

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1 ENERGIZADO DE UNA RED DE ALTA O MEDIA TENSIÓN COMPUESTA POR CABLES SUBTERRÁNEOS.....	3
<b>2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....</b>	<b>4</b>
2.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA .....	4
2.2 OBJETIVO DEL PROYECTO .....	4
2.3 MÉTODO DE SOLUCIÓN .....	5
2.4 LIMITACIONES .....	5
<b>3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....</b>	<b>6</b>
<b>4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PSCAD .....</b>	<b>10</b>
4.1 MODELO EQUIVALENTE DE LA RED.....	11
<b>5 CÁLCULO DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA.....</b>	<b>12</b>
<b>6 DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS REALIZADAS .....</b>	<b>14</b>
6.1 TRABAJO REALIZADO .....	14
<b>7 ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL MODELO PSCAD .....</b>	<b>16</b>
<b>8 MINIMIZACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES DURANTE EL ENERGIZADO .....</b>	<b>20</b>
8.1 RESITENCIAS DE PRE-INSERCIÓN.....	20
8.2 CIERRE SINCRONIZADO.....	22
<b>9 CONCLUSIÓN .....</b>	<b>24</b>

# 1. Introducción

---

La energía generada en parques eólicos, centrales térmicas, etc. es transportada y distribuida al consumidor usando la red eléctrica, que se diferencia en dos, distribución o transporte atendiendo a los diferentes niveles de tensión. El sistema de transmisión está principalmente formado por líneas aéreas mientras que el sistema de distribución suele estarlo por líneas subterráneas. En Dinamarca el operador de la red de transmisión es la empresa Energinet.dk a 400 kV, 220 kV, 150 kV y 132 kV. El operador de la red de distribución es la empresa ENV y comprende los niveles de tensión de 60 kV, 10 kV y 0,4 kV.

La tendencia en transmisión y distribución de energía eléctrica ha quedado marcada en Dinamarca mediante una ley aprobada en 2008. Dicha ley estipula que todas las líneas de 400 kV o más tensión pasarán a ser subterráneas en los siguientes 20 años posteriores a su aprobación. La principal razón de cambiar las líneas aéreas por cables enterrados en Dinamarca ha sido la presión popular por el impacto medioambiental y visual que estas suponen. Todavía no existe una sólida experiencia en cables subterráneos de gran longitud y alta tensión. El más largo se encuentra en Tokio y mide 40 km.

A la hora de comparar las líneas subterráneas con líneas aéreas existe una serie de ventajas y desventajas que se exponen a continuación:

Ventajas:

- Los cables enterrados ocupan menos espacio ya que están situados bajo tierra
- El riesgo de shock eléctrico es menor
- Los cables enterrados están menos expuestos a sufrir daños en tormentas, rayos, etc.
- La corrosión es menor

Desventajas:

- Los costes de inversión para cables enterrados son mayores que para líneas aéreas
- Las reparaciones son más costosas
- No existe una larga experiencia en cables subterráneos de alta tensión
- La localización de una falta es más difícil de detectar
- La capacitancia es mucho mayor y suele ser necesario compensarla con reactores en paralelo
- Mediante el uso de reactores en paralelo, las frecuencias de resonancia son aproximadamente 45-47 Hz, muy próximas a la frecuencia de operación de la red

- Ya que las pérdidas son pequeñas las oscilaciones transitorias causadas por las conexiones y desconexiones son amortiguadas. Durante este tiempo de oscilación aparecen sobretensiones peligrosas para el sistema
- Misma vida útil que las líneas aéreas (40 años) pero mucho más costoso de sustituir

### **1.1 Energizado de una red de alta o media tensión compuesta por cables subterráneos**

Uno de los problemas asociados al uso de cables subterráneos de alta tensión y también a niveles de tensión de distribución es el energizado. El objetivo principal de este proyecto es el estudio del comportamiento transitorio de un cable subterráneo cuando es energizado y también durante la desconexión del mismo de la red. Los principales fenómenos transitorios que ocurren durante dichas operaciones se describen a continuación:

- Circuitos resonantes: los cables subterráneos pueden asemejarse con grandes capacitancias en paralelo separadas por pequeñas impedancias en serie de manera que forman circuitos resonantes. De esta manera existirá en el cable oscilación de energía entre campo eléctrico y magnético a ciertas frecuencias de resonancia durante el energizado que causarán sobretensiones
- Una tensión mayor en el extremo final del cable que en el extremo inicial del mismo debido al fenómeno de reflexión de onda
- Desconexión del cable: cuando el cable es desconectado de la red la energía que este contiene en forma de campo eléctrico puede causar altos niveles de tensión entre bornes del seccionador
- Altas corrientes de irrupción procedentes de otros cables subterráneos conectados al mismo embarrado: cuando se energiza un cable subterráneo localizado en una red compuesta por cables subterráneos se produce una transferencia de energía desde los cables ya conectados al cable que se está conectando

Una descripción detallada de cada uno de estos fenómenos se encuentra en el Capítulo 1 del texto original adjunto a esta memoria.

## 2.- Análisis del problema

---

Tradicionalmente la red eléctrica ha consistido en líneas aéreas. Los cables enterrados han sido utilizados para cruzar grandes zonas de agua, áreas con gran densidad de población o áreas de interés natural. Debido a la investigación y desarrollo de cables XLPE, la disminución de costes de los mismos y el interés político y popular se decidió en Dinamarca en 2008 que las líneas aéreas de alta tensión serían sustituidas por cables subterráneos.

Las propiedades de las líneas subterráneas son muy diferentes de las de las líneas aéreas para una misma capacidad de transporte de energía. Esto requiere un análisis detallado del comportamiento en régimen estacionario y régimen transitorio para diseñar y operar una red eléctrica consistente en líneas subterráneas.

El distribuidor de energía eléctrica danés ENV A/S (Elforsyningen Nordvendsyssel) ha trabajado en los últimos años en el cambio de líneas aéreas de 60 kV por líneas subterráneas, un proceso que esperan completar en 2014. Durante este tiempo se ha hecho evidente la necesidad de investigar profundamente las propiedades de los cables adquiridos para asegurar el buen funcionamiento de los elementos que componen la red y garantizar el suministro a los clientes.

### 2.1 Presentación del problema

Durante el energizado de una línea subterránea las tensiones y corrientes transitorias pueden alcanzar valores elevados y por lo tanto los elementos de la red pueden resultar dañados. Las sobretensiones pueden propagarse a niveles inferiores de tensión pudiendo causar la destrucción de equipos electrónicos. Otro problema es el llamado “back to back” que consiste en la aparición de elevadas corrientes de irrupción procedentes de otros cables subterráneos conectados al mismo embarrado.

Con el fin de proteger los componentes es necesario alcanzar un buen nivel de conocimiento sobre fenómenos transitorios en sistemas de líneas enterradas.

En este proyecto se investigan y analizan las sobretensiones en una línea enterrada durante el energizado y también durante la desconexión de la red. Además se presentan diferentes alternativas para minimizar los efectos transitorios.

### 2.2 Objetivo del proyecto

El proyecto está basado en el estudio de un caso concreto de una línea subterránea de 60 kV localizada en la red subterránea en Nord Jutland, Dinamarca. El análisis ha sido llevado a cabo en el modelo de la red implementado en el software PSCAD y también mediante las medidas realizadas en la línea.

Los objetivos del proyecto se resumen a continuación:

- Desarrollo de un modelo de la red en PSCAD
- Análisis de las sobretensiones causadas por resonancia durante el energizado del cable localizado en la red de ENV. Las frecuencias de resonancia han sido calculadas mediante tres métodos diferentes: manualmente basándose en la teoría de onda estacionaria, mediante Matlab usando el modelo  $\pi$  equivalente y usando PSCAD
- Medida de las diferentes tensiones y corrientes durante la conexión y desconexión de la línea
- Comparación entre las medidas obtenidas y los resultados de las simulaciones en PSCAD
- Análisis de las corrientes de irrupción a través del interruptor y análisis de la seguridad de operación del mismo
- Investigación de métodos de minimización de las sobretensiones y corrientes de irrupción durante las operaciones de conexión y desconexión

### **2.3 Método de solución**

Con el objetivo de investigar los fenómenos transitorios durante el energizado de un cable subterráneo se ha implementado un modelo en PSCAD. La validación de dicho modelo se ha llevado a cabo mediante la comparación de los resultados arrojados por este y las medidas obtenidas en el la línea. El modelo PSCAD será usado para probar la eficacia de los distintos métodos propuestos para minimizar los transitorios.

