



## DESARROLLO DE UN DIVISOR PATRON PARA MEDIDA DE IMPULSO EN ALTA TENSION

Daniel Slomovitz  
UTE LABORATORIO

Jorge Fernández  
UTE LABORATORIO

### RESUMEN.

Se presenta el diseño de un divisor resistivo patrón. Los requisitos impuestos a este diseño están dados por las normas IEC. La IEC 60-3 (1976) está actualmente en proceso de revisión. El proyecto (42.2.2) refiere a sistemas de medida de referencia en alta tensión. En éste se propone un cambio de filosofía, considerando a los divisores de impulso en forma similar a los restantes patrones eléctricos. Por esto, en forma adicional a los ensayos convencionales (respuesta al escalón, relación de división, etc) se proponen rutinas de intercomparación entre laboratorios.

Se detalla la implementación de un divisor y su ensayo con un generador de escalones. Se muestra que la respuesta al escalón es ampliamente satisfactoria como para considerarlo divisor de referencia, de acuerdo al proyecto referido. Se comparan resultados obtenidos de divisores comerciales, discutiéndose la incidencia que el cambio de norma tendrá en las instalaciones actualmente en uso.

El trabajo discute también la importancia y el desarrollo de un sistema de intercomparación de divisores a nivel regional, destacándose la ausencia de patrones de divisores de impulso en los países integrantes del Mercosur.

### PALABRAS CLAVE.

divisor, impulso, parametros de respuesta

### 1. INTRODUCCION

De acuerdo a las normas los equipamientos de alta tensión deben ensayarse con ondas de impulso puestas y recortadas. Las formas

de onda de tensión se miden con un sistema compuesto por un divisor de impulso y un medio de registro, sea osciloscopio analógico o digital o un digitalizador.

Debido a las limitaciones de respuesta de un divisor la onda de salida puede estar distorsionada no reflejando fielmente la tensión que se quiere medir. Esto puede inducir a errores en la evaluación de la tensión de pico y otros parámetros de la forma de onda.

Para ensayos de rutina con formas de onda normalizadas se utilizan una serie de parámetros para poder caracterizar a un divisor de impulso. Si se conocen estos parámetros de respuesta entonces es posible decidir si este es apto o no para la medida de la tensión dentro de los errores máximos admitidos por las normas.

### 2. NORMAS VIGENTES

La performance de los divisores de impulso está regulada por las normas IEC 60-3 [1] y 60-4 [2]. Sin embargo, muchos trabajos han demostrado que divisores de acuerdo con estas normas, producen errores inaceptables en la medición de ondas de impulso [3], [4].

Las normas IEC vigentes califican el comportamiento del divisor a través del parámetro básico  $T$ . Este valor es la sumatoria algebraica de las áreas comprendidas entre la respuesta al escalón normalizada y un escalón unitario ideal. El valor de  $|T|$  debe ser inferior a  $0.2 \mu s$ . Para ensayos de impulso de rayo no se especifican límites para los otros parámetros como ser las áreas parciales, el origen convencional, etc.

Actualmente se está estudiando una revisión de las normas IEC. Este proyecto [5] define

una serie de parámetros que se describen a continuación (ver figura 1).

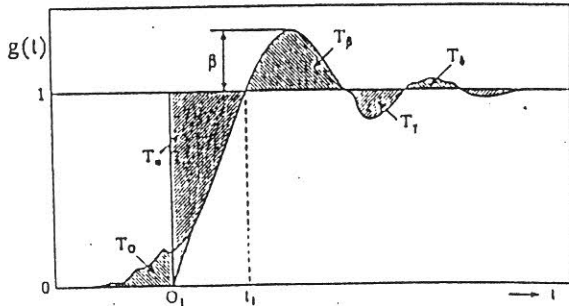


Figura 1

Origen virtual  $O_1$ .

La intersección con el eje de tiempo de una recta trazada tangente a la parte con mayor pendiente del frente de la respuesta al escalón.

Respuesta al escalón normalizada  $g(t)$ .

La respuesta al escalón normalizada a valor unitario.

Integral de respuesta  $T(t)$ .

