

pero también de procesos electromecánicos en los generadores próximos a la falta, que pueden tener importantes consecuencias.

La Tabla 8.1 muestra la clasificación de gamas de frecuencia propuesta por el Grupo de Trabajo 33-02 de CIGRE. Cada gama se corresponde a un tipo particular de proceso transitorio. Se puede observar que hay cuatro grupos, y que existe solapamiento entre ellos.

Tabla 8.1. Clasificación de gamas de frecuencia.

GRUPO	GAMA DE FRECUENCIAS	DESIGNACIÓN	APLICACIÓN PRINCIPAL
I	0.1 Hz - 3 kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobretensiones temporales
II	50 Hz - 20 kHz	Ondas de frente lento	Sobretensiones por maniobras
III	10 kHz - 3 MHz	Ondas de frente rápido	Sobretensiones por rayos
IV	100 kHz - 50 MHz	Ondas de frente muy rápido	Sobretensiones por recebado

8.4.3 Representación de componentes en el cálculo de transitorios

Actualmente existen varias fuentes de información en las que se proponen directrices para representar los componentes de un sistema de energía en la simulación digital de procesos transitorios:

1. Uno de los primeros documentos publicados en este campo fue producido por el Grupo de Trabajo 33-02 de CIGRE. El documento propone la representación de los componentes más importantes de un sistema de energía teniendo en cuenta la gama de frecuencias de los procesos transitorios a simular (ver Tabla 8.1).
2. Otra fuente de información son los documentos producidos por el Grupo de Trabajo del IEEE "Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs". Este grupo ha publicado varios trabajos relacionados con la representación de componentes en un tipo particular de estudios, que han sido ampliados y reunidos en una publicación especial.

Los siguientes aspectos pueden tener una influencia decisiva en una simulación digital:

- *Datos del sistema:* Valores aproximados o estimados de parámetros cuya influencia es importante o muy importante son empleados frecuentemente en la representación de un componente. En general, esto ocurre con parámetros dependientes de la frecuencia o con algunos parámetros básicos empleados en representaciones de los Grupos III y IV. Es importante tener en cuenta que algunos parámetros pueden cambiar debido a

- *Tipo de estudio:* En muchos estudios la información más importante son los valores de cresta que alcanzan las sobretensiones. Los valores máximos usualmente aparecen durante la primera oscilación después de iniciarse el proceso transitorio. Grandes diferencias entre los valores reales y los obtenidos mediante simulación son debidas fundamentalmente a una pobre representación de las pérdidas, mientras que una representación incorrecta de las inductancias y capacidades conducen a un desplazamiento de los valores de cresta pero no a diferencias importantes entre valores reales y obtenidos mediante simulación. Conviene tener en cuenta que esto es válido cuando la representación del sistema se realiza mediante circuitos con parámetros concentrados, para los que las frecuencias naturales de oscilación dependen de los valores de inductancias y capacidades.
- *Complejidad del sistema:* Cuantos más componentes tenga el sistema en estudio más grande es la probabilidad de que la representación sea incorrecta o insuficiente. Por otra parte, una representación muy detallada requerirá un tiempo de simulación muy largo. Al final siempre es recomendable cierta experiencia para decidir con cuánto detalle se representa el sistema en estudio y cuál es la representación más adecuada para los componentes más importantes.

8.5 Sobretensiones en sistemas eléctricos de energía

8.5.1 Clasificación de sobretensiones

Una sobretensión es una sollicitación variable en el tiempo cuyo valor máximo es superior al valor de cresta de la tensión nominal del sistema en el que se origina. El cálculo de sobretensiones es de vital importancia en el diseño de sistemas eléctricos de energía ya que son estas sollicitaciones las que servirán para escoger el nivel de aislamiento y las protecciones de los equipos. En la actualidad el cálculo de sobretensiones se realiza generalmente con ordenador. Existen varias razones por las que la simulación digital puede ser necesaria: el tamaño de la red a simular, la complejidad de los modelos matemáticos que se han de emplear, la precisión que se puede conseguir en cálculos por ordenador, y el ahorro que puede suponer un cálculo preciso y riguroso de sobretensiones.

