



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO DE TRABAJOS CON ATP PARA
PROTECCIONES DE LOS SISTEMAS DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

CARLA ALONSO PINILLA
TUTOR: ANTONIO PASTOR GUTIÉRREZ

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
JULIO 2016

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Introducción al modelo	5
1.2. Modelos de líneas de transporte	7
1.2.1. Modelos de línea para estudios de régimen permanente.....	7
1.2.2. Modelos de línea para estudios de transitorios.....	9
1.3. Generadores	11
1.4. Transformador	12
1.4.1. Modelo de Transformador Ideal.....	13
1.4.2. Modelo de Transformador Saturable.....	13
1.4.3. Modelo matricial	14
1.4.4. Saturación del transformador	16
1.4.5. Corrientes de Foucault	17
1.4.6. Modelos de Transformador de alta frecuencia.....	17
1.4.7. Conclusiones sobre los transformadores	18
1.5. Transformador de intensidad	18
1.5.1. Validación de la curva V-I (tensión-intensidad)	21
1.6. Modelos digitales de transformadores de tensión capacitivo-inductivos	21
1.7. Transformador de Tensión.....	24
1.8. Modelo de interruptor.....	24
1.8.1. Tipos de interruptores:	24
1.8.2. Funcionamiento unipolar o tripolar de interruptores automáticos	26
1.8.3. Resistencias de cierre	27
1.8.4. Datos de parámetros necesarios como entrada para el interruptor.....	27
2. OBJETIVOS	29
3. ENSAYO DE FALTAS DEL SISTEMA IEEE PSRC WG: “Reference Network for Transmission Line Relay Testing”	31
3.1. CASO 1: ESTUDIO DE LA LÍNEA L1 CON L3 DESCONECTADA	32
3.2. CASO 2: ESTUDIO DE LA LÍNEA L1 CON L2 DESCONECTADA	41
3.3. CASO 3: SOLUCIÓN DE ERRORES EN LA SIMULACIÓN	45
3.4. CASO 4: MÓDULO DE FALTAS SITUADO SOBRE LA LÍNEA L2	51
4. RELÉ DE SOBREINTENSIDAD	55

4.1.	MÓDULO NECESARIOS PARA DEFINIR EL CIRCUITO	55
4.2.	EJECUCIÓN DEL CIRCUITO EN ATPDRAW Y COMPROBACIÓN ANALÍTICA DE RESULTADOS	63
5.	MÓDULO DE FASORES	75
5.1.	Método gráfico	75
5.2.	Método analítico: Cálculo directo de fasores	76
5.3.	Representación de los fasores con Matlab.....	78
5.4.	Comprobación de tensiones.....	80
6.	ENSAYO DE OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN ..	83
6.1.	DESARROLLO DE UN MODELO DE TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD 83	
6.1.1	Obtención de la característica de excitación	83
6.1.2	Circuito equivalente del transformador ideal	86
6.2.	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE SATURACIÓN DEL TI89	
6.3.	OBTENCIÓN DE LA CURVA DE LA CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN 91	
6.3.1.	Curvas de saturación para los diferentes valores de tensión	91
6.3.2.	Transformación de las curvas de saturación	94
6.3.3.	MÉTODO ALTERNATIVO PARA EL CÁLCULO DE LOS VALORES EFICACES.....	97
7.	CONCLUSIONES	101
8.	LÍNEAS FUTURAS	103
9.	BIBLIOGRAFÍA	105
10.	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	107
11.	PRESUPUESTO	111
12.	ÍNDICE DE FIGURAS	113
13.	ÍNDICE DE TABLAS	119
14.	APÉNDICE	121

RESUMEN

Se ha trabajado con el sistema eléctrico elaborado por el IEEE PSRC WG (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power System Relaying Committee, Working Group): “Reference Network for Transmission Line Relay Testing”, y utilizando como herramienta de trabajo el programa ATP y sus programas auxiliares. En el presente proyecto se va comenzar identificando todos los elementos que conforman el sistema, así como su funcionamiento, y continuando con el estudio de la configuración del mismo. Las alternativas de configuración van a servir para analizar todas las posibilidades de conexión del sistema eléctrico. Para cada tipo de conexión se va a proceder a simular diferentes tipos de faltas, monofásica, bifásica y bifásica a tierra, variando también la resistencia de falta, así como la posición de la falta a lo largo de la línea. Tras este análisis de operación se obtendrán una serie de ejemplos cuyos ficheros de resultados se pueden aprovechar para estudios posteriores de protecciones.

Los sistemas de protecciones guardan un papel fundamental dentro de cualquier línea de transporte. Por tanto para completar el estudio de la línea de transporte, se aislará parte del anterior sistema y se modelará el relé de sobreintensidad como protección. Dicho relé mide permanentemente la corriente de cada fase con la finalidad de detectar las corrientes que se producen en un cortocircuito. El tiempo de actuación es función de la corriente, se van a emplear dos módulos presentes entre las herramientas de ATPDraw para el cálculo de dicho tiempo. Uno va a ser el módulo de tiempo definido, donde se fija una intensidad umbral y en el momento que la intensidad que recorre la línea sobrepasa dicho valor, la protección actúa instantáneamente o en el tiempo programado t_s , se abre el interruptor de conexión de la línea dejando de circular corriente. El otro módulo empleado es el de tiempo inverso. En este caso el tiempo de operación es tanto menor cuanto mayor es la corriente.

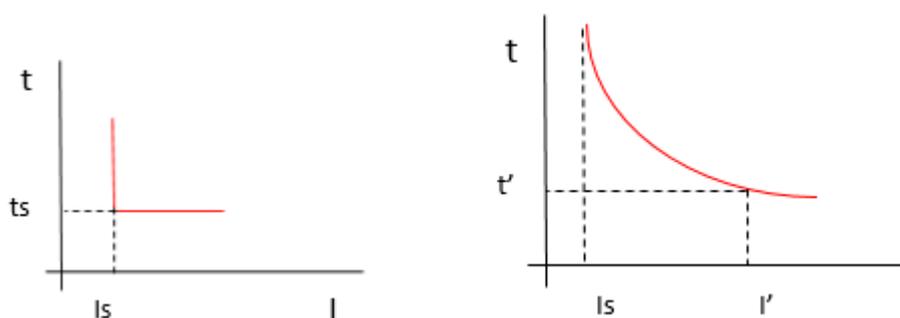


Figura 0.1. Curva I-t de tiempo definido y tiempo inverso

El programa ATP, ofrece gran variedad de módulos y herramientas, para el modelado y estudio de sistemas eléctricos, por lo que uno de los objetivos principales era profundizar en

el manejo de dicho programa. Siguiendo sobre la línea de estudio que se ha ido trabajando desde el inicio, se le añaden módulos de cálculo fasorial, para comprobar que independientemente del tipo de cálculo, ya sea gráfico o analítico el resultado es el mismo.

Como se indica en el inicio del resumen es fundamental conocer el funcionamiento de cada uno de los elementos que conforman el sistema, y es también necesario profundizar en el manejo del programa ATPDraw que tantas posibilidades de trabajo ofrece dentro de los sistemas eléctricos, por lo que por último se va a concluir con el estudio de la característica de excitación de un transformador de intensidad.

A partir de la curva característica de excitación del transformador de intensidad (V-I), se van a sacar los puntos necesarios para definirla. Introduciendo estos valores en el subprograma 'SATURATION' de ATP, y ejecutándolo se procederá a la conversión de los valores tensión-intensidad (V-I) en valores flujo-intensidad (Ψ -I) que son necesarios para definir el transformador. Una vez que se tienen dichos valores, se diseña el circuito en ATPDraw, con la fuente de tensión, los sensores de intensidad (para obtener los resultados gráficamente) y dicho transformador. Se introducen los valores de flujo-intensidad en el transformador y se ejecuta el programa. Se reproduce el ensayo con el que se obtiene en realidad la característica de excitación: se deja el devanado primario del TI a circuito abierto y se conecta una fuente de tensión en el secundario. Para diferentes valores de la tensión de la fuente (tensión de excitación) se obtienen diferentes valores de corriente (corriente de excitación). Para poder obtener dicha curva es necesario obtener los valores de intensidad eficaz a partir de las formas de onda. Y para ello se van a emplear dos métodos, uno utilizando directamente un módulo de conversión a valores eficaces, que se conecta directamente sobre el devanado primario del circuito diseñado, y otro segundo método, donde compilando desde GTPPlot (subprograma de ATP) devuelve en forma de gráfica el valor de intensidad eficaz, introduciendo la respuesta gráfica del sensor del circuito anteriormente citado. En conclusión, para cada valor de tensión introducido en la fuente del circuito se obtendrá un valor de intensidad que podrá transformarse en valor de intensidad eficaz y con estos dos datos confirmar la curva característica de excitación de partida del ensayo.

PALABRAS CLAVE:

Sistema eléctrico, línea de transporte, programa ATP, configuraciones de la línea, falta monofásica, bifásica y bifásica a tierra, protección, relé de sobreintensidad, tiempo de actuación, transformador de intensidad y característica de excitación.

Norma IEC 255-3.

1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que para garantizar el funcionamiento de un relé de protección, este debe someterse a pruebas en condiciones reales de funcionamiento del sistema eléctrico. Esto generalmente significa que el relé debe ser probado con datos de transitorios generados a partir de programas de simulación de transitorios electromagnéticos. Entre los programas disponibles se encuentran, ATP (Alternative Transients Program), EMTP (Electromagnetic Transients Program) y PSCADTM (EMTDC). En cada uno de estos programas, el sistema de energía que genera los datos transitorios puede ser modelado en detalle. También es posible simular fácilmente varios escenarios de fallo y diferentes configuraciones del sistema.

El propósito de este documento es proporcionar un concepto para un modelo de prueba de línea de transporte estándar, sus parámetros, las operaciones que deben ser consideradas, y los casos típicos de estudio en el modelo, de modo que pueda ser llevada a cabo una prueba real de protección de relés. Este relato no pretende ser una guía completa, sino más bien servir como base de partida para empezar a construir.

1.1. Introducción al modelo

El modelo básico de la figura 2 es adecuado para probar la mayoría de las aplicaciones de protección de líneas de transporte. El modelo se compone de varios componentes - líneas, transformadores, fuentes, etc. Hay tres fuentes en la red - S1, S2 y S3. El ángulo de la fuente se puede variar para simular flujos de potencia. Las líneas de transporte consisten en un par de líneas acopladas entre sí (entre los nudos 1 y 2), de los cuales una es una línea de tres terminales. Se proporcionan nudos intermedios en los modelos de la línea para permitir la aplicación de fallos en varios lugares. También se incluyen interruptores e interruptores automáticos para simular diferentes configuraciones. Este modelo se puede ampliar para incluir condensadores en serie, bobinas y condensadores en derivación, etc.

Los parámetros físicos de los componentes que conforman la red se proporcionan en el Apéndice A de este documento. Es posible para el usuario generar sus propios archivos de simulación en el programa de simulación de su elección con los parámetros proporcionados.

1.2. Modelos de líneas de transporte

Las líneas de transporte desempeñan un papel fundamental en la generación de transitorios. A continuación se exponen diferentes tipos de modelos de línea que pueden utilizarse en estudios de protecciones.

A lo largo de la longitud de la línea se distribuyen uniformemente su resistencia, inductancia y capacidad, por lo que, en general, no pueden tratarse como elementos concentrados. Además alguno de los parámetros son también función de la frecuencia.

Para los estudios de régimen permanente, como cortocircuitos y flujos de carga, los parámetros siempre serán función de una única frecuencia que es la de la red de alimentación.

Cuando se trata de estudios de transitorios electromagnéticos no es posible calcular los parámetros a partir de fórmulas sencillas si no que deben ser calculados utilizando subrutinas auxiliares disponibles en diferentes programas de transitorios electromagnéticos. La mayoría de los programas de transitorios electromagnéticos contienen dos categorías principales de modelos de línea de transporte:

1. Los modelos de parámetros constantes.
2. Los modelos de parámetros dependientes de la frecuencia.

Dentro de los modelos de parámetros constantes:

- Representación en parámetros concentrados de secuencia directa y homopolar.
- Modelo en pi.
- Parámetros distribuidos (modelo Bergeron) para la representación de línea traspuesta y no traspuesta.

Dentro de la categoría de modelos dependientes de la frecuencia:

- Modelo de línea dependiente de la frecuencia para líneas traspuestas y no traspuestas utilizando una matriz de transformación modal constante.
- Modelo de línea dependiente de la frecuencia para líneas traspuestas y no traspuestas utilizando una matriz de transformación modal dependiente de la frecuencia.
- Modelo de línea dependiente de la frecuencia en el dominio de fase para líneas traspuestas y no traspuestas (sin transformación modal).

1.2.1. Modelos de línea para estudios de régimen permanente

En este caso se tiene una única frecuencia.

1.2.1.1. Modelo de circuito en pi exacto

El modelo equivalente en pi exacto de una línea monofásica se muestra en la figura 3.

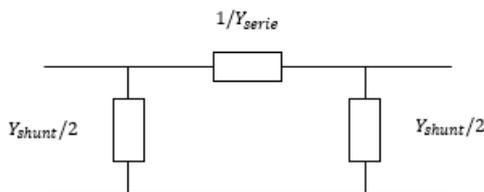


Figura 1.3. Circuito equivalente en pi exacto

Ecuaciones del modelo:

$$\frac{1}{Y_{serie}} = (R' + j\omega L') \cdot l \cdot \sinh(\gamma \cdot l) / (\gamma \cdot l) \quad (1)$$

$$Y_{shunt}/2 = \frac{(\frac{j\omega C'}{2}) \cdot l \cdot \tanh(\gamma \cdot \frac{l}{2})}{\gamma \cdot l/2} \quad (2)$$

$$\gamma = [(R' + j\omega \cdot L') \cdot j\omega \cdot C']^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde R', L', C' son la resistencia, inductancia y capacidad de la línea por unidad de longitud, l es la longitud de la línea y γ la constante de propagación.

Las ecuaciones (1) y (3) muestran que el modelo de circuito en pi exacto puede representar con precisión la línea a una frecuencia determinada.

Este modelo es un modelo de parámetros concentrados y resulta adecuado cuando tenemos una única frecuencia de interés y una longitud determinada. Incluye correcciones hiperbólicas y se tiene en cuenta el efecto pelicular y las correcciones por retorno por tierra. Es el mejor modelo para respuestas de régimen permanente, como flujos de carga o estudios de barrido de frecuencia. Es un modelo polifásico, en el dominio de fase, con valores constantes de los parámetros R, L, C y G de la línea y es correcto para cualquier número de circuitos en el mismo derecho de paso. Este modelo no es adecuado para estudios de transitorios.

1.2.1.2 Modelo en pi nominal (Simplificado o de línea corta)

Este modelo se deriva del modelo exacto en pi descrito en el punto anterior a partir de la ecuación (1), si la longitud o frecuencia de la línea es baja. Para líneas aéreas de transporte si $l \leq 150$ km a una frecuencia de 60 Hz o $l \leq 15$ km a 600 Hz. Este modelo también tiene en

cuenta el efecto pelicular y las correcciones por retorno por tierra. Es un modelo polifásico en el dominio de fase. La línea se representa como no traspuesta, y el usuario puede modelar esquemas de transposición con la conexión de modelos en pi nominal en cascada.

Este modelo tiene las mismas limitaciones que el modelo exacto, además de estar limitado su uso para líneas cortas de menos de 150 km con 60 Hz y menos de 5 km con 2 kHz. No puede representar la dependencia de la frecuencia, no puede ser utilizado para el estudio de transitorios, ni con líneas largas. Sin embargo, se ha utilizado para los estudios de transitorios mediante la conexión en cascada de un número de modelos en pi nominal en cascada.

Aproximaciones en el modelo de línea corta:

$$\sinh(\gamma l) \approx \gamma \cdot l \quad (4)$$

$$\tanh(\gamma l) \approx \frac{\gamma \cdot l}{2} \quad (5)$$

1.2.2. Modelos de línea para estudios de transitorios

Los modelos de parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia son los mejores para el estudio de transitorios. Utilizan soluciones de ondas móviles que son válidos en intervalos más amplios de frecuencia que los anteriores.

1.2.2.1. Modelo nominal en pi

Este modelo no es una buena opción para estudios de transitorios. Sin embargo, se ha utilizado para los estudios de transitorios mediante la conexión de una serie de modelos-pi nominal en cascada, similar a lo que se hizo en el pasado con los analizadores de redes para transitorios. Cuando se utiliza como tal, este modelo tiene la gran desventaja de producir reflexiones en los puntos de conexión intermedios de la cascada.

Para representar adecuadamente la línea en varios rangos de frecuencia, se debe utilizar un gran número de secciones nominal-pi en cascada. Como regla general, se debe utilizar una sección para representar la línea hasta 100 Hz, ocho secciones para extender el campo hasta 700 Hz y 15-20 secciones para ampliar el campo hasta 1-2 kHz o mantener las longitudes de sección entre 5 y 10 kilómetros (2 km para una frecuencia de hasta 5 kHz).

1.2.2.2. Modelo de línea con parámetros distribuidos constantes

Este modelo supone que los parámetros de la línea R' , L' y C' son constantes. L' y C' están distribuidos y las pérdidas de $R' \cdot l$ están concentradas en tres puntos. Es razonable cuando

$R' \cdot l \ll Z_{\text{onda}}$ (Z_{onda} , impedancia de onda). Se cumplen las condiciones anteriores para los parámetros de secuencia directa hasta aproximadamente 1-2 kHz, pero no para los parámetros de secuencia homopolar. Es un buen modelo sólo cuando las corrientes de secuencia homopolar son muy pequeñas u oscilan con una frecuencia cercana a aquella para la que se calcularon los parámetros. Esta frecuencia no debe ser muy alta para cumplir con la condición $R' \cdot l \ll Z_{\text{onda}}$; de lo contrario la línea debe ser dividida en secciones más pequeñas. La matriz de transformación para desacoplar los modos de propagación se toma como real y constante y es tanto menos válida cuanto mayor es la asimetría. La velocidad de ejecución de este modelo es mucho más rápida que los modelos de circuito nominal-pi conectados en cascada y no hay reflexiones dentro de la línea. La conductancia en derivación se ignora en este modelo.

1.2.2.3. Modelo de línea con parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia

Este modelo proporciona una representación exacta de la naturaleza distribuida de todos los parámetros de la línea, así como su dependencia con la frecuencia. Por tanto, los parámetros de línea para este modelo no son constantes, sino que dependen de la frecuencia, es decir, $R(\omega)$, $L(\omega)$, $C(\omega)$ y $G(\omega)$. Todos los parámetros están distribuidos incluyendo R' y G' .

La mayoría de los modelos dependientes de la frecuencia se basan en la teoría modal en la que las ecuaciones de una línea polifásica se desacoplan a través de matrices de transformación, por lo que cada modo puede ser estudiado por separado como una línea monofásica. Las matrices de transformación para las líneas no transpuestas o desequilibradas son complejas y dependientes de la frecuencia. Es posible sin embargo, obtener una buena precisión mediante el uso de matrices de transformación reales y constantes. Algunos programas pueden ofrecer la opción de usar matrices de transformación dependientes de la frecuencia. Sin embargo, esta opción tiene una tendencia a producir soluciones inestables. El último avance en los modelos de la línea de transporte dependientes de la frecuencia es el modelo en el dominio de fase dependiente de la frecuencia. Este modelo no utiliza la matriz de transformación modal y, por tanto, no tiene las imprecisiones asociadas a la dependencia de la frecuencia de la matriz de transformación. Proporciona una mayor precisión cuando se tratan líneas asimétricas.

En resumen, se debe utilizar el modelo-pi exacto para el análisis de régimen permanente. Y para el caso de transitorios se debe utilizar el modelo dependiente de la frecuencia para las líneas de gran interés, y el modelo de parámetros distribuidos de frecuencia constante (Bergeron) para las líneas de interés secundario.

El modelo en Pi no es una buena opción para el estudio de transitorios. Sin embargo, se ha utilizado conectando en cascada un número determinado de secciones pi nominal, como se hacía en el pasado en los analizadores de red para transitorios, aunque siguen existiendo problemas porque se convierte en un sistema computacionalmente lento y requiere nudos de red adicionales.

1.3. Generadores

La elección de un modelo de generador depende de la configuración del sistema y de los objetivos del estudio. A continuación se muestran los más utilizados en los estudios de protecciones:

Modelo 1: Se utilizan fuentes ideales con reactancias subtransitorias. Se utiliza para representar grandes centrales de generación. En este caso se supone que la inercia del sistema es infinita y la perturbación no causa una variación de frecuencia en el circuito. El marco de tiempo utilizado son aproximadamente 10 ciclos y los controles de la máquina, como el sistema de excitación y el regulador de velocidad, no han respondido a la perturbación. Este modelo se utiliza comúnmente en los estudios de protecciones de líneas de transporte.

En el caso de que sea un sistema integrado grande, puede dividirse en unos pocos subsistemas. Cada subsistema puede entonces reducirse a una fuente trifásica ideal y las impedancias de secuencia positiva y cero de un equivalente Thevenin. Estas impedancias se pueden calcular utilizando un programa de cortocircuitos de 60 Hz en estado estacionario mediante el aislamiento del subsistema del resto del circuito en el nudo común entre ellos y aplicando después un fallo en ese nudo. Es una práctica común para seleccionar las barras comunes, que estén al menos a una línea de distancia de los terminales de la línea donde se evalúa el comportamiento de las protecciones. Se sigue suponiendo que estamos en el caso de fuentes ideales con reactancias subtransitorias. Sin embargo, la principal ventaja de este modelo es que los requisitos de cálculo se reducen significativamente porque todos los componentes dentro de un subsistema se reducen a una representación simple usando una fuente ideal y las impedancias equivalentes de Thevenin. Sin embargo la principal desventaja es que la impedancia Thevenin solo representa la equivalencia del sistema a 60Hz. La respuesta transitoria del sistema utilizando este modelo reducido no es tan precisa como cuando se representa el sistema completo con todas las líneas y fuentes.

Modelo 2: Se trata del modelo detallado de Máquina Síncrona. Se utiliza para la representación de pequeñas centrales de generación y para los casos en los que la perturbación cause un cambio en la frecuencia y en la respuesta de los relés a esa perturbación que sea lento. El modelo requiere datos completos de la máquina, incluyendo la inercia y las reactancias subtransitoria, transitoria y de régimen permanente. Los modelos de turbina y del sistema de excitación también pueden incluirse dependiendo del intervalo de tiempo de estudio y de su tiempo de respuesta. El modelo detallado permite representar el comportamiento completo de la máquina desde el régimen subtransitorio hasta el estado estable. En general, el sistema de excitación y de control de velocidad se ignoran para los estudios de protecciones de línea. La principal desventaja es que se trata de un modelo complejo, y requiere datos completos de la máquina, es computacionalmente ineficiente y no

proporciona ninguna precisión adicional en la simulación. Por tanto, no se recomienda su uso para un gran sistema integrado.

El sistema básico de la figura 1 tiene definidas las fuentes S1 y S3 como fuentes ideales con las impedancias del equivalente Thevenin. La fuente S2 está definida con un modelo detallado. Los parámetros de los modelos de las tres fuentes se dan en el apéndice.

1.4. Transformador

Se tienen tres tipos de modelos transformadores:

- Transformador ideal.
- Transformador saturable.
- Modelos de transformador basados en bobinas acopladas mutuamente, usando programas auxiliares.

En los transformadores ideales se ignora toda dispersión suponiendo que todo el flujo se encuentra confinado en el núcleo magnético. Además se desprecian las corrientes de magnetización suponiendo que no hay reluctancia en el material magnético. El modelo transformador saturable elimina estas dos restricciones, considerando que alrededor de cada bobina individual existe una vía de dispersión magnética separada, y que también existe un camino de reluctancia magnética finita en el material. Los modelos basados en matrices de bobinas acopladas mutuamente pueden representar disposiciones bastante complejas, pero son algo más difíciles de usar.

Los modelos básicos de transformadores anteriores no representan la saturación, las corrientes de Foucault, y los efectos de la alta frecuencia con la excepción del modelo de transformador saturable que tiene la saturación incorporada directamente en el modelo. Los fenómenos de saturación, corrientes parásitas, y de alta frecuencia pueden ser representados por separado mediante el aumento de la complejidad de los modelos básicos anteriores. Los modelos anteriores se utilizan cuando se está trabajando con frecuencias por debajo de los 2 kHz. En frecuencias superiores a 2 kHz las capacidades y el acoplamiento capacitivo entre arrollamientos se vuelven muy importantes. De hecho, a muy altas frecuencias el comportamiento del transformador está dominado por sus capacidades. Se necesita el uso de modelos complejos y detallados si se está interesado en la distribución de tensión transitoria dentro del devanado.

Por lo general, los modelos de transformador se derivan teniendo en cuenta el comportamiento de los terminales del transformador. Sin embargo, en el estudio del funcionamiento de la línea de transporte, se podría estar interesado en fallos internos del transformador de potencia. El método para la simulación de fallos internos en el

transformador utilizando EMPT viene ilustrado en [1]. Para la simulación si no se requiere representación explícita de los transformadores, el usuario puede modelarlo usando el equivalente Thevenin.

1.4.1. Modelo de Transformador Ideal

Como se ha dicho anteriormente, en este modelo se supone que todo el flujo se encuentra confinado en el núcleo magnético y que el material magnético carece de reluctancia magnética. El transformador ideal se puede modelar directamente en el programa ATP, mediante el uso de una fuente tipo 18 y estableciendo un valor cero en una fuente de tensión. Este modelo tiene un formato de entrada muy simple. Una de sus principales ventajas es que se puede utilizar junto a otros componentes lineales y no lineales de EMTP, para representar los transformadores de potencia más complejos no disponibles en ATP.

Las ecuaciones de este modelo son las siguientes:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1} = n \quad (6)$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{n} \quad (7)$$

- N1: número de espiras en el arrollamiento 1 (en el primario).
- N2: número de espiras en el arrollamiento 2 (en el secundario).
- v1: tensión en el lado primario.
- v2: tensión en el secundario.
- i1: intensidad en el primario.
- i2: intensidad en el secundario.
- n: relación de espiras.

1.4.2. Modelo de Transformador Saturable

El modelo del transformador saturable utiliza una representación en estrella del circuito, y se emplea con transformadores monofásicos de hasta tres devanados. Su extensión a transformadores trifásicos no es exacta. Este modelo requiere conocer la tensión nominal de cada devanado, la impedancia de dispersión de cada devanado e información sobre la forma de conexión del transformador.

Las impedancias de dispersión son inductancias y resistencias fijas y están separadas en elementos individuales para cada devanado. Los valores de impedancia en por unidad (p.u) obtenidos de datos de flujos de carga o cortocircuitos, deben convertirse a valores reales utilizando una impedancia base, dada por:

$$Z_{base} = \frac{V^2}{S_{1\phi}} \quad (8)$$

- V : tensión nominal del devanado.
- $S_{1\phi}$: potencia monofásica nominal.

El circuito de este modelo está basado en el circuito equivalente monofásico de cualquier libro de texto:

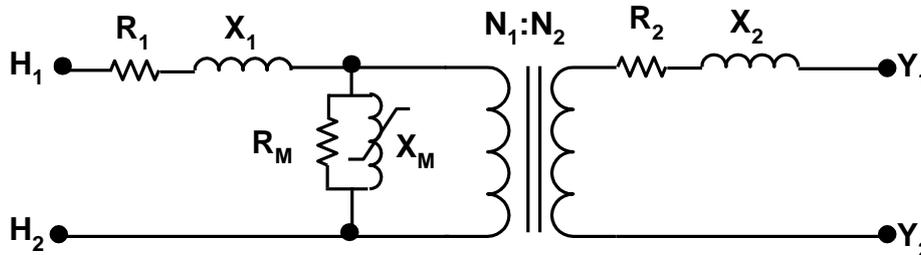


Figura 1.4. Modelo de transformador saturable

H1 y H2 son los terminales del devanado de alta tensión y Y1 e Y2 los del lado de baja tensión. R1 y R2 son las resistencias de los arrollamientos de alta y baja tensión, respectivamente. La reactancia de dispersión del transformador X_{12} se divide entre la reactancia del lado de alta y del lado de baja X_1 y X_2 , respectivamente. R_M representa las pérdidas en vacío y X_M la reactancia de magnetización no lineal. La relación de transformación es $N_1:N_2$, N_1 es el número de espiras en el arrollamiento de alta tensión y N_2 en el de baja. El modelo se utiliza para bajas frecuencias. Las resistencias dependen de la frecuencia y deben ser modificadas para reflejar el amortiguamiento propio a frecuencias más altas. La relación de espiras no se puede cambiar dinámicamente durante la simulación para reflejar el cambio de tomas. En ocasiones, se ha producido inestabilidad numérica con este modelo.

1.4.3. Modelo matricial

Definir modelos de transformadores trifásicos es más complejo que los de unidades monofásicas. En un banco de transformadores de unidades monofásicas, las fases individuales no están acopladas magnéticamente, y su funcionamiento es equilibrado suponiendo que las tres fases tienen parámetros iguales. En los transformadores trifásicos, hay acoplamiento magnético directo de un devanado con los otros dos devanados de fase. Los transformadores trifásicos presentan asimetría de longitudes de camino magnético, lo que da lugar a densidades de flujo asimétricas en el núcleo del transformador. Los efectos de la asimetría del núcleo son más apreciables para la secuencia homopolar o en funcionamiento desequilibrado. Los tipos más comunes de transformadores trifásicos son:

- Núcleo de tres columnas
- Núcleo de cinco columnas

- Forma acorazada

La representación exacta de transformadores trifásicos requiere del uso de un modelo matricial completo que tiene en cuenta el acoplamiento de cada devanado de una fase con todos los demás devanados del banco.

La siguiente matriz representa la matriz de admitancias de un cuadripolo que describe un transformador no ideal de dos devanados visto desde el lado primario:

$$[Y] = [\omega L]^{-1} = \begin{bmatrix} Y & -tY \\ -tY & t^2Y \end{bmatrix} \quad (9)$$

La siguiente matriz de admitancias representa la relación lineal entre las corrientes y tensiones primaria y secundaria:

$$\begin{bmatrix} i_L \\ i_H \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} V_L \\ V_H \end{bmatrix} \quad (10)$$

Esta representación utiliza esencialmente la misma matriz de 2 x 2 conocida de los estudios de flujo de carga, con la diferencia, que en la matriz de admitancias se debe separar en las matrices $[R]$ y $[\omega L]^{-1}$ para los estudios de transitorios. Los estudios con el programa EMTP se realizan con los valores verdaderos. Las ecuaciones de rama asociadas con las matrices anteriores son:

$$[L]^{-1}[V] = [L]^{-1}[R][I] + \left[\frac{di}{dt} \right] \quad (11)$$

Los elementos de la matriz para transformadores con cualquier número de devanados se pueden obtener de las impedancias de cortocircuito entre parejas de devanados. Los cálculos son bastante complejos, y debe usarse el programa BCTRAN disponible en el ATP. BCTRAN produce las matrices de rama a partir de los datos de secuencia directa y secuencia homopolar de los ensayos de vacío y de cortocircuito. Se reconoce el hecho de que los devanados conectados en triángulo proporcionan un cortocircuito para las corrientes de secuencia homopolar, así como otras complejidades, y trabaja también con unidades monofásicas. BCTRAN requiere de datos de ensayos independientes para impedancia de dispersión de cortocircuito de secuencia homopolar y corrientes de magnetización. Un modelo producido por BCTRAN es bueno desde dc hasta 2 kHz. Puede tener en cuenta las pérdidas de excitación, pero el comportamiento no lineal no está representado y debe ser añadido externamente.

Se pueden utilizar dos posibles representaciones matriciales para el modelo del transformador, la representación con la matriz de admitancias y la de impedancias. La representación con matriz de impedancia sólo es posible si la corriente de excitación es distinta de cero. Estas matrices pueden ser leídas directamente como datos de ramas R-L acopladas.

1.4.4. Saturación del transformador

La característica de saturación del transformador debe modelarse, siempre que se prevea que el flujo va a superar la región lineal de la curva de saturación con un valor próximo a 1 p.u. La representación más utilizada es la bobina no lineal univaluada, que es una parte integral del modelo de transformador saturable. El modelo de transformador saturable permite tener una inductancia de magnetización no lineal que se colocará en el punto estrella. Con transformadores de dos o tres devanados se puede llegar a un circuito equivalente para el transformador con un nudo ficticio donde se podría colocar la rama de magnetización. En transformadores con más de tres arrollamientos, no es posible disponer de un nudo ficticio para colocar la rama de magnetización y la rama no lineal se coloca en los terminales del transformador. Este es también el caso con los modelos de admitancia y de impedancia, donde la rama saturable se coloca en los terminales de uno de los devanados del transformador. En la representación de la matriz de impedancias y admitancias, al añadir inductancias no lineales en la línea, fácilmente sucede esto. Si la matriz contiene ya el efecto de la corriente de excitación insaturada, entonces la inductancia no lineal añadida en la línea representa la diferencia entre la corriente de excitación saturada e insaturada.

En el campo no saturado, no tiene gran relevancia el lugar donde se coloque la inductancia magnetizante. En el campo saturado, donde la pendiente de la curva de flujo de corriente se hace comparable con la inductancia de cortocircuito (1 a 2,5 veces en líneas cortas para transformadores con devanados separados, o 4 a 5 veces para autotransformadores), puede hacerse notable en el lugar donde se coloca. Las comparaciones de los ensayos reales sobre la línea y las simulaciones en EMTP de transformadores de núcleo con tres devanados, han demostrado que los resultados se corresponden mejor si la inductancia no lineal se conecta a través de un arrollamiento más cercano al núcleo (en general en el tercer devanado o en el devanado con menor tensión).

