

## CASO DE ESTUDIO:

### *Mitigación de sags en líneas de distribución radiales utilizando restauradores dinámicos de tensión basado en inversores*

Escrito por Kristel Barahona Sánchez y Johan Ramírez Meza, noviembre 2025

## SINOPSIS

Los sags representan para las líneas de distribución los problemas más típicos de calidad de la energía. Esto suele deberse a arranques de motores de gran potencia, fallas eléctricas (como cortocircuitos), o sobrecargas momentáneas en el sistema. Estos eventos pueden afectar el desempeño de equipos sensibles y reducir la calidad del suministro eléctrico.

## RESTAURADORES DINAMICOS DE TENSIÓN (DVR)

Los restauradores dinámicos de tensión (DVR) se presentan como una solución efectiva para la mitigación de Sags en las redes de distribución. Los DVR se modelan como fuentes variables de tensión conectados en serie con la carga [4]. Ante la detección de un evento indeseado, los DVR inyectan un voltaje compensatorio para mantener el perfil de tensión deseado.

El DVR está formado por diferentes etapas y elementos que permite intercambiar P y Q con la red de distribución mientras se hace la compensación de tensión. A continuación, se muestran las etapas de un DVR [6].

1. **Almacenamiento:** energía almacenada necesaria ante la compensación.
2. **Inversor:** convierte la energía almacenada en voltaje AC controlable.
3. **Filtro Pasivo:** elimina armónicos de alta frecuencia generados por el inversor.
4. **Transformador:** acopla el voltaje compensado a la red de distribución.
5. **Bypass:** desvía las altas corrientes de falla para proteger el inversor.
6. **Enlace DC:** actúa como buffer de energía para transitorios rápidos.

La elección de un DVR no es estandarizada, depende de un conjunto de factores técnicos que determinan la viabilidad de la solución. Ante estas posibilidades existen distintas topologías que permiten desempeños distintos para escenarios específicos. El nivel de tensión de aplicación, la configuración del almacenamiento, el tipo de convertidor y la elección o no del transformador son combinaciones de distintas topologías que determinaran la calidad de la solución [9].

Los métodos de compensación en los DVR son las formas en las que se va a inyectar la tensión ante una compensación para restaurar la calidad del suministro. Estos métodos son fundamentales y determinan cómo se va a utilizar la energía almacenada y como va a ser la calidad de la restauración. Algunos métodos de compensación son los siguientes [9]:

- **Compensación por fase:** inyecta una tensión con la magnitud y ángulo faltante en la fase para restaurar el voltaje.
- **Compensación pre-sag:** corrige la tensión tanto en magnitud como en fase. Se calcula la diferencia vectorial entre el voltaje en la red antes de la falla y el voltaje de la red durante la falla. Lo que inyecta o compensa es exactamente el vector de diferencia que se calculó.

- **Compensación por energía mínima:** esta técnica trata de hacer una compensación puramente reactiva. Para ello, inyecta un voltaje que sea perpendicular a la corriente de la carga para que solo haya intercambio de potencia reactiva. También hay una variación que se llama el método de avance de fase (phase advance method), en este caso el DVR inyecta un voltaje adelantado un cierto ángulo respecto al voltaje de la red que ha sufrido el sag para minimizar la inyección de potencia activa.
- **Compensación Híbrida:** combinación de distintos modos de compensación.

## CASO REAL

La empresa distribuidora Duke Power de Carolina del Sur implementó un DVR en un circuito radial con tensión de 12,47 kV, en un pueblo ubicado lejos del centro urbano. La configuración de la alimentación es radial debido a que en su cola de circuito presenta un cliente de tipo industrial, específicamente una planta automatizada de hilado y tejido. Esta empresa por su ubicación sufre de constantes eventos de tensión con caídas que pueden llegar al 33% en la mayoría de los casos, y para lo cual la empresa distribuidora no ha logrado encontrar una solución eficiente para mitigar estos efectos [7]

En la Figura 1 extraída de [7] se muestra un esquema de conexión típico para un DVR, el cual debe colocarse en serie con la línea de distribución cerca del punto en donde se quiere corregir el evento. Mientras que en la figura Y, se puede observar la implementación realizada por parte de Duke Power en la acometida que alimenta este cliente industrial, el cual dentro de su esquemático se observa la implementación de protección tipo “By Pass” y un transformador de inserción para poder adaptar el aporte del DVR a la tensión de operación de la línea de distribución. Las especificaciones técnicas consistían en un inversor de 2 MVA con almacenamiento basado en capacitores, los cuales podía inyectar hasta 2 kWh durante un evento, por hasta 30 ciclos.