### **2.4 Limitaciones**

El objetivo del proyecto es investigar los fenómenos transitorios que ocurren durante las conexiones y desconexiones y no incluye otros tales como faltas o rayos.

Las medidas realizadas en la línea también incluyen la desconexión. Para poder comparar estas medidas con las obtenidas en el modelo PSCAD se necesita implementar los transformadores de tensión ya que se produce saturación de los mismos. Los datos de dichos transformadores tales como la curva de saturación no están disponibles por lo que no han sido implementados.

En los trabajos realizados en las subestaciones se han tenido las siguientes limitaciones:

- No se ha medido el tiempo de propagación de la onda: el equipo de medida utilizado, OMICRON 256, puede ser equipado con equipo transmisor GPS de manera que el tiempo de propagación puede ser medido con exactitud. En este proyecto el tiempo de propagación ha sido calculado en PSCAD
- No se ha medido las frecuencias de resonancia: una de las principales partes del proyecto es el cálculo de las frecuencias de resonancia que causan transitorios. La medida de las frecuencias de resonancia podría llevarse a cabo usando un generador AC de frecuencia variable. Las frecuencias medidas podrían utilizarse para validar el modelo PSCAD

# 3.- Descripción del sistema

La línea subterránea bajo estudio se encuentra situada en la red subterránea de 60 kV de Starbakke, en Nord Jutland, Dinamarca.

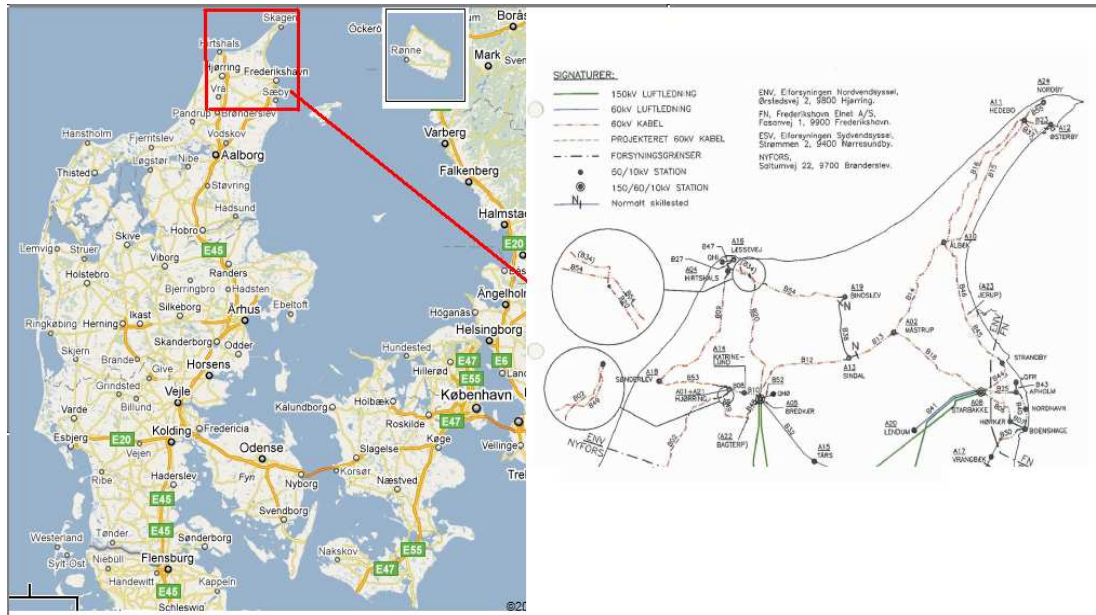
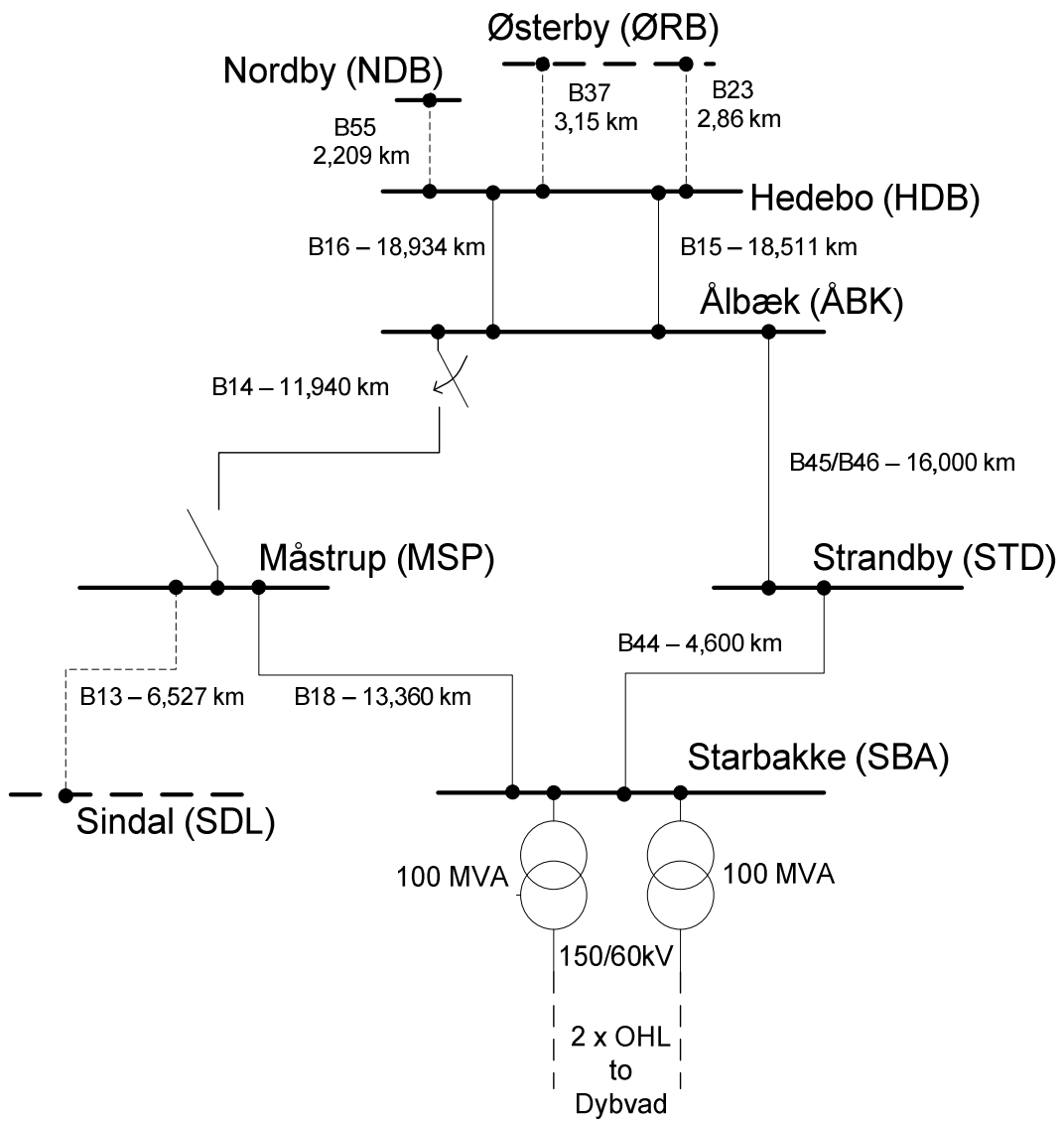


figura 3-1 Mapa de Dinamarca (google maps) y de la red de 60 kV ENV A/S

El cable investigado es el que conecta las subestaciones de Ålbæk (ÅBK) y Måstrup (MSP), en el anillo que va desde Starbakke a Hedebo. La conexión del cable a la red se realiza en el extremo de Ålbæk mientras que el extremo de Måstrup permanece abierto durante todo el proceso.