La integral desde  $O_1$  a  $t$  de uno menos la respuesta normalizada.

$$T(t) = \int_{O_1}^t [1 - g(\tau)] d\tau$$

Tiempo de respuesta experimental  $T_N$ .

El valor de la integral de respuesta hasta  $t_{max}$ .  
 $T_N = T(t_{max})$

Tiempo de respuesta parcial  $T_1$ .

El valor máximo de la integral de respuesta.

Overshoot  $\beta$ .

La cantidad por la cual el valor máximo de la respuesta excede la unidad.

Tiempo de distorsión inicial  $T_0$ .

El área encerrada por el eje de tiempo, la respuesta normalizada  $g(t)$  y la línea recta usada para determinar  $O_1$ .

Tiempo de establecimiento  $t_i$ .

El menor tiempo para el cual el tiempo de respuesta residual  $T_N(t_i)$  toma un valor y se mantiene menor al 2% de  $t_i$ , para cualquier tiempo entre  $t_i$  y  $t_{max}$ .

Los cambios principales a la norma vigente en lo que a divisores se refiere, consisten en definir dos tipos de sistema de medida. Se define un sistema de medida aprobado y un sistema de medida de referencia. Las exigencias de performance sobre este último son mayores. Los sistemas de medida aprobados son los que se utilizarían para la realización de ensayos de rutina en equipamiento de alta tensión. Los sistemas

de referencia serían patrones, considerándolos en la misma forma como el resto de los patrones eléctricos ya conocidos. La nueva norma propone rutinas de intercomparación entre laboratorios con un periodo entre ensayos de 5 años para así poder mantener la trazabilidad de los patrones hacia un laboratorio reconocido. Para los sistemas de medida aprobados se admite una gama de valores para el overshoot y la relación  $T_1/T_2$ , donde  $T_1$  es el tiempo de respuesta parcial y  $T_2$  es el tiempo de frente del impulso a medir. En la figura 2 la zona sombreada indica la gama de valores permitida.

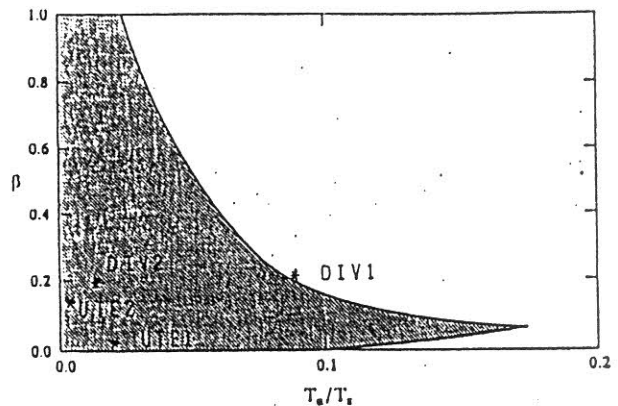


Figura 2

Para los sistemas de medida de referencia y dependiendo para que tipo de ensayos se van a utilizar hay límites para otros parámetros tal como se muestra en la tabla 1.

Parámetro	impulso de rayo	impulso recortado en el frente	impulso de maniobra	impulso de corriente
tiempo de respuesta $T_N$	≤15 ns	≤10ns	-	-
tiempo de establecimiento $t_i$	≤200ns	≤150ns	10,μs	-
tiempo de respuesta parcial $T_1$	≤30ns	≤20ns	-	0.1 $T_1$
distorsión inicial $T_0$		≤2.5ns	-	-

Tabla 1

Comparando ambos documentos, resulta que la norma sólo limita la suma algebraica de las áreas. Por tanto un divisor cuya respuesta tenga grandes apartamientos de un escalón podría resultar aprobado si las áreas positivas y negativas fueran similares. Por otro lado el proyecto impone entre otros límites, un valor máximo a la primer área

$T_1$ ). Esta condición es mucho más severa que la anterior.

3. RESPUESTA AL ESCALON.

Para la determinación de los parámetros de respuesta de los divisores de impulso es necesario registrar la respuesta a un escalón. Para ello se utilizó el montaje recomendado en la revisión de la norma. El mismo consta de un plano vertical y un piso eléctricamente conectados entre sí y a tierra. El generador de escalones se monta en el plano vertical a la altura del extremo superior del divisor bajo ensayo de tal forma que el conductor de alta tensión quede horizontal.

