

METODOLOGIA PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN RESTAURADOR DINÁMICO DE TENSIÓN

Methodology to size and design a dynamic voltage restorer

RESUMEN

Uno de los problemas que pueden presentar los sistemas eléctricos de manera más común es debido al deterioro en la calidad de la energía, lo cual se ve reflejado en caídas de tensión (sags), sobretensiones (swells), o perturbaciones debido a diferentes causas. Esto afecta las cargas sensibles que necesitan un nivel de tensión y de frecuencia constantes. Se hace necesario plantear alguna solución, una de ellas es el DVR (*Dynamic Voltage Restorer*). En este artículo se presenta la forma como se dimensiona cada componente del DVR para un sistema de distribución con una carga sensible a perturbaciones.

PALABRAS CLAVES: Sistema de Distribución, Sag, Compensación, DVR, Transformador de acople, almacenamiento de energía, convertidor fuente de tensión.

ABSTRACT

One of the problems that may occur in electrical systems is caused by power quality degradation; this problem shown voltage dips (sags), overvoltage (swells), or disturbances due to different causes, these events affect sensitive loads which require constant voltage and constant frequency. It becomes necessary propose a solution; such as the implementation of DVRs (Dynamic voltage restorers). This article presents the procedure to build and design each component of the DVR in a distribution system with a load sensitive to disturbances.

KEYWORDS: Distribution system, sag, compensation, DVR, injection transformer, energy storage, voltage source converter.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en la complejidad del sistema de potencia y al aumento de dispositivos electrónicos sensibles en el sector industrial, el problema de calidad de energía ha tomado una alta relevancia. Las caídas de tensión (“sags”), las sobretensiones (“swells”), los transitorios y las interrupciones momentáneas (interrupciones menores a un minuto) constituyen los problemas de calidad de energía típicos para los usuarios industriales. Este proyecto se enfoca en las caídas de tensión pues estas constituyen el evento de calidad de energía que ocurre de manera más frecuente. Aproximadamente el 85% de los problemas de calidad de energía son debidos a caídas de tensión.

Hay 2 maneras de tratar el problema de calidad desde el punto de vista del usuario, una es asegurarse que los equipos no son sensibles a perturbaciones y su funcionamiento no es afectado por las mismas. La otra es instalando un dispositivo *custom power* para eliminar o contrarrestar estas perturbaciones.

El DVR es un dispositivo que se conecta en serie, y que puede inyectar tensiones en la red de tal manera que se pueda controlar la tensión en la carga. En el caso de una

CHRISTIAN SEPULVEDA

Ingeniero Electricista
Estudiante Maestría en Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
chrisdavid1205@utp.edu.co

ALFONSO ALZATE GOMEZ

Ingeniero Electricista, M.Sc
Profesor Titular
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@sysmanten.com

caída de tensión, el DVR inyecta el nivel suficiente para conservar la tensión nominal en la carga.

A pesar de que el DVR es una buena solución para el problema de calidad de energía, es una tecnología con mucho por desarrollar primordialmente en el área de control y en el tema de los dispositivos de conmutación, por lo tanto es poco comercial en la actualidad.

2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL DVR

El DVR es un compensador serie diseñado para mejorar la calidad de energía en un sistema de distribución de media y baja tensión. La función primaria del DVR es proteger a los usuarios más sensibles de los efectos de caídas de tensión y sobretensiones (*sags* y *swells*). Los “sags” son el problema más común y costoso de calidad de energía, los cuales se producen generalmente por fallas en la red.

2.1. CALCULO DE SAGS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Para calcular el efecto de un “sag” en un sistema de distribución radial, se utiliza el modelo de divisor de tensión de la Fig.1., en donde se asume que la corriente

de falla es mucho mayor que la corriente en la carga durante la falla. De la Fig.1. [1], [2], la tensión en el punto de acoplamiento común (PCC) y el ángulo de falla pueden ser obtenidos por:

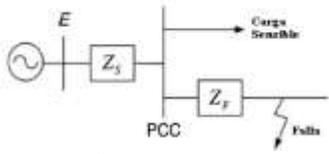


Figura.1. Diagrama unifilar de un sistema de distribución radial

$$Vsag = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} E \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \arg(Vsag) = \arctan\left(\frac{X_f}{R_f}\right) - \arctan\left(\frac{X_s + X_f}{R_s + R_f}\right) \quad (2)$$

Donde:

$Z_s = R_s + jX_s$; es la impedancia de la fuente en el PCC

$Z_f = R_f + jX_f$; es la impedancia entre el PCC y la falla.

3. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN UN DVR

Un DVR consiste esencialmente en un transformador de acople, un convertidor fuente de tensión (VSC), un filtro de salida LC y un dispositivo almacenador de energía DC [8], tal como se muestra en la fig.2.

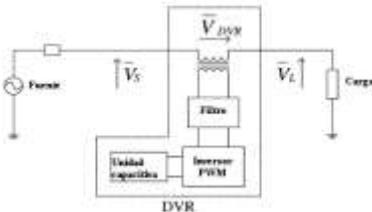


Figura.2. Esquema típico de un DVR

3.1. DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE ACOPLÉ

El transformador debe manejar la tensión inyectada y el flujo de corriente proveniente del DVR esto puede generar pérdidas en el hierro desde histéresis a corrientes de Eddy, y corrientes de magnetización no lineales [4].

3.1.1. MÉTODO DEL ÁREA PRODUCTIVA

Este método utiliza el área productiva A_p la cual está definida como el producto del área de la ventana del transformador y el área del núcleo. El área productiva del núcleo está dada en términos de la capacidad de manejo de potencia P_t y está definida como [4].

$$A_p = \frac{P_t}{K_f K_u B_{ac\max} K_j f} \quad (3)$$

Donde:

K_f : Es el coeficiente de la forma de onda

K_u : Es el factor de utilización

$B_{ac\max}$: Es la densidad de flujo máxima del núcleo

K_j : Es la densidad de corriente constante

f : Es la frecuencia de la fuente

La capacidad de potencia del transformador se calcula a partir de la potencia y la corriente de la fuente, se encuentra mediante [4]:

$$P_t = V_s I_s \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) \quad (4)$$

Donde η es la eficiencia del transformador. Para el área del núcleo A_c el número de vueltas en el primario puede ser calculado de la siguiente manera [4]:

$$N_p = \frac{V_p}{K_f B_{ac\max} A_c} \quad (5)$$

De igual manera el número de vueltas en el secundario puede ser encontrado con la tensión nominal del secundario. La densidad de corriente por la bobina será:

$$J = \frac{P_t}{K_f K_u B_{ac\max} A_p f} \quad (6)$$

El tamaño del cable para el devanado primario A_{bare} se calcula como:

$$A_{bare} = \frac{I_p}{J} \quad (7)$$

Así mismo puede conocerse el tamaño del cable del devanado secundario conociendo el valor de la corriente por el secundario [4].

3.1.2. IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO

Un aspecto importante en el diseño del transformador es la caída de tensión a través del mismo, debido al tamaño de la impedancia de cortocircuito. La inductancia de esta puede en algunos casos ser utilizada en el filtro de los armónicos de los interruptores del VSC. Las pérdidas por resistencia en su mayoría son no deseadas, pero pueden dar algún amortiguamiento a las oscilaciones en el filtro del compensador [9], [11].

Además esta impedancia tiene una gran influencia en la corriente de cortocircuito, la cual aparece durante un

corto cerca de la carga. Las componentes reactivas y resistivas del transformador pueden ser calculadas referidas al lado primario como:

$$X_{pri} = \frac{V_p^2}{S^2} V_{sagq} \tag{8}$$

$$R_{pri} = \frac{V_p^2}{S^2} V_{sagp} \tag{9}$$

$$Z_{pri} = R_{pri} + jX_{pri} \tag{10}$$

Con:

X_{pri} : La reactancia del transformador referida al lado primario

R_{pri} : La resistencia del transformador referida al lado primario

Z_{pri} : La impedancia de cortocircuito referida al lado primario

S : Potencia nominal del transformador

V_{sagq} : La tensión reactiva de caída en pu.

