

MODELIZACIÓN PARA EVALUAR LA COORDINACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES IMPULSIVAS

*MODELING TO EVALUATE THE COORDINATION OF SURGE
PROTECTION DEVICES*

Julio Guillermo Zola

Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, Argentina
jzola@fi.uba.ar

Recepción: 28/junio/2021

Aceptación: 9/agosto/2021

Resumen

Se analizan modelos simples para evaluar el comportamiento de un sistema de protección contra sobretensiones impulsivas en equipos electrónicos de baja potencia (denominados en las normas como "equipamiento sensible"). Este trabajo está enfocado a la coordinación de estas protecciones cuando deben conectarse en cascada para asegurar un funcionamiento adecuado de estos dispositivos. Analizando un ejemplo particular se discute el mejor arreglo circuital frente al evento transitorio. Esta evaluación se basa en la construcción de un modelo equivalente eléctrico que permita describir la metodología de análisis a realizar y de esta manera poder interpretar y aplicar esquemas más eficaces de acuerdo con las recomendaciones de los estándares.

Palabras Clave: Coordinación; Impulso; Varistor.

Abstract

Simple models are analyzed to evaluate the behavior of a protection system against surge voltages on low-power electronic equipment (referred to in the standards as "sensitive equipment"). This work is focused on the coordination of these protections when they must be connected in cascade to ensure proper operation of these devices. Analyzing a particular example, the best circuit arrangement against the transitory event is discussed. This evaluation is based on the construction of an electrical equivalent model that allows describing the analysis

methodology to be carried out and in this way being able to interpret and apply more efficient schemes in accordance with the standards.

Keywords: *Coordination; Surge; Varistor.*

1. Introducción

Los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), se utilizan para proteger equipamiento eléctrico y electrónico frente a sobretensiones que producen impulsos de corriente de alta energía, tales como las inducidas en el cableado por descargas atmosféricas, las sobretensiones de maniobra (arranque o parada de motores), así como la conexión y/o desconexión de bancos de capacitores para mejorar el factor de potencia en entornos industriales, entre otros eventos. La figura 1 muestra cómo se altera la señal V_n de una red eléctrica de 220 V_{rms} y 50 Hz ante la presencia de estos impulsos espurios.

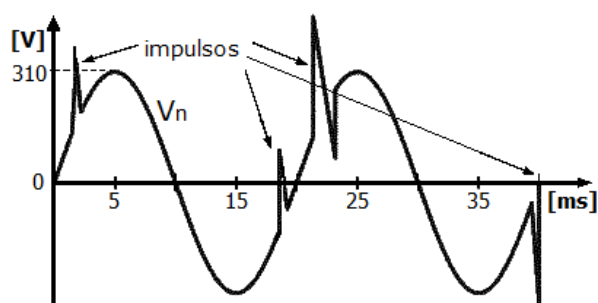


Figura 1 Impulsos de kV (fuera de escala) inducidos sobre una red eléctrica.

Estas corrientes impulsivas tienen en general valores que pueden alcanzar las decenas de kA, en tiempos tan breves como algunos μ s a cientos de μ s. Al circular hacia tierra a través del cableado, de las capacitancias parásitas entre los cables y tierra, y de los circuitos conectados a la red eléctrica, estas corrientes impulsivas (o emisiones conducidas espurias de alta energía) provocan voltajes de modo común de decenas a cientos de kV que pueden deteriorar la aislación eléctrica de los equipos. Si bien también se producen sobretensiones entre líneas (modo diferencial) que pueden llegar a alterar el funcionamiento de los equipos (y que eventualmente deben ser valoradas dentro de un sistema de protección integral), la

mayor parte de la energía involucrada en estos eventos puede considerarse concentrada en el modo común [Pulse Tech., 1999].

Un DPS es un dispositivo cuya función es limitar las sobretensiones transitorias y dar un camino de baja impedancia de derivación a tierra para las corrientes impulsivas. Para realizar esta función debe contener al menos un componente no lineal [IEC 61643-12, 2020] [IEEE Std. C62.72, 2016]. Dichos componentes pueden ser diodos zener, varistores y/o descargadores gaseosos, dependiendo el o los componentes a utilizar no sólo del nivel de corriente impulsiva que deben derivar a través de ellos (asociado con la energía máxima a disipar), sino también de las tensiones y/o frecuencias de las señales que circulan por las líneas y equipos a proteger.

En este trabajo se enfocará el análisis sobre la protección de equipamiento electrónico de bajo nivel de potencia (llamado en la normativa “equipamiento sensible”) que pueden recibir sobretensiones impulsivas a través de la red de suministro eléctrico y por lo tanto sufrir daños irreparables o alteraciones en su funcionamiento. Sin embargo, las conclusiones pueden extenderse a la protección de líneas de comunicaciones y/o control, tales como redes de datos, video por cable coaxial, etc [Dehn + Söhne, 2015].

Antes de comenzar la descripción del comportamiento del DPS y de la red eléctrica sobre la que se encuentra, vale la pena aclarar que se hará una simplificación de las variables y parámetros definidos en los distintos estándares para caracterizar tanto al DPS como a la señal impulsiva, para poder trabajar con modelos sencillos, sin por ello dejar de enfatizar los puntos esenciales del fenómeno a tratar.

