámico de tensión.

3. Restaurador Dinámico de Tensión (DVR)

Es un dispositivo electrónico de conexión serie con el sistema de distribución o una carga de interés, el cual tiene la capacidad de compensar perturbaciones que pueden presentarse en la red eléctrica. La compensación se realiza con la inyección controlada de tensión a la red, calculada mediante el uso de algoritmos de control y sintetizada por un convertidor de potencia (Barvadiya, 2020; Suraya, Irshad, Azeem, Al-Gahtani, & Mahammad, 2020; Villalobos, 2011).

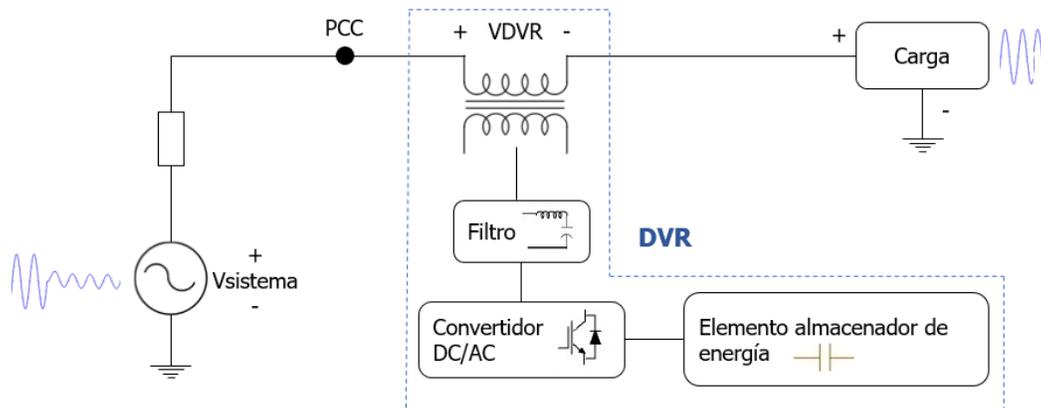
3.1 Principio de operación

Su función básica es la inyección de una tensión controlada en serie con la tensión de alimentación en el punto de acople común (PCC, Point of Common Coupling) a través del

transformador de acoplamiento. El valor de la tensión inyectada es controlado con la finalidad de mitigar algunas de las perturbaciones que se pueden presentar en la tensión de la carga debido a perturbaciones en la tensión de alimentación. Esto quiere decir que idealmente, cualquier diferencia de tensión con respecto a la tensión de servicio, causada por perturbaciones en el alimentador AC, deberá ser compensada por una tensión equivalente generada por el convertidor e inyecta a la red por medio del transformador (ver Figura 6) (Radadiya, Vibhakar, Rajani, & Bhayani, 2013; Ramachandaramurthy, Zhan, Barnes, & Jenkins, 2000; Villalobos, 2011).

Figura 6.

Principio de funcionamiento del DVR



Nota. Adaptado de (Villalobos, 2011)

En las opciones de compensación para las que fue diseñado el DVR se encuentran los hundimientos y elevaciones de tensión, armónicos y desequilibrios de tensión, limitaciones de corrientes de fallas, entre otras. Para que el DVR sea capaz de compensar estas perturbaciones en la onda de tensión, debe ser capaz de generar y/o absorber potencia activa o reactiva desde o hacia el sistema, este intercambio depende de la topología y estrategia de control implementadas

(Barvadiya, 2020; Carrillo & Tirira, 2019; Mansor, Othman, Musirin, & Noor, 2019; P. Joshi & J. Shah, 2015; Ramachandaramurthy et al., 2000; Ramasamy, Iyer, Ramachandaramuthy, & Mukerjee, 2005; Wasnik, Shaha, & Ghutke, 2019).

3.2 Topologías

La configuración del DVR en general consta de una unidad de almacenamiento, un filtro pasivo, un convertidor y un transformador de inyección o acoplamiento, y su topología depende de estos elementos (Barvadiya, 2020; Ramachandaramurthy et al., 2000; Wasnik et al., 2019).

3.2.1 Unidad de almacenamiento de energía

El propósito de la unidad de almacenamiento es suministrar la energía necesaria al convertidor para generar las tensiones de referencia a través de una barra de continua y así inyectar la potencia necesaria cuando se requiera. Las baterías, los condensadores y los supercondensadores son los tipos más comunes de dispositivos de almacenamiento de energía empleados en esta aplicación. Las baterías son comúnmente las más utilizadas.

El almacenamiento de energía se puede dar de dos formas: la primera usa energía almacenada para suministrar la energía entregada y el segundo no requiere almacenamiento de energía interna significativo, en su lugar la energía es tomada de la red durante la perturbación presentada (Barvadiya, 2020; Jayakumar & Devarajan, 2019; Radadiya et al., 2013; Wasnik et al., 2019).

Las topologías que puede presentar el DVR teniendo en cuenta la unidad de almacenamiento de energía se explican brevemente a continuación:

Topologías con energía tomada de la barra de continua:

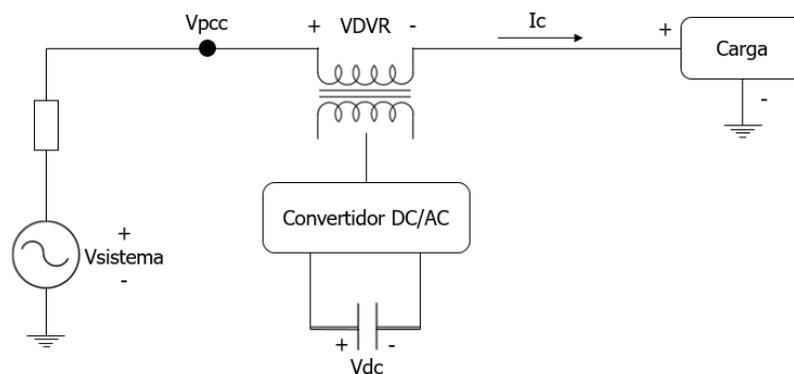
Esta topología de almacenamiento es necesaria para perturbaciones como hundimientos de tensión que sobrepasen el 40% de la tensión nominal en el punto de acoplamiento común (Christian & Alder, 2010).

a) Tensión en la barra de continua no controlada

Se manejan condensadores como almacenadores de energía y un convertidor DC/AC con una configuración sencilla (Ver Figura 7). Durante hundimientos severos, la mayor parte de esta energía almacenada no es usada debido a que el convertidor entra en sobre-modulación al tratar de inyectar la tensión más alta posible (Christian & Alder, 2010; P. Joshi & J. Shah, 2015).

Figura 7.

Topología con tensión en la barra de continua no controlada



Nota. Adaptado de (Christian & Alder, 2010)

La energía en la barra de continua se calcula mediante la Ec. 1, donde C_{DC} es el valor de la capacitancia del condensador y V_{DC} es la tensión nominal en la barra de continua (Sepulveda & Alzate, 2011).

$$E_{almacenada} = \frac{1}{2} C_{DC} V_{DC}^2 \quad Ec. 1$$

Debido a que la tensión en la barra de continua decrece exponencialmente durante la compensación, lo cual reduce las posibilidades de compensar perturbaciones de larga duración, la energía entregada por el DVR será:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C_{DC} (V_{DC}^2 - V_{DCmínima}^2) \quad Ec. 2$$

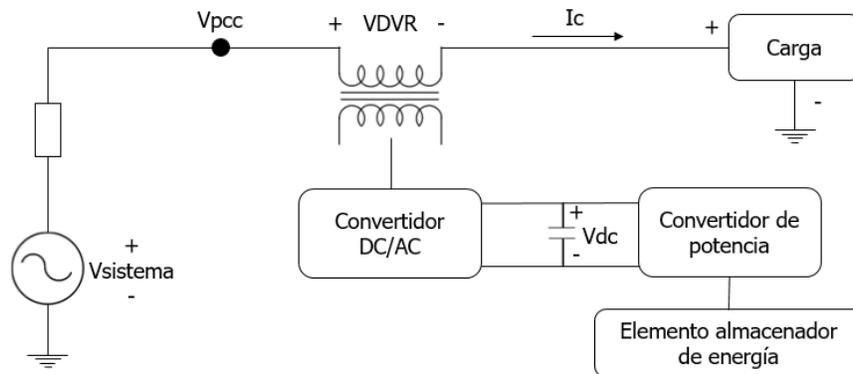
Donde $V_{DCmínima}$ es la mínima tensión admisible en la barra de continua para que el DVR pueda funcionar en condiciones óptimas ante perturbaciones.

b) Tensión en la barra de continua controlada

La energía almacenada puede ser utilizada en el DVR por medio de un convertidor DC/DC de alta potencia externo a la red (Ver Figura 8). Lo que se logra es mantener la tensión en la barra de continua constante, ya que la energía almacena se transfiere de un gran almacenador a uno pequeño en la barra continua a través del convertidor de alta potencia durante la perturbación en la onda de tensión. Su desempeño en los sistemas, a comparación de la topología con tensión en la barra de continua no controlada, es mejor, pero el costo de implementación es alto debido al convertidor de alta potencia (Christian & Alder, 2010; P. Joshi & J. Shah, 2015).

Figura 8.

Topología con tensión en la barra de continua controlada.



Nota. Adaptado de (Christian & Alder, 2010)

Topologías con energía tomada de la red:

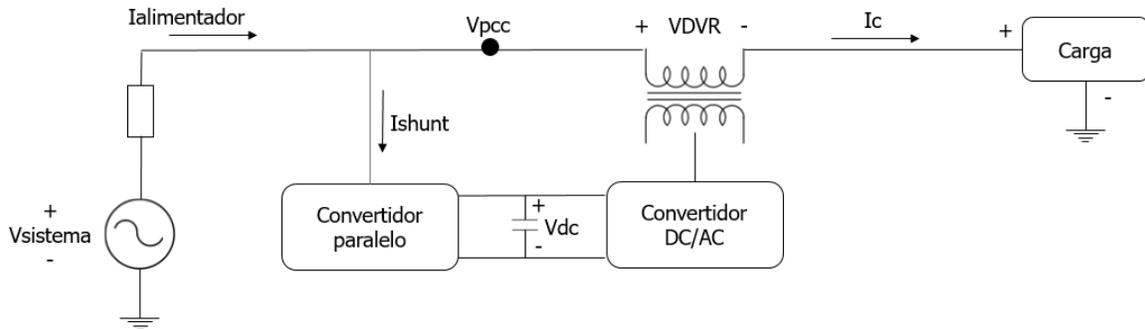
Para esta topología, la potencia necesaria para mantener la carga en su condicional nominal de operación es obtenida por el aumento de la corriente de alimentación que es transportada al convertidor paralelo e inyecta una tensión de compensación por medio del convertidor. Permite compensar perturbaciones de mayor duración, sin embargo, tiene la desventaja de tomar más corriente de falla de la necesaria, lo que implica percibir una caída de tensión mayor en lo que se encuentre conectado aguas arriba (Christian & Alder, 2010).

a) Convertidor en paralelo conectado a la fuente de alimentación

El convertidor paralelo es el encargado de cargar el condensador al valor de la tensión de alimentación en el momento de la perturbación (ver Figura 9 **Figura 30**). Durante los hundimientos o elevaciones, la tensión V_{DC} puede caer o aumentar de forma directa con la perturbación.

Figura 9.

Topología con convertidor en paralelo conectado a la fuente de alimentación



Nota. Adaptado de (Christian & Alder, 2010)

La tensión de compensación para hundimientos de tensión está dada por:

$$V_{compensación} = \varepsilon V_{carga}$$

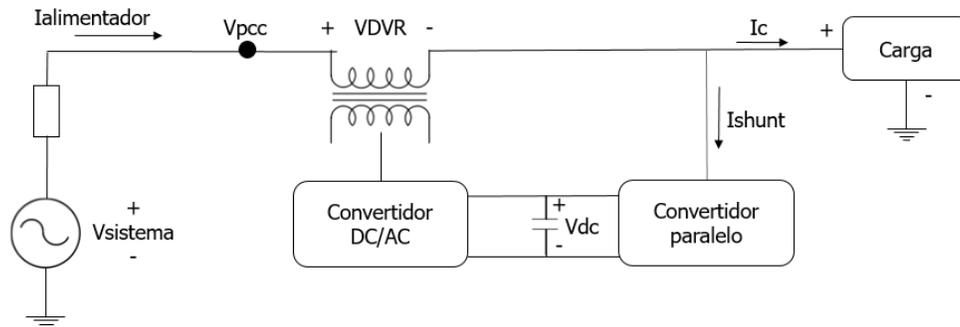
Donde ε es el aumento o reducción de la tensión eficaz de alimentación. Para las elevaciones la capacidad de alimentación no está limitada, mientras que para los hundimientos esta limitado a compensar máximo un 50% de la tensión nominal de la carga (P. Joshi & J. Shah, 2015).

b) Convertidor en paralelo conectado en el lado de la carga

Para este caso la tensión de entrada del convertidor paralelo es controlada por los límites del convertidor DC/AC, y la tensión V_{DC} se puede mantener constante a partir de la inyección suficiente de V_{DVR} , lo que quiere decir que la amplitud de la tensión de carga (V_{carga}) es aproximadamente igual a la amplitud de la tensión en la barra de continua (V_{DC}). Si el convertidor se alimenta del lado de la carga, está puede sufrir las corrientes no lineales generadas por el convertidor (Ver Figura 10) (Christian & Alder, 2010; P. Joshi & J. Shah, 2015).

Figura 10.

Topología con convertidos en paralelo conectado en el lado de la carga.



Nota. Adaptado de (Christian & Alder, 2010)

3.2.2 Filtro pasivo

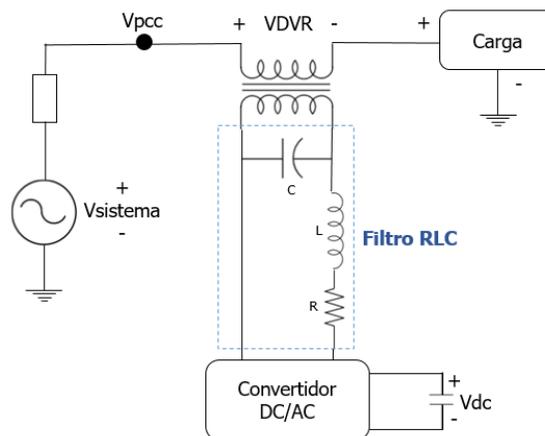
La tarea principal del filtro pasivo es mantener el contenido de armónicos de tensión generados por el convertidor DC/AC en los niveles permisibles, es decir, eliminar los armónicos de conmutación de alta frecuencia (Barvadiya, 2020; Radadiya et al., 2013; Wasnik et al., 2019).

El filtro puede situarse en el lado de alta, como en el de baja tensión del transformador de acople. La ventaja de situar el filtro en el lado de baja del transformador es que las corrientes armónicas no circulan por los devanados del transformador, mientras que, si el filtro se sitúa en el lado de alta del transformador, su resistencia e inductancia pueden hacer parte del filtro siendo necesario solamente un capacitor teniendo en cuenta que las corrientes armónicas circulan por el transformador y esto debe considerarse en el dimensionamiento del mismo (Christian & Alder, 2010).

En la Figura 11 se puede observar el esquema del filtro en el lado de baja del transformador o en el lado del convertidor. El filtro pasivo está compuesto por un condensador, una bobina y una resistencia que representa la resistencia asociada a la bobina y las pérdidas en el inversor.

Figura 11.

DVR con filtro en el lado de baja del transformador.

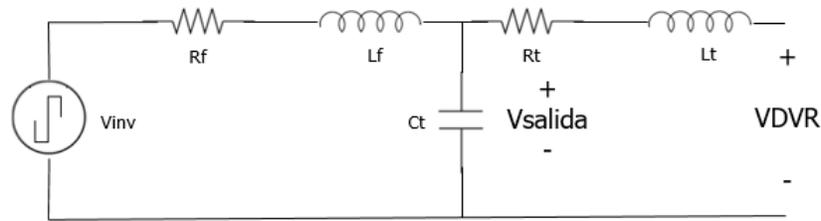


Nota. Adaptado de (Christian & Alder, 2010)

Teniendo en cuenta esta topología el circuito equivalente del filtro en el lado de baja del transformador es:

Figura 12.

Circuito equivalente con filtro en el lado de baja del transformad.



Nota. Adaptado de (Christian & Alder, 2010)

Donde V_{inv} es la tensión generada por el convertidor y R_T, L_T son la resistencia y la bobina del transformador referidas al lado de baja. La función de transferencia $H(s)$ de esta topología y la frecuencia de sintonización ω para el filtro son:

$$H(s) = \frac{1}{(s^2 L_f C_f) + (s R_f C_f) + 1}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

3.2.3 Convertidor

El convertidor o también conocido como inversor DC/AC se utiliza para convertir la tensión de continua suministrada por el dispositivo de almacenamiento de energía a una tensión de alterna con magnitud y frecuencia deseada. Por lo general, la tensión alterna obtenida es una onda cuadrada con un alto contenido de armónicos, por este motivo la necesidad del filtro. Los dispositivos de conmutación pueden ser MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect*),

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) y GTO (*Gate Turn-off Thyristors*) (Radadiya et al., 2013; Ramachandaramurthy et al., 2000; Wasnik et al., 2019).