V_{sagp} : La tensión activa de caída en pu.

3.2. DISEÑO DEL FILTRO

El modelo del filtro LCL aplicado a un VSC paralelo es ilustrado en la Fig.3. La impedancia de la fuente es muy baja y por superposición esta puede ser considerada un cortocircuito [9], [11]. La frecuencia de resonancia es definida por las 2 inductancias L_{1f}, L_{2f} y el capacitor del filtro C_f . También se debe tener en cuenta que para un convertidor pequeño conectado a una fuente grande, la influencia de la inductancia del suministro es mínima $L_{2f} \ll L_{fuente}$ (inductancia de la fuente). La frecuencia de resonancia para el filtro es igual a:

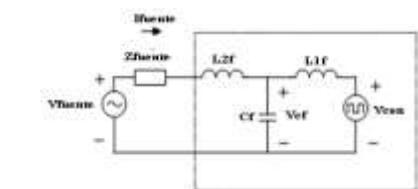


Figura.3. Filtro LCL aplicado a un convertidor paralelo

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{1f} + L_{2f} + L_{fuente}}{L_{1f}(L_{2f} + L_{fuente})} C_f} \tag{11}$$

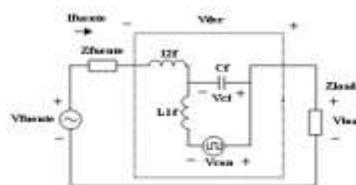


Figura.4. Filtro LCL aplicado a un convertidor serie

Para una conexión serie el modelo del convertidor es mostrado en la Fig.4. La inductancia de la fuente también es incluida en el modelo [9], [11]. Para un DVR la frecuencia de resonancia varía con la conexión de la carga de acuerdo con:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{1f} + L_{2f} + L_{fuente} + L_{load}}{L_{1f}(L_{2f} + L_{fuente} + L_{load})} C_f} \tag{12}$$

En las aplicaciones del DVR generalmente se tiene el caso que:

$$L_{fuente} + L_{load} + L_{2f} \ll L_{1f} \tag{13}$$

Lo que permite simplificar la frecuencia de resonancia a:

$$f_{res} \cong \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{1f} C_f}} \tag{14}$$

3.3. DISEÑO DEL CONVERTIDOR

El convertidor es un inversor fuente de tensión, el cual está equipado con interruptores totalmente controlados. Se pueden considerar 2 tipos de interruptores que son el GTO y el IGBT. La mejor opción es el IGBT debido a que es fácil de controlar y es adecuado para manejar potencias medias y bajas [9], [11].

Cabe destacar que la topología elegida para el convertidor es la del puente completo con transformador Y/Y de la Fig.5., debido a que es una topología versátil y puede:

- Inyectar tensiones de secuencia cero
- Sintetizar tensiones trifásicas
- Reducir el tamaño del filtro debido a que tiene una alta frecuencia de conmutación
- Controlar y cargar con facilidad el dispositivo de almacenamiento.

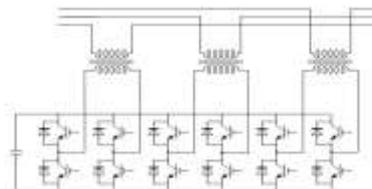


Figura.5. Convertidor de puente completo con transformador en Y/Y

Se utiliza un puente completo por fase, y se utiliza la técnica PWM sinusoidal para disparar los interruptores de potencia [9], [11]. Con un índice de modulación en amplitud igual a:

$$m_a = \frac{V_{conv}}{V_{dc}} \quad (15)$$

Donde:

V_{conv} : Tensión a la salida del convertidor

V_{dc} : Tensión en el banco capacitores

Si $m_a < 1$, la componente fundamental de la frecuencia varía linealmente con m_a . Si $m_a > 1$, la tensión de salida contiene más armónicos y la componente fundamental de la frecuencia no varía linealmente con m_a [9], [11].