El generador de escalones consiste básicamente en una fuente de tensión continua cuya salida se cortocircuita con una llave con contactos bañados en mercurio. La llave se conmuta a una frecuencia de 100 Hz para tener un tren de escalones.

Los registros de las formas de onda se realizaron con osciloscopios digitales de 10 bits utilizándolos en modo "sequential single shot". De esta manera es posible obtener mayor precisión usando osciloscopios de baja velocidad pero mayor cantidad de bits de resolución vertical.

4. RELEVAMIENTO DE LOS PARAMETROS

Se relevó la respuesta de varios divisores de distinto tipo, algunos de ellos comerciales. En la figura 3 se muestra la respuesta al escalón de un divisor comercial de 200 kV de tipo mixto (DIV1).

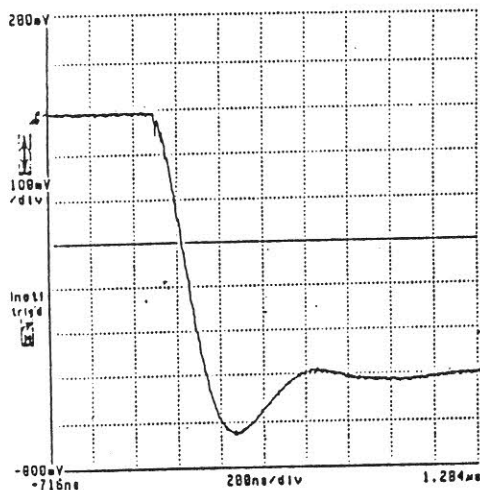


Figura 3

Los valores de los parámetros de respuesta de éste y el resto de los divisores están resumidos en la tabla 2. Como muestra la misma, este divisor cumple con las exigencias de las normas vigentes pero no así con las exigencias de la nueva norma,

divisor	$T_N(ns)$	$T_a(ns)$	$T_o(ns)$	$\beta(\%)$	$t_i(ns)$
DIV1	60	110	2	20.5	775
UTE1	22	24	-	1.4	79
DIV2	16	19	-	19.8	300
UTE2	7	8	-	15	89

Tabla 2

ni siquiera para sistemas aprobados. En efecto, el tiempo de respuesta  $T$  es menor a 200 ns pero si observamos la figura 2 vemos que la relación entre su overshoot  $\beta$  y  $T_a/T_1$  cae fuera del rango admitido por el proyecto para ensayos de impulso de rayo. Se diseñó un nuevo divisor de impulso (UTE1) cuyos requisitos fueron lograr mayor velocidad y menor overshoot. Se decidió realizar un divisor resistivo con resistencias de película y en baño de aceite.

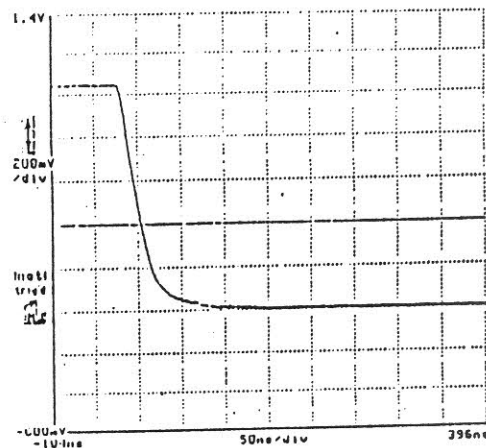


Figura 4

En la figura 4 se muestra su respuesta. De los valores de la tabla 1, se concluye que es apto como sistema aprobado de acuerdo al proyecto para ondas planas y cortadas en el frente.

Ultimamente se adquirió un nuevo divisor comercial de tipo resistivo (DIV2) de 300 kV. Su respuesta se muestra en la figura 5. De acuerdo a esos valores y según la nueva norma, este divisor es apenas aceptable como divisor de referencia para ensayos de impulso con onda completa.