El programa ATP tiene programas auxiliares para calcular los parámetros de saturación de la rama de magnetización. Esto se realiza utilizando el programa auxiliar SATURATION en el programa ATP. La característica resultante se puede utilizar en el modelo integrado de transformador saturable, o en un elemento Tipo 98 de bobina pseudo no lineal. La curva de saturación generada no contiene histéresis. Todo lo que se necesita son unas pocas parejas de valores eficaces de los datos del ensayo de excitación del transformador a circuito abierto. La rutina de saturación auxiliar genera los datos para una inductancia lineal a tramos mediante la conversión de los valores eficaces de tensión y corriente a los valores de pico de flujo y corriente.

El elemento de modelo de bobina no lineal, Tipo-93, que tiene el mismo formato que el modelo de bobina pseudo no lineal tipo 98, funciona bien para una serie de simulaciones; sin embargo, existen una serie de limitaciones. Este modelo no representa efectos de histéresis, lo que significa que el flujo remanente en el núcleo no puede ser representado. Como resultado, las corrientes transitorias de conexión no se pueden modelar con precisión si el transformador

tenía algún nivel de flujo remanente en el núcleo antes de ser puesto en tensión. Este modelo también es independiente de la frecuencia.

ATP proporciona otro modelo, el Tipo 96, de bobina pseudo no lineal con histéresis, lo que podría superar algunas de las limitaciones del modelo Tipo-98. Los datos para el modelo Tipo 96 se pueden obtener usando el programa auxiliar HYSDAT. La única información que necesita ser suministrada por el usuario es el escalado, es decir la ubicación del punto de saturación positivo. Este es el punto del primer cuadrante donde el bucle de histéresis cambia de ser multivaluado a ser univaluado. El modelo de Tipo-96 tiene sus propias limitaciones y, a veces, dificultades numéricas. Algunas de las limitaciones del Tipo-96 incluyen problemas de inicialización fuera del bucle principal de histéresis y la elección de un único material del núcleo [ARMCO M4].

Para los estudios de protecciones, tales como la saturación del transformador de corriente, que implican una "saturación profunda", el modelo más simple (Tipo-98) que no representa la histéresis produce resultados muy satisfactorios. Sin embargo, con este modelo, la remanencia en el núcleo del TI no puede tomarse en consideración.

1.4.5. Corrientes de Foucault

Las corrientes parásitas en el núcleo de un transformador tienen dos efectos principales: introducen pérdidas en el núcleo, y retrasan la penetración de flujo en el núcleo. El modelado de las corrientes de Foucault no es una tarea fácil, ya que no se dispone de datos. Las pérdidas en vacío incluyen las debidas a corrientes de Foucault y a la histéresis y pueden ser representadas por una resistencia R_m en paralelo con la inductancia de magnetización:

$$R_m = \frac{V^2}{P_{nl}} \quad (12)$$

Donde P_{nl} corresponde al valor de las pérdidas en vacío.

1.4.6. Modelos de Transformador de alta frecuencia

A frecuencias superiores a 2kHz, las capacidades y el acoplamiento capacitivo entre bobinados empiezan a ser importantes. Para frecuencias de hasta 30 kHz, es suficiente, para la mayoría de los propósitos, la simple adición de las capacidades totales entre los devanados y tierra y entre devanados. Para frecuencias superiores a 30 kHz, se requiere una representación más detallada de la disposición interna del devanado y las capacidades entre devanados y entre los segmentos de devanado deben ser modeladas. El fabricante no suele proporcionar las

capacidades de los transformadores. Los valores de la capacidad entre un terminal y tierra, incluyendo la capacidad del pasatapas, varían considerablemente en un campo de valores de 1 a 10 nF. Esto se debe principalmente a la disposición física de los devanados del transformador y el diseño general del transformador. El usuario debe consultar al fabricante para obtener estos datos.

1.4.7. Conclusiones sobre los transformadores

El programa ATP dispone de un modelo de transformador saturable, acompañado de un programa auxiliar, BCTRAN, para el cálculo de los parámetros del transformador. El programa auxiliar BCTRAN deduce una matriz de parámetros para modelar los devanados del transformador como ramas acopladas mutuamente. Cuando se utilizan estos modelos matriciales, el núcleo magnético del transformador se representa típicamente con una reactancia no lineal o una rama de reactancia conectada externamente a los terminales de los devanados.

La componente de transformador es más sencillo de usar que los modelos de matrices. Sin embargo, si debe moderarse saturable el comportamiento a secuencia homopolar de transformadores trifásicos, entonces debe utilizarse el programa auxiliar que proporciona los parámetros matriciales. Los modelos de transformadores discutidos aquí son válidos sólo a frecuencias moderadas. En general, estos modelos son lo suficientemente precisos para estudios de faltas y maniobras.

1.5. Transformador de intensidad

El circuito equivalente del transformador de intensidad (TI) tienen la siguiente forma:

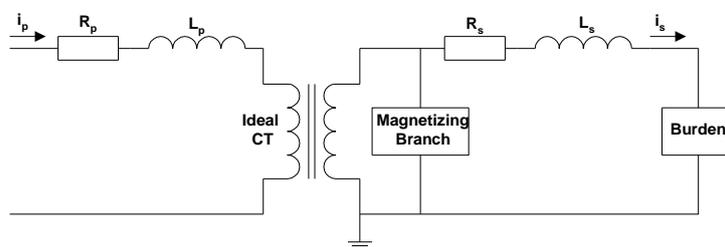


Figura 1.5. Transformador de intensidad

R_p L_p : Resistencia e inductancia del devanado primario.

R_s L_s : Resistencia e inductancia del devanado secundario.

Para estudios de protecciones el circuito se puede simplificar. R_p , L_p , y la capacidad entre devanados puede despreciarse; también puede despreciarse L_s en la mayoría de los casos [3]. En el circuito simplificado R_b representa la resistencia del devanado secundario, la resistencia de los cables y la resistencia de la carga. La rama de magnetización puede ser localizada en el primario o en el secundario del TI, ya que el resultado de la simulación es igual en ambos casos, aunque se suele colocar en el secundario, debido a que es donde se realizan las mediciones para la formación de la curva flujo-intensidad y así no es necesario transferir valores de un lado a otro del transformador [4, 5].

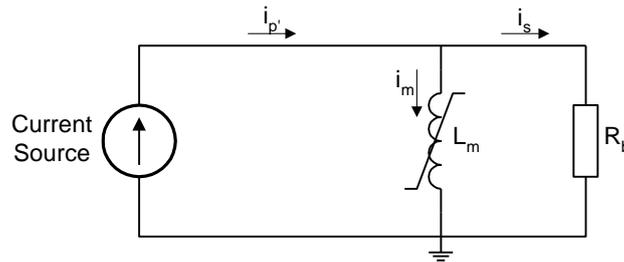


Figura 1.6. Transformador de intensidad para transitorios (modelo simplificado)

Todos los modelos de TI desarrollados usando programas de transitorios electromagnéticos se basan en el circuito equivalente del TI y se pueden construir usando modelos de componentes disponibles en los programas. La inductancia, L_m , de la rama de magnetización está representada por una bobina no lineal cuya característica se especifica en forma lineal a tramos por el usuario. Ya que es difícil disponer directamente de los valores Ψ - I (flujo-intensidad), estos programas proporcionan un programa auxiliar para convertir las características más comúnmente disponibles de V_{ef} - I_{ef} (tensión eficaz-corriente eficaz) en las características Ψ - I .

Los programas de transitorios electromagnéticos tienen modelos para representar la rama de magnetización. Algunos modelos de rama de magnetización son parte integral de un modelo de transformador; mientras que otros son una rama de inductancia no lineal que se añade al modelo de transformador lineal. Al utilizar modelos de rama de magnetización (L_m) externos al modelo del transformador, la resistencia del devanado secundario del TI debe conectarse en el lado de la carga de L_m . Esto significa que es necesario ajustar la resistencia del devanado en el modelo de transformador a casi cero, e incluir la resistencia correcta del bobinado en la carga conectada [4].

El efecto de histéresis puede ser importante en el estudio, o no serlo. Sin embargo, es más importante incluir el efecto de remanencia en el comportamiento del TI, lo que se estudia fácilmente si el modelo de la rama de magnetización puede representar la histéresis. Si el modelo no puede representar la histéresis, todavía puede permitir la especificación de un nivel de flujo en estado estacionario en el comienzo de un estudio. A partir de un valor inicial de flujo simulará la presencia de flujo remanente, similar al uso de modelo de histéresis. La

especificación de un valor inicial del flujo permitirá simular la influencia de flujo remanente de manera similar a cuando un modelo de histéresis.

Como se mencionó anteriormente, la curva V-I no se utiliza directamente en las simulaciones con programas de transitorios electromagnéticos. Por ejemplo, los programas EMTP y ATP proporcionan un programa auxiliar para convertir la curva de V-I en un conjunto de datos Ψ -I equivalente, que se utiliza entonces por EMTP y ATP. Los programas EMTP y ATP extrapolan la curva Ψ -I usando la pendiente definida por los dos últimos puntos del conjunto de datos Ψ -I. Si los datos de la curva de V-I son tales que la pendiente no es monótonamente decreciente (es decir, contiene "ruido"), entonces la curva Ψ -I puede obtener extrapolada una pendiente más alta (Fig. 1.7). Puede dar lugar a una respuesta transitoria en el TI errónea. El problema puede ser resuelto mediante la adición de un punto adicional a la curva V-I para asegurar que la pendiente de la curva Ψ -I representa adecuadamente la región de saturación profunda [5].

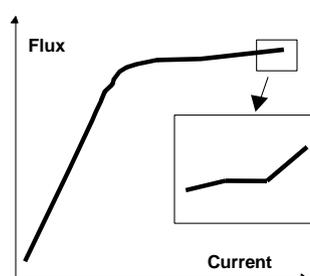


Figura 1.7. Representación del "ruido" en una curva Ψ -I (flujo-intensidad)

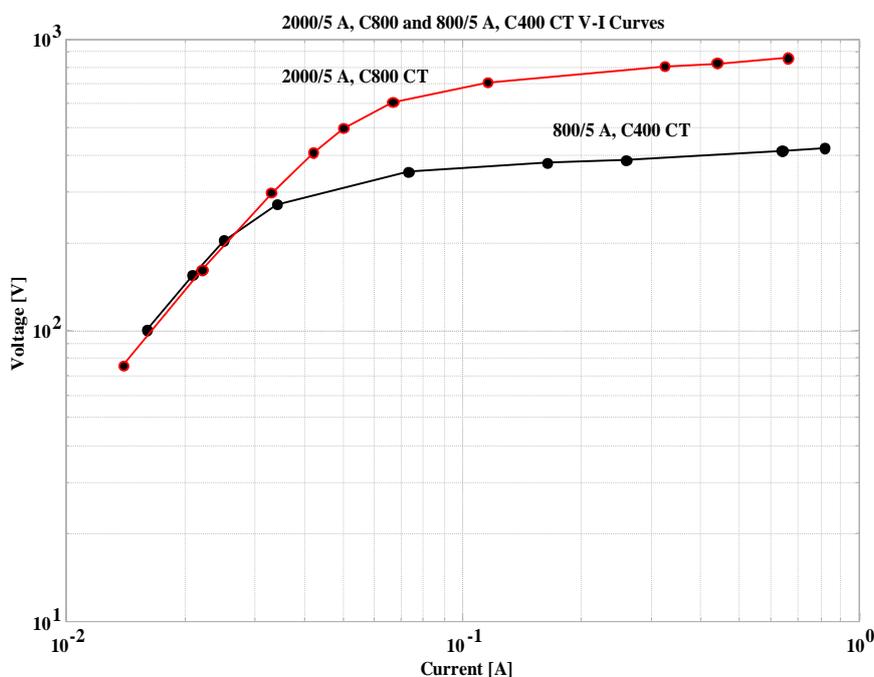


Figura 1.8. Curva característica V-I (tensión-intensidad), para un TI C800 con relación de transformación 2000/5 y otro TI de tipo C400 con relación de transformación 800/5

1.5.1. Validación de la curva V-I (tensión-intensidad)

Después de que los datos de la curva Ψ -I hayan sido incluidos en el modelo CT, se pueden verificar mediante la simulación de las condiciones en las que se midió la curva real V-I. El circuito que es utilizado en los programas ATP y EMTP para comprobación de los valores de la curva V-I aparece a continuación en la figura 1.9. Las simulaciones se deben ejecutar para cada punto de tensión seleccionado de la curva V-I variando el valor de la fuente de tensión E. La corriente se mide a través de la resistencia R y la tensión V grabada en el nudo A2. La duración de cada simulación puede ser de varios ciclos. Los valores eficaces de intensidad y de tensión se calculan entonces para obtener pares de puntos de tensión y de corriente. Si la característica V-I se modela correctamente, las curvas medidas y simuladas se superponen entre sí. Este método se puede utilizar para la verificación de la curva V-I de cualquier modelo de transformador.

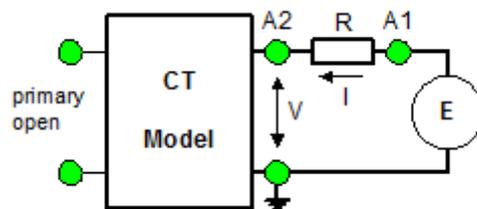


Figura 1.9. Circuito para la simulación de la curva V-I

1.6. Modelos digitales de transformadores de tensión capacitivo-inductivos

Los transformadores de tensión capacitivo-inductivos (CCVT) son ampliamente utilizados en los sistemas eléctricos de alta tensión para obtener señales de baja tensión estándar para relés de protección e instrumentos de medida. Por lo general, están diseñados como unidades monofásicas independientes. Un CCVT típico incluye los siguientes componentes (que se observan en la figura 1.10): conjunto serie de condensadores (C1, C2); bobina de drenaje (Ld); bobina de compensación (Rc, LC, CC); transformador reductor (Rp, Lp, Cp, Cs, Rs, Ls, Cs, Lm, Rm); circuito de supresión de ferorresonancia (Rf, Lf, Cf); y otros circuitos con elementos L, C y explosores que en muchos casos son no lineales. Las componentes C1, C2, Lc y Lp forman un circuito resonante paralelo sintonizado a la frecuencia fundamental para obtener una alta precisión en las medidas.

El modelo genérico de CCVT adecuado para los estudios de protecciones, no necesita incluir todos los componentes anteriores y se puede simplificar como se indica en la figura. 1.10. El programa auxiliar “TRANSFORMER” que aparece en el programa ATP, se utiliza para

representar el transformador reductor. Su uso también requiere la selección de valores de R_s y L_s . La influencia de estos elementos es pequeña, y pueden adoptarse arbitrariamente valores pequeños ($\mu\Omega$) [6].

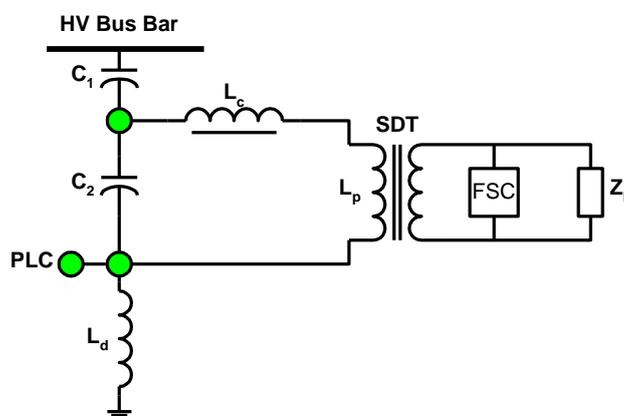


Figura 1.10. Conexión del circuito de un CCVT

- C_1, C_2 : Conjunto serie de condensadores.
- PLC: Interfaz de transmisión por onda portadora.
- L_c : Bobina de compensación
- L_d : Bobina de drenaje.
- SDT: Transformador reductor.
- L_p : Inductancia de dispersión del devanado primario.
- FSC: Circuito de supresión de ferorresonancia.
- Z_b : Carga.

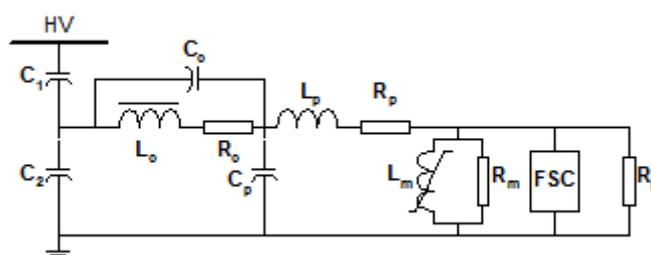


Figura 1.11. Modelo genérico de un CCVT

El circuito de supresión de ferorresonancia (FSC) tiene un efecto considerable en la respuesta transitoria del CCVT. Hay dos diseños principales del FSC. El primer diseño del FSC incluye condensadores y bobinas de núcleo de hierro conectadas en paralelo y sintonizadas a la frecuencia fundamental. Están conectados de forma permanente en el lado secundario y afectan al comportamiento transitorio del CCVT (Figura 1.12a). El condensador C_f está

conectado en paralelo con la bobina L_f de núcleo de hierro sintonizada a frecuencia fundamental. La resistencia R_f es la resistencia de amortiguamiento diseñada para amortiguar las oscilaciones de ferorrresonancia dentro de un ciclo. El circuito está sintonizado con un alto factor Q con el fin de atenuar las oscilaciones de ferorrresonancia a cualquier armónico, excepto en el fundamental. El FSC puede ser modelado utilizando dos representaciones diferentes de L_f , como se muestra en la Figura 1.12b y en la figura 1.12c, [7]. El modelo FSC con L_f representada como una inductancia con núcleo de aire (Fig. 1.12b) utiliza componentes C_f y L_f sintonizados a 60 Hz. En la Figura 1.12c se muestra L_f representada como un transformador no saturable. El valor calculado de L_f debe ser incorporado en el modelo del transformador como una autoinducción. Los devanados primario y secundario están conectados de tal manera que la resonancia en paralelo sólo se produce a la frecuencia fundamental. En otras frecuencias, sólo está implicada la inductancia de dispersión por lo que la resistencia de amortiguamiento es la que atenúa las oscilaciones de ferorrresonancia. La simulación del FSC utilizando la representación de L_f como un transformador es más precisa.

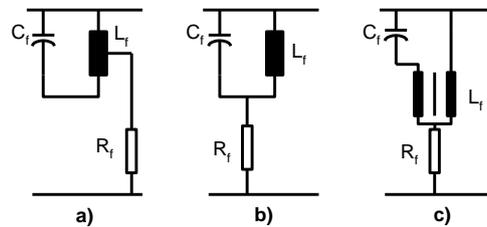


Figura 1.12. (a) Diseño real del FSC, (b) modelo digital del FSC simulado utilizando el modelo de bobina y (c) utilizando el modelo de transformador.

El segundo diseño del FSC incluye una resistencia conectada en el lado secundario del transformador reductor (SDT). Esta resistencia se puede conectar de forma permanente. Otra opción es tener un explosor o un circuito electrónico conectado en serie con la resistencia, que se activa siempre que se produce una sobretensión. Este diseño del FSC no afecta a la respuesta transitoria a menos que se produzca una sobretensión.

La Referencia [8] describe un método para las medidas de la respuesta en frecuencia del CCVT realizadas desde el lado secundario del CCVT. El método es adecuado para medidas de campo, ya que no requiere de ningún desmontaje interno del CCVT. Los parámetros del CCVT pueden ser estimados y utilizados para desarrollar modelos para ordenador.

1.7. Transformador de Tensión

El modelo del transformador de tensión inductivo (VT) es, en principio, similar al modelo de cualquier transformador de potencia. La figura 1.13 muestra el modelo necesario para simular exactamente la respuesta transitoria de los VTs.

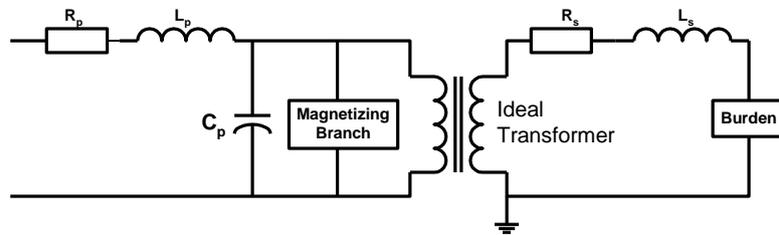


Figura 1.13. Circuito del transformador de tensión

En comparación con el circuito del transformador de corriente, se observa que se añade una capacidad en el devanado primario, C_p , en paralelo con la rama de magnetización.

1.8. Modelo de interruptor

El propósito de lo que sigue es proporcionar información básica sobre el concepto de control del interruptor, tal como se aplica a los relés de protección de líneas de transporte. Hay que decir que desde el punto de vista eléctrico el interruptor se abre cuando la corriente pasa por cero y, además, no existe una modelización de la dinámica no lineal de arco del interruptor y de las pérdidas. El programa EMPT permite un modelo separado del interruptor que puede emplearse para modelos de arco detallados [12]. El paso de tiempo involucrado en las simulaciones del interruptor es típicamente del orden de nanosegundos o inferior, mientras que en las simulaciones para protecciones son adecuados tiempos del orden de microsegundos (dependiendo de la longitud de la línea), o menores. Este texto no pretende ser una guía completa, sino más bien para servir como punto de partida para empezar a trabajar [9], [11].

1.8.1. Tipos de interruptores:

Hay tres tipos de interruptores que son aplicables a las pruebas de relés en líneas de transporte:

1. Interruptor controlado por tiempo. En este tipo de interruptores se especifica el instante en el cual se debe cerrar y el instante en el que se debe abrir el interruptor. El tiempo real de apertura del interruptor se producirá después del momento en el

que la corriente pase por cero después del instante especificado en las características del interruptor dentro de ATP. A veces para simular el corte con un valor de corriente distinto de cero se indica un margen para que se abra el interruptor al quedar la corriente por debajo del mismo.

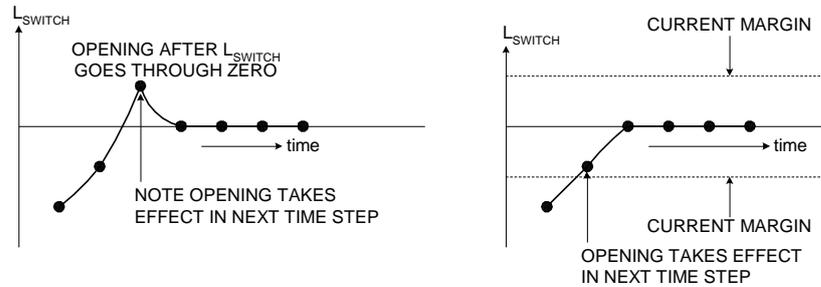


Figura 1.14. Interruptor de simulación básico

2. Interruptor para estudios estadísticos “STATISTICS”. El interruptor “STATISTICS” se puede utilizar para abrir o cerrar el interruptor al azar con funciones de distribución predeterminadas, como Gauss u otras. Por otro lado, el usuario tendrá que especificar el tiempo de cierre medio y la desviación estándar, además del tipo de distribución. Este interruptor también puede utilizarse para determinar las máximas intensidades de pico que pueden circular a través de un relé cuando se cierra sobre una falta. También se pueden analizar las sobretensiones que se producen debido a la interrupción anticipada de la corriente y la duración de los polos del interruptor y la inducción mutua de la línea. Se realizan unas 100 ó 200 simulaciones para determinar la distribución estadística de interés tal como en las corrientes máximas del relé o las sobretensiones máximas en el sistema.

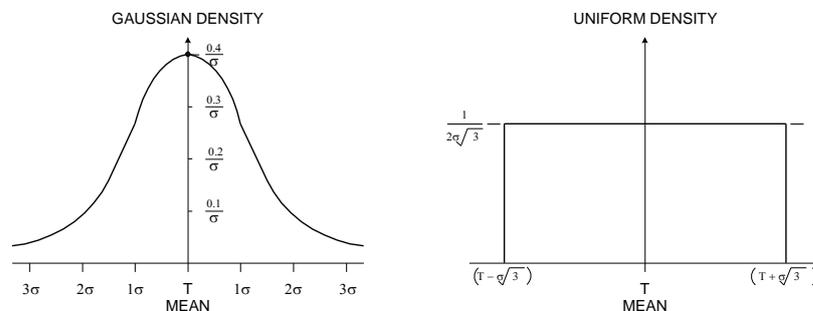


Figura 1.15. Interruptor de estudios estadísticos

3. Interruptor “TACS”. Dentro del programa EMTP existe un sistema equivalente a un ordenador analógico, denominado "Análisis transitorio de Sistemas de Control" (Transient Analysis of Control Systems, TACS), que proporciona la señal de control para abrir el interruptor. Así, por ejemplo un modelo de relé de distancia simple podría ser implementado en TACS y controlar el interruptor en el modelo de red. Se comportaría de forma similar al interruptor controlado por tiempo. Por ejemplo, supóngase que el interruptor está cerrado inicialmente, y se produce una falta. A medida que la tensión disminuye y la corriente aumenta, el algoritmo implementado en el relé de impedancia TACS medirá un fallo. Si el algoritmo determina que la impedancia de falta está dentro de la zona de operación, la señal de disparo del interruptor TACS puede ser transmitida al interruptor de red. El interruptor se abrirá en la próximo paso por cero de la corriente. Después de un tiempo de retardo puede simularse una operación de reenganche mediante el cierre de este interruptor u otro interruptor en paralelo.

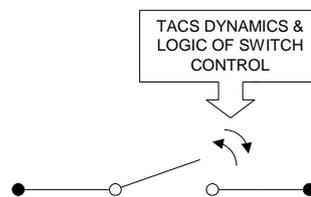


Figura 1.16. Operación de un interruptor TACS controlado

1.8.2. Funcionamiento unipolar o tripolar de interruptores automáticos

El funcionamiento de los interruptores descritos anteriormente es inherentemente monofásico, es decir, cada interruptor de cada fase opera de forma independiente. Por lo tanto, es posible establecer casos de estudio en los que se simula solo la apertura de una fase y su reconexión después de un retardo de tiempo.

Para configurar la operación tripolar de un interruptor automático con un interruptor controlado por tiempo, es suficiente con introducir el mismo tiempo de apertura en las tres fases que se traducirá en la apertura de fase en el siguiente paso por cero de la corriente de la fase particular. Para configurar una operación tripolar de un interruptor automático con un interruptor de tipo “STATISTICS”, es suficiente con definir a cada fase con el mismo tiempo medio de cierre y la misma desviación típica. Para configurar una operación tripolar de un interruptor automático con un interruptor controlado de tipo TACS, es suficiente con accionar el interruptor TACS de cada fase con la misma variable de control de TACS.

1.8.3. Resistencias de cierre

En algunas líneas de transporte de alta tensión, los interruptores automáticos se emplean con resistencias de preinserción por lo general con un valor igual a la impedancia característica de la línea (aproximadamente 250-400 ohmios). Hay un contacto auxiliar que cierra primero y se inserta una resistencia en serie con la línea de transporte durante un tiempo de alrededor de un ciclo. A continuación, el contacto principal del interruptor se cierra y puenta el contacto auxiliar y la resistencia. El contacto auxiliar se abre a continuación, para evitar el sobrecalentamiento de la resistencia. Con este procedimiento se disminuyen las ondas inyectadas al sistema, particularmente en el extremo receptor, donde se duplica la onda incidente.

La tendencia actual es la aplicación de pararrayos de óxidos metálicos en los dos extremos de las líneas de transporte y también en otros puntos a lo largo de la línea con el fin de limitar las sobretensiones. Las razones de esta tendencia son las mejores características V-I, y una mayor capacidad de energía de los pararrayos de óxidos metálicos, y también las complejidades inherentes a un diseño de interruptor con un contacto principal, un contacto auxiliar, y una resistencia de alta potencia. Una excelente referencia para la simulación de resistencias de cierre es [11].

1.8.4. Datos de parámetros necesarios como entrada para el interruptor

En este apartado se van a identificar alguno de los datos genéricos requeridos por el usuario para implementar el modelo de interruptor dentro de los diferentes programas de transitorios. Por supuesto es imperativo consultar el manual de la versión particular del programa de transitorios elegido.

1. Nombre de los nudos entre los que se encuentra conectado el interruptor en el circuito. Es aconsejable no poner dos interruptores en paralelo, debido a las dificultades con la división de corriente entre dos nudos cortocircuitados.
2. Tiempo en el que el interruptor se va a cerrar. (Para los interruptores controlados por tiempo)
3. Tiempo en el que el interruptor se va a abrir. (Para los interruptores controlados por tiempo)
4. Margen de corriente para el que el interruptor puede verse obligado a abrir. (Para los interruptores controlados por tiempo)
5. Tiempo medio de cierre o el momento en el que se intenta cerrar el interruptor automático. (Interruptor "STATISTICS")
6. La desviación típica, que puede ser calculada como el intervalo de tiempo en el que se cortó la corriente en los tres polos del interruptor dividido entre 6. El factor

- 6 representa la distribución normal de Gauss del interruptor automático de -3σ a $+3\sigma$. (Interruptor “STATISTICS”)
7. Señal OPEN/CLOSE identificada dentro de TACS como una variable que controla si el interruptor está abierto o cerrado, dependiendo del valor de la señal (solo para el interruptor TACS). Esta señal TACS podría servir como salida del relé para accionar el interruptor automático.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es mostrar el modelo de un sistema de prueba de relés elaborado por el IEEE PSRC WG (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power System Relaying Committee, Working Group): “Reference Network for Transmission Line Relay Testing” y algunas de sus posibilidades de trabajo. A través de la simulación con el programa ATP, se han elaborado una serie de casos que pondrán de manifiesto dichas posibilidades:

1. Análisis de diferentes tipos de faltas sobre la línea de transporte.
2. Estudio de la característica de magnetización de un transformador de intensidad y su obtención de manera experimental.
3. Estudio de modelos para obtención de valores eficaces y de fasores.
4. Estudio de una protección de sobreintensidad.

Ha sido necesario trabajar con el programa ATP a través de su preprocesador ATPDraw y en algún momento se ha entrado directamente a dicho programa ATP. La utilización de este programa ha sido también uno de los objetivos principales del trabajo.

3. ENSAYO DE FALTAS DEL SISTEMA IEEE PSRC WG: “Reference Network for Transmission Line Relay Testing”

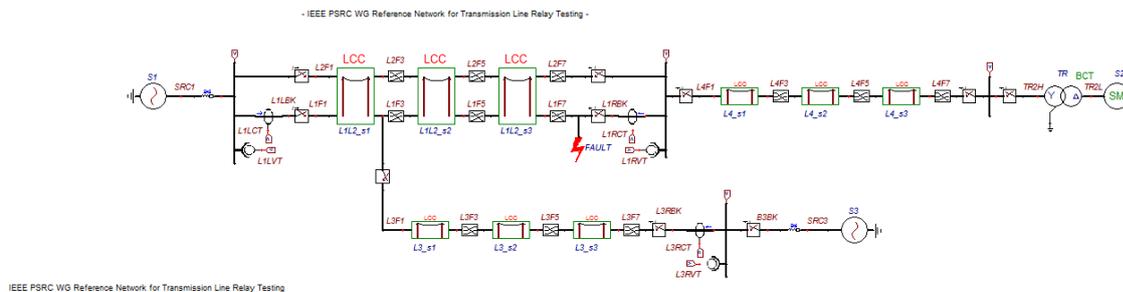


Figura 3.1. Sistema IEEE PSRC WG

Como se indica en el inicio del proyecto uno de los objetivos principales es el estudio de la línea de transporte. Primero se comenzaba con un análisis detallado de cada uno de los elementos que conforma el sistema eléctrico en la introducción del proyecto. Dando paso así al ensayo de la simulación de faltas sobre el sistema.

El sistema consta de cuatro líneas de transporte, dos de ellas acopladas entre sí, conectadas en paralelo, se trata de las líneas L1 y L2. Y una tercera línea L3, que aparece al ramificarse la línea L1. Para poder realizar un estudio detallado del sistema es necesario realizar las máximas combinaciones posibles de las conexiones que admite este sistema eléctrico, es decir, conviene estudiar la línea L1 aislada, con L2 y L3 desconectadas, la línea L1 y L2 con L3 desconectada, y la línea L1 y L3 con L2 desconectada. Los sensores que devuelven información sobre el estado de la línea de transporte se encuentran sobre L1, por ello no tiene ningún sentido la desconexión de esta y todos los casos anteriormente citados tienen esta línea conectada. Inicialmente se comprueba que el sistema funciona correctamente sin ningún tipo de error ante cualquier tipo de conexión, por lo que directamente se puede pasar al ensayo de faltas sobre la línea. Para la diseñar las faltas se ha creado previamente un módulo específico llamado “FAULT”, que permite definir cualquier tipo de faltas sobre el sistema, pudiendo localizar este módulo en cualquier posición conveniente para el desarrollo completo del ensayo.

A continuación, se encuentran de manera detallada los casos más representativos, pero se han generado y guardado los ficheros .pl4 con los resultados de todos los casos posibles de conexión y con faltas de tipo monofásica, bifásica y bifásica a tierra, por si en un futuro fueran necesarios.

