

EFFECTOS MECÁNICOS EN LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN DEBIDOS A LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO. PROPUESTA DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DEL FENÓMENO

MANUEL PÉREZ GONZÁLEZ
JOSÉ A. GONZALEZ TABOADA
y
ALFONSO FERNÁNDEZ ARMESTO

*Departamento de Materiales, Mecánica Aplicada y Construcción
Universidad de Vigo, Lagoas, Marcosende 9, 36200 Vigo, España
Tel.: + 34-86-812923 Fax: + 34-86-812991*

RESUMEN

La respuesta mecánica de un sistema de transporte de energía eléctrica a las fuerzas de excitación debidas a las corrientes de cortocircuito se traduce en la puesta en movimiento de los cables portadores y en un sensible incremento de los esfuerzos que éstos soportan y que transmiten a los apoyos que los sustentan. La idealización del sistema físico real nos lleva a definir un modelo discreto que mediante el adecuado tratamiento implementado en ordenador permita cuantificar el problema. Un estudio de sensibilidad encaminado a determinar cómo afecta al comportamiento del sistema la variación de diversos parámetros y configuraciones de líneas nos permitirá un mejor conocimiento del fenómeno.

MECHANICAL EFFECTS ON H.V. ELECTRICAL LINES DUE TO SHORT-CIRCUIT CURRENTS. A MODEL PROPOSAL TO SIMULATE THE PHENOMENA

SUMMARY

The mechanical response of a power transport system electrical line to the exciting forces due to short-circuit currents usually results into motion of the flexible cables and a noticeable increase of the tensil forces which they bear and transmit to bearing supports. Idealization of the real physical system leads to define a discrete mechanical model which by adequate mathematical treatment implemented on a computer will enable to quantify the problem. A sensitivity study directed to determinate how the behaviour of the system is affected by changes in various parameters and cable line configurations will provide a better understanding of the phenomenon. Study results are enclosed.

Recibido: Mayo 1996

INTRODUCCIÓN

Cuando aparece un fallo o cortocircuito en una red de transporte de energía eléctrica de alta tensión surgen grandes intensidades de corriente dando lugar a la aparición de campos electromagnéticos importantes. La interacción de estos campos con cables portadores de la corriente de defecto provoca que éstos se pongan en movimiento a gran velocidad, “efecto latigazo”, movimiento que da lugar a un sensible incremento de los esfuerzos de tracción que soportan los cables y de las tensiones mecánicas que éstos transmiten a las cadenas aisladoras, herrajes y soportes, con posible riesgo de rotura o agotamiento de estos elementos del equipamiento.

La magnitud de los desplazamientos que sufren los conductores y los esfuerzos electrodinámicos que aparecen serán función no sólo del nivel de las corrientes de cortocircuito, sino también de su duración, de la geometría del vano y de las características físicas de las portadoras.

Durante el movimiento de los cables puede ocurrir que éstos se aproximen hasta una distancia que, debido a la ionización del aire y las tensiones eléctricas de la red, provoque el cebado del arco eléctrico con el posible deterioro de los cables y dando origen además a un cortocircuito secundario. Este riesgo se presenta especialmente en líneas con armado horizontal cuando los cables oscilan en retorno previamente al reenganche de la red, pudiendo incluso producirse el choque entre cables de distinta fase.

El aumento esperado de las corrientes de cortocircuito en líneas de nueva construcción dará lugar a un incremento importante de los efectos mecánicos del cortocircuito que de no tomarse en consideración, pueden llevarnos a consecuencias desastrosas. Así pues, la evolución del nivel de las corrientes de cortocircuito plantea nuevos problemas técnicos en el área del diseño mecánico; ello obligará al ingeniero a concebir las herramientas de cálculo adecuadas para una correcta concepción de los soportes y el dimensionamiento de las portadoras.

En el cálculo mecánico clásico de líneas las acciones que habitualmente se tienen en cuenta son el peso propio, las sobrecargas motivadas por el hielo, la acción del viento y en algunos casos la carga sísmica. No se contemplan las acciones mecánicas que aparecen en condiciones de cortocircuito, en adelante carga de cortocircuito, cuando sabemos ahora que en algunos casos éstas pueden ser determinantes en la concepción de líneas y sus soportes.