3.4. TOPOLOGIA PARA OBTENER ENERGÍA DURANTE UNA CAIDA DE TENSION

El DVR puede obtener energía de 2 formas, una es usando una unidad de almacenamiento de energía y otra extrayendo energía directamente de la red, esto se explica en [7] y [9]. Para este caso en particular se usó la topología 1 de [7], que se ilustra en la Fig.6.

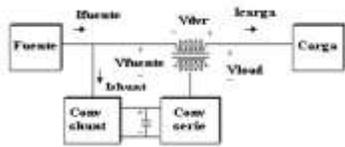


Figura.6. Convertidor no controlado conectado en paralelo al lado de la fuente

El convertidor al lado de la fuente es no controlado. La red carga el capacitor a través del convertidor, por tanto la tensión en el capacitor es aproximadamente igual al pico de la tensión de fase de la red, por ello durante un sag, la tensión en el capacitor disminuye proporcionalmente a la magnitud del sag.

$$v_{dc} \approx |v_{red}| \approx |a| \quad (16)$$

$$a = \frac{v_{sag}}{v_{load}} \quad (17)$$

Donde:

v_{dc} : Tensión en el capacitor

v_{red} : Tensión en la fuente

v_{sag} : Tensión en la red durante la caída de tensión

v_{load} : Tensión en la carga

La tensión máxima en pu para el convertidor en paralelo es:

$$|v_{shunt}| = 1 \quad (16)$$

Y para el convertidor serie:

$$|v_{series}| = |1 - a| \quad (17)$$

Mientras que la corriente máxima que pueden manejar los convertidores es respectivamente:

$$|i_{shunt}| = \frac{|1 - a|}{a} \quad (18)$$

$$|i_{series}| = 1 \quad (19)$$

Entonces la potencia máxima de cada convertidor está dada por:

$$s_{shunt} = |v_{shunt}| |i_{shunt}| = \frac{|1 - a|}{|a|} \quad (20)$$

$$s_{series} = |v_{series}| |i_{series}| = |1 - a| \quad (21)$$

Se puede notar que las potencias de los 2 convertidores no son iguales, ya que el manejo de la potencia para el convertidor serie es directamente proporcional a la caída de tensión, mientras que la tensión y la corriente máximas de la carga en el convertidor paralelo no ocurren simultáneamente [7], [9], [11].

3.5. TAMAÑO DEL CAPACITOR

Con la potencia total del DVR y con base en una constante de tiempo definida de acuerdo a la duración de la caída de tensión se puede hallar la energía que se requiere almacenar en el dispositivo [9], [11]:

$$E_c = \tau_c S_{DVR} \quad (22)$$

Con el valor de la energía almacenada es posible determinar el valor del banco de capacitores:

$$E_{banco} = \frac{1}{2} C_{dc} \times V_{dc}^2 \quad (23)$$

4. ESTRATEGIA DE CONTROL

Para controlar los pulsos de disparo del convertidor se usó la técnica PWM sinusoidal. Para generar los pulsos de disparo se comparan la señal triangular con la señal de referencia, [5], [6], [11] la generación de estas señales se hace de la siguiente manera:

Se toman las tensiones del sistema por fase, luego se ingresan a un PLL (*Phase Locked Loop*) [3]. La señal de salida del PLL se multiplica por la frecuencia de la señal portadora y se limita a un rango de 0 a 360 grados, esta señal se divide en un arreglo de dos señales triangulares una que dará la señal de apagado y otra que dará la señal de encendido [10].

Para obtener la señal de referencia se hace un arreglo similar. Se toma la señal de salida del PLL, se pasa de grados a radianes y se divide en 3, de allí se convierte en una señal sinusoidal normalizada y se le resta las señales medidas en la red bajo perturbación para obtener el error en la señal [10].

5. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DVR

Con base en la información hallada y a los cálculos efectuados se puede establecer una metodología para diseñar y dimensionar el DVR de manera adecuada, para ello:

- a) De acuerdo a una base de datos de las fallas que ocurren cerca a la carga sensible, se puede calcular el valor de las caídas de tensión V_{sag} y con ello la cantidad de tensión que debe inyectar el DVR a la red (se debe tener en cuenta que si la caída de tensión es de gran magnitud el DVR no se encuentra en capacidad de corregirla)
- b) Se escoge una topología adecuada para el convertidor (esto depende del tipo de problema de calidad que se esté abordando y del tipo de carga que se esté protegiendo).
- c) Se elige una topología para tener acceso a potencia activa durante una perturbación de energía (ya sea con almacenador o sin almacenador de energía eso depende principalmente de la cantidad de presupuesto disponible y de la topología del sistema)
- d) Se diseña el transformador de acople más adecuado para el tipo de sistema, el tipo de carga y el tipo de convertidor.
- e) Se calcula la energía a almacenar para la topología del convertidor escogida de acuerdo a la potencia del convertidor y considerando el tiempo de caída
- f) Se halla el nivel de tensión de los condensadores en base a la relación de tensión entrada-salida del convertidor. Dado esto y calculada la energía que se debe almacenar se obtiene el valor del banco de capacitores

- g) Se escoge una estrategia de compensación y se usa la técnica PWM para disparar los tiristores utilizando un control para señal de referencia en lazo abierto.

6. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Se modelo un sistema de distribución como el que se muestra en la Fig.7., por medio del software PSCAD, se usaron fallas tanto trifásicas como monofásicas para ver la operación del compensador y establecer las comparaciones pertinentes.

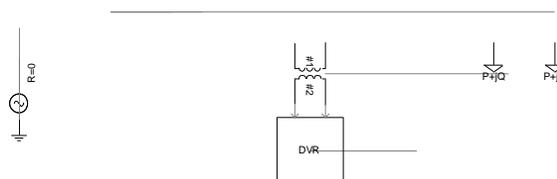


Fig.7. Sistema a simular

Para el sistema de la fig.7. con tensión nominal de 7.5kV y 60 Hz, los parámetros de las cargas y el DVR son las consignadas en la tablas 1 y 2 respectivamente:

	Potencia aparente	Factor de Potencia
Carga 1	0.9	0.8
Carga 2	0.9	0.85

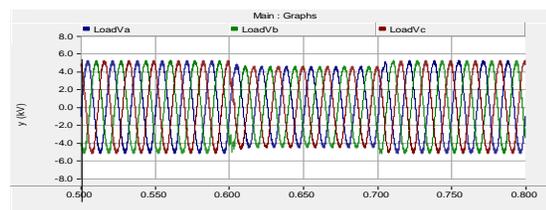
Tabla.1. Parámetros de las cargas

	Potencia de los transformadores (MVA)	Tensión en el trafo 1 (kV)	Tensión en el trafo 2 (kV)	Condensador (µF)
DVR	1	7.5/2	7.5/4	4000

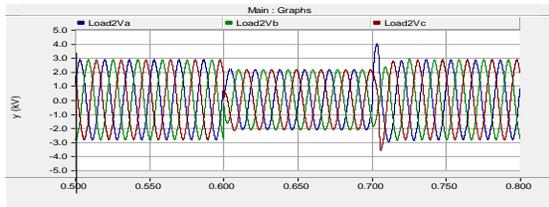
Tabla.2. Parámetros del DVR

Para el sistema de la Fig.7., se simulo para el siguiente caso:

Se analizó la respuesta del sistema cuando ocurre una falla en la carga no protegida (denominada carga 2) la cual es llamada falla f , se tomaron medidas de tensión y corriente tanto en la carga protegida por el DVR (llamada carga 1), como en la carga 2. Se considera que la falla introducida al sistema es trifásica y ocurre a los 0.6s., con una duración de 0.1s., y que además son fallas de impedancia 5Ω .



a)



b)

Figura.8. Falla f trifásica a) Tensión en carga 1 b) Tensión en carga 2

OPERACIÓN	TENSIÓN PICO (kV)	CORRIENTE PICO (kA)	TENSIÓN NOMINAL(pu)
normal	5.28	0.069	0.84
Falla sin DVR	3.4	0.045	0.55
Falla con DVR	4.5	0.06	0.72