A continuación se muestra el esquema de una parte de la red de Starbakke. Las líneas sólidas son líneas que han sido implementadas en el modelo PSCAD:



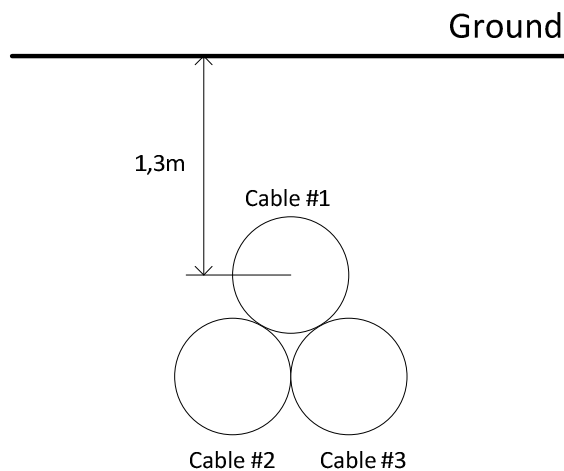
*figura 3-2 Parte de la red de Starbakke*

La red de Starbakke es alimentada a través de dos transformadores de 100 MVA. La descripción de los cables subterráneos que componen la red es facilitada por la compañía distribuidora ENV y se muestra a continuación:

No.	Sección	Tipo	Longitud [km]	Lecho
B13	MSP – SDL	400mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV 150mm <sup>2</sup> PEX-CU	2,727 3,800	Arcilla / tierra Arcilla / tierra
B14	MSP – ÅBK	400mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	11,940	Arcilla / tierra / Arena
B15	ÅBK – HDB	400mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	18,511	Arena
B16	ÅBK – HDB	400mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	18,934	Arena
B18	SBA – MSP	400mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	13,360	Arcilla / tierra
B23	HDB – ØRB	50mm <sup>2</sup>	2,680	Arena
B37	HDB – ØRB	150mm <sup>2</sup> PEX-CU	3,150	Arena
B44	SBA – STD	240mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	4,600	Arcilla / tierra / Arena
B45/ B46	STD – ÅBK	240mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	16,000	Arcilla / tierra / Arena
B55	HDB – NDB	400mm <sup>2</sup> PEX-M-AL-LT 72kV	2,209	Arcilla / tierra / Arena

*tabla 3-3 Cables en la red Starbakke*

La línea estudiada es la B14 y consiste en tres cables PEX-M-AL-LT 72 kV de la casa NKT. La sección es de 400 mm<sup>2</sup>. La longitud es 11,940 km. El cable está enterrado a una profundidad de 1,3 m en lecho de arcilla, arena y tierra. La resistividad de la tierra depende de varios factores como la humedad o la compactación del terreno y se estima en 100 Ωm que es el valor por defecto en PSCAD. A continuación se muestra la sección de la línea:



*figura 3-4 Disposición de la línea*



Los datos de los cables relevantes para el desarrollo del modelo en PSCAD se dan en el punto siguiente. La pantalla conductora de cada uno de los cables está conectada a tierra en ambos extremos. En el Capítulo 3 del texto original puede encontrarse una descripción más detallada de los cables utilizados en líneas subterráneas.

## 4.- Descripción del modelo PSCAD

El modelo de cada una de las líneas de la red en PSCAD se lleva a cabo usando los parámetros proporcionados por el fabricante de cables NKT. A continuación se muestra la configuración del modelo PSCAD de la línea bajo estudio. El resto de líneas de la red así como una descripción más detallada se encuentra en Capítulo 5 del texto original.

### Cable PEX-M-AL-LT 72 kV – 400 mm<sup>2</sup>

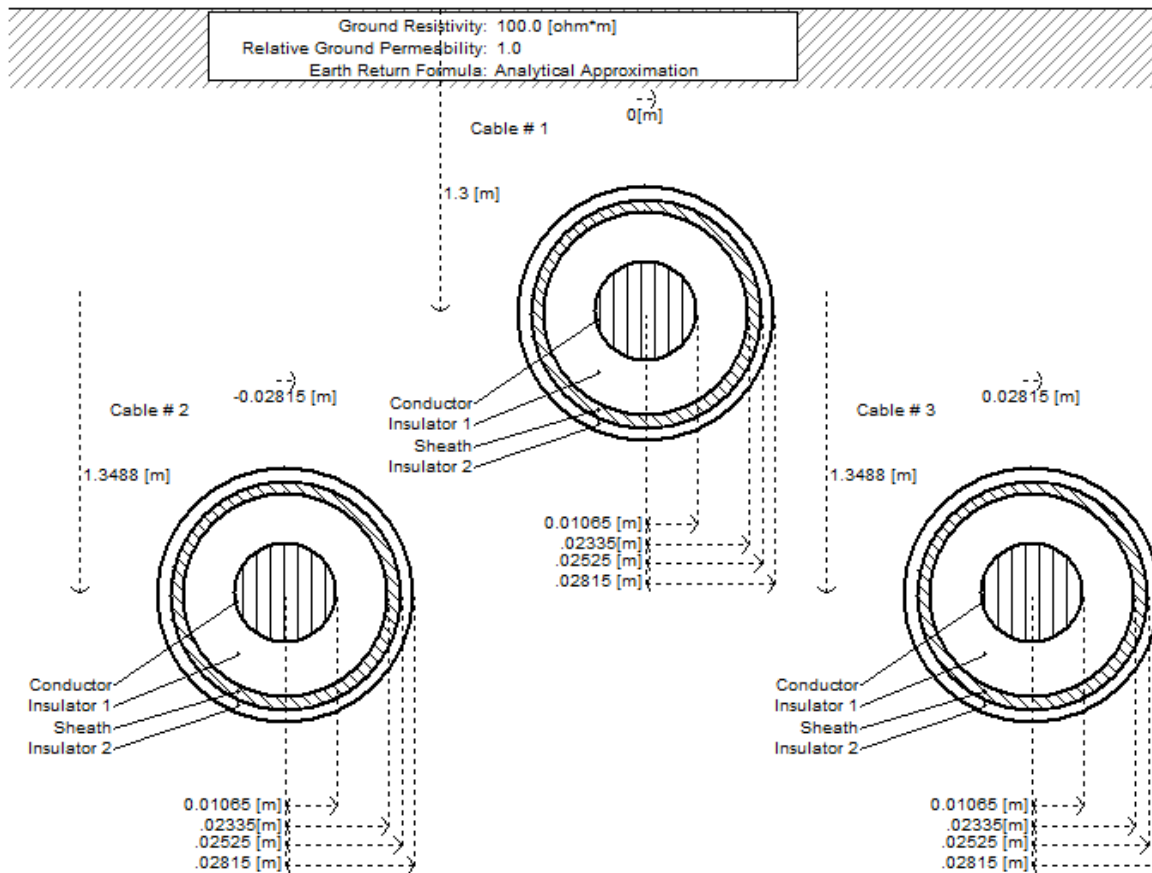


figura 4-2 Disposición del cable de 400 mm<sup>2</sup> en PSCAD

El aislamiento principal se encuentra entre dos capas semiconductoras de 0,7 mm de grosor que no son posibles de modelar por separado en PSCAD. Estas dos capas han sido modeladas como una sola y su permitividad ( $\epsilon'_i = 2,613$ ) se ha calculado en el Apéndice A del texto original.

La pantalla conductora consiste en un mallado compuesto por cables de cobre. Esta configuración no está disponible en PSCAD así que ha sido implementado un cilindro sólido y se ha corregido la resistividad como se describe en el Capítulo 5 del texto original.

## 4.1 Modelo equivalente de la red

Para incluir el resto de la red en el modelo de PSCAD esta es modelada como su impedancia equivalente tal y como muestra la figura 4-2:

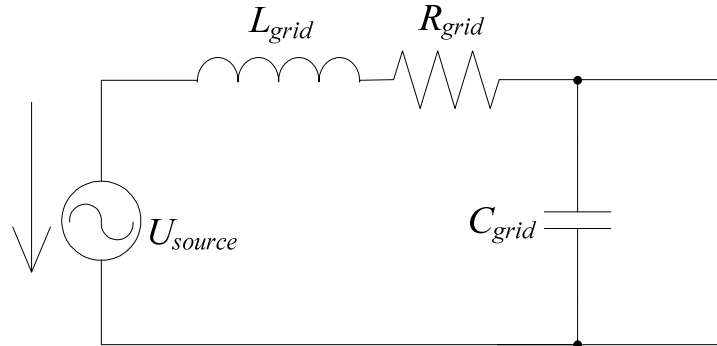


figura 4-2 Modelo equivalente de la red

La información referente a la potencia de cortocircuito en el punto de alimentación en Starbakke es proporcionada por la compañía suministradora ENV. A partir de este dato es posible calcular la impedancia equivalente. Este cálculo se encuentra en el Capítulo 5 del texto original.