5. DESARROLLO DEL DIVISOR

Actualmente se está trabajando en el desarrollo de un nuevo divisor resistivo (UTE2) con la intención de usarlo como divisor de referencia. Para su diseño se utilizaron resistencias no inductivas especiales para uso en impulso. El divisor posee un toroide conformador de campo eléctrico en su extremo superior y se

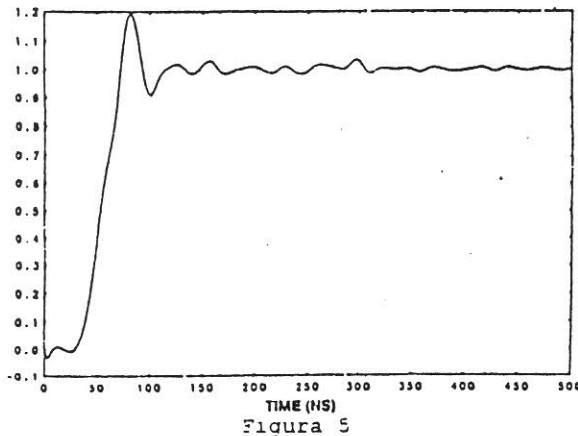


Figura 5

agregó un cilindro en la base del mismo conectado a tierra. En una implementación preliminar se logró la respuesta que se muestra en la figura 6.

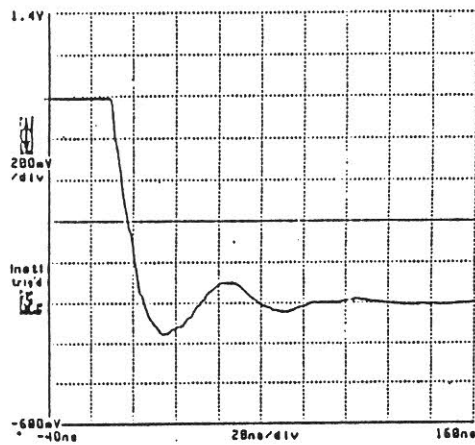


Figura 6

Se calcularon los parámetros de respuesta al escalón. Esos valores están dentro de los límites exigidos a un divisor de referencia para uso en ensayos de impulso de onda plena y recortada. En efecto, se puede ver en la figura 2 que su relación entre  $\beta$  y  $T_0/T_1$  cae dentro del rango aceptado y los demás parámetros,  $T$ ,  $T_0$ ,  $\beta$ ,  $T_0$  y  $t_r$ , están por debajo de los límites impuestos por el proyecto para divisores de referencia para impulso de rayo completo y cortado en el frente.

Para poder estudiar con mayor detalle los factores que influyen en la respuesta al escalón y poder así optimizarla se utilizó un programa de simulación analógica, el Microcap II. Este programa es de amplia aplicación en electrónica pero nada impide su uso en sistemas de potencia. En particular en el caso de impulso todos los elementos utilizados son componentes lineales, condensadores, resistencias, inductancias, etc, con modelos disponibles en la biblioteca del Microcap. Es un programa de fácil uso y en general los tiempos de simulación son pequeños. El

ingreso de datos se hace en modo gráfico y también los resultados se muestran gráficamente. La aplicabilidad de este programa en técnicas y dispositivos de alta tensión, incluso en la representación de elementos no lineales ha sido demostrada en varios trabajos, [6], [7].

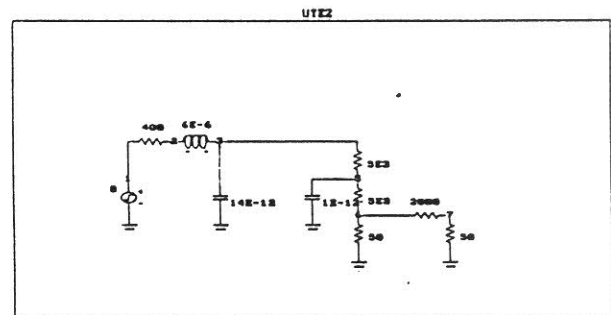


Figura 7

En la figura 7 se muestra el modelo adoptado para el divisor junto con un circuito atenuador para reducir la tensión a valores admisibles por los circuitos de entrada del osciloscopio. Este modelo es relativamente simple, pero ha sido usado exitosamente [8]. Por otro lado, el uso de modelos más complejos agrega la dificultad de la estimación de los valores de los parámetros usando los datos medidos de respuesta al escalón. El valor de la inductancia se determinó mediante fórmulas que tienen en cuenta la geometría del circuito y los diámetros de los conductores utilizados [9]. Los valores de las capacidades a tierra del toroide y del divisor se obtuvieron partiendo de valores típicos y ajustándolos hasta obtener una respuesta similar a la respuesta medida. En la fig 8 se muestra la respuesta al escalón que resulta de la simulación.