La primera clasificación de las sobretensiones se basa en el origen, ya que la causa puede ser interna o externa a la red. Una clasificación más completa incluye las principales características: valor de cresta; frecuencia o gama de frecuencias si el proceso transitorio es oscilatorio, o tiempo al valor de cresta si el proceso transitorio es unidireccional; duración. De acuerdo con esto se pueden distinguir las siguientes categorías:

1. *Sobretensiones temporales:* Son de larga duración (desde varios milisegundos a varios segundos), poco amortiguadas y de frecuencia igual o próxima a la frecuencia de operación.
2. *Sobretensiones de frente lento:* Son de corta duración (pocos milisegundos), fuertemente amortiguadas y se presentan con una gama de frecuencias que varía entre 2 y 20 kHz.

Los resultados presentados en la Figura 8.62 han sido obtenidos con una onda de rayo y una separación entre pararrayos y transformador determinadas. Tanto los parámetros de la onda del rayo como la distancia que separa el pararrayos del transformador tienen un efecto importante en la sobretensión que puede aparecer en el punto donde se haya instalado el transformador. Las Figuras 8.63 y 8.64 presentan los resultados correspondientes a dos estudios en los que se ha analizado el efecto de estos parámetros. De estos resultados se deduce que

- cuanto más separación existe entre pararrayos y transformador más grande es la sobretensión resultante en el transformador;
- cuanto más elevada es la pendiente de la corriente del rayo, I_{max}/t_{max} , más elevada resulta la sobretensión en el transformador;
- la tensión máxima que se puede originar en el transformador es dos veces la tensión residual del pararrayos.

De la expresión (8.97) se puede obtener el valor de la distancia crítica para cada una de las ondas de rayo empleadas en la simulación de los casos anteriores:

- Onda 10 kA, 8/20 μ s $l_{cri} = 68.57$ metros
- Onda 10 kA, 1/5 μ s $l_{cri} = 8.57$ metros

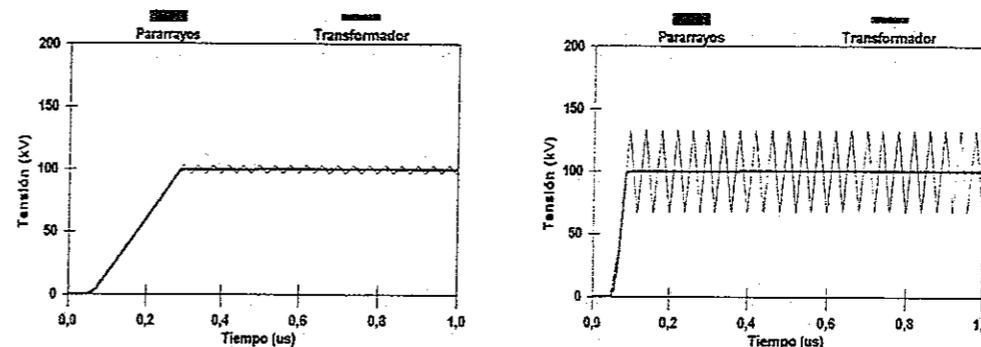
Del análisis de los resultados presentados en las Figuras 8.63 y 8.64 se comprueba que con una onda de 10 kA, 8/20 μ s, en ningún caso se alcanza en el transformador una tensión doble que la del pararrayos debido a que todas las distancias son inferiores a 68.57 metros, mientras que con una onda de 1 kA, 1/5 μ s, tan sólo en el primer caso la distancia es inferior a la crítica, 8.57 metros, y la tensión en el transformador no dobla la tensión residual del pararrayos.