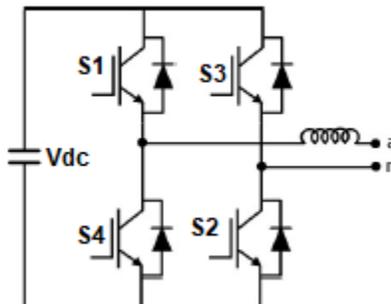
El convertidor se puede clasificar en: monofásico (dos hilos) y trifásico de tres y cuatro hilos.

Convertidor monofásico

Una de las topologías más empleadas en sistemas monofásicos es el convertidor en puente completo o puente H, el cual está conformado por dos ramas de transistores de potencia (S_1 a S_4), cada transistor con un diodo en anti-paralelo. Cuando S_1 y S_2 se activan simultáneamente la tensión de salida en el lado de AC del inversor es V_{DC} , si por el contrario se activan S_3 y S_4 la tensión es $-V_{DC}$ (Ver Figura 13) (Christian & Alder, 2010).

Figura 13.

Convertidor monofásico de puente completo,



Nota. Adaptado de (Villalobos, 2011)

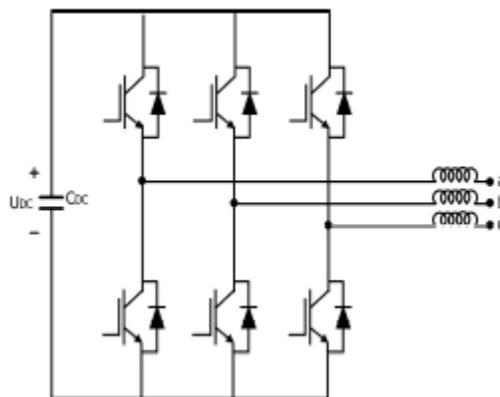
Convertidores trifásicos

c) Convertidor trifásico de tres hilos

Se basa en un inversor de tres ramas (Ver Figura 14). La desventaja de esta configuración radica en que la sumatoria de las corrientes por los tres hilos debe ser igual a cero, lo que impide compensar desequilibrios de origen homopolar. No obstante, permite aprovechar al máximo la totalidad de la tensión en el lado de continua (Villalobos, 2011).

Figura 14.

Convertidor trifásico de tres hilos,



Nota. Adaptado de (Villalobos, 2011)

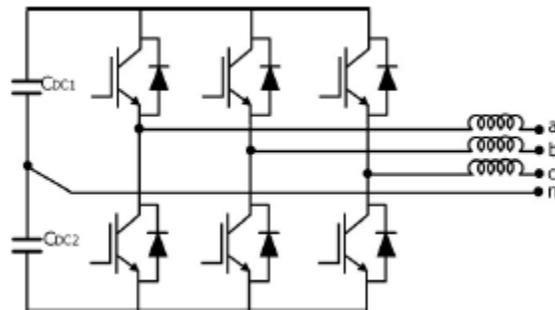
d) Convertidor trifásico con condensador repartido

Cuenta con dos condensadores en el lado de continua donde el punto medio entre estos dos es conectado al neutro de la carga, lo que permite el paso para componente de secuencia cero de la corriente. Es fácil de controlar debido a que permite desacoplar las tres ramas y operar como si fueran monofásicas, a pesar de, sus desventajas son la reducción de la capacidad de inyección del

inversor y el desbalance que puede generar la componente de secuencia cero sobre las tensiones en los condensadores (Ver Figura 15) (Villalobos, 2011).

Figura 15.

Convertidor trifásico con condensador repartido,



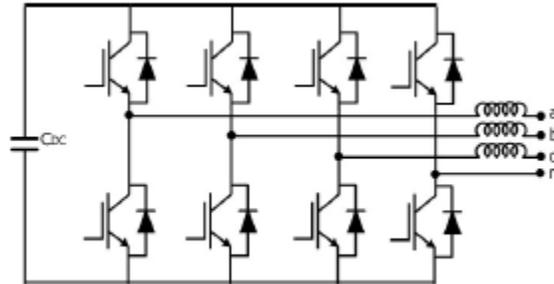
Nota. Adaptado de (Villalobos, 2011)

e) Convertidor puente completo con cuatro ramas

Se requiere de un solo condensador, tres ramas conectadas a las fases del sistema y la cuarta rama es conectada al neutro de la carga (Ver Figura 16). Esta topología permite un aprovechamiento máximo de la tensión del lado de continua y facilita generar altos niveles de tensión de secuencia cero (Villalobos, 2011).

Figura 16.

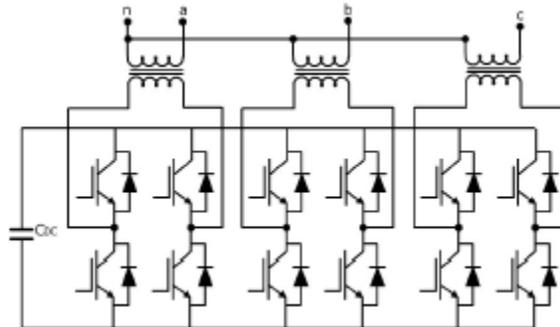
Convertidor puente completo con cuatro ramas



Nota. Adaptado de (Villalobos, 2011)

f) Tres puentes completos monofásicos y cuatro hilos

En esta topología cada puente monofásico es conectado a la red por medio de un transformador, el cual permite aislar los inversores y previene posibles cortos en el condensador de almacenamiento de energía. Permite mayor capacidad de generación de corrientes de todas las secuencias e incrementa la confiabilidad del compensador, además, se pueden conseguir tensiones de tres niveles a la salida, sin embargo, todo esto hace que sea una topología costosa (Ver Figura 17) (Villalobos, 2011).

Figura 17.*Convertidor tres puentes completos monofásicos cuatro hilos*

Nota. Adaptado de (Villalobos, 2011)

Convertidores multinivel

Los convertidores multinivel son sistemas de conversión de potencia compuestos por semiconductores de potencia y fuentes de tensión en continua capacitivas, que cuando se conectan y controlan correctamente, pueden generar una forma de onda de tensión de múltiples niveles con frecuencia, fase y amplitud variable y controlable. La forma de onda escalonada se sintetiza seleccionando diferentes niveles de tensión generados por la conexión adecuada de la carga a las diferentes fuentes DC capacitivas, la cual se realiza mediante la conmutación adecuada de los semiconductores de potencia. Existen muchas formas de combinar semiconductores de potencia y fuentes de DC capacitivas para generar tensiones de salida multinivel. Sin embargo, solo algunos de ellos han cobrado importancia desde un punto de vista práctico (José et al., 2009).

3.2.4 Transformador de inyección

El transformador de inyección o acoplamiento tiene como función elevar e inyectar la tensión de compensación generada en la salida del convertidor y proporcionar aislamiento entre el DVR y la red de distribución (Barvadiya, 2020; Radadiya et al., 2013; Ramachandaramurthy et al., 2000; Wasnik et al., 2019). Si el transformador no es diseñado correctamente, al inyectar la tensión se puede generar saturación en el transformador y causar un funcionamiento erróneo del DVR.

Los aspectos a tener en cuenta para el diseño del transformador de inyección para DVR son: pérdidas de potencia activa mínimas, corriente de carga lineal o no lineal, y la frecuencia máxima de conmutación del inversor para que el transformador emita las tensiones de alta frecuencia (Christian & Alder, 2010).

3.3 Técnicas de compensación

La clasificación de las técnicas de compensación principalmente depende de la tensión de falla que se va a compensar, condiciones de carga, y la potencia del DVR. Para hundimientos y elevaciones de tensión con saltos de ángulo de fase cero, la potencia del DVR será:

$$P_{DVR} = \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1} \right) P_{carga}$$

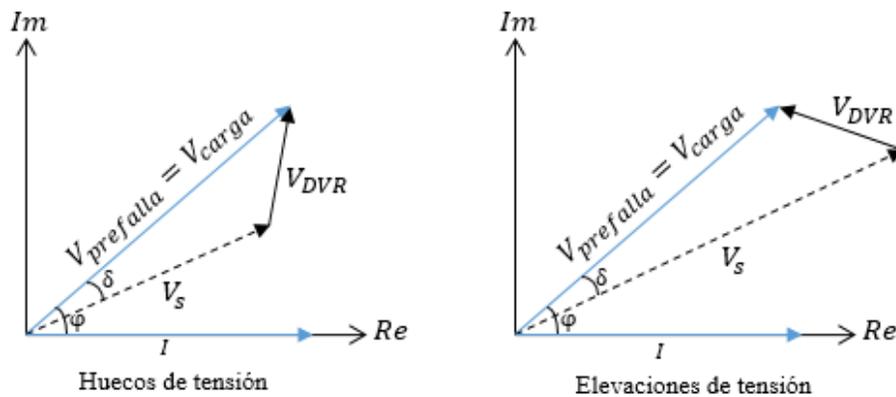
Donde, V_1 y V_2 son las tensiones de línea en condición normal de operación y falla respectivamente (P. Joshi & J. Shah, 2015; Wasnik et al., 2019).

3.3.1 Compensación pre-falla

Este método se basa en la técnica de seguimiento constante. El DVR se sincroniza con la tensión de alimentación y si se detecta alguna perturbación en esta, se inyecta un valor de tensión que es igual a la diferencia entre la tensión de alimentación y la caída o elevación de tensión presentada, manteniendo así la tensión en los terminales de la carga igual al de la tensión previa a la falla. Con esta técnica se logra la compensación tanto en magnitud como en ángulo de fase (Christian & Alder, 2010; P. Joshi & J. Shah, 2015; Ramachandaramurthy et al., 2000).

Figura 18.

Diagramas fasoriales pre-falla.



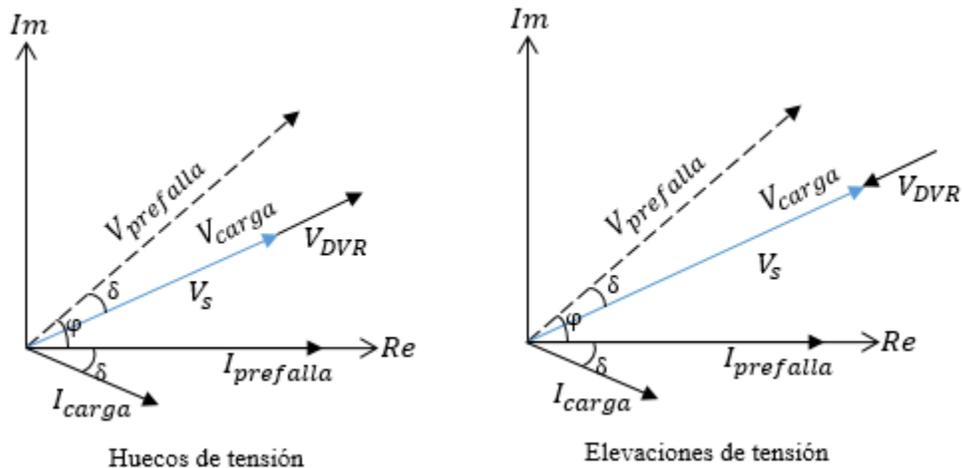
De acuerdo a los diagramas fasoriales de la Figura 18, $V_{presafalla}$, V_s y δ representan la tensión de pre-falla en la carga, tensión de alimentación durante la falla y salto de fase de la tensión de alimentación, respectivamente.

3.3.2 Compensación en fase

La tensión compensada está en fase con la tensión de alimentación durante la falla, (ver Figura 19), independientemente de la corriente de carga y la tensión de pre-falla. Mediante este método se mantiene constante la magnitud de la tensión en la carga, pero el salto de fase no es compensado. La ventaja es que la magnitud de la tensión de compensación es menor para la condición de caída de tensión, en comparación con otras técnicas de compensación. (P. Joshi & J. Shah, 2015; Ramachandaramurthy et al., 2000; Wasnik et al., 2019).

Figura 19.

Diagramas fasoriales compensación en fase



De acuerdo con los diagramas fasoriales, V_{carga} , V_s y δ representan la tensión en la carga, tensión de alimentación durante la falla y salto de fase de la tensión de alimentación, respectivamente.

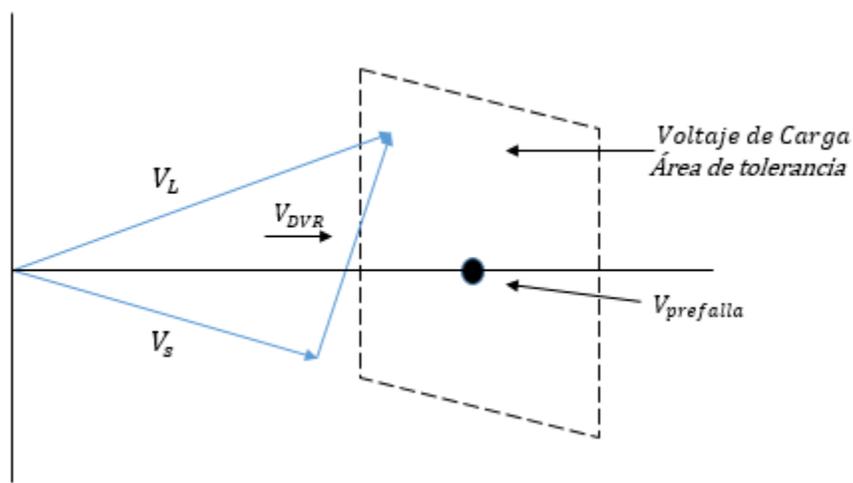
3.3.3 Tolerancia de tensión

Este método se ocupa de establecer los valores de tensión en un rango que mantenga el sistema en estado de operación normal. Es decir, que una pequeña cantidad de caída de tensión y un leve salto de ángulo de fase es permisible en el sistema. Si la magnitud de la tensión se sitúa entre el 90-110% de la tensión nominal y el 5-10% del estado nominal, ello no afectará a las características de rendimiento de la carga. Por lo tanto, tanto la magnitud como la fase son los parámetros de control, los cuales se pueden lograr controlar mediante una pequeña inyección de energía. En última instancia, se requerirá un pequeño dispositivo de almacenamiento de energía para esta topología.

De acuerdo con el diagrama fasorial de la Figura 20, V_L y V_s representan la tensión de la línea de alimentación y la tensión durante la falla, respectivamente (P. Joshi & J. Shah, 2015; Ramachandaramurthy et al., 2000).

Figura 20.

Diagramas fasoriales tolerancia de tensión

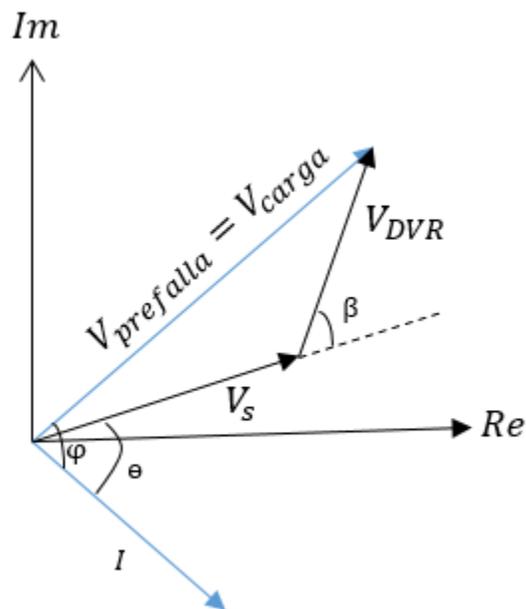


3.3.4 Compensación avanzado en fase

La compensación avanzada en fase es otra solución para minimizar la inyección de potencia activa del DVR. Este método se basa en la compensación del ángulo de fase. La tensión del DVR se inyecta con un ángulo de avance de fase β con respecto a la tensión de caída. En comparación con la compensación en fase, la magnitud de la tensión del DVR requerido en este método es mayor (Ver Figura 21) (Al-Mathnani, Shareef, Mohamed, Members, & Hannan, 2010; P. Joshi & J. Shah, 2015; Remya, Parthiban, & Nandakumar, 2018).

Figura 21.