El modelo PSCAD del anillo de Starbakke queda como se muestra en la figura siguiente:

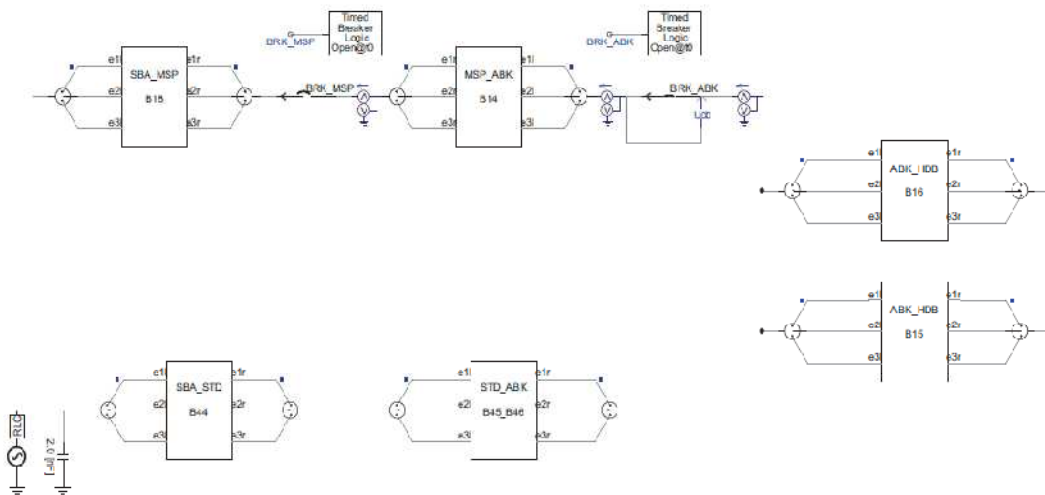


figura 4-3 Modelo PSCAD del anillo de Starbakke

Todos los archivos de programa se encuentran en el CD adjunto al proyecto.

## 5.- Cálculo de las frecuencias de resonancia

---

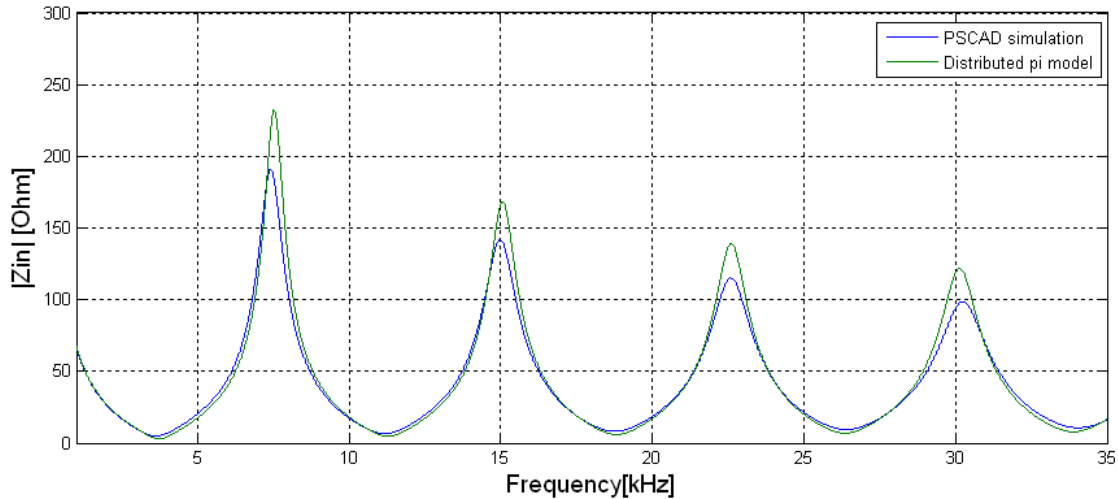
Las frecuencias de resonancia son las causantes de las sobretensiones que aparecen en la línea durante su energizado. Para calcular estas frecuencias de resonancia se utilizan tres métodos diferentes: a mano usando la teoría de onda estacionaria, mediante el uso del circuito equivalente en  $\pi$  implementado en Matlab y por último con un escáner de frecuencias proporcionado por PSCAD. Todos los cálculos pueden ser consultados en el Capítulo 6 del texto original.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos para cada una de los métodos mencionados:

Método	Inductancia usada [ $\mu\text{H}/\text{km}$ ]	1 <sup>er</sup> punto de resonancia [kHz]	2 <sup>o</sup> punto de resonancia [kHz]	3 <sup>er</sup> punto de resonancia [kHz]	4 <sup>o</sup> punto de resonancia [kHz]
Cálculo a mano	188,58	7,1	14,2	21,3	28,4
Cálculo a mano	166,83	7,5	15,0	22,5	30,0
Modelo $\pi$	188,58	7,1	14,0	21,1	28,3
Modelo $\pi$	166,83	7,5	15,0	22,6	30,0
Simulación PSCAD	-	7,5	15,0	22,6	30,0

*tabla 5-1 Comparación de las frecuencias de resonancia calculadas por los distintos métodos*

En la figura siguiente se muestra la comparativa del espectro de frecuencias obtenido en Matlab y PSCAD:



*figura 5-2 Frecuencias de resonancia usando el modelo PSCAD y el modelo  $\pi$  equivalente*

Los cálculos se han realizado con dos valores de inductancia: el valor de la inductancia 188,58  $\mu\text{H}/\text{km}$  se obtiene de los cálculos que pueden ser consultados en el Apéndice A del texto original. El valor 166,83  $\mu\text{H}/\text{km}$  ha sido obtenido de la simulación en PSCAD. Esta última inductancia ha sido obtenida usando el tiempo de propagación de la onda obtenido en PSCAD. Usando este valor existe una dependencia entre las frecuencias obtenidas en PSCAD y el resto ya que la inductancia procede en todo caso de PSCAD. Por conveniencia se considera que este último valor es el más preciso.

En los cálculos a mano se observa una ligera desviación respecto a los otros dos métodos. Esta desviación se debe a la no dependencia de la frecuencia de los parámetros en este método. También a que el cable es considerado sin distorsión, es decir que el ratio  $R_{\text{km}}/L_{\text{km}} = G_{\text{km}}/C_{\text{km}}$  ( $0/L_{\text{km}} = 0/C_{\text{km}}$ ) donde  $G_{\text{km}}$  es la conductancia por km. Para PSCAD y modelo equivalente  $\pi$  el cable no es sin distorsión ya que  $R_{\text{km}}$  es distinto de cero.

Sin embargo los resultados obtenidos por los diferentes métodos muestran unos valores aproximados por lo que el cálculo a mano puede ser un buen método para un primer cálculo rápido de las frecuencias de resonancia si no se tiene el modelo del cable.

La descripción de todos los cálculos realizados y una explicación del significado físico de las frecuencias de resonancia se encuentran en el Capítulo 6 del texto original.

## 6.- Descripción de las medidas realizadas

---

Las medidas se han llevado a cabo en la red de 60 kV de Starbakke en Nord Jutland, Dinamarca, el 28 de mayo de 2010.

El cable subterráneo investigado es el que conecta las subestaciones de Ålbæk (ÅBK) y Måstrup (MSP). El representación del sistema se muestra en la figura 3-2. El cable tiene una longitud de 11,94 km. En ambas subestaciones hay instalados interruptores y transformadores de medida, tanto de tensión como de corriente. El interruptor en Ålbæk es utilizado para energizar el cable mientras que el de Måstrup permanece abierto durante todo el proceso.

Siempre que el cable es desconectado de la red se procede a continuación a la descarga de la capacitancia conectándolo a tierra en ambos extremos. De esta manera el cable está descargado cuando se procede a una nueva conexión.