8.5.3 Características de las sobretensiones

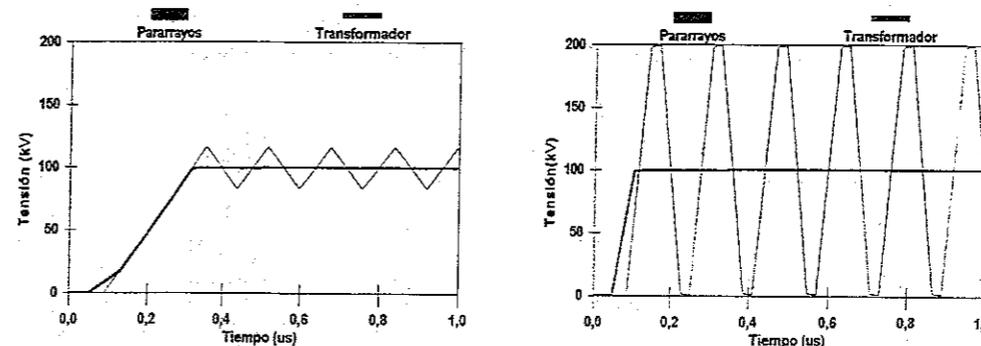
Aunque las causas de sobretensiones son muchas, así como los parámetros y variables que intervienen en cada categoría, es posible distinguir unos pocos parámetros cuya influencia será decisiva en la mayoría de casos.

1. *Valor de cresta:* El valor máximo de una sobretensión dependerá de ciertos factores, según sea su origen:

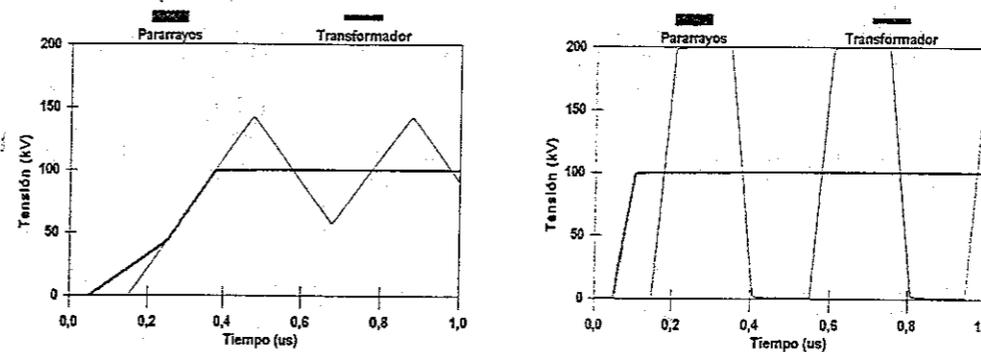
- En tensiones temporales o de frente lento originadas por una falta o maniobra influirán el instante en el que se inicia el proceso transitorio, la carga atrapada en el lado del consumo en caso de maniobra, el amortiguamiento que introducen los distintos equipos de la red, y en algunos casos (maniobra de línea en vacío) algún coeficiente de reflexión.
- En tensiones de frente rápido o muy rápido originadas por una maniobra, además de las causas mencionadas anteriormente, habrá que añadir las impedancias características de los componentes que intervienen en el proceso transitorio.
- En sobretensiones provocadas por una descarga atmosférica influirán las impedancias características de líneas, cables y otros equipos, los coeficientes de reflexión en puntos cercanos al punto de impacto, y el instante de impacto de la descarga.



(a) Separación entre pararrayos y transformador - d = 3 metros



(b) Separación entre pararrayos y transformador - d = 12 metros



(c) Separación entre pararrayos y transformador - d = 30 metros

Figura 8.63. Onda de rayo: 10 kA, 8/20 μ s.

Figura 8.64. Onda de rayo: 10 kA, 1/5 μ s.

2. *Frecuencia de las oscilaciones:* Las frecuencias que aparecerán en sobretensiones oscilatorias serán debidas a la frecuencia de la fuente o fuentes que alimentan la red, las frecuencias naturales que pueden originarse entre los distintos equipos, y la longitud de líneas, cables o conductos para los cuales el modelo matemático incluya una representación con parámetros distribuidos. En este caso, la frecuencia de las oscilaciones viene dada por la expresión

$$f = \frac{1}{4\tau} \quad (8.99)$$

siendo τ el tiempo de propagación en la línea, cable o conducto.