El funcionamiento de un DPS conectado en paralelo con el equipo a proteger (protección de modo común), se caracteriza por presentar una impedancia muy elevada con funcionamiento normal de la red de suministro ($Z \rightarrow \infty$) y una impedancia muy baja ($Z \rightarrow 0$) ante la aparición del impulso, derivando la corriente impulsiva a tierra, como se muestra en la figura 2. Cuando la sobretensión producida por el impulso transitorio supera el voltaje V_n de la línea de suministro, el DPS es el encargado de limitarla en un valor V_p o tensión residual (que puede llegar a superar cuatro o cinco veces el valor de V_n). Para que el DPS pueda proteger al equipo y

disipar la energía de la señal impulsiva, la tensión residual máxima, $V_{pm\acute{a}x}$, deberá ser inferior a V_w , que es la máxima tensión impulsiva resistida por el equipo a proteger.

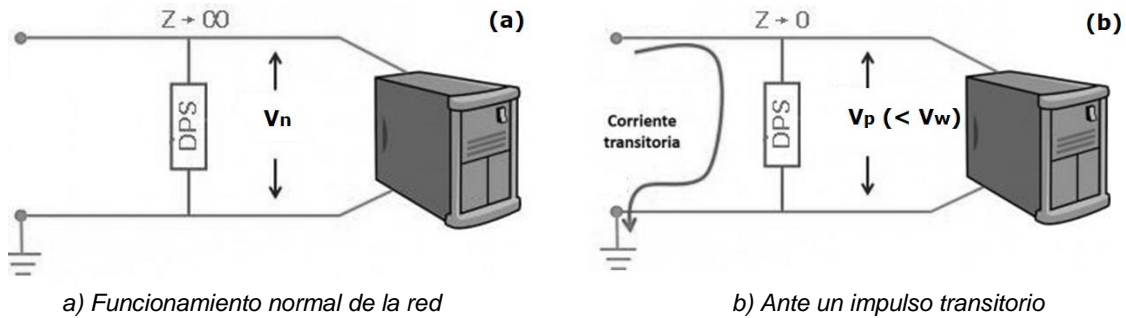


Figura 2 Comportamiento del DPS conectado a una red de suministro eléctrico.

En caso de que el DPS proteja más de un equipo, se toma como referencia la V_w menor. Cabe aclarar que la capacidad de disipación de energía del DPS está relacionada con el valor de $V_{pm\acute{a}x}$. Es decir, a mayor V_p el DPS puede soportar una corriente impulsiva I_p mayor.

Por ejemplo, para el caso de varistores de óxido de zinc (muchos DPS utilizados como protección en líneas de suministro eléctrico están conformados por varistores), la característica típica I-V es la indicada en la figura 3.

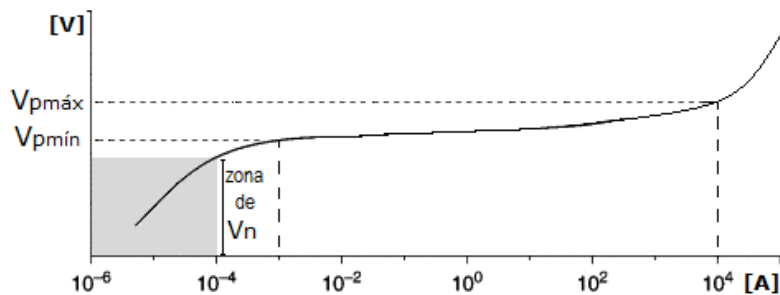


Figura 3 Ejemplo de la característica I-V de un varistor de óxido de zinc.

La V_n de la red se deberá encontrar dentro de la zona sombreada, donde la corriente de fuga del DPS es del orden de los μA . El voltaje de activación, $V_{pm\acute{i}n}$, que se puede denominar la tensión residual mínima, se define para una corriente de 1 mA [TDK Series, 2018]. El voltaje máximo, $V_{pm\acute{a}x}$, que se puede denominar la tensión residual

máxima, determina a su vez la máxima corriente impulsiva que puede soportar el DPS.

La corriente corresponde en general al valor máximo de una onda de impulso estándar 8/20 μs , que se usa para caracterizar a los DPS y que recrea una forma típica de señales impulsivas espurias. La onda 8/20 μs es una doble exponencial de 8 μs de tiempo de crecimiento y 20 μs de tiempo de descenso hasta la mitad de su valor máximo [IEEE Std. C62.45, 2002] [IEC 61000-4-5, 2017].

A partir de la descripción básica del funcionamiento y características del DPS, surgen en principio dos formas de pensar la protección del equipamiento:

- Utilizar un DPS1 de $V_{p1\text{máx}}$ algo inferior a V_w (un valor recomendable es $V_{p1\text{máx}} \cong 0.8V_w$) para que derive a tierra una corriente impulsiva lo más elevada posible. En este caso, el equipo podría encontrarse sobre exigido debido a la posibilidad de recibir impulsos de valores cercanos a V_w (incluso en forma repetitiva).
- Utilizar un DPS2 de $V_{p2\text{mín}}$ algo superior a V_n para evitar sobre exigir al equipo ante la presencia de impulsos transitorios (un valor recomendable es $V_{p2\text{mín}} \cong 1.2V_n$). En este caso, el DPS2 tiene menor capacidad de derivación de corriente que el del caso anterior, por lo que aumenta la posibilidad de que ante un impulso elevado (que sí soportaría el DPS1) sufra un deterioro, presentando baja impedancia o un cortocircuito permanentes. Es decir, el DPS se sacrifica en su función de protección, quedando el equipo sin alimentación. Resulta necesario en este caso el uso de un fusible en serie en la línea para evitar que quede la red de suministro en cortocircuito. Esta forma de protección, si bien es realizable puede dejar fuera de servicio al equipamiento hasta que no se reemplace el DPS dañado.

Entonces, para evitar una detención del servicio del equipo, sería en principio más conveniente instalar un DPS de las características del DPS1. Bajo estas condiciones, habría que analizar a qué distancia instalar el DPS respecto del equipo a proteger para que el nivel V_p sea el adecuado para proteger al equipo ante una sobretensión impulsiva.

