



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/18  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

## **GRUPO – V**

### **GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

#### **IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE UM RELÉ DE DISTANCIA SUB-CICLO**

**Roberto Cimadevilla (\*)**  
**ZIV**

**Izaskun García**  
**ZIV**

## **RESUMEN**

Los relés de distancia aplicados en líneas críticas de muy alta tensión requieren tiempos de disparo por debajo del ciclo, con el fin de acelerar al máximo el despeje de faltas y no poner en riesgo la estabilidad del sistema. Para conseguir dichos tiempos los filtros empleados deben utilizar ventanas de cálculo inferiores al ciclo, lo cual los hace menos precisos que los filtros convencionales de ciclo completo. Debido a ello, el alcance de las unidades sub-ciclo debe ser siempre inferior al 100% del alcance de la zona de distancia que aceleran. A la hora de definir este alcance es necesario tener en cuenta todos los fenómenos que pueden poner en riesgo la seguridad: componente exponencial de las intensidades y tensiones de falta, oscilaciones en circuitos RLC, transitorios producidos por transformadores de tensión capacitivos, saturación de transformadores de intensidad, etc. Este artículo explica, por una parte, cada uno de los fenómenos antes citados, describiendo su origen y las distorsiones que generan sobre una onda senoidal de frecuencia nominal. Por otra parte el trabajo analiza la influencia de los citados fenómenos sobre un filtrado basado en DFT de medio ciclo complementada ésta por un filtro paso banda de cuarto de ciclo.

## **PALABRAS-CLAVE**

Relé de distancia sub-ciclo, estabilidad, DFT, componente exponencial, oscilaciones RLC, transformador de tensión capacitivo, saturación de transformadores de intensidad

### **1.0 - INTRODUCCIÓN**

Las restricciones medioambientales están limitando la expansión de la red de transporte, a la vez que, alejan, cada vez más, la generación del consumo final. Esta situación hace que los sistemas de hoy en día se encuentren más debilitados y sobrecargados, lo que ha reducido los márgenes de estabilidad. Como se verá a continuación, uno de los factores que permite mejorar la estabilidad del sistema es el despeje rápido de las faltas. Es por ello que cada vez más compañías eléctricas requieren en sus relés de línea tiempos de disparo sub-ciclo.

El filtro más comúnmente empleado en los relés de protección es la DFT de ciclo completo. Se eligió una ventana de tiempo de un ciclo por su buen compromiso entre seguridad y obediencia. Una reducción en el tiempo de dicha ventana penaliza la seguridad, que deberá compensarse con una reducción en el porcentaje de línea cubierto por la zona "rápida". Este artículo describe el algoritmo implementado en un relé de distancia sub-ciclo y los fenómenos considerados a la hora de diseñar y validar dicho algoritmo.

### **2.0 - NECESIDAD DE TIEMPOS DE DISPARO SUBCICLO**

La intensidad de falta genera esfuerzos térmicos y mecánicos que pueden producir daños en diversos elementos del sistema eléctrico tales como transformadores, conductores, aisladores, cables de guarda, puestas a tierra,

pantallas y aislamiento de cables, etc. Todos estos elementos poseen curvas de tolerancia  $I^2t$ . Cuanto antes se despeje la falta menor será el daño sobre los citados elementos. No obstante la protección de dichos elementos no requiere, normalmente, tiempos de disparo sub-ciclo. La necesidad de éstos viene dada, fundamentalmente, por problemas de estabilidad del sistema. Veamos cómo influye el tiempo de despeje de una falta en la estabilidad del sistema.

La potencia transferida entre dos generadores A y B sigue la siguiente fórmula:

$$P = \frac{E_A E_B}{Z_T} \sin \delta, \text{ donde } E_A \text{ y } E_B \text{ son las tensiones de salida de ambos generadores, } Z_T \text{ es la impedancia de transferencia que existe entre ambas máquinas y } \delta \text{ el ángulo entre tensiones.}$$

Suponiendo que  $E_A$ ,  $E_B$  y  $Z_T$  son constantes, la potencia seguirá la curva azul representada en la figura 1. Cuando se produce una falta en la línea que interconecta los dos generadores, la impedancia de transferencia aumentará, lo que modificará la curva  $P - \delta$ , que pasará de ser la curva azul (curva "sin falta") a ser la curva verde (curva "con falta").

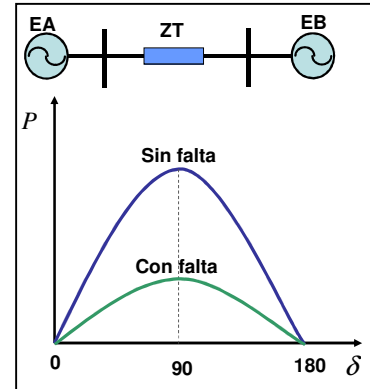
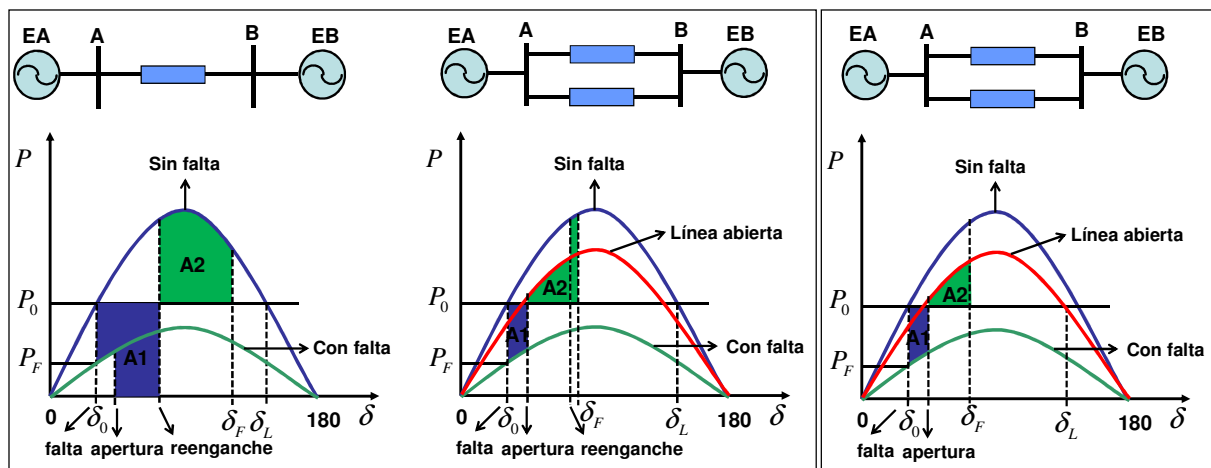


FIGURA 1 - Potencia transferida entre dos sistemas con y sin falta en la línea de interconexión



a. Circuito simple con reenganche b. Circuito doble con reenganche c. Circuito doble sin reenganche

FIGURA 2 – Criterio de igualdad de áreas aplicado en un caso de falta

Supongamos que el generador en A se encuentra en una condición de equilibrio, suministrando una potencia eléctrica  $P_0$ , igual a la potencia mecánica de entrada, existiendo un ángulo entre las fuentes  $E_A$  y  $E_B$  igual a  $\delta_0$  (ver figura 2.a). Si se produce una falta en la línea que interconecta ambos generadores, la potencia transferida pasará a ser  $P_F$ . Considerando que la potencia mecánica de entrada no varía durante la falta, dado que el sistema de control encargado de modificar dicha potencia tiene un tiempo de reacción mayor que la duración del defecto, se producirá un exceso de potencia mecánica, lo que acelerará el generador en A, que pasará a girar a una velocidad mayor que la de sincronismo, aumentando el ángulo  $\delta$ , al girar el fasor  $E_A$  más rápido que el fasor  $E_B$ . En el momento en el que las protecciones disparan y los interruptores en ambos extremos de la línea abren, la potencia transferida a través de la línea será nula, hasta el momento del reenganche, punto en el cual se vuelve a la curva  $P - \delta$  inicial. En ese momento la potencia eléctrica será mayor que la potencia mecánica de entrada al generador, lo que creará un par decelerador. No obstante, el ángulo  $\delta$  no empezará a decrecer de forma inmediata, dado que en el momento del reenganche el generador A estaba girando a una velocidad mayor que la de sincronismo, lo que hará que  $\delta$  siga creciendo. Cuando la velocidad del generador A iguale la velocidad del generador B,  $\delta$  empezará a decrecer. Ese punto, con valor  $\delta_F$ , vendrá fijado por el criterio de igualdad de áreas, cuando el área  $A_1$ , que representa la energía ganada durante la aceleración del generador, iguale a  $A_2$ , que representa la energía perdida durante la deceleración. Si el ángulo  $\delta_F$  es mayor que el ángulo  $\delta_L$  (límite de estabilidad) el ángulo  $\delta$  ya no podrá decrecer, dado que el par decelerador que teníamos pasará a ser acelerador de nuevo, al ser la potencia eléctrica menor que la mecánica cuando  $\delta > \delta_L$ . En este caso el sistema se volverá inestable. Si  $\delta_F < \delta_L$  el ángulo  $\delta$  realizará una serie de oscilaciones en torno a  $\delta_0$  hasta alcanzar de nuevo dicho valor inicial. Claramente se puede deducir que cuanto antes se despeje la falta y se reenganche la misma, menor será el área  $A_1$  y mayor será el área  $A_2$ , por lo que más estable será el sistema.

La figura 2.b representa el fenómeno antes explicado suponiendo que los generadores A y B están interconectados por dos líneas paralelas, produciéndose la falta en una de ellas. En este caso, la apertura del interruptor en ambos extremos de la línea en falta desplaza el punto  $P - \delta$  a la curva roja, que se encuentra por encima de la curva

asociada a la condición de falta. El reenganche lleva el punto P-  $\delta$  a la curva inicial (curva azul). Como se puede observar, en este segundo caso el ángulo  $\delta F$  es bastante menor que en el primer caso.

En ambos casos hemos visto que la estabilidad del sistema no solo depende del tiempo de despeje de la falta sino del tiempo de reenganche, que suele ser bastante mayor que el tiempo de disparo (valores típicos de 0.5 s para un reenganche trifásico). De ahí que una diferencia en el tiempo de disparo de medio ciclo no tenga prácticamente influencia en la estabilidad. Sin embargo, si los generadores A y B están interconectados por más de una línea, el sistema puede ser estable aunque no se reenganche. En la figura 2.c el área A2 es mayor que el área A1. En este último caso, el tiempo de despeje de la falta sí puede llegar a ser crítico (por ejemplo si el valor máximo de la curva roja es cercano a P0), requiriéndose tiempos sub-ciclo.

### 3.0 - FILTROS SUBCICLO

Los filtros sub-ciclo deben utilizar ventanas de cálculo inferiores al ciclo, lo que los hace más imprecisos que los filtros convencionales de ciclo completo. Es por ello que la característica asociada a las unidades sub-ciclo debe estar ligeramente comprimida y no puede cubrir el 100% de la zona a acelerar. La figura 3 muestra un ejemplo de características Mho y cuadrilateral sub-ciclo y convencionales.

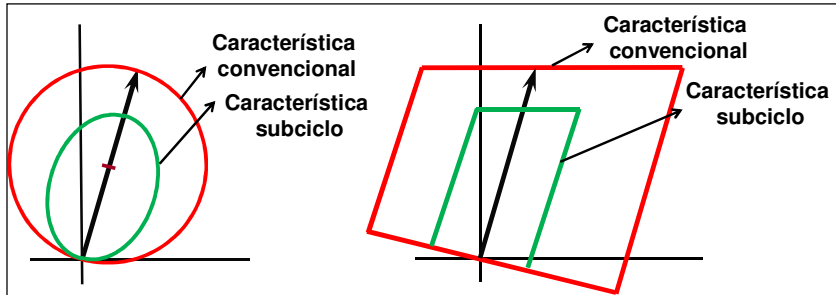


FIGURA 3 - Características convencional y subciclo asociadas a una misma zona

Los requerimientos de tiempos sub-ciclo son, normalmente, para faltas sin resistencia de falta, que son las más perjudiciales para la estabilidad del sistema, y localizadas hasta un porcentaje de la zona 1 (del 50% al 80%, dependiendo de la compañía eléctrica).

### 3.1 DFT

El filtro más utilizado en relés de protección es la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Dada una señal senoidal  $x(t)$ , muestreada  $N$  veces por ciclo, representada por los valores  $x_i$  ( $i=0, \dots, N-1$ ), la DFT permite obtener la parte real e imaginaria del fasor  $X_1$ , correspondiente a la componente fundamental de la onda, de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\text{Re}X_1 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (1)$$

$$\text{Im}X_1 = -\frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (2)$$

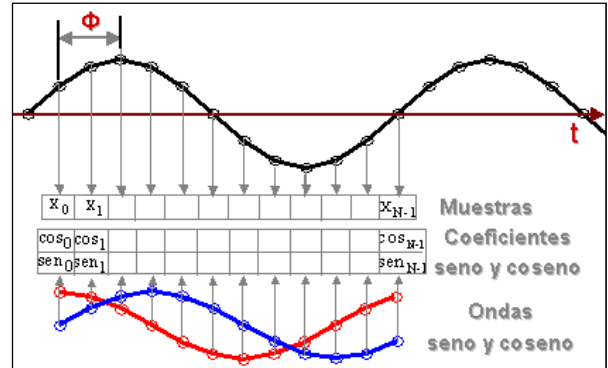


FIGURA 4 - Onda muestreada y ondas seno y coseno de la DFT

En la figura 4 se representa la onda muestreada, y las ondas seno y coseno empleadas en el cálculo de la DFT,  $\sin(2\pi i/N)$  y  $\cos(2\pi i/N)$ , con  $i=0, \dots, N-1$ . Se ha considerado una ventana de cálculo de un ciclo.

La DFT implementada en los relés de protección utiliza, generalmente, ventanas de un ciclo, aunque también es posible diseñarla con ventanas menores que el ciclo. La DFT con ventanas de medio ciclo se calcula mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{Re}X_1 = \frac{4}{N} \cdot \sum_{i=0}^{\frac{N-1}{2}} x_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (1); \quad \text{Im}X_1 = -\frac{4}{N} \cdot \sum_{i=0}^{\frac{N-1}{2}} x_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right)$$

En el relé de distancia descrito en este trabajo se incluyó tanto una DFT de ciclo completo como de medio ciclo. Esta última presenta una respuesta en frecuencia peor que la correspondiente a la DFT de ciclo completo. La figura 5.a muestra la respuesta en frecuencia de ambas DFT. Como se puede observar, la DFT de medio ciclo no filtra totalmente la componente de continua ni los armónicos pares.

Para eliminar la componente de continua se utilizó un filtro diferenciador. Teniendo en cuenta la amplificación de las altas frecuencias que genera dicho filtro, se incluyó en serie un filtro paso bajo. El retraso total generado por ambos filtros es de un cuarto de ciclo. La figura 5.b muestra la respuesta en frecuencia de ambas DFT complementadas por el filtro paso banda antes citado. El complemento de dicho filtro sobre la DFT de ciclo completo se incluyó con el fin de mejorar el comportamiento con componentes exponenciales (ver siguiente punto).

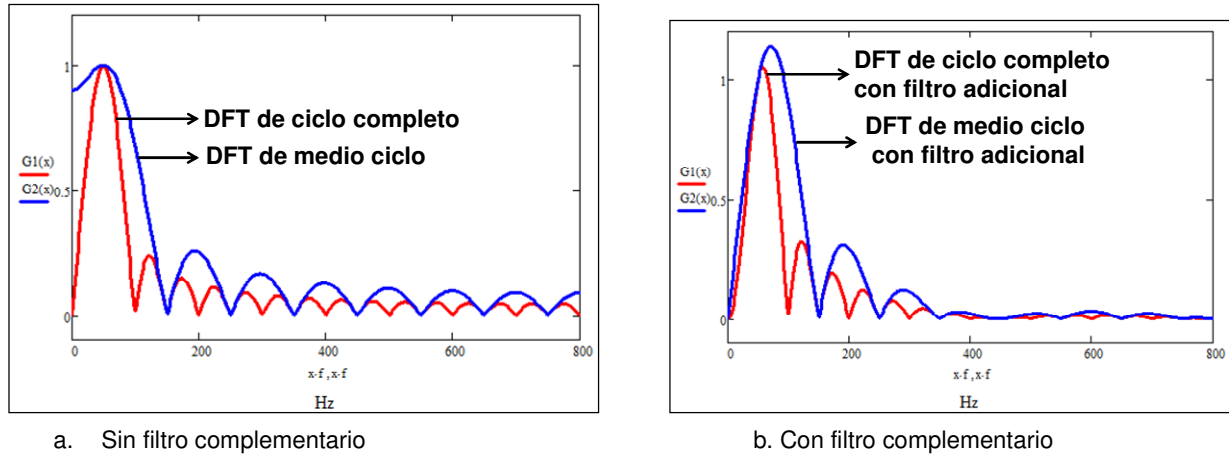


Fig. 5 - Respuesta en frecuencia de la DFT de medio ciclo y de ciclo completo

#### 4.0 - FENÓMENOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UN FILTRO SUB-CICLO

##### 4.1 Componente exponencial de la intensidad

Los circuitos en falta se modelizan normalmente como circuitos RL, como el representado en la figura 6. En dicho circuito se cumple la siguiente ecuación diferencial:  $E = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$

Cuando el switch S se cierra, simulando la aparición de la falta, se produce un régimen transitorio, siguiendo la intensidad de falta la siguiente fórmula:

$$i(t) = I \cdot \left[ \sin(\omega t + \lambda - \theta) - e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\lambda - \theta) \right],$$

donde:  $I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ ,  $\theta = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$  y  $\tau = \frac{L}{R}$

Cualquier cambio brusco en la intensidad, impedido por la inductancia del sistema, es absorbido por una componente de continua que se amortigua en el tiempo como consecuencia de la resistencia del sistema. En la figura 7 se puede observar la componente estacionaria de la intensidad de falta (onda azul), la componente exponencial (onda verde) y la intensidad total (onda roja).

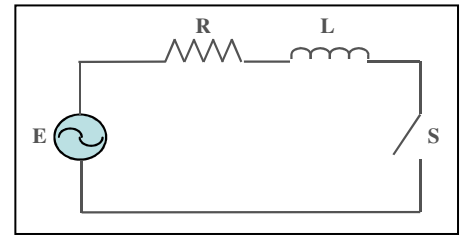


FIGURA 6 - Circuito RL

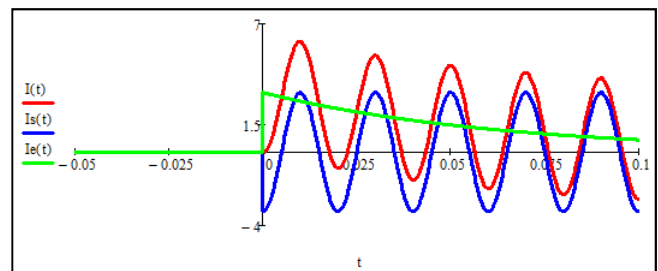


FIGURA 7 - Intensidad de falta con sus componentes estacionaria (senoide) y transitoria (exponencial)

La DFT de medio ciclo, presenta grandes problemas para filtrar la componente exponencial de la falta. La figura 8.b muestra el módulo de la componente fundamental de la intensidad representada en la figura 8.a. Dicho módulo se obtuvo con una DFT de medio ciclo y de ciclo completo con y sin el filtro paso banda complementario citado en el punto 3.1. Como se puede observar, la estimación efectuada por la DFT de medio ciclo sola (la\_sf\_medio) presenta un gran error. Cabe destacar que la DFT de ciclo completo, a pesar de atenuar totalmente la componente de 0 Hz, presenta un pequeño error ante componentes exponenciales (la\_sf\_completo). De ahí que el filtro complementario se aplique antes de calcular ambas DFTs. Como se puede observar, la estimación realizada con la previa aplicación del citado filtro es mucho más exacta (la\_cf\_medio e la\_cf\_completo).

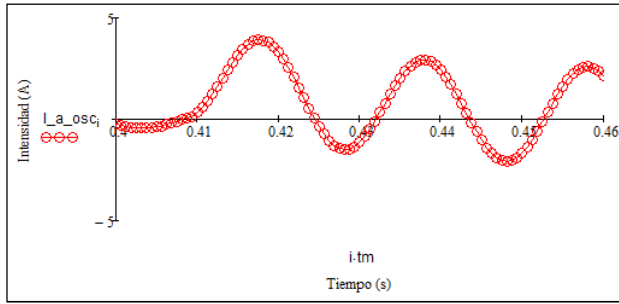


FIGURA 8.a - Intensidad con exponencial

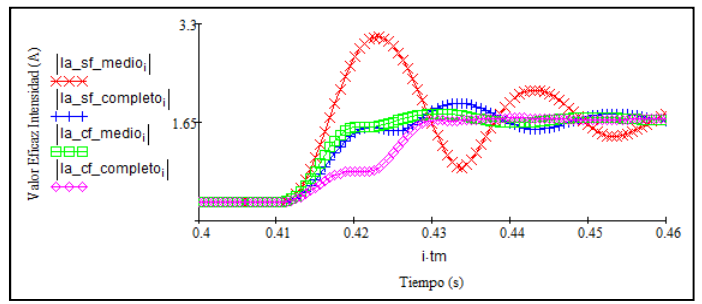


FIGURA 8.b - Magnitud obtenida con DFT de ciclo completo y medio ciclo (medio), con (cf) y sin filtro (sf) complementario

#### 4.2 Componente exponencial de la tensión

En el circuito de la figura 6,  $L = L_L + L_S$  y  $R = R_L + R_S$ , donde los subíndices L y S representan la línea y la fuente, respectivamente. La tensión que mide un relé será:  $v = R_L \cdot i + L_L \cdot \frac{di}{dt}$ . Sustituyendo i en dicha ecuación se tiene:

$$v = I \cdot \left[ \sin(\omega t + \lambda - \theta) - e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\lambda - \theta) \right] \cdot R_L + I \cdot \left[ \omega \cdot \cos(\omega t + \lambda - \theta) + \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\lambda - \theta) \right] \cdot L_L$$

$$v = I \cdot \left[ \sin(\omega t + \lambda - \theta) \right] \cdot R_L + I \cdot \left[ \omega \cdot \cos(\omega t + \lambda - \theta) \right] \cdot L_L + e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\lambda - \theta) \cdot \left( \frac{1}{\tau} L_L - R_L \right)$$

Dado que  $\tau = \frac{L}{R} = \frac{L_S + L_L}{R_S + R_L}$ , si el sistema es homogéneo, es decir si  $\frac{L_S}{R_S} = \frac{L_L}{R_L}$ ,  $\tau = \frac{L_L}{R_L}$ , por lo que v será:

$v = I \cdot \left[ \sin(\omega t + \lambda - \theta) \right] \cdot R_L + I \cdot \left[ \omega \cdot \cos(\omega t + \lambda - \theta) \right] \cdot L_L$  y, por lo tanto, no existirá componente exponencial en la tensión.

Teniendo en cuenta la posibilidad de que el sistema sea no homogéneo, el filtro paso banda descrito en el punto 3.1 también se aplicó en la medida de tensión.

#### 4.3 Oscilaciones en circuitos RLC

En el circuito de la figura 6 no se ha considerado la capacidad del sistema, valor no despreciable si existen líneas largas y cables. El circuito en falta a analizar sería el primer circuito representado en la figura 9. Este circuito se puede resolver por el principio de superposición, descomponiéndolo en circuito de prefalta (segundo circuito de la figura 9) y circuito de falta pura (tercer circuito de la figura 9). El circuito de falta pura será un circuito RLC serie, que seguirá la ecuación diferencial genérica  $E = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt$ ,

cuya solución será:  $i = V_p \cdot \left( \omega C \sin \omega t + \frac{1}{\sqrt{L/C}} e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \right)$

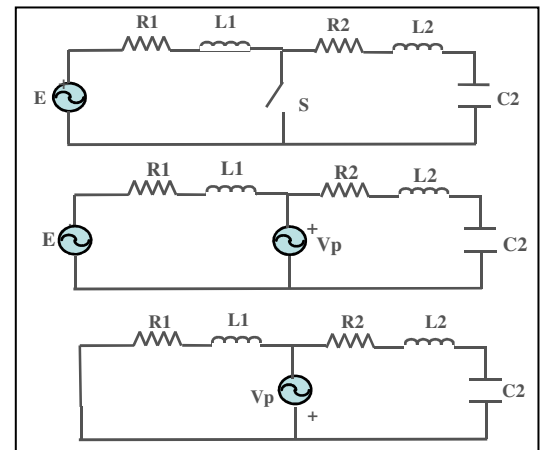


FIGURA 9 - Circuito RLC de falta, prefalta y falta pura

La intensidad i constará de una componente estacionaria y una componente transitoria senoidal que se va amortiguando. Teniendo en cuenta los valores LC de los sistemas eléctricos, la frecuencia de la componente oscilatoria suele estar por encima de los 300 Hz, por lo que su filtrado no resulta difícil (ver figura 5.b). No obstante en sistemas con una longitud de cable subterráneo elevada, dicha frecuencia puede ser menor [1].

La figura 9.a muestra la tensión medida en una falta producida en una línea de 400 kV. La medida del módulo de la tensión con DFT de medio ciclo y ciclo completo, con y sin filtro adicional, se muestra en la figura 9.b. El módulo estimado por la DFT complementada con filtro paso banda presenta un error pequeño.

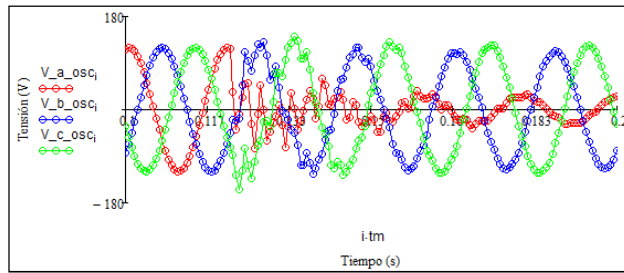


FIGURA 9.a - Tensión de falta en línea de 400 kV

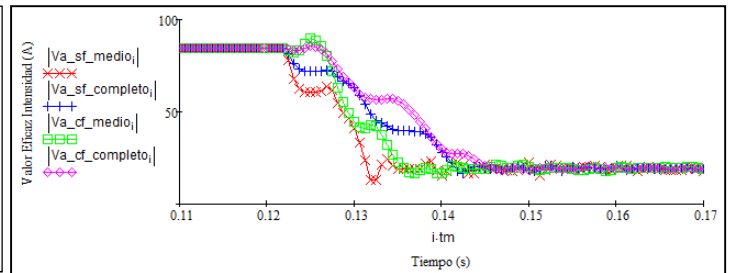


FIGURA 9.b - Módulo de la tensión medido con DFT de ciclo completo y de medio ciclo, con (cf) y sin filtro (sf) adicional

#### 4.4 Transitorios con Transformadores de Tensión Capacitivos (TTC)

Los TTC se utilizan mucho en niveles de alta y muy alta tensión por varios motivos: son más económicos que los transformadores inductivos para los citados niveles de tensión, presentan una precisión en condiciones estáticas adecuada y permiten el acoplamiento de señales PLC.

La figura 10 representa el circuito equivalente de un TTC. El divisor capacitivo, formado por las capacidades  $C_1$  y  $C_2$ , reduce la tensión primaria a un valor intermedio, del orden de 5 – 20 kV. La inductancia  $L$  está sintonizada, a frecuencia nominal, para cancelar las capacidades  $C_1$  y  $C_2$  y, de esa forma, anular cualquier desfase entre primario y secundario. El transformador inductivo intermedio transforma la tensión intermedia en una tensión secundaria. El filtro incluido tiene la finalidad de eliminar posibles ferorresonancias, dado que el circuito de un TTC es muy proclive a dichos fenómenos, al incluir una inductancia no lineal (transformador intermedio), un condensador y tener baja carga. Existen dos tipos de filtros: activo (tipo 1), basado en un circuito serie-paralelo RLC y pasivo (tipo 2), basado en un circuito RL serie.

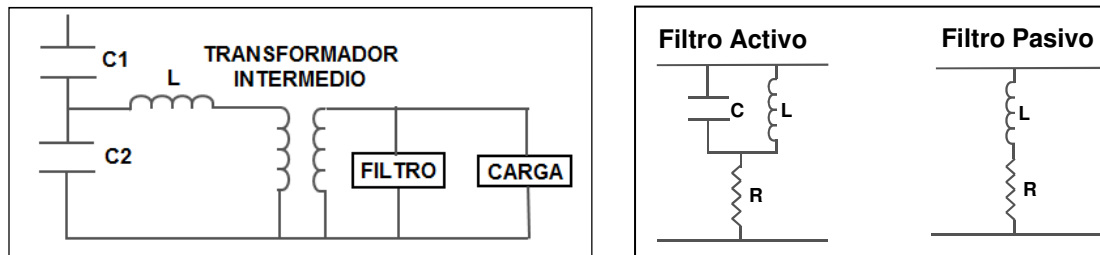


FIGURA. 10 - Circuito equivalente de un TTC

Dado que la energía acumulada en las bobinas y los condensadores no cambia de forma instantánea, cuando se produce una falta, existirá un régimen transitorio durante el cual la tensión secundaria no seguirá fielmente a la tensión primaria. Los fenómenos transitorios dependen básicamente de los siguientes factores [2]:

- **Ángulo de incidencia de la falta:** la constante de tiempo de descarga del condensador es bastante mayor que la de descarga de la bobina por lo que el caso más desfavorable se producirá cuando la energía en el condensador sea máxima, es decir en el paso por cero de la tensión.
- **Valor de la capacidad:** cuanto mayor es la capacidad del TTC menor es la reactancia capacitiva por lo que, para un valor fijo de la intensidad en la carga, menor es la caída de tensión en la capacidad y, por lo tanto, menor es la energía acumulada. Cabe destacar que, aunque el transitorio generado es menor, su constante de tiempo ( $RC$ ) es mayor.
- **Relación del transformador intermedio:** cuanto mayor sea ésta menor será la intensidad primaria para una intensidad secundaria constante, lo que generará una menor caída de tensión en la capacidad y, por lo tanto, un menor transitorio.
- **Tipo de carga:** cuando el TTC está poco cargado la intensidad primaria será pequeña por lo que la energía acumulada en la bobina y el condensador y, por lo tanto, el transitorio serán pequeños. Cuando la falta se produce en el valor máximo de la tensión el transitorio será de alta frecuencia con valores del orden de 600 a 4000 Hz. Cuando la falta se produce en el paso por cero se generará un transitorio de baja frecuencia, del orden de 2 a 15 Hz. Cuando mayor es la carga, mayor es la energía acumulada en la bobina y el condensador del TTC y, por lo tanto, mayor es el transitorio. Si la falta se produce en el valor máximo de la tensión y la carga es resistiva, el transitorio de alta frecuencia se amortiguará rápidamente. Si la falta se produce en el paso por cero, la resistencia tenderá a alargar el transitorio de baja frecuencia. Una carga inductiva afectará negativamente al transitorio, como consecuencia de la energía acumulada en la bobina. Este tipo de cargas genera transitorios de frecuencias cercanas a la nominal, difíciles de filtrar. No obstante, la carga de los relés digitales suele ser resistiva y de bajo valor.
- **Tipo de filtro anti-ferorresonancia:** el filtro activo afecta negativamente al transitorio, dado que existirá, en el momento de la falta, una energía acumulada en su bobina y condensador, que deberá descargarse. Este filtro puede generar componentes de frecuencia cercanas a la nominal. El filtro pasivo, afecta en



menor medida al transitorio, dado que no contiene elementos acumuladores de energía. La mayoría de los TTC de hoy en día incluyen filtros pasivos.

- **Tensión de falta:** cuanto menor es la tensión de la falta, mayor es el transitorio generado. La peor situación se dará para faltas cercanas al límite de la zona 1 que tengan tensión baja. Dicha situación ocurrirá para altos valores de SIR (System Impedance Ratio)= $Z_S/Z_L$ , donde  $Z_S$  es la impedancia de fuente y  $Z_L$  la impedancia de línea.

El filtro citado en el punto 3.1 permitirá eliminar adecuadamente las componentes de 2-15 Hz y de 600-4000 Hz. La figura 11.a muestra la tensión generada durante una falta, utilizando un modelo de TTC con filtro antiferroresonancia pasivo. Como se puede ver, la tensión presenta una componente exponencial. La figura 11.b muestra la respuesta de la DFT de medio y de ciclo completo con y sin el filtro complementario. Como se puede observar, la aplicación del filtro adicional permite realizar una medida correcta del módulo, sobre todo por lo que respecta a la DFT de medio ciclo.

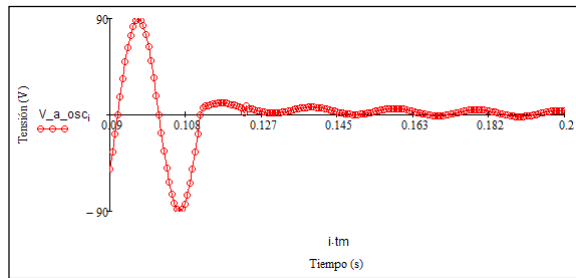


FIGURA 11.a - Tensión de falta en línea de 400 kV

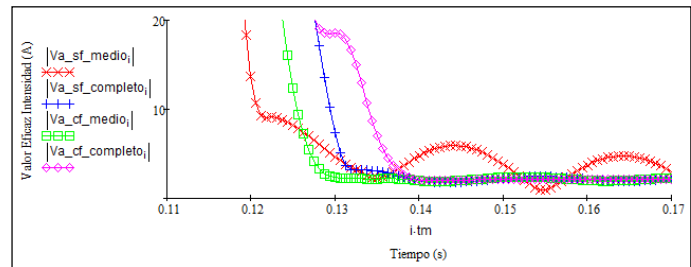


FIGURA 11.b - Módulo de la tensión medido con DFT de ciclo completo y de medio ciclo con (cf) y sin filtro (sf) adicional

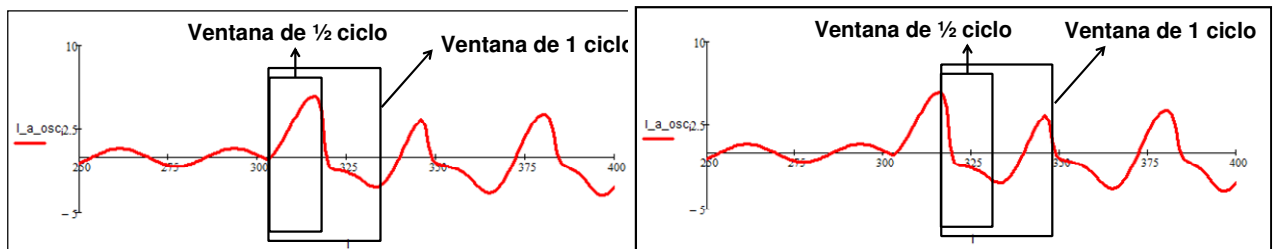
Como se ha comentado, una carga inductiva o un filtro antiferroresonancia activo pueden, en determinadas condiciones, generar transitorios de frecuencia cercana a la nominal. En ese caso es necesario tomar medidas adicionales al filtrado descrito. El algoritmo implementado en el relé de distancia al que se refiere este trabajo mide el SIR y comprime la característica de zona 1 cuando detecta valores elevados. De esa forma no penaliza los tiempos de disparo para faltas cercanas al extremo local. El SIR se mide con la siguiente fórmula:

$$SIR = \frac{(V1 - V1_p)}{(I1 - I1_p)} \cdot \frac{ZL}{ZL1}$$

donde  $V1$  e  $I1$  representan la tensión e intensidad de secuencia directa de falta y  $V1_p$  e  $I1_p$  representan la tensión e intensidad de secuencia directa de prefalta.

#### 4.5 Saturación de transformadores de intensidad (TI)

Las unidades de distancia rápidas, basadas en ventanas inferiores al ciclo, incrementan la obediencia en condiciones de saturación de un TI, dado que requieren tiempos libres de saturación menores, lo cual permite reducir la potencia del TI, con el supuesto ahorro de coste. La figura 12.a representa una onda de intensidad en la que se ha producido la saturación del TI. Con una ventana de cálculo de medio ciclo la unidad de distancia calculará un valor eficaz de intensidad más cercano al teórico (si no se hubiera saturado el TI) que con una ventana de ciclo completo y por lo tanto permitirá "ver" mejor la falta. No obstante, las ventanas más cortas de un ciclo también se verán más afectadas por los periodos de saturación que las ventanas de ciclo completo. La figura 12.b muestra como la ventana de medio ciclo tiene un momento en el que abarca únicamente la zona saturada. En ese caso el error en la medida es mayor. Para evitar sobrealcances de la unidad rápida de distancia en condiciones de saturación se implementó el detector de saturación descrito en la referencia [3]. La activación de dicho detector, basado en la derivada de la intensidad, producirá una compresión de la característica de distancia, reduciendo especialmente el alcance de los limitadores resistivos: la saturación tiende a adelantar la fase del fasor de intensidad, lo que tiende a reducir el ángulo de la impedancia medida, acercando ésta a la línea de reactancia de una característica cuadrilateral (ver figura 13).



a. Ventana de medio ciclo en zona sin saturar  
FIGURA 12 - Onda de intensidad con TI saturado

b. Ventana de medio ciclo en zona saturada

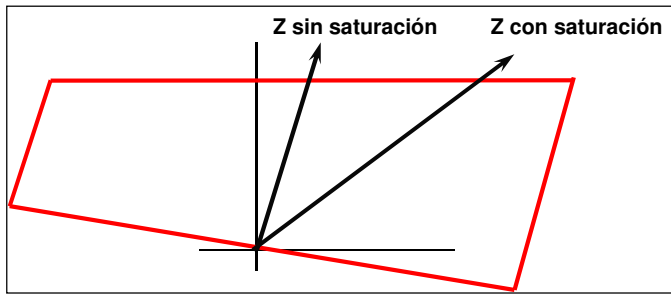


FIGURA 13 - Impedancia medida con y sin saturación del TI

## 5.0 - SALIDAS RÁPIDAS DE ESTADO SÓLIDO

La operación sub-ciclo requiere el uso de salidas de disparo rápidas, con tiempos inferiores al ms y que permitan operar directamente sobre la bobina del interruptor, sin necesidad de emplear relés repetidores. En el relé de distancia citado en este trabajo se implementaron salidas de estado sólido, de tipo IGBT, que proporcionan tiempos de operación del orden de 50  $\mu$ s y una capacidad de corte de 10 A con constantes L/R de 40 ms. Dichas salidas, al no incorporar partes móviles no generan arco, mejorando la capacidad de cierre y apertura con respecto a una salida electromecánica.

## 6.0 - TIEMPOS DE DISPARO

La figura 14 muestra los tiempos de disparo registrados por el relé de distancia en el que se implementó la unidad sub-ciclo. Como se puede observar éstos son menores que el ciclo para faltas hasta un 80% de la zona 1.

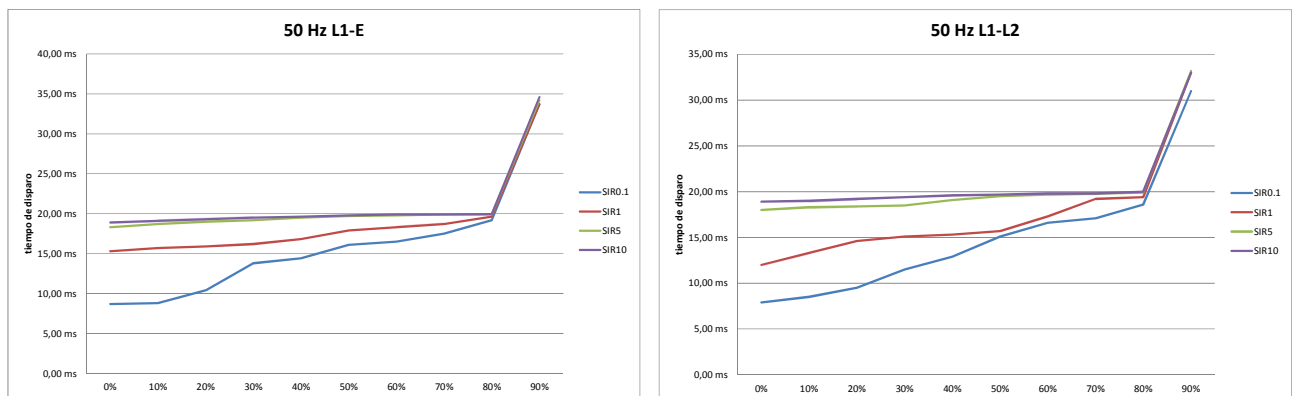


FIGURA 14 - Tiempos de disparo en función del SIR y de la localización de la falta

## 7.0 - CONCLUSIONES

- En sistemas de muy alta tensión se requieren tiempos de disparo subciclo para evitar daños en equipos y conductores y, sobre todo, para mantener la estabilidad
- Los disparos sub-ciclo requieren filtros con ventanas inferiores al ciclo que presentar peor precisión que los filtros convencionales
- Las unidades basadas en filtros sub-ciclo no pueden cubrir el 100% de la zona
- El tipo de filtrado seleccionado permite un disparo sub-ciclo para faltas hasta el 80% de la zona 1, manteniendo la seguridad ante faltas con componente exponencial en la intensidad y en la tensión y con componentes oscilatorias.
- Para TTCs con filtro antiferroresonancia activo se implementó un algoritmo de compresión de la característica de distancia basado en la medida del SIR
- Las unidades rápidas de distancia permiten relajar los requerimientos del TI al mejorar la obediencia. Para mantener la seguridad se implementó un detector de saturación que permite reducir el alcance resistivo

## 8.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yoshihide Hase "Handbook of Power System Engineering", Wiley 2007
- [2] A. Sweetana, "Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 5, September 1971, pp.1989–2001.
- [3] R. Cimadevilla, "Nuevas Unidades Incorporadas en Protecciones Diferenciales", STPC, Recife, Octubre 2010
- [4] Manual de instrucciones. ZIV Protección de transformador Modelo ZLV, Zamudio (España), Referencia LZLV1111Av05



## 9.0 - DATOS BIOGRÁFICOS

**Roberto Cimadevilla** se graduó en Ingeniería Eléctrica en la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Gijón España, en 2001. Posteriormente obtuvo un master en “Análisis, Simulación y Gestión de Sistemas Eléctricos” en la Universidad del País Vasco. Empezó su carrera laboral como ingeniero de protecciones en Red Eléctrica de España. En 2003 Roberto comenzó a trabajar en ZIV como ingeniero de aplicación, siendo el responsable del desarrollo de varios equipos de protección y control, incluyendo protección de distancia, diferencial de transformador y diferencial de línea. Desde 2011 hasta 2013 Roberto trabajó como director del departamento de Ingeniería de Aplicación de la división ZIV GRID AUTOMATION. En 2013 fue promocionado a director técnico de la citada división. Roberto ha escrito más de 20 artículos, todos ellos presentados en conferencias internacionales, es miembro de IEEE y ha participado en varios grupos de trabajo de CIGRE / CIRED.