Diagramas fasoriales compensación avanzado en fase



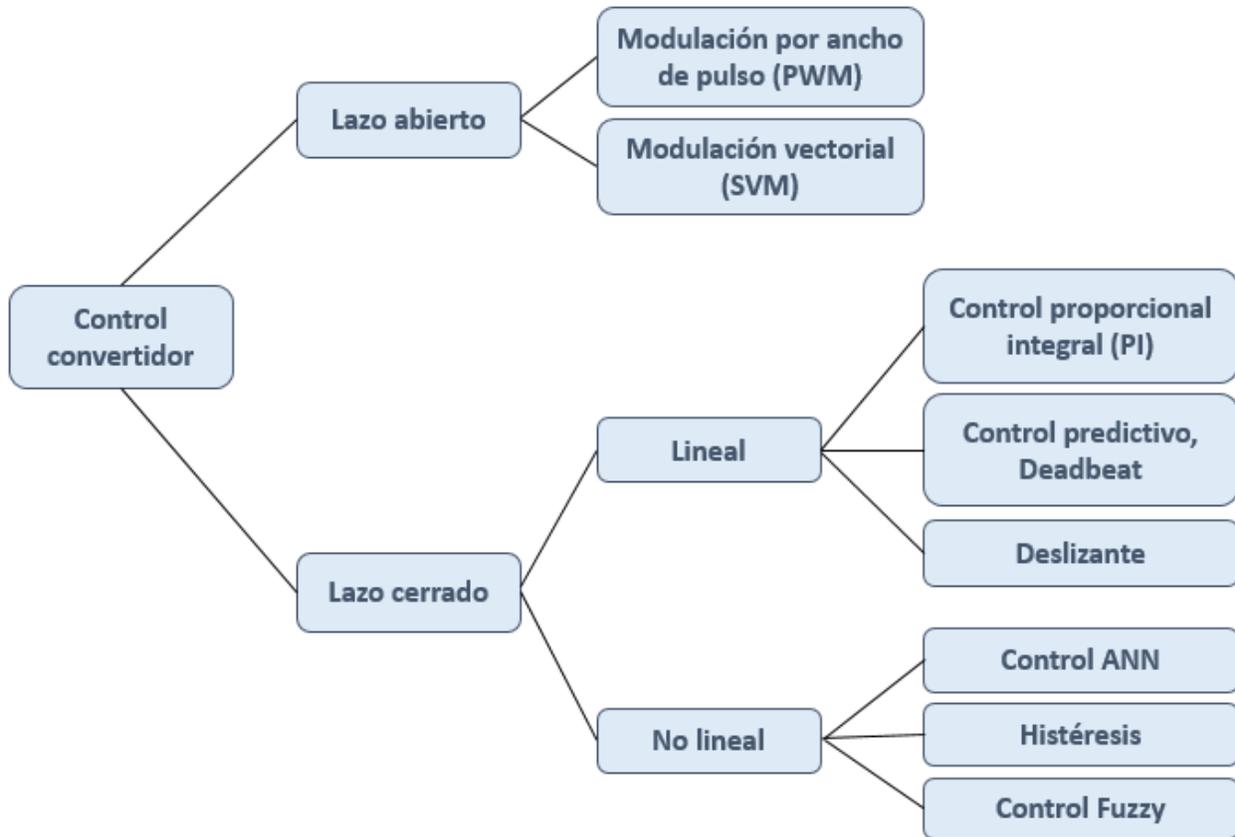
3.4 Control del convertidor DC/AC

El fin de implementar las estrategias de control del convertidor DC/AC es poder obtener las señales de conmutación de los dispositivos semiconductores del convertidor, para que así las señales generadas por el convertidor sigan con el menor error las señales de referencia.

Estas técnicas se clasifican en dos tipos: técnicas de control de lazo abierto y técnicas de control de lazo cerrado. Las de lazo abierto suelen consistir en técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) o modulación vectorial. Por otra parte, las de lazo cerrado mantienen la señal de salida del sistema en un valor cercano a la señal de referencia que se desea mediante un proceso de retroalimentación, son implementadas cuando existe incertidumbre en el sistema (perturbaciones externas). Los controladores de lazo cerrado se clasifican en lineales y no lineales según su modo de funcionamiento (Christian & Alder, 2010; Villalobos, 2011). Las principales técnicas de control usadas en el DVT se muestran en la Figura 22:

Figura 22.

Técnicas de control para el convertidor DC/AC en el DVR



A continuación, se hace una revisión de las principales técnicas de control lineal y no lineal de lazo cerrado, con el fin de proporcionar al DVR versatilidad ante las compensaciones de hundimientos o elevaciones de tensión.

Controladores lineales

Los controladores lineales separan el cálculo de la tensión de salida del convertidor y la determinación de las señales de conmutación del inversor. La tensión de salida que el convertidor debe generar es obtenida desde de la señal de error, una vez calculadas éstas deben ser sintonizadas por medio de técnicas de lazo abierto principalmente las basadas en ancho de pulso o modulación

vectorial. Entre los más usados son: el controlador proporcional Integral (PI) y el control de tiempo de establecimiento finito (Deadbeat) (Villalobos, 2011).

Controlador Proporcional Integral (PI)

Es usado para estimar la tensión que lleva el error de la señal de referencia hasta un el valor cero o nulo. Una vez calculadas las señales de tensión de control del convertidor para el seguimiento del tensión de referencia, se sintonizan estas por medio un control en lazo abierto, siendo la más usada la modulación por ancho de pulso (PWM) (Christian & Alder, 2010).

Control de tiempo de establecimiento finito (Deadbeat)

El Deadbeat es un control predictivo, el cual tiene por objetivo predecir, a partir de la información que conoce del sistema modelado, el valor que debe tomar la señal generada por el convertidor, para que de esta forma la tensión generada logre alcanzar el valor de referencia al finalizar del periodo de muestreo. Con respecto a la técnica basada en PI e histéresis, esta estrategia presenta un mejor comportamiento dado que arroja respuestas más precisas (Villalobos, 2011).

Controladores no lineales

Los controladores no lineales obtienen de forma directa las señales de conmutación del inversor, a través de la señal de error. Dentro de los más implementados están el control de histéresis y la modulación delta.

Control de histéresis

Está basado en la obtención de las señales de conmutación del inversor. Compara la señal de error con una banda de histéresis fija, con la finalidad de mantener el error en el límite inferior y superior de la banda. Es una técnica sencilla, robusta y fácil de implementar. Una banda pequeña permite pequeños errores de seguimiento, pero esto, conlleva a la generación de altas frecuencia

de conmutación que los convertidores no pueden seguir. Además, la frecuencia de modulación de esta estrategia es variable, lo cual dificulta el diseño del filtro de conexión a la red. De igual forma, existen propuestas que permiten vencer estas limitaciones como variar el ancho de la banda de histéresis para encontrar frecuencias de conmutación fijas (Villalobos, 2011).

3.5 Estrategias para obtener la señal de referencia

La señal de referencia es aquella que el DVR debe generar para compensar las perturbaciones de interés: elevaciones, hundimientos o armónicos de tensión. Según la estructura de control aplicada, la generación de la señal de referencia se puede realizar mediante la medición de la tensión de alimentación del sistema en el punto común o el control de la tensión de salida (Christian & Alder, 2010; Petit Suárez, 2012; Villalobos, 2011).

Para cualquier caso es necesario que el método que calcula la señal de referencia del DVR, detecte el principio y final de la perturbación, y también determine que tan profunda o elevada fue la perturbación y el ángulo de fase asociado a esta. Además, sin importar la técnica de control utilizada, el algoritmo debe estar en la capacidad de extraer la señal de referencia con el menor error y operar adecuadamente (Christian & Alder, 2010; Petit Suárez, 2012; Villalobos, 2011).

Los métodos para el cálculo de la señal de referencia del DVR se clasifican en los que operan en el dominio de la frecuencia y los que operan en el dominio del tiempo. A continuación, se presentan algunas de estas estrategias:

Dominio de la frecuencia

Los métodos de detección en el dominio de la frecuencia se basan en el análisis de Fourier que permite a una función ser transformada del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y

viceversa, lo que permite analizar las señales distorsionadas de corriente o tensión (Serrano-Domínguez, 2014; Villalobos, 2011). Por medio de esta estrategia es posible extraer la componente fundamental de la señal distorsionada y obtener la señal de referencia sin contenido de armónicos en tensión del nodo de acople. Su principal desventaja radica en que la frecuencia de la señal debe ser estimada cuando esta no es conocida, para lo cual se debe implementar un lazo de seguimiento de fase (Phase Locked Loop – PLL). Sus tiempos de respuesta son lentos. (Petit Suárez, 2012; Singh, AlHaddad, & Chandra, 1999; Villalobos, 2011). Estas técnicas suelen emplearse para la compensación de armónicos, pero no son usadas para compensación de hundimientos o elevaciones de tensión.

Dominio del tiempo

Este análisis de control trabaja completamente en el dominio del tiempo por lo cual realiza el cálculo instantáneo de la señal de referencia. Hacen parte de esta estrategia las teorías de potencia instantánea, transformada de Park, transformada de Clarke, teoría componente simétricas instantáneas y las basadas en filtros sintonizados y adaptativos (Petit Suárez, 2012).

Teoría del marco de referencia síncrono (dq0 o Park)

La transformación de Park tiene como objetivo convertir los valores instantáneos de un sistema trifásico (abc), a un sistema de referencia de valores constantes en un estado de régimen permanente (dq0). Teniendo en cuenta lo anterior, las tensiones del marco de referencia abc son transformadas al marco de referencia dq0. El marco de referencia está sincronizado a la frecuencia fundamental de la tensión de operación del sistema, haciendo que la componente de secuencia positiva de la tensión a frecuencia fundamental se refleje en el dominio dq0 como componente de continua, mientras que, las otras dos componentes varían con el tiempo. En principio, la compensación a partir de esta teoría, toma que la tensión de operación es igual a la componente de

secuencia positiva de la tensión fundamental de la carga, haciendo que sea una componente fácil de filtrar en el marco dq0 (Christian & Alder, 2010; Villalobos, 2011).

Teoría componente simétricas instantáneas

Esta compensación utiliza la matriz de transformación de componentes simétricas, con la finalidad de descomponer las tensiones trifásicas, en sus respectivas componentes de secuencia positiva, negativa y cero, y calcular las fases del sistema. Por medio de esta descomposición se pueden implementar estrategias que compensen armónicos y desequilibrios en las tensiones (Villalobos, 2011).

Filtros sintonizados y adaptativos

En este campo se ha propuesto diferentes estrategias que permiten filtrar señales distorsionadas y desbalanceadas para obtener las componentes a la frecuencia fundamental y a su vez las componentes de secuencia (Villalobos, 2011). Entre los algoritmos de esta categoría se resalta el filtro de Kalman por su capacidad de filtrado y rápida convergencia.

PLL (Phase Locked Loop)

Es un sistema de bucle cerrado que controla un oscilador interno con el fin de seguir el tiempo de la señal periódica externa a través del circuito de retroalimentación. Esta señal externa puede ser la tensión de red a la que será conectado el convertidor de potencia. La finalidad del oscilador interno es obtener una estimación del ángulo de fase de esta tensión y de esta manera sincronizar el convertidor a la red. Así el objetivo del PLL es determinar el vector de tensión de la componente de secuencia positiva en magnitud y fase, además, de la frecuencia de red de una manera oportuna (Rey, 2013; Serrano-Domínguez, 2014).

4. Metodología

En este capítulo se describe la metodología empleada para evaluar el funcionamiento del DVR en una carga en particular.

Inicialmente se recolecta la información requerida para llevar a cabo la evaluación. En esta recolección se establecen las especificaciones técnicas y consideraciones que se tomaron en cuenta para la simulación del modelo del DVR en operación en el sistema de distribución. Además, se procede a la construcción del modelo del DVR en el software Simulink de MATLAB con base en la información previamente establecida. Finalmente se ejecutan los estudios para evaluar el funcionamiento del DVR, correspondiente al análisis de hundimientos y elevaciones.

A continuación, se describen las características de la carga seleccionada y de los elementos que conforman el DVR.

Carga Implementada

Para el evaluar el comportamiento del DVR se selecciona una carga trifásica desbalanceada con un modelo de carga Y-PQ, con las capacidades por fase mostradas en la Tabla 1:

Tabla 1.

Carga seleccionada para evaluar el comportamiento del DVR

Nodo	Modelo carga	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
Carga seleccionada	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Además, la fuente de alimentación de la carga corresponde a un alimentador de media tensión, con tensión nominal de 4.16 kV (4160 V).

Topología utilizada

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 2, donde se presentan los componentes, topologías y diferentes estrategias que se pueden implementar para modelar el DVR, se define a continuación el modelo que representa el funcionamiento y la compensación de hundimientos y elevaciones de tensión del DVR.

Para la implementación se selecciona como ya sabemos una carga trifásica desbalanceada tipo Y, y se instala un inversor monofásico para cada línea, los cuales en conjunto conforman un DVR trifásico en topología “convertidor tres puentes completos monofásicos cuatro hilos” (Ver Figura 14), donde la fuente de DC sería una batería para los tres puentes completos monofásicos.

La selección del modelo a utilizar en esta monografía se realizó de acuerdo a la bibliografía encontrada durante el estudio del arte, donde se realizaban previamente simulaciones y en las cuales se estudiaban diferentes combinaciones posibles en las técnicas de control del convertidor, estrategias de compensación y tipos de filtro, seleccionando así para este proyecto aquella que permite analizar las características generales de un DVR en cuanto a capacidad de compensación

El esquema de control y el circuito de potencia para el modelo del DVR se muestran en la Figura 23 y Figura 24, respectivamente.

Figura 23.

Esquema de control DVR.

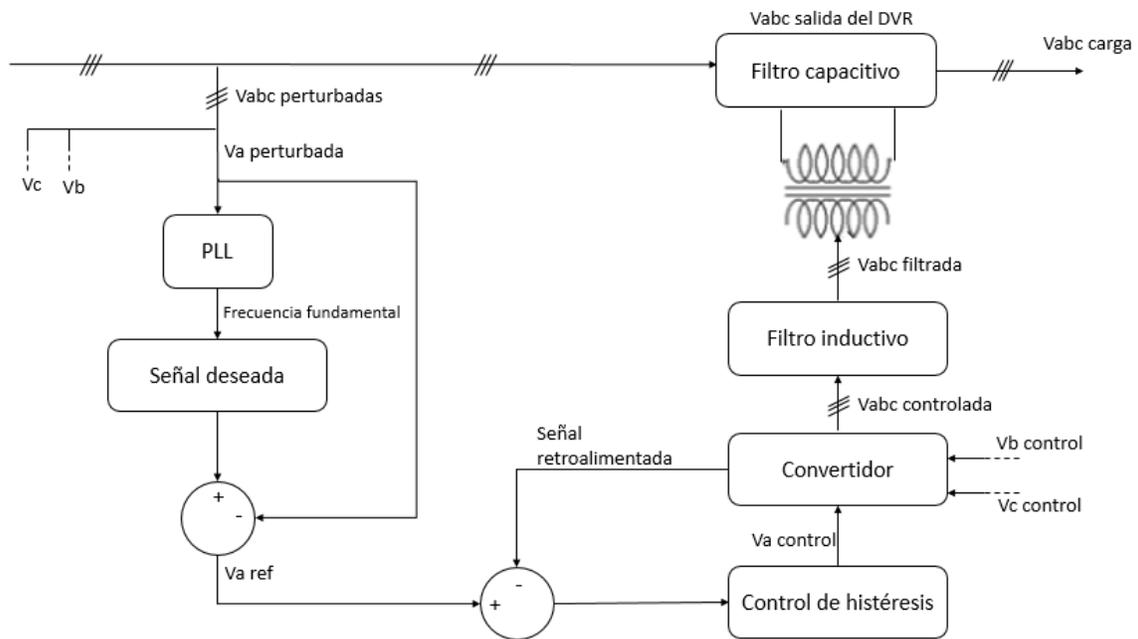
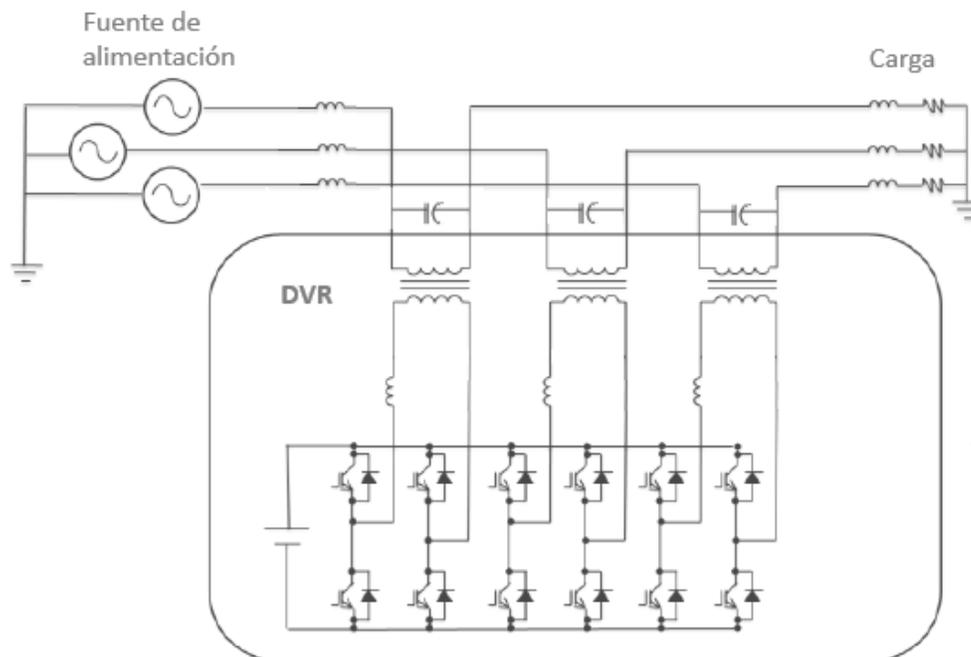


Figura 24.

Circuito de potencia DVR



A continuación, en la Figura 25 se muestra el diagrama circuital implementado en Simulink para la simulación de la topología del DVR seleccionada. La topología de cada DVR se resume en el uso de una batería como unidad de almacenamiento, la cual comparten, un filtro pasivo conformado por un capacitor y un inductor, un convertidor monofásico puente completo con control por histéresis (ver Figura 26), un transformador de acoplamiento, y un sistema de medición para hacer el debido control.