2. Métodos

Se analizan dos casos típicos para la ubicación del DPS: cercano al equipo a proteger y cercano a la alimentación (en este caso, el tablero principal de suministro eléctrico).

Para el primer caso, tal como se muestra en la figura 4, la corriente impulsiva circulará por el DPS muy cercano al equipo, por lo cual el campo magnético generado por la corriente muy elevada (de decenas de kA, por ejemplo), puede provocar problemas de EMC (compatibilidad electromagnética) e incluso esfuerzo mecánico, con posibles fallos del equipo. Por ejemplo, utilizando la expresión simple del campo magnético generado por la corriente que atraviesa un conductor [Feynman, 1998], para una corriente impulsiva $I_p = 10$ kA circulando a través de un DPS instalado a 10 cm del equipo, se obtendría un campo de inducción magnético máximo de 20 mT, valor tres o cuatro órdenes superior al campo magnético máximo presente en redes de suministro en entornos industriales.

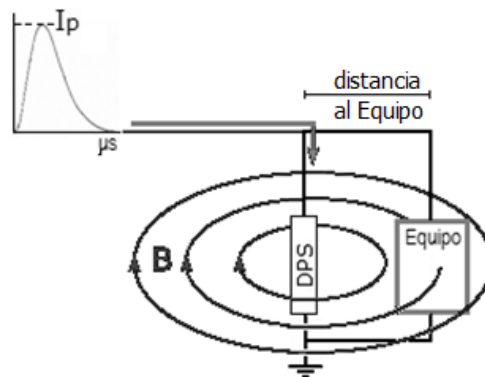


Figura 4 Campo magnético generado por la corriente impulsiva a través de un DPS.

Para el segundo caso, si el DPS se instala en el tablero principal alejado del equipo a proteger una distancia d_T , tal como se muestra en la figura 5a, si dicha distancia es de varios metros el campo magnético provocado por el impulso influye en forma despreciable sobre el equipo. Haciendo un equivalente eléctrico simple, tal como el que se muestra en la figura 5b, la respuesta casi instantánea del DPS al impulso se puede modelizar como una señal escalón entre V_n de servicio de la red y V_p de enclavamiento del DPS. Para simplificar el esquema, se muestra solamente la

inductancia equivalente del cable L_c (del orden de $1 \mu\text{H}/\text{m}$) y se omitió la resistencia del cableado (que es del orden de los $10 \text{ m}\Omega/\text{m}$) [Arcioni, 2018]. Se admite que el equipamiento a proteger está conectado a un terminal de tierra (de su tablero secundario), vinculado con la tierra del tablero principal de modo de asegurar la equipotencialidad de las masas.

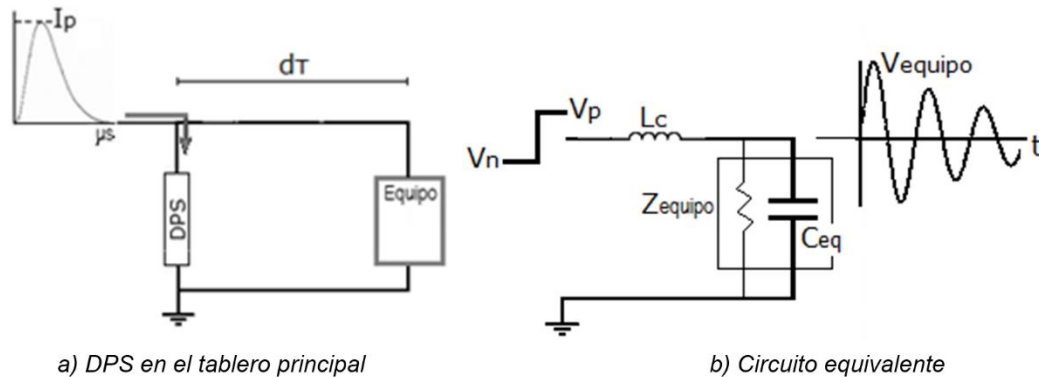


Figura 5 Respuesta de la red al activarse el DPS ubicado en el tablero principal.

En principio la inductancia equivalente del cableado, desde el DPS hasta el equipo provoca ante el impulso una caída de potencial que reduciría el nivel de sobretensión sobre el equipo. Sin embargo, si se considera la impedancia de entrada del equipo (junto con las capacitancias de pérdida distribuidas entre línea y tierra), queda conformada una red RLC. Ante la excitación de la señal escalón, aparece sobre el equipo una tensión V_{equipo} oscilatoria amortiguada, cuyo valor máximo se puede acercar a $2V_p$, (si la impedancia de entrada es muy elevada o si está desconectado internamente), con el riesgo de superar su V_w .

Por ejemplo, para una $d\tau = 15 \text{ m}$, se tendrá una inductancia de la línea $L_c \cong 15 \mu\text{H}$. Si el equipo presenta al impulso una impedancia Z_{equipo} capacitiva, de $C_{\text{eq}} \cong 0.2 \text{ nF}$ (por ejemplo, la capacitancia equivalente distribuida del transformador de una fuente de alimentación de corriente continua), se obtendría una onda oscilatoria de aproximadamente 3 MHz .

Si el equipo posee componentes de protección interna, como por ejemplo varistores, se pueden reducir significativamente las oscilaciones, incluso para distancias mayores a las recomendadas por los estándares (menores a 10 m).