La experiencia internacional¹ recoge muy pocos casos de daños mecánicos importantes en redes eléctricas provocados por corrientes de cortocircuito. No obstante, los ingenieros de proyecto deberán asegurarse de que los diseños cumplen los requerimientos externos asociados a estas corrientes. Ello podrá conseguirse utilizando métodos de simulación, como el que aquí se presenta, o en casos excepcionalmente complicados mediante pruebas o ensayos sobre modelos reales.

El objetivo del presente documento es presentar un modelo matemático que nos permita definir y probar un procedimiento que simule el fenómeno para diversas configuraciones del sistema, que sea susceptible de ser programado en ordenador y en consecuencia permita determinar, en el tiempo que dura el cortocircuito, tanto las tensiones mecánicas que aparecen como el movimiento a que se ven sometidos los

cables. En concreto tratamos de evaluar la influencia en el comportamiento del sistema de ciertos parámetros y variables, intrínsecos a la propia definición del modelo, cuya cuantificación presenta cierta variabilidad o incertidumbre.

MODELO FÍSICO

Lo que se pretende con la modelización es sustituir el sistema real por un modelo ideal donde sólo tengan cabida aquellas partes o parámetros del mismo con una influencia relevante en su comportamiento, siempre con la vista puesta en los resultados que pretende determinar el fenómeno a simular. En la definición del modelo se tienen asimismo presentes las dificultades que conlleva el tratamiento matemático del mismo, de manera que nos facilite la creación de un programa informático para la obtención de resultados.

La configuración típica de un vano en una línea de alta tensión incluye los cables flexibles traccionados, con uno o varios conductores simples (en haz) por fase, fijados a los soportes mediante cadenas de conductores de suspensión o de amarre. Los apoyos son normalmente torres de acero en celocía y en algunos casos, postes de hormigón; estos últimos suelen utilizarse en medias tensiones. En el caso de vanos de cable flexible en subestaciones suele existir en su interior montantes y bajantes a determinados apartos eléctricos, así como masas correspondientes a aisladores intermedios. Los apoyos son normalmente estructuras de acero porticadas.

En el sistema real (Figura 1), los cables o portadores se caracterizan por ser medios continuos con cierta rigidez a la flexión donde la curva de equilibrio que adopta el cable en reposo toma la forma de una catenaria. En el tiempo que dura el cortocircuito y sus efectos, los cables se apartan de su posición y forma iniciales, pero en cualquier caso su forma permanece curvilínea y las moléculas que los componen se mantienen en equilibrio dinámico bajo las fuerzas de inercia, gravitatorias, tensiones mecánicas internas y fuerzas electromagnéticas.

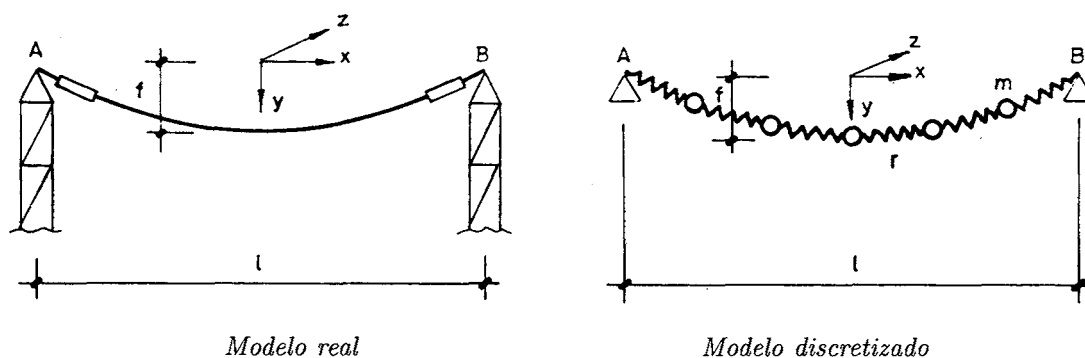


Figura 1. Modelo mecánico

Al objeto de hacer posible el tratamiento matemático del fenómeno se sustituye este sistema continuo por otro discreto. Ello hace posible el estudio del comportamiento elástico e inercial del cable, éste último concretado en una serie de puntos o nodos dotados de masa. Para ello, cada una de las portadoras o cables se supone dividida en un cierto número de tramos con la masa de los mismos concentrada en su punto medio. Estas masas están unidas a sus adyacentes por resortes elásticos ideales de las mismas características mecánicas que los cables objeto de estudio. Los resortes se consideran articulados en los nodos sin rozamiento, carentes de rigidez a flexión, de comportamiento lineal a tracción e incapaces de soportar esfuerzos de compresión. En resumen, para representar el cable discretizado se hacen los siguientes supuestos:

- La curva de equilibrio del cable se asimila a una línea poligonal.
- Se trata como un sistema discreto de masa, con las masas concentradas situadas en los nodos.
- Se asume que los cables son perfectamente flexibles.
- Están sometidos a fuerzas puntuales que actúan en los nodos sobre las masas concentradas.
- Se pueden incluir masas adicionales para simular los bajantes o aisladores intermedios en el vano de cable.

Parece lógico esperar que el modelo se aproxime tanto más a la realidad cuanto mayor sea el número de tramos definidos. No obstante, el incremento en el número de tramos tendrá un límite a partir del cual la precisión de los resultados no mejorará sensiblemente, mientras que el coste por proceso en ordenador se hará cada vez más oneroso.

A la vista del estudio de sensibilidad que nos hemos propuesto realizar y ante la diversidad de casos que se presentan, nos ha parecido conveniente prescindir de la representación en el modelo de las cadenas de aisladores y de la flexibilidad de los soportes. Por ello estos últimos se representan por apoyos fijos unidos al cable por una rótula sin rozamiento.

MODELO MATEMÁTICO

En el sistema finito resultante del proceso de discretización la ecuación de equilibrio que pone de manifiesto el comportamiento dinámico del cable viene dada por

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

donde $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ y $\mathbf{K}$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, y $\mathbf{F}$ y el vector de fuerzas que actúan sobre las masa concentradas. Estas fuerzas son función del tiempo t y de la posición de los nodos.

Dentro de la gama de procedimientos numéricos existentes para la solución de este tipo de sistema de ecuaciones² hemos seleccionado el método de integración directa basado en el esquema de Newmark³. El método nos permite obtener soluciones que satisfacen el sistema de ecuaciones secuencialmente, paso a paso a intervalos discretos

de tiempo Δt , a partir del estado inicial del sistema, equilibrio estático y velocidad nula. La solución dentro de cada intervalo se obtiene por aproximación utilizando un proceso iterativo de previsión-corrección de aceleraciones adecuado. La estabilidad y convergencia del método queda asegurada si se elige un intervalo de tiempo Δt apropiado.

Vista la dificultad que presenta la evaluación de la matriz $\mathbf{C}$ se prescinde de las fuerzas de amortiguamiento del sistema. Ello nos coloca en cualquier caso del lado de la seguridad en la evaluación del fenómeno.

Las fuerzas elásticas que actúan sobre los resortes y que éstos transmiten a las masas adyacentes están representadas por el sumando $\mathbf{K} \cdot \mathbf{X}$. Para el cálculo de estas fuerzas particularizado para cada resorte, conocida la longitud actual de los mismos en un instante dado y la ley del comportamiento elástico del material, haremos uso de la expresión

$$l = l_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)](1 + F/EA) \quad (2)$$

donde l_0 es la longitud inicial del resorte sin tensionar, l la longitud actual del resorte, α el coeficiente de dilatación lineal del cable, θ_0 y θ la temperatura inicial y actual del cable, E el módulo de Young del cable, A la sección del cable y F la fuerza de tracción que tensiona el resorte.

Como puede verse en la expresión (2), hemos introducido un término correctivo de calentamiento, considerado adiabático, para contemplar la caída de tensión mecánica que aparece debida a la dilatación que sufre el cable.