3.1. CASO 1: ESTUDIO DE LA LÍNEA L1 CON L3 DESCONECTADA

Para este caso se debe desconectar la línea L3, liberándola del sistema donde en un inicio está conectada con la línea L1. Para realizar dicha maniobra se abren los interruptores que se encuentran entre los nudos L1F3 y L3F1. En la figura 2, aparece ilustrada la forma de liberar el interruptor. Para ello se programa su apertura en un tiempo fuera del intervalo de estudio, y se hace coincidir el tiempo de cierre con el tiempo de operación. También se debe comprobar que el resto de interruptores de la línea de transporte se encuentren conectados (cerrados).

Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl_1	s	10	IN1	ABC	L1F3
T-op_1	s	10	OUT1	ABC	L3F1
T-cl_2	s	10			
T-op_2	s	10			
T-cl_3	s	10			
T-op_3	s	10			
Imar	Amps	0			

Figura 3.2. Interruptor de conexión de la línea L3

1 FALTA MONOFÁSICA SOBRE LA FASE A

1.1 Falta monofásica en la fase A con resistencia de falta próxima a cero

1.1.1 Localización del módulo de faltas en la posición L1F7-L1RBK

Se sitúa el módulo de faltas sobre la línea 1, entre los nudos L1F7-L1RBK. Se modela la falta de forma que se realice un cortocircuito en la fase A de la línea 1, en el instante 0.05 s y se modifica el valor de la resistencia de falta para esta fase, dándole un valor de $10^{-7} \Omega$, que es un valor muy próximo a cero, pero sin llegar a serlo, debido a que en el caso de modelar dicha resistencia como una de cero ohmios el programa devolvería un error.

Estos parámetros se modifican haciendo doble clic sobre el módulo de falta, quedando de la siguiente forma:

Attributes			Attributes		
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-op-BC	s	10	IN	ABC	L1F1
T-cl-CA	s	10			
T-op-CA	s	10			
T-cl-AG	s	0.05			
T-op-AG	s	10			
T-cl-BG	s	10			
T-op-BG	s	10			
T-cl-CG	s	10			

Attributes			Attributes		
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-op-CG	s	10	IN	ABC	L1F7
Rf_G	Ohm	1E-6			
Rf_AG	Ohm	1E-7			
Rf_BG	Ohm	1E-6			
Rf_CG	Ohm	1E-6			
Rf_AB	Ohm	1E-6			
Rf_BC	Ohm	1E-6			
Rf_CA	Ohm	1E-6			

Figura 3.3. Módulo de faltas

Como se trata de una falta monofásica, el cortocircuito solo se realiza en la fase A, por ello dentro del módulo de faltas es el único interruptor que se debe cerrar en el instante 0.05s. Esto queda patente en las figuras anteriores, ya que se puede ver que los interruptores de las siguientes fases se cerrarán a los 10 segundos, un valor de tiempo que no afecta al ensayo, porque es coincidente con el tiempo de estudio en el que se ha programado el sistema. Lo mismo sucede con la resistencia de faltas, que debe ser muy próxima a cero en todos los casos.

Para saber a priori si está bien definida la falta y si se ejecuta correctamente el cortocircuito, en la fase en la que se ha programado, basta con observar las tensiones en el inicio de la línea en el Bus 1.

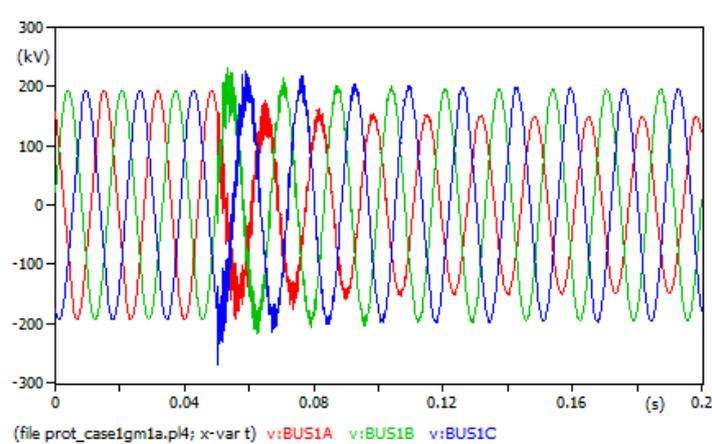


Figura 3.4. Tensiones para la falta monofásica con $Rf_AG \approx 0 \Omega$ y módulo de faltas en la posición L1F7

Al realizar la simulación se comprueba que la falta se ha producido en la fase A, por tanto el sistema responde correctamente ante este tipo de falta.

El cortocircuito afecta tanto a la tensión como a la intensidad, por ello en el sistema también se han situado sensores de corriente en el punto L1LBK-L1F1.

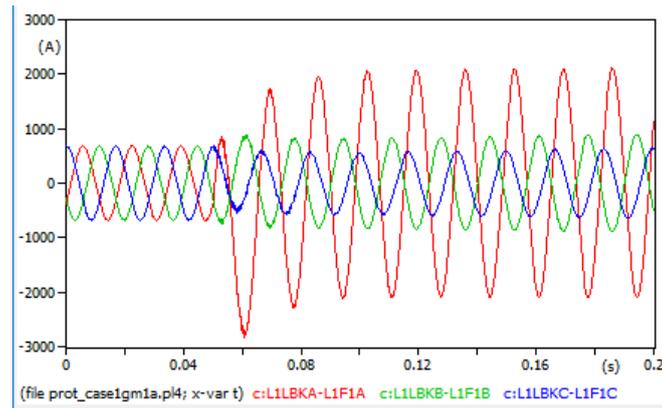


Figura 3.5. Intensidades para la falta monofásica con $Rf_{AG} \approx 0 \Omega$ y el módulo de faltas en L1F7

Al producirse un cortocircuito sobre la fase A, la tensión de esta fase disminuye y la de las fases B y C aumenta. Otra consecuencia inmediata es el cambio brusco de intensidad en la fase en la que se ha producido dicho cortocircuito, aumentando drásticamente la intensidad que recorre dicha fase. Por este tipo de situaciones se estudian las protecciones, para poder responder en el caso en que se produzcan fallos, ya que si no se pone en peligro el funcionamiento de la línea de transporte.

1.1.2 Localización de la falta en el nudo L1F1

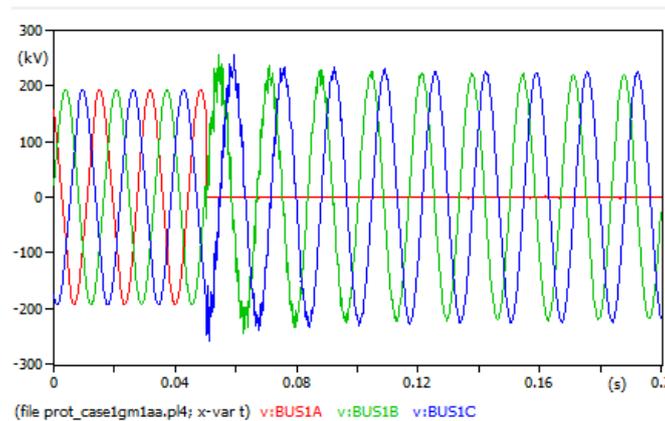


Figura 3.6. Tensiones para la falta monofásica con $Rf_{AG} \approx 0 \Omega$ y módulo de faltas en la posición L1F1

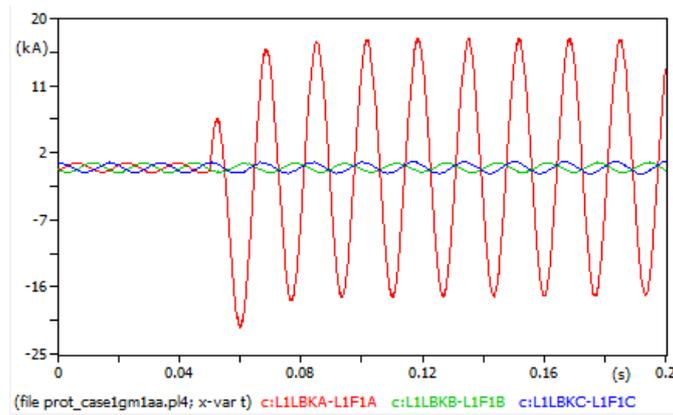


Figura 3.7. Intensidades para la falta monofásica con $Rf_{AG} \approx 0 \Omega$ y el módulo de faltas en L1F1

Al situar la falta más próxima al inicio de la línea se observa el cortocircuito de una forma más clara, haciéndose cero la tensión en la fase donde está programado el corto. Sin embargo aunque difieran los resultados numéricos al modificar la localización del módulo de faltas, la respuesta cualitativamente en ambos casos es la misma. Una fuerte disminución de la tensión en la fase donde se realiza el cortocircuito, y un aumento de las tensiones de las fases B y C. Y en el caso de las intensidades, la intensidad en la fase A, al ser la fase afectada responde con un aumento desmesurado de la intensidad.

1.2 Resistencia de falta igual a 10Ω

Siguiendo dentro del caso de la falta monofásica sobre la fase A, se va a realizar una modificación en la resistencia de falta de esta fase, pasando de un valor prácticamente cero a 10Ω . Como se explica en el inicio del documento se quiere realizar un estudio exhaustivo sobre cómo afectan las faltas al sistema eléctrico.

1.2.1 Localización del módulo de faltas en la posición L1F7-L1RBK

Igual que en caso de la resistencia prácticamente nula, se va a posicionar el módulo de faltas en diferentes lugares de la línea, para poder llegar a una conclusión general sobre el fallo, como en el caso anterior. Independientemente de la posición de la falta, ante un mismo fallo la respuesta debe ser similar.

Después de modificar dentro del módulo de faltas la resistencia, se activa la simulación y utilizando el programa auxiliar XYPlot se puede abrir el archivo .pl4 que se ha generado, donde se tiene gráficamente la respuesta de la línea de transporte ante el tipo de falta que se ha diseñado. Este programa XYPlot se utilizará durante todo el ensayo para visualizar la respuesta de la línea de transporte.

A continuación aparecen las figuras correspondientes a los gráficos de tensiones e intensidades para el caso en el que la falta se sitúa en el nudo L1F7.

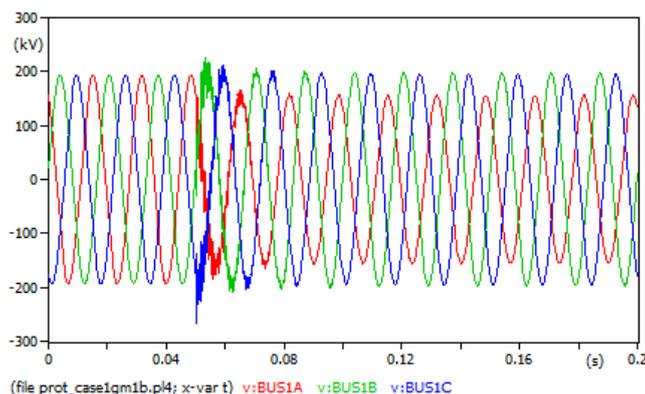


Figura 3.8. Tensiones para la falta monofásica con $Rf_AG=10 \Omega$ y el módulo de faltas en LIF7

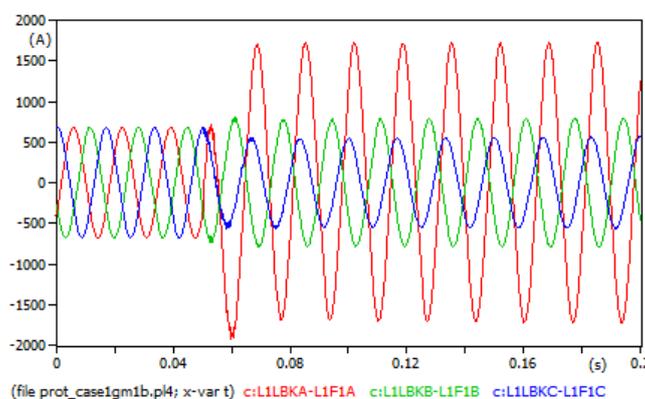


Figura 3.9. Intensidades para la falta monofásica con $Rf_AG=10 \Omega$ y el módulo de faltas en la posición LIF7

1.2.2 Localización de la falta en la posición L1F1

El siguiente paso es trasladar la falta a posición L1F1 y volver a realizar la simulación para obtener la respuesta gráfica de intensidad y tensión del sistema.

Gráfica de tensiones

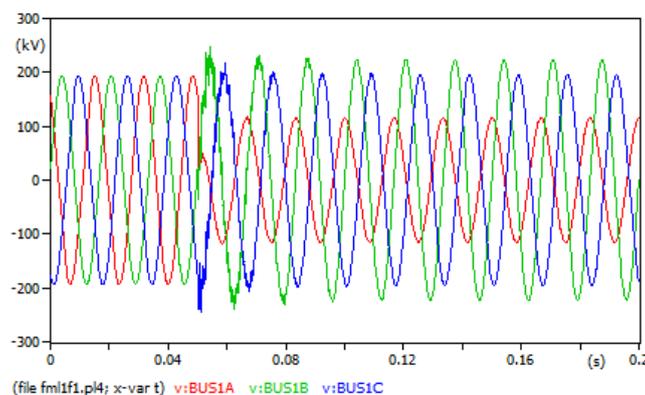


Figura 3.10. Tensiones para la falta monofásica con $Rf_AG=10 \Omega$ y módulo de faltas en la posición L1F1

Gráfica de intensidades

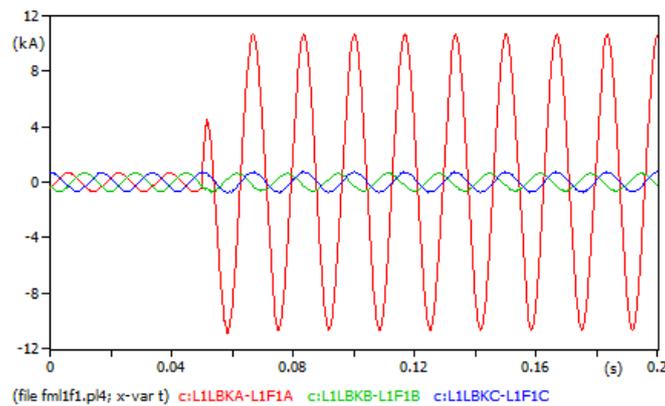


Figura 3.11. Intensidades para la falta monofásica con $R_{f_AG}=10 \Omega$ y módulo de faltas en la posición L1F1

Basándose en el efecto teórico que produce un cortocircuito, para el mismo tipo de falta monofásica en la fase A, los dos sistemas responden igual aunque tengan diferente resistencia de falta, tendiendo hacer cero la tensión en la fase en la que se ha producido el fallo. Pero la diferencia entre el caso de resistencia de falta prácticamente cero y el caso en que la resistencia de falta es de diez ohmios radica en la respuesta de la intensidad, debido a que al tener mayor resistencia de falta, la intensidad debe de ser menor

2 FALTA BIFÁSICA EN LAS FASES B Y C

Dentro del mismo tipo de conexión con la línea L3 desconectada, se va a modificar el tipo de falta. Si se parte del caso anterior, se debe restablecer, el interruptor de la fase A a tierra (AG) se definirá con un tiempo de cierre de 10 segundos para que no afecte a la línea de transporte sobre la que estamos trabajando. Para modelar una falta bifásica, se va a cerrar el interruptor de la fase BC del módulo de faltas en el instante 0.05s. E igual que se hacía para la falta monofásica se realizarán los ensayos para diferentes posiciones de la falta y con dos resistencias de falta diferentes.

2.1 Ensayo con resistencia de falta próximo a cero

2.1.1 Localización del módulo de faltas en la posición L1F7-L1RBK

Se ejecuta el programa con $R_{f_BC}=10^{-7} \Omega$ (resistencia de falta BC) y $t_{cl_BC}=0.05$ s (tiempo de cierre del interruptor).

Tensiones en el inicio de la línea 1:

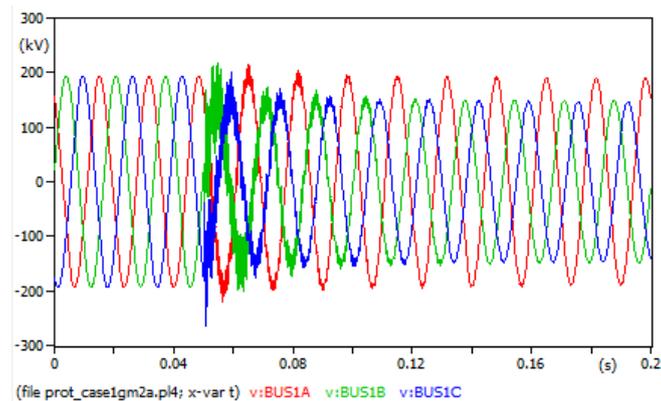


Figura 3.12. Tensiones para la falta bifásica con $R_{f_BC} \approx 0 \Omega$ y módulo de faltas en L1F7

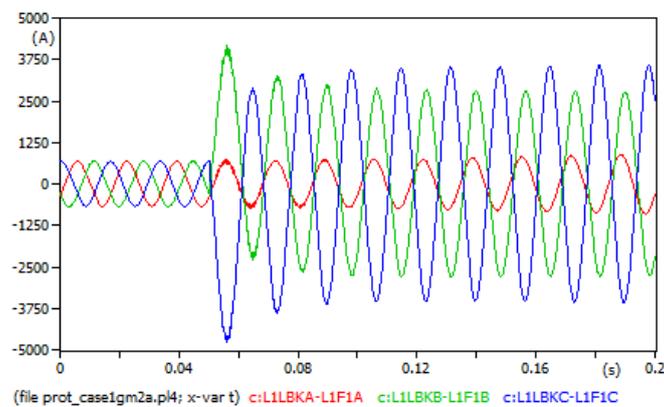


Figura 3.13. Intensidades para la falta bifásica con $R_{f_BC} \approx 0 \Omega$ y módulo de faltas en L1F7

Se observa que la respuesta corresponde con la falta programada, ya que se ha definido el cortocircuito en las fases B y C y son las que se han visto afectadas al ejecutar el programa. Lo que conlleva en el caso de las intensidades un drástico aumento en las fases en la que se produce el fallo.

2.1.2 Localización de la falta en L1F1

Es importante que el estudio sea representativo de la realidad. Es por ello por lo que no sirve generalizar la respuesta del sistema, sin antes contrastar que realmente la respuesta depende más del tipo de falta que de la posición de esta. Por ello a continuación se realizan los mismos pasos pero con el módulo de faltas en L1F1.

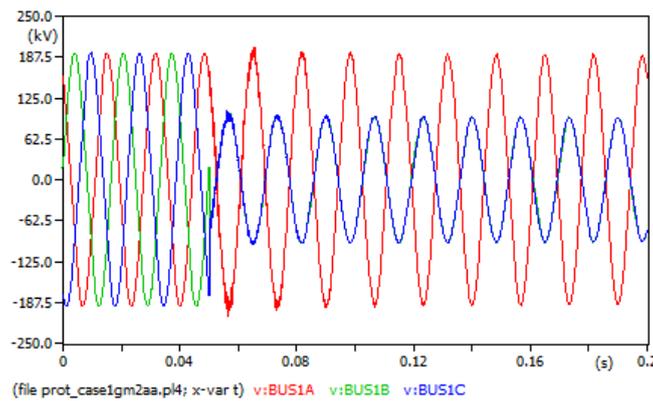


Figura 3.14. Tensiones para la falta bifásica con $R_{f_BC} \approx 0 \Omega$ y módulo de faltas en L1F1

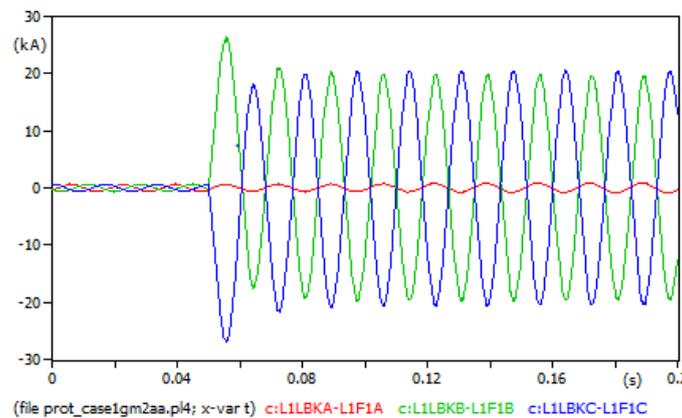


Figura 3.15. Intensidades para la falta bifásica con $R_{f_BC} \approx 0 \Omega$ y módulo de faltas en L1F1

En la falta monofásica ya se estudiaba la diferencia de la respuesta del sistema según la posición en la que se localizaba la falta, tanto en el caso de la falta monofásica como en el de la bifásica ocurre que al acercarse la falta al punto de estudio, se amplifican las magnitudes obtenidas de tensión e intensidad. En este caso se observan también otra diferencia cuando la falta se localizaba lejos del punto de estudio se veía que las tensiones de las fases sobre las que se producía el cortocircuito salían de su régimen estacionario y disminuían su valor de pico, ahora en esta posición estas dos fases se hacen coincidentes. Por otro lado la intensidad reacciona de la misma forma, pero con valores de pico diferentes.

2.2 Falta bifásica con resistencia de falta mayor de cero

2.2.1 Localización del módulo de faltas en la posición L1F7-L1RBK

En este ensayo se va a modificar la resistencia de falta, dándole un valor de 10Ω . El resto de valores del módulo de faltas se dejan como en el apartado anterior, porque lo que se quiere estudiar es cómo afecta la resistencia de falta a la respuesta del sistema.

Gráfico de tensiones:

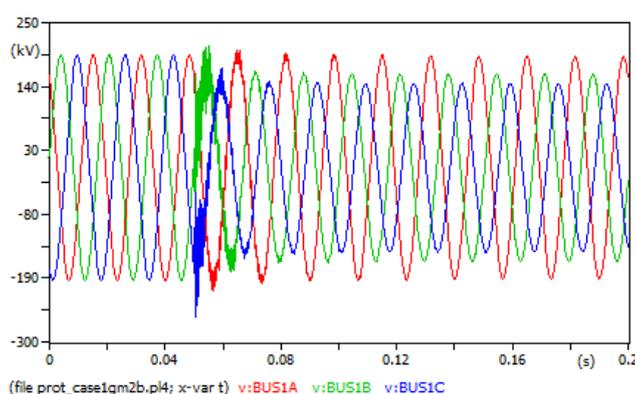


Figura 3.16. Tensiones para la falta bifásica con $Rf_{BC}=10 \Omega$ y módulo de faltas en L1F7

Gráfico de intensidades:

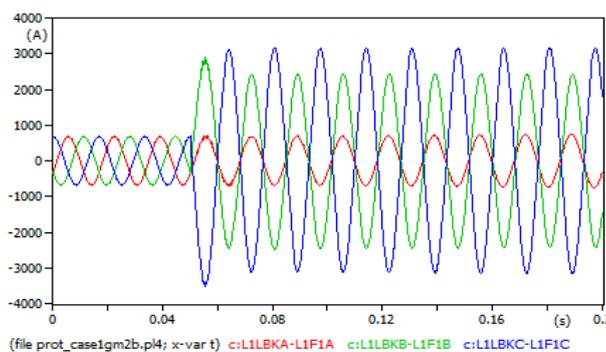


Figura 3.17. Intensidades para la falta bifásica con $Rf_{BC}=10 \Omega$ y módulo de faltas en L1F7

Como sucedía en el apartado 1.2, al aumentar la resistancia de falta, las intensidades disminuyen. En las fases en las que se produce el cortocircuito, en este caso las fases B y C, hay un aumento importante de la intensidad.

2.2.2 Localización de la falta en L1F1

Gráfico de intensidades:

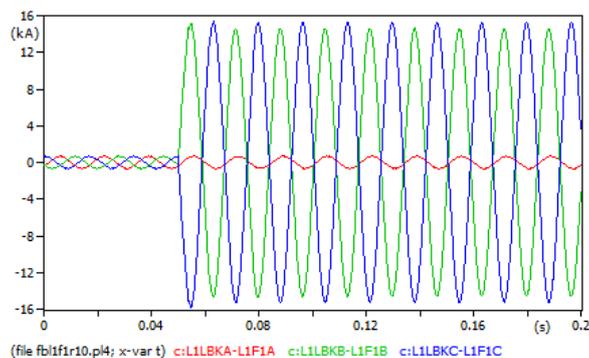


Figura 3.18. Intensidades para la falta bifásica con $Rf_{BC}=10 \Omega$ y módulo de faltas en L1F1

Siguiendo la regla de los ensayos de falta monofásica, la magnitud de la respuesta depende de lo próxima que se encuentre la falta al inicio del sistema, por lo que en el momento en el que se localice la falta en L1F1 la respuesta va a ser mucho más evidente, con valores de intensidades de pico mucho más elevadas.

El motivo por el que cuanto más próxima se encuentra la falta al inicio del sistema, mayor es el efecto del cortocircuito, es debido, a que en el inicio del sistema eléctrico, se encuentra una red de gran potencia, es por ello, por lo que al acercarse a ese punto las corrientes aumentan y las tensiones mantienen formas de onda prácticamente senoidales y al alejarse se distorsionan mucho más.

3.2. CASO 2: ESTUDIO DE LA LÍNEA L1 CON L2 DESCONECTADA

En este caso, se estudia el comportamiento de la línea L1 con L3 conectada y L2 desconectada. Para poder realizar este tipo de configuración, habrá que desconectar los dos interruptores que mantienen a L2 conectada en paralelo con L1 y conectar L3 ya que en el caso anterior se había desconectado. La forma de programar los interruptores aparece definida en la figura 2, y simplemente habrá que adaptarla a este caso.

Una vez realizadas las correspondientes maniobras de programación y comprobación de conexiones se ejecuta el programa. Los resultados obtenidos, tanto para la falta monofásica con resistencia de falta próxima a cero, y con resistencia de 10Ω y bifásica con resistencia de falta próxima a cero y de 10Ω , son similares que para el caso anterior en el que se tenía otro tipo de conexión. Es debido a que es el mismo tipo de falta la que se ha programado y situada en el mismo punto de la línea L1 (L1F1 y L1F7).

Sin embargo en el caso 1, donde la línea desconectada del sistema es L3, al realizar los ensayos en el punto L1F3, nudo donde se encuentra el interruptor que une L1 y L3, la simulación devolvía error. El sistema comenzaba deformado desde el instante cero, independientemente del instante en el que se programase la falta. Pero en este caso 2, no se produce este tipo de error, debido a que el interruptor en dicho nudo permanece conectado. A continuación se añade este nuevo ensayo para añadir información al estudio del sistema eléctrico. Y comprobar la perturbación que causa al sistema y si afecta a la conexión de ambas líneas.

1 FALTA MONOFÁSICA CON MÓDULO DE FALTAS EN L1F3

La falta monofásica se programa en la fase A.

1.1 Resistencia de falta prácticamente nula

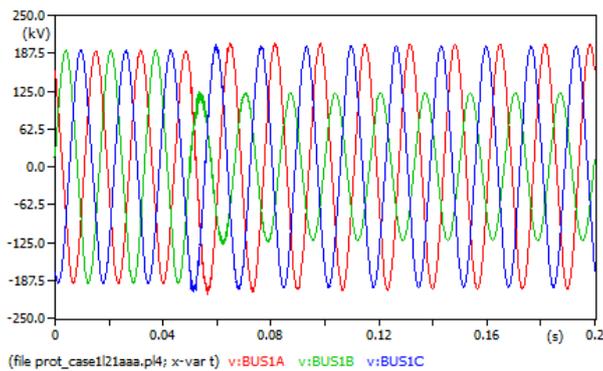


Figura 3.19. Tensiones para falta monofásica en L1F3 y con $R_f \approx 0 \Omega$

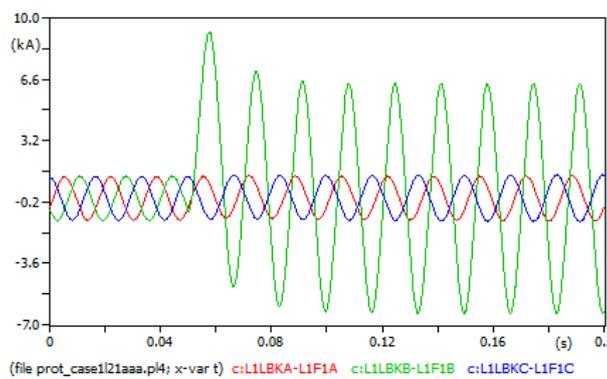


Figura 3.20. Intensidades para falta monofásica en L1F3 y con $R_f \approx 0 \Omega$

1.2 Resistencia de falta 10Ω

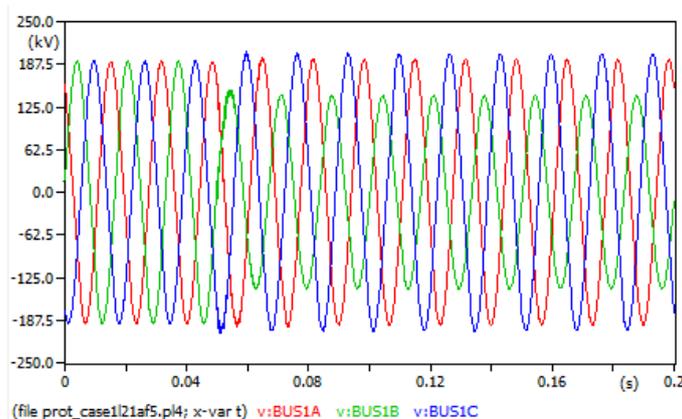


Figura 3.21. Tensiones para falta monofásica en L1F3 y $R_f = 10 \Omega$

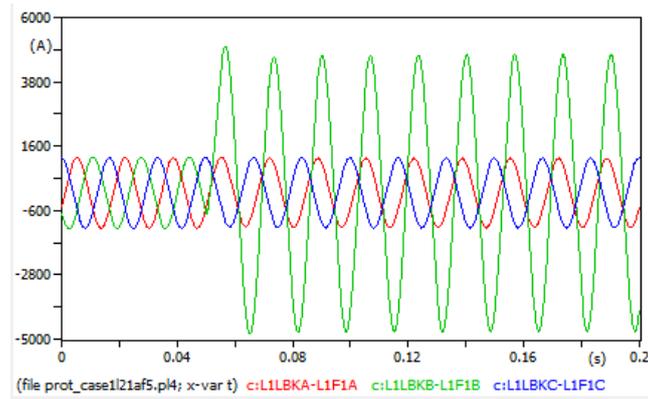


Figura 3.22. Intensidades para falta monofásica en L1F3 y $R_f=10 \Omega$

2 FALTA BIFÁSICA CON MÓDULO DE FALTAS EN L1F3

La falta bifásica se programa en las fases B y C.

2.1 Resistencia de falta prácticamente nula

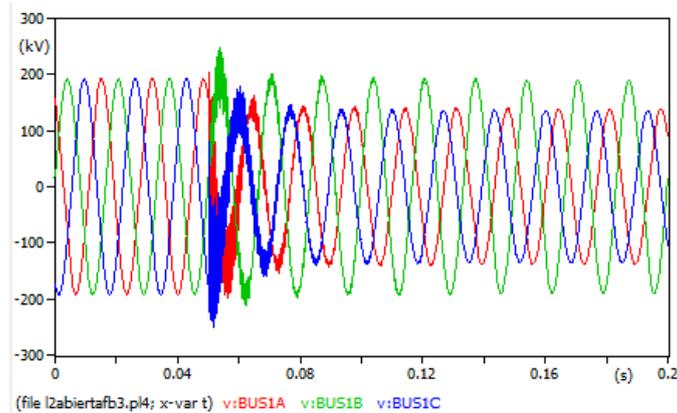


Figura 3.23. Tensiones para falta bifásica en L1F3 y $R_f \approx 0 \Omega$

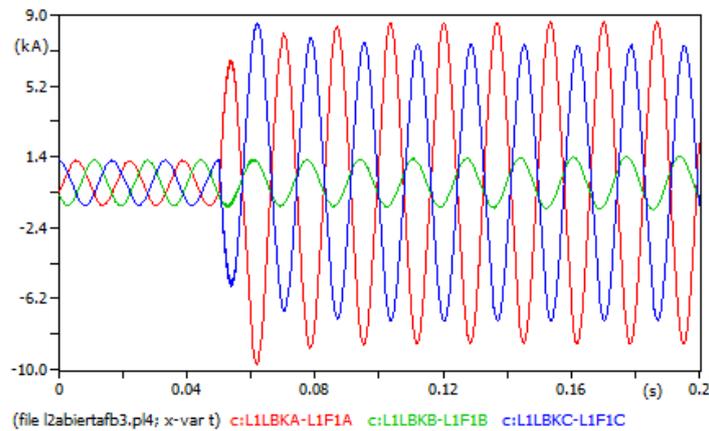


Figura 3.24. Intensidades para falta bifásica en L1F3 y $R_f \approx 0 \Omega$

2.2 Resistencia de falta de 10Ω

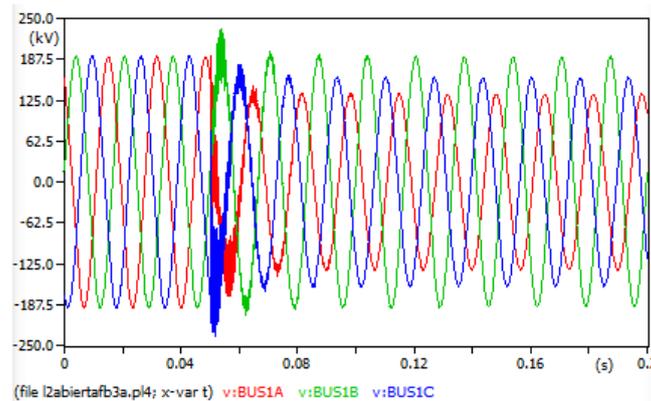


Figura 3.25. Tensiones para falta bifásica en L1F3 y $R_f=10 \Omega$

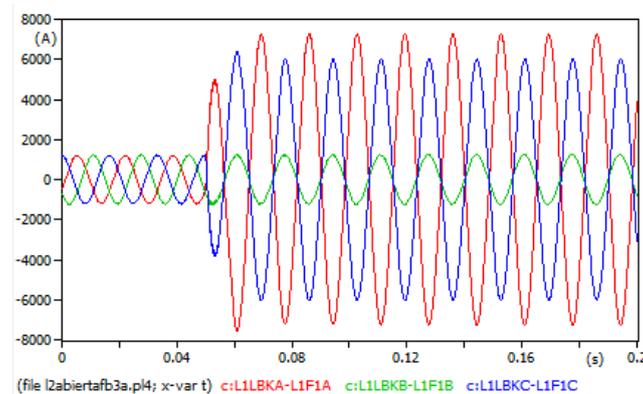


Figura 3.26. Intensidades para falta bifásica en L1F3 y $R_f=10 \Omega$

Análisis sobre la nueva posición de la falta en el nudo L1F3

Si se analizan directamente las gráficas, se podría pensar que no es el resultado esperado. La falta monofásica se programa en A y aparece en B, la falta bifásica se programa en B y C y se produce en A y C, tanto para los casos de resistencia de falta próxima a cero como para los casos en que tiene un valor de diez ohmios. Esto es debido a que en la línea L1, entre el nudo L1F3, donde se modela la falta, y el nudo L1F1 donde se encuentra el sensor de donde se extrae la respuesta de la línea se encuentra un módulo de trasposición de fases, lo que hace que el punto L1F1, lo que está definido en A se observe en B, lo que se define en B, aparezca en C y lo de C aparezca en A. En la siguiente figura se encuentra señalizado dicho módulo de trasposición de fases.

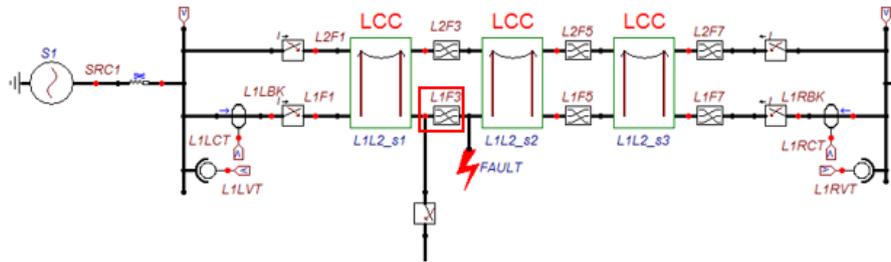


Figura 3.27. Trasposición de fases entre L1F3 y L1F1

Comparación entre las posiciones L1F1, L1F7 y L1F3 de la falta

Este nuevo ensayo sirve para corroborar que a medida que la falta se sitúa más próxima al inicio de la red, mayor es el efecto del cortocircuito. Se producen mayores caídas de tensiones que dan lugar a mayores picos de intensidad en L1F1 después en L1F3 y finalmente en L1F7, que es el más alejado del inicio del sistema.

3.3. CASO 3: SOLUCIÓN DE ERRORES EN LA SIMULACIÓN

Tras realizar el ensayo de las diferentes configuraciones posibles sobre la línea de transporte, se ha observado que al desconectar la línea L3, ya sea con la línea L2 conectada o desconectada, al situar el módulo de faltas en la posición L1F3 o L1F5, y ejecutar el programa, este responde con el fallo desde el instante cero, siendo independiente del instante en el que se ha programada la falta, del tipo de falta, y de la resistencia de falta que se defina. A continuación aparece una figura mostrando la respuesta del sistema ante este problema.

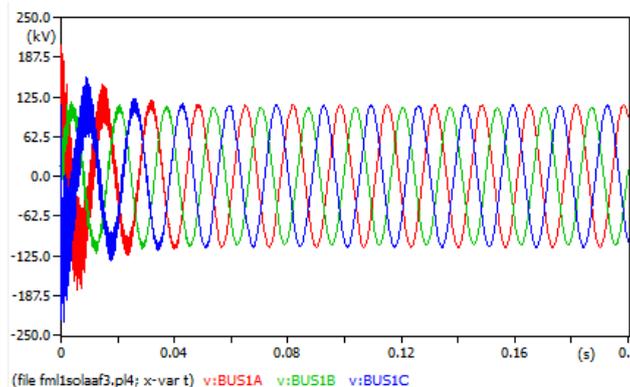


Figura 3.28. Tensiones para el caso en el que el módulo de faltas se sitúa en L1F3, estando L3 desconectada

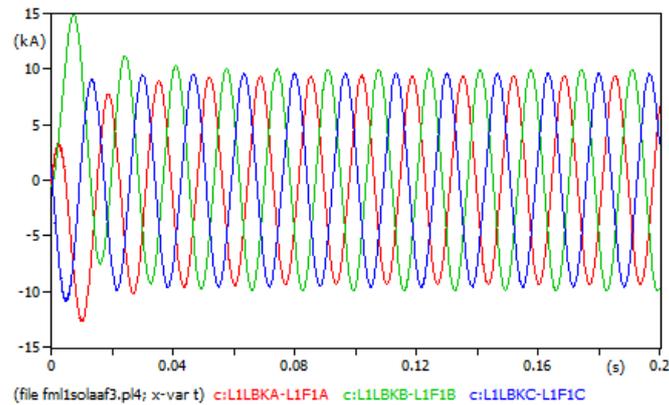


Figura 3.29. Intensidades para el caso en el que el módulo de faltas se sitúa en L1F3, estando L3 desconectada

Las figuras superiores pertenecen a la simulación de la línea de transporte con L2 y L3 desconectadas, pero como se explica anteriormente, se ha comprobado que en todos los casos que L3 está desconectado si se posiciona la falta en L1F3 y L1F5, se obtiene la misma respuesta.

Para resolver este fallo de simulación en lugar de ejecutar el circuito diseñado en ATPDraw con su respectivo módulo de faltas, se modela el archivo .ATP del circuito, modificando el código, programando directamente la falta sobre este.

A continuación se van a programar el código correspondiente para la simulación de faltas directamente con el compilador TPBIG de GNUATP.

ESTUDIO DE LA LÍNEA L1 CON L2 CONECTADA Y L3 DESCONECTADA

Para mostrar los casos más representativos y evitar repeticiones, se va a estudiar la línea L1 con L2 conectada y L3 desconectada y los resultados se hacen extensibles al ensayo con L2 también desconectada, ya que se ha comprobado que sirve la misma solución para ambos casos.

1 FALTA MONOFÁSICA

Se va a trabajar sobre el archivo ATP de la línea de transporte para el caso en el que la línea L2 está conectada y L3 está desconectada. En este apartado el objetivo es realizar una falta monofásica, por ejemplo en la fase A, sobre la posición L1F3, que es la que devuelve un resultado erróneo al situar el módulo de faltas en esta posición. Para ello dentro del archivo .ATP, se debe localizar la posición de los interruptores ('SWITCH'), ya que son los que permiten definir la falta al cerrarlos en un determinado instante.

```

/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
BUS1A L2F1A -1. 10. 1
BUS1B L2F1B -1. 10. 1
BUS1C L2F1C -1. 10. 1
L1LBKAL1F1A -1. 10. 1
L1LBKBL1F1B -1. 10. 1
L1LBKCL1F1C -1. 10. 1
BUS2A L2F7A -1. 10. 1
BUS2B L2F7B -1. 10. 1
BUS2C L2F7C -1. 10. 1
L1RBKAL1F7A -1. 10. 1
L1RBKBL1F7B -1. 10. 1
L1RBKCL1F7C -1. 10. 1
L1F3A L3F1A 10. 10. 0
L1F3B L3F1B 10. 10. 0
L1F3C L3F1C 10. 10. 0
B3BKA BUS3A -1. 10. 1
B3BKB BUS3B -1. 10. 1
B3BKC BUS3C -1. 10. 1
L3RBKAL3F7A -1. 10. 1
L3RBKBL3F7B -1. 10. 1
L3RBKCL3F7C -1. 10. 1
BUS4A L4F7A -1. 10. 1
BUS4B L4F7B -1. 10. 1
BUS4C L4F7C -1. 10. 1
TR2HA BUS4A -1. 10. 1
TR2HB BUS4B -1. 10. 1
TR2HC BUS4C -1. 10. 1
L4F1A BUS2A -1. 10. 1
L4F1B BUS2B -1. 10. 1
L4F1C BUS2C -1. 10. 1
L1F3A 0.05 10.

```

Figura 3.30. Interruptores

Se ha definido el cierre del interruptor en la posición L1F3A (de la fase A) a tierra (ya que el blanco que aparece tras L1F3A significa conectado a tierra), en el instante 0.05 s.

Como para todos los apartados anteriores se estudiaba la diferencia entre una resistencia de falta de 0 Ω y 10 Ω , en este caso, se va a realizar el mismo estudio, modificando pertinentemente las resistencias en el código del circuito.

1.1 Resistencia de falta próxima a cero

Elimino las resistencias que quedan sueltas en la línea al haber modificado el interruptor que produce la falta.

1XX0007	1.E-5	1.E-5	2.E3	
2BUS3C L3RBKC	1.E-5	1.E-5	5.	
XX0007L3RCTC	.75			0
L3RCTC	4.			0
XX0008XX0039	1.E-6			0
XX0009XX0013	1.E-6			0
XX0010XX0038	1.E-6			0
L1F7C XX0013	1.E-6			0
L1F7B XX0039	1.E-6			0
XX0040	1.E-6			0
XX0002L1RCTA	.75			0
L1RCTA	4.			0
TRANSFORMER	.0198	.2851	TX0020 3.2E8	0

Ya que en el interruptor se eliminaban las líneas, que aparecen en la siguiente figura:

XX0038XX0008	10.	10.	0
XX0039XX0009	10.	10.	0
XX0013XX0010	10.	10.	0
XX0038XX0040	.05	10.	0
XX0039XX0040	10.	10.	0
XX0013XX0040	10.	10.	0

Para poder definir directamente la falta en L1F3.

Al simularlo queda la falta de la siguiente forma:

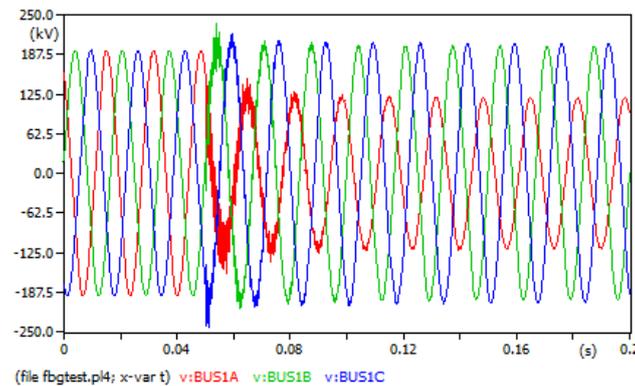


Figura 3.31. Tensiones al aplicar la falta en L1F3, falta monofásica, con L3 desconectada y $R_f \approx 0 \Omega$

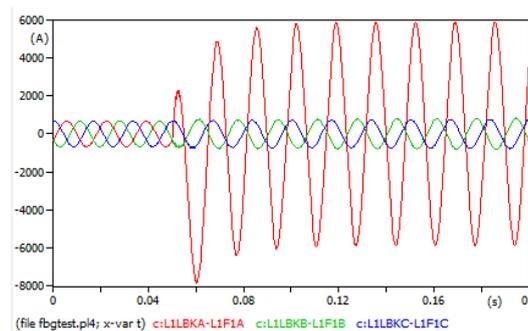


Figura 3.32. Intensidades al aplicar la falta en L1F3, falta monofásica, con L3 desconectada y $R_f \approx 0 \Omega$

1.2 Resistencia de falta 10 Ω

Para el estudio de la falta con resistencia de falta de 10 Ω , es necesario realizar algunas modificaciones sobre el código de programa que se va a ejecutar. Se debe nombrar un nudo adicional para poder conectar la resistencia de falta. En este caso se está trabajando sobre el nudo L1F3 en la fase A, por lo que se nombra un nudo adicional L1F3XA y entre este y tierra se conecta la resistencia.

L1F3A	L1F3XA	0.05	10.
-------	--------	------	-----

Y la resistencia va añadida en el código en el lugar de donde se habían borrado las resistencias que quedaban sueltas en el código, que aparece en el inicio del apartado.

L1F3XA	10.
--------	-----

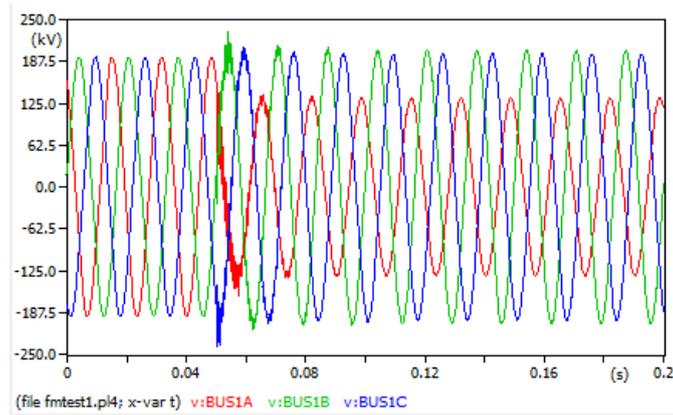


Figura 3.33. Tensiones al aplicar la falta en L1F3, falta monofásica, con L3 desconectada y $R_f=10\Omega$

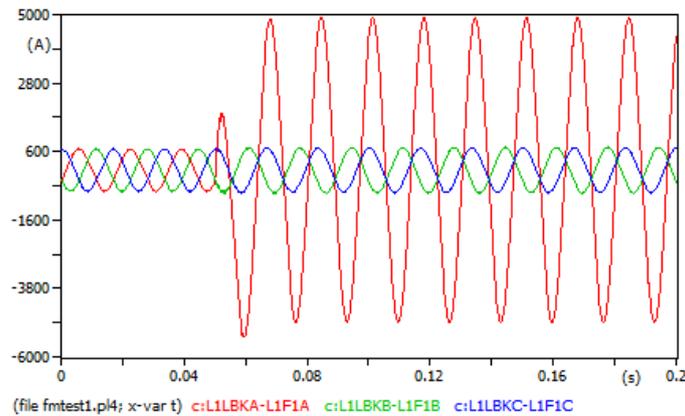


Figura 3.34. Tensiones al aplicar la falta en L1F3, falta monofásica, con L3 desconectada y $R_f=10\Omega$

2 FALTA BIFÁSICA

Para la falta bifásica, se va a diseñar, el caso en el que la falta se encuentra entre las fases A y B, a partir del código implementado para la falta bifásica, realizando los cambios pertinentes. En la siguiente figura se muestra la programación de los interruptores para situar la falta en L1F3. Se ha decidido exponer únicamente el caso de falta bifásica con resistencia de falta prácticamente nula, ya que el añadir la resistencia conlleva las mismas consecuencias que en el resto de casos y no aportaba ninguna variación sobre el estudio de la línea que se ha ido desarrollando.

```

/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
BUS1A L2F1A -1. 10. 1
BUS1B L2F1B -1. 10. 1
BUS1C L2F1C -1. 10. 1
L1LBKAL1F1A -1. 10. 1
L1LBKBL1F1B -1. 10. 1
L1LBKCL1F1C -1. 10. 1
BUS2A L2F7A -1. 10. 1
BUS2B L2F7B -1. 10. 1
BUS2C L2F7C -1. 10. 1
L1RBKAL1F7A -1. 10. 1
L1RBKBL1F7B -1. 10. 1
L1RBKCL1F7C -1. 10. 1
L1F3A L3F1A 10. 10. 0
L1F3B L3F1B 10. 10. 0
L1F3C L3F1C 10. 10. 0
B3BKA BUS3A -1. 10. 1
B3BKB BUS3B -1. 10. 1
B3BKC BUS3C -1. 10. 1
L3RBKAL3F7A -1. 10. 1
L3RBKBL3F7B -1. 10. 1
L3RBKCL3F7C -1. 10. 1
BUS4A L4F7A -1. 10. 1
BUS4B L4F7B -1. 10. 1
BUS4C L4F7C -1. 10. 1
TR2HA BUS4A -1. 10. 1
TR2HB BUS4B -1. 10. 1
TR2HC BUS4C -1. 10. 1
L4F1A BUS2A -1. 10. 1
L4F1B BUS2B -1. 10. 1
L4F1C BUS2C -1. 10. 1
L1F3A L1F3B 0.05 10.
    
```

Figura 3.35. Interruptores para falta bifásica

2.1 Resistencia de falta de cero Ω

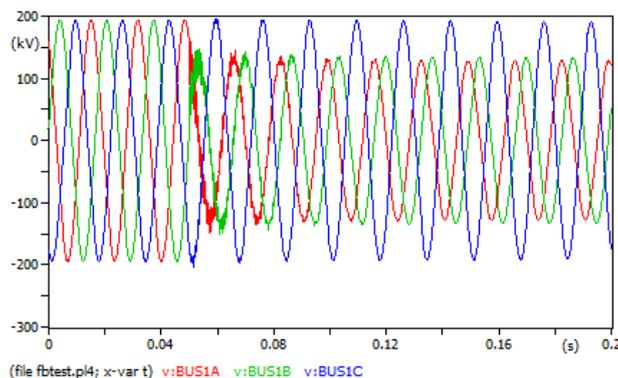


Figura 3.36. Tensiones al aplicar la falta en L1F3, falta bifásica, con L3 desconectada y $R_f \approx 0\Omega$

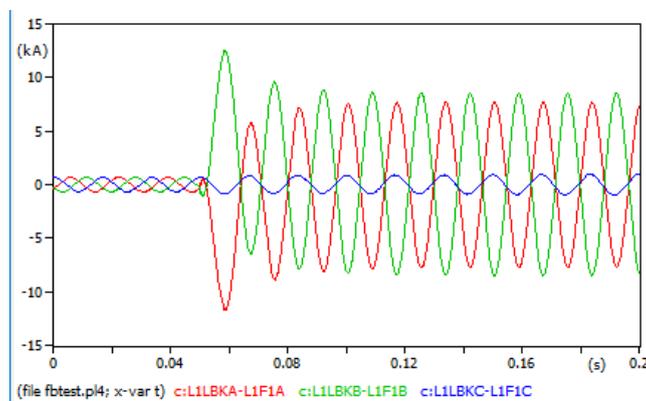


Figura 3.37. Intensidades al aplicar la falta en L1F3, falta bifásica, con L3 desconectada y $R_f \approx 0\Omega$

3.4. CASO 4: MÓDULO DE FALTAS SITUADO SOBRE LA LÍNEA L2

Hasta el momento se habían realizado los ensayos posicionando las faltas sobre la línea L1, pero las faltas no tienen por qué producirse siempre sobre dicha línea. En una situación real, la aparición de la falta puede producirse en cualquier punto del sistema. Por tanto para que el análisis sobre la respuesta del sistema eléctrico ante faltas pueda representar situaciones reales, se va a trasladar la posición de las faltas a la línea L2.

En este caso en el que el módulo de faltas se encuentra L2, si se ejecuta directamente el sistema desde ATPDraw, se produce un fallo desde el instante cero, independientemente del tipo de falta y de la resistencia de falta que se haya modelado. Para solucionar este problema se seguirá el mismo procedimiento que en el caso 3, es decir, ir modificando el código del programa según las especificaciones que sean necesarias para diseñar el sistema.

En este apartado el lugar que ocupa la falta sobre L2 no es tan relevante como lo era en el caso L1, ya que sobre L2 no se produce ninguna ramificación. Por ello para agilizar el estudio se va a situar el módulo de faltas sobre L2F1. Y se va a presentar el ensayo con la línea L3 conectada.

1 FALTA MONOFÁSICA CON L1, L2 Y L3 CONECTADAS

1.1 Resistencia de falta próxima a cero

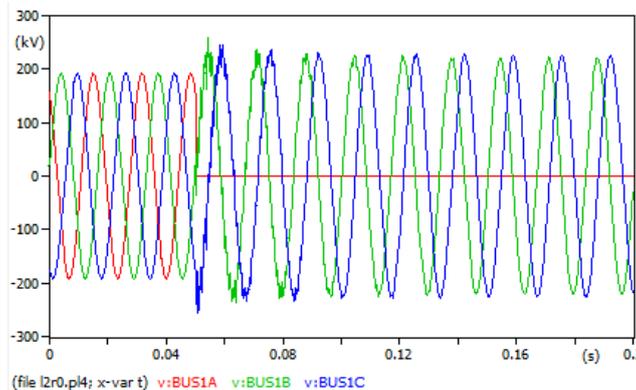


Figura 3.38. Tensiones, con falta monofásica sobre L2, $R_f \approx 0\Omega$

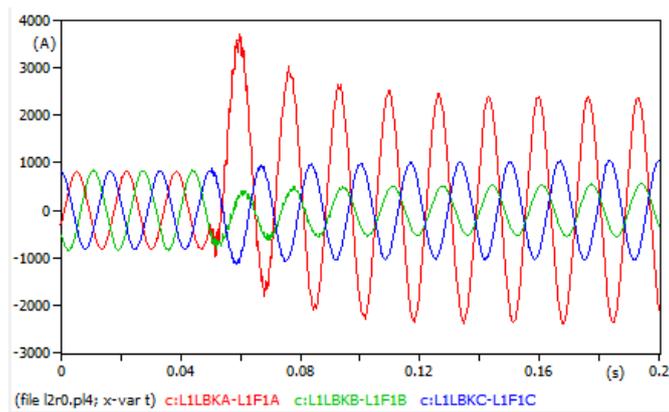


Figura 3.39. Intensidades, con falta monofásica sobre L2, $R_f \approx 0\Omega$

1.2 Resistencia de falta de 10Ω

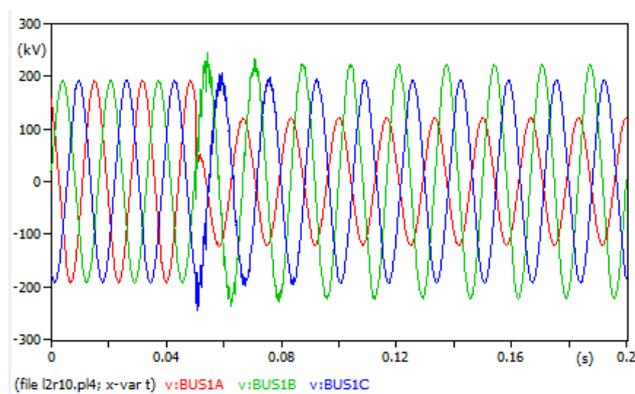


Figura 3.40. Tensiones, con falta monofásica sobre L2, $R_f = 10\Omega$

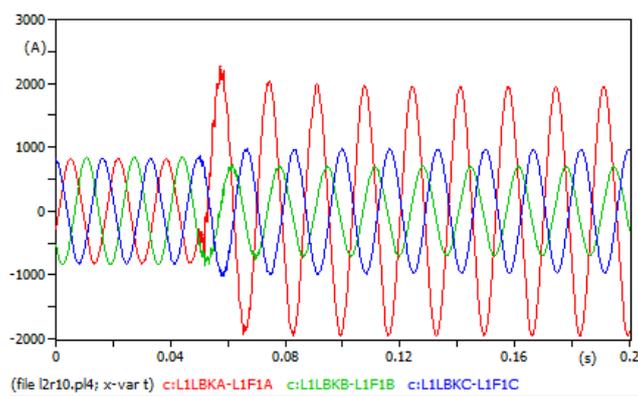


Figura 3.41. Intensidades, con falta monofásica sobre L2, $R_f = 10\Omega$

2 FALTA BIFÁSICA EN A Y B, CON L1, L2 Y L3 CONECTADAS

2.1 Resistencia de falta próxima a cero

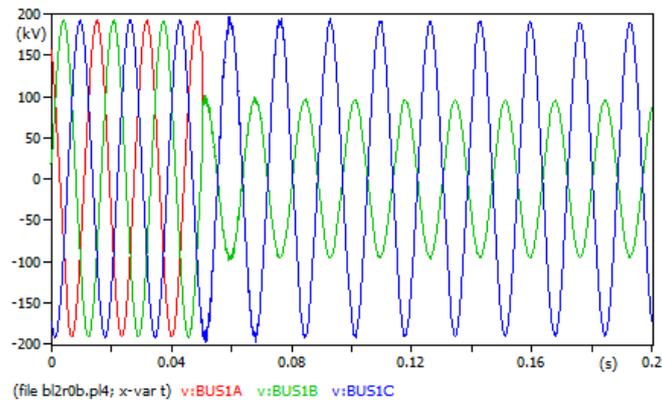


Figura 3.42. Tensiones para falta bifásica sobre L2, y $R_f \approx 0\Omega$

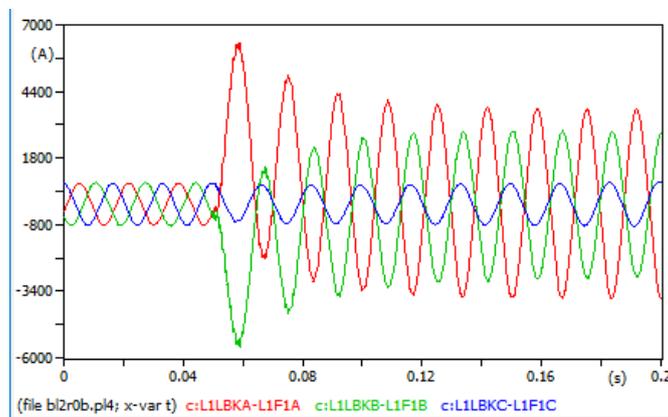


Figura 3.43. Intensidades para falta bifásica sobre L2, y $R_f \approx 0\Omega$

2.2 Resistencia de falta de 10Ω

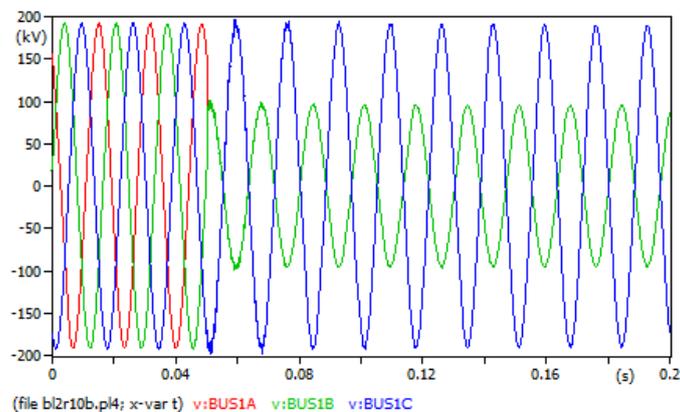


Figura 3.44. Tensiones para falta bifásica sobre L2, y $R_f = 10\Omega$

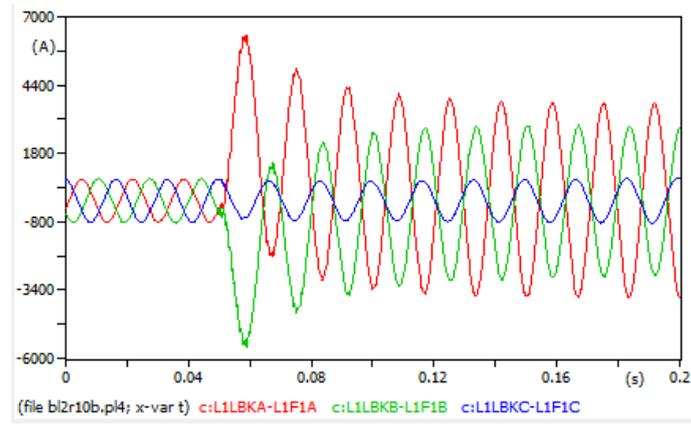


Figura 3.45. Intensidades para falta bifásica sobre L2, y $R_f=10\Omega$

4. RELÉ DE SOBREINTENSIDAD

En este apartado se va a realizar un estudio del funcionamiento de los relés. A partir del sistema original (figura 2) se va a aislar la línea L3, y a esta se le añadirán los módulos correspondientes, que definen el funcionamiento del relé, el circuito correspondiente a dicho relé es el que se encuentra en la figura 61 que aparece a continuación.

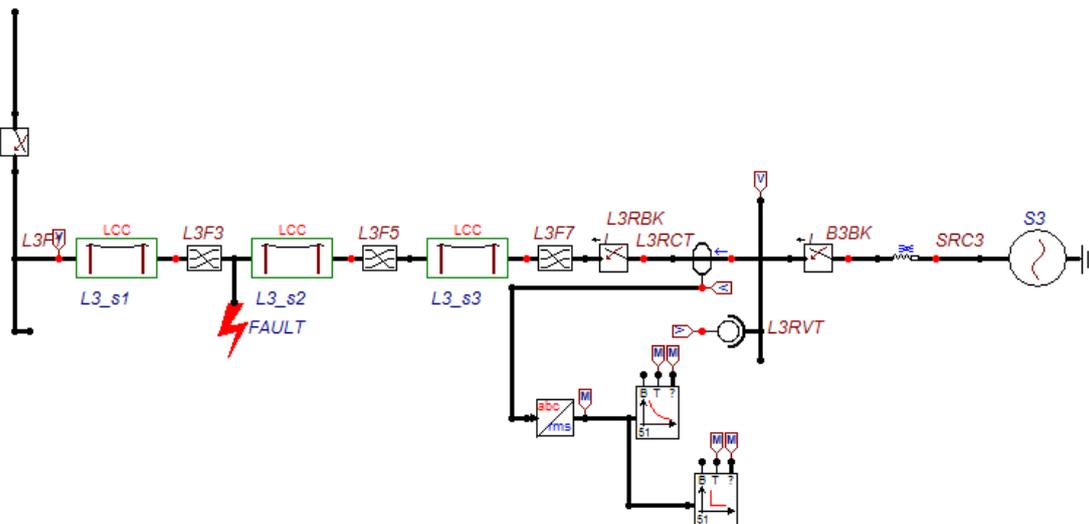


Figura 4.1. Línea L3 aislada

El objetivo fundamental del relé en la línea de transporte, es actuar como protección. En el caso que se va a estudiar, se programa el relé de tal forma que al circular mayor corriente de la permitida se abra el interruptor y deje de pasar corriente (relé de sobrecorriente). Evitando así los peligros de sobrecorriente. Estas sobrecorrientes pueden ser motivadas por:

- Sobrecargas debidas a aparatos de utilización o defectos de aislamientos.
- Cortocircuitos.
- Descargas eléctricas atmosféricas.

4.1. MÓDULO NECESARIOS PARA DEFINIR EL CIRCUITO

El diseño del relé comienza a la salida del transformador de intensidad. Las intensidades del lado secundario del transformador van conectadas directamente al módulo de conversión a

valores eficaces. Los relés que se encuentran sobre las líneas de transporte reales trabajan directamente con valores de intensidad. Sin embargo, en la simulación en ATPDraw, se trabaja internamente con las tensiones, y a la hora de aplicar las fórmulas del relé, tanto para el caso del relé de tiempo definido, como para el de tiempo inverso, se operara con tensiones pero simulando que en realidad son los valores de intensidad que se sustituyen sobre las ecuaciones. Esto es debido a que a la salida del transformador de intensidad va conectada una resistencia de cuatro ohmios. La salida de dicho transformador, es la tensión en la carga como se ve en la figura 4.1. Y esta tensión es la que se lleva al módulo de valores eficaces. A continuación se muestra el módulo de conversión a valores eficaces “RMS”.

En conclusión se trabaja con tensiones como si fuesen valores de intensidad.

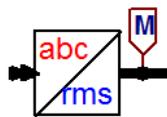


Figura 4.2. Módulo de conversión a valores eficaces

Dentro del módulo se debe de introducir el código de conversión a valores eficaces en un entorno trifásico, en el apartado “Edit”.

MODEL: ABC2RMS

Attributes			NODE		
DATA	UNIT	VALUE		PHASE	NAME
freq	Hz	60	x	ABC	L3RCT
xrms_ini	V/I	-1	xrms	ABC	X0001
scale	pu	1			
SampleFreq	Hz	100000			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Mgdet: ABC2RMS Edit Use As: ABC2RMS Record Hide Protect

Figura 4.3. Editor del módulo de conversión a valores eficaces

Como ya se ha explicado anteriormente en la descripción de la línea, se trabaja con una frecuencia de 60 Hz, ya que se trata de un estudio en sistema americano, la base de cálculo es de 1 p.u (valor por unidad). Se toma como frecuencia de muestreo 100000 Hz, porque si se elige un valor más pequeño se obtendrían demasiados puntos para la formación de la gráfica y requeriría mucho más tiempo la simulación.

```

MODEL ABC2RMS
comment-----
Calculates the true rms value of a 3-phase signal based on integration.
SampleFreq frequency should be whole multiple of power frequency.
-----endcomment
DATA
  freq          -- base frequency
  xrms_ini {dflt:-1} -- initial rms value
  scale {dflt:1} --multiply output by this number
  SampleFreq    -- sample frequency in Hz
INPUT
  x[1..3]       -- monitored signal
OUTPUT
  xrms[1..3]    -- rms value of monitored signal
VAR
  xrms[1..3]
  x2[1..3]      -- internal, x*x
  ix2[1..3]     -- internal, integral of x2
  period        -- 1/freq
  n
TIMESTEP min:recip(SampleFreq) --this restricts local timestep to avoid overflow
DELAY CELLS(ix2[1..3]): recip(freq*timestep) +2
INIT
  period      := recip(freq)
  histdef(ix2[1..3]) := 0
  integral(x2[1..3]) := 0
  IF xrms_ini <0 THEN xrms[1..3]:=0 ELSE xrms[1..3]:=xrms_ini ENDIF
ENDINIT
EXEC
  FOR n:=1 TO 3 DO
    x2[n] := x[n]*x[n]
    ix2[n] := integral(x2[n])
    IF t>period THEN
      xrms[n] := sqrt((ix2[n] - delay(ix2[n], period))*freq)*scale
    ENDIF
  ENDFOR
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 4.4. Código de conversión a valores eficaces

El sensor a la salida de este módulo permite obtener las curvas de valores eficaces.

MÓDULOS QUE CONFORMAN EL RELÉ

Los valores eficaces del módulo anterior, se introducen a los módulos que definen el relé. El relé está compuesto por el módulo de intensidad instantánea o de tiempo definido y el de tiempo inverso.

Relé de intensidad de tiempo definido

El relé de tiempo definido permite fijar una intensidad de referencia o intensidad umbral. En el momento que el relé detecta que la línea ha superado la intensidad de referencia, se abre el interruptor de conexión de la línea y deja de circular corriente en el tiempo establecido.

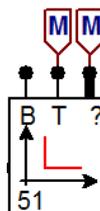


Figura 4.5. Módulo de tiempo definido

La variable de entrada son las intensidades en valores eficaces. Y las variables de salida son el tiempo de disparo, es decir, en el momento en el que se ha producido el corte de la intensidad debido a la sobreintensidad que se ha producido en la línea y la segunda variable de salida son las intensidades, donde se puede ver como se ven afectadas tras la actuación de esta protección. Los resultados se pueden ver gráficamente al ejecutar el circuito en ATPDraw gracias a los sensores “M” que se han colocado a la salida, T para el disparo y ? devuelve el estado de las intensidades, que servirá para comprobar que actuado correctamente el relé sobre la fase en la que se encuentra el fallo. La salida B , es la respuesta booleana (Verdadero o falso) y en este caso se prescinde de ella.

Las variables dentro del módulo se han definido de la siguiente forma:

MODEL: WTRELAY51

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is	A	5
td	s	0
DownSampl	1..n	10
t_init	s	0.02
Idx	1..n	3

NODE	PHASE	NAME
irms	ABC	X0001
Block	1	X0011
Trip	1	X0012
Zone	BCA	X0013

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Mgdel: WTRELAY51 Edit Use As: WTRELAYE View Copy

Hide Protect

Figura 4.6. Editor del módulo de tiempo definido

- $I_s(A)$, es el valor de intensidad para el que se ha definido el umbral.
- $t_d(s)$, tiempo de retardo.
- DownSampl, cada cuantos intervalos hay que sacar valores de salida.
- $t_{init}(s)$, tiempo antes de la transmisión de muestreo.
- Idx, variable definida por el programa ATPDraw.

El funcionamiento del módulo de intensidad definida, para una intensidad de ajuste “ I_s ” y el tiempo en el que se produce la actuación de la protección “ t_s ”, se puede ver gráficamente en la siguiente figura. En ATPDraw este módulo es el 51; esta información es importante a la hora de crear el circuito.

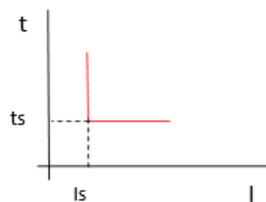


Figura 4.7. Curva $I-t$ de tiempo definido

El código correspondiente al módulo de tiempo definido es:

```

MODEL W1RELAY51
comment-----
Constant time overcurrent relay.
-----endcomment

DATA
Is      --Starting current
td      --time delay
DownSampl --Write out every DownSampl
t_init  --Time before relay starts sampling
Idx     --Unique identifier (managed by ATPDraw)

INPUT
irms[1..3] --Input signal (rms value)
Block {dflt:0} --Blocking signal, TRUE or 1 = Block

OUTPUT Trip
Zone[1..3] -- Which zone (0 or 1) tripped in each phase [1..3]
VAR trip,Zone[1..3],ts[1..3],M,d,n
INIT
trip:=1
Zone[1..3]:=0
ts[1..3]:=0
d:=0
ENDINIT
EXEC
if (t>t_init) and (Block=FALSE)
then
FOR n:=1 TO 3 DO
M:=ABS(Irms[n]*recip(Is))
if M>1
then
ts[n]:=ts[n]+timestep
if ts[n]>td
then
Zone[n]:=1
endif
else
ts[n]:=ts[n]-timestep
if ts[n]<td
then
ts[n]:=0
endif
endif
ENDFOR
trip:=not OR(Zone[1],Zone[2],Zone[3], not trip)
if (d mod DownSampl) = 0
then
write('BEGIN WRITE @W1RELAY51',trunc(Idx)) --Do not
modify this line, replaced by ATPDraw
write(Irms[1], ts[1], Irms[2], ts[2], Irms[3], ts[3], trip) --Add
multiple columns or multiple lines
write('END WRITE @W1RELAY51',trunc(Idx)) --Do not
modify this line, replaced by ATPDraw
endif
d:=d+1
endif
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 4.8. Código del módulo de tiempo definido

Relé de tiempo inverso

Como sucedía en el módulo de tiempo definido, la variable de entrada al módulo de tiempo inverso es en valores eficaces. Y las variables de salida son T , tiempo de disparo,?, estado de las intensidades a la salida del relé. Esta información sirve para ver la respuesta ante la actuación de la protección y por último, B , que es la respuesta booleana. A continuación se muestra el módulo en ATPDraw, con las correspondientes variables de salida y los sensores que se han colocado para poder visualizar los resultados. El módulo correspondiente en el circuito de ATPDraw es el 51I.

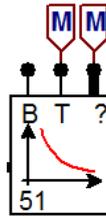


Figura 4.9. Módulo de tiempo inverso

La curva tiempo-intensidad, para el módulo de tiempo inverso, tiene la siguiente forma:

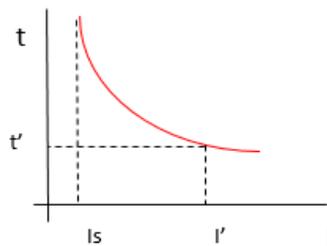


Figura 4.10. Curva I-t de tiempo inverso

La ecuación de la curva varía dependiendo de la norma que se esté utilizando. En el caso de ATPDraw, el módulo está definido para la norma IEC 255-3 (International Electrotechnical Commission) y IEEC C37.112 (Institute of Electrical and Electronic Engineers). Dependiendo de la norma que se esté utilizando y el modo en el que esté trabajando (Inverso, muy inverso, extremadamente inverso, entre otros que aparecerán a continuación), se utilizará una ecuación y unas constantes determinadas.

Norma IEC 255-3

Ecuación del tiempo de actuación:

$$t = D \frac{A}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^Q - 1} \quad (13)$$

Las variables que se utilizan:

- D, dial de tiempos
- I_s, intensidad de ajuste
- A, B, Q, constantes

Según el modo en el que se esté trabajando las constantes toman un valor determinado. En la tabla que aparece a continuación se especifican los modos y los valores de las constantes.

Modo	A	Q	B
Normalmente Inverso	0.14	0.02	0
Muy Inverso	13.50	1.00	0
Extremadamente Inverso	80.00	2.00	0

Tabla 4.1. Valores del módulo de tiempo inverso Norma IEC 255-3

Norma IEEE C37.112

$$t = D \left(\frac{A}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^Q - 1} + B \right) \quad (14)$$

Los valores de las variables según el modo, están ilustradas en la siguiente tabla.

Modo	A	Q	B
Normalmente Inverso	0.0515	0.02	0.1140
Muy Inverso	16.6100	2.00	0.4910
Extremadamente Inverso	28.2000	2.00	0.1217

Tabla 4.2. Valores del módulo de tiempo inverso Norma IEEE C37.112

Para el estudio del caso de la línea L3, se va a utilizar el modo Normalmente Inverso. Al módulo del relé de tiempo inverso, hay que definirlo con estos valores.

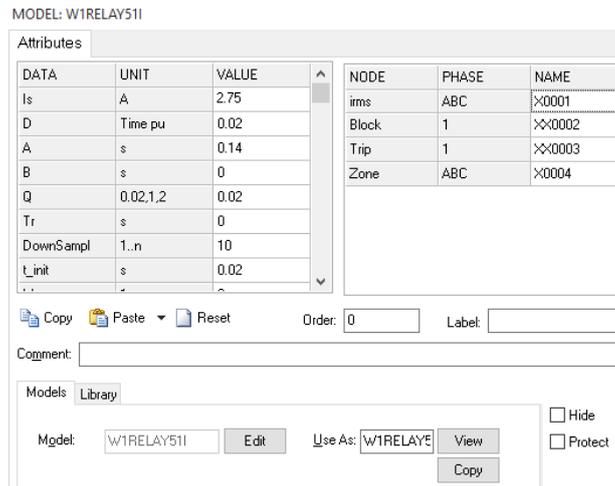


Figura 4.11. Valores del módulo de tiempo inverso

Además de las constantes para el modo normalmente inverso hay que definir las siguientes variables:

- Is, intensidad de ajuste.

- t_r , tiempo de retardo.
- DownSample, cada cuantos intervalos hay que sacar valores de salida.
- $t_{init}(s)$, tiempo antes de la transmisión de muestreo.
- Idx, variable definida por el programa ATPDraw.

El relé empieza a trabajar en el instante cero, es decir, no tiene retraso y la protección se encuentra activa desde el inicio de la conexión de la línea a la red. La intensidad de ajuste, debe ser un valor no muy grande, ya que se trata de un sistema de protección, no tendría sentido que permitiese trabajar al sistema altamente sobrecargado. Se toman 2,75 A, con el objetivo que la actuación del relé se lleve a cabo en el rango de tiempo que se está estudiando.

Como se ha explicado en el inicio del documento, los relés en la realidad trabajan con valores de intensidad, pero en la simulación de ATPDraw, se trabaja con valores de tensión que simbólicamente representan lo que en la realidad son las intensidades. Por ello los valores de ajuste están modelados para trabajar con tensiones, ya que si fuesen intensidades se introduciría en el módulo como valor de ajuste, 2,75 entre los 4 Ω correspondientes a la resistencia de carga del transformador de intensidad (TI). Este valor de resistencia se utilizará para realizar los cambios de intensidad a tensión oportunos.

El código correspondiente al módulo de tiempo inverso:

```

MODEL WIRELAY51I
comment-----
Inverse time overcurrent relay.
ts= D*(A/((Irms/Is)^Q -1)+B)
-----endcomment
DATA Is --Starting current
D --time multiplier
-- IEC: NI VI EI IEEE: NI VI EI
A -- 0.14 13.5 80.0 0.0515 19.61 28.20
B -- 0 0 0 0.1140 0.491 0.1217
Q -- 0.02 1 2 0.02 2 2
Tr -- 4.85 21.6 29.1
DownSampl -- Write out every DownSampl
t_init -- Time before relay starts sampling
Idx -- Unique identifier (managed by ATPDraw)
INPUT
irms[1..3]
Block (dfilt:0)-- Blocking signal TRUE or 1 = Block
OUTPUT Trip
Zone[1..3] --Shows which zone (0 or 1 here) trips in which phase (1..3)
VAR trip,Zone[1..3],ts[1..3],M,j,n
INIT
trip:=1
Zone[1..3]:=0
ts[1..3]:=0
j:=0
ENDINIT
EXEC
if (t>t_init) and (Block=FALSE)
then
FOR n:=1 TO 3 DO
M:=ABS(Irms[n]*recip(Is))
if M>1
then
ts[n]:=ts[n]+timestep
if ts[n]>D*(A*recip(M**Q-1)+B)
then
Zone[n]:=1
endif
endif
else
ts[n]:=ts[n]-timestep
if ts[n]<-D*Tr*recip(M**2-1)
then
ts[n]:=0
endif
endif
ENDFOR
trip:=not OR(Zone[1],Zone[2],Zone[3],not trip)
if (j mod DownSampl) = 0
then
write('BEGIN WRITE @WIRELAY51I',round(Idx)) --Do not modify this line,
replaced by ATPDraw
write(Irms[1], ts[1], Irms[2], ts[2], Irms[3], ts[3], trip) --Add multiple columns or
multiple lines
write('END WRITE @WIRELAY51I',round(Idx)) --Do not modify this line,
replaced by ATPDraw
endif
endif
j:=j+1
endif
ENDEXC
ENDMODEL

```

Figura 4.12. Código del relé de tiempo inverso

4.2. EJECUCIÓN DEL CIRCUITO EN ATPDRAW Y COMPROBACIÓN ANALÍTICA DE RESULTADOS

La función fundamental del relé es la protección de la línea; en este caso se trabaja con un relé de sobreintensidad. Se fija una intensidad de ajuste o intensidad umbral, teniendo en cuenta que por encima de este valor se pone en peligro el correcto funcionamiento del circuito. Si la intensidad que circula por la línea de transporte alcanzara este valor, el relé actuaría abriendo los contactos, cesando el paso de la corriente. Con el programa ATPDraw se simula una situación real, que permite estudiar la respuesta de la línea y comprobar el funcionamiento del relé, más allá del ámbito teórico.

Lo primero es aislar la línea L3 de la línea básica de transporte sobre la que se ha ido trabajando, para que sea más sencilla la interpretación de resultados y se vea más claramente el funcionamiento del relé. Se modela una falta monofásica, con el módulo de faltas, en este caso se realizará el cortocircuito en la fase A, en el instante 0.05 s.

Una vez modelado se ejecuta en ATPDraw el circuito.

Para comprobar que la falta se ha producido correctamente, se busca la información en el sensor del inicio de la línea que da información sobre la tensión. Y se ve claramente la falta monofásica. La falta se programaba en la fase A, pero sin embargo se ve en la fase B, esto es debido a que entre el módulo de faltas y el sensor hay una trasposición de fases, y la falta monofásica en A, pasa a ser monofásica en B.

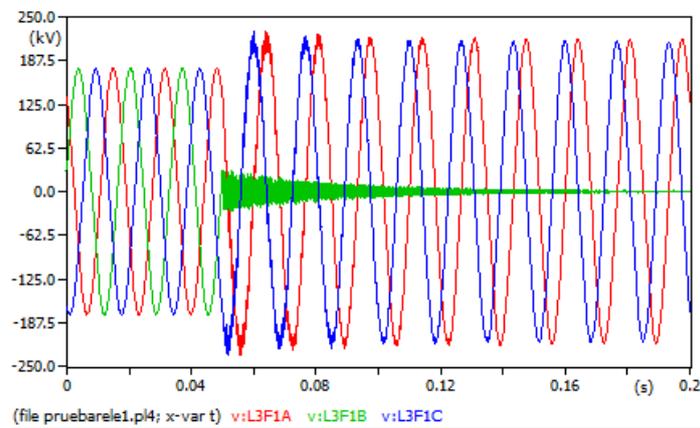


Figura 4.13. Tensiones en el inicio de la línea

En la fase en la que se produce el cortocircuito, la tensión tiende hacerse nula y la corriente en esa fase aumenta drásticamente, produciéndose así una sobreintensidad en esta fase.

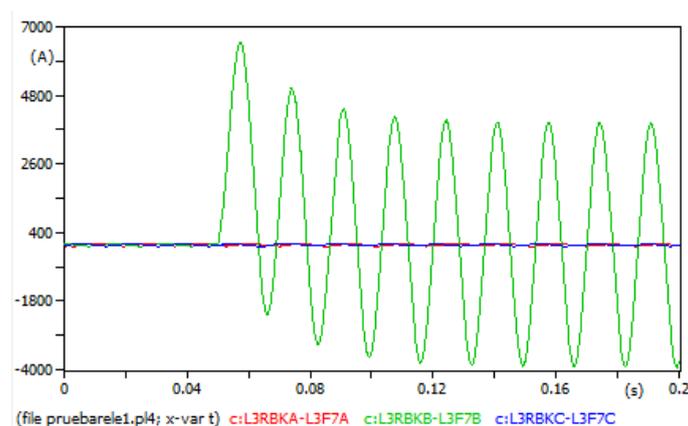


Figura 4.14. Intensidades en la línea

En la gráfica se observa la sobreintensidad que se produce en la fase afectada por la falta, mientras que la curva de intensidades de las otras dos fases quedan prácticamente

despreciables frente a esta. Para comprobar que no tiene intensidad nula, se reduce la escala de estudio, a un rango de magnitudes menos elevado que el de la intensidad de falta.

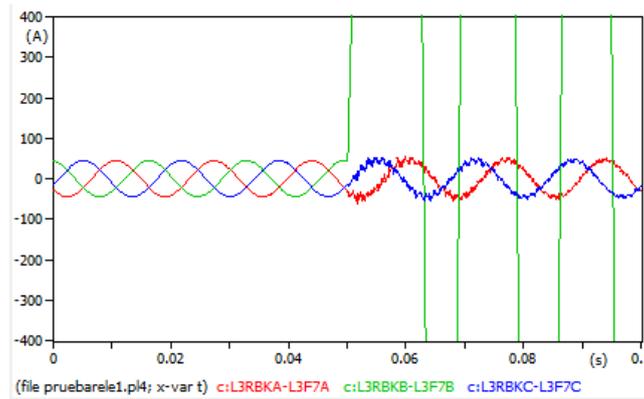


Figura 4.15. Ampliación de la gráfica de intensidades

Respuesta del relé de tiempo definido

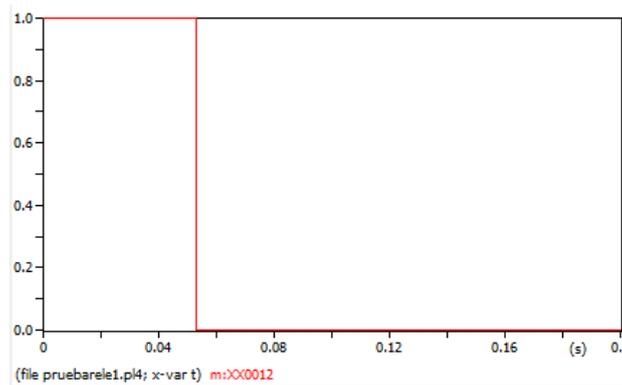


Figura 4.16. Disparo del relé de tiempo definido

Una de las variables de salida del módulo de tiempo definido es el disparo del relé, donde se puede observar el instante en que ha saltado el contacto de protección, debido a que se alcanzan valores de intensidad por encima de la intensidad de ajuste definida. En ese momento el interruptor de contacto se abre y deja de circular corriente. La falta estaba modulada en el instante 0.05s, al ser un relé de tiempo instantáneo y sin retardo, actúa la protección al producirse la falta (al ampliar el eje de tiempos se observa que salta en 0.0525 s, sin embargo ese pequeño retraso es despreciable, para el correcto funcionamiento de la protección).

Este módulo permite obtener como variable de salida los cambios de estado que se han producido sobre las intensidades.

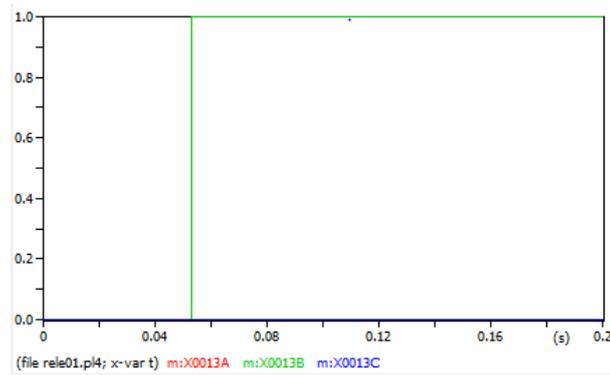


Figura 4.17. Cambio de Estado de las Intensidades

El cambio de estado, da información sobre la actuación del relé. Como era de esperar, el relé ha actuado sobre la fase en la que se encontraba el fallo. Y en el instante que se produce la detección del fallo, el relé procede a desconectar esa fase.

Respuesta del relé de tiempo inverso

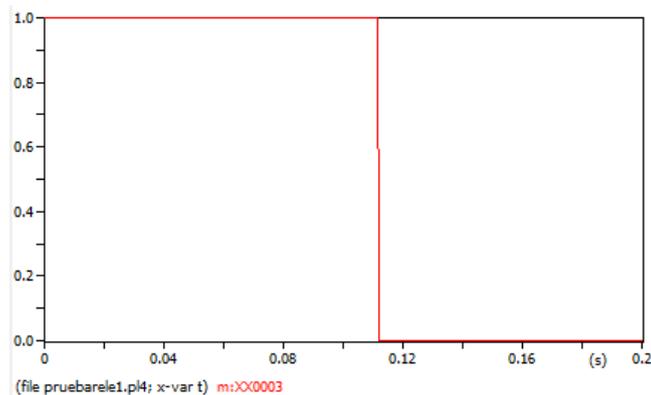


Figura 4.18. Disparo del relé de tiempo inverso

Se observa en la gráfica de disparo como inicialmente el contacto está activo (el “1” indica la conexión de los contactos y “0”, la desconexión) y al producirse la falta se abre el contacto, la actuación es a los 0.11 segundos, porque se está trabajando con tiempo inverso.

La otra variable de salida son los cambios de estado, que se ilustran a continuación.

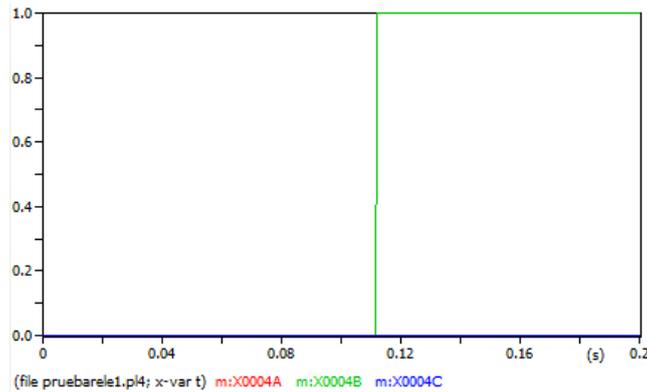


Figura 4.19. Estado del sistema en el relé de tiempo inverso

Esta gráfica sirve como comprobación del funcionamiento del relé, que actúa sobre la fase en la que se produce la sobreintensidad.

Comprobación de resultados para la falta monofásica

El siguiente procedimiento es comprobar que el sistema funciona correctamente.

A partir de la extracción de resultados en el sensor que se encuentra en el inicio de la línea, se obtiene la variación de intensidades y como responden las fases ante el fallo programado por el módulo de faltas. A partir del valor de pico de la fase sobre la que se ha producido el cortocircuito, se calcula su valor eficaz, dividiendo este valor de pico entre raíz de 2. Pero sin embargo este no será exactamente el valor eficaz que se obtiene en el módulo de conversión a valores eficaces, debido a que este módulo trabaja con valores de tensión. Entonces el valor eficaz de intensidad que se obtenía al dividir el valor de pico entre raíz de 2, habrá que dividirlo por la relación de transformación (r_t) 2000/5 y multiplicarlo por el valor de la resistencia de 4Ω , conectada en el secundario del TI para obtener la tensión de salida correspondiente.

De la gráfica que aparece a continuación se extrae el valor de pico de la intensidad.

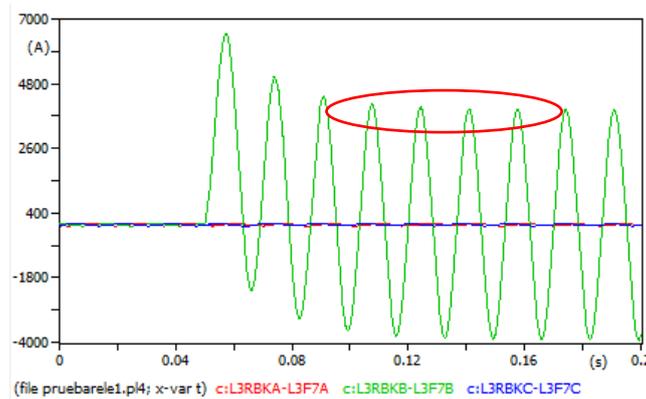


Figura 4.20. Intensidades en la línea

Valor de pico de la intensidad: $I=4000$ A

Valor eficaz de la intensidad en el secundario: $I_{ef} = \frac{4000}{\sqrt{2}} / r_t = \frac{4000}{\sqrt{2}} / 400 = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7.071$ A

Tensión en valores eficaces, para poder contrastar los resultados con los del módulo de conversión a valores eficaces: $U_{ef} = \frac{10}{\sqrt{2}} \cdot 4 = 28.28$ V

Y ahora se extrae el valor eficaz de la gráfica de resultados del módulo de conversión a valores eficaces.

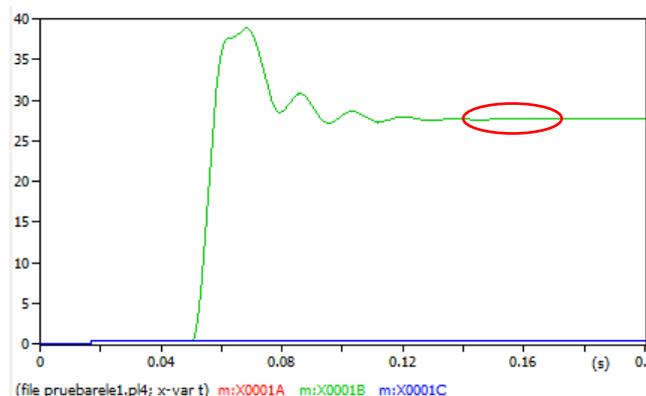


Figura 4.21. Valores eficaces

Valor Eficaz=28 V

Efectivamente el resultado obtenido gráficamente coincide con el resultado analítico.

Siguiendo con la contrastación de resultados, se va a obtener de manera analítica el instante en el que debe actuar el relé de tiempo inverso, pudiendo así corroborar que todos los módulos del circuito funcionan y operan correctamente.

Se acaba de calcular analíticamente el valor de intensidad eficaz (simbólicamente, ya que se debe recordar que el relé está operando con tensiones). Este valor de intensidad es el que debe de introducirse en la ecuación de tiempo de actuación del módulo de tiempo inverso.

Recordar que es la ecuación correspondiente a la norma IEC 255-3 y operando en el modo normalmente inverso.

Valores correspondientes a las constantes: A=0.14; D=0.02; Q=0.02

Valores de intensidad: Is=2.75 A; I=28,28 A

$$t = D \frac{A}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^Q - 1} = 0.02 \frac{0.14}{\left(\frac{28.28}{2.75}\right)^{0.02} - 1} = 0.058$$

El instante en el que actúa el relé, es igual al tiempo en el que se produce el fallo, más el tiempo de actuación del módulo de tiempo inverso, $t=0.05+0.058=0.108$ s, que son prácticamente los 0.11 s, que se obtenían gráficamente.

Tras estas comparaciones entre el método analítico y el método gráfico, se puede concluir, que el sistema funciona correctamente.

FALTA BIFÁSICA

La falta bifásica se programa en el instante 0.05 s, entre las fases A y B. Pero como sucedía en el caso de la falta monofásica, la información sobre la respuesta de la línea se extrae del sensor que se encuentra en el inicio de la línea, y debido a que entre el módulo de faltas y el sensor de extracción de datos, hay trasposición de fases, la falta se observará entre las fases B y C.

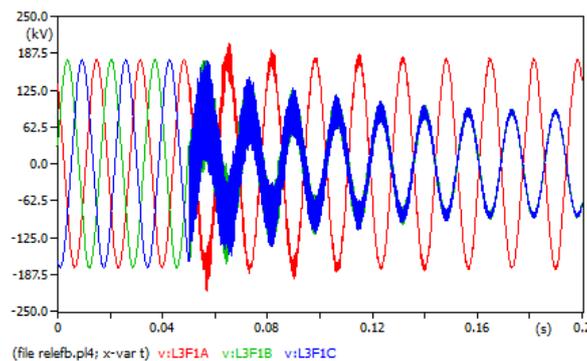


Figura 4.22. Tensiones en la línea para el caso de falta bifásica

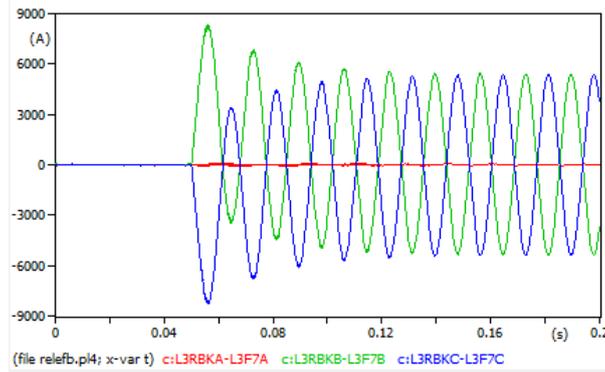


Figura 4.23. Intensidades en la línea para el caso de falta bifásica

Las intensidades del secundario del transformador van a parar al módulo de conversión a valores eficaces (teniendo en cuenta que en realidad va a trabajar en la simulación con valores de tensión).

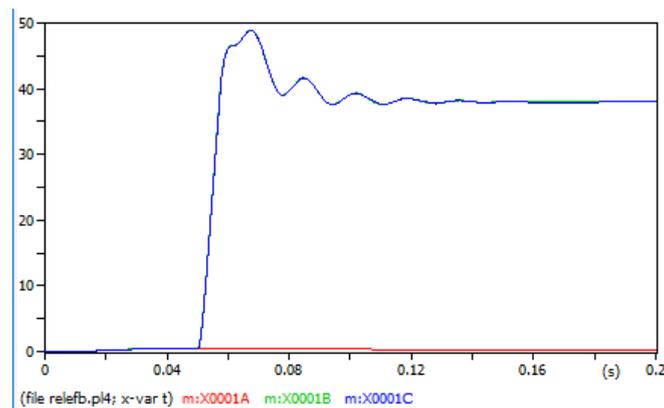


Figura 4.24. Valores eficaces para el caso de falta bifásica

Una vez que se tienen los valores eficaces, ya pueden introducirse dentro de módulo de tiempo definido y tiempo inverso, que son los correspondientes a la simulación del relé. Lo principal es comprobar que ha actuado correctamente la protección, y por tanto se desconectan los interruptores de las fases afectadas. Las variables de salida de estos dos módulos son, el tiempo de disparo, y el cambio de estado de las intensidades, que sirve para comprobar que se ha actuado sobre las fases con falta.

Respuesta del relé inverso

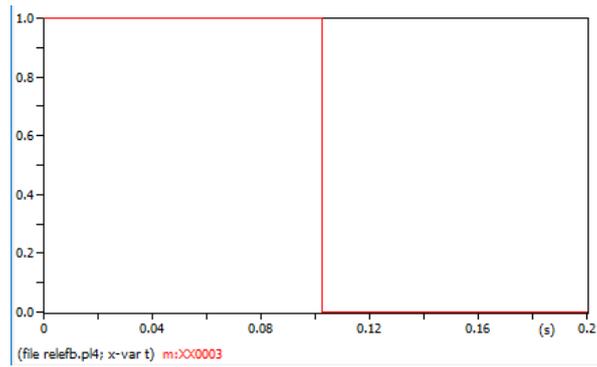


Figura 4.25. Disparo del módulo de tiempo inverso

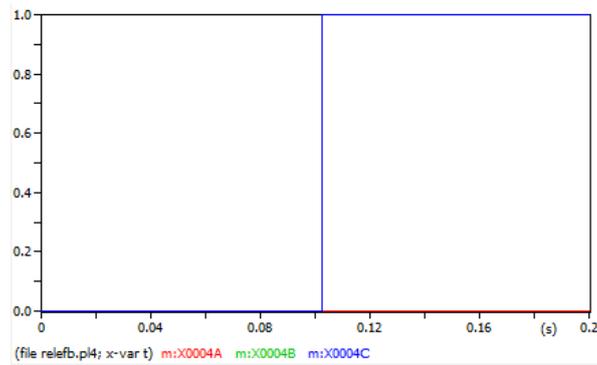


Figura 4.26. Cambio de estado

Respuesta del módulo de tiempo definido

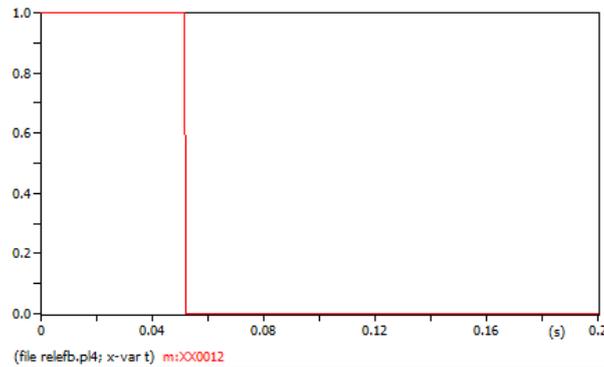


Figura 4.27. Disparo del módulo de tiempo definido

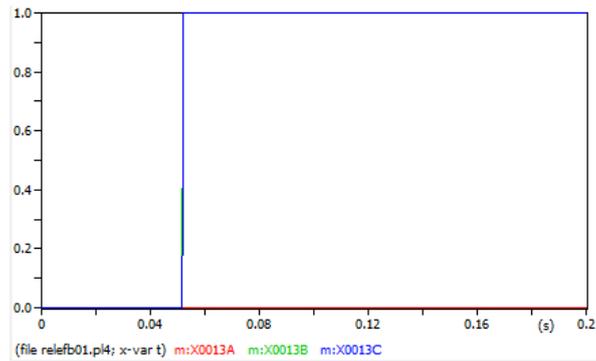


Figura 4.28. Variable de salida de cambio de estado del módulo de tiempo definido

En este ensayo de falta bifásica, el objetivo fundamental era comprobar que el relé actúa como protección en la línea, independientemente del tipo de falta que se produzca. Se han obtenido los resultados idóneos. En el caso de falta monofásica, el relé abre el interruptor de la fase afectada y en el caso de tener una falta bifásica, el relé actuará abriendo el interruptor de las dos fases afectadas.

Comprobación analítica del funcionamiento de la falta bifásica

Se seguirá la misma secuencia de operaciones que para el caso de la falta monofásica. La falta bifásica es igual en las dos fases en las que se produce, por ello con estudiarla en una fase es suficiente para comprobar el correcto funcionamiento del relé.

Lo primero es extraer de la gráfica de intensidades, procedente del sensor situado en el inicio de la línea, el valor de cresta de las intensidades de las fases donde se produce la falta.

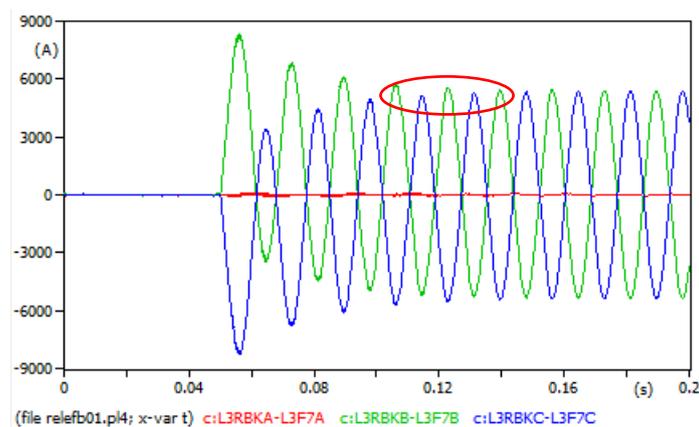


Figura 4.29. Intensidades de la línea con la falta bifásica

Valor de pico de la intensidad: $I=5400$ A

Valor eficaz de la intensidad en el secundario: $I_{ef} = \frac{5400}{\sqrt{2}} / r_t = \frac{5400}{\sqrt{2}} / 400 = 9.546 A$

Tensión en valores eficaces, para poder contrastar los resultados con los del módulo de conversión a valores eficaces: $U_{ef} = 9.546 \cdot 4 = 38.183 V$

Y se comprueba este valor eficaz con el de la salida del módulo de conversión a valores eficaces.

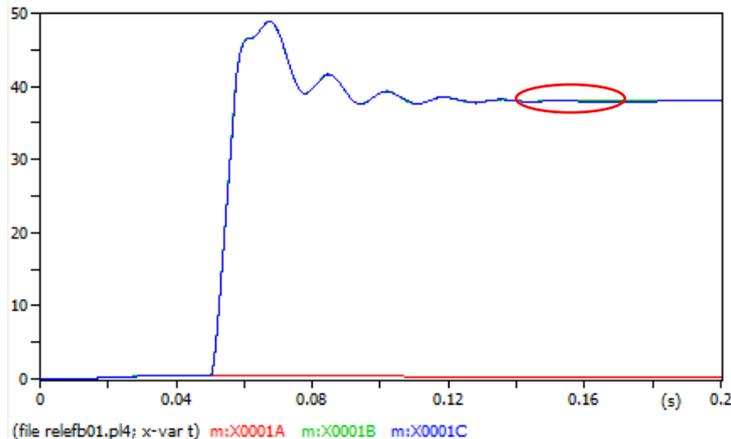


Figura 4.30. Gráfica con valores eficaces

La salida del módulo de valores eficaces es 38 V, prácticamente la misma que la calculada analíticamente. Por tanto, por el momento, el funcionamiento del sistema definido para conformar el relé funciona adecuadamente.

El módulo del relé de tiempo definido trabaja como era de esperar, saltando en el instante en el que se produce la falta. A continuación se va a calcular el tiempo de operación del relé de tiempo inverso para comprobar que el momento en el que debe actuar la protección (calculado analíticamente, ya que es el teóricamente correcto) coincide con el tiempo de funcionamiento del módulo de la simulación. Y para calcular este tiempo, se utiliza la ecuación definida por la norma IEC 255-3.

Valores correspondientes a las constantes: $A=0.14$; $D=0.02$; $Q=0.02$

Valores de intensidad: $I_s=2.75 A$; $I=38.18 A$

$$t = D \frac{A}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^Q - 1} = 0.02 \frac{0.14}{\left(\frac{38.18}{2.75}\right)^{0.02} - 1} = 0.052s$$

El tiempo en el que actúa el relé, es igual al tiempo en el que se produce el fallo, más el tiempo de actuación del módulo de tiempo inverso, $t=0.05+0.052=0.102s$, y este resultado hay que compararlo con el resultado obtenido gracias al sensor del módulo de tiempo inverso.

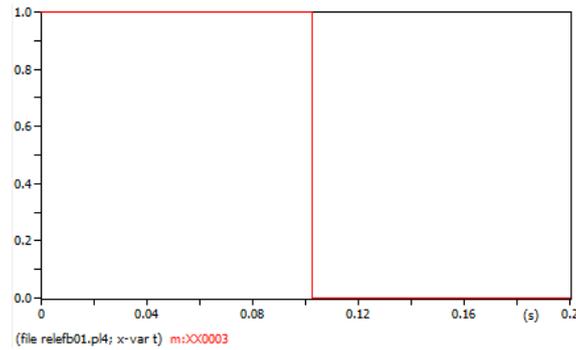


Figura 4.31. Tiempo de actuación del módulo de tiempo inverso

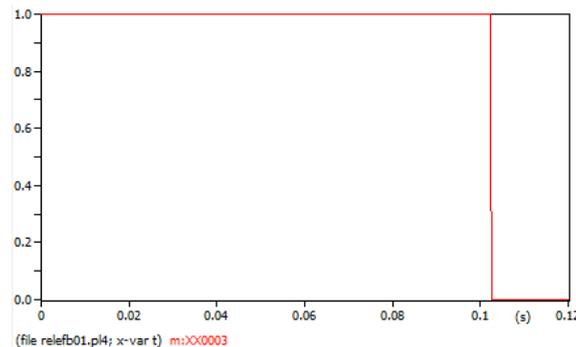


Figura 4.32. Ampliación de la gráfica de tiempo de actuación del relé de tiempo inverso

El instante en el que debe actuar el módulo de tiempo inverso, debe ser 0.102 s, valor calculado utilizando la norma IEC 255-3, y se observa que en la simulación el relé actuó en ese instante.

Se comprueba que efectivamente el relé de sobreintensidad opera correctamente también para el caso de falta bifásica. Se ha comprobado que los valores teóricos coinciden con los obtenidos en la simulación, y la actuación del relé es la deseada: actúa la protección al producirse la falta. El funcionamiento del relé es independiente de que el tipo de falta que aparezca sobre la línea de transporte, ya sea bifásica o monofásica. En ambos casos, actúa de la misma forma, es decir, desconectando la línea en el instante que aparezca la falta, cumple su función de protección sobre la línea. Este era uno de los objetivos a comprobar, que actuase la protección cuando se produjese una intensidad superior a la estipulada como intensidad de ajuste, ya que por encima de este valor se pone en peligro el funcionamiento de toda la red.

5. MÓDULO DE FASORES

Como se ha podido observar durante los ensayos, el programa ATPDraw permite modelar circuitos y simular el funcionamiento real de las redes de transporte. Este programa ofrece gran variedad de módulos para el estudio de líneas. En este apartado se va a estudiar el módulo de fasores, que permite obtener el fasor de tensión para cada una de las fases. Hay dos métodos de obtención de fasores, uno colocando sensores a la salida del módulo de cálculo fasorial, para poder así obtener gráficamente las partes real e imaginaria por separado de cada una de las fases, e interpretando estas gráficas se sacan los respectivos valores. El segundo método es añadir a la salida del módulo de cálculo de fasores otro módulo llamado “write”, que se encuentra también dentro de las herramientas de ATPDraw (“system power tools”) del grupo fasores (“phasors”). En este caso se obtiene el resultado numérico de cada una de las fases en el archivo .lis que se ha creado al ejecutar el circuito.

5.1. Método gráfico

El circuito se ha diseñado aislando la línea L3 del resto del sistema (figuras 1.1 y 1.2) y añadiendo el módulo de cálculo de fasores (figura 5.1). Las variables de entrada en este módulo son las tensiones procedentes del transformador de tensión y en la salida van conectados dos sensores, para obtener los resultados gráficamente. Se está trabajando con tensión trifásica, y este módulo de cálculo fasorial realiza el cálculo de la parte real e imaginaria de cada una de las fases simultáneamente, lo que facilita la operación ya que no es necesario colocar tres módulos diferentes para cada una de las fases.

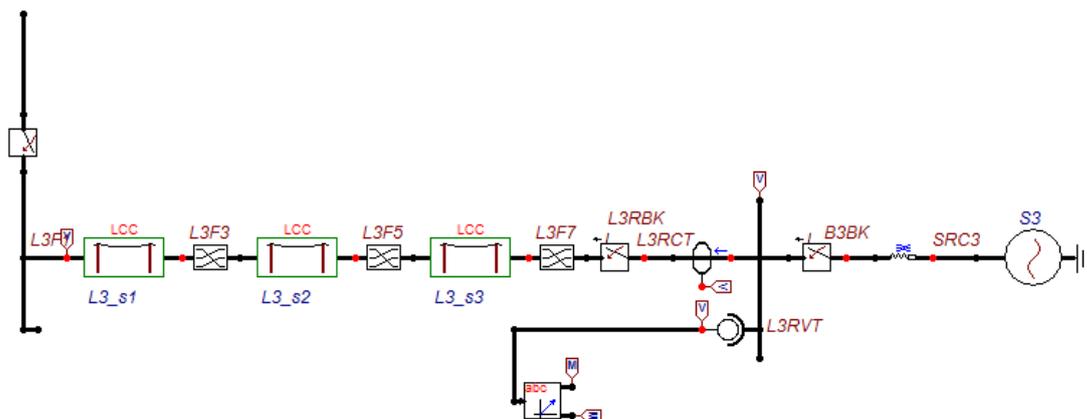


Figura 5.1. Circuito para obtención de resultados gráficos

Las variables de salida son las siguientes:

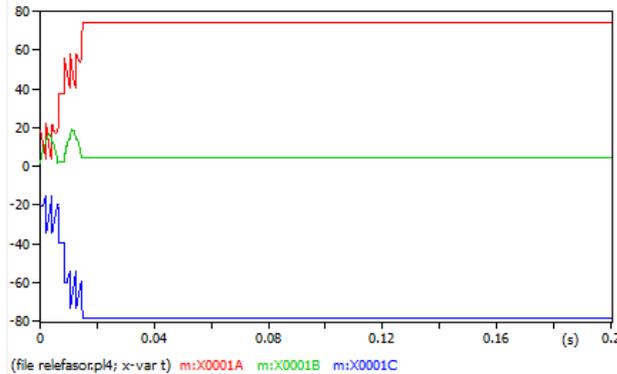


Figura 5.2. Parte real del fasor de tensión para cada fase

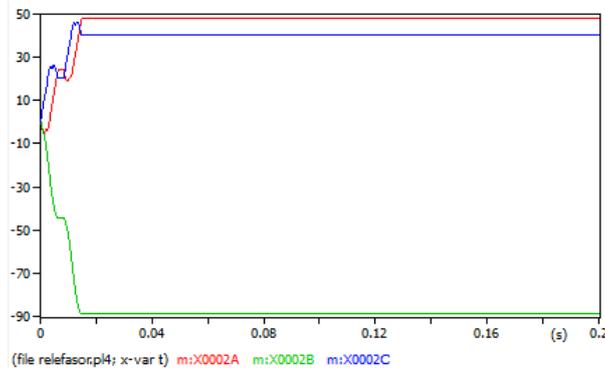


Figura 5.3. Parte imaginaria del fasor de tensión para cada fase

Si se desea conocer de manera más exacta el valor numérico se puede localizar la gráfica en un rango más cercano al resultado. El valor que se utiliza para los fasores, es el que aparece una vez que se estabiliza la curva.

Resultados numéricos sacados de las gráficas:

$$\text{Fase A: } Ua = 75 + 48j$$

$$\text{Fase B: } Ub = 4.5 - 90j$$

$$\text{Fase C: } Uc = -79 + 40j$$

5.2. Método analítico: Cálculo directo de fasores

En este otro método de obtención de fasores, se conecta a la salida del módulo de cálculo de fasores otro módulo también correspondiente a dicho grupo de herramientas que ofrece ATPDraw. El nombre de dicho módulo es "Write", como ya se comentaba en el inicio de este

apartado. La salida del módulo de cálculo fasorial permite obtener por un lado los valores reales de cada una de las fases y por otro los valores imaginarios del fasor. Estos grupos de variables de salida se conectan directamente con el “Write”, entrando por un lado la parte real de cada una de las fases y por otro la parte imaginaria. Las variables de salida en este caso no serán en forma de respuesta gráfica, si no que en el archivo .lis que se crea al ejecutar el circuito, se generan los resultados numéricos de cada uno de los fasores. Este método resultará mucho más exacto al obtener los resultados directamente del compilador.

En la siguiente figura se pueden observar las modificaciones pertinentes que se han realizado sobre el circuito y las conexiones anteriormente explicadas, para el correcto funcionamiento de este segundo método.

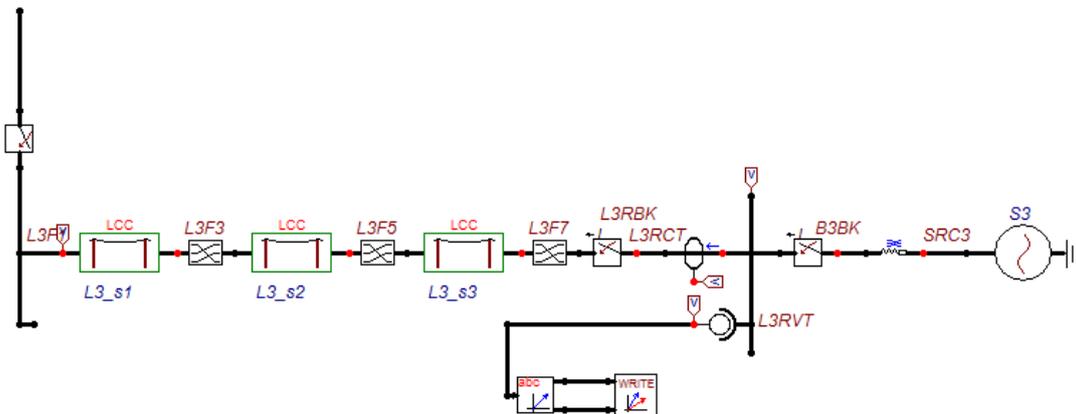


Figura 5.4. Circuito para el segundo método de cálculo de fasores de tensión

En el código del módulo “write”, se especifica el modo de respuesta de este módulo, la respuesta se obtendrá en el orden de fases A, B y C, y en el fasor, primero aparece la parte imaginaria y después la real.

```

MODEL WRITEPHASOR
comment-----
| Special purpose Model. Writes the value of Xre and Xim @T=Tsampl. |
| The output of this Model is written to the lis-file.             |
| The data Idx is used to identify the output in the lis-file.    |
| The lis-file is automatically read after the simulation.        |
| The result is displays as phasors in the View dialog.          |
-----endcomment
DATA
  n          --numbers of phases
  Tsampl    --sample the values at this time
  Idx       --unique identifier (managed by ATPDraw)
INPUT Xre[1..n],Xim[1..n]
VAR i,written
INIT
  written:=0
ENDINIT
EXEC
  if (T>Tsampl) and (written=0)
  then
    write('BEGIN WRITE @WRITEPHASOR', trunc(Idx)) --Do not modify this line, re
    for i:=1 to n do
      write(xim[i],xre[i]) --Add multiple lines
    endfor
    write('END WRITE @WRITEPHASOR', trunc(Idx)) --Do not modify this line, re
    written:=1
  endif
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 5.5. Código del módulo “write”

Variables de salida:

```

BEGIN WRITE @WRITEPHASOR 2.0
48.0908887 74.3248688
-88.412641 4.48698927
40.3217767 -78.811847
END WRITE @WRITEPHASOR 2.0

```

Fase A: $Ua = 74.3248688 + 48.0908887j$

Fase B: $Ub = 4.48698927 - 88.412641j$

Fase C: $Uc = -78.811847 + 40.3217767j$

Concluyendo que se obtiene con ambos métodos el mismo resultado, ya que la diferencia que se puede apreciar es mínima. Como cabía esperar, el caso en el que el programa aporta los resultados numéricos es mucho más preciso.

5.3. Representación de los fasores con Matlab

Para representar gráficamente los fasores de tensión de cada una de las fases, se crea un sencillo código en Matlab, utilizando la función ‘plot’.

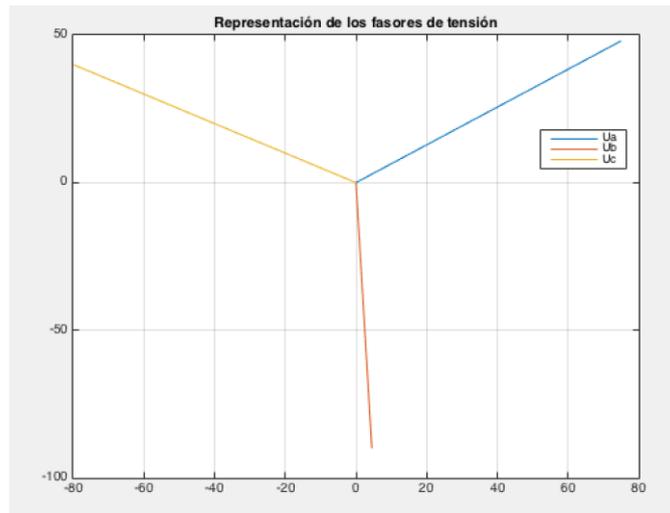


Figura 5.6. Representación de fasores

Los módulos de cada una de las fases deben ser aproximadamente los mismos y los fasores deben formar entre ellos ángulos de 120° , esta comprobación se realiza fácilmente con funciones de Matlab. A continuación se muestra el código que se ha utilizado para crear la representación gráfica y las pertinentes comprobaciones matemáticas.

```

%Fasores
a=75+48i;
b=4.5-90i;
c=-80+40i;

%Calculo de los modulos y argumentos
moda=abs(a)
modb=abs(b)
modc=abs(c)
arga=angle(a)
argb=angle(b)
argc=angle(c)

%Pasar de radianes a grados
dega=radtodeg(arga)
degb=radtodeg(argb)
degc=radtodeg(argc)

%Si inicialmente tengo los datos como modulo y argumento (coordenadas
polares) pasar a coordenadas cartesianas
[x,y]=pol2cart(arga,moda)
[X,Y]=pol2cart(argb,modb)
[k,z]=pol2cart(argc,modc)

%Representacion grafica de los fasores
x=[0 75];
y=[0 48];
X=[0 4.5];
Y=[0 -90];
k=[0 -80];
z=[0 40];
plot(x,y)
hold on
grid on
plot(X,Y)
plot(k,z)
    
```

Figura 5.7. Código de representación de fasores con Matlab

Resultados:

FASE	MODULO	ARGUMENTO (GRADOS)
A	89.0449	32.6192
B	90.1124	-87.1376
C	89.4427	153.4349

Tabla 5.1. Resultado fasores de tensión

Efectivamente se comprueba que los módulos de las tensiones son prácticamente iguales y el ángulo que separa a los fasores es de 120° .

5.4. Comprobación de tensiones

En la línea que se está estudiando el transformador de tensión va conectado a un nudo. A la derecha de este nudo se encuentra una fuente de tensión S3. La tensión en la entrada del transformador debe ser prácticamente la misma que la de la fuente de tensión que se encuentra al final del sistema (S3), porque prácticamente es como si se encontrase en paralelo.

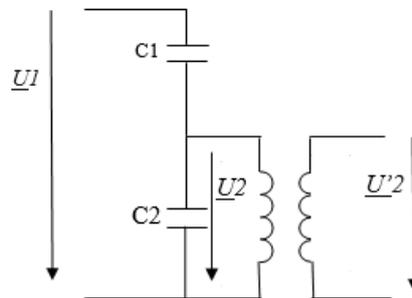


Figura 5.8. Representación de tensiones para el transformador de tensión capacitivo-inductivo

Se necesitan los datos de las capacidades C1 y C2, y la relación de transformación del trafo de tensión. Estos valores se tienen en el anexo y son los siguientes:

Capacidades: $C1=2.43 \text{ nF}$; $C2=82 \text{ nF}$

Relación de transformación del transformador inductivo: $rt=6584/115$

Cálculos:

Divisor de tensión para el lado primario del transformador:

$$U_2 = \frac{\frac{-j}{\omega C_2}}{\frac{-j}{\omega C_1} + \frac{-j}{\omega C_2}} U_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1$$

Tensión en el lado secundario del transformador:

$$U'_2 = 89,53 \text{ V (Promedio entre los valores de tensión obtenidos en las tres fases)}$$

Tensión en el lado primario del transformador inductivo:

$$U_2 = r_t \cdot U'_2$$

Tensión a la entrada del divisor de tensión:

$$U_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot r_t \cdot U'_2 = \frac{2.43 + 82}{2.43} \cdot \frac{6584}{115} \cdot 90 = 179029.67 \text{ V}$$

Por tanto la tensión en el nudo es 178094,07 V y la tensión de la fuente S3 es 175024V. Los valores son prácticamente coincidentes.

6. ENSAYO DE OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN

Los transformadores son componentes fundamentales de los sistemas eléctricos. En el modelo de la línea de transporte (figura 1.1) se tienen tanto transformadores de intensidad como de tensión. El uso de transformadores de intensidad va muy ligado al sistema de protecciones de la línea, ya que dicho transformador es el que envía la intensidad al relé. Por ello el objetivo principal de este ensayo es conocer en profundidad como están diseñados estos transformadores.

Con el procesador gráfico ATPDraw que ofrece ATP, se va a crear un circuito eléctrico, para un transformador monofásico, y se va a analizar su característica de magnetización.

6.1. DESARROLLO DE UN MODELO DE TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

6.1.1 Obtención de la característica de excitación

Para estudiar la saturación del transformador de intensidad y la relación entre los valores de la característica de excitación V-I (Tensión eficaz-Intensidad eficaz) y la característica Ψ -I (Flujo-Intensidad), se parte de la característica de excitación V-I (tensión eficaz-Intensidad eficaz), donde se escogen varios puntos que sirvan para definir perfectamente la curva. En el caso que se va a estudiar a continuación se escoge la curva de relación de intensidades 1200/5.

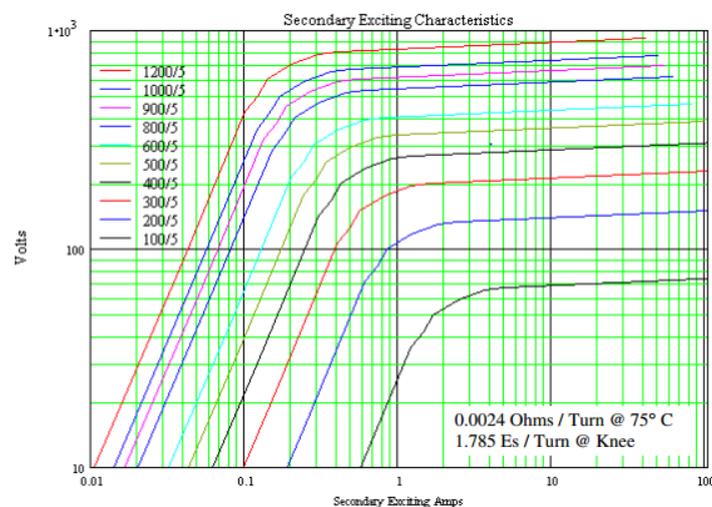


Figura 6.1. Característica del TI (Transformador de Intensidades)

El siguiente paso es crear un archivo .ATP, donde se introduzcan los nueve valores que se han tomado de la curva. Es muy importante que se definan de la forma que aparece en la figura 2, porque si no el programa dará error, ya que se deben respetar los espacios y la colocación de los números para una correcta ejecución del programa.

```

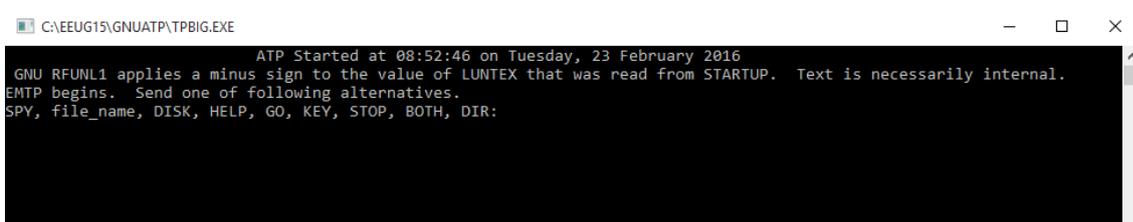
BEGIN NEW DATA CASE
C      1      2      3      4      5
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
SATURATION
60.      .001      1.E-6      0
      .01      9.
      .04      90.
      0.1      428.
      .12      500.
      .14      600.
      0.2      700.
      0.3      780.
      0.4      800.
40.0      927.
          9999
C      1      2      3      4      5
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C
$PUNCH, SAT240.pch
BLANK LINE
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK LINE ENDING ALL CASES
    
```

Figura 6.2. Valores de saturación del transformador

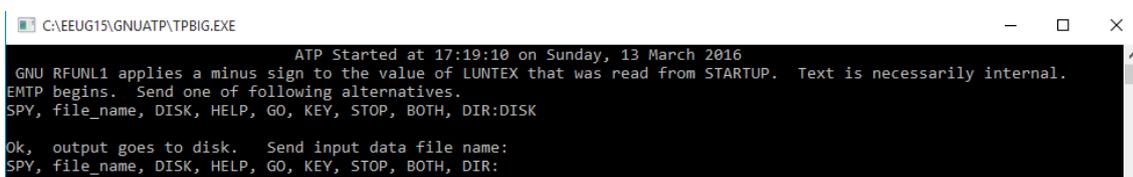
La palabra “SATURATION” de la cuarta línea del código, corresponde a la llamada al programa auxiliar “SATURA”, que transforma los valores de la curva V-I a valores Ψ -I.

Para ejecutar el programa se va a recurrir al programa, TPBIG. En las figuras que aparecen a continuación quedan plasmados los pasos que se deben seguir. Para llamar al disco, localizar el fichero y finalmente ejecutar el programa.

1. Abrir el programa, TPBIG



2. Llamar al disco escribiendo la palabra DISK.



3. Directamente el programa preguntará por el archivo que hay que ejecutar, y es en este punto donde se debe escribir el nombre del archivo y su dirección, para que el compilador pueda localizarlo y ejecutarlo.

4. Finalmente se introduce -R y se ejecuta el programa.

Así se creará un archivo .LIS en la misma dirección donde está el archivo .ATP que se acaba de utilizar. Es donde se encontrarán los resultados de la transformación.

Resultados de la transformación:

```
Derived saturation curve gives peak current as a function of flux :
  Row      Current [amp]      Flux [volt-sec]
  1         0.0000000000         0.0000000000
  2         0.0141421356         0.0337618619
  3         0.0536733089         0.3376186186
  4         0.1316945517         1.6055640971
  5         0.1750465972         1.8756589920
  6         0.1891341277         2.2507907904
  7         0.3413108661         2.6259225888
  8         0.5610725685         2.9260280275
  9         0.9759987709         3.0010543872
  10        94.3968011213         3.4774717712
          9999

Next, check the derived curve by independent reverse computation. Assuming sinusoidal voltage (flux) at the level of each point,
rms current is found numerically. This curve should be equal to the original I-V points inputted.
  Row      Current in P.U.      Voltage in P.U.
  2         0.01000000         9.00000000
  3         0.04000000         90.00000000
  4         0.10000000         428.00000000
  5         0.12000000         500.00000000
  6         0.14000000         600.00000000
  7         0.20000000         700.00000000
  8         0.30000000         780.00000000
  9         0.40000000         800.00000000
  10        40.00000000         927.00000000

Comment card. Card index = 17.      |C      1      2      3      4      5
Comment card. Card index = 18.      |C 345678901234567890123456789012345678901234567890
Comment card. Card index = 19.      |C
Request for flushing of punch buffer. |$PUNCH, SAT240.pch
```

Figura 6.3. Resultados de la transformación

Creará un archivo SAT240.pch con los valores de la característica Ψ -I. Estos valores son los que se deben introducir en la característica del transformador de intensidad del circuito que se creará en ATPDraw y que servirá para el análisis de magnetización y la obtención de la curva de excitación.

El programa auxiliar vuelve a comprobar la transformación:

```

A listing of 80-column card images now being flushed from punch buffer follows.
=====
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
=====
C <++++> Cards punched by support routine on 23-Feb-16 08:21:14 <++++>
C SATURATION
C 60. .001 1.E-6 0
C .01 . 9.
C .04 . 90.
C 0.1 . 428.
C .12 . 500.
C .14 . 600.
C 0.2 . 700.
C 0.3 . 780.
C 0.4 . 800.
C 40.0 . 927.
C
C 9999
1.41421356E-02 3.37618619E-02
5.36733089E-02 3.37618619E-01
1.31694552E-01 1.60556410E+00
1.75046597E-01 1.87565899E+00
1.89134128E-01 2.25079079E+00
3.41310866E-01 2.62592259E+00
5.61072569E-01 2.92602803E+00
9.75998771E-01 3.00105439E+00
9.43968011E+01 3.47747177E+00
9999
=====< End of LUNIT7 punched cards as flushed by $PUNCH request >=====

Blank card terminating "SATURATION" data cases. |BLANK LINE
Timing figures characterizing central processor (CP) solution speed. ----- CP sec Wait sec Real sec

```

Figura 6.4. Comprobación de la transformación

6.1.2 Circuito equivalente del transformador ideal

Como herramienta para crear el circuito del transformador de intensidad se utilizará el programa ATPDraw. En la figura 8 aparece el circuito, que debe ser guardado en extensión .atp.

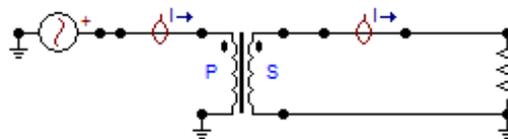


Figura 6.5. Circuito TI ATPDraw

El circuito consta de cuatro componentes; una fuente de tensión monofásica en el secundario del transformador, dos sondas de corriente (para medir las intensidades en el devanado primario y secundario), el modelo transformador saturable, y una resistencia de carga. La figura 9 muestra el circuito del transformador saturable.

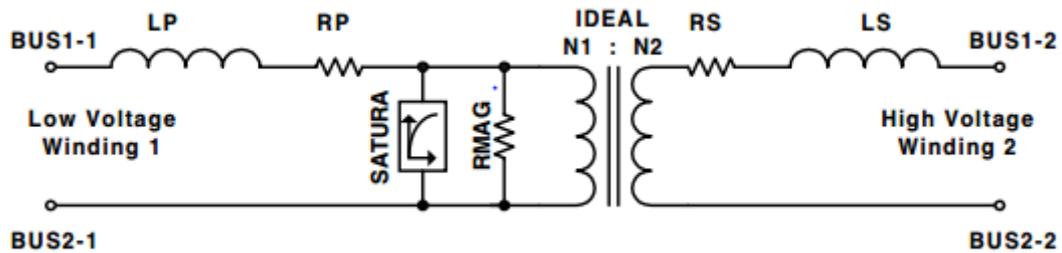


Figura 6.6. Circuito TI saturable

Los libros suelen definir el circuito equivalente del transformador de intensidad tal forma que la rama magnetizante aparece en el lado secundario. Por el contrario, en el modelo de transformador saturable en ATP la rama magnetizante se sitúa en el primario. Por ello el lado secundario del TI será el lado primario del modelo de transformador saturable (indicado con la letra P, en las figuras 8 y 9). Además el lado secundario del TI es el de mayor número de espiras como sucederá con el primario de un transformador de potencia que hiciera una reducción de intensidad desde el primario al secundario.

Una vez diseñado el circuito en ATPDraw, se deben introducir los valores que definen al transformador de intensidad, estos valores aparecen a continuación en la tabla 1. La forma de añadirlos es haciendo doble clic sobre el transformador y en la pestaña “Atributtes” rellenar los campos.

Valor	Descripción
I0=0	Corriente [A] a través de la rama magnetizante (MB), en estado estacionario
F0=0	Flujo [Wb-vuelta] en la rama magnetizante, en estado estacionario
RMAG=0 ¹	Resistencia magnetizante, 0 Ohm
RP=0.576	Resistencia en el devanado primario [Ω]
LP=0	Inductancia en el devanado primario [H]
VRP=240	Tensión nominal [kV] en el devanado primario (N1)
RS=0	Resistencia en el devanado secundario [Ω]
LS=1E-7	Inductancia en el devanado secundario [H]
VRS=1	Tensión nominal [kV] en el devanado secundario (N2)
RMS=0	Característica no lineal corriente/flujo

Tabla 6.1. Valores del circuito TI saturable

¹ Si se pone el valor cero en RMAG se quiere indicar al programa que no se considere la resistencia de pérdidas en el hierro (en realidad debería tener un valor infinito ya que es un circuito abierto).

Como se está trabajando con un transformador saturable, será necesario añadir los valores de excitación del transformador, que se han obtenido en el apartado anterior utilizando el programa auxiliar “SATURA”. En este apartado se explicaba que al ejecutar archivo CARACT.atp con el programa auxiliar, se crea un archivo SAT240.pch, que contenía los valores flujo-intensidad necesarios para definir el transformador saturable. Este archivo SAT240.pch se encuentra dentro del archivo caract.lis que devuelve el programa auxiliar “SATURATION”. En la siguiente figura se muestra donde introducir los valores de excitación del transformador (en la pestaña “Characteristics”).

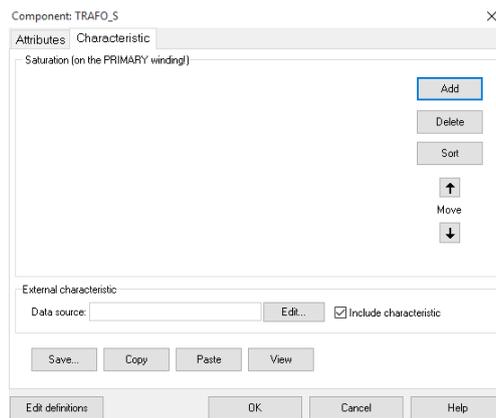


Figura 6.7. Editor del TI

Se pincha en Edit y se introducen los valores de saturación del transformador que se tienen en el archivo SAT240.pch, de la forma ilustrada en la figura 11.

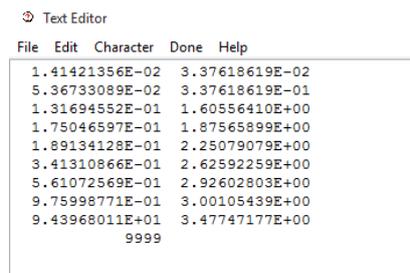


Figura 6.8. Saturación del TI

Para finalizar y comprobar el funcionamiento de circuito, dentro de ATPDraw hay que dirigirse a la barra de herramientas y pinchar en ATP.

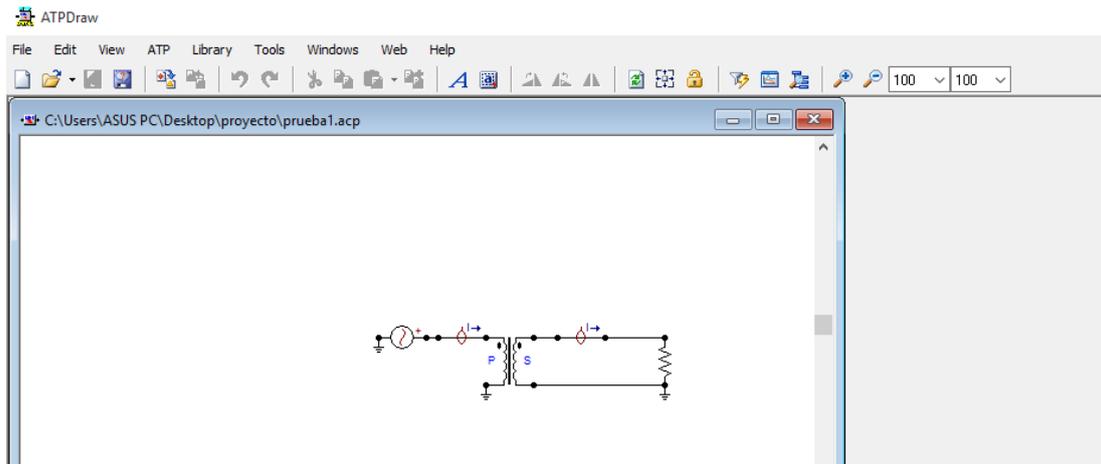


Figura 6.9. TI en ATPDraw

Dentro de ATP, “sub-process” y “make ATPfile”. Una vez que se ha creado el archivo con esta extensión, se ejecuta, con una opción que permite también esta herramienta, pinchando en “run ATP”.

6.2. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE SATURACIÓN DEL TI

Interesa conocer cómo afecta la magnitud de tensión aplicada a la saturación del transformador, por ello a continuación se va a ejecutar el circuito para dos casos diferentes de fuentes de tensión.

1. Para una fuente de tensión conectada en el devanado primario (secundario del TI) de 707.1 V o 500 V eficaces y una resistencia de $10^7 \Omega$ conectada en el devanado secundario (primario del TI). Este valor tan elevado de resistencia es para simular que el devanado secundario se encuentra a circuito abierto.

Devanado primario:

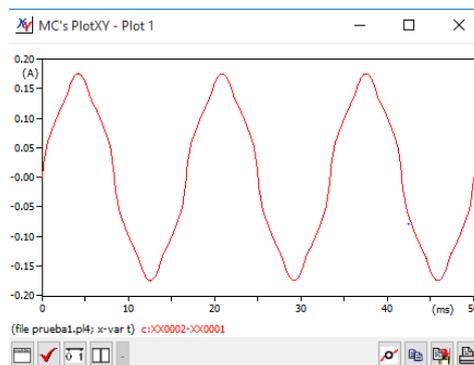


Figura 6.10. Corriente en el primario (secundario del TI) para fuente de 500V

Devanado secundario:

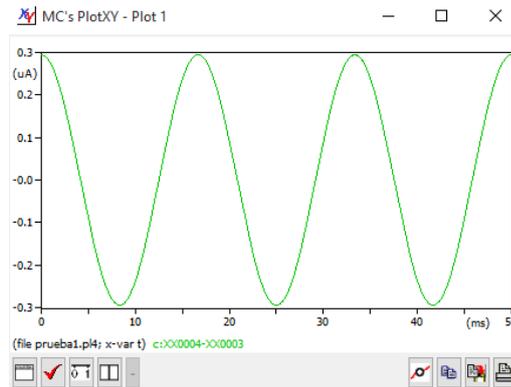


Figura 6.11. Corriente en el secundario (primario del TI) para fuente de 500V

2. Y para un segundo caso se varía la tensión conectada al devanado primario a un valor mucho más grande de 10000 V, para observar cómo afecta a su respuesta.

Devanado primario:

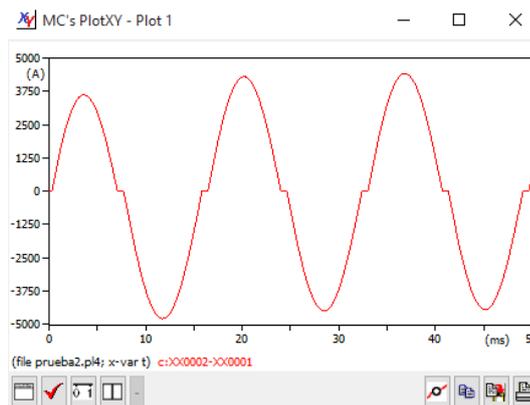


Figura 6.12. Corriente en el primario (secundario del TI) para fuente de 10000V

Devanado secundario:

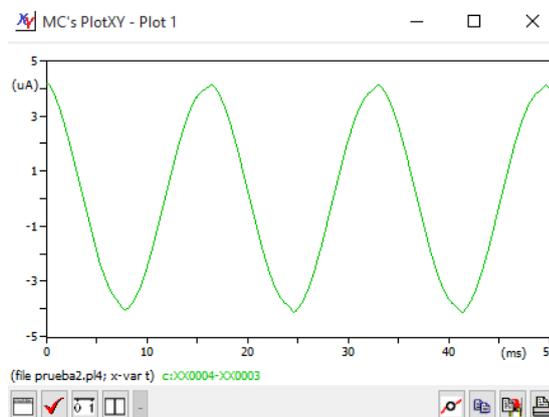


Figura 6.13. Corriente en el secundario (primario del TI) para fuente de 10000V

Conclusiones

Al comparar los dos casos se observa, como cabía esperar, un cambio de intensidades. Al introducir mayor tensión en el caso 2, obtendremos mayor pico de intensidad y también mayor saturación. La consecuencia de aumentar la tensión es un aumento mucho mayor de la corriente y también un aumento de la distorsión.

Como la rama de saturación está colocada en el devanado primario efectivamente la saturación aparece en la curva de intensidad del devanado primario.

6.3. OBTENCIÓN DE LA CURVA DE LA CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN

En los apartados anteriores se explicaba como a partir de los valores de la curva característica de excitación, por medio del programa auxiliar “SATURA” de ATP, se obtenía la curva Ψ -I.

A continuación, el procedimiento va a ser el siguiente, obtener la curva de saturación del transformador en el devanado primario (I-t) para los valores de tensión tomados de la curva característica de excitación de la figura 6.1, siguiendo los pasos del apartado 1. Utilizando el programa auxiliar de ATP, GTPPlot, transformar las curvas de saturación I-t en I_{ef} -t ($I_{ef} \equiv$ Intensidad eficaz), para comprobar que con los valores de saturación del transformador, se puede obtener la misma característica de excitación de la que se ha partido.

6.3.1. Curvas de saturación para los diferentes valores de tensión

Lo primero es ir modificando en el circuito de ATP la tensión, para obtener la curva de saturación para todos los valores de tensión que hemos tomado en un inicio de la característica de excitación, siguiendo los pasos de los apartados 1 y 2.

Tensión 10 V (recordar que en el circuito de ATP, las tensiones de las fuentes no son en valor eficaz, luego habrá que multiplicar por raíz de dos):

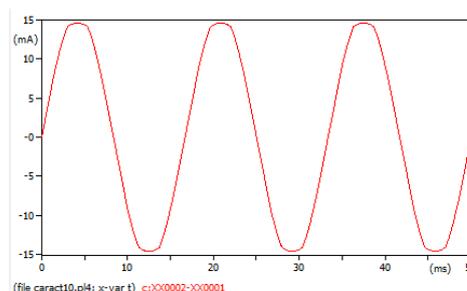


Figura 6.14. Intensidad para fuente de tensión de 10 V

Tensión 100V:

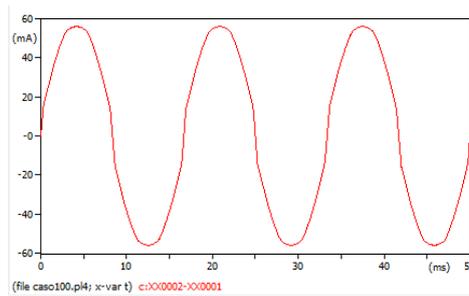


Figura 6.15. Intensidad para fuente de tensión de 100 V

Tensión 400 V:

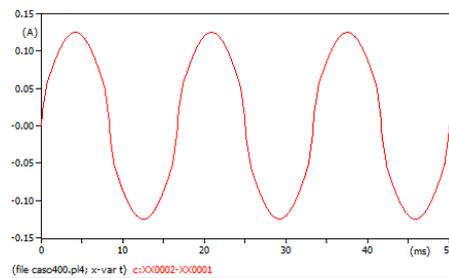


Figura 6.16. Intensidad para fuente de tensión de 400 V

Tensión 500 V:

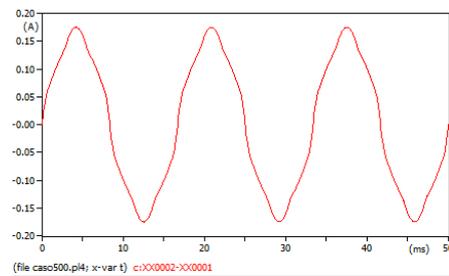


Figura 6.17. Intensidad para fuente de tensión de 500 V

Tensión 600 V:

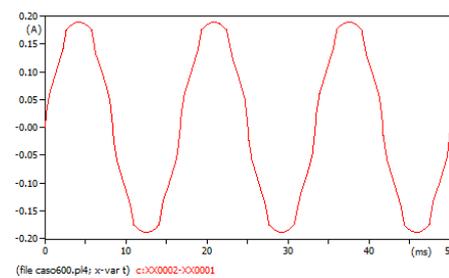


Figura 6.18. Intensidad para fuente de tensión de 600 V

Tensión 700 V:

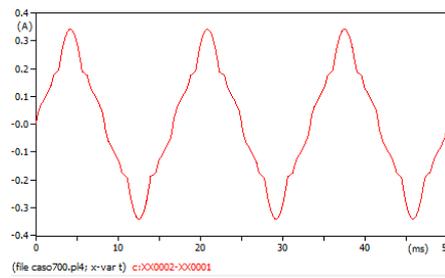


Figura 6.19. Intensidad para fuente de tensión de 700 V

Tensión 780 V:

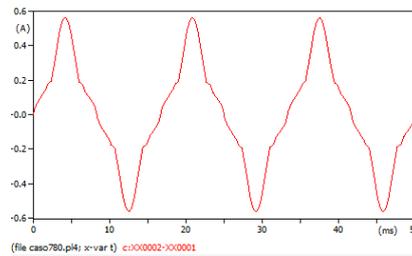


Figura 6.20. Intensidad para fuente de tensión de 780 V

Tensión 800 V:

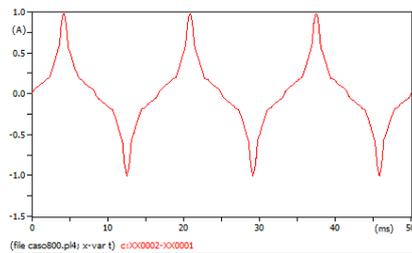


Figura 6.21. Intensidad para fuente de tensión de 800 V

Tensión 927 V:

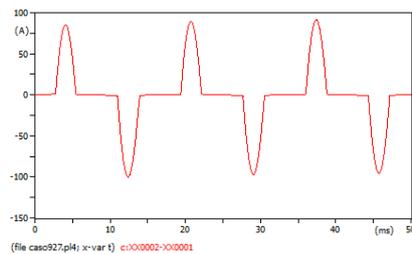


Figura 6.22. Intensidad para fuente de tensión de 927 V

6.3.2. Transformación de las curvas de saturación

Los archivos .pl4 creados al ejecutar el circuito ATP (son los archivos que permiten visualizar las gráficas en el programa auxiliar XYPlot). Se van a introducir en el programa GTPPlot, para transformar las curvas de I-t (intensidad-tiempo) en curvas I_{ef}-t (intensidad eficaz-tiempo) y así poder extraer el valor eficaz de la corriente de excitación para una determinada tensión. El procedimiento se mostrará a continuación para un valor de tensión y se repetirá para el resto.

En el programa auxiliar GNUPlot, lo primero es escribir la dirección del archivo .pl4 que contiene las formas de onda. Lo siguiente es indicar la variable de la que se va a querer la curva, en este caso la intensidad del devanado primario, por lo que se introducirá #1. Como el tipo de valores deseados es valores eficaces, se escribirá RMS, y por último “GO”, para que se ejecute la operación y devuelva la gráfica convertida.

```

Reading configuration from gtpplot.ini

SEND @@COMMAND FILE OR
SEND .PL4 FILE NAME [<CR> to PLOT: prompt, DIR, END] F:\CARACT10

=== Ok, ready to connect F:\CARACT10.pl4

Reading 200000 points
200001 Timepoints, T-min, T-max(sec) 0.00000E+00 2.00000E-01
Data file [ F:\CARACT10.pl4]
Type-4 entries (node voltages):

Type-8 entries (branch voltages, * branch power):
Type-9 entries (branch currents, * branch energy):
1 XX0002-XX0001 2 XX0004-XX0003

LAST COMMAND:[]
PLOT: #1

Request Type Curve Name-1 Name-2
1 9 1 XX0002 XX0001

LAST COMMAND:[#1]
PLOT: RMS
--- Ok, to calculate RMS of variables.

LAST COMMAND:[RMS]
PLOT: GO

```

Figura 6.23. Ejecución del programa GTPPlot

GRÁFICAS I_{ef} -t SEGÚN LOS VALORES DE TENSIÓN

Tensión 10 V

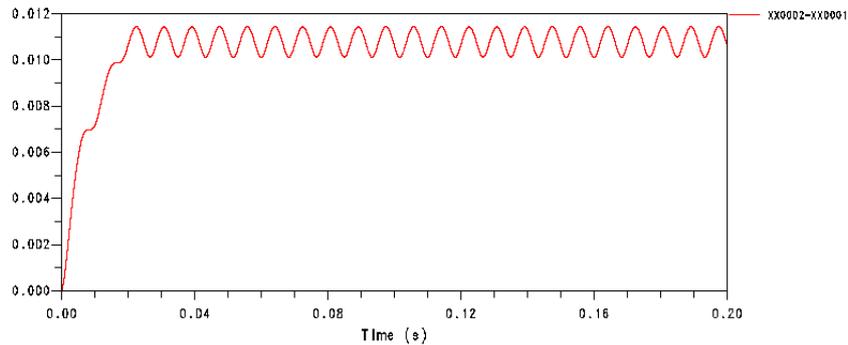


Figura 6.24. Gráfica de valores eficaces de intensidad para tensión de 10V

El valor límite de la saturación aparece en 0.01 A, siendo necesarios prácticamente dos periodos para alcanzarlo (se está trabajando con 60 Hz, por lo que el periodo será: $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0.0167$ s).

$I_{ef}=0.01$ A

Tensión 100 V:

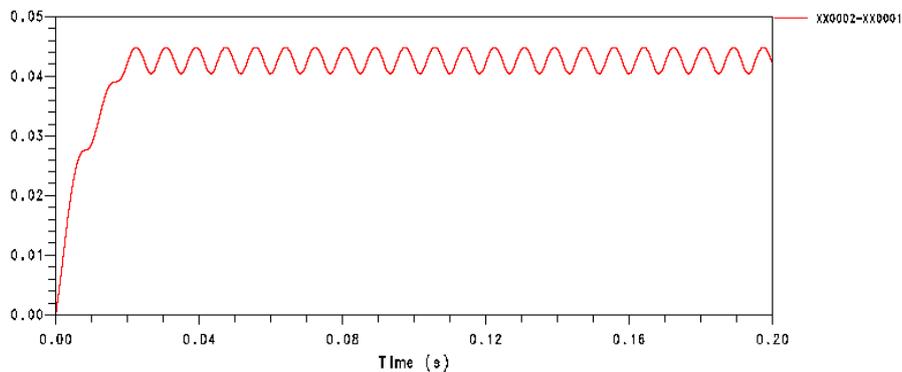


Figura 6.25. Gráfica de valores eficaces de intensidad para tensión de 100V

$I_{ef}=0.04$ A

El método de obtención de valores eficaces es el mismo en todo momento. Simplemente hay que ir modificando el archivo .pl4 introducido en el programa GTPPlot. En la siguiente tabla se encuentran los valores de intensidad eficaz para cada uno de los valores de tensión de la

fuentes que son necesarios para posteriormente poder graficar la curva de característica de excitación.

Resultados

Vef (V)	Ief (A)
10	0.01
100	0.04
400	0.09
500	0.12
600	0.14
700	0.2
780	0.3
800	0.4
927	40

Tabla 6.2. Valores Vef-Ief para la curva de excitación (método 1)

Representación de la característica de excitación con los datos de la tabla:

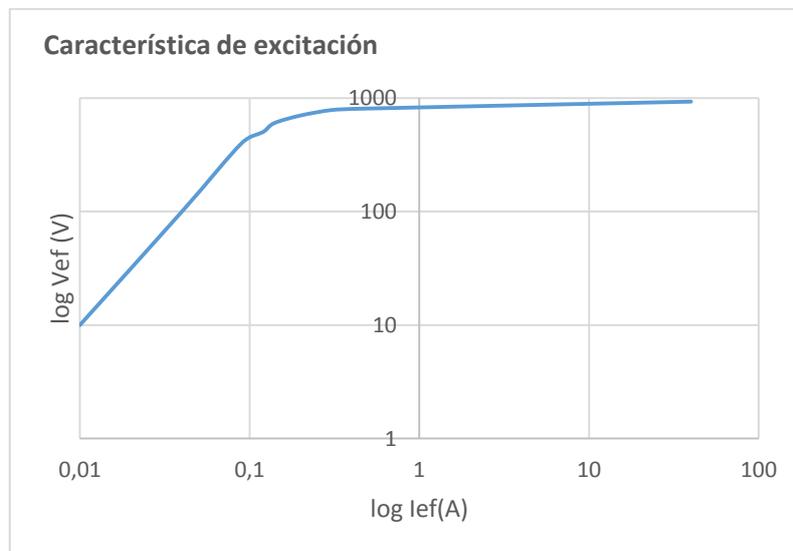


Figura 6.26. Representación de la característica de excitación con Excel

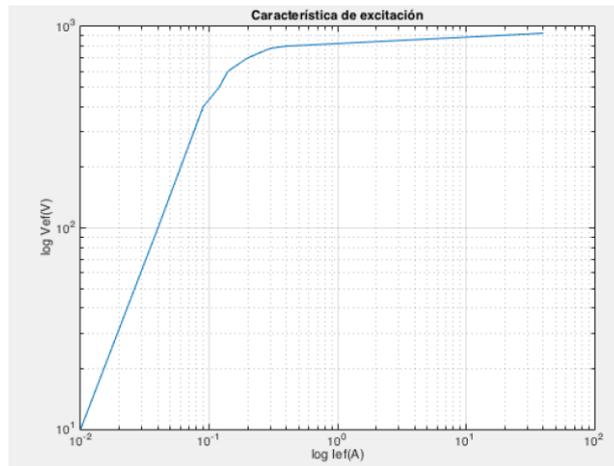


Figura 6.27. Representación de la característica de excitación con Matlab

6.3.3. MÉTODO ALTERNATIVO PARA EL CÁLCULO DE LOS VALORES EFICACES

En lugar de tener que recurrir al programa GTPPlot, para convertir las gráficas I-t (intensidad tiempo) creadas al ejecutar el circuito creado en ATP para cada valor de tensión que se está estudiando, se puede añadir al circuito creado en ATP un módulo con el que se obtiene el valor eficaz de una magnitud periódica. Este módulo maneja tensiones como señales de entrada. Por ello se debe poner en serie con el circuito primario una resistencia de 0.01 Ω y se toma como entrada del módulo la tensión en esta resistencia. Debido a esto el resultado es el valor eficaz de la corriente multiplicado por 0.01. La salida se puede ver al abrir el archivo .pl4 y eligiendo la variable que empieza por “m”, obteniendo una gráfica, en la cual modificando la escala de observación, se alcanza un resultado más exacto que en apartado anterior.

A continuación se va a seguir este procedimiento para todos los valores de tensión que deben ser estudiados. Se obtendrá la gráfica para el primer caso y el resto se obtendrán de la misma forma.

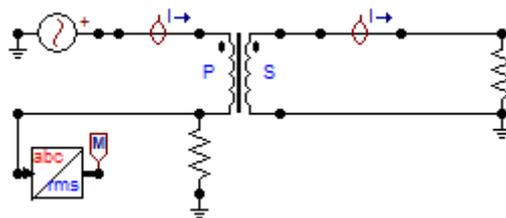


Figura 6.28. Circuito en ATP modificado, añadiendo el módulo de cálculo de valores eficaces

Caso: tensión eficaz=10 V

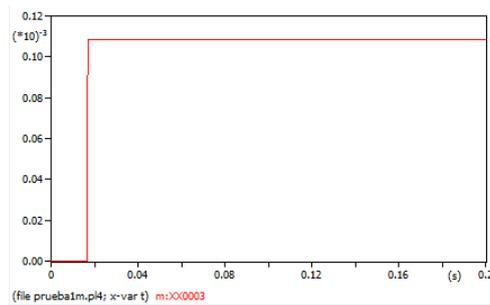


Figura 6.29. Valor eficaz de intensidad para fuente de tensión de 10V

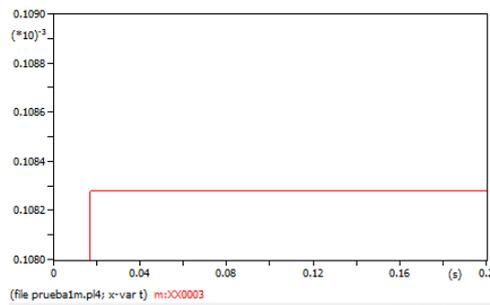


Figura 6.30. Ampliación de gráfica de valores eficaces de intensidad para fuente de tensión de 10V

$I_{ef}=0.01083$ A

Se seguirá el mismo procedimiento para todos los valores de tensión que ayudan a definir la curva. Simplemente se deben ir cambiando dichos valores de tensión en la fuente del circuito. Para simplificar el desarrollo se ha escrito directamente en la siguiente tabla de resultados.

Resultados:

V_{ef} (V)	I_{ef} (A)
10	0.01083
100	0.044
400	0.095415
500	0.12
600	0.14
700	0.2
780	0.3
800	0.401
927	40

Tabla 6.3. Valores V_{ef}-I_{ef} para la curva de excitación (método 2)

Y con estos datos se crea la característica de excitación:

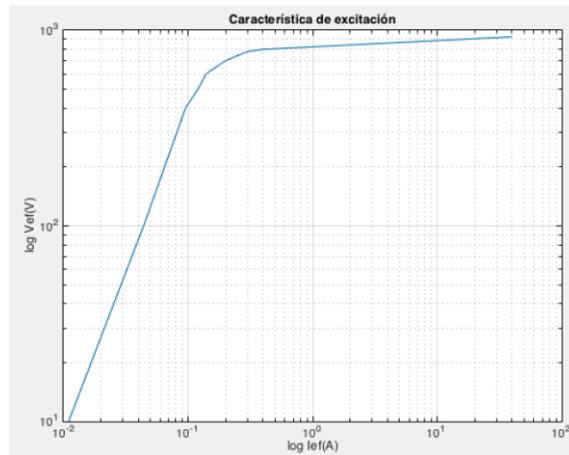


Figura 6.31. Característica de excitación obtenida con los resultados del módulo de valores eficaces

Se comprueba que para ambos casos sale la misma característica de excitación, debido que la diferencia de valor y magnitud entre los resultados de los dos métodos es mínima. El resultado es el esperado, ya que se buscaba obtener la misma característica de excitación independientemente del método de obtención de valores eficaces que se implementase.

7. CONCLUSIONES

Uno de los principales objetivos del trabajo era el estudio del sistema eléctrico elaborado por el IEEE PSRC WG. Para poder cumplir dicho objetivo se comenzó analizando todas las posibilidades de configuración del sistema y cada uno de los elementos que lo componen, y así poder profundizar en las posibilidades de trabajo. Para ello se realizaron ensayos de faltas, obteniendo de esta manera la respuesta del sistema eléctrico ante cualquier tipo de fallo. Se llevaron a cabo ensayos de falta: monofásica, bifásica y bifásica a tierra, para todas las configuraciones. Lo que permitió contemplar diferentes tipos de errores según la posición de la falta y la conexión de la línea. El primer problema se producía al desconectar la línea L3, y posicionar la falta en el nudo donde se encuentra el interruptor que conecta las líneas L1 y L3. Al ejecutar el programa el sistema devolvía un error desde el instante inicial independientemente del instante en que se hubiese definido el fallo y el tipo de fallo del que se tratase, el sistema permanecería alterado durante toda la duración del ensayo. El otro problema que se observó al ejecutar el programa directamente desde ATPDraw fue al cambiar el módulo de faltas de la línea L1 a la línea L2, el sistema respondía con error desde el instante inicial y su respuesta no correspondía al diseño que se le había dado. Para resolver dichos problemas se programaron las faltas directamente desde el código del programa y ejecutándolo con el compilador TPBIG. Consiguiendo así el objetivo principal: disponer de todos los datos posibles para el estudio de cortocircuitos.

A la vista de dichos resultados, se puede decir que al situar la falta próxima al inicio de la línea el efecto del cortocircuito será mucho más elevado. Esto es debido a que la red conectada a la izquierda del sistema eléctrico (figura 1) es de gran potencia, por lo que al acercarse la falta las corrientes aumentan y las tensiones mantienen formas de onda casi puramente sinusoidales. A la hora de definir las faltas, la falta monofásica hace que la línea afectada adquiera picos de intensidad mucho más elevados y mayores caídas de tensión que en el caso de faltas bifásicas. Y por último, en aquellos casos donde se programa resistencia de falta de diez ohmios en lugar nula, el cortocircuito es más leve, controlando la caída de tensión y los valores de pico de intensidad.

El análisis de faltas sobre el sistema eléctrico, da paso al estudio de protecciones. El relé de protecciones que se ha modelado durante el trabajo actúa ante todo tipo de faltas, ya sean monofásicas o bifásicas. Se ha trabajado con el relé de sobreintensidad. Dicho relé está permanentemente midiendo la intensidad, y al fijar una intensidad de ajuste, valor por encima del cual se pondría en peligro el funcionamiento de la línea de transporte, la protección actúa abriendo los interruptores, impidiendo así la circulación de corriente. Durante la simulación se ha comprobado el correcto funcionamiento de los módulos que conforman el relé, que actúan al producirse la falta.

Siguiendo con el sistema eléctrico y con el objetivo de profundizar en el estudio de dicho sistema, se diseñaron dos modelos para medir los fasores de tensión de la línea L3, comprobando que independientemente del método que se emplee, ya sea mediante un módulo conectado directamente al circuito y que devuelve los valores gráficamente, o utilizando un módulo que devuelva resultados numéricos dentro del código del programa, los resultados son los mismos.

Por último con el fin de sacar el máximo partido a las posibilidades que ofrece ATP, se estudió la característica de excitación del transformador de intensidad, consiguiendo que a partir de datos extraídos de la característica de excitación tensión-intensidad (V-I), se puedan convertir en valores de flujo-intensidad (Ψ -I), utilizando el programa auxiliar de ATP, "SATURATION". Diseñando el circuito en ATPDraw con dicho valores, se reproduce el ensayo de laboratorio para obtener la característica de excitación, lo que se consigue de forma satisfactoria.

8. LÍNEAS FUTURAS

El sistema de la IEEE PSRC WG: “Reference Network for Transmission Line Relay Testing” con el que se ha estado trabajando ofrece múltiples posibilidades para estudios futuros, tanto en el ámbito de análisis de operación del sistema, como en el de simulación.

Y en cuanto a los módulos de relés, existe la posibilidad de trabajar con protecciones de distancia y protecciones diferenciales.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Bastard, P. Bertrand and M. Meunier, "A transformer model for winding fault studies", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 690-699, April 1994.
- [2] "Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers", IEEE Power System Relaying Committee, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 62-72.
- [3] Lj. A. Kojovic, "Guidelines for Current Transformers Selection for Protection Systems", IEEE/PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 2001.
- [4] M. Kezunovic, Lj. A. Kojovic, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, F. Phillips, "Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study", *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 9, No. 1, pp. 405-413, January 1994.
- [5] Lj. A. Kojovic, "Comparison of Different Current Transformer Modeling Techniques for Protection System Studies", IEEE/PES Summer Meeting, Chicago, Illinois, July 2002.
- [6] M. Kezunovic, Lj. A. Kojovic, V. Skendzic, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, S. L. Nilsson, "Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Transients Protective Relaying Studies", *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 7, No. 4, pp. 1927-1935, October 1992.
- [7] Lj. A. Kojovic, M. Kezunovic, S. L. Nilsson, "Computer Simulation of a Ferroresonance Suppression Circuit for Digital Modeling of Coupling Capacitor Voltage Transformers", ISMM International Conference, Orlando, Florida, March 1992.
- [8] Lj. A. Kojovic, M. Kezunovic, V. Skendzic, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, "A New Method for the CCVT Performance Analysis using Field Measurements, Signal Processing and EMTP Modeling", *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 9, No. 4, pp. 1907-1915, October 1994.
- [9] ATP Manual.
- [10] EMTP Manual.
- [11] EMTP Primer, EPRI EL-4202, 1985.
- [12] V. Phaniraj and A.G. Phadke, "Modelling of Circuit Breakers in the EMTP", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 799-805, May 1988.
- [13] IEEE Guide for Transmission Line Protection.
- [14] IEEE Guide for Protective Relay Application of Transmission-Line Series Capacitor Banks

10. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

El trabajo que se va a realizar y que pretende cubrir los objetivos expuestos en el inicio del documento se puede dividir en cinco etapas.

En este proyecto se va a trabajar con el programa ATP, y por tanto en primer lugar habrá que familiarizarse con dicho programa, haciendo uso del manual y realizando pequeñas prácticas preliminares, que aunque no siendo parte del proyecto son necesarias para agilizar el manejo y diseño de circuitos, que posteriormente serán necesarios para realizar los diferentes ensayos.

Gran parte del proyecto se basa en el estudio del sistema eléctrico elaborado por el IEEE PSRC WG: “Reference Network for Transmission Line Relay Testing”, por lo que tras la iniciación en el programa ATP se procederá al estudio de dicho sistema, recabando información sobre el funcionamiento y configuración del mismo así como los módulos que lo conforman.

Una vez que se tienen los conocimientos necesarios sobre el sistema eléctrico y como modelar circuitos con el programa ATP, se comenzará con los ensayos. Se comienza con el ensayo de Característica de Excitación del Transformador de Intensidad. Utilizando los conocimientos que se han adquirido durante el proceso de documentación, se diseñará con el programa auxiliar de ATP: ATPDraw, y la saturación se calculará con otro subprograma: “SATURATION”.

Continuando con los ensayos se procederá a la programación de faltas sobre el sistema eléctrico. Algunos de los casos programados durante este ensayo devolverán error, por lo que otra etapa del proyecto será corregir estos errores y para ello se programará directamente el código y se ejecutará directamente con el compilador TPBIG. El siguiente ensayo será de protecciones. En el mismo sistema se diseñará un relé de sobreintensidad y se comprobará su correcto funcionamiento ante fallos definidos en la línea de transporte.

Otro de los objetivos del trabajo era profundizar en las posibilidades de trabajo dentro de ATP, con este fin se añade al sistema diferentes módulos de cálculo fasorial, para comprobar su funcionamiento y medir las tensiones en el sistema eléctrico.

Por último se validarán los resultados de los ensayos, realizando comprobaciones con métodos analíticos y gráficos, con la ayuda del programa MATLAB.

Y finalmente la redacción de la memoria.

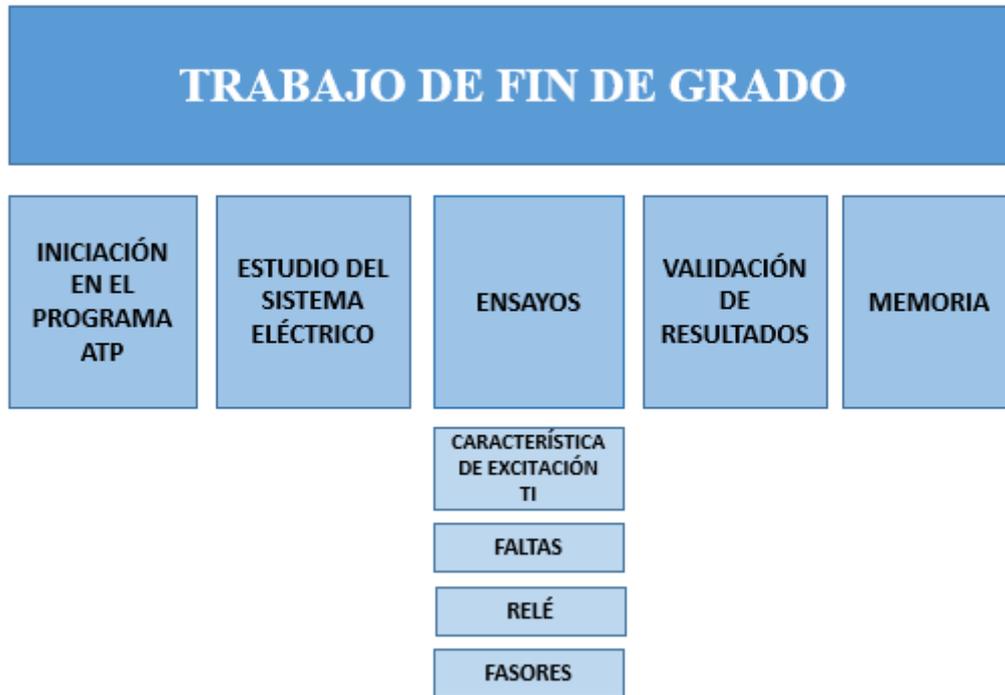


Figura 10.1. Planificación del Trabajo Fin de Grado

Por otro lado la distribución temporal del Trabajo Fin de Grado se desarrolla con el programa Gantt Project. Dicho diagrama que aparece en la siguiente figura, contiene la programación de todas las actividades que son necesarias para llevar a cabo el proyecto, incluyendo las relaciones entre las diferentes etapas.

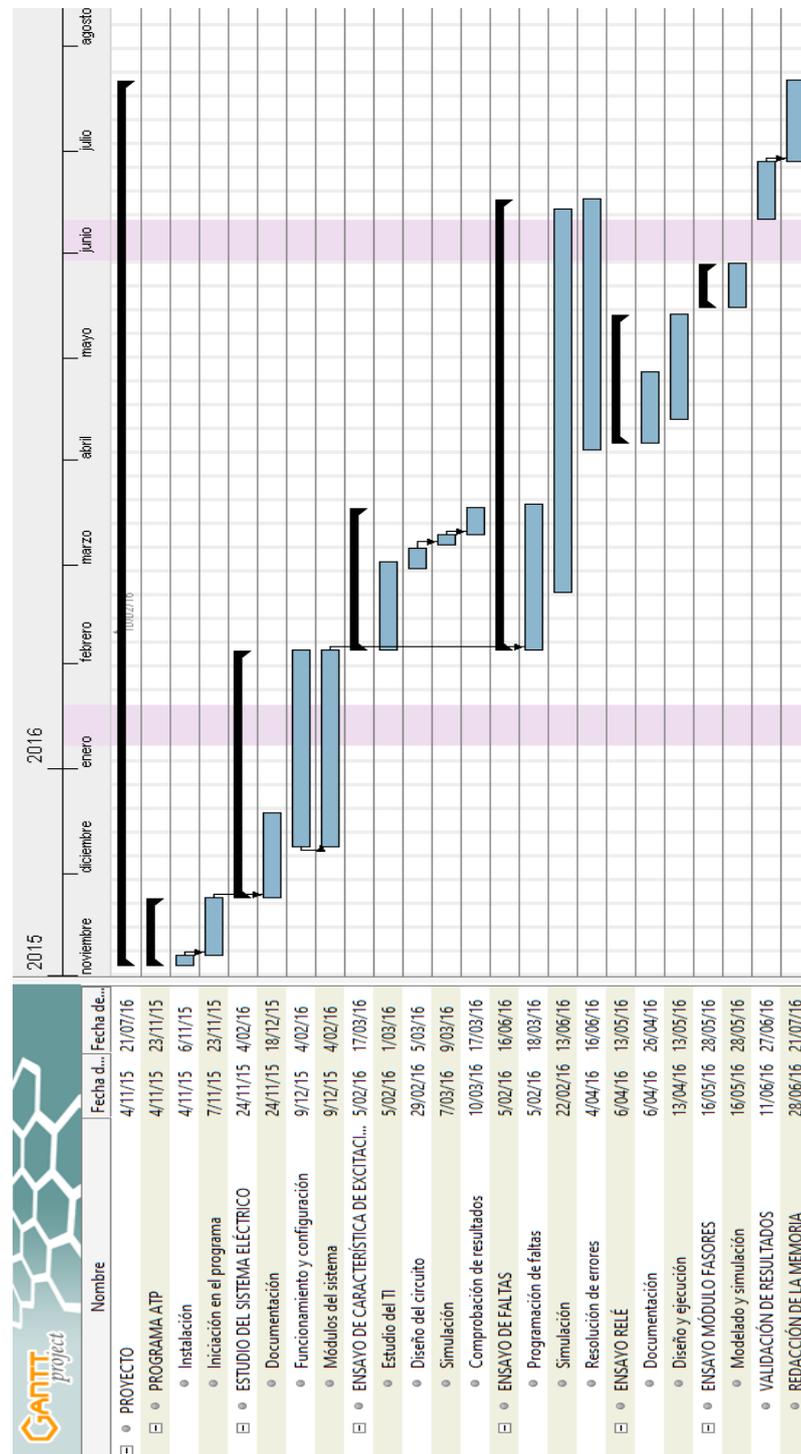


Figura 10.2. Diagrama de Gantt

11. PRESUPUESTO

Los conceptos incluidos en el presupuesto de este proyecto se pueden dividir de la siguiente forma:

- Coste personal

Se incluyen las horas dedicadas tanto por el alumno como aquellas dedicadas por el tutor.

	Horas de trabajo	Coste horario (€/h)	Coste total (€)
Alumno	320	10	3200
Profesor	60	60	3600
		TOTAL	6800

- Coste de herramientas y software de trabajo

Se incluye el ordenador necesario para realizar el trabajo, así como el software empleado para desarrollar el modelo de los diferentes ensayos, ATP. Por último se utilizará el programa *Matlab*, propiedad de *MathWorks*, para la comprobación de resultados. En el presupuesto se incluye la amortización correspondiente al tiempo de uso efectuado.

Producto	Precio (€)	Periodo de amortización	Tiempo de uso	Coste (€)
Ordenador portátil	800	4 años	9 meses	150
ATP ²	-	-	-	-
Matlab ³	-	-	-	-
			TOTAL	150

² La licencia del programa ATP es gratuita.

³ Se ha hecho uso de la licencia académica de *Matlab* disponible para los alumnos de la Universidad Politécnica de Madrid, por lo que el coste ha sido nulo.

12. ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 0.1. CURVA I-T DE TIEMPO DEFINIDO Y TIEMPO INVERSO.....	3
FIGURA 1.1. SISTEMA IEEE	6
FIGURA 1.2.MÓDELO EN ATPDRAW DEL SISTEMA IEEE.....	6
FIGURA 1.3. CIRCUITO EQUIVALENTE EN PI EXACTO.....	8
FIGURA 1.4. MODELO DE TRANSFORMADOR SATURABLE.....	14
FIGURA 1.5. TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD.....	18
FIGURA 1.6. TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD PARA TRANSITORIOS (MODELO SIMPLIFICADO).....	19
FIGURA 1.7. REPRESENTACIÓN DEL “RUIDO” EN UNA CURVA Ψ -I (FLUJO-INTENSIDAD)	20
FIGURA 1.8. CURVA CARACTERÍSTICA V-I (TENSIÓN-INTENSIDAD), PARA UN TI C800 CON RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN 2000/5 Y OTRO TI DE TIPO C400 CON RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN 800/5.....	20
FIGURA 1.9. CIRCUITO PARA LA SIMULACIÓN DE LA CURVA V-I.....	21
FIGURA 1.10. CONEXIÓN DEL CIRCUITO DE UN CCVT	22
FIGURA 1.11. MODELO GENÉRICO DE UN CCVT.....	22
FIGURA 1.12. (A) DISEÑO REAL DEL FSC, (B) MODELO DIGITAL DEL FSC SIMULADO UTILIZANDO EL MODELO DE BOBINA Y (C) UTILIZANDO EL MODELO DE TRANSFORMADOR.	23
FIGURA 1.13. CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN.....	24
FIGURA 1.14. INTERRUPTOR DE SIMULACIÓN BÁSICO	25
FIGURA 1.15. INTERRUPTOR DE ESTUDIOS ESTADÍSTICOS	25
FIGURA 1.16. OPERACIÓN DE UN INTERRUPTOR TACS CONTROLADO	26
FIGURA 3.1. SISTEMA IEEE PSRC WG	31
FIGURA 3.2. INTERRUPTOR DE CONEXIÓN DE LA LÍNEA L3	32
FIGURA 3.3. MÓDULO DE FALTAS	33
FIGURA 3.4. TENSIONES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} \approx 0 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN LA POSICIÓN L1F7	33
FIGURA 3.5. INTENSIDADES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} \approx 0 \Omega$ Y EL MÓDULO DE FALTAS EN L1F7 .	34

FIGURA 3.6. TENSIONES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} \approx 0 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN LA POSICIÓN L1F1	34
FIGURA 3.7. INTENSIDADES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} \approx 0 \Omega$ Y EL MÓDULO DE FALTAS EN L1F1 .	35
FIGURA 3.8. TENSIONES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} = 10 \Omega$ Y EL MÓDULO DE FALTAS EN L1F7	36
FIGURA 3.9. INTENSIDADES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} = 10 \Omega$ Y EL MÓDULO DE FALTAS EN LA POSICIÓN L1F7.....	36
FIGURA 3.10. TENSIONES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} = 10 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN LA POSICIÓN L1F1	36
FIGURA 3.11. INTENSIDADES PARA LA FALTA MONOFÁSICA CON $R_{F_AG} = 10 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN LA POSICIÓN L1F1	37
FIGURA 3.12. TENSIONES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} \approx 0 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F7	38
FIGURA 3.13. INTENSIDADES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} \approx 0 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F7	38
FIGURA 3.14. TENSIONES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} \approx 0 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F1	39
FIGURA 3.15. INTENSIDADES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} \approx 0 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F1	39
FIGURA 3.16. TENSIONES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} = 10 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F7	40
FIGURA 3.17. INTENSIDADES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} = 10 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F7	40
FIGURA 3.18. INTENSIDADES PARA LA FALTA BIFÁSICA CON $R_{F_BC} = 10 \Omega$ Y MÓDULO DE FALTAS EN L1F1	40
FIGURA 3.19. TENSIONES PARA FALTA MONOFÁSICA EN L1F3 Y CON $R_F \approx 0 \Omega$	42
FIGURA 3.20. INTENSIDADES PARA FALTA MONOFÁSICA EN L1F3 Y CON $R_F \approx 0 \Omega$	42
FIGURA 3.21. TENSIONES PARA FALTA MONOFÁSICA EN L1F3 Y $R_F = 10 \Omega$	42
FIGURA 3.22. INTENSIDADES PARA FALTA MONOFÁSICA EN L1F3 Y $R_F = 10 \Omega$	43
FIGURA 3.23. TENSIONES PARA FALTA BIFÁSICA EN L1F3 Y $R_F \approx 0 \Omega$	43
FIGURA 3.24. INTENSIDADES PARA FALTA BIFÁSICA EN L1F3 Y $R_F \approx 0 \Omega$	43
FIGURA 3.25. TENSIONES PARA FALTA BIFÁSICA EN L1F3 Y $R_F = 10 \Omega$	44
FIGURA 3.26. INTENSIDADES PARA FALTA BIFÁSICA EN L1F3 Y $R_F = 10 \Omega$	44
FIGURA 3.27. TRASPOSICIÓN DE FASES ENTRE L1F3 Y L1F1	45
FIGURA 3.28. TENSIONES PARA EL CASO EN EL QUE EL MÓDULO DE FALTAS SE SITÚA EN L1F3, ESTANDO L3 DESCONECTADA	45

Desarrollo de trabajos con ATP para protecciones de los sistemas de energía eléctrica

FIGURA 3.29. INTENSIDADES PARA EL CASO EN EL QUE EL MÓDULO DE FALTAS SE SITÚA EN L1F3, ESTANDO L3 DESCONECTADA	46
FIGURA 3.30. INTERRUPTORES.....	47
FIGURA 3.31. TENSIONES AL APLICAR LA FALTA EN L1F3, FALTA MONOFÁSICA, CON L3 DESCONECTADA Y $R_F \approx 0\Omega$	48
FIGURA 3.32. INTENSIDADES AL APLICAR LA FALTA EN L1F3, FALTA MONOFÁSICA, CON L3 DESCONECTADA Y $R_F \approx 0\Omega$	48
FIGURA 3.33. TENSIONES AL APLICAR LA FALTA EN L1F3, FALTA MONOFÁSICA, CON L3 DESCONECTADA Y $R_F = 10\Omega$	49
FIGURA 3.34. TENSIONES AL APLICAR LA FALTA EN L1F3, FALTA MONOFÁSICA, CON L3 DESCONECTADA Y $R_F = 10\Omega$	49
FIGURA 3.35. INTERRUPTORES PARA FALTA BIFÁSICA	50
FIGURA 3.36. TENSIONES AL APLICAR LA FALTA EN L1F3, FALTA BIFÁSICA, CON L3 DESCONECTADA Y $R_F \approx 0\Omega$..	50
FIGURA 3.37. INTENSIDADES AL APLICAR LA FALTA EN L1F3, FALTA BIFÁSICA, CON L3 DESCONECTADA Y $R_F \approx 0\Omega$	50
FIGURA 3.38. TENSIONES, CON FALTA MONOFÁSICA SOBRE L2, $R_F \approx 0\Omega$	51
FIGURA 3.39. INTENSIDADES, CON FALTA MONOFÁSICA SOBRE L2, $R_F \approx 0\Omega$	52
FIGURA 3.40. TENSIONES, CON FALTA MONOFÁSICA SOBRE L2, $R_F = 10\Omega$	52
FIGURA 3.41. INTENSIDADES, CON FALTA MONOFÁSICA SOBRE L2, $R_F = 10\Omega$	52
FIGURA 3.42. TENSIONES PARA FALTA BIFÁSICA SOBRE L2, Y $R_F \approx 0\Omega$	53
FIGURA 3.43. INTENSIDADES PARA FALTA BIFÁSICA SOBRE L2, Y $R_F \approx 0\Omega$	53
FIGURA 3.44. TENSIONES PARA FALTA BIFÁSICA SOBRE L2, Y $R_F = 10\Omega$	53
FIGURA 3.45. INTENSIDADES PARA FALTA BIFÁSICA SOBRE L2, Y $R_F = 10\Omega$	54
FIGURA 4.1. LÍNEA L3 AISLADA.....	55
FIGURA 4.2. MÓDULO DE CONVERSIÓN A VALORES EFICACES	56
FIGURA 4.3. EDITOR DEL MÓDULO DE CONVERSIÓN A VALORES EFICACES	56
FIGURA 4.4. CÓDIGO DE CONVERSIÓN A VALORES EFICACES	57
FIGURA 4.5. MÓDULO DE TIEMPO DEFINIDO.....	57
FIGURA 4.6. EDITOR DEL MÓDULO DE TIEMPO DEFINIDO	58

FIGURA 4.7. CURVA I-T DE TIEMPO DEFINIDO	58
FIGURA 4.8. CÓDIGO DEL MÓDULO DE TIEMPO DEFINIDO.....	59
FIGURA 4.9. MÓDULO DE TIEMPO INVERSO.....	60
FIGURA 4.10. CURVA I-T DE TIEMPO INVERSO	60
FIGURA 4.11. VALORES DEL MÓDULO DE TIEMPO INVERSO.....	61
FIGURA 4.12. CÓDIGO DEL RELÉ DE TIEMPO INVERSO.....	63
FIGURA 4.13. TENSIONES EN EL INICIO DE LA LÍNEA	64
FIGURA 4.14. INTENSIDADES EN LA LÍNEA	64
FIGURA 4.15. AMPLIACIÓN DE LA GRÁFICA DE INTENSIDADES.....	65
FIGURA 4.16. DISPARO DEL RELÉ DE TIEMPO DEFINIDO	65
FIGURA 4.17. CAMBIO DE ESTADO DE LAS INTENSIDADES.....	66
FIGURA 4.18. DISPARO DEL RELÉ DE TIEMPO INVERSO.....	66
FIGURA 4.19. ESTADO DEL SISTEMA EN EL RELÉ DE TIEMPO INVERSO.....	67
FIGURA 4.20. INTENSIDADES EN LA LÍNEA	68
FIGURA 4.21. VALORES EFICACES.....	68
FIGURA 4.22. TENSIONES EN LA LÍNEA PARA EL CASO DE FALTA BIFÁSICA	69
FIGURA 4.23. INTENSIDADES EN LA LÍNEA PARA EL CASO DE FALTA BIFÁSICA.....	70
FIGURA 4.24. VALORES EFICACES PARA EL CASO DE FALTA BIFÁSICA	70
FIGURA 4.25. DISPARO DEL MÓDULO DE TIEMPO INVERSO.....	71
FIGURA 4.26. CAMBIO DE ESTADO	71
FIGURA 4.27. DISPARO DEL MÓDULO DE TIEMPO DEFINIDO	71
FIGURA 4.28. VARIABLE DE SALIDA DE CAMBIO DE ESTADO DEL MÓDULO DE TIEMPO DEFINIDO.....	72
FIGURA 4.29. INTENSIDADES DE LA LÍNEA CON LA FALTA BIFÁSICA	72
FIGURA 4.30. GRÁFICA CON VALORES EFICACES	73
FIGURA 4.31. TIEMPO DE ACTUACIÓN DEL MÓDULO DE TIEMPO INVERSO.....	74
FIGURA 4.32. AMPLIACIÓN DE LA GRÁFICA DE TIEMPO DE ACTUACIÓN DEL RELÉ DE TIEMPO INVERSO	74
FIGURA 5.1. CIRCUITO PARA OBTENCIÓN DE RESULTADOS GRÁFICOS.....	75
FIGURA 5.2. PARTE REAL DEL FASOR DE TENSIÓN PARA CADA FASE	76
FIGURA 5.3. PARTE IMAGINARIA DEL FASOR DE TENSIÓN PARA CADA FASE.....	76

Desarrollo de trabajos con ATP para protecciones de los sistemas de energía eléctrica

FIGURA 5.4. CIRCUITO PARA EL SEGUNDO MÉTODO DE CÁLCULO DE FASORES DE TENSIÓN.....	77
FIGURA 5.5. CÓDIGO DEL MÓDULO “WRITE”.....	78
FIGURA 5.6. REPRESENTACIÓN DE FASORES	79
FIGURA 5.7. CÓDIGO DE REPRESENTACIÓN DE FASORES CON MATLAB.....	79
FIGURA 5.8. REPRESENTACIÓN DE TENSIONES PARA EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO-INDUCTIVO..	80
FIGURA 6.1. CARACTERÍSTICA DEL TI (TRANSFORMADOR DE INTENSIDADES).....	83
FIGURA 6.2. VALORES DE SATURACIÓN DEL TRANSFORMADOR.....	84
FIGURA 6.3. RESULTADOS DE LA TRANSFORMACIÓN	85
FIGURA 6.4. COMPROBACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN	86
FIGURA 6.5. CIRCUITO TI ATPDRAW	86
FIGURA 6.6. CIRCUITO TI SATURABLE	87
FIGURA 6.7. EDITOR DEL TI.....	88
FIGURA 6.8. SATURACIÓN DEL TI.....	88
FIGURA 6.9. TI EN ATPDRAW	89
FIGURA 6.10. CORRIENTE EN EL PRIMARIO (SECUNDARIO DEL TI) PARA FUENTE DE 500V.....	89
FIGURA 6.11. CORRIENTE EN EL SECUNDARIO (PRIMARIO DEL TI) PARA FUENTE DE 500V.....	90
FIGURA 6.12. CORRIENTE EN EL PRIMARIO (SECUNDARIO DEL TI) PARA FUENTE DE 10000V.....	90
FIGURA 6.13. CORRIENTE EN EL SECUNDARIO (PRIMARIO DEL TI) PARA FUENTE DE 10000V.....	90
FIGURA 6.14. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 10 V.....	91
FIGURA 6.15. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 100 V.....	92
FIGURA 6.16. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 400 V.....	92
FIGURA 6.17. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 500 V.....	92
FIGURA 6.18. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 600 V.....	92
FIGURA 6.19. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 700 V.....	93
FIGURA 6.20. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 780 V.....	93
FIGURA 6.21. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 800 V.....	93
FIGURA 6.22. INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 927 V.....	93
FIGURA 6.23. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA GTPPLOT	94
FIGURA 6.24. GRÁFICA DE VALORES EFICACES DE INTENSIDAD PARA TENSIÓN DE 10V.....	95

FIGURA 6.25. GRÁFICA DE VALORES EFICACES DE INTENSIDAD PARA TENSIÓN DE 100V.....	95
FIGURA 6.26. REPRESENTACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN CON EXCEL.....	96
FIGURA 6.27. REPRESENTACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN CON MATLAB.....	97
FIGURA 6.28. CIRCUITO EN ATP MODIFICADO, AÑADIENDO EL MÓDULO DE CÁLCULO DE VALORES EFICACES	97
FIGURA 6.29. VALOR EFICAZ DE INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 10V.....	98
FIGURA 6.30. AMPLIACIÓN DE GRÁFICA DE VALORES EFICACES DE INTENSIDAD PARA FUENTE DE TENSIÓN DE 10V	98
FIGURA 6.31. CARACTERÍSTICA DE EXCITACIÓN OBTENIDA CON LOS RESULTADOS DEL MÓDULO DE VALORES EFICACES.....	99
FIGURA 10.1. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO	108
FIGURA 10.2. DIAGRAMA DE GANTT	109
FIGURA 14.1. EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON LOS RESPECTIVOS VALORES.....	125
FIGURA 14.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE CCVT (TRANSFORMADOR DE TENSIÓN).....	126

13. ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1. VALORES DEL MÓDULO DE TIEMPO INVERSO NORMA IEC 255-3	61
TABLA 4.2. VALORES DEL MÓDULO DE TIEMPO INVERSO NORMA IEEE C37.112	61
TABLA 5.1. RESULTADO FASORES DE TENSIÓN	80
TABLA 6.1. VALORES DEL CIRCUITO TI SATURABLE.....	87
TABLA 6.2. VALORES V_{EF} - I_{EF} PARA LA CURVA DE EXCITACIÓN (MÉTODO 1).....	96
TABLA 6.3. VALORES V_{EF} - I_{EF} PARA LA CURVA DE EXCITACIÓN (MÉTODO 2).....	98
TABLA 13.1. CONFIGURACIÓN DE LA TORRE CON LA LÍNEA DE DOBLE CIRCUITO.....	124
TABLA 13.2. CONFIGURACIÓN DE LA TORRE CON UNA ÚNICA LÍNEA	124
TABLA 13.3. INTENSIDAD-FLUJO PARA EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	125
TABLA 13.4. DATOS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CCVT.....	126

14. APÉNDICE

PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN EL MODELO DE LÍNEA DEL SISTEMA

Los parámetros físicos de los distintos componentes que forman el sistema de la figura 1.1 se van a especificar a continuación. Con esta información se permite al usuario llevar a cabo la simulación transitoria.

La frecuencia utilizada es de 60 Hz.

A.1 Fuentes de tensión ideales

La fuente de tensión S1 (conectada en el nudo 1) y la fuente S3 (conectada en el nudo 3) están modeladas como fuentes reales, esto es, una fuente sinusoidal detrás de una impedancia Thevenin.

A.1.1 Fuente S1 (230kV)

Impedancia de secuencia directa $Z_1=6.1 + j16.7\Omega$

Impedancia de secuencia homopolar $Z_0=2.7 + j8.37\Omega$

A.1.2 Fuente S3 (230kV)

Impedancia de secuencia directa $Z_1=0.69 + j4.12\Omega$

Impedancia de secuencia homopolar $Z_0=0.34 + j4.77\Omega$

A.2 Máquina Síncrona (Fuente S2)

La fuente S2, que está conectada al nudo 4, a través de un transformador elevador se modela como una máquina síncrona. La dinámica de la excitatriz y el rotor no se modelan. Los parámetros de la máquina son:

Tensión nominal: 24 kV

Potencia nominal: 830 MVA

Resistencia de armadura en corriente continua R_a : 0,00199 Ω

Reactancia de secuencia directa X_l : 0,15 pu

Reactancia de secuencia homopolar X_0 : 0.145 pu

Reactancia síncrona de eje directo X_d : 1,89 pu

Reactancia síncrona de eje en cuadratura X_q : 1,8 pu

Reactancia transitoria de eje directo X'_d : 0,23 pu

Reactancia transitoria de eje en cuadratura X'_q : 0,435 pu

Reactancia subtransitoria de eje directo X''_d : 0,1775 pu

Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura X''_q : 0.177 pu

Constante de tiempo transitoria de eje directo a circuito abierto T'_{do} : 4.2s

Constante de tiempo transitoria de eje en cuadratura a circuito abierto T'_{qo} : 0.589s

Constante de tiempo subtransitoria de eje directo a circuito abierto T''_{do} : 0.031s

Constante de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura a circuito abierto T''_{qo} : 0.063s

WR^2 : 678.000 lb-ft²

La máquina real tiene 6 masas. Sin embargo, la inercia individual, amortiguación entre otras especificaciones, no están disponibles, por lo que se modela como una máquina de una sola masa.

Todos los valores de impedancia por unidad están referidos a los valores nominales de la máquina (830 MVA, 24 kV).

Cuando estaban disponibles valores de reactancia tanto saturados como insaturados, se utiliza el promedio de los dos.

A.3 Transformador conectado a la fuente de tensión S2

El transformador tiene una conexión Y – Δ con el neutro de la estrella a tierra. Es un transformador de dos devanados con los siguientes parámetros:

Devanado de alta tensión (primario):

Tensión: 229.893kV

Potencia: 725MVA

Resistencia: 0.1469Ω

Devanado de baja tensión (secundario):

Tensión: 22.8kV

Potencia: 725MVA

Resistencia: 0.0044Ω

% De la corriente de excitación al 100% de la tensión nominal: 0,706

Pérdidas en vacío al 100% de la tensión nominal: 466.303kW

Prueba de cortocircuito:

% Z: 9.21

Pérdidas: 1333.689kW

Se suponen los mismos valores de secuencia directa que de secuencia homopolar.

A.4 Líneas de transporte (230 kV)

En el modelo de estudio de la figura 1.1, hay principalmente tres líneas de transporte de 230 kV. La primera es una línea de circuito doble (dos líneas conectadas en paralelo entre los nudos 1 y 2, “BUS1” y “BUS2”). Una segunda línea que es una ramificación de la línea 1 (la que correspondía a dos líneas conectadas en paralelo) y que termina en el nudo 3 (“BUS3”) y por último la tercera línea conectada entre el nudo 2 (“BUS2”) y el nudo 4 (“BUS4”).

Cada línea es de 72.42km de largo, y hay tres secciones por línea, siendo cada sección de 24.14km de longitud. Esto permite al usuario aplicar fallos en la unión de secciones.

La línea de doble circuito se modela utilizando un modelo lineal de parámetros distribuidos constantes, mientras que las otras dos líneas se modelan con secciones de parámetros concentrados.

El conductor de la línea es un Marigold 1113 Kcmil AA con un diámetro de 1,216 pulgadas y una resistencia de corriente continua de $0.057302\Omega / \text{km}$ a 50°C . Los parámetros de línea se calculan a 60 Hz con una resistividad de la tierra de $50\Omega\text{m}$.

A.4.1 Configuración de la torre con línea de doble circuito (para 230 kV)

Conductor	Separación horizontal de referencia (m)	Altura en la torre (m)	Altura en el tramo medio (m)
1	0.0	30.48	22.25
2	0.0	25.45	17.22
3	0.0	20.42	12.19
4	8.34	20.42	12.19
5	8.34	25.45	17.22
6	8.34	30.48	22.25

Tabla 14.1. Configuración de la torre con la línea de doble circuito

A.4.2 Configuración de la torre para otras líneas de 230 kV

Conductor	Separación horizontal de referencia (m)	Altura en la torre (m)	Altura en el tramo medio (m)
1	0.0	30.48	22.25
2	0.0	25.45	17.22
3	0.0	20.42	12.19

Tabla 14.2. Configuración de la torre con una única línea

A.5 Transformadores de corriente (TC)

Los transformadores de corriente se sitúan dentro de la línea en aquellos puntos donde se va a conectar relés. En la figura 1.1 del documento aparece ilustrada esta especificación.

En la figura que aparece a continuación se muestra el circuito equivalente del TI, con los valores de los diferentes parámetros.

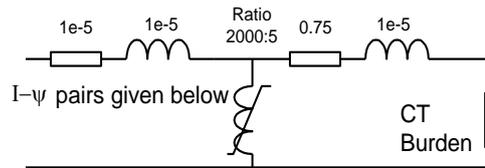


Figura 14.1. Equivalente del transformador de corriente con los respectivos valores

La relación de transformación es 2000:5, la resistencia del conductor del TI es 0.75Ω . La tabla con los valores de flujo y corriente que sirven para determinar la excitación del transformador es la siguiente:

Corriente	Flujo
0.0198	0.2851
0.0281	0.6040
0.0438	1.1141
0.0565	1.5343
0.0694	1.8607
0.1025	2.2771
0.2167	2.6522
0.7002	3.0234
1.0631	3.1098
15.903	3.2261

Tabla 14.3. Intensidad-Flujo para el transformador de corriente

A.6 Transformadores de tensión de acoplamiento capacitivo (CCVT)

A continuación se muestra el equivalente del circuito de transformador de tensión de acoplamiento capacitivo:

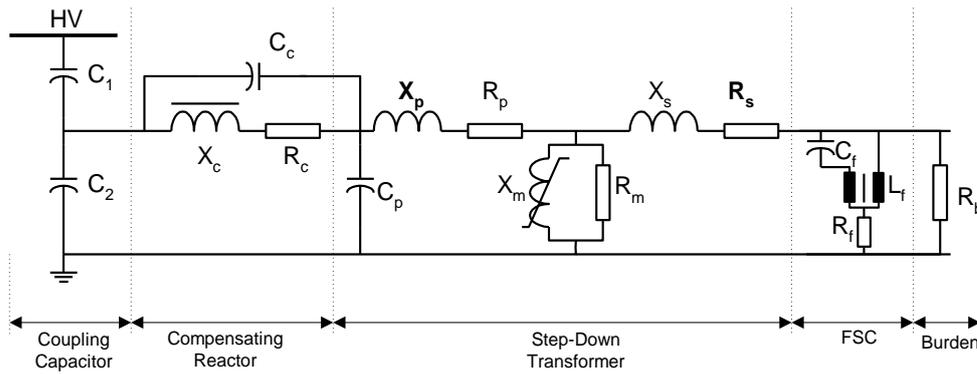


Figura 14.2. Circuito Equivalente de CCVT (Transformador de Tensión)

Condensadores	$C_1 = 2.43 \text{ nF}$, $C_2 = 82 \text{ nF}$
Bobina de compensación	$R_c = 228 \text{ } [\Omega]$, $X_c = 58 \text{ [k}\Omega]$, $C_c = 100 \text{ pF}$
Transformador reductor	$C_p = 150 \text{ pF}$, $R_p = 400 \text{ } [\Omega]$, $X_c = 2997 \text{ } [\Omega]$, $R_s = 0.001 \text{ } [\Omega]$, $X_s = 0.001 \text{ } [\Omega]$, Relación de transformación = 6584/115 Arrollamiento de acoplamiento (pendiente de magnetización: $I = 0.001421 \text{ [A]}$, $\Psi = 13.7867 \text{ [Vs]}$
Circuito de Supresión de Ferresonancia (FSC)	$R_f = 40 \text{ } [\Omega]$, $C_f = 9.6 \text{ } [\mu\text{F}]$

Tabla 14.4. Datos del circuito equivalente CCVT