Si bien, en muchos casos es suficiente el uso de un DPS (donde no es crítica la distancia al equipo a proteger y son aceptables los niveles de tensión máxima soportables), puede resultar necesario buscar como solución a los problemas planteados el uso de dos DPS, un DPS1 de alta capacidad de derivación de corriente (de $V_{p1m\acute{a}x}$ algo inferior a V_w) cercano al origen de la alimentación (tablero principal de suministro) y un DPS2 de menor capacidad de derivación de corriente (de $V_{p2m\acute{i}n}$ algo superior a V_n) cercano al equipo (o al tablero secundario donde toma la alimentación el equipo), tal como se muestra en la figura 6.

Esta protección en cascada exige un análisis de coordinación de modo que las características de ambos DPS sean las adecuadas para el caso particular, de modo de actuar correctamente ante un impulso transitorio de alta energía.

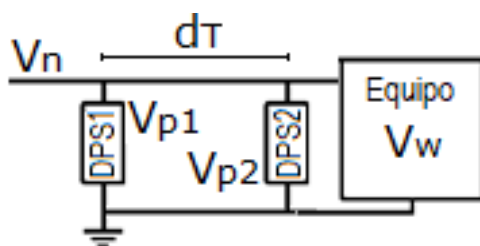


Figura 6 Instalación de DPS coordinados.

Tal como recomiendan los estándares, al coordinar dos DPS es necesario abordar varios aspectos [IEC 61643-12, 2020] [IEEE Std. C62.72, 2016]:

- Coordinación de energías: distribución de la corriente impulsiva entre DPS1 y DPS2 de acuerdo con su capacidad energética soportable, que garantice que uno o ambos DPS no se destruyan por un exceso de energía.
- Coordinación del nivel de protección: asegurar que no se supere el nivel de protección de tensión del DPS2 cercano al equipo (ubicado “aguas abajo”). La tensión residual del DPS2 se puede reducir por debajo de su $V_{p2m\acute{a}x}$ al diseñar la coordinación de modo que circule a través de dicho DPS una corriente menor a su máxima permitida, evitando sobre exigirlo.
- Actuación coordinada: DPS1 y DPS2 debe actuar al momento del impulso de forma tal de asegurar que se cumplan las dos condiciones anteriores.

Para poder cumplir con los aspectos señalados, resulta de importancia no solo la elección de los DPS, sino también la distancia óptima entre ellos para logra la mejor coordinación (no se discutirán aquí aspectos relacionados con la correcta instalación de los DPS, que están descriptos en las distintas normas).

Los criterios de coordinación expuestos se evaluarán mediante la modelización y análisis de un ejemplo concreto.

Existen infinidad de situaciones (y por lo tanto infinidad de formas de modelizar) y las soluciones no tiene por qué ser únicas para cada caso. Por ejemplo, la distancia aceptable (llamada “distancia de protección”) depende del tipo de DPS, del tipo de instalación, de la pendiente de crecimiento de la sobretensión que se produzca (dv/dt) y de la impedancia que presenta al impulso el equipo a proteger.

Se hará un planteo simple sobre el que se construirá un modelo equivalente eléctrico para describir la metodología de análisis a realizar y de esta manera poder interpretar y aplicar esquemas más eficaces de acuerdo con las recomendaciones de los distintos estándares.

3. Resultados

Se considera para este ejemplo la protección de equipamiento sensible conectado a una red de suministro eléctrico.

Se supondrá $V_w = 1.5$ kV (orden de valor típico en pequeñas unidades de alimentación ininterrumpida, UPS, por ejemplo) [TRaco Power, 2018] y que dicho equipamiento está ubicado a una distancia $d_T \cong 30$ m del origen de la señal de suministro eléctrico (tablero principal).

Se construirá un modelo sencillo partiendo de querer lograr una protección de niveles de impulsos de hasta 20 kA (los valores típicos en ambientes industriales y residenciales están entre 10 y 40 kA, y se determinan a partir de un análisis de riesgo de niveles de exposición a impulsos especificado en los estándares).

Caso 1: Protección con DPS1

La figura 7 presenta un modelo simple para analizar este caso. Si bien los estándares parten de considerar un análisis donde no se tiene en cuenta la

impedancia que presenta el equipo a la señal impulsiva (pero sí recomendar longitudes de cableado máximas, así como un coeficiente de seguridad para la elección de la tensión residual del DPS), se supondrá a los fines de este ejemplo particular que el equipo presenta al impulso una impedancia equivalente a una carga capacitiva $C_{eq} \cong 100 \text{ pF}$.

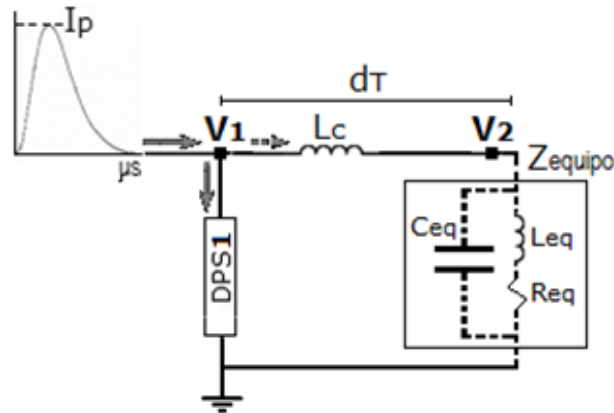


Figura 7 Modelo equivalente eléctrico para el Caso 1.

Teniendo en cuenta que en general en equipos electrónicos la entrada de suministro de alterna contiene un transformador reductor, el valor tomado en este ejemplo es razonable como impedancia equivalente aproximada del transformador a la señal impulsiva y corresponde a la capacidad distribuida parásita de los devanados. En otras palabras, las frecuencias asociadas a impulsos de μs están por encima de los cientos de kHz, es decir por encima de la frecuencia de resonancia de un transformador que trabaja en 50/60 Hz. De allí su comportamiento capacitivo [Galván Sanchez, 2012].