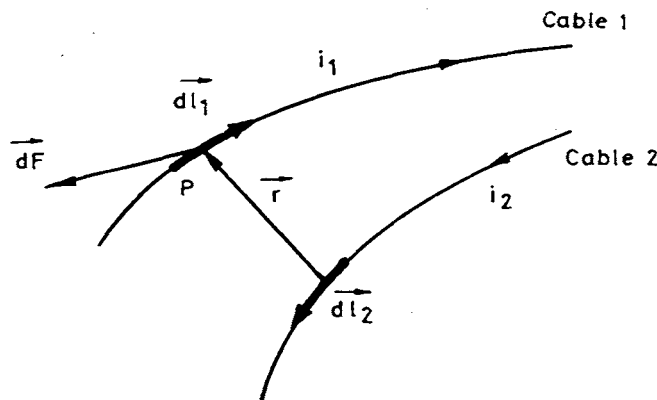


Figura 2. Fuerza electrodinámica entre corrientes lineales

La Figura 2 muestra la fuerza electrodinámica elemental que experimenta un conductor por el que circula la corriente i_1 situado en el campo magnético creado por otro conductor con una corriente i_2 ; se puede cuantificar mediante la ecuación

$$\vec{dF} = (\mu_0/4\pi)i_1i_2[\vec{dl}_1 \wedge (\vec{dl}_2 \wedge \vec{r})]/r^3 \quad (3)$$

Agregando las fuerzas electrodinámicas que actúan sobre los tramos adyacentes a un nodo, calculadas por integración de la expresión (3) sobre las líneas poligonales representativas de la posición de los cables, se obtiene la fuerza electrodinámica que actúa sobre el nodo.

En línea con lo recomendado por el IEC⁴ para el cálculo de la carga mecánica de cortocircuito se adopta como forma de onda de las corrientes instantáneas de cortocircuito la representada en la Figura 3, cuya expresión matemática es

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_k'' [\sin(\omega t + \gamma - \varphi) + e^{-t/\tau} \sin(\varphi - \gamma)] \quad (4)$$

donde $i(t)$ es la intensidad instantánea de cortocircuito, I_k'' el valor eficaz de la componente alterna de la corriente de cortocircuito, ω la pulsación de la corriente, φ el ángulo de desfase, γ el ángulo de fase de la tensión en el instante en que aparece el cortocircuito y τ la constante de tiempo de la red.

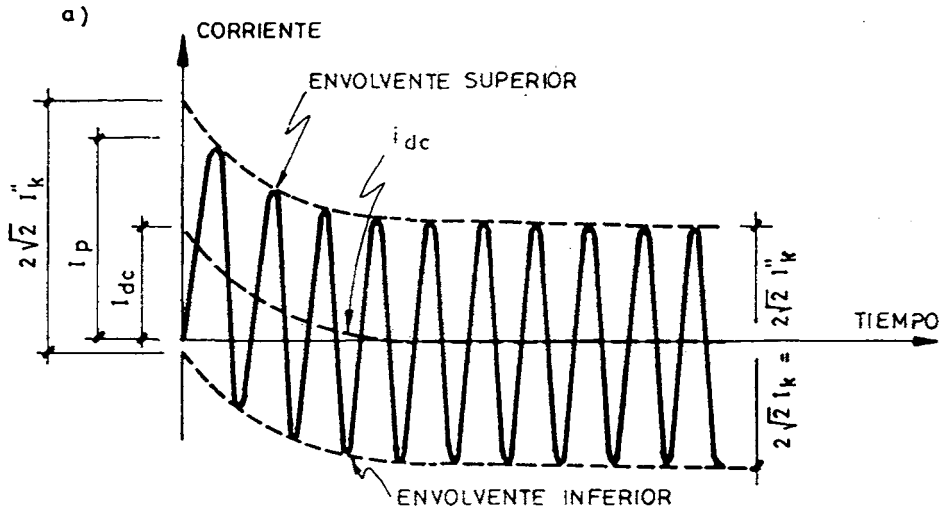


Figura 3. Forma de onda de la corriente de cortocircuito

La ecuación (4) recoge la forma de onda cuando el fallo ocurre en un punto alejado del generador; contiene una sola constante de tiempo que afecta a la componente aperiódica de la corriente, mientras que la componente alterna permanece constante a lo largo de todo el tiempo de cortocircuito. La asimetría de la onda depende de la variable estadística γ . En este estudio se considera máxima asimetría, es decir $\gamma - \varphi = \pi/2$, caso en que los efectos son más desfavorables.

Hacemos constar aquí que las compañías eléctricas tienen acceso a programas de simulación de redes mediante los cuales se pueden hallar, con una buena aproximación, los valores que toman la intensidad eficaz de cortocircuito I_k'' y la constante de tiempo τ para cada caso particular de cortocircuito.