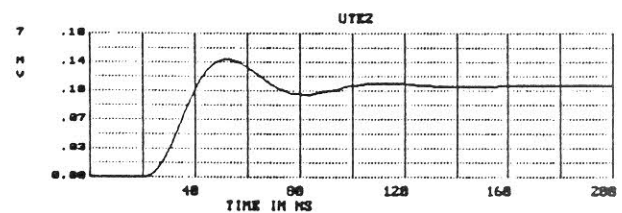


Figura 8

Se colocó un condensador en paralelo con la rama alta del atenuador para el osciloscopio para poder aumentar la velocidad de respuesta. Se realizaron varias simulaciones variando el valor de esa capacidad y se calcularon los parámetros de respuesta en cada caso para poder estudiar su variación.

Estos parámetros afectan directamente a los errores en la medida de impulsos cortados en el frente [10]. Analizaremos la influencia de cada uno de ellos.

Mediante el programa de simulación se determinaron los tiempos de respuesta  $T_v$  y tiempos de respuesta parciales  $T_a$  en función de la capacidad del atenuador. Los resultados se muestran en las figuras 9 y 10.

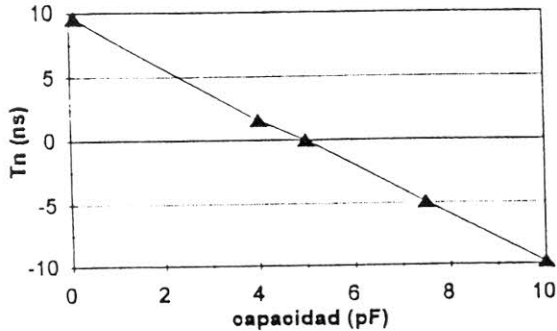


Figura 9

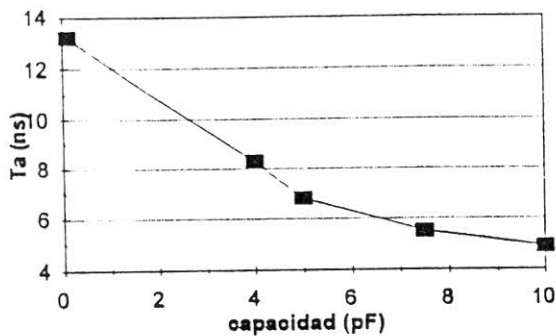


Figura 10

El tiempo de respuesta parcial influye sobre la máxima frecuencia que el divisor es capaz de registrar. Cuanto menor sea  $T_a$ , mayor será la pendiente de la curva de respuesta y más se parecerá a una respuesta ideal.

El tiempo de respuesta  $T_v$  del divisor influye sobre la medida de la tensión de pico y del tiempo de corte del impulso. Un tiempo de respuesta negativo se traduce en un valor de tensión de pico mayor y un valor de tiempo de corte mayor que los reales.

Utilizando el programa de simulación se excitó al divisor con una fuente cuya forma de onda es una rampa cortada a los 50 ns y se analizó cual era el error en la medida del valor de pico variando la capacidad del atenuador.

En la fig 11 se muestran dichos resultados y se observa que para una capacidad de aproximadamente 4 pF se logra tener un error nulo. En la figura 12 se muestra el modelo final del divisor compensado. Es de resaltar que cualquiera sea el ajuste de dicho condensador, dentro del rango mostrado, igualmente el divisor cumple con el proyecto IEC para divisores de referencia.