Si la sobretensión es unidireccional no oscilatoria y originada por un rayo, el tiempo a la cresta dependerá fundamentalmente del tiempo a la cresta de la descarga atmosférica, y será del orden de microsegundos.

3. *Duración:* La duración de una sobretensión será debida fundamentalmente a dos factores, la causa y el amortiguamiento que introducen los equipos de la red.

8.5.4 Limitación de sobretensiones

La protección frente a sobretensiones se realiza teniendo en cuenta el tipo de equipo a proteger y su nivel de tensión nominal. La protección de estaciones receptoras y líneas aéreas de transporte se realiza con distintos criterios que la protección de redes aéreas y subterráneas de distribución. Algunos de los aspectos que justifican los principales criterios de protección empleados en redes eléctricas se comentan a continuación:

- Las sobretensiones de origen atmosférico pueden ser originadas por un rayo directo a algún conductor de una línea, o un rayo indirecto que alcance un punto próximo a la línea; debido al nivel de aislamiento que se utiliza en líneas aéreas, las sobretensiones por rayo indirecto no son peligrosas en líneas de transporte, pero pueden serlo en líneas de distribución.
- La protección de una línea aérea frente al rayo se puede conseguir apantallando la línea con conductores de tierra o mediante la instalación de pararrayos en los apoyos; la instalación de conductores de tierra es la solución más extendida para proteger líneas aéreas de transporte, especialmente en zonas de mucha actividad atmosférica; el apantallamiento que se consigue con estos conductores, junto con una resistencia de puesta a tierra relativamente baja en los apoyos de las líneas, permite reducir sensiblemente el número de fallas por rayos en líneas aéreas de transporte; la instalación de cables de tierra en líneas aéreas de distribución puede reducir sensiblemente el número de fallas debidas a descargas indirectas.
- Las sobretensiones temporales y de maniobra, tanto en transporte como en distribución, alcanzan valores de pico mucho más pequeños que las originadas por rayos, su frecuencia es mucho más baja y su duración mucho más larga; generalmente, su valor se mide como un múltiplo de la tensión de pico (fase-tierra) nominal de la red.

- El nivel de aislamiento empleado en redes de distribución es muy bajo frente a las sobretensiones debidas al rayo, pero elevado frente al nivel de las sobretensiones de origen interno, de aquí que en redes de distribución a media tensión la mayoría de averías debidas a una sobretensión tenga un origen atmosférico.
- El momento en el que se origina una sobretensión por rayo o por cortocircuito es evidentemente desconocido, sin embargo se sabe perfectamente cuándo aparecerá una sobretensión de maniobra, por lo que se pueden emplear medios para reducir su efecto en el momento de efectuar la maniobra.

Los métodos de protección frente a sobretensiones se resumen a continuación:

1. Las sobretensiones de maniobra se pueden controlar o reducir controlando el instante de cierre del interruptor utilizado en la maniobra o mediante la inserción de resistencias o inductancias en serie con el interruptor durante el tiempo que pueda durar la sobretensión.
2. El efecto de las sobretensiones de origen atmosférico en estaciones receptoras y en líneas de transporte se puede reducir sensiblemente mediante apantallamiento de estaciones y líneas, y manteniendo las resistencias de puesta a tierra en valores relativamente bajos.
3. Los pararrayos son útiles en la protección frente a sobretensiones de maniobra y de origen atmosférico. Sus valores nominales se escogen teniendo en cuenta la tensión nominal de la red en la que se instalan, la tensión soportada por el equipo o los equipos a proteger frente a choques de maniobra y rayo, y el nivel y la duración que pueden alcanzar las sobretensiones temporales, fundamentalmente las debidas a un cortocircuito fase-tierra.

La Tabla 8.2 muestra un resumen de las causas, características y medios para limitar sobretensiones temporales, de frente lento y de frente rápido, respectivamente.