### 6.1 Trabajo realizado

En Ålbæk se miden tensión y corriente durante la conexión y desconexión mientras que en Måstrup solamente tensión. Las medidas realizadas se obtienen del circuito de protección en las celdas correspondientes en cada subestación. En la subestación de Ålbæk se toma medida de la tensión a ambos lados del interruptor, es decir, el lado de la red y el lado del cable y también la medida de corriente en el lado del cable. A continuación se muestra la configuración de los equipos de medida en cada una de las subestaciones:

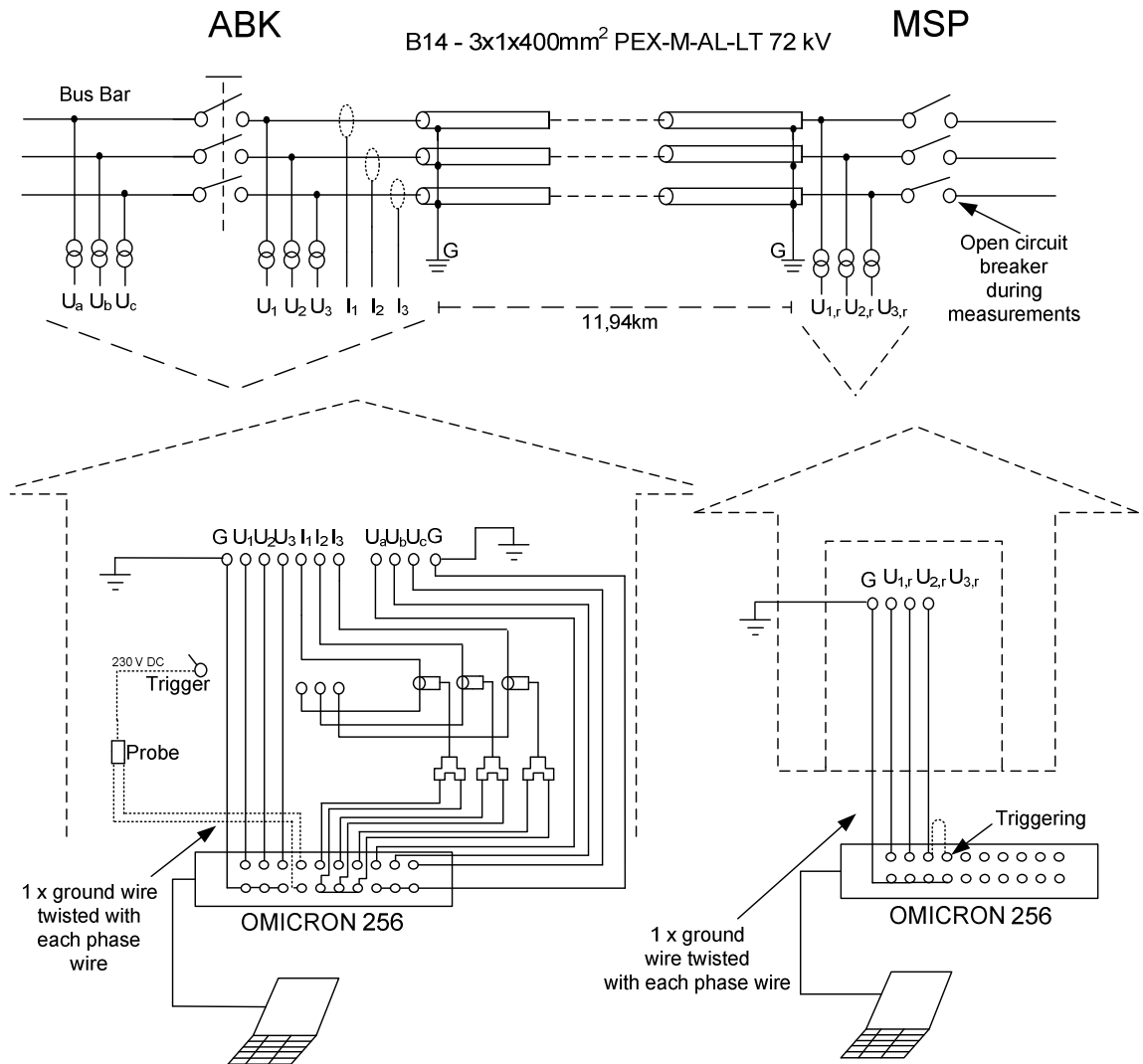


figura 6-1 Disposición de los equipos de medida

El dispositivo utilizado para la adquisición de datos es el OMICRON 256.

Un dato a tener en cuenta es que el transformador de corriente está midiendo la suma de dos corrientes: la corriente por el conductor y la corriente por la pantalla exterior. Para obtener la medida del conductor únicamente, se retorna por el interior del transformador el cable que conecta la pantalla con tierra. De esta manera la medida de la corriente por la pantalla queda anulada.

En el Capítulo 7 del texto original aparece una descripción más detallada de las conexiones de cada dispositivo y un estudio de las limitaciones de cada uno de ellos.

El test realizado consiste en seis operaciones, tres de conexión con la red y tres de desconexión. El análisis de los resultados obtenidos se presenta en el capítulo siguiente.

# 7.- Análisis y validación del modelo PSCAD

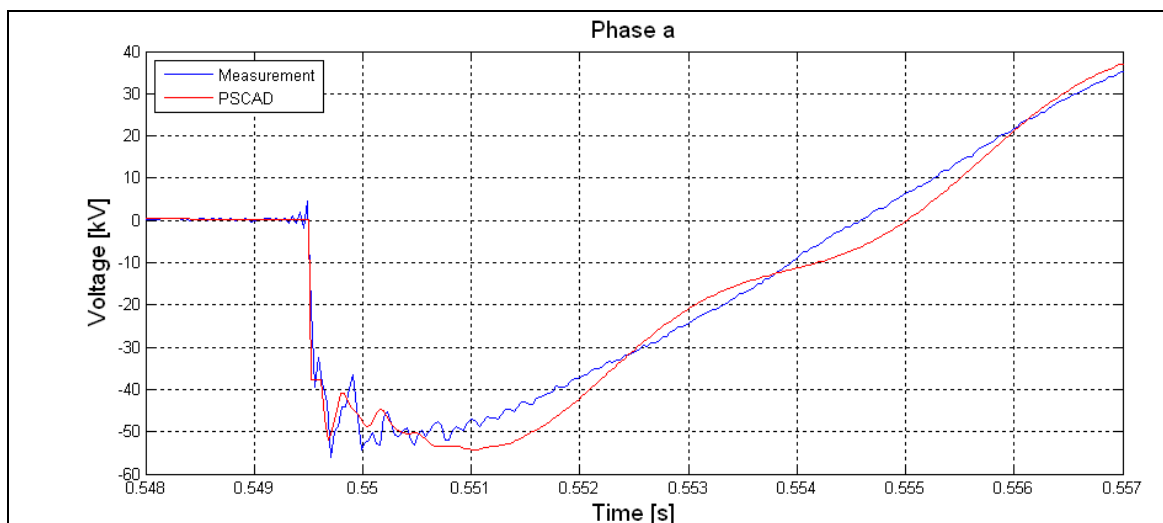
---

Con el objetivo de validar el modelo de la red implementado en PSCAD se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos en el software con las medidas realizadas. Al comprobar que los resultados obtenidos son similares para PSCAD y medidas podremos asegurar que el modelo tiene un comportamiento igual al sistema real.