La similitud entre las oscilaciones y fuerzas⁵ originadas sobre los cables de línea, trátase de cortocircuito tripolar o bipolar, cuando los cables están tendidos

paralelamente en la posición inicial de equilibrio, simplifica el modelo, bastando por ello simular solamente el caso de cortocircuito bipolar que es el más crítico en cuanto a las consecuencias derivadas del balanceo de los cables.

EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

Basándose en el modelo matemático descrito en el apartado anterior, se ha desarrollado un conjunto de programas de ordenador que simulan el comportamiento mecánico de un vano de línea en condiciones de cortocircuito. Su elaboración parte del siguiente algoritmo:

1. Calcular el estado inicial del sistema (equilibrio estático).
2. Calcular la intensidad del cortocircuito y el calentamiento del cable.
3. Calcular la fuerzas electrodinámicas que actúan sobre los nodos.
4. Algoritmo iterativo que calcula el estado en el instante t (equilibrio dinámico).
5. Si no ha terminado el período a simular, incrementar el tiempo $t = t + \Delta t$ e ir al paso 2.
6. Fin de la simulación.

En el paso 4 se obtienen los resultados buscados, es decir, la posición del cable en el instante t y el valor de los esfuerzos que actúan sobre los cables y las fuerzas que éstos transmiten a los soportes. Para configurar la línea a simular se suministran al programa tres grupos de datos con información sobre las características mecánicas y eléctricas de los cables y la geometría del vano.

Por último, para la validación del modelo matemático propuesto se han seguido dos vías; utilizando modelos físicos cuyo comportamiento se puede determinar analíticamente⁵ se han validado algunas partes críticas del programa, tales como el procedimiento para el cálculo de las fuerzas electrodinámicas y el algoritmo iterativo para determinar el estado en un instante. La buena concordancia entre los resultados de la simulación y los obtenidos en pruebas sobre montajes a escala real⁶ nos asegura la bondad de los resultados obtenidos con el programa de simulación.

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

En este estudio se persiguen fundamentalmente dos objetivos:

1. Evaluar la sensibilidad de los resultados a la variación de los distintos parámetros que intervienen en el fenómeno, tanto aquellos intrínsecos achacables a la propia modelización como los que definen el sistema físico a estudiar.
2. Obtener un buen conocimiento cualitativo e incluso intuitivo de cómo se ve influenciado el fenómeno por los cambios en las variables físicas y eléctricas.

En esta publicación solamente haremos mención a los parámetros intrínsecos, es

decir, aquellos que afectan a la definición del propio modelo de simulación. Como tales hemos identificado el número de tramos en que se dividen los cables, el módulo elástico del cable, la forma de la corriente y los efectos derivados del calentamiento de los cables.

Como antes se mencionó, cuanto mayor sea el número de tramos en que se trocea el cable para discretizarlo es de esperar una mejor representación del sistema real. Por otra parte, la incertidumbre en el valor del módulo elástico del cable, que depende del esfuerzo de tracción máximo a que se ve sometido⁷, aconseja el análisis de este parámetro. La comparación de resultados en base a la aproximación que se hace de la forma de onda de la corriente de cortocircuito, intensidad instantánea incluyendo o no la componente asimétrica posibilita utilizar en algunos casos la intensidad eficaz I_k'' como corriente de cortocircuito. Ello supone una mejora sustancial en el tiempo de ordenador preciso para ejecutar el programa de simulación. Se contempla asimismo la influencia que ejerce sobre los efectos del cortocircuito la consideración o no del calentamiento de los cables. La información requerida para la configuración de los casos simulados se recoge, en forma esquemática, en la Tabla I.