Si bien este modelo sencillo de la carga resulta suficiente para analizar la respuesta del sistema a la pendiente de crecimiento de la señal impulsiva, para poder observar cómo se comporta la red a medida que se extingue el impulso, conviene considerar para este ejemplo un modelo de carga donde se tenga en cuenta también un equivalente de las inductancias (y resistencias de pérdida) de los devanados del transformador, como se muestra en la figura 7. No es necesario hallar una expresión detallada de estos componentes, dado que tanto el valor de L_{eq} como R_{eq} no son

críticos en la forma de respuesta y sólo ayudan a poder observar un comportamiento temporal más realista de la red al extinguirse el impulso. Se eligen entonces $L_{eq} \cong 10 \text{ mH}$ y $R_{eq} \cong 10 \Omega$, para que quede definida una frecuencia de resonancia del transformador de aproximadamente 150 kHz.

Teniendo en cuenta la distancia supuesta al origen del suministro ($d_T \cong 30 \text{ m}$), la inductancia del cable para este ejemplo es de $L_c \cong 30 \mu\text{H}$.

De acuerdo con las características que debe poseer el DPS1, se elige un protector construido con varistores que soporte un impulso de corriente de 20 kA, con una tensión residual para dicha corriente de $V_{p1m\acute{a}x} \cong 0.8V_w = 1.2 \text{ kV}$. Se utiliza entonces para la simulación mediante Orcad-PSpice un modelo de varistor correspondiente con estas características [Zola, 2004].

Partiendo del modelo equivalente eléctrico de la figura 7, se aplica una sobretensión impulsiva que produce una corriente I_p de forma típica como la indicada en la figura 8, obteniéndose sobre el DPS1 una tensión V_1 y sobre el equipo una tensión V_2 , tal como se muestran en dicha figura 8.

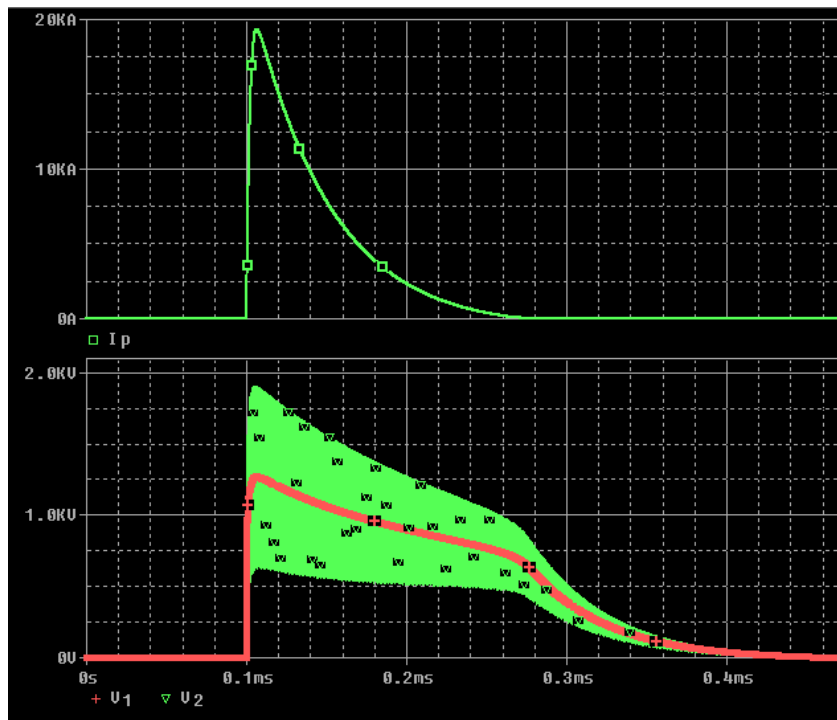


Figura 8 Caso 1: respuesta sobre el DPS1, V_1 y el equipo, V_2 ante un impulso I_p .

Puede observarse que, a pesar de que el DPS1 limita la tensión en aproximadamente 1.2 kV, sobre el equipo alcanza a casi 2 kV debido a la respuesta oscilatoria descrita, superando entonces el valor de V_w . La frecuencia de la oscilación de 2.9 MHz de la tensión sobre el equipo, que se muestra en el análisis espectral de la figura 9, está dada por la resonancia entre L_c y C_{eq} .

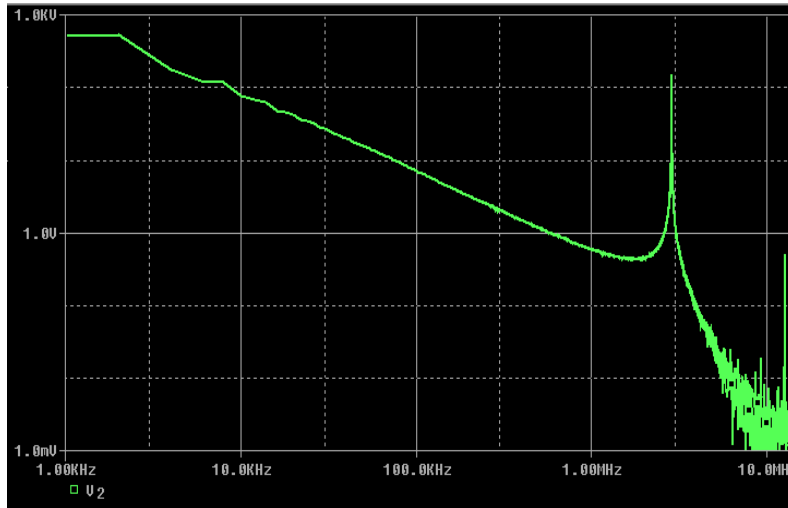


Figura 9 Caso 1: Análisis espectral de V_2 .