Tabla 8.2. Sobretensiones en sistemas eléctricos de energías.

TIPO DE SOBRETENSIÓN	ORIGEN	CARACTERÍSTICAS	LIMITACIÓN	PROTECCIÓN CON PARARRAYOS
TEMPORALES	CORTOCIRCUITOS A TIERRA	Solo originan sobretensiones fase-tierra en las fases sanas; se presentan a frecuencia de operación, su amplitud depende del sistema de puesta a tierra y de la localización de la falta, y su duración depende del sistema de protección.	Mediante selección de aquellos parámetros que pueden tener una gran influencia en su valor de cresta. Son más reducidas en sistemas con neutro a tierra.	Su tensión nominal se selecciona a partir de la máxima tensión en régimen permanente. Desde un punto de vista práctico, no limitarán las sobretensiones temporales, excepto en ciertos casos de resonancia.
	PERDIDA BRUSCA DE CARGA	Pueden originar sobretensiones fase-tierra, entre fases y longitudinales, y su magnitud dependerá de la carga desconectada, de la estructura del sistema y las características de la fuente.	Mediante instalación de reactores paralelo, bancos de condensadores serie, o compensadores estáticos.	
	RESONANCIA Y FERRORRESONANCIA	Generalmente se originan al activar redes con elementos capacitivos grandes y reactancias saturables. Pueden alcanzar valores muy elevados.	De-sintonizando el sistema de la frecuencia de resonancia, cambiando la configuración de la red, o instalando resistencias de amortiguamiento.	
	SOBRETENSIONES LONGITUDINALES DURANTE SINCRONIZACIÓN	Pueden alcanzar una amplitud igual a dos veces el valor de la tensión de operación fase-tierra, con una duración que irá de varios segundos a varios minutos.		
DE FRENTE LENTO	ENERGIZACIÓN Y REENGANCHE DE LÍNEAS	Pueden originar sobretensiones fase-tierra y fase-fase; su amplitud dependerá del tipo de interruptor, el tipo de red, la potencia de cortocircuito en el punto de maniobra, la longitud de la línea, así como de la terminación y la compensación de la línea.	Mediante pre-inserción de resistencias o control del instante de cierre. Transformadores instalados en los terminales de la línea, reducen la carga atrapada en las fases, después de la desconexión.	Son adecuados en redes con sobretensiones temporales moderadas. La dependencia de la tensión residual respecto al frente de onda de la corriente de descarga es despreciable. Se instalan generalmente entre fases y tierra.
	CORTOCIRCUITOS Y ELIMINACIÓN DE CORTOCIRCUITOS	Pueden originar sobretensiones fase-tierra. Los valores máximos serán: - Iniciación $(2k-1) \cdot V_{fisa} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$ - Eliminación $2 \cdot V_{fisa} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$ (k = factor de falta a tierra)	El empleo de varistores puede limitar las sobretensiones de maniobra con líneas, reactores o condensadores.	
	MANIOBRAS CON CORRIENTES INDUCTIVAS O CAPACITIVAS	El recabado de interruptores durante la interrupción de corrientes inductivas o capacitivas puede originar sobretensiones muy peligrosas.		
	PERDIDA BRUSCA DE CARGA	Pueden ser importantes en redes en las que las sobretensiones de energización y re-energización están controladas a valores inferiores a 2 pu.		
DE FRENTE RÁPIDO	SOBRETENSIONES POR RAYOS EN LÍNEAS AÉREAS	Son originadas por rayos directos a un conductor de fase o un cebado inverso, o inducidas por rayos a tierra cercanos a la línea. Las tensiones inducidas por rayos son importantes en redes de Gama I.	Mediante diseño apropiado de las líneas: instalando cables de guarda contra rayos directos; reduciendo la impedancia de puesta a tierra en los apoyos para reducir las sobretensiones por cebado inverso.	Su efectividad depende de la amplitud y la forma de onda del rayo, la impedancia de onda del equipo protegido, la distancia entre pararrayos y equipo protegido, la longitud de los cables de conexión. Las corrientes de descarga de los pararrayos se deben seleccionar de acuerdo con los siguientes criterios: - Gama I: 5 a 10 kA - Gama II: 10 a 20 kA
	SOBRETENSIONES POR RAYOS EN ESTACIONES RECEPTORAS	La amplitud de las sobretensiones por rayos es tan elevada que la coordinación de aislamiento se basará generalmente en este tipo de tensiones.		
	MANIOBRAS Y CORTOCIRCUITOS	Se pueden originar en maniobras con equipos conectados a la red mediante cables muy cortos. La máxima sobretensión dependerá del tipo y el comportamiento del equipo de maniobra, y pueden variar entre 2 y 3 veces la tensión de nominal de cresta.	Mediante selección del equipo de maniobra adecuado: interruptores libres de recabados, preinserción de resistencias limitadoras, control del instante de la maniobra.	