Figura 25.

Conexiones de DVR a la carga seleccionada.

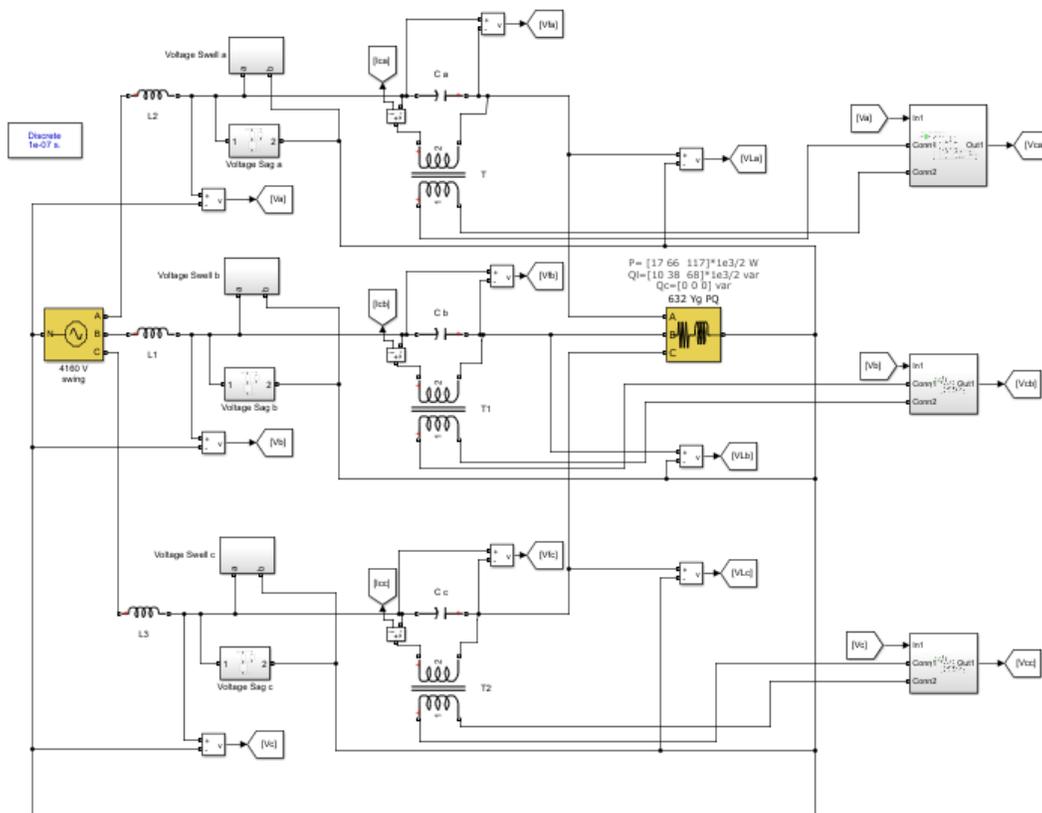
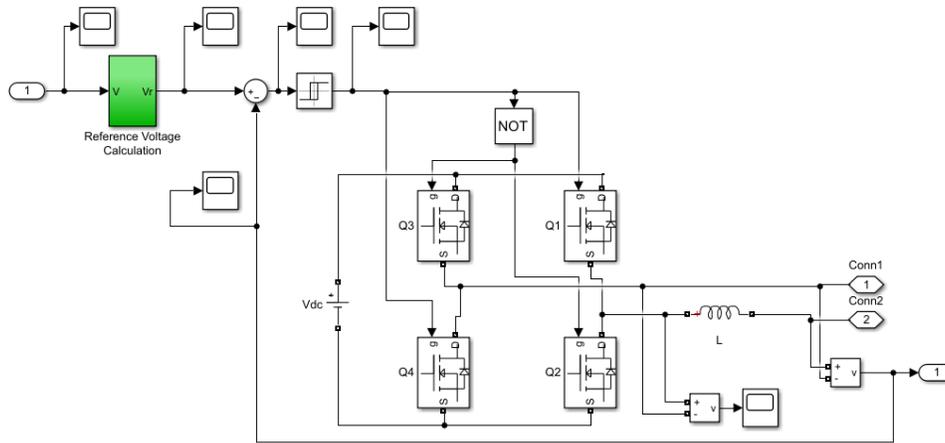


Figura 26.

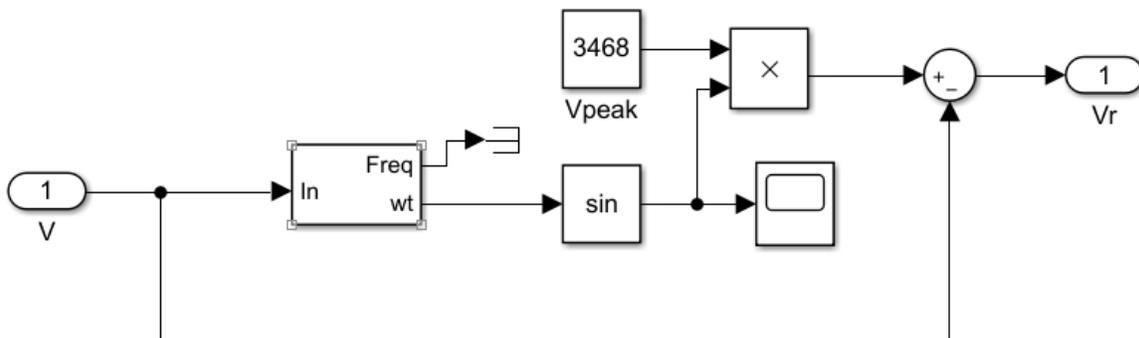
Control por histéresis de los DVRs conectados a cada una de las fases de la carga



En la obtención de la tensión de referencia se hizo necesario utilizar un PLL para así obtener la frecuencia fundamental y por consiguiente la señal deseada. En la Figura 27 se observa a detalle el bloque que calcula la señal de referencia (bloque de color verde en la Figura 26). Además, la técnica de compensación implementada es de compensación en fase mostrada en la sección 2.3 Técnicas de compensación.

Figura 27.

Utilización de phase-locked loop (PLL) para la obtención de la señal de referencia



Los valores de la batería y del filtro, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Valores utilizados en la batería y filtro de los DVRs..

Tensión batería [V]	Capacitancia filtro [mF]	Inductancia filtro [μH]
4000	4.7	0.1

Generación de perturbaciones

Para realizar el análisis del funcionamiento del DVR ante diferentes tipos de perturbaciones, se tuvieron en cuenta los tiempos estipulados en el estándar IEEE 1159 para perturbaciones de corta duración de tipo instantáneo y momentáneo, los cuales deben estar en los siguientes rangos:

Tabla 3.

Tiempos de perturbación según estándar IEEE 1159.

Perturbación	Rango de tiempo	Tiempo seleccionado [s]
Instantánea	0.5 – 30 ciclos	0.16
Momentánea	30 ciclos – 3 segundos	0.5

También se consideraron diferentes valores de amplitud para los hundimientos de tensión y elevaciones de tensión según la Tabla 4.

Tabla 4.

Amplitudes tomadas para las diferentes perturbaciones.

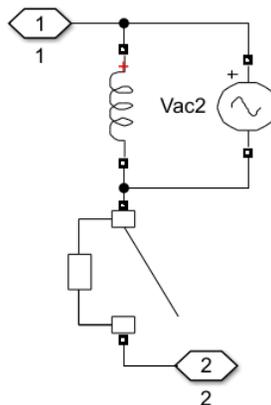
Tipo de perturbación	Amplitudes tomadas (base amplitud nominal del sistema)	
Hundimiento de tensión	A1= 0.8pu	A2= 0.4pu
Elevación de tensión	A1=1.8pu	A2=2.5pu

En las simulaciones se consideraron perturbaciones en fase y desfase de tipo monofásico y trifásico.

La implementación en Simulink de las perturbaciones se elaboraron como se muestra en las Figura 28 y Figura 29, correspondientes a generación de hundimientos de tensión y elevaciones de tensión, respectivamente. Para simular el hundimiento de tensión, se conecta de línea a neutro un interruptor (accionado en tiempos establecidos), acompañado de un inductor y una fuente de tensión, para poder hacer control a la magnitud del hueco.

Figura 28.

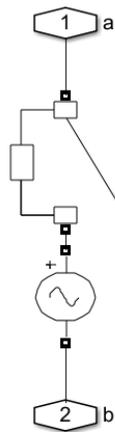
Implementación de hueco de tensión en Simulink.



En la simulación de la elevación de tensión se implementó el mismo sistema, con la diferencia de la ausencia del inductor, debido a que la función de este bloque solo es generar más tensión.

Figura 29.

Implementación de la elevación de tensión en Simulink.



5. Simulación y análisis de resultados

Con la finalidad de evaluar el comportamiento del DVR ante diferentes perturbaciones de tensión, se ejecutan cuatro casos de simulación, con los parámetros establecidos en la Tabla 5.

Tabla 5.*Parámetros usados en los casos de simulación.*

Caso	Hundimiento de tensión		Elevación de tensión		Trifásico o monofásico	En fase o desfase
	Tiempo [s]	Amplitud	Tiempo [s]	Amplitud		
1	0.16	0.4 pu	0.5	1.8 pu	Trifásico	En fase
2	0.16	0.4 pu	0.5	1.8 pu	Trifásico	En desfase
3	0.16	0.8 pu	0.5	2.5 pu	Monofásico	En fase
4	0.5	0.8 pu	0.16	2.5 pu	Trifásico	En fase

Caso 1

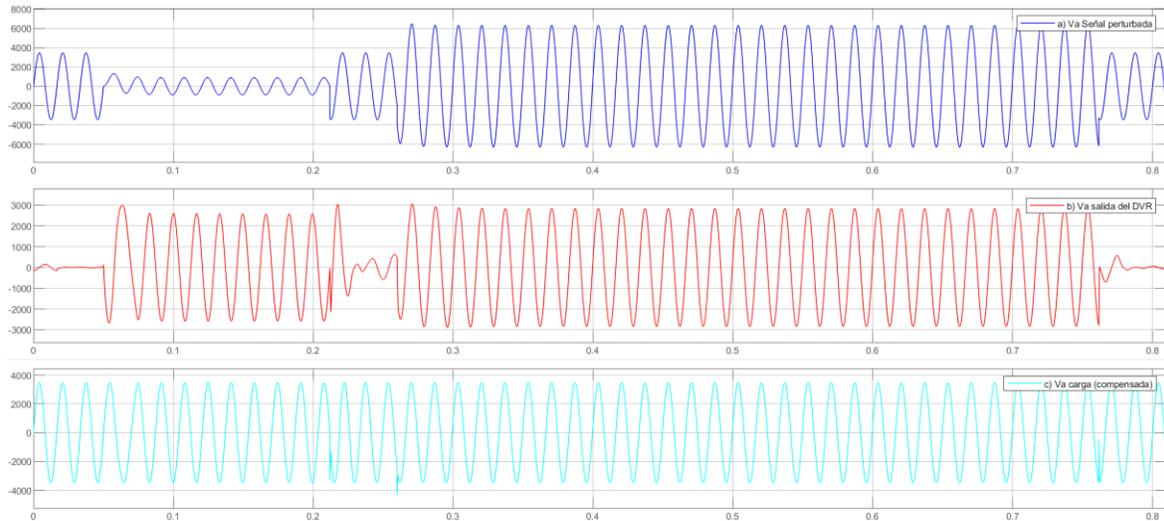
En el primer caso se simulan dos perturbaciones en cada una de las fases, la primera es un hundimiento de tensión que hace caer a un 40% la tensión nominal del sistema, con una duración de 0.16 [s]. La segunda perturbación es una elevación de tensión, con una amplitud del 180% de la tensión nominal del sistema, durando 0.5 [s], cada una de estas perturbaciones en fase con su respectiva línea. En la Figura 30, Figura 31, Figura 32 se observan las perturbaciones presentadas en cada una de las fases. En la Tabla 6 se observan los valores de dichas perturbaciones.

Tabla 6.*Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 1.*

Fase	Vp sin perturbación [V]	Vp Hundimiento de tensión [V]	Vp Elevación de tensión [V]
a	3468∠0°	1295∠0°	6468∠0°
b	3468∠-120°	1295∠-120°	6468∠-120°
c	3468∠120°	1295∠120°	6468∠120°

Figura 30.

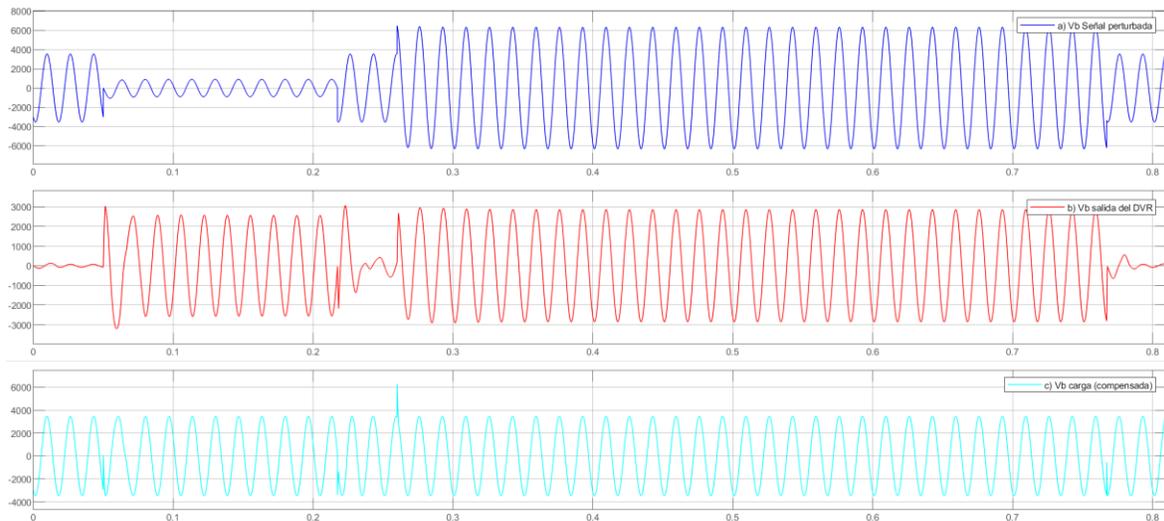
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 1).



En la Figura 30 a) se observa la señal de la fase a perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 6 para dicha fase, en la Figura 30 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 30 c) se aprecia la señal de la fase a en la carga, ya compensada.

Figura 31.

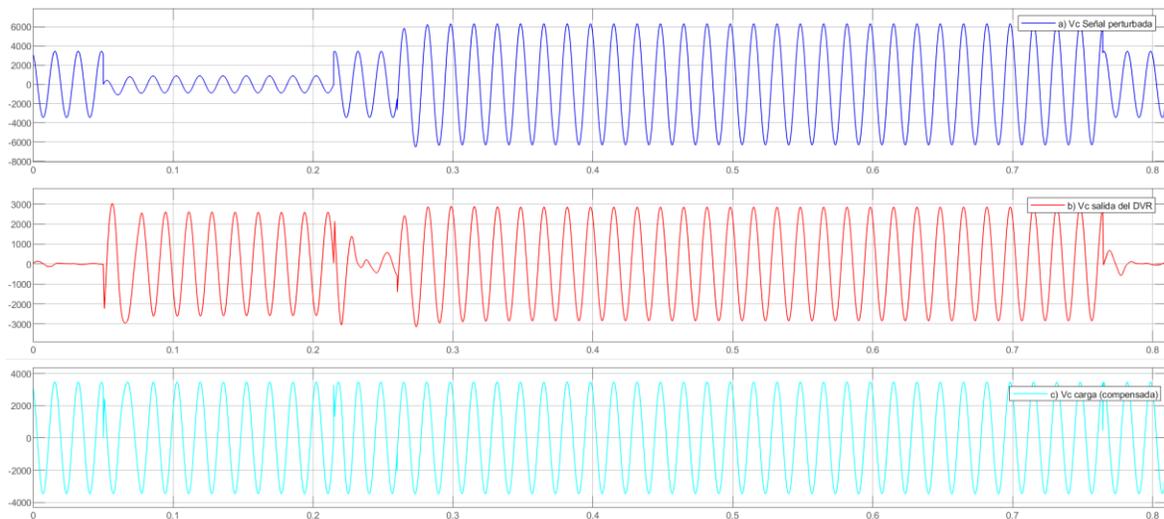
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 1).



En la Figura 31 a) se observa la señal de la fase b perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 6 para dicha fase, en la Figura 31 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 31 c) se aprecia la señal de la fase b en la carga, ya compensada.

Figura 32.

a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 1).