Repitiendo la simulación con este esquema circuital variando el valor de la inductancia del cable, V_2 cae por debajo de V_w para $L_c < 6 \mu\text{H}$, es decir a una distancia de 6 m. Tener en cuenta que los estándares recomiendan que puede utilizarse este tipo de esquemas para distancias menores a 10 m, lo que parecería que el resultado de la simulación resulta algo conservativo. Sin embargo, cabe recordar que en la normativa no se tiene en cuenta la Z_{equipo} , lo cual por un lado parece una situación más exigente al considerar una impedancia infinita, pero aún en ese caso, los resultados de la modelización de este ejemplo brindarían más información del comportamiento del sistema de protección considerando esta impedancia de carga aproximada (aun suponiendo que resulte de una capacidad distribuida en el cableado, si el equipo se encuentra apagado).

Volviendo al ejemplo, con el resultado obtenido se hace necesaria entonces la instalación de un segundo DPS cerca del equipo, con el consecuente análisis de coordinación.

Caso 2: Protección con DPS1 y DPS2

La figura 10 presenta un modelo simple para analizar este caso. El DPS2, también formado por varistores, se elige de acuerdo con las características ya descritas para este tipo de protector con $V_{p2min} \cong 1.2V_n \cong 370 \text{ V}$.

Para completar las características del DPS2, se debería realizar previamente una simulación para conocer cuál es la porción de los 20 kA de corriente impulsiva que debe soportar. Para ello se puede admitir en principio que, por ejemplo, el 10% del impulso circulará por el DPS2, eligiendo por tanto un modelo para este protector cuyas características permitan que soporte al menos 2 kA.

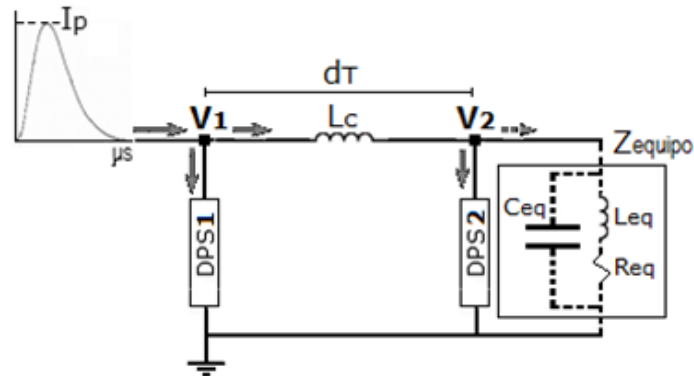


Figura 10 Modelo equivalente eléctrico para el Caso 2.

La figura 11 muestra la distribución de corrientes en ambos DPS y las tensiones sobre el DPS1, V_1 y sobre el DPS2, V_2 , como respuesta de la simulación del modelo equivalente eléctrico de la figura 10 y bajo las mismas condiciones de corriente impulsiva del Caso 1. Puede observarse que el agregado del DPS2 atenuó la oscilación, lográndose una tensión máxima $V_2 \cong 700 \text{ V} < V_w$.

Haciendo un análisis espectral de V_2 , la oscilación que aparece al extinguirse el impulso (y cuando ambos DPS están volviendo a su condición de “inactivos”) es de aproximadamente 1.3 MHz, es decir menos de la mitad del valor que se obtuvo en el Caso 1. Esta reducción se debe a la contribución de la capacitancia parásita que presenta el DPS2, que queda en paralelo con la C_{eq} .

El resultado de la figura 11 indica que el DPS1 debe soportar casi los 20 kA del frente de onda, mientras que por el DPS2 circula una corriente máxima de unos 0.8

kA con el retardo dado por la inductancia del cableado (notar que la pendiente de crecimiento de dicha corriente es muy inferior a la del impulso incidente. Este resultado valida la elección de un DPS2 que soporte hasta 2 kA.

Si bien la relación entre las corrientes circulantes por ambos DPS es casi veinte a uno, el retardo provocado por la red hace que el tiempo de duración de la corriente impulsiva sobre el DPS2 sea mayor que sobre el DPS1, por lo que la relación entre las energías que soportan ambos DPS sea de diez a uno, como se muestra en la figura 12.

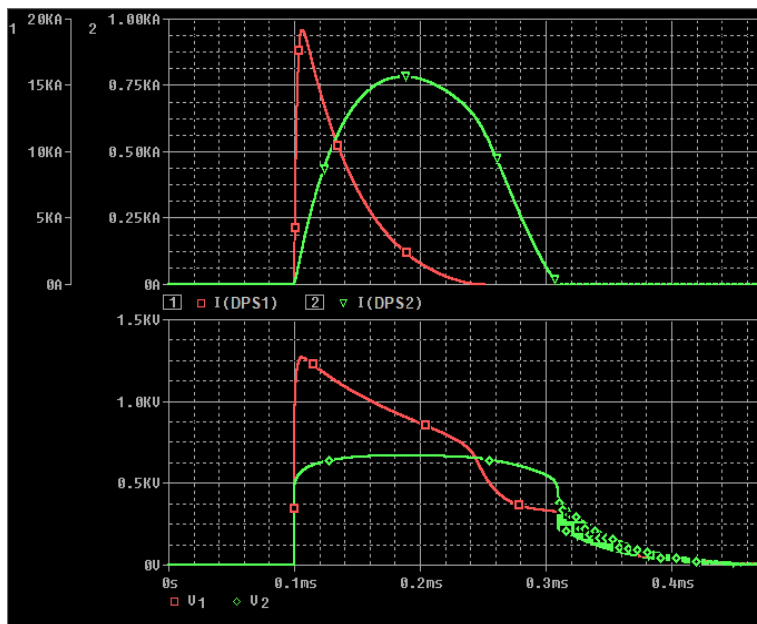


Figura 11 Caso 2: distribución de corrientes y tensiones sobre los DPS.