Bibliografía

- [1] P. Chowdhuri (ed.), "Power System Transients", Sección 10 de *The Electric Power Engineering Handbook*, L. L. Grigsby (ed.), CRC Press, 2000.
- [2] P. Chowdhuri, *Electromagnetic Transients in Power Systems*, RSP - John Wiley, 1996.
- [3] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, John Wiley, 1991.
- [4] A. P. Sakis Meliopoulos, *Power System Grounding and Transients*, Marcel Dekker, 1988.
- [5] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-Phase Networks", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 88 (2), pp. 734-741, 1969.
- [6] H. W. Dommel, "Nonlinear and Time-Varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 90 (6), pp. 2561-2567, 1971.
- [7] H. W. Dommel y W. Scott Meyer, "Computation of Electromagnetic Transients", *Proc. of IEEE*, vol. 62 (7), pp. 983-993, 1974.
- [8] "Digital Simulation of Electrical Transient Phenomena", A. Phadke (ed.), IEEE Tutorial Course, Course Text 81 EHO173-5-PWR, 1981.
- [9] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [10] J. A. Martínez-Velasco (ed.), *Computer Analysis of Electric Power System Transients*, IEEE Press, 1997.
- [11] H. W. Dommel, "Techniques for Analyzing Electromagnetic Transients", *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 10 (3), pp. 18-21, 1997.
- [12] CIGRE WG 33.02, "Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients", CIGRE Brochure 63, 1990.
- [13] "Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs", A. M. Gole, J. A. Martínez-Velasco y A. J. F. Keri (eds.), IEEE PES Special Publication, TP-133-0, 1999.
- [14] A. P. Sakis Meliopoulos, "Lightning and Overvoltage Protection", Sección 27 de *Standard Handbook for Electrical Engineers*, D. G. Fink y H. Wayne Beaty (eds.), McGraw-Hill, 2000.
- [15] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, Marcel Dekker, 1999.
- [16] K. Ragaller (ed.), *Surges in High-Voltage Networks*, Plenum Press, 1980.
- [17] F. Crespo, *Sobretensiones en las Redes de Alta Tensión*, Asinel, 1975.
- [18] CIGRE WG 33.10 y IEEE TF on TOV, "Temporary Overvoltages: Causes, Effects and Evaluation", *CIGRE 1990 Session*, Paper 33-210, 1990.
- [19] CIGRE WG 13.05, "The Calculation of Switching Surges", *Electra*, vol. 19, pp. 67-78, 1971.
- [20] CIGRE WG 13.02, "Switching Overvoltages in EHV and UHV Systems with Special Reference to Closing and Reclosing Transmission Lines", *Electra*, vol. 30, pp. 70-122, 1973.
- [21] CIGRE WG 33.01, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", CIGRE Brochure 63, 1991.
- [22] IEEE Std 1243, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", 1997.
- [23] IEEE Std 1410, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", 1997.
- [24] CIGRE WG 33/13.09, "Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substations", *CIGRE 1988 Session*, Paper No. 33-13, 1988.