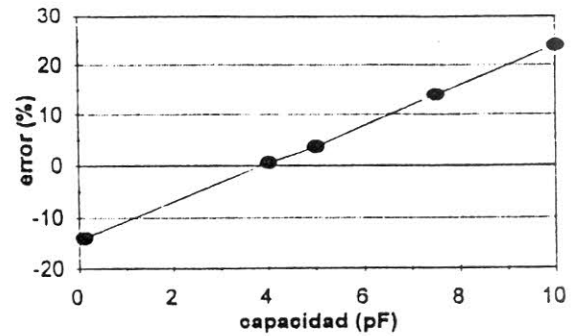


Figura 11

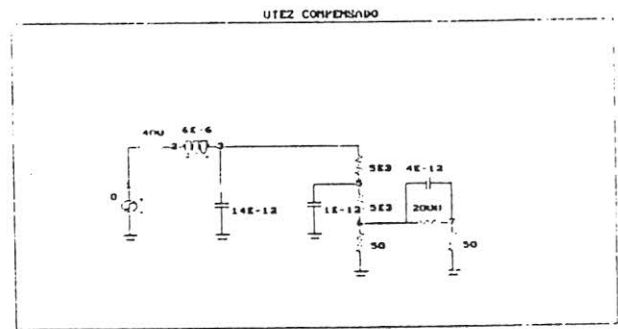


Figura 12

## 6. TRABAJO FUTURO

Se consideró que el error en la medida de la tensión de pico es un factor de diseño fundamental. El plan de trabajo propuesto consiste en utilizar los parámetros de respuesta para evaluar los resultados, ya que su determinación es relativamente sencilla. Es necesario relevar las respuestas reales a la rampa cortada con distintos valores de capacidad. Una vez confirmadas las conclusiones de la simulación se asumiría un valor de 4 pF para el condensador. Se espera obtener resultados satisfactorios y así poder garantizar que el divisor es capaz de registrar impulsos cortados en el frente de muy corta duración. Será necesaria además una comparación contra patrones de laboratorios del exterior para la aprobación del sistema.

## 7. CONCLUSIONES

Realizando una comparación de las normas vigentes con el proyecto en estudio se ve que los sistemas actualmente en uso difícilmente serán aptos para su uso como divisores de referencia cuando entre en vigencia el proyecto. Más aún, hay algunos divisores que ni siquiera podrán ser usados como sistemas aprobados para uso en ensayos de rutina con impulsos de rayo plenos. Es



6

obvio que para poder tener un divisor patrón es necesario realizar un diseño cuidadoso para poder lograr configuraciones de divisores que se ajusten con mayor exactitud a un divisor ideal.

Se propone el uso de programas simples simuladores, para analizar la influencia de la rama de baja tensión, logrando ajustes que disminuyan los errores de medida en las formas de onda usadas.

Actualmente en los países integrantes del Mercosur no existen divisores de impulso patrones aprobados. El desarrollo de este divisor y su posterior contraste contra el patrón del PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Alemania) será de gran importancia para la región.

### 8. REFERENCIAS

- [1] IEC 60-3, "High-Voltage Test Techniques", 1976.
- [2] IEC 60-4, "High-Voltage Test Techniques", 1977.
- [3] Mc Comb T.R., et al, "Comparative measurement of HV impulses to evaluate different sets of response parameters", IEEE PWRD-6, 1991.
- [4] Hyltén-Cavallius N., "A new approach to minimize response errors in the measurement of high voltage impulses", IEEE PAS-102, 1983.
- [5] "High Voltage Test Techniques", project number 42.2.2, June 1992.
- [6] Daniel Slomovitz y Jorge Fernández, "Ensayo y modelado de descargadores de varillas, usados para la protección de transformadores", 3a Reunión Nacional de Sistemas Eléctricos, Buenos Aires, Argentina, setiembre 1989
- [7] Jorge Fernández y Pablo Braga, "Application of Microcap-II's polynomial sources", IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 5, No 6, noviembre 1989, pp. 30-31.
- [8] Ziqin Li and E. Kuffel, "The application of analog compensation in impulse resistor voltage dividers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988.
- [9] Frederick W. Grover, "Inductance calculations", D. Van Nostrand Company, Inc., 1946.
- [10] Frank C. Creed, "The generation and measurement of high voltage impulses", Center Book Publishers, Inc., 1989.