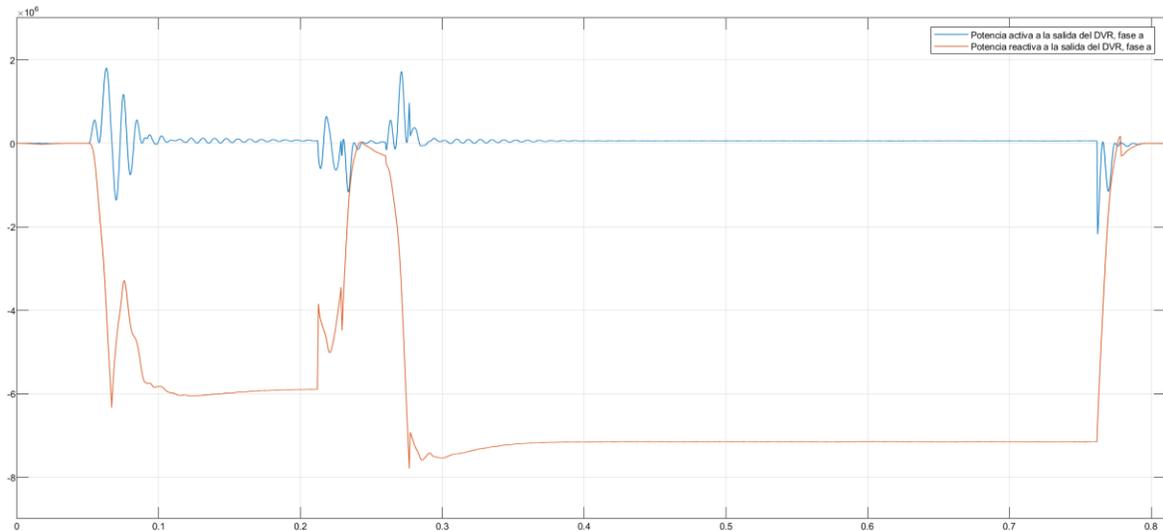
En la Figura 32 a) se observa la señal de la fase c perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 6 para dicha fase, en la Figura 32 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 32 c) se aprecia la señal de la fase c en la carga, ya compensada.

Para realizar seguimiento al comportamiento del flujo de potencia activa y reactiva a través del DVR y el sistema, se instaló un medidor en cada punto de compensación, las señales se pueden apreciar en la Figura 33, Figura 34 y Figura 35.

Figura 33.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso

1).

**Figura 34.**

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso

1).

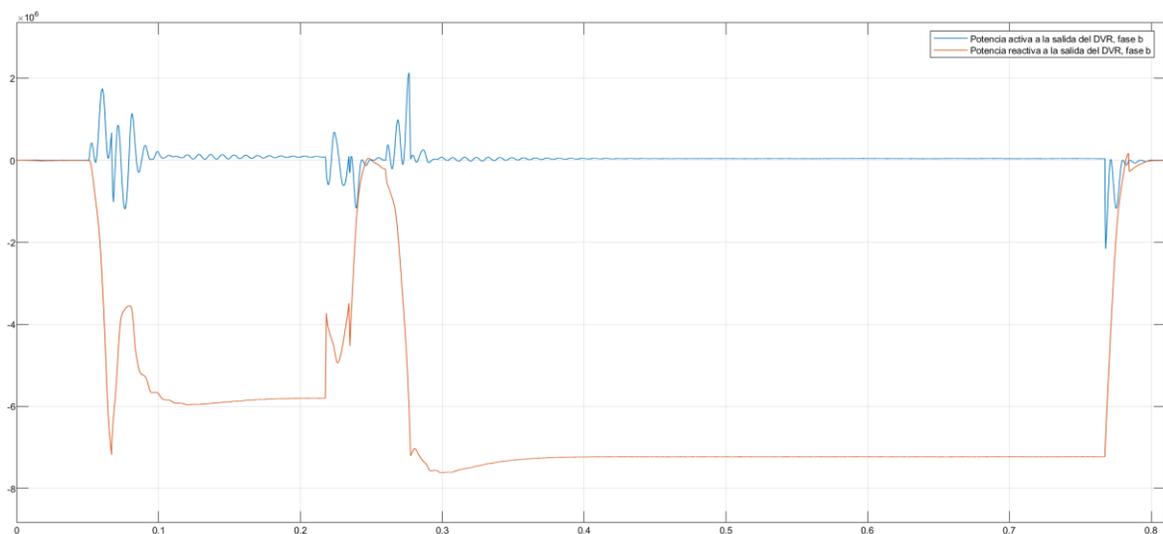
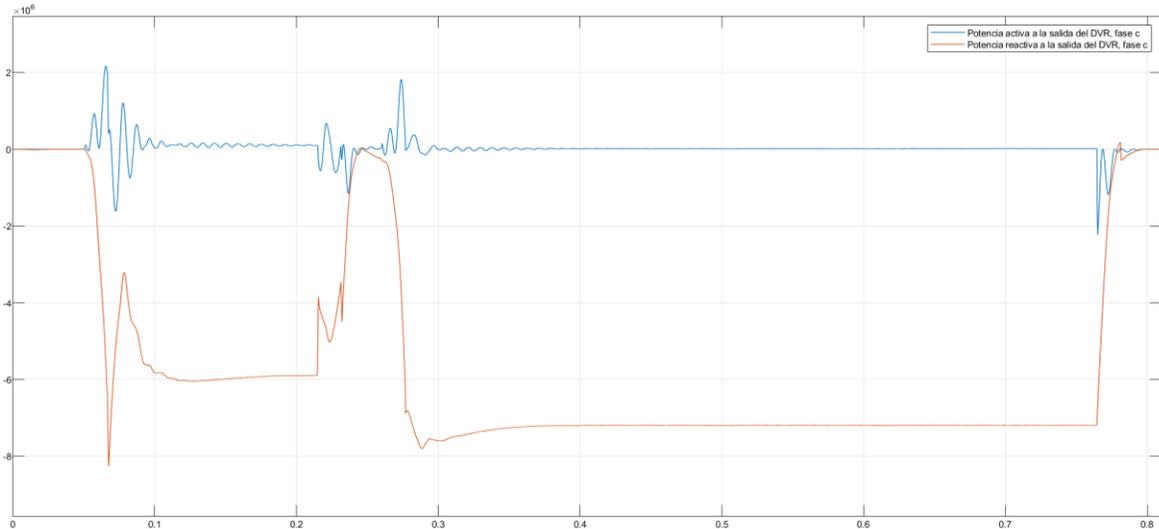


Figura 35.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 1).

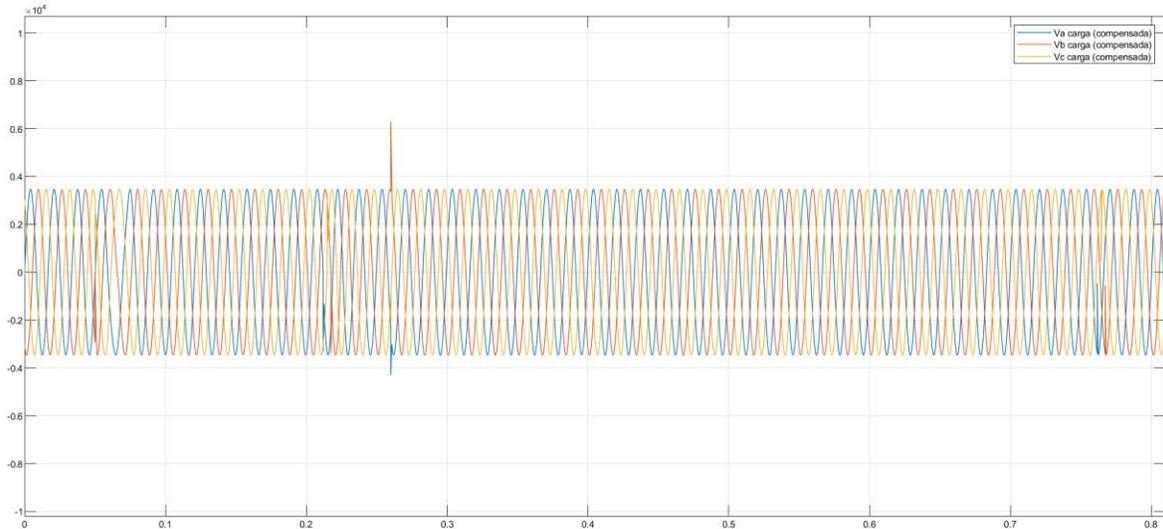


En las anteriores figuras se puede observar que el flujo potencia activa promedio entregada por el DVR en estado estable durante las perturbaciones es de 0.1 MW o 100 kW para cada una de las fases (Figura 33, Figura 34, Figura 35, azul). Por otro lado, en el flujo de potencia reactiva, se observa que el DVR consume reactivos, oscilando esta en promedio entre 6 [MVar] y 7 [MVar] para cada una de las fases en estado estable durante las perturbaciones (Figura 33, Figura 34, Figura 35, naranja). Los picos máximos de potencia activa y reactiva representan transitorios en el DVR en el momento de realizar el esfuerzo el sistema para ejercer el control y asumir la perturbación presentada.

Con la finalidad de analizar el comportamiento entre las 3 fases, se extrajo la información de estas en un solo gráfico, Figura 36, donde la fase a esta representada por la señal azul, la fase b por la señal naranja y la fase c por la señal amarilla. Encontrado que se logra obtener un buen comportamiento en la compensación de las tres fases.

Figura 36.

Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 1).



Análisis

Para el caso 1 el DVR cumplió con su objetivo, se obtuvieron en las tres fases del sistema la señal con amplitud y fase deseadas, concluyendo que para las perturbaciones con los valores de la Tabla 6 el DVR planteado no tiene limitantes de compensación.

Caso 2

En el segundo caso se simulan dos perturbaciones en cada una de las fases, al igual que en el caso 1, con la diferencia es que estas no están en fase con su respectiva línea, la primera es un hundimiento de tensión que hace caer a un 40% la tensión nominal del sistema, con una duración de 0.16 [s]. La segunda perturbación es una elevación de tensión, con una amplitud del 180% de la tensión nominal del sistema, durando 0.5 [s]. En la Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se observan las perturbaciones en sus respectivas fases. En la Tabla 7 se observan los valores de las perturbaciones.

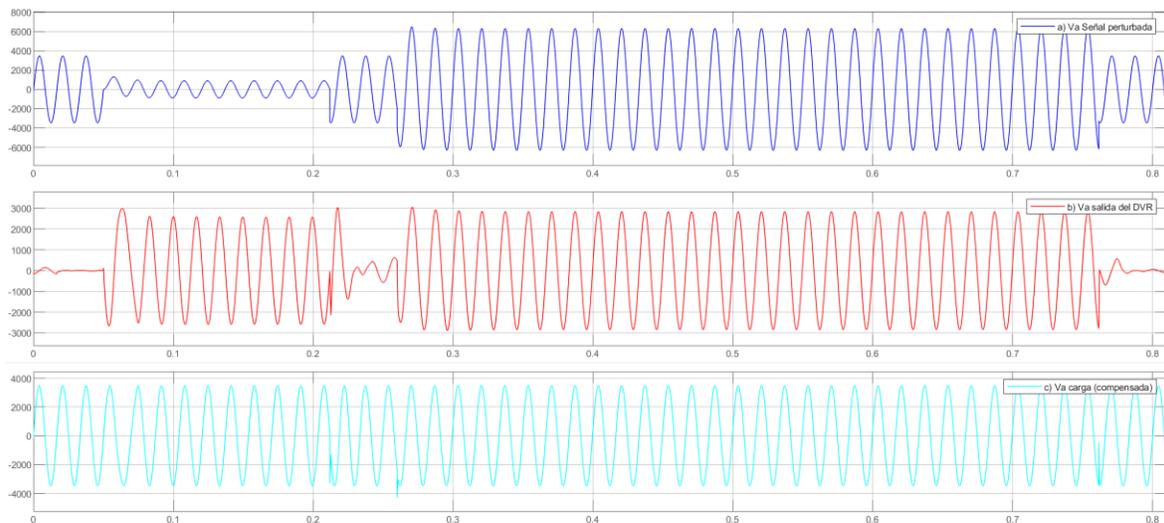
Tabla 7.

Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 2.

Fase	Vp sin perturbación [V]	Vp Huevo de tensión [V]	Vp Elevación de tensión [V]
a	3468∠0°	1295∠0°	6468∠0°
b	3468∠-120°	1295∠0°	6468∠0°
c	3468∠120°	1295∠0°	6468∠0°

Figura 37.

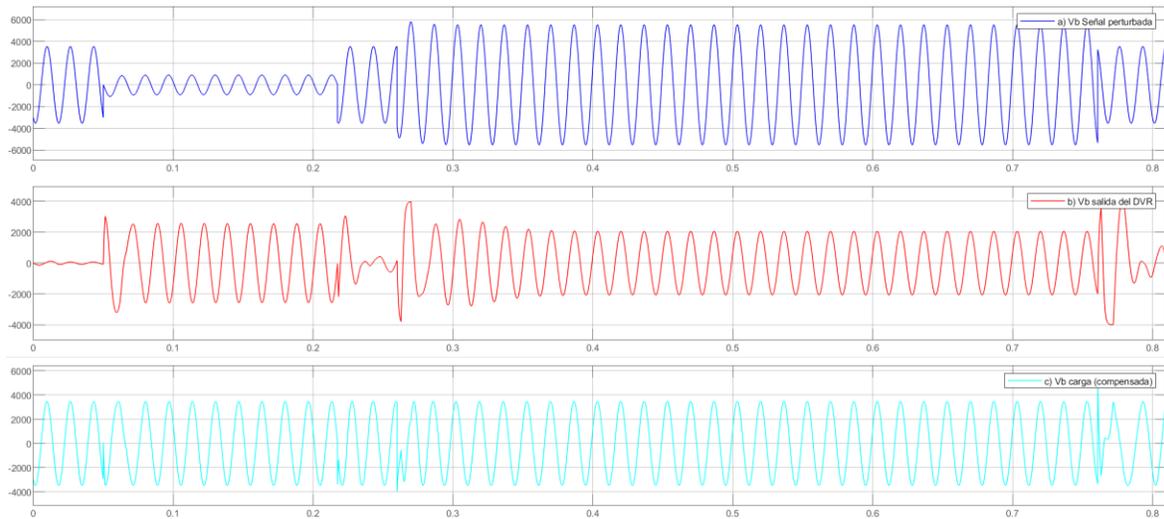
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 2).



En la Figura 37 a) se observa la señal de la fase a perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 7 para dicha fase, en la Figura 37 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 37 c) se aprecia la señal de la fase a en la carga, ya compensada.

Figura 38.

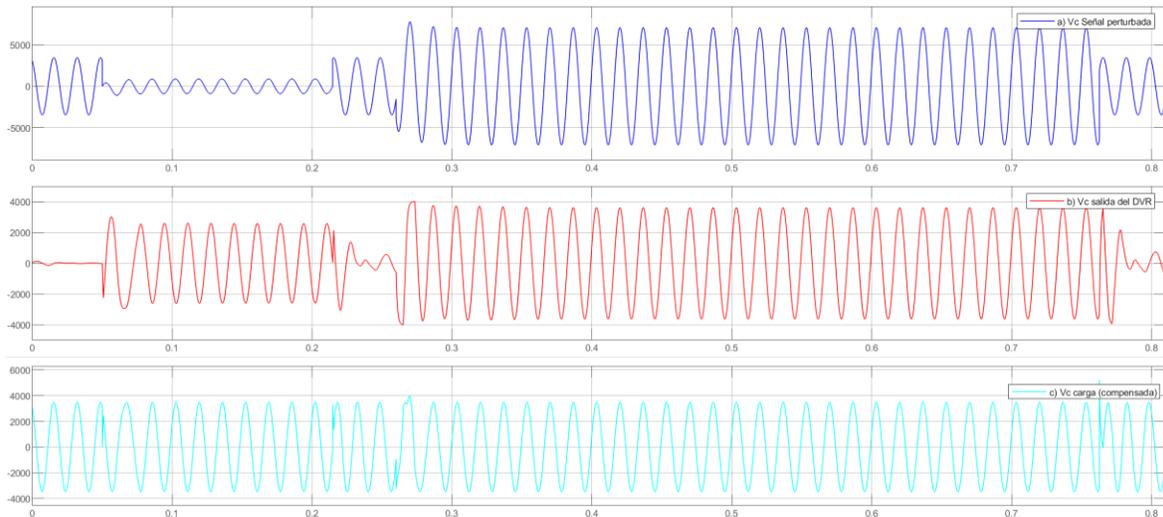
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 2).



En la Figura 38 a) se observa la señal de la fase b perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 7 para dicha fase, en la Figura 38 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 38 c) sea aprecia la señal de la fase b en la carga, ya compensada.

Figura 39.

a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 2).