Descripción	Valor típico	Unidades
PARÁMETROS ELÉCTRICOS - Corriente de cortocircuito (I_k'') - Constante de tiempo de la red (t) - Duración del cortocircuito (t_k) - Tiempo total simulado (t_s)	90 0-160 500 5	A/mm ² ms ms s
GEOMETRÍA DEL VANO - Longitud del vano (l) - Distancia entre fases (d) - Flecha (s)	50-500 6-8 4% · 1	m m m
CARACTERÍSTICAS DEL CABLE (Cable tipo LA-635/UNE 21018) - Peso del cable (W) - Módulo de elasticidad (E) - Coeficiente de dilatación lineal (α) - Resistencia a 20 °C (R)	2.125 68 $1,94 \cdot 10^{-5}$ 0,051	kg/km kN/cm ² °C ⁻¹ Ω/km

Tabla I

Conviene hacer aquí algunas consideraciones sobre el valor de los parámetros seleccionados en esta tabla. La densidad de corriente adoptada, unos 90 A/mm², es la máxima generalmente aceptada para que los incrementos de temperatura esperados no afecten al galvanizado de protección contra la corrosión del alma de los cables compuestos. La duración del cortocircuito de 500 ms es del orden de magnitud del tiempo usual que tarda en actuar el disyuntor de reserva, cuando falla la protección primaria de la red. En cuanto a la gama de longitudes seleccionados, de 50 a 500 m,

recogen longitudes de los vanos de línea que suelen presentarse en la práctica. Las tablas que incluimos a continuación muestran los resultados para los valores extremos del intervalo.

Aunque como salida del programa de simulación se obtienen los valores en el tiempo de la evolución de los desplazamientos y esfuerzos de tracción a lo largo de toda la longitud de los cables, a intervalos discretos, en las tablas y a efecto de comparación sólo se muestran las tensiones mecánicas pico y los desplazamientos máximos de los conductores.

En la Figura 4 puede verse un ejemplo de salida gráfica que nos ayudará en la interpretación de los resultados. La notación utilizada se interpreta F_{st} la máxima tensión estática inicial sobre el cable, (aparece en los puntos de amarre); F_0 el pico de tensión mecánica cuando el cable asciende; F_i el pico de tensión mecánica cuando el cable desciende; d_0 el desplazamiento horizontal máximo, hacia el exterior, del punto medio del cable; d_t el desplazamiento horizontal máximo, hacia el interior, del punto medio del cable; A la posición de equilibrio estático del punto medio del cable y N el número de tramos en que se considera dividido el cable.

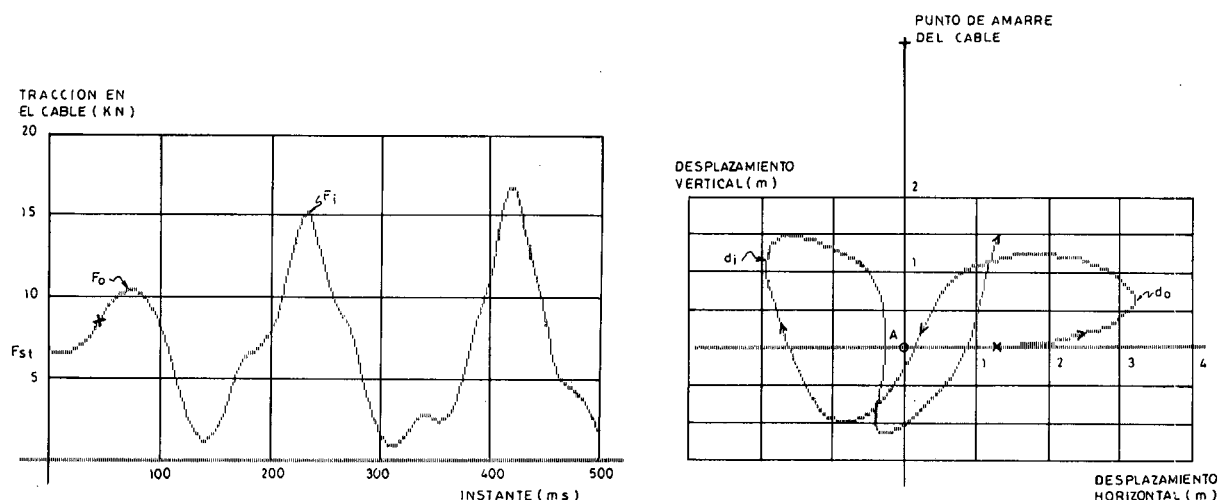


Figura 4. Tensión mecánica y desplazamiento del cable (x interrupción del cortocircuito)

Influencia del número de tramos

En las Tablas II y III observamos que el incremento del número de tramos, en que se divide el cable en el vano, no provoca variaciones importantes en los picos de tensión mecánica que origina el cortocircuito ni el en el valor de los desplazamientos de los cables. Los instantes en que aparecen estos máximos son prácticamente iguales. A la vista de los resultados, se considera que con una partición de 20 a 40 tramos se obtiene una buena representación del cortocircuito, obteniéndose en consecuencia una precisión suficiente en los resultados con tiempos aceptables de proceso en ordenador.