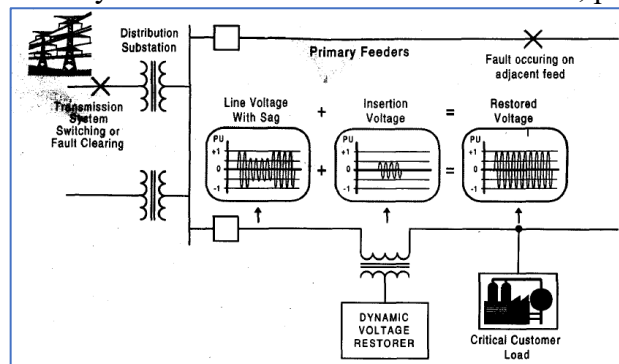


Figura 1. Configuración óptima de ubicación del DVR en línea de distribución. Tomada de [7]

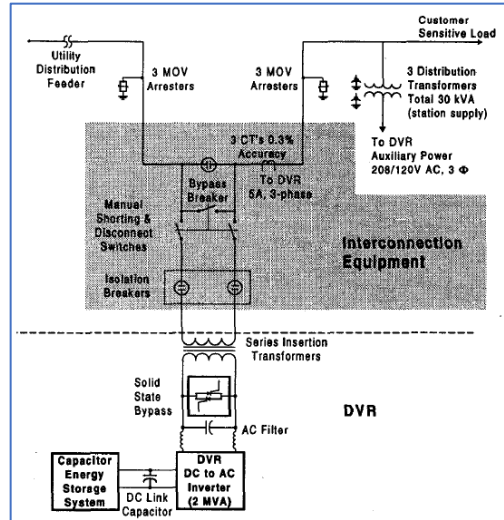


Figura 2. Configuración óptima de ubicación del DVR en línea de distribución. Tomada de [7]

En uno de los eventos monitoreados, se experimentó una caída de tensión bastante profunda que normalmente hubiera sacado el proceso de producción de la planta (0,22 pu de tensión durante el evento) que requirió un 53 % de tensión insertada del DVR de 2 MVA, ver figura Z.A. La acción del DVR duró aproximadamente 100 milisegundos, y utilizó un 7,7% de la energía almacenada. Esto permitió mantener el evento de tensión por encima de 0,83 pu, manteniendo la operación de la planta, ver figura Z.C.

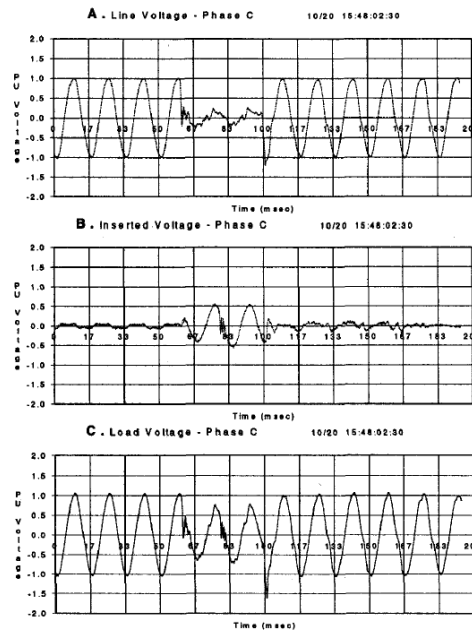


Figura 3. Mediciones del evento. A: Tensión en la línea, B: Energía inyectada por el DVR, C: Tensión obtenida en la acometida del cliente. [9]

Si bien la acción del DVR no logró eliminar completamente el evento de tensión, logró una mitigación importante que permitió mantener la operación normal de la planta, objetivo principal de la empresa Distribuidora.

## CONCLUSIÓN

Los restauradores dinámicos de tensión basado en inversores son una solución que permite a las empresas distribuidoras mitigar los sags o eventos de tensión críticos utilizando electrónica de potencia y sistema de almacenamiento de energía, el ejemplo mostrado en este artículo técnico permitió visualizar la relevancia de una solución con equipos de potencia comunes. Su implementación en circuitos radiales puede ser beneficiosa tanto para clientes como para empresas distribuidoras.

## REFERENCIAS

- [1] H. M. A. Ahmed, A. S. A. Awad, M. H. Ahmed, and M. M. A. Salama, "Mitigating voltage sag and voltage deviation problems in distribution networks using battery energy storage systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 184, p. 106294, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106294.
- [2] Electric Power Research Institute (EPRI), *Development of the Platform-Mounted Dynamic Voltage Restorer (PMDVR)*, Final Report No. TR-112114. Palo Alto, CA: EPRI, 1998.
- [3] U. K. Jhuma *et al.*, "The impact of synchronous generator on voltage sag mitigation in power system network," in *Proc. 2021 4th Global Conf. on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/GUCON50781.2021.9573961.
- [4] M. I. Khan and P. C. B. Naidu, "Voltage sag and mitigation using dynamic voltage restorer (DVR) system for power quality improvement," *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 2, p. 302, 2017.
- [5] S. Mahmoodi and H. Tarimoradi, "A novel partitioning approach in active distribution networks for voltage sag mitigation," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 149206–149220, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3476242.
- [6] N. Mbuli, "Dynamic voltage restorer as a solution to voltage problems in power systems: Focus on sags, swells and steady fluctuations," *Energies*, vol. 16, no. 19, p. 6946, 2023, doi: 10.3390/en16196946.
- [7] L. Morgan, N. Woodly, and A. Sundaram, *Experience With An Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer*. California: IEEE, 1999.
- [8] S. K. Paramasivam, S. K. Ramu, S. Mani, S. Muthusamy, S. C. M. Sundararajan, H. Panchal, and K. K. Sadasivuni, "Improved dynamic voltage restorer with reduced capacity of power components using sliding mode control," *IET Power Electronics*, vol. 14, no. 5, pp. 958–968, 2021, doi: 10.1049/pel2.12078.
- [9] V. Remya, P. Parthiban, R. S. K. A. Jan, and V. K. Thankachan, "Dynamic voltage restorer (DVR) – A review," *J. Green Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 519–572, Oct. 2018, doi: 10.13052/jge1904-4720.84