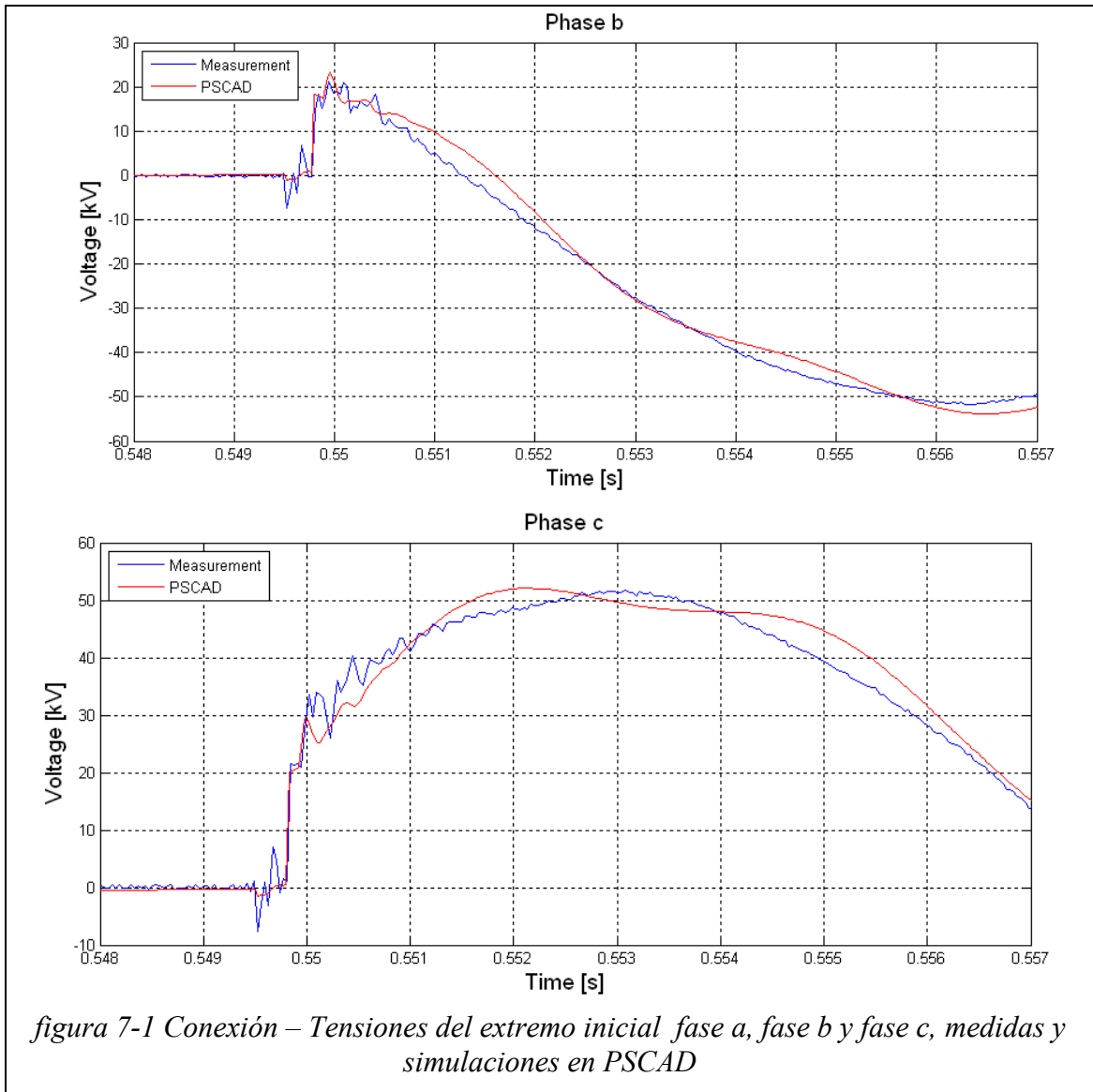
Las tensiones y corrientes medidas son las siguientes:

- Tensión en el extremo inicial de los cables
- Tensión en el extremo final de los cables
- Tensión en el embarrado general donde se conectan los cables
- Corrientes de irrupción en el extremo inicial de los cables

Cada una de estas lecturas es tomada cuando se conecta el cable y cuando se desconecta. A continuación se muestra la comparación entre tensiones del extremo inicial cuando la línea subterránea es conectada a la red:

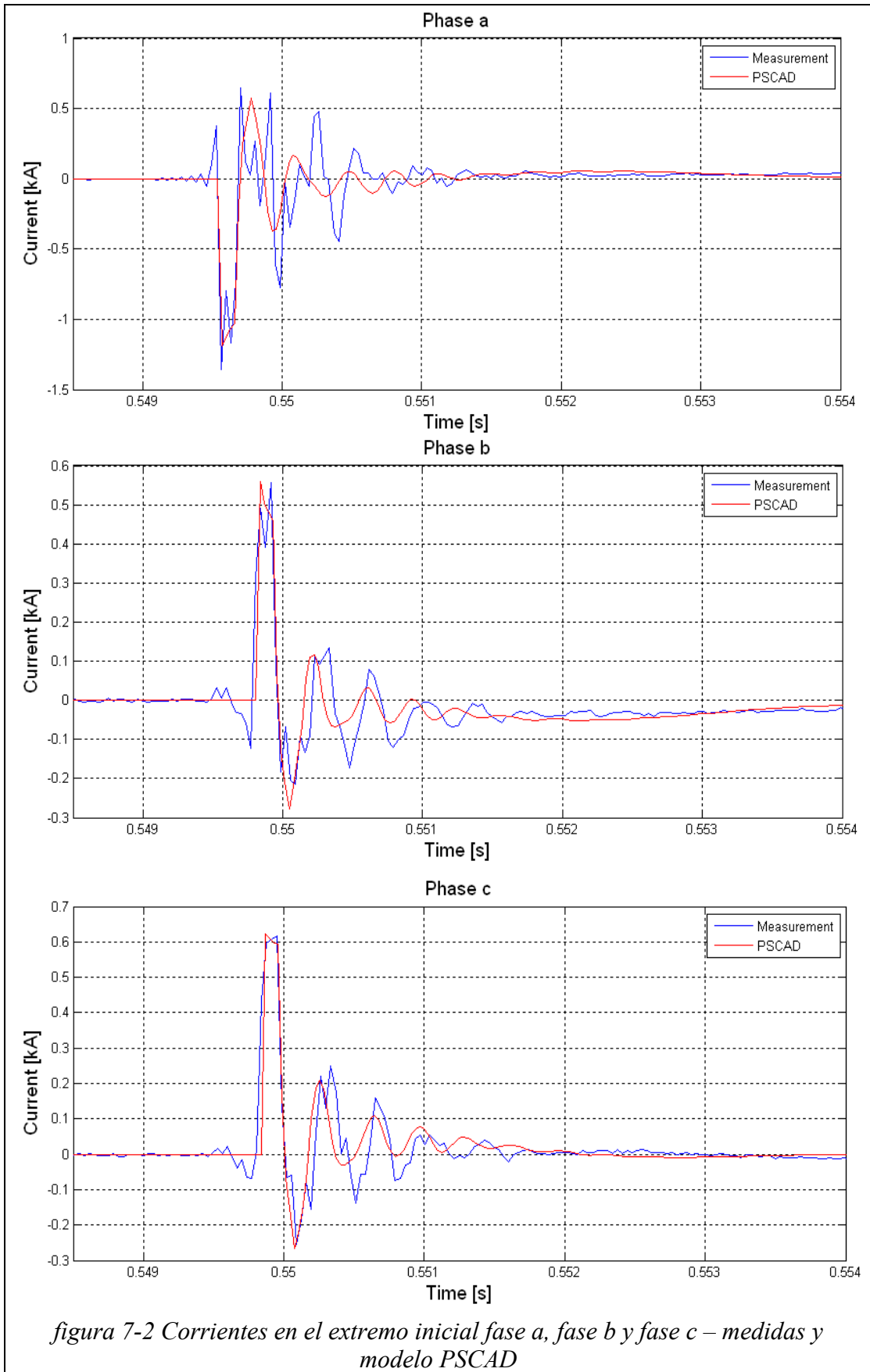






*figura 7-1 Conexión – Tensiones del extremo inicial fase a, fase b y fase c, medidas y simulaciones en PSCAD*

A continuación se muestran las corrientes medidas en comparación con las simuladas durante la conexión de la línea:



*figura 7-2 Corrientes en el extremo inicial fase a, fase b y fase c – medidas y modelo PSCAD*

En el Capítulo 8 del texto original se encuentra una descripción detallada de la comparativa para las gráficas anteriores y el resto de graficas para el resto de casos expuestos anteriormente. También las simulaciones de los casos más desfavorables que pueden darse. Además se presenta una breve explicación de cómo afecta la saturación de los transformadores de tensión durante la desconexión de la línea y el peligro que supone.

En las gráficas de tensiones se observa que la simulación es más amortiguada que las medidas. Los mayores picos de tensión medidos son -53,03 kV y -69,5 kV para extremo inicial y final respectivamente. La tensión en el extremo final es mayor debido a que la energía de la onda viajera se almacena en forma de campo eléctrico cuando está encuentra el extremo final en circuito abierto.

En las gráficas de corrientes se observa que la simulación arroja un resultado muy aproximado a las medidas hasta que la onda reflejada alcanza el extremo inicial. Cuando la onda reflejada alcanza el extremo inicial comienzan las diferencias entre simulación y medidas. Se asume que la causa de estas diferencias es que la onda reflejada se propaga en diferentes modos (tierra, pantalla-pantalla, etc.). El modo pantalla-pantalla depende de la distribución de la corriente en el conductor que a su vez depende de efecto proximidad para altas frecuencias. La simulación del efecto proximidad no está disponible en PSCAD.

Un análisis de los errores en las medidas debido a las tolerancias de los diferentes equipos de medida utilizados ha sido realizado y puede ser consultado en detalle en el Capítulo 8 del texto original. Como conclusión se aprecia que las tolerancias no son una de las razones de la discordancia entre simulación y medida debido a la escasa influencia que tienen sobre las medidas.

# 8.- Minimización de las sobretensiones durante el energizado

---

Como se explicó anteriormente la conexión de una línea subterránea a la red es comparable a la conexión de una batería de condensadores. Por lo tanto algunos de los métodos utilizados para minimizar las sobretensiones en la conexión de las baterías de condensadores son también utilizados para este fin.

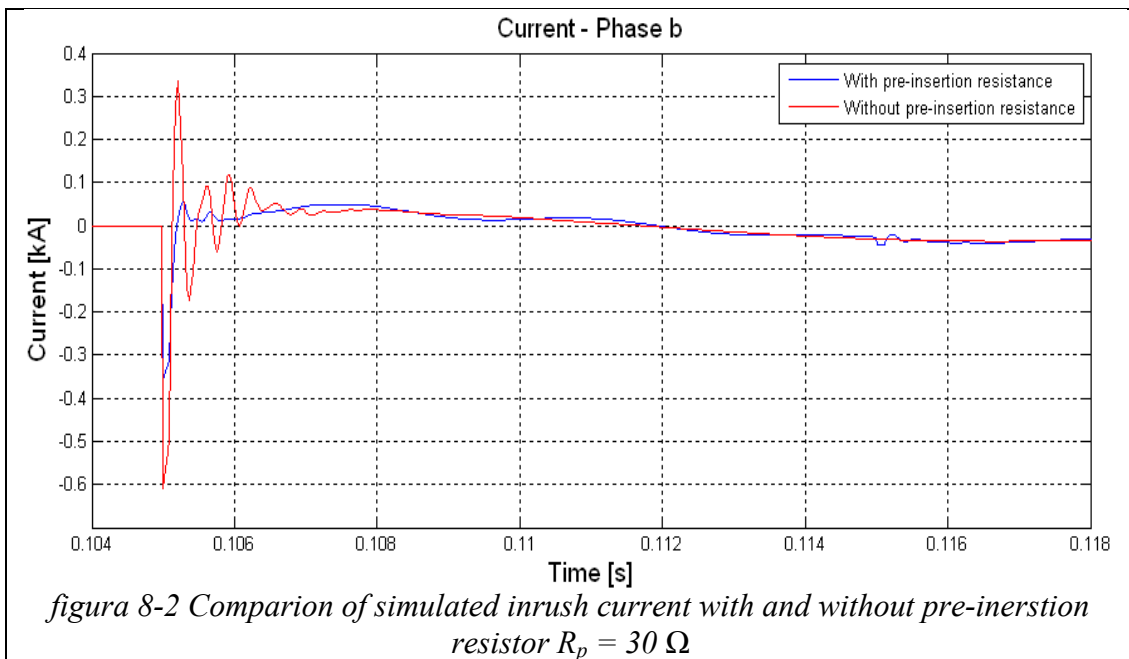
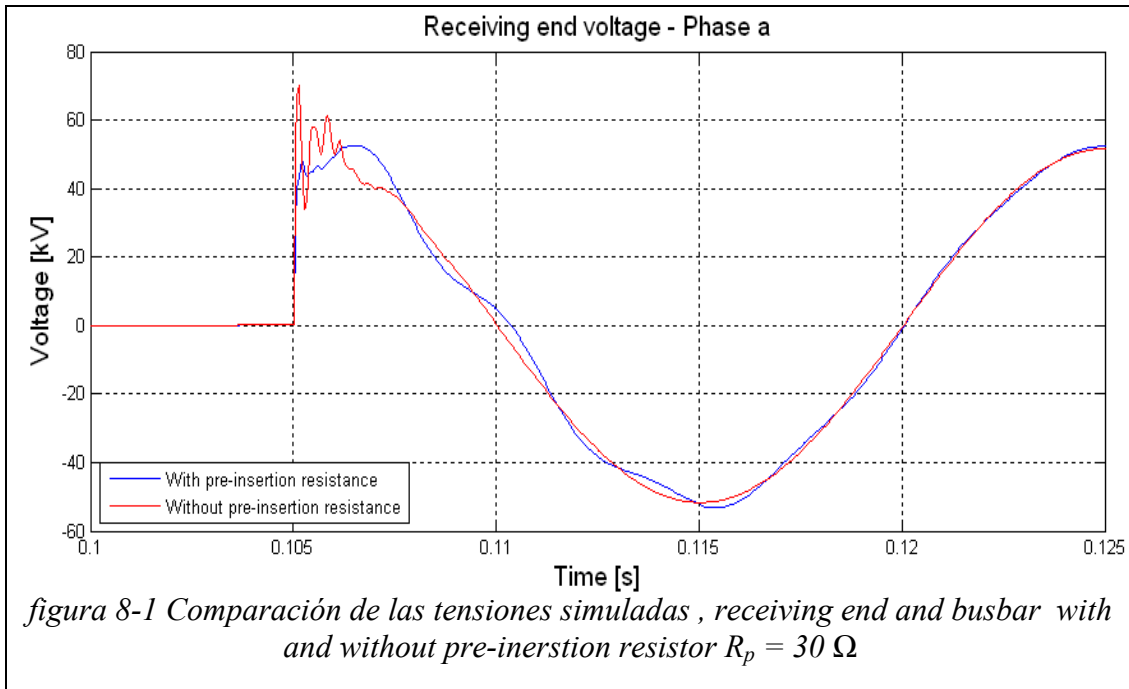
Dos métodos han sido implementados en PSCAD para minimizar las sobretensiones y corrientes de irrupción:

- Inserción de resistencias durante el energizado
- Conexión sincronizada de las fases en el interruptor

## 8.1 Resistencias de pre-inserción

Al conectar una resistencia en serie con el cable la onda que se propaga a través de él se ve reducida. Esto se realiza mediante la conexión a la red en dos pasos: primero se conecta el cable a través de la resistencia y a continuación se cortocircuita la resistencia de manera que el cable queda directamente conectado a la red. De esta manera las sobretensiones quedan reducidas tanto en el extremo de conexión como en el extremo final y la perturbación en la red también es menor.

En las figuras siguientes puede observarse el efecto de la pre inserción de resistencias para la tensión y corriente de una de las fases:



Puede observarse que las sobretensiones y las corrientes de irrupción han sido reducidas considerablemente.

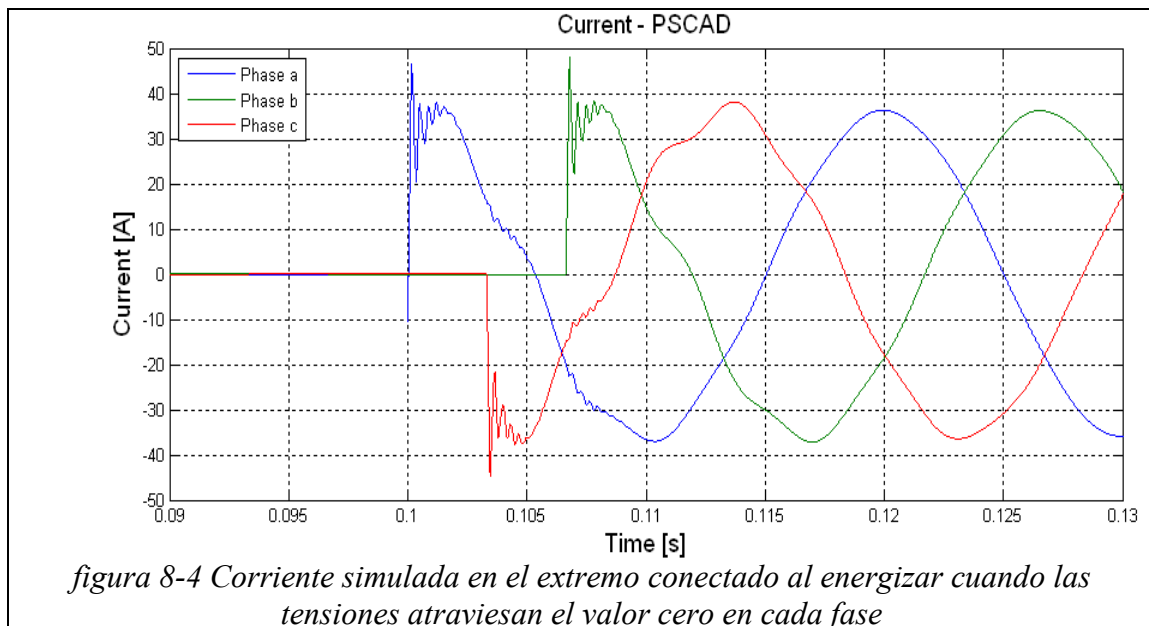
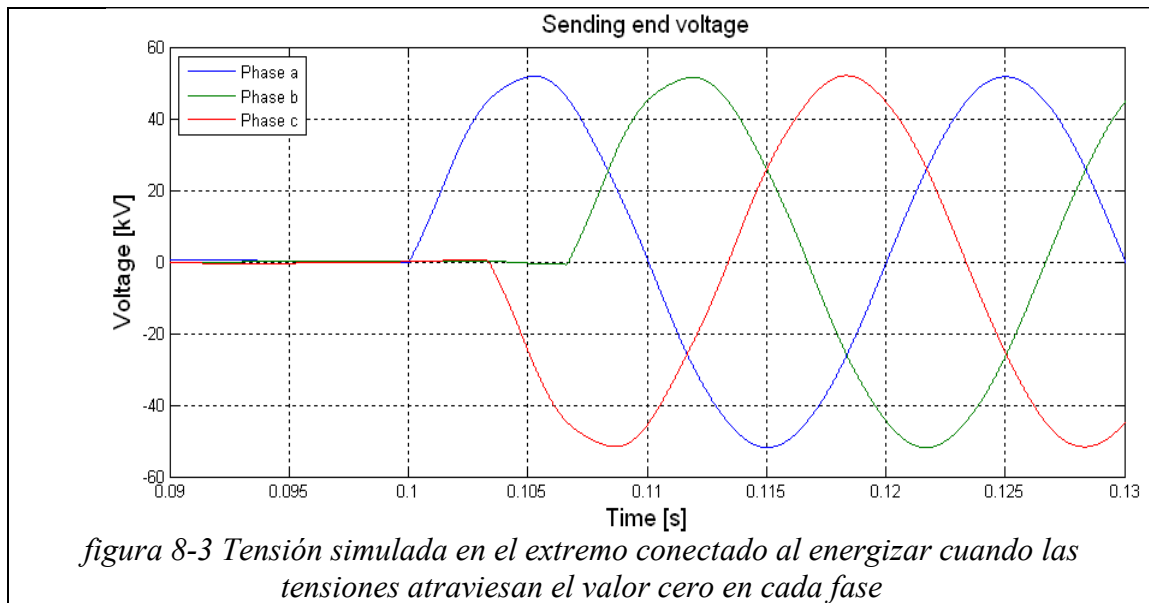
A la hora de decidir la posible instalación de este sistema se debe tener en cuenta el incremento del coste que supone un interruptor de estas características debido a la complejidad que supone realizar la conexión en dos pasos y también la mayor manutención que requiere.

Los criterios de selección del valor de la resistencia, el resto de gráficas y una explicación más detallada pueden ser consultados en el Capítulo 9 del texto original.

## 8.2 Cierre sincronizado

La mayor sobretensión durante el conexionado de un cable enterrado a la red se produce cuando la tensión de una de las fases se encuentra en su máximo valor en el momento de la conexión. La menor sobretensión se da cuando la tensión en la fase alcanza el valor cero en el momento de la conexión. En este método lo que se pretende es conectar de manera independiente las tres fases cuando en cada una de ellas se alcanza el valor cero de tensión.

A continuación se muestran la comparación de los resultados obtenidos en la simulación de tensión y corriente:



Puede observarse en las gráficas que las sobretensiones han sido totalmente neutralizadas y también las corrientes de irrupción en cada una de las fases.

El coste de este tipo de interruptores es mayor que el de uno no sincronizado debido a la precisión que requiere en la operación de conxionado. En las medidas realizadas se observa un ligero desfase entre el cierre de cada una de las tres fases debido a la tolerancia del mecanismo.

El resto de gráficas así como una explicación más detallada del método pueden ser consultadas en el Capítulo 9 del texto original

## 9.- Conclusión

---

Este proyecto trata con las sobretensiones que se producen durante el energizado de una línea situada en una red de 60 kV. Un análisis de las frecuencias de resonancia que causan las sobretensiones ha sido llevado a cabo y las frecuencias han sido calculadas para una línea específica situada en una red de distribución de 60 kV.

Una investigación de las corrientes de irrupción procedentes de cables ya energizados conectados a la misma red ha sido llevada a cabo. Este fenómeno es conocido como *back to back switching*.

Para poder analizar con más profundidad las sobretensiones y corrientes de irrupción una parte de la red ha sido implementada en el software PSCAD. Para verificar el modelo se han realizado medidas en un cable específico para poder así comparar los resultados obtenidos con los del software.

Las frecuencias de resonancia que causan las sobretensiones han sido analizadas y calculadas usando tres métodos: aproximación analítica usando la teoría de onda estacionaria, usando el modelo  $\pi$  equivalente donde el efecto pelicular ha sido incluido y finalmente mediante un espectro de frecuencias proporcionado por PSCAD. A la vista de los resultados se observa la concordancia entre los tres métodos. Sin embargo la inductancia usada en la aproximación analítica y también en modelo  $\pi$  equivalente ha sido obtenida usando el tiempo de propagación de la onda obtenido en PSCAD. Esto indica dependencia entre métodos. Para eliminar esta dependencia el tiempo de propagación de la onda debe ser medido. Sin embargo debido a la larga preparación que requiere y dado que el tiempo para realizar las medidas era limitado no se ha realizado dicha medida.

La comparación entre medidas y simulación muestra una buena concordancia antes de que la onda reflejada en el extremo final del cable alcance el extremo inicial. Se asume que la desviación es causada por el hecho de que la onda reflejada se propaga en diferentes modos (tierra, pantalla-pantalla, etc.). El modo pantalla-pantalla es dependiente de la distribución de la corriente que depende a su vez del efecto proximidad. El efecto proximidad no está disponible en el software PSCAD.

El análisis de la diferencia entre medidas y simulación ha sido llevado a cabo teniendo en cuenta la repercusión de la tolerancia de los instrumentos de medida. A la vista de los resultados se observa que dicha tolerancia no afectan de manera significativa a las medidas.

Se puede concluir con que el modelo PSCAD proporciona una buena predicción de las sobretensiones y también de las corrientes de irrupción.

Se ha realizado el análisis de capacidad del seccionador y se ha comparado con los límites de la norma IEC 62271-100 primera edición. Se ha demostrado que la frecuencia



de la tensión y corriente y sus valores de pico durante el energizado se encuentra dentro de los límites, sin embargo estas son elevadas y pueden causar estrés en el seccionador.

Las medidas de las tensiones durante la desconexión del cable muestran que los transformadores de tensión saturan y que los cables se descargan a través del devanado primario del transformador. El transformador de tensión no ha sido implementado en PSCAD ya que datos necesarios para ello no están disponibles, tal como la curva de saturación, etc. No obstante un breve análisis de la saturación del transformador causado por la descarga del cable ha sido realizado.

Finalmente con el objetivo de minimizar las sobretensiones dos métodos han sido investigados e implementados en el modelo PSCAD. Las estrategias son: la conexión sincronizada de cada una de las fases de la línea y la introducción transitoria de resistencias en serie con la línea durante la conexión. Los dos métodos muestran un buen comportamiento y limitan en gran medida las sobretensiones y también las corrientes de irrupción.