CASO	N	TENSIÓN (kN)			DESPLAZAMIENTO (m)	
		F_{st}	F_0	F_i	d_0	d_i
T.1	10	33,65	63,22	100,50	17,56	colisión
T.2	20	"	62,17	101,30	17,97	"
T.3	40	"	61,89	99,26	18,14	"
T.4	100	"	61,83	103,04	18,14	"
INSTANTE (ms) $\Rightarrow$			850	4.750	2.000	5.250
			850	4.750	1.950	5.200
			850	4.700	1.900	5.200
			850	4.750	1.900	5.200

* $l = 500$ m, $d = 8$ m, $I_k'' = 50$ kA

Tabla II

CASO	N	TENSIÓN (kN)			DESPLAZAMIENTO (m)	
		F_{st}	F_0	F_i	d_0	d_i
T.5	10	3,37	9,44	22,27	2,12	1,96
T.6	20	"	10,19	21,44	2,07	1,66
T.7	40	"	10,40	22,96	2,01	1,71
T.8	100	"	10,49	22,71	2,07	1,73
INSTANTE (ms) $\Rightarrow$			500	1.650	750	2.150
			500	1.650	750	2.150
			500	1.650	750	2.200
			500	1.650	800	2.200

* $l = 50$ m, $d = 6$ m, $I_k'' = 30$ kA

Tabla III

Influencia de la variación del modelo elástico

Se hace variar el módulo elástico del cable en el recorrido ± 15 % sobre su valor nominal. La influencia en los resultados se muestra en las Tablas IV y V.

Del análisis de los resultados se deduce que pequeñas variaciones, o incertidumbres, en el valor del módulo elástico del cable no son preocupantes, ya que su influencia en la evaluación del fenómeno es de escasa importancia.

CASO	E (%)	TENSIÓN (kN)			DESPLAZAMIENTO (m)	
		F_{st}	F_0	F_i	d_0	d_i
E.1	0	33,65	62,16	101,84	17,97	colisión
E.2	5	"	62,65	103,50	17,99	"
E.3	10	"	63,07	101,94	18,00	"
E.4	15	"	63,54	101,89	18,03	"
E.5	-5	"	61,59	106,65	17,97	"
E.6	-10	"	60,97	100,99	17,97	"
E.7	-15	"	60,41	100,49	17,97	"
INSTANTE (ms) $\Rightarrow$			850	4.650	1.950	5.200
			850	4.700	1.950	5.200
			850	4.650	1.950	5.200
			800	4.700	1.950	5.200
			850	4.700	1.900	5.200
			850	4.750	1.900	5.200
			1.000	4.700	1.900	5.200

* $l = 500$ m, $d = 8$ m, $I_k'' = 50$ kA

Tabla IV

CASO	E (%)	TENSIÓN (kN)			DESPLAZAMIENTO (m)	
		F_{st}	F_0	F_i	d_0	d_i
E.6	0	3,37	9,45	22,27	2,12	1,96
E.7	5	"	9,46	21,68	2,12	1,93
E.8	10	"	9,51	22,07	2,12	1,87
E.9	15	"	9,59	21,47	2,12	1,83
E.10	-5	"	9,47	22,53	2,12	2,03
E.11	-10	"	9,54	24,21	2,12	2,02
E.12	-15	"	9,65	24,00	2,12	2,02
INSTANTE (ms) $\Rightarrow$			500	1.650	750	2.150
			500	1.650	750	2.150
			500	1.650	750	2.150
			500	1.600	750	2.150
			500	1.650	750	2.200
			500	1.650	750	2.200
			500	1.650	750	2.200

* $l = 50$ m, $d = 6$ m, $I_k'' = 30$ kA

Tabla V

Influencia de la forma de la corriente y del calentamiento del cable

En la simulación de los casos 1 y 2, tanto para vanos largos como cortos (Tablas VI y VII), se obtienen prácticamente los mismos resultados. De aquí, para que constante de red $\tau = 0$ el cortocircuito pueda simularse tomando como corriente de defecto su valor eficaz I_k'' .