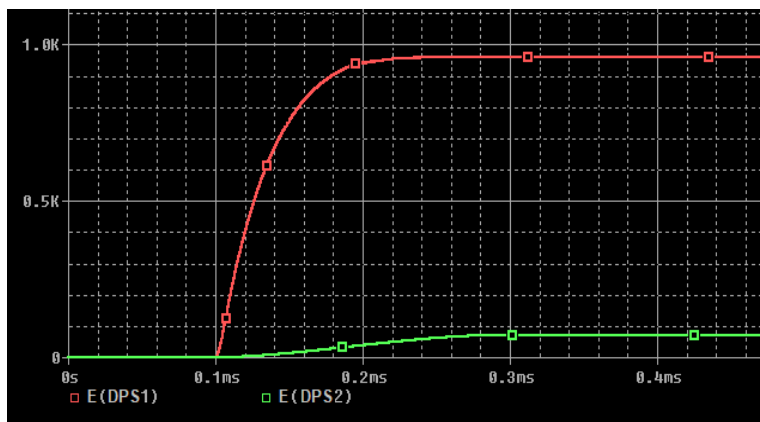


Figura 12 Caso 2: energía disipada por los DPS (en Joules).

4. Discusión

Con el ejemplo planteado, se ha visto un caso donde existe la necesidad de utilizar una protección en cascada, para lo cual se realizó la coordinación de los DPS abordando los dos primeros aspectos indicados en el ítem 2. Faltaría analizar el tercer punto, sobre lograr su actuación coordinada.

En los modelos presentados se asegura precisamente esta correcta actuación de las protecciones. En la simulación siguiente se agrega una condición de conexión de los DPS en la red eléctrica, en que esta actuación coordinada se ve afectada. En la figura 13 se muestra nuevamente el modelo eléctrico de conexión del DPS1 y DPS2, pero teniendo en cuenta que el DPS1 se encuentra alejado del tablero principal (y/o terminal de conexión a tierra), de modo que se le agrega en serie una inductancia del cable, L_x , (este caso podría producirse por ejemplo ante la ausencia de espacio en el tablero para la instalación del DPS1). Se supone para este ejemplo que el DPS1 se encuentra a una distancia de 1.5 m del tablero principal, por lo que la longitud total del cableado será entonces de 3 m ($L_x = 3 \mu\text{H}$) al considerar la conexión al terminal de tierra.

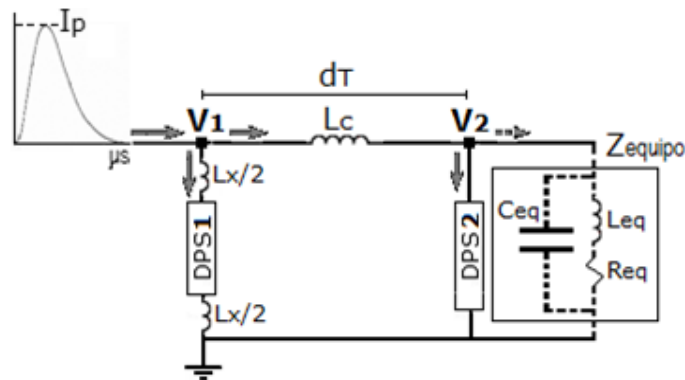


Figura 13 Modelo eléctrico para analizar la actuación coordinada de los DPS.

Las figuras 14 y 15 muestran los resultados de la simulación tal como se hizo para el Caso 2. Aquí pueden notarse varias diferencias respecto del Caso 2:

- La corriente máxima por el DPS2 aumentó por encima de 2 kA, lo cual supera el valor máximo previsto en la elección del DPS2 para una correcta coordinación.

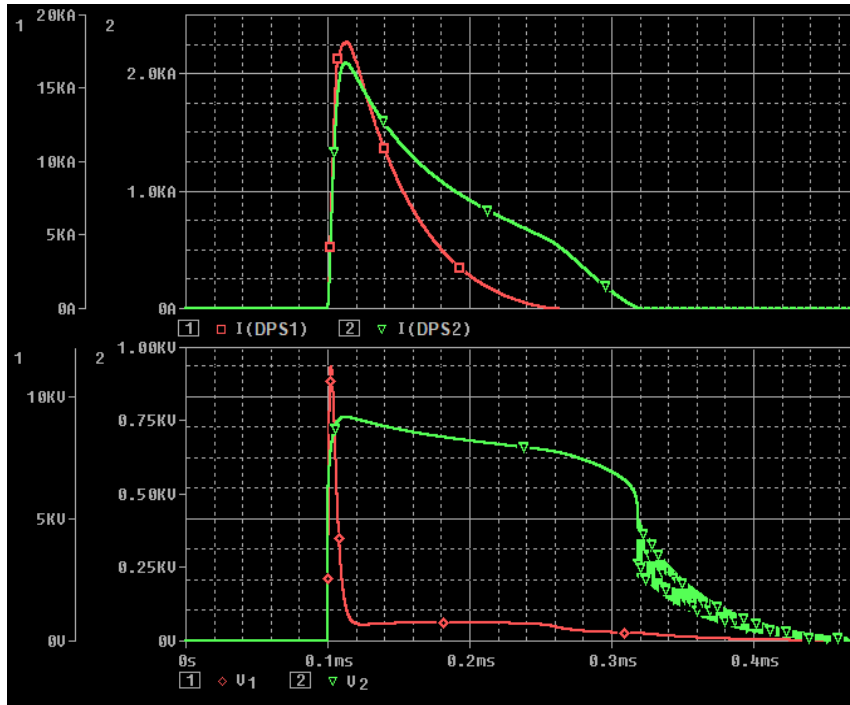


Figura 14 Ejemplo de análisis de la actuación coordinada de los DPS.