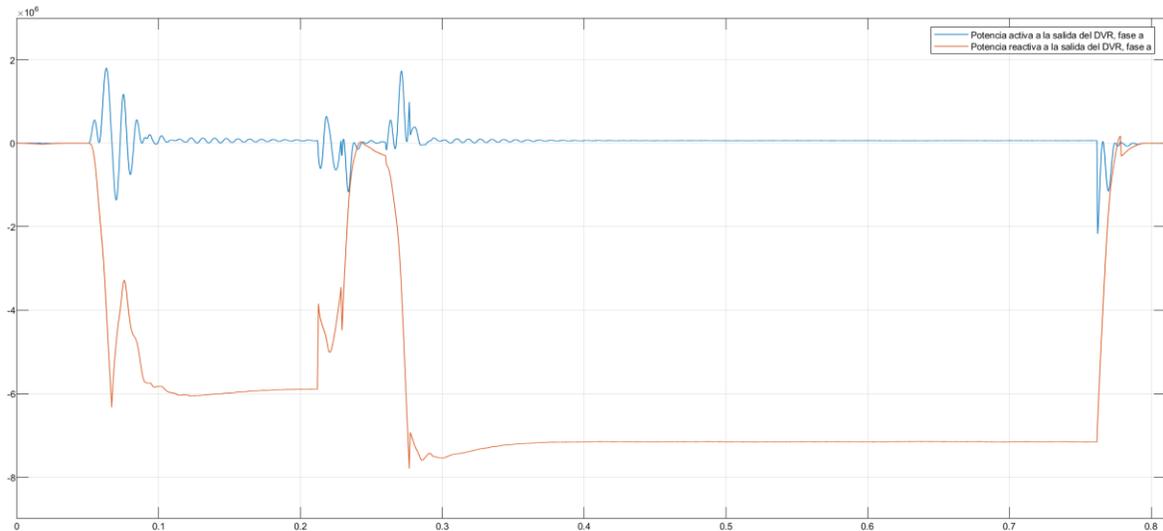


En la Figura 39 a) se observa la señal de la fase c perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 7 para dicha fase, en la Figura 39 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 39 c) se aprecia la señal de la fase c en la carga, ya compensada.

Para el caso 2 las señales del medidor del flujo de potencia activa y reactiva a través del DVR y el sistema se pueden apreciar en la Figura 40, Figura 41 y Figura 42.

Figura 40.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 2).

**Figura 41.**

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 2).

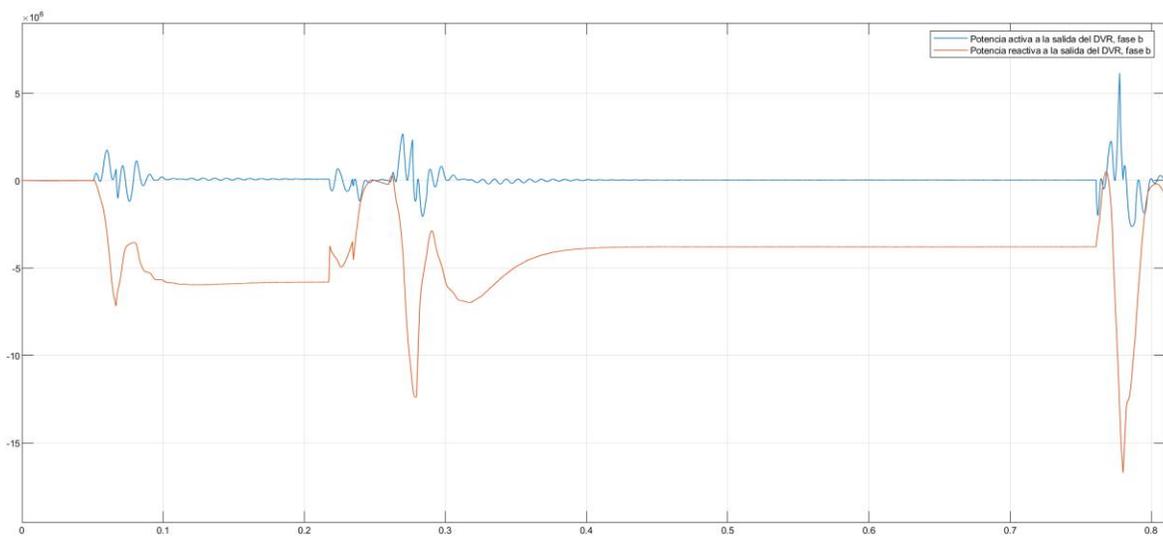
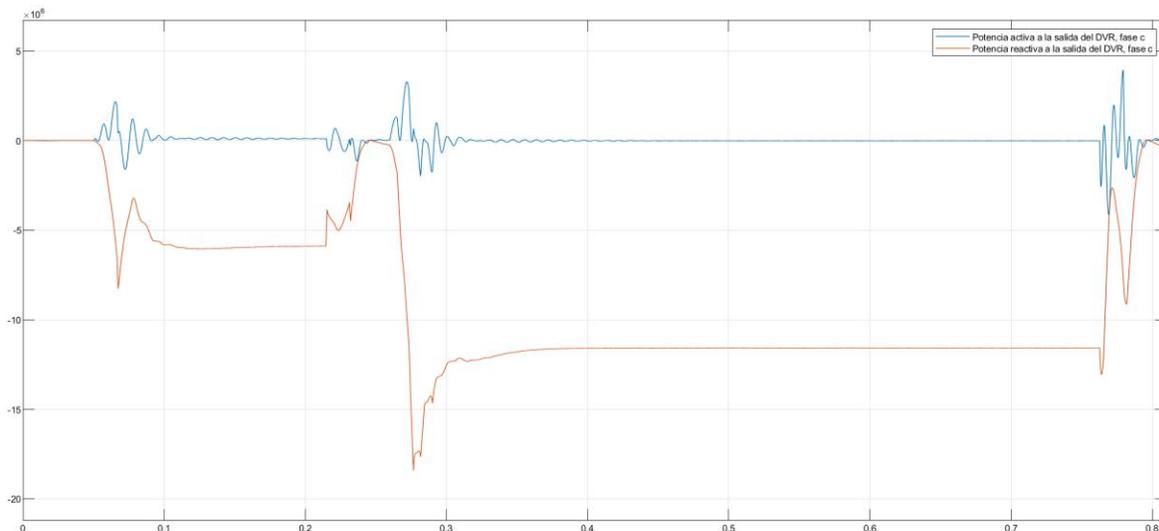


Figura 42.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 2).



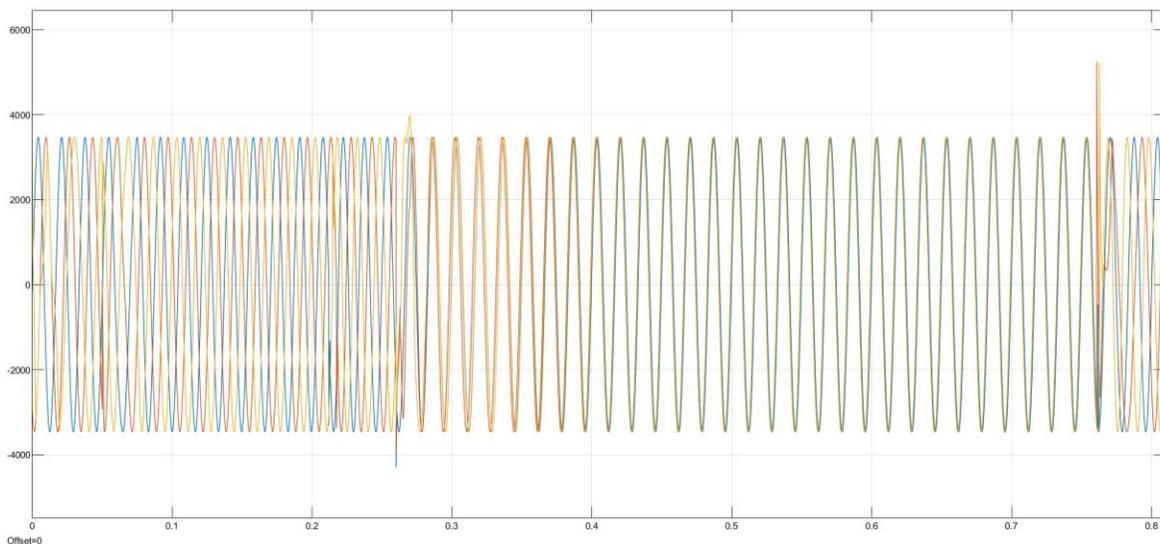
En las anteriores figuras se puede observar que el flujo potencia activa promedio entregada por el DVR en estado estable durante las perturbaciones es de 0.1 [MW] para cada una de las fases (Figura 40, Figura 41, Figura 42, azul). Por otro lado, en el flujo de potencia reactiva, se observa que el DVR consume reactivos, en la fases a (Figura 40, naranja) la potencia reactiva promedio consumida durante el hundimiento es de 6 [MVar] y para la elevación de 7 [MVar], en la fases b (Figura 41, naranja) la potencia reactiva promedio consumida durante el hundimiento es de 4 [MVar] y para la elevación de 6 [MVar] y en la fase c (Figura 42, naranja) la potencia reactiva consumida durante el hundimiento es de 6 [MVar] y para la elevación es de 12 [MVar].

Al igual que el caso 1, los picos máximos de potencia activa y reactiva representan transitorios en el DVR en el momento de realizar el esfuerzo el sistema para ejercer el control y asumir las perturbaciones presentadas.

En el caso 2 al igual que en el caso 1, se extrajo la información de las 3 fases en un solo gráfico, Figura 43, donde la fase *a* esta representada por la señal azul, la fase *b* por la señal naranja y la fase *c* por la señal amarilla. Donde se observa un buen resultado en la compensación en la magnitud de la onda, sin embargo, el DVR no compensó el desfase inyectado por las perturbaciones.

Figura 43.

Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 2).



Análisis

Para el caso 2 se puede ver una limitación en el DVR, aunque cumplió con el objetivo, de compensar la amplitud, no tuvo la capacidad de compensar el desfase inyectado, para las perturbaciones con los valores de la Tabla 7. El anterior resultado se debe a la técnica de compensación empleada para el control del DVR.

Caso 3

En el tercer caso, se simulan dos perturbaciones solo en la primera fase, la primera perturbación es un hundimiento de tensión que hace caer a un 80% la tensión nominal del sistema, con una duración de 0.5 [s], la segunda es una elevación de tensión, con una amplitud del 250% de la tensión nominal del sistema, durando 0.16 [s]. en la Figura 44, Figura 45 y Figura 46 se observan las perturbaciones en cada una de la fases. En la Tabla 8 se observan los valores de las perturbaciones.

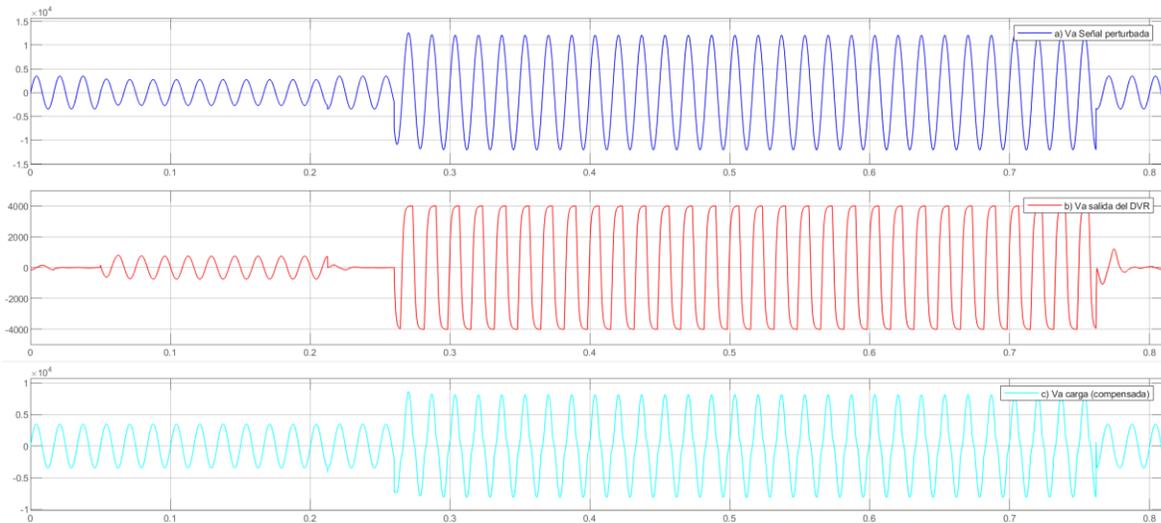
Tabla 8.

Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 3.

Fase	Vp sin perturbación [V]	Vp Hueco de tensión [V]	Vp Elevación de tensión [V]
a	3468∠0°	2711∠0°	8618∠0°
b	3468∠-120°	3468∠-120°	3468∠-120°
c	3468∠120°	3468∠120°	3468∠120°

Figura 44.

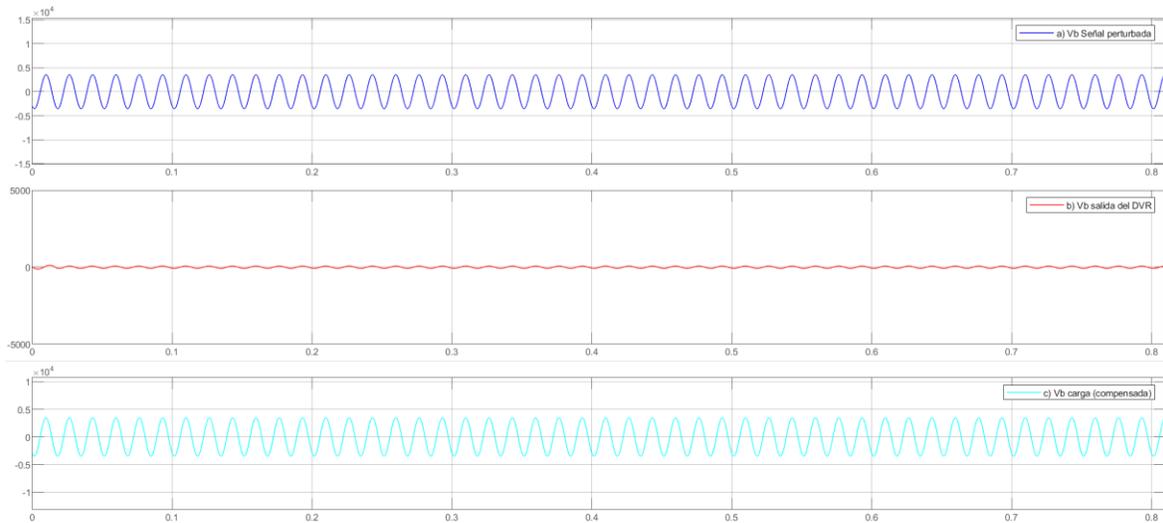
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 3).



En la Figura 44 a) se observa la señal de la fase a perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 8 para dicha fase, en la Figura 44 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 44 c) se aprecia la señal de la fase a en la carga, ya compensada. Evidenciándose que, dada la magnitud de la elevación de tensión, el DVR no tuvo la capacidad de compensar en su totalidad la segunda perturbación.

Figura 45.

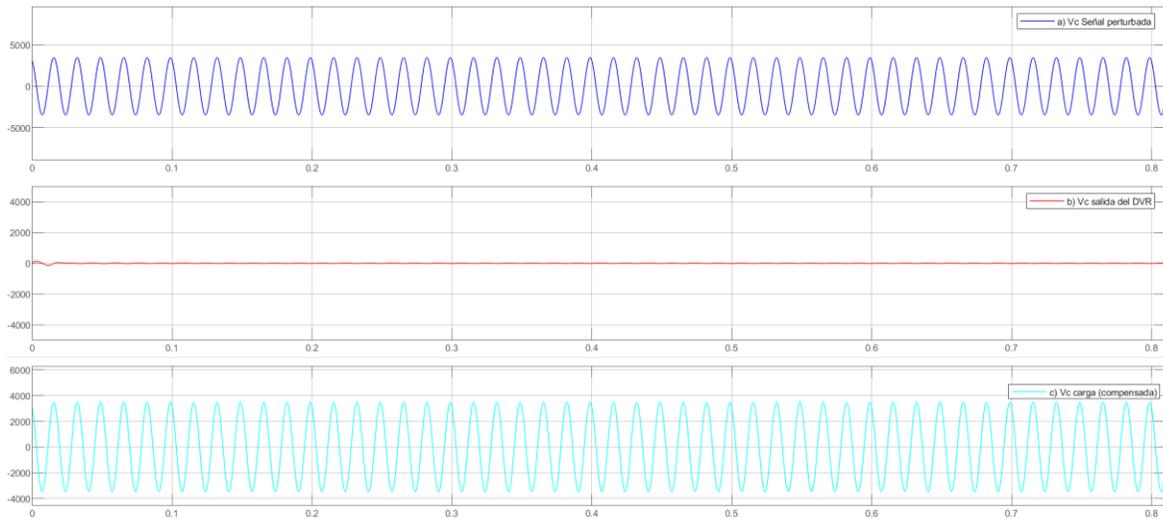
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 3).



En la Figura 45 a) se observa la señal de la fase b sin ninguna clase de perturbación, por lo cual en la Figura 45 b) el DVR presenta una señal de muy baja amplitud, ya que no es necesario ejercer ningún tipo de compensación.

Figura 46.

a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 3).