CASO		TENSIÓN (kN)			DESPLAZAMIENTO (m)	
			F_0	F_i	d_0	d_i
C.1	(1)	33,65	62,16	101,84	17,97	colisión
C.2	(2)	"	62,06	101,49	17,95	"
C.3	(3)	"	69,11	111,89	18,33	"
C.4	(4)	"	69,20	112,02	18,32	"
INSTANTE (ms) $\Rightarrow$			850	4.650	1.950	5.200
			850	4.650	1.950	5.150
			1.050	4.750	1.950	5.300
			1.050	4.800	1.950	5.300

* $l = 500$ m, $d = 8$ m, $I_k'' = 50$ kA

- (1) Simulación con intensidad eficaz de cortocircuito I_k''
- (2) Simulación con intensidad instantánea de cortocircuito. (Sólo componente simétrica)
- (3) Simulación con intensidad eficaz de cortocircuito. (Con influencia del calentamiento sobre el módulo elástico y el coeficiente de dilatación lineal del cable)
- (4) Simulación con intensidad eficaz de cortocircuito. (Sólo influencia del calentamiento sobre el coeficiente de dilatación lineal del cable)

Tabla VI

CASO		TENSIÓN (kN)			DESPLAZAMIENTO (m)	
			F_0	F_i	d_0	d_i
C.5	(1)	3,365	9,45	22,27	2,12	1,96
C.6	(2)	"	9,40	23,19	2,12	1,96
C.7	(3)	"	8,51	22,25	2,17	2,02
C.8	(4)	"	8,51	21,42	2,17	2,02
INSTANTE (ms) $\Rightarrow$			500	1.650	750	2.150
			500	1.650	750	2.150
			400	1.650	750	2.200
			400	1.650	750	2.200

* $l = 500$ m, $d = 8$ m, $I_k'' = 50$ kA

Tabla VII

Las diferencias entre los resultados de los casos 3 y 4 son mínimas, por ello, en la simulación bastaría tomar en cuenta la influencia del calentamiento sobre el coeficiente de dilatación lineal del cable.

Al considerar el calentamiento, comparando los casos 1 y 4, se observa que las diferencias en los resultados se agudizan, en especial para vanos cortos, ello nos advierte la conveniencia de incluir el calentamiento en el modelo de simulación del cortocircuito.

CONCLUSIONES

La validación de los resultados obtenidos con el programa de simulación muestra que el modelo matemático propuesto parece razonable para representar el comportamiento mecánico de los cables en condiciones de cortocircuito.

De los diversos casos simulados se infiere que, a efecto de simulación del comportamiento mecánico, es suficiente considerar troceado el cable entre 20 y 40 tramos, con lo que se obtiene una buena precisión en los resultados. Más de 40 tramos incrementan notablemente el tiempo de ordenador sin aparente mejoría en los resultados.

El calentamiento del cable, debido a las corrientes de cortocircuito, tiene relevancia en los resultados. De aquí, la conveniencia de que este efecto sea incluido en el modelo de simulación.

REFERENCIAS

1. "The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Substations", CIGRE (1987).
2. K.J. Bathe y E.L. Wilson, "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice-Hall Inc. (1976).
3. N.M. Newmark,, "A Method of Computation for Structural Dynamics", *ASCE Journal Eng. Mech. Division*, Vol. **85**, pp. 65-94 (1959).
4. "Short-Circuit Current Calculation in Three-Phase A.C. Systems", IEC Publication 909 Ginebra (1987).
5. M. Pérez González, "Efectos mecánicos en líneas de alta tensión debidos a las corrientes de cortocircuito", *Tesis Doctoral*, Universidad de Vigo, (1994).
6. P. Rousel y J. Guillot, "Incidence de l'augmentation des courants de courtcircuit sur la conception des ouvrages a 400 KV du reseau de transport d'electricité de France", CIGRE, Report 23-06 (1976).
7. "Aluminium Electrical Conductor Handbook", The Aluminium Association. Institut Technological of Illinois, USA.