Tabla.3. Magnitudes de V, I, Vpu antes y después de la falla f trifásica en la carga 1

OPERACIÓN	TENSIÓN PICO (kV)	CORRIENTE PICO (kA)	TENSIÓN NOMINAL(pu)
normal	2.8	0.045	0.78
Falla sin DVR	1.95	0.029	0.59
Falla con DVR	2.05	0.03	0.6

Tabla.4. Magnitudes de V, I, Vpu antes y después de la falla f trifásica en la carga 2

De la Fig.8. se puede observar que el impacto de la falla f en la magnitud de la tensión en la carga 1 es menor al impacto visto en la carga 2. Comparando las magnitudes de la tensión y la corriente en las Tablas 3 y 4 se observa la diferencia entre las magnitudes en operación normal, en falla conectado el DVR y en falla sin el DVR, con base en estos resultados se puede afirmar que el DVR disminuye el impacto de la falla.

7. CONCLUSIONES

Se diseñó una metodología para el diseño y dimensionamiento de cada una de las componentes que conforman un DVR.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas 1 y 2, y estableciendo comparaciones se puede decir que el DVR efectivamente mitiga el efecto de las caídas de tensión en la carga a la cual se encuentra conectado.

Se puede mejorar el rendimiento del DVR mejorando su circuito de control, utilizando métodos de conmutación diferentes a la técnica PWM y aumentando la complejidad del seguidor de fase PLL.

8. REFERENCIAS

[1] Y. W. Li and D. M. Vilathgamuwa, "A Dual Functional Medium Voltage Level DVR to Limit

Downstream Fault Current," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.22, n.4, pp. 1330-1340, July 2007.

[2] I. Y. Chung, D. Y. Won, S. Y. Park, "The DC link energy control method in dynamic voltage restorer system," *Electrical Power and Energy Systems*, Seoul National University, Vol.25. 2003, pp. 525-531.

[3] K. R. Agileswary and K. I. Rengan, "Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation," *IEEE PEDS*, 2005, pp. 1289-1294.

[4] S. Sasitharan, *et al.* "Rating and Design Issues of DVR Injection Transformer," *Department of Electrical Engineering, IIT Madras, India, IEEE*, pp. 449-455, 2008

[5] A. Ghosh and L. Gerard, "Structures and Control of a Dynamic Voltage Regulator (DVR)," *IEEE*, pp. 1027-1032, 2001.

[6] M. R. Banaei, S. H. Hosseini and S. Khanmohamadi, "Verification of a New Energy Control Strategy for Dynamic Voltage Restorer by Simulation," *Simulation Model Practice and Theory*, Vol.14, pp. 112-125, 2006.

[7] J. G. Nielsen and F. Blaabjerg, "A Detailed Comparison of System Topologies for a Dynamic Voltage Restorer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No.5, pp. 1272-1280, Sept-Oct. 2005.

[8] M. Tumay, A. Teke, and C. K. Bayindir, "Simulation and Modeling of a Dynamic Voltage Restorer," Cukurova University, Adana, Turkey.

[9] J. G. Nielsen, "Design and Control of DVR". Phd Thesis, Aalborg University, Denmark, Institute of Energy Technology, March 2002.

[10] S. W. Wahab, y A. M. Yusuf, "Voltage Sag and Mitigation Using Dynamic Voltage Restorer (DVR) System". *Faculty of Electrical Engineering, University Teknologi Malaysia, Elektrika*, Vol.8, No.2, pp. 32-37, 2006.

[11] A. Alzate, "Análisis de Impactos sobre el Sistema de Distribución con Uso de Dispositivos Custom Power", Codensa S.A. ESP, Bogotá, Colombia, Informe Técnico, Universidad Tecnológica de Pereira, Julio, 2009.

9. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a Colciencias y su programa jóvenes investigadores e innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda" por el apoyo económico en el desarrollo de esta investigación.