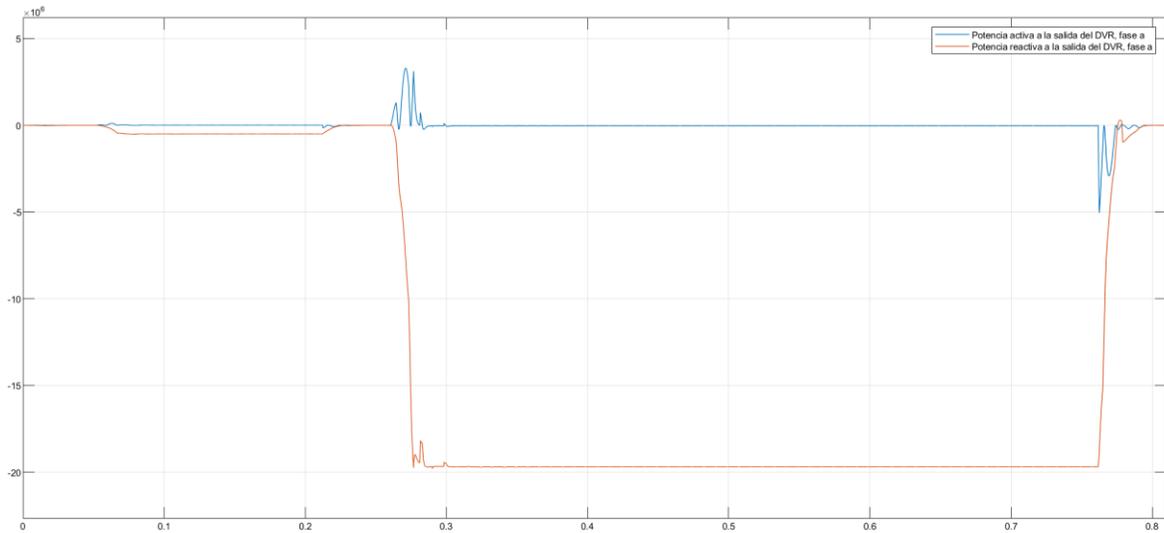


En la Figura 46 a) se observa en la señal de la fase c que al igual que en la fase b no presenta ninguna perturbación, presentando el DVR el mismo comportamiento.

Para el caso 3 las señales del medidor del flujo de potencia activa y reactiva a través del DVR y el sistema se pueden apreciar en la Figura 47, Figura 48 y Figura 49.

Figura 47.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 3).

**Figura 48.**

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 3).

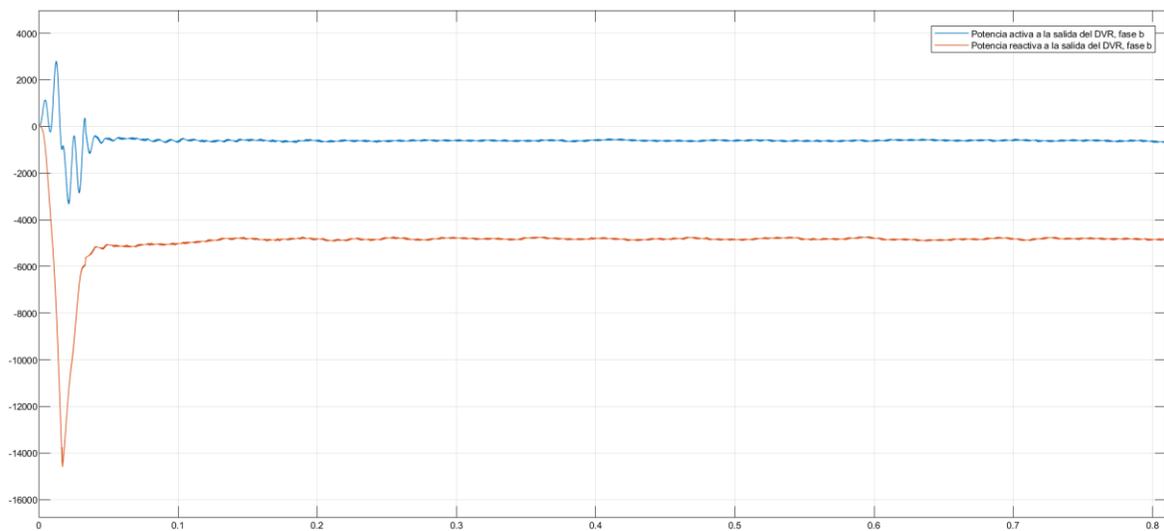
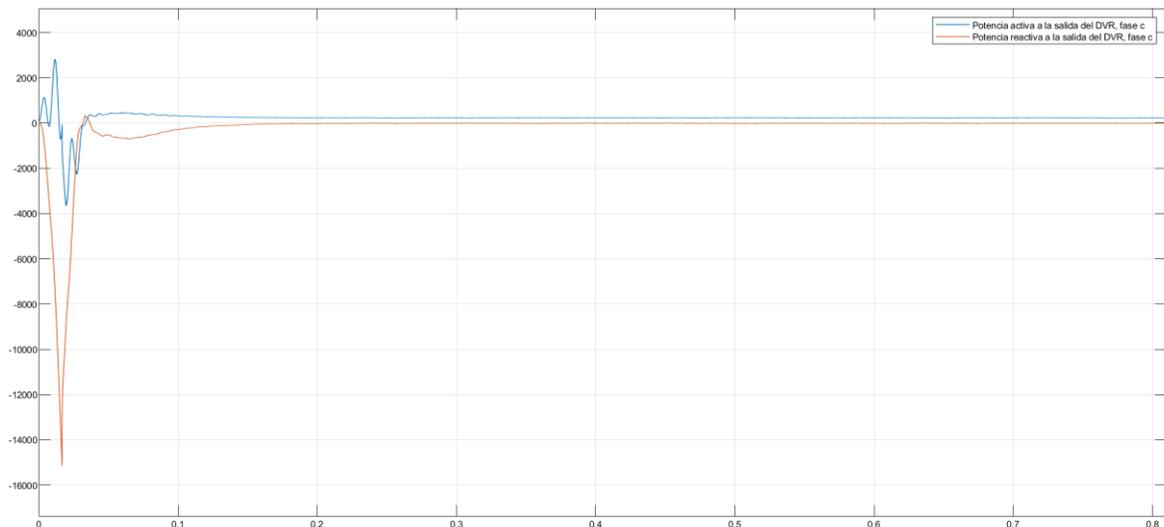


Figura 49.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 3).



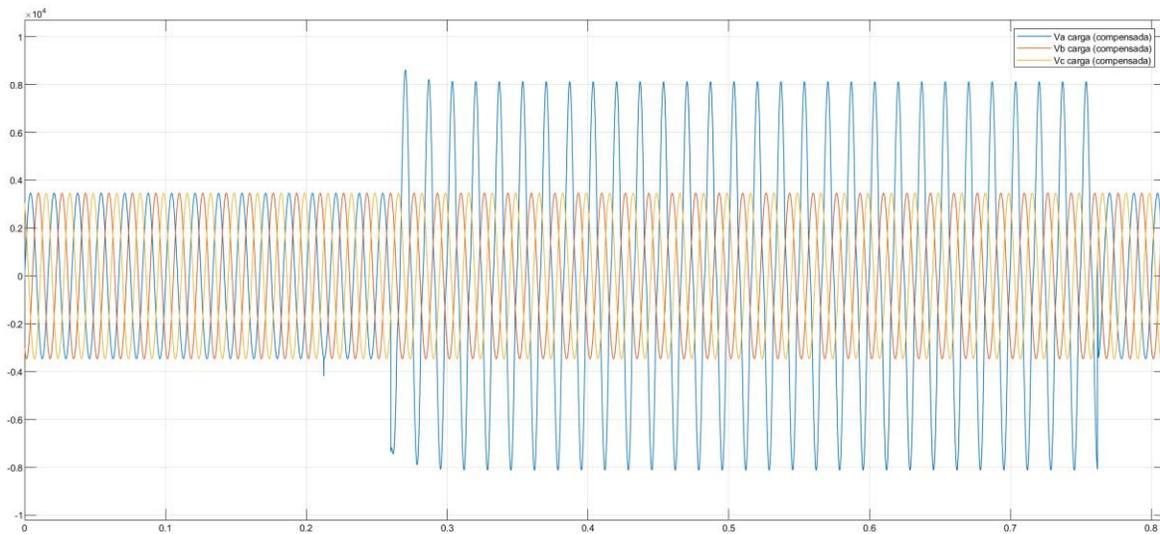
En las anteriores figuras se puede observar que el flujo potencia activa promedio entregada por el DVR en estado estable durante la elevación de tensión en la fase a es mínima, aproximadamente (Figura 47, azul). En el flujo de potencia reactiva, se observa que el DVR consume reactivos, en la fases a (Figura 47, naranja) la potencia reactiva promedio consumida durante la elevación de tensión es de 20 [MVA]. Los picos máximos de potencia activa y reactiva representan transitorios en el DVR en el momento de realizar el esfuerzo el sistema para ejercer el control y asumir las perturbaciones presentadas.

En el caso 3 al igual que en los anteriores casos, se extrajo la información de las 3 fases en un solo gráfico, Figura 50, la fase *a* esta representada por la señal azul, la fase *b* por la señal naranja y la fase *c* por la señal amarilla. Donde se logra observar la inhabilidad del DVR para compensar una elevación de gran magnitud, como la presentada en la fase *a*. Esto se da debido al límite que

presenta la batería, es decir, se cuenta con una batería que presenta una tensión específica, lo cual le da un límite de tensión a suplir en el caso de presentarse una elevación de gran magnitud.

Figura 50.

Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 3).



Análisis

El caso 3 evidencia otra limitación en el DVR, se observa que no es suficiente la compensación hecha en la fase *a* para la elevación presentada en la Tabla 8, la cual lleva la magnitud de tensión a un 250% de su valor nominal.

Caso 4

En el cuarto caso, al igual que el primer caso, se simulan dos perturbaciones en cada una de las fases, la primera perturbación es un hundimiento de tensión que hace caer a un 80% la tensión nominal del sistema, con una duración de 0.5 [s], la segunda es una elevación de tensión, con una amplitud del 250% de la tensión nominal del sistema, durando 0.16 [s], cada una de las

perturbaciones en fase con su respectiva línea. En la Figura 51, Figura 52 y Figura 53 se observan las perturbaciones en sus respectivas fases. En la Tabla 9 se observan los valores de las perturbaciones.

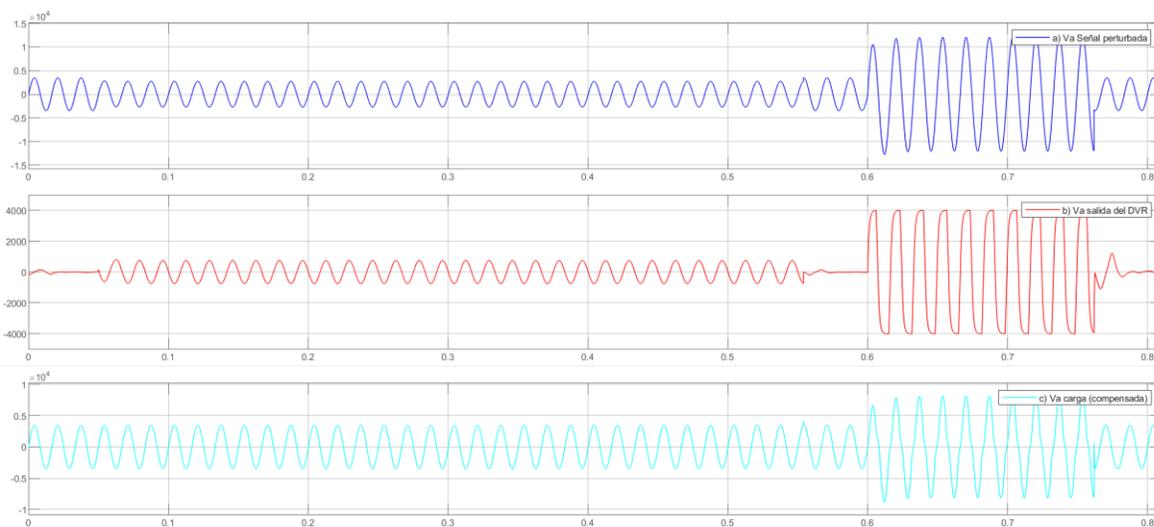
Tabla 9.

Valores pico de la señal con perturbaciones del caso 4.

Fase	Vp sin perturbación [V]	Vp Huevo de tensión [V]	Vp Elevación de tensión [V]
a	$3468\angle 0^\circ$	$2711\angle 0^\circ$	$8618\angle 0^\circ$
b	$3468\angle -120^\circ$	$2711\angle -120^\circ$	$8618\angle -120^\circ$
c	$3468\angle 120^\circ$	$2711\angle 120^\circ$	$8618\angle 120^\circ$

Figura 51.

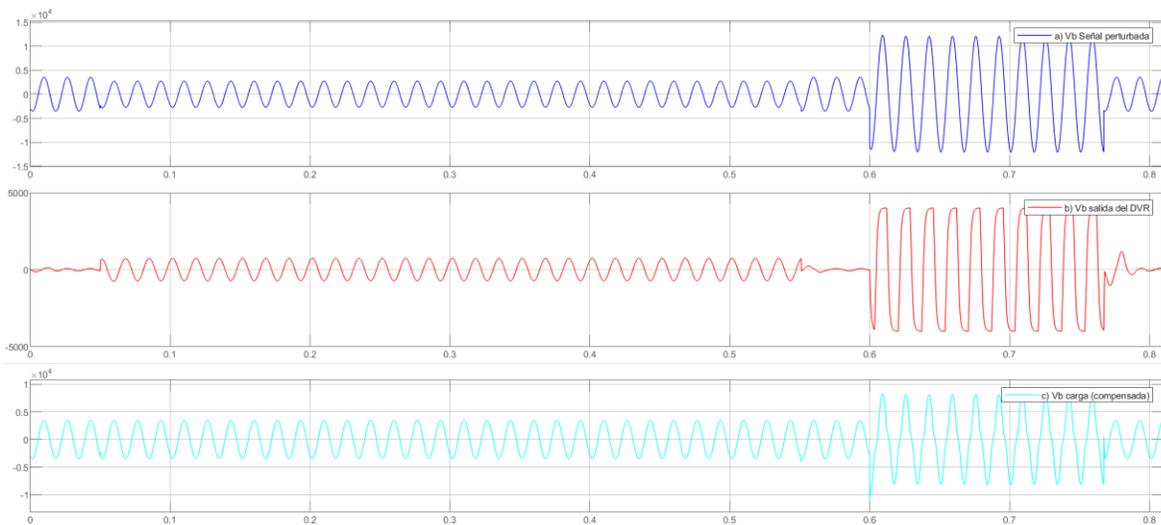
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase a, caso 4).



En la Figura 51 a) se observa la señal de la fase a perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 9 para dicha fase, en la Figura 51 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 51 c) se aprecia la señal de la fase a en la carga, ya compensada. Se evidencia que, debido a la magnitud de la elevación de tensión, el DVR no tuvo la capacidad de compensar en su totalidad la segunda perturbación.

Figura 52.

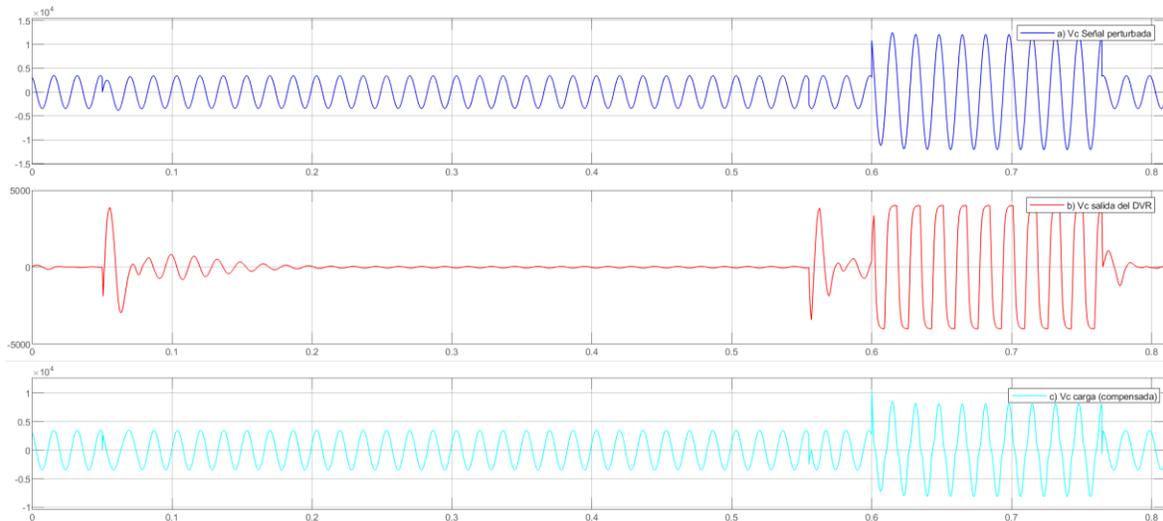
a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase b, caso 4).



En la Figura 52 a) se observa la señal de la fase b perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 9 para dicha fase, en la Figura 52 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 52 c) se aprecia la señal de la fase b en la carga, ya compensada. Se evidencia que, debido a la magnitud de la elevación de tensión, el DVR no tuvo la capacidad de compensar en su totalidad la segunda perturbación.

Figura 53.

a) Señal perturbada (azul), b) señal salida del DVR (roja), c) señal compensada en la carga (cian). (fase c, caso 4).

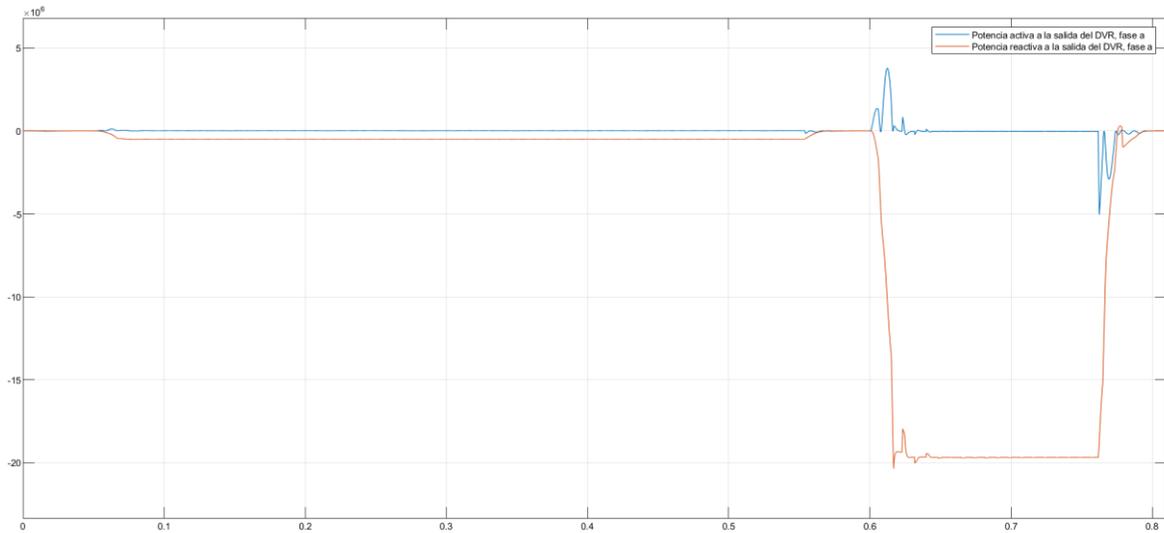


En la Figura 53 a) se observa la señal de la fase c perturbada con los parámetros mencionados en la Tabla 9 para dicha fase, en la Figura 53 b) se muestra la señal controlada en la salida del DVR para compensar las perturbaciones y en la Figura 53 c) se observa la señal de la fase c en la carga, ya compensada. Nuevamente al igual que las demás fases se evidencia que dada la magnitud de la elevación de tensión, el DVR no tuvo la capacidad de compensar en su totalidad la segunda perturbación.

Para el caso 4 las señales del medidor del flujo de potencia activa y reactiva a través del DVR y el sistema se pueden apreciar en la Figura 54, Figura 55 y Figura 56.

Figura 54.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase a, caso 4).

**Figura 55.**

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase b, caso 4).

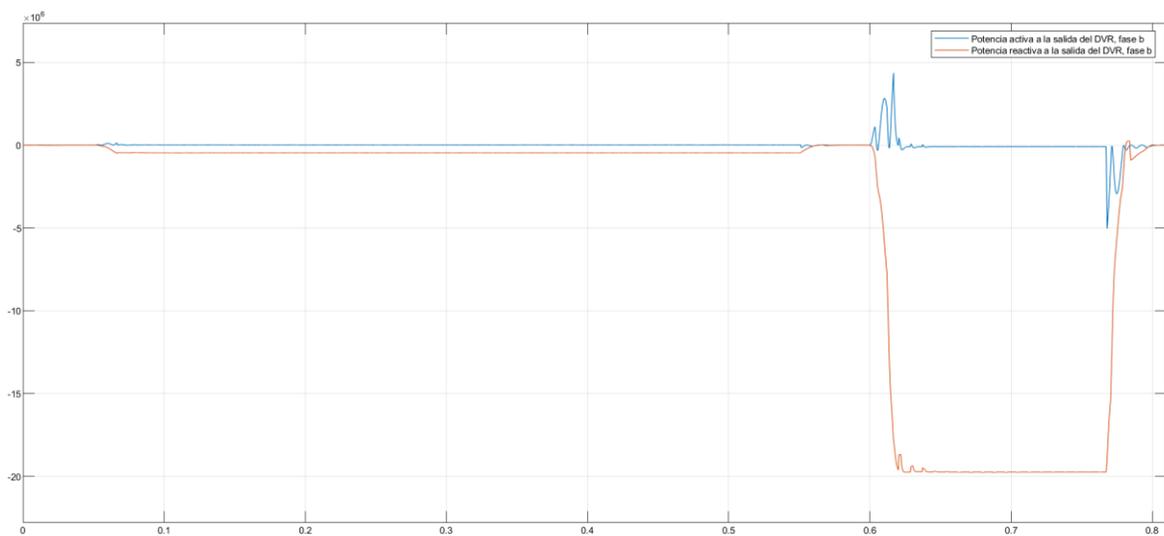
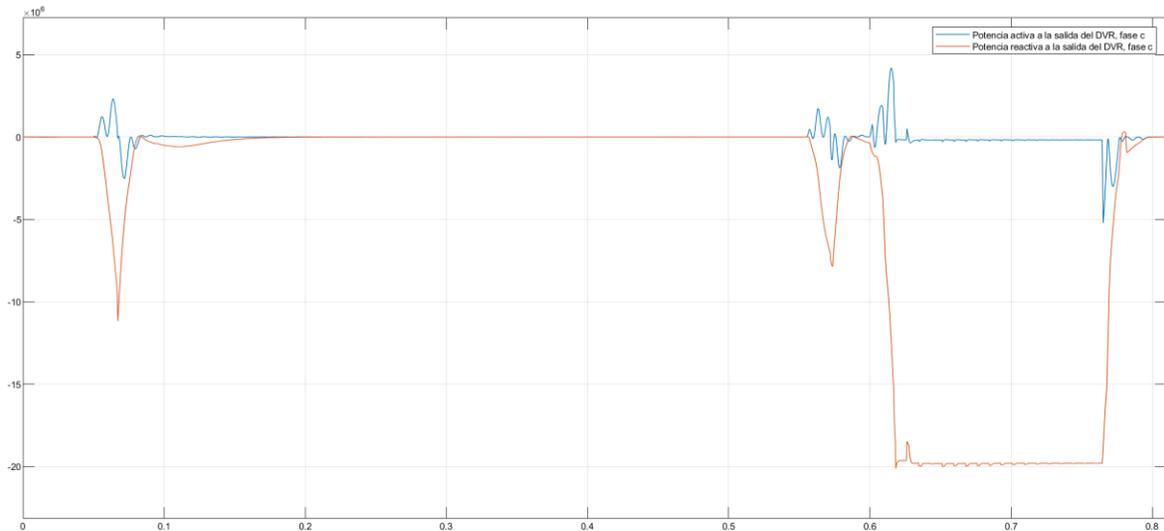


Figura 56.

Señal de potencia activa (azul) y potencia reactiva (naranja), a la salida del DVR. (fase c, caso 4).



En las anteriores figuras se puede observar que el flujo potencia activa promedio entregada por el DVR en estado estable durante las perturbaciones es de 0.01 [MW], aproximadamente cero, para cada una de las fases (Figura 54, Figura 55, Figura 56, azul). Por otro lado, en el flujo de potencia reactiva, se observa que el DVR consume reactivos, la potencia reactiva promedio consumida durante la perturbación para cada una de las fases es aproximadamente de 20 [MVar] (Figura 54, Figura 55, Figura 56, naranja).

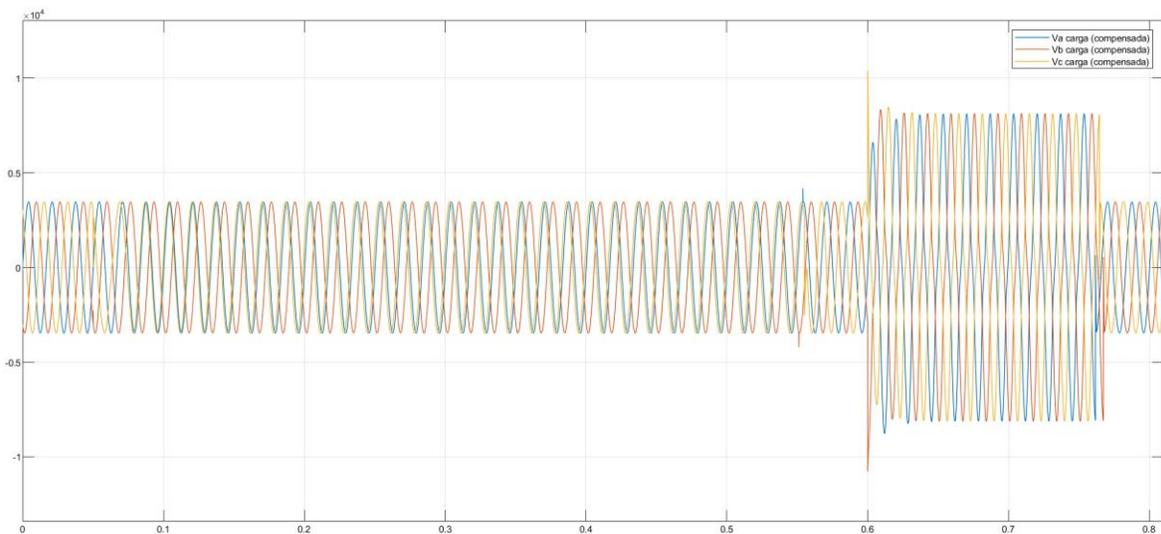
Al igual que todos los casos, los picos máximos de potencia activa y reactiva representan transitorios en el DVR en el momento de realizar el esfuerzo el sistema para ejercer el control y asumir las perturbaciones presentadas.

Para el caso 4 igualmente se extrajo la información de las 3 fases en un solo gráfico, Figura 57, donde la fase a esta representada por la señal azul, la fase b por la señal naranja y la fase c por la señal amarilla. En el cual se logra observar la inhabilidad del DVR para compensar una

elevación de tensión de gran magnitud, como la presentada en las fases *a*, *b* y *c*. Esto se da debido al límite que presenta la batería, es decir, se cuenta con una batería que presenta una tensión específica, lo cual le da un límite de tensión a suplir en el caso de presentarse una elevación de gran magnitud.

Figura 57.

Señales de tensión compensadas, de la fase a (azul), fase b (naranja) y fase c (amarilla). (caso 4).



Análisis

Para el caso 4, al igual que en el anterior, se puede evidenciar la misma limitación en el DVR, (diferenciándose del caso 3, la duración de la elevación de tensión) se observa que es insuficiente la compensación hecha en las fases *a*, *b* y *c* para las elevaciones presentadas en la Tabla 9, las cuales llevan la magnitud de tensión a un 250% de su valor nominal, con lo que se puede concluir que la variable tiempo de falla en el DVR planteado, no presenta diferencias con la capacidad de compensar. Sin embargo, esta característica debe tenerse en cuenta en el

dimensionamiento del sistema de almacenamiento de tal manera que cumpla con la capacidad de inyección de potencia requerida.

Análisis General

El DVR cumple con el objetivo de suplir las variaciones de tensión, esto se puede apreciar en los casos 1 y 2, la respuesta del DVR da como resultado una onda con la amplitud deseada, sin embargo, el modelo planteado tiene limitaciones, y se pueden clasificar de la siguiente manera:

Potencia entregada, esta limitante se observa en los casos 3 y 4, el DVR no tiene la capacidad de contrarrestar por completo la elevación de tensión al tener que demandar una gran cantidad potencia para lograr la compensación.

Desfase, esta limitante se puede apreciar en el caso 2, ya que a pesar de que todas las perturbaciones fueron compensadas en magnitud, no lo fueron en fase, y por consiguiente al momento de la perturbación, las tres fases se alinean, perdiendo así sus ángulos de 120 y -120 iniciales, resultando en una tensión desbalanceada.

6. Conclusiones y recomendaciones

En base a las simulaciones ejecutadas se puede apreciar que el DVR cumple con su función principal de compensar hundimientos y elevaciones de tensión, sin embargo, debido al esquema de control utilizado, este presenta limitaciones en contrarrestar los desfases de las perturbaciones. Para mejorar estas limitaciones, se haría necesario un control pre- falla, como se menciona en el capítulo 2.3.1. Lo anterior demuestra que, en la implementación real de un DVR, es crucial la

selección de la técnica de compensación a emplear, ya que al presentar desfases como los vistos en la Figura 37, la tensión de neutro puede llegar a ser peligrosa para las cargas allí conectadas.

Otra limitante a tener en cuenta en el DVR es la cantidad de potencia que puede llegar a entregar, esto depende principalmente del almacenador de energía, en este caso la batería, concluyendo que, al momento del diseño, se debe tener en cuenta la posible potencia máxima solicitada por una perturbación, con el fin de que el restaurador pueda compensar en su totalidad la alteración de tensión.

Referencias Bibliográficas

- Al-Mathnani, A. O., Shareef, H., Mohamed, A., Members, M. A. M. A., & Hannan, M. A. (2010). Power quality improvement using DVR with two fast vector control. *PEOCO 2010 - 4th International Power Engineering and Optimization Conference, Program and Abstracts*, (June 2014), 376–381. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2010.5559216>
- Barvadiya, R. (2020). Voltage Quality Improvement In Distribution Network Using Custom Power Device 3 . Basic Structure Of Dvr, *10(5)*, 338–344.
- Carrillo, U. P. D., & Tirira, F. D. W. (2019). Diseño e implementación de un prototipo de Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR) para mitigar variaciones de corta duración en cargas residenciales. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20552>
- Christian, A., & Alder, S. (2010). *Restaurador Dinámico de Tensión (DVR): Análisis y estrategias de control*. Universidad Industrial de Santander.
- ICONTEC. (2008). *Calidad de la Potencia Eléctrica. Límites y Metodología de Evaluación en Punto de Conexión Común - NTC 5001*.

IEEE Std 1159. (2019). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Standard 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)* (Vol. 2019).

Jayakumar, A., & Devarajan, R. (2019). Compensation of Voltage Sag and Swell Using Smes Based Dynamic Voltage Restorer, *5*(1), 22–31.

José, R., Franquelo, L. G., Samir, K., León, J. I., Portillo, R. C., Prats, M. Á. M., & Pérez, M. A. (2009). Multilevel converters: An enabling technology for high-poer applications. *Proceedings of the IEEE*, *97*(11), 1786–1817.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2030235>

Mansor, M. A., Othman, M. M., Musirin, I., & Noor, S. Z. M. (2019). Dynamic voltage restorer (DVR) in a complex voltage disturbance compensation. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, *10*(4), 2222–2230.
<https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i4.2222-2230>

P. Joshi, S., & J. Shah, P. (2015). Topologies for Voltage Sag & Swell Compensation by Dynamic Voltage Restorer. *Ijireeice*, *3*(11), 50–53. <https://doi.org/10.17148/ijireeice.2015.31110>

Petit Suárez, J. F. (2012). Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados. *Ph.D. Dissertation*, 219.

Radadiya, K. P., Vibhakar, C. K., Rajani, S. V., & Bhayani, J. (2013). Voltage Compensation Using Dynamic Voltage Restorer (DVR), *2013(Ratmig)*, 645–654.

Ramachandaramurthy, V. K., Zhan, C., Barnes, M., & Jenkins, N. (2000). Dynamic voltage restorer for voltage sag/swell mitigation. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 161.

Ramasamy, A. K., Iyer, R. K., Ramachandaramurthy, V. K., & Mukerjee, R. N. (2005). Dynamic voltage restorer for compensation of voltage sag. *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2, 1289–1294.
<https://doi.org/10.1109/peds.2005.1619886>

Remya, V. K., Parthiban, P., & Nandakumar, A. (2018). Phase advance compensation of voltage sags using full bridge inverter based DVR. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy: Exploring Energy Solutions for an Intelligent Power Grid, TAP Energy 2017*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397236>

Rey, A. H. (2013). Trabajo de diploma Trabajo de diploma “ Restaurador Dinámico de Tensión.

Roger, D. M. F. G. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std. 519-2014*, 2014.

Sepulveda, C., & Alzate, A. (2011). Metodología Para El Diseño Y Dimensionamiento De Un Restaurador Dinámico De Tensión. *Scientia Et Technica*, 16(48), 19–24.
<https://doi.org/10.22517/23447214.1221>

Serrano-Domínguez, D. (2014). Análisis Comparativo de Técnicas de Sincronización con la Red Eléctrica.

Singh, B., AlHaddad, K., & Chandra, A. (1999). A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(5), 960971.
<https://doi.org/10.1109/41.793345>

Special, I., On, C., & Interference, R. (2008). *IEC 61000-4-30 International Standard*.

Suraya, S., Irshad, S. M., Azeem, M. F., Al-Gahtani, S. F., & Mahammad, M. H. (2020). Multiple Voltage Disturbance Compensation in Distribution Systems using DVR. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(3), 5732–5741.
<https://doi.org/10.48084/etasr.3485>

Villalobos, M. (2011). Trabajo de investigación presentado como requerimiento parcial para optar al título de:

Wasnik, D., Shaha, P. R., & Ghutke, P. (2019). Compensation of Sag and Swell Voltage by using Dynamic Voltage Restorer. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development, Volume-3(Issue-4)*, 403–408. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd23740>