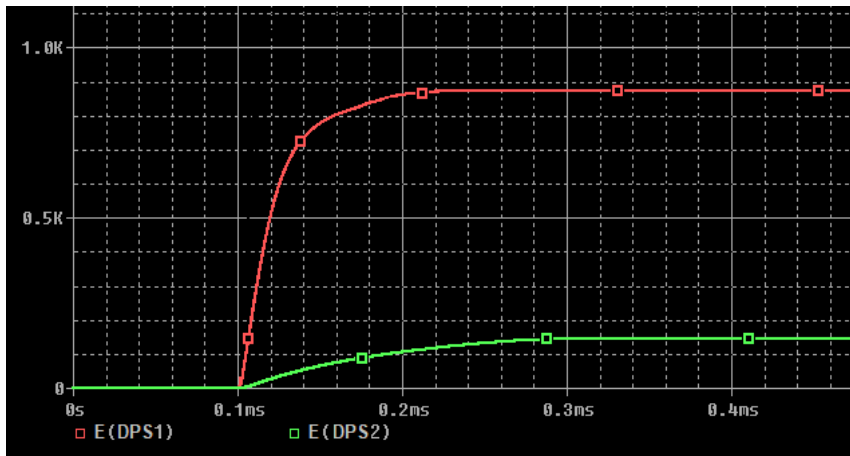


Figura 15 Análisis de actuación coordinada: energía disipada por los DPS (en Joules).

- El DPS1 ya no limita la tensión de la entrada debido a la sobretensión producida en la inductancia del cable que conecta sus terminales (observar que V_1 supera los 10 kV). Por lo tanto, la corriente por el DPS2 crece con la misma pendiente que la corriente que circula por el DPS1 es decir, debe actuar también sobre el frente de onda, por lo que debe soportar una porción mayor de la corriente total incidente, respecto del Caso 2.

- La energía que debe soportar el DPS2 casi se duplica respecto del Caso 2, tal como se muestra en la figura 15. Este dato resulta de importancia ya que, aún ante una ubicación más cercana del DPS1 al tablero principal (por ejemplo, a 1 m de distancia), si bien por el DPS2 circularía una corriente menor a 2 kA, debería disipar una energía debida al impulso superior al Caso 2. Es decir, el DPS2 estará sobre exigido en su energía máxima.

5. Conclusiones

Se realizó una modelización simple para mostrar una forma de análisis básico que permita evaluar los parámetros más influyentes a tener en cuenta en el comportamiento de un sistema de protección contra impulsos transitorios en una red de suministro eléctrico que alimenta equipamiento electrónico sensible (siendo el análisis extensible a redes de comunicaciones y control).

En particular se enfocó el estudio en la coordinación de dichos dispositivos de protección al conectarse en cascada y que es un tema de importancia en los estándares. El modelo presentado, si bien puede ser aumentado en su orden de complejidad (por ejemplo, hacer un equivalente eléctrico detallado de la puesta a tierra del sistema particular), brinda información suficiente como para comprender el alcance del problema del efecto que puede causar un impulso de alta energía (muy común en ambientes industriales y también residenciales) y cuál es la metodología para llegar a un adecuado sistema de protección.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Pulse Technitrol Company, Understanding common mode noise, 4/1999.
- [2] IEC 61643-12, Low-voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Selection and application principles. Ed. 3.0, 2020.
- [3] Dehn + Söhne, Surge protection for Ethernet and Fast Ethernet networks. White Paper. www.dehn-international.com, 2015.
- [4] TDK Series/Type B722, SIOV metal oxide varistors. Leaded varistors, Standar D series, 2018.

- [5] IEEE Std. C62.72, Guide for the Application of Surge-Protective Devices for Use on the Load Side of Service Equipment in Low-Voltage (1000 V or Less, 50 Hz or 60 Hz) AC Power Circuits, 2016.
- [6] IEEE Std. C62.45, Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits, 2002.
- [7] IEC 61000-4-5, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test. Ed. 3.1 b, 2017.
- [8] Feyman, R. Leighton, R., Física Volumen 2 - Electromagnetismo y Materia, Addison Wesley, 1998.
- [9] Arcioni, J. C., Mediciones de la resistencia eléctrica óhmica en cables de cobre duro, desnudos (IRAM 2004) con y sin soldaduras cuproaluminotérmicas (IRAM 2315), Revista Ingeniería Eléctrica, nro. 329, Ed. Editores, Marzo 2018.
- [10] TRaco Power, UPS Uninterruptable AC/DC Power Supply TSPC-UPS Series, www.tracopower.com, 2018.
- [11] Galván Sanchez, V. A., Gutiérrez Robles, J. A., Ortiz Muro, V. H., Sanchez Herrera, R., Modelado del transformador para eventos de alta frecuencia, Revista Ingeniería Energética, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, vol. XXXIII, nro.2, mayo-agosto 2012.
- [12] Zola, J. G., Simple model of metal oxide varistor for Pspice Simulation, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 23